

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
«Пермский национальный исследовательский политехнический университет»

На правах рукописи

Кухарчук Ирина Борисовна

**АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ ПОДДЕРЖКА ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ ПРИ
УПРАВЛЕНИИ ПРОЦЕССОМ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ С
УЧЕТОМ ДИНАМИКИ ИЗМЕНЕНИЯ НАГРУЗКИ**

2.3.3. Автоматизация и управление технологическими процессами и
производствами

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
доктор технических наук, профессор
Труфанова Наталия Михайловна

Пермь – 2024

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	5
Глава 1. Общие положения и состояние проблемы	12
1.1 Особенности современных распределительных сетей	12
1.2 Способы прокладки кабельных линий	13
1.3 Влияние материала изоляции на значение длительно допустимого тока ..	16
1.4 Анализ существующих методик оценки температурного состояния кабельных линий и определения длительно допустимой токовой нагрузки.....	19
1.5 Анализ подходов в задачах управления распределением электроэнергии в кабельных линиях	28
Выводы по главе.....	34
Глава 2. Разработка концептуальной модели системы поддержки принятия решений при управлении распределением электроэнергии	36
2.1 Процесс распределения электроэнергии как объект управления	36
2.2 Описание автоматизированной системы управления распределением электроэнергии в кабельных линиях.....	38
2.3 Постановка задачи поиска оптимального значения токовых нагрузок.....	40
2.4 Концептуальная модель системы поддержки принятия решений при управлении распределением электроэнергии	42
Выводы по главе.....	44
Глава 3. Математическое моделирование и численное исследование процесса передачи электроэнергии в кабельном блоке	46
3.1 Математическая модель процессов тепломассопереноса в кабельном блоке.	46
3.1.1 Описание объекта моделирования	46
3.1.2 Постановка математической модели.....	49
3.1.3 Численная реализация модели.....	52
3.1.4 Проверка адекватности счетной модели	60
3.2 Оценка влияния условий эксплуатации кабельной линии на величину длительно допустимого тока.....	64

3.3 Анализ нестационарного режима работы кабельных линий.....	71
3.4 Параметрическая модель температурных и токовых режимов в кабельном блоке	75
Выводы по главе.....	79
Глава 4. Метод и алгоритмы принятия решений при управлении процессом распределения электрической энергии в кабельном блоке в условиях изменения нагрузки	80
4.1 Определение максимально возможного значения тока вновь вводимой линии	81
4.2 Определение управляющих воздействий для сохранения допустимого температурного режима в условиях планового увеличения нагрузки линий	82
4.3 Определение управляющих воздействий для сохранения допустимого температурного режима кабельного блока в условиях вынужденного увеличения нагрузки.....	89
Выводы по главе.....	92
ГЛАВА 5. Результаты внедрения моделей и алгоритмов принятия решений при управлении процессом распределения электроэнергии.....	94
5.1 Программная реализация алгоритмов поиска оптимального режима работы кабельного блока в условиях вынужденного увеличения нагрузки.....	94
5.1.1 Характеристики программного комплекса «Выбор оптимального режима нагрузки кабельного блока».....	95
5.1.2 Описание программного комплекса «Выбор оптимального режима нагрузки кабельного блока».....	95
5.1.3 Демонстрационный пример использования системы поддержки принятия решений при распределении нагрузки в кабельном блоке.....	101
5.2 Внедрение моделей и методов принятия решений в автоматизированную систему управления распределением электроэнергии в кабельном блоке.....	105
5.2.1 Описание объекта внедрения.....	105
5.2.2 Результаты внедрения.....	106
Выводы по главе.....	109

Заключение.....	111
Список литературы.....	113
Приложение А.....	130
Приложение Б.....	133
Приложение В.....	136
Приложение Г.....	141
Приложение Д.....	143

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования. В современных условиях развития городов, уплотнения застройки и реконструкции социальных объектов весьма актуальным является вопрос эффективного распределения электрической энергии от объектов генерации к потребителям. Постоянное увеличение спроса на электроэнергию, существенная доля капитальных затрат при проектировании систем электропередачи на кабельную продукцию, ограниченное пространство для строительства кабельных сооружений приводят к необходимости максимально полного использования существующих линий электропередачи.

Увеличения эффективности процесса распределения электроэнергии можно достичь путем увеличения передаваемой по линиям электропередачи мощности за счёт учёта неравномерности загрузки соседних линий, а также плановых графиков нагрузки в дневное и ночное время суток при расчете длительно допустимых токов, использования резервных линий с максимально возможной загрузкой. Однако в данный момент отсутствуют общепринятые методы определения длительно допустимых токов линий для нетиповых условий эксплуатации.

Существующие нормативные документы, используемые для определения длительно допустимых токов в кабельных сооружениях, учитывают ограниченное количество вариантов конфигурации кабельных блоков и равномерное распределение нагрузки по линиям. Для оценки возможности изменения режима нагрузки кабельного сооружения любой конфигурации необходимо оценивать температурное состояние элементов кабельных линий, так как основным ограничением для величины длительно допустимого тока кабелей является предельное значение рабочей температуры изоляции. Следовательно, можно сформулировать *противоречие* – при существующем увеличении потребления электроэнергии эффективность её распределения не возрастает в виду отсутствия методов определения длительно допустимых токов, учитывающих текущие условия. *Гипотеза* исследования заключается в том, что данная проблема может

быть решена с помощью разработки и внедрения в автоматизированную систему управления распределением электроэнергии методов принятия решений, в основе которых лежат математические модели процессов тепломассопереноса и электродинамических процессов в кабельных сооружениях.

Методы определения управляющих воздействий по увеличению или снижению загрузки кабельных линий на основе анализа их температурного состояния позволяют обеспечить эффективное автоматизированное управление распределением электроэнергии.

Степень разработанности темы исследования. Вопросам использования систем поддержки принятия решений (СППР) в автоматизированных системах управления электроснабжением районов городов или предприятий посвящены работы Ларина О.М., Милосердова Е.П., Кузнецова М.А., Мукучан А.А. В основе рассматриваемых СППР лежит оценка экономической эффективности планируемых мероприятий по развитию, реконструкции и оптимизации затрат электроэнергии. В качестве критериев используются объем инвестиций, затраты на ремонт и эффект от внедрения, но не учитывается техническое состояние элементов системы электроснабжения.

Системам поддержки принятия решений, помогающим оценить техническое состояние системы, посвящены работы Карелина А.Е., Березы А.Н., Казымова И.М., Компанец Б.С., Семенов Н.Г., Черновой А.Д. Предлагаемые СППР призваны решать проблемы повышения качества электроэнергии, с помощью анализа показаний измерительных приборов и формирования цифрового двойника сети. Однако подобные СППР не позволяют оценить перспективные состояния системы электроснабжения, в том числе температурные режимы кабельных линий, при изменении распределения электроэнергии.

Задачам управления распределением нагрузки посвящены работы Hamed D., Behrooz V., Hamed S., Mey G.De., Xynis P., Papagiannopoulos I., Chatziathanasiou V., Exizidis L., Wieseck B. Поиски оптимальных значений рабочих токов и условий прокладки линий в данных работах связаны с проектированием новых кабельных сооружений и основываются на стоимости строительства. Однако потребность в

управлении распределением нагрузки возникает и в процессе эксплуатации уже существующих систем.

Вопросам определения допустимых значений нагрузок кабельных линий путем исследования температурных режимов системы посвящены работы многих российских и зарубежных ученых. Исследованию несоответствия допустимых нагрузочных режимов, определенных по действующим нормативным документам, значениям, полученным при использовании более сложных моделей, посвящены работы Грешнякова Г.В., Baazzim M.S., Al-Saud M.S., El-Kady M.A. Существенное занижение значений допустимых токов, приводящее к завышению требуемых сечений жил кабеля, обосновывает необходимость разработки новых методов для их поиска.

Максимально точные величины допустимых нагрузок позволяют определить математические модели процессов тепломассопереноса, реализованные с использованием специальных программных пакетов. Исследованию подобных моделей посвящены работы Титкова В.В., León F., Халитова В.Р., Ковалева Г.В., Дубницкого С.Д., Рудакова А.А., Кучерявой И.Н., Shwehdia M. H., AL-Ismaila F. S., AL-Nuaimb A. A. Каждая модель разработана с учетом определенных условий и допущений, зависящих от решаемой задачи.

Таким образом, разработка моделей и алгоритмов поддержки принятия решений при управлении процессом распределения электрической энергии в кабельных сооружениях, в основе которых лежит определение максимально возможных значений рабочих токов при заданных условиях эксплуатации с использованием методов математического моделирования, является актуальной.

Объектом исследования является процесс распределения электроэнергии в подземных кабельных блоках.

Предметом исследования являются модели и алгоритмы принятия решений при автоматизированном управлении эффективным распределением электроэнергии в подземных кабельных блоках в условиях изменения нагрузки.

Целью диссертационной работы является повышение эффективности распределения электроэнергии в подземных кабельных блоках за счет разработки

и внедрения моделей и алгоритмов принятия решений в автоматизированных системах управления в условиях изменения нагрузки.

В соответствии с поставленной целью в диссертационном исследовании решаются следующие **задачи**:

1. Провести анализ существующих подходов в управлении нагрузкой кабельных сооружений, способов определения длительно допустимых токов;
2. Разработать концептуальную модель системы поддержки принятия решений при управлении процессом распределения электроэнергии в подземных кабельных блоках в условиях изменения нагрузки;
3. Разработать математические модели объекта управления, предназначенные для определения температурного состояния элементов конструкции кабельного сооружения для различных режимов нагрузки;
4. Разработать метод определения управляющих воздействий при управлении распределением электроэнергии в кабельных блоках для сохранения допустимых значений температур кабельных линий в условиях изменения нагрузочного режима;
5. Провести апробацию системы поддержки принятия решений в составе автоматизированной системы управления распределением электроэнергии с целью обоснования эффективности разработанных моделей и метода.

Положения, выносимые на защиту, обладающие научной новизной, и их соответствие паспорту специальности 2.3.3:

1. *Концептуальная модель* системы поддержки принятия решений при управлении процессом распределения электроэнергии в подземных кабельных блоках, отличающаяся учетом температурного состояния кабельных линий, что позволяет увеличить эффективность работы автоматизированной системы управления (п. 6 – Научные основы и методы построения интеллектуальных систем управления технологическими процессами и производствами);
2. *Математические модели* объекта управления, оригинальность которых заключается в учете сложного теплообмена в кабельном сооружении и зависимости теплофизических и электрических характеристик от

температуры, что позволяет обеспечить эффективное управление распределением электроэнергии за счет определения температуры элементов конструкции кабельных линий для различных режимов нагрузки (п. 4 – Теоретические основы и методы моделирования, формализованного описания, оптимального проектирования и управления технологическими процессами и производствами);

3. *Метод определения управляющих воздействий* в автоматизированных системах управления распределением электроэнергии, отличие которого заключается в выборе одного из множества вариантов режимов нагрузки на основе анализа перспективного температурного состояния, что дает возможность увеличить точность принятия решений при управлении распределением электроэнергии (п. 11 – Методы создания, эффективной организации и ведения специализированного информационного и программного обеспечения АСУТП, АСУЦ, АСТПП и др., включая базы данных и методы их оптимизации, промышленный интернет вещей, облачные сервисы, удаленную диагностику и мониторинг технологического оборудования, информационное сопровождение жизненного цикла изделия).

Теоретическая значимость работы заключается в разработке моделей и алгоритмов, которые позволили усовершенствовать научно-методологическую основу для построения систем поддержки принятия решений.

Практическая значимость работы заключается в возможности применения разработанной системы поддержки принятия решений в организациях, обеспечивающих автоматизированные системы диспетчерского управления распределением электроэнергии в подземных кабельных сооружениях, что позволяет увеличить эффективность эксплуатации кабельных линий. Использование предложенных моделей для определения температуры элементов конструкции кабельных линий при проектировании новых кабельных сооружений позволяет оценить эффективность различных способов нагрузки и конфигурации блока, не прибегая к натурным экспериментам. Разработанный алгоритм определения допустимой нагрузки резервных линий позволяет

увеличить объем передаваемой мощности за счет учета плановых нагрузок действующих линий.

Разработанные алгоритмы определения максимально допустимых режимов нагрузки, реализованные в виде программных продуктов «Thermal analysis of the block», «Optimal load mode», апробированы и внедрены на предприятии ООО «ОКП «ЭЛКА-Кабель» (г. Пермь). Внедрение позволило увеличить эффективность распределения электроэнергии в кабельном блоке на 12,3 % без использования резервных линий и дополнительно на 10,9 % за счет определения максимального режима нагрузки резервных линий.

Результаты работы используются в образовательном процессе подготовки магистров, обучающихся по направлению 13.04.02 «Электроэнергетика и электротехника», при освоении дисциплины «Математические пакеты для инженерных и научных расчетов». Акты о внедрении результатов диссертации включены в приложение к диссертации.

Методология и методы исследования. Методологической основой исследования послужили положения теории автоматического управления, теоретические основы электротехники, теория принятия решений, методы математического моделирования и экспериментального исследования, обработки результатов экспериментов.

Степень достоверности и апробация работы. Достоверность результатов исследования определяется корректным использованием современных математических методов, соответствием полученных теоретических результатов экспериментальным данным.

Результаты диссертационного исследования докладывались и обсуждались на следующих мероприятиях: научно-методические семинары кафедры «Конструирования и технологии в электротехнике» ПНИПУ; Всероссийская научно-техническая конференция молодых ученых «Автоматизированные системы управления и информационные технологии» (АСУИТ) (г. Пермь, 2018, 2020, 2021); Международная интернет-конференция молодых ученых, аспирантов и студентов «Инновационные технологии: теория, инструменты, практика»

(INNOTECH) (г. Пермь, 2018, 2020); IV международная научно-техническая конференция «Электропривод, электротехнологии и электрооборудование предприятий» (г. Уфа, 2019); X Всероссийская конференция «Актуальные проблемы прикладной математики и механики» (г. Абрау-Дюрсо, 2020); «International Russian Automation Conference» (RusAutoCon) (г. Сочи, 2021, 2022).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 17 научных работ, из них 5 статей индексируются в журналах из списка ВАК, три статьи индексируются в международных базах цитирования Scopus и WoS, получено два свидетельства о государственной регистрации программы для ЭВМ.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы, включающего 134 наименования, 5 приложений. Работа изложена на 145 страницах, содержит 48 рисунков, 21 таблицу.

ГЛАВА 1. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ И СОСТОЯНИЕ ПРОБЛЕМЫ

1.1 Особенности современных распределительных сетей

Современная распределительная сеть 6-35 кВ селитебных территорий используется для совместного питания потребителей коммунально-бытового сектора и промышленного производства. Принцип построения таких сетей базируется на стандартных требованиях надежности и устойчивости в соответствии с нормативными документами. Схемы главных цепей распределительных пунктов представляют собой одну секционированную систему сборных шин с питанием по резервируемым линиям электропередачи (двухцепное исполнение) от независимых источников, подключенных к разным секциям шинопроводов. Для потребителей первой категории надежности электроснабжения в соответствии с Правилами устройства электроустановок (ПУЭ) предусматривается автоматика ввода резерва. Узловые подстанции проектируются с учетом схем главных цепей распределительных устройств в зависимости от количества подключаемых присоединений и требований экономичности, наглядности, возможности и безопасности обслуживания, выполнения ремонтных работ и расширения, компактности и др. Подключение крупных генерирующих мощностей осуществляется, как правило, к узловым подстанциям. Значительная доля линий электропередачи выполняется в кабельном исполнении, более того, в ряде городов Российской Федерации в соответствии с правилами землепользования и принятыми градостроительными нормами сооружение новых линий электропередачи возможно только в кабельном исполнении.

Развитие передовых технологий и новых методов выработки и передачи электрической энергии направлено в сторону концепции интеллектуальных сетей, включающих в себя значительную долю генерирующих мощностей на базе возобновляемых источников энергии [1, 2]. Распределенная генерация имеет

гибкие характеристики, позволяющие адаптироваться к меняющемуся спросу на электрическую энергию.

Значительное количество малых распределенных генерирующих объектов и их режимов работы, зависящих, в том числе от внешних факторов, розы ветров, интенсивности солнечной инсоляции, несомненно, требует развития новых подходов в области защиты и управления электроэнергетическими системами и комплексами. Необходимо применение технологий, направленных на совершенствование систем защиты и автоматики, в том числе в области обеспечения объектов энергетики цифровыми решениями. Внедрение цифровых технологий позволяет снизить эксплуатационные и инвестиционные затраты при повышении надежности электроснабжения [3].

1.2 Способы прокладки кабельных линий

Основным способом передачи электроэнергии на большие расстояния являются воздушные линии электропередачи. Однако, на территории городов, промышленных предприятий не только вновь вводимые линии выполняются в подземном кабельном исполнении, но и существующие воздушные электрические и телефонные коммуникации постепенно скрывают под землю [4]. На рисунке 1.1 представлена схема электроэнергетической системы населенного пункта.

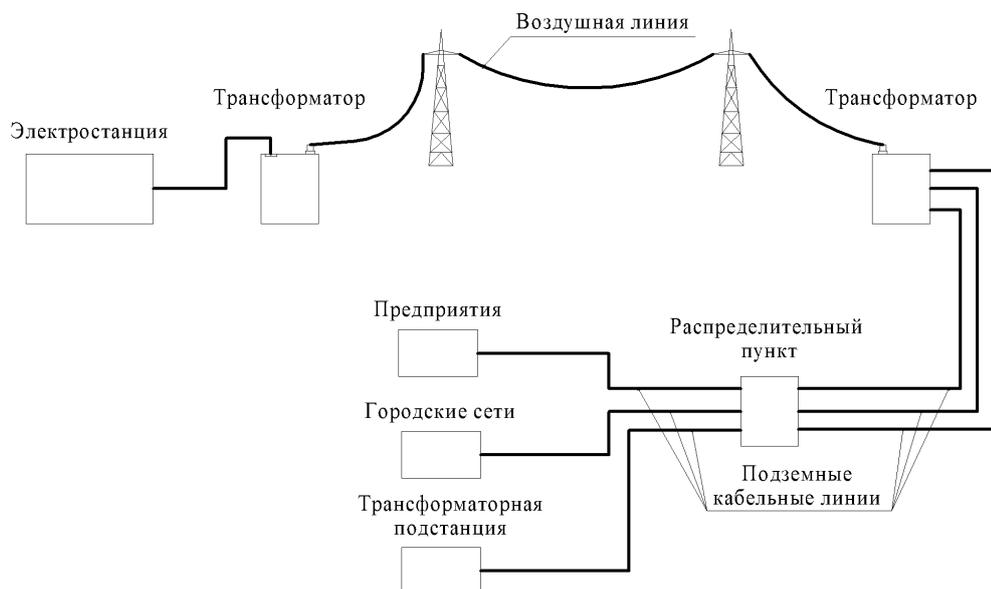


Рисунок 1.1 – Схема электроэнергетической системы

К подземным способам прокладки относятся траншейные и бестраншейные способы, а также кабельные сооружения. Бестраншейные методы: проколы, горизонтально-направленное бурение (ГНБ) и продавливание (ГНП) и др. позволяют сохранить существующую инфраструктуру, минимизировать периоды ограничения движения транспорта [5]. На рисунке 1.2 показаны траншейный и бестраншейный варианты размещения кабельных линий. Кабели располагают в трубах непосредственно в земле [6]. Такой способ прокладки допустим для количества кабелей не больше шести.

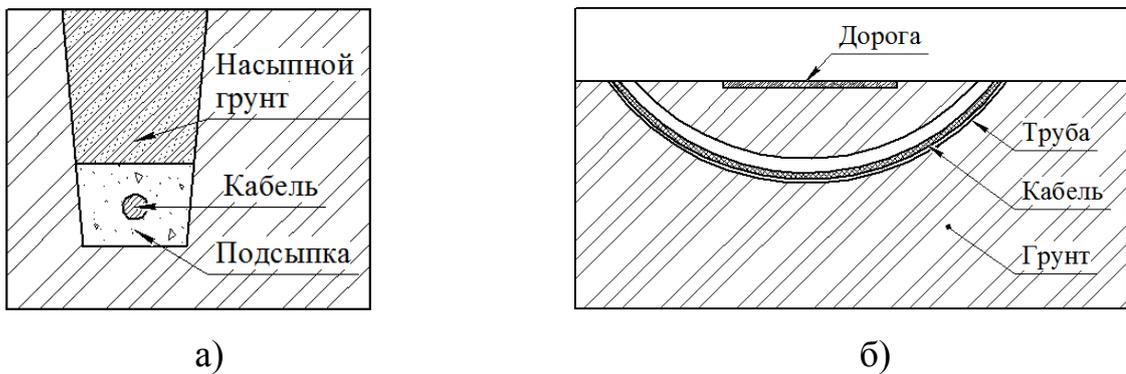


Рисунок 1.2 – Траншейный (а) и бестраншейный (б) (ГНБ) способы прокладки кабельных линий

К кабельным сооружениям относятся кабельные тоннели, каналы, блоки, эстакады и др. Согласно ПУЭ, кабельное сооружение – это сооружение, предназначенное для размещения в нем кабелей, кабельных муфт и другого оборудования. На рисунке 1.3 представлены примеры кабельных сооружений.

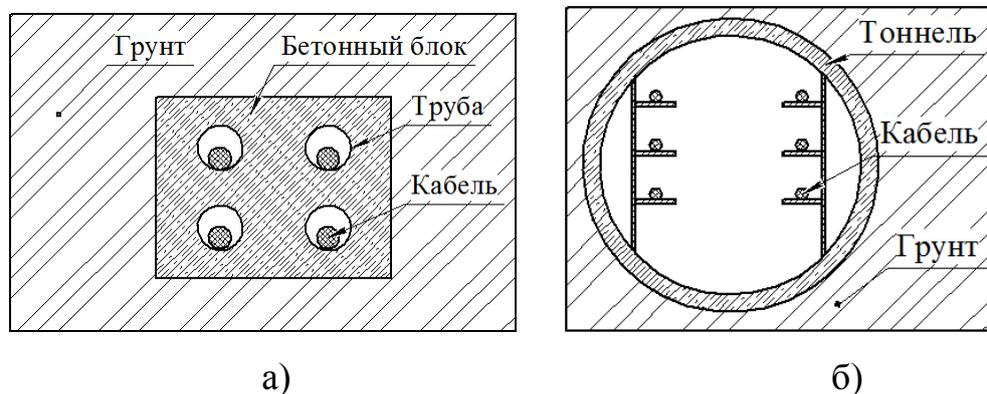


Рисунок 1.3 – Кабельные сооружения: а) кабельный блок; б) кабельный тоннель

Расположенные в кабельных сооружениях линии имеют значительно лучшую механическую защиту, чем проложенные в земле. Особенностью кабельного тоннеля является его проходимость, что упрощает ремонт и реконструкцию линий.

Способы прокладки и конструкции кабельных сооружений выбирают в зависимости от множества факторов таких, как свойства грунта, близость коммуникаций, дорог и объектов инфраструктуры, количество кабельных линий и т.д. [4, 7].

Несмотря на большие капитальные затраты при строительстве, кабельные сооружения оправдывают свой выбор. Так в статье [8] рассматривается сравнение стоимости прокладки кабельных линий в траншее и строительства эстакады. Использование траншеи для прокладки линий хоть и имеет меньшую стоимость, сопровождается дополнительными затратами из-за большей вероятности повреждения кабеля и более дорогостоящего процесса ремонта. Эстакада в виду большей защищенности кабеля и простоты организации ремонтных работ и реконструкции окупается за 7 лет в сравнении с траншеей.

В статье [9] описан сравнительно новый способ подземной прокладки кабелей – микротоннелирование. Он совмещает в себе преимущества методов ГНБ и кабельного канала такие, как механическая защита линий и сокращенные сроки ограничения движения транспорта на территории строительства, что является важным фактором при выборе способов прокладки на территории городов.

Размещение кабельных линий в грунте имеет свои недостатки при эксплуатации, связанные в основном с ремонтом и модернизацией линий. Так, например, в статье [10] описан способ поиска конца трубы в случае повреждения кабеля. А в статье [11] оценивается влияние задержки ремонта из-за поиска места повреждения на продолжительность и стоимость ремонтных работ.

Одним из самых распространенных способов прокладки кабелей на территориях населенных пунктов являются кабельные блоки. В данный момент не регламентированы варианты их комплектации. Количество и способ

прокладываемых линий определяются проектной организацией. На рисунке 1.4 представлены варианты комплектации кабельных блоков.

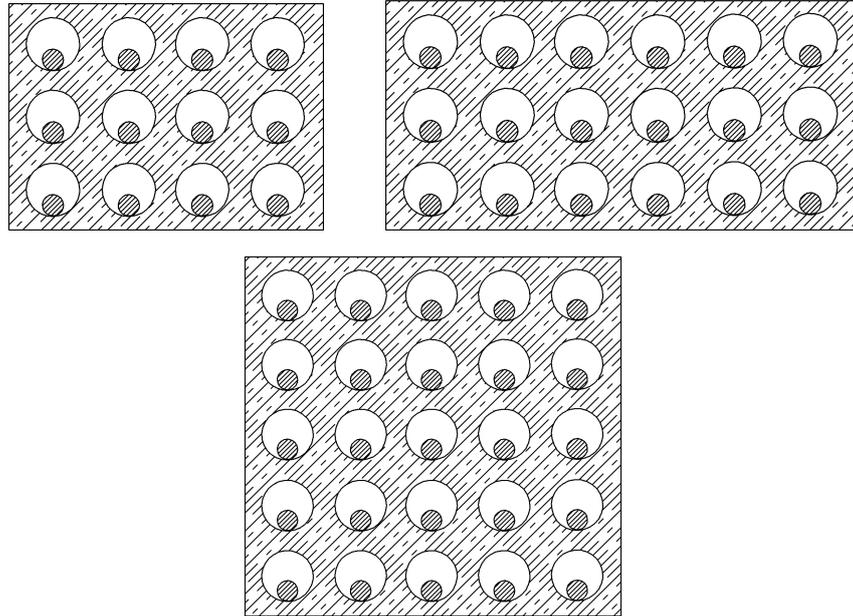


Рисунок 1.4 – Варианты комплектации кабельных блоков

Большое разнообразие количества и вариантов расположения кабельных линий в блоке существенно усложняет анализ эксплуатационных характеристик кабелей, особенно их температурного состояния из-за необходимости учитывать взаимный нагрев, и как следствие затрудняет определение эффективных режимов работы кабельного сооружения.

1.3 Влияние материала изоляции на значение длительно допустимого тока

Эксплуатационные параметры кабелей во многом определяются изоляцией токопроводящих жил. Изоляция силовых кабелей может быть выполнена из следующих материалов:

- маслонаполненная изоляция;
- поливинилхлоридный пластикат;
- сшитый полиэтилен;
- полимерные композиции, не содержащие галогенов;

- сшитые полимерные композиции, не содержащие галогенов;
- этиленпропиленовая резина.

Выбор материала изоляции зависит от множества факторов, таких как рабочее напряжение кабеля, условия эксплуатации, стоимость и т.д. Особенностью изоляции является необходимость ограничения температуры эксплуатации. Продолжительные повышенные тепловые нагрузки, при которых используется изоляция, приводят к снижению диэлектрической прочности, деградации изоляции, ускоренному старению и ухудшению механических свойств [12–16]. Ухудшение диэлектрической прочности может привести к аварийным ситуациям, например, электрическому пробое. При электрическом пробое твердого изоляционного материала электрическая прочность не восстанавливается, что приводит к увеличению числа аварийных режимов [17, 18].

Так как максимальной точка нагрева изоляции является точка контакта изоляции с токопроводящей жилой, для каждого вида изоляции указываются значения максимально допустимых температур нагрева жил, таблица 1 [19].

Таблица 1 – Допустимые температуры нагрева токопроводящих жил

Материал изоляции	Допустимая температура нагрева жил кабеля, °С		
	Длительно допустимая	В режиме перегрузки	Предельная при коротком замыкании
Маслонаполненная изоляция (6/35 кВ)	80/65	105/-	200/130
Поливинилхлоридный пластикат	70	90	160
Сшитый полиэтилен	90	130	250
Полимерные композиции, не содержащие галогенов	70	90	160
Сшитые полимерные композиции, не содержащие галогенов	90	130	250
Этиленпропиленовая резина	90	130	250

Исследованиям влияния температуры и других факторов на свойства изоляции, способов прогнозирования остаточного ресурса материалов изоляции посвящено большое количество научных работ.

В работе [21] Олексюк И.В. исследует вопрос ускоренного старения изоляции из СПЭ при воздействии высоких температур. Автором получено аналитическое выражение для расчета срока службы силовых кабелей, учитывающее старение изоляции под действием температур.

Кучерявая И.Н. в своих работах [21–23] исследует влияние микровключений на эксплуатационные характеристики кабелей с изоляцией из СПЭ. Особенностью такой изоляции является подверженность деградации, которая усугубляется при повышенных температурах и неоднородности полиэтилена.

В работе [24] авторами рассмотрен кабельный канал из 8 кабельных линий треугольной прокладки при различных сроках службы - 0, 15 и 30 лет. Отмечено, что длительное превышение рабочей температуры на 8% и 15% приводит к сокращению срока службы в 2 и 3 раза соответственно. Поэтому точное определение характеристик повышения температуры кабеля имеет большое значение для расчета оптимальной пропускной способности кабеля и обеспечения безопасности системы электропередачи. Авторами рассматривается плоская задача теплопереноса, без учета конвекции в кабельном канале. Многослойная конструкция кабеля заменена однослойной. Задача реализована с использованием численного метода. Полученные результаты подтверждают необходимость в управлении величиной нагрузки на кабельные линии и учете срока службы кабельных линий, т.к. со временем изменяются диэлектрические свойства изоляции.

В работе Роженцовой Н.В. и соавторов [25] отмечается неблагоприятное влияние повышенной допустимой температуры работы изоляции из СПЭ на влажность окружающего кабель грунта, что может привести к перегреву конструкции. Следовательно, необходимо уточнение величины допустимой температуры работы жилы кабелей для грунтов с возможным высыханием.

Вопрос диагностики и прогнозирования остаточного ресурса изоляционных материалов рассмотрен в работах [15, 26–29]. Так как ресурс изоляционных материалов напрямую зависит от температурного режима, авторами производился мониторинг температуры кабеля во время работы с помощью цифрового регистратора. С помощью оптоволоконных датчиков, расположенных внутри изоляции, измерялась температура для определения точек перегрева, которые могут свидетельствовать о появлении частичного разряда и как следствие деструкции материала.

Так как свойства материала изоляции меняются в процессе эксплуатации, необходим регулярный контроль её состояния на протяжении срока службы. Также важно при проектировании и эксплуатации кабельных линий оценивать температурное состояние кабелей и правильно определять длительно допустимые токи.

1.4 Анализ существующих методик оценки температурного состояния кабельных линий и определения длительно допустимой токовой нагрузки

На температурное состояние кабельных линий оказывает влияние большое количество условий. От полноты учета этих факторов зависит точность определения температурных полей элементов конструкции, и, следовательно, рациональный выбор величины нагрузки.

В области тепловых и электродинамических процессов в кабельных линиях, кабельных каналах и сооружениях, определению длительно допустимой токовой нагрузки посвящено большое количество исследований и работ проведенных, как российскими: Э.Т. Ларина, Г.В. Грешняков, М.В. Дмитриев и др., так и зарубежными: М.Х. МакГрат, Дж.Х. Неер и др. учеными. Практика определения допустимой токовой нагрузки кабеля имеет долгую историю, и заложена в эпоху развития телеграфных линий; одними из самых ранних источников являются работы А.Е. Кеннелли, опубликованные в 1889 году. Результаты исследований

Дж.Х. Неераи М.Х. МакГрата являются общепризнанной основой для выполнения практических расчетов по определению длительно допустимых токов [30].

Согласно СТО 56947007-29.060.20.020-2009 «Методические указания по применению силовых кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена на напряжение 10-35 кВ (с Изменениями)» при определении длительно допустимого тока для кабельных линий, проходящих в различных грунтах и условиях окружающей среды, выбор осуществляется по участку с наиболее тяжелыми условиями.

Определение длительно допустимых токов основано на анализе температурного состояния кабеля в определенных условиях эксплуатации и может быть реализовано с использованием различных методов. На рисунке 1.5 представлены самые распространенные на данный момент методы определения длительно допустимых токов.

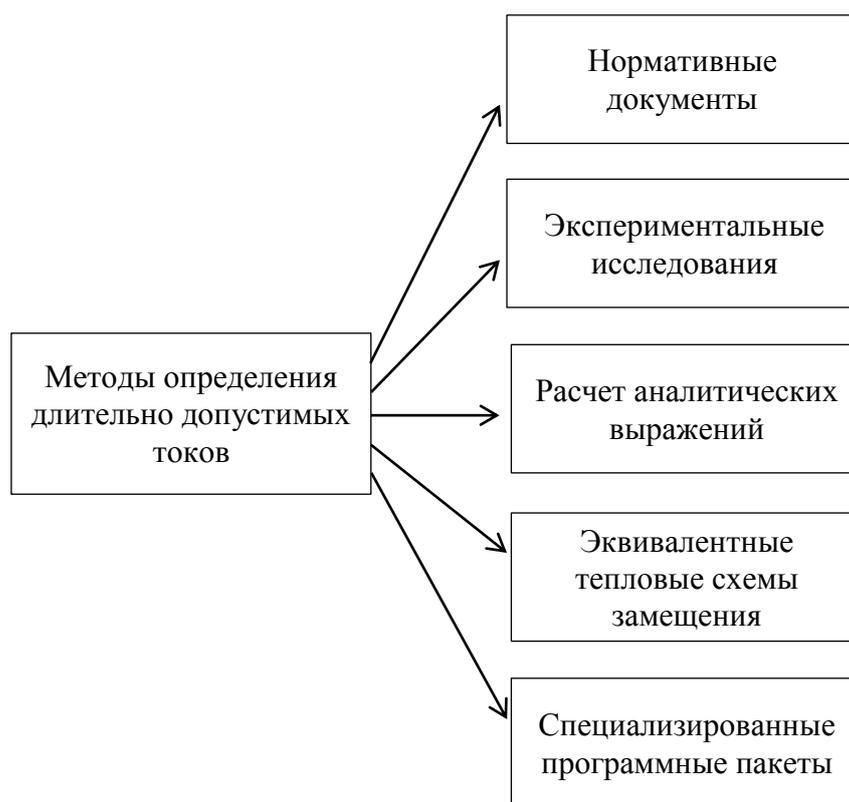


Рисунок 1.5 – Методы определения длительно допустимого тока

Требования, изложенные в МЭК (IEC) 60287 (стандарт МЭК 60287 состоит из 8-ми частей, 7 частей утверждены в Российской Федерации), являются

результатом обобщения научных изысканий и накопленного опыта в области кабельной техники и канализации, в основе которых лежит модель Неера-МакГрафа [31–33]. Описанные математические модели стационарных тепловых процессов основаны на эмпирических зависимостях и поправочных коэффициентах. ГОСТ Р МЭК содержит примечание о том, что расчеты длительно допустимого тока производятся без учета повышения температуры от выделяющейся теплоты в близлежащих кабелях, а следовательно, не могут применяться для кабельных блоков.

Правила устройства электроустановок 7-й редакции содержат рекомендации по расчету длительно допустимых токов линий в кабельных блоках. Однако ПУЭ 7 рассматривает ограниченное количество вариантов конфигурации блоков с определенными расстояниями между линиями и диаметром труб. На данный момент не существует нормативных документов, регламентирующих определение величины длительно допустимых токов для линий, проложенных в кабельных блоках произвольной конфигурации.

Современные методики, описанные в стандартах [34–36], по определению длительно допустимой токовой нагрузки кабельных линий не позволяют учитывать в полной мере все возможные сочетания оказывающих влияние факторов таких, как геометрические параметры кабельных линий, условия и способы прокладки, условия теплообмена, токи, протекающие в металлических экранах кабелей, взаимовлияние рядом проложенных кабельных линий и т.д. Следовательно, для безаварийной эксплуатации расчетный длительно допустимый ток часто оказывается занижен относительно реальных условий эксплуатации, что приводит к завышению сечений жил кабелей. В работах [37, 38] определено, что длительно допустимый ток, рассчитанный с помощью IEC 60287 ниже на 10-30%, чем ток, получаемый при использовании более сложных моделей, за счет упрощенного подхода к физическим эффектам, связанным с конвекцией воздуха, влажностью грунта и т.д.

Современные методы непосредственного контроля температуры кабеля, как правило, основаны на оптических методах, их достоинства и недостатки

исследованы в целом ряде работ [39–44]. Температура может контролироваться на поверхности кабельной линии, либо внутри токопроводящей жилы или экрана при интеграции оптического волокна в их тело. Однако, непосредственное измерение температуры недостаточно для определения области допустимых режимов, которое возможно лишь при наличии прогноза изменения температуры кабельной линии при изменении нагрузки. Разработка математических моделей и алгоритмов оценки температуры элементов, входящих в систему передачи электрической энергии по кабельным линиям, в режимах близких к реальному времени позволяет создать системы мониторинга, учитывающие изменения токовой нагрузки линий и изменения внешних условий [45].

Основные требования к системе мониторинга процессов теплопереноса, проходящих в кабельном сооружении, могут быть сформулированы в следующем виде [39, 46, 47]:

1. Распознавание событий связанных с превышением токовой нагрузки, приводящей к неблагоприятным температурным режимам работы изоляции, для чего необходимо определение температуры на поверхности жилы;
2. Прогнозирование области допустимых токовых нагрузок и времени существования режимов, безопасных для изоляции, для чего необходимо с учетом поставленных временных ограничений выполнять расчет перспективных режимов работы кабельной линии.

В работе [48] авторы используют экспериментальный метод определения допустимых токовых нагрузок. Для контроля температур используются термопары, установленные на поверхности жилы, изоляции и оболочки. Результаты исследований показали хорошую сходимость со значениями стандартного расчета по ГОСТ. Экспериментальный метод определения допустимых токов достаточно трудоемкий и ресурсозатратный, а также не подходящий для адекватной оценки взаимного влияния большого количества рядом проложенных кабелей.

Ряд авторов производят расчет температурных состояний элементов кабельной конструкции, используя аналитические выражения. В работе [49]

авторы исследуют процесс нагрева изоляции кабеля с помощью метода суперпозиции и теоремы Дюамеля. Полученные графики нагрева различных точек изоляции сравнивались со значениями, полученными численными методами. Показано, что в случае необходимости определения кривой нагрева в одной точке изоляции использование численных методов может быть избыточно и приводить к трате больших счетных и временных ресурсов.

Авторы работы [50] используют MATLAB для расчета аналитических выражений, описывающих нестационарную задачу теплопроводности в кабеле с ПВХ изоляцией. Получены кривые нагрева центра кабеля для нескольких значений тока и распределение температуры в сечении кабеля.

В работе [51] также производится расчет теплового поля трех однофазных кабелей, проложенных в земле, с помощью аналитических выражений, решенных в пакете MATLAB. Авторы рассматривают нелинейную задачу теплопроводности (зависимость теплофизических характеристик материалов кабеля от температуры) используя для ее реализации итерационную процедуру.

Подобие явлений протекания электрического тока и переноса тепла в контуре позволяет перейти от тепловых моделей к моделям электрической цепи, подходящих к анализу стационарных и динамических процессов. Параметры тепловых сопротивлений элементов анализируемой модели могут быть определены, используя сведения МЭК 60287 [52]. Конструкции кабельного сооружения учитываются тепловой схемой замещения, а окружающий грунт посредством решения аналитических уравнений теплопроводности. Определение теплофизических характеристик материалов системы «кабельные линии – кабельное сооружение – грунт» может быть выполнено на основании сведений, представленных в справочной литературе [53]. Смесь газов, заполняющая пространство между трубами и кабельными линиями, так же характеризуется определенными теплофизическими свойствами [54–57].

В работе [58] отмечается необходимость анализа температурного поля в кабельных линиях для повышения коэффициента использования кабеля при обеспечении его безопасности, надежности, оценки переходных процессов, а,

следовательно, управлением работы кабельными линиями. Рассмотрены два подхода определения температурных полей – модель тепловой цепи с двумя и тремя емкостными ветвями. Произведено сравнение результатов реализации рассмотренных моделей с результатами численного анализа, с использованием метода конечных элементов для одного кабеля. Отмечено, что наилучшее согласование результатов имеет модель тепловой цепи с тремя ветвями. Однако авторы указывают на необходимость дополнительных исследований и определения значений эквивалентных тепловых характеристик моделей для возможности более широкого использования моделей.

Кабельные линии, нагрузка которых существенно изменяется во времени, рассматриваются в работе [59]. Характерным примером возникновения такой ситуации является широкая интеграция возобновляемых источников энергии в общую энергосистему. Причем динамическое тепловое поведение силовых кабельных линий при постоянно меняющейся нагрузке не может быть хорошо смоделировано с помощью методик МЭК. В работе рассматривается тепловая модель с приведенными тепловыми характеристиками. Изменяющиеся во времени и от температуры теплофизические характеристики многослойного кабеля существенно влияют на распределение температуры и ее максимальное значение. Сравнительные оценки максимальной температуры кабеля, полученные при использовании различных модификаций тепловых моделей с экспериментальными замерами температуры в лабораторном кабеле для случая изменяющейся нагрузки во времени (шестиступенчатое изменение нагрузки в течение 9 часов) показало, что погрешность составляет от 50% до 10%. В последнем случае рассматривался численный метод.

Лебедев В.Д. и Зайцев Е.С. в статьях [60, 61] также используют электрическую схему замещения для задачи нагрева высоковольтного кабеля. Авторы рассматривают расчет переходного процесса с помощью операторного метода расчета линейных электрических цепей и метода конечно-элементного моделирования. Предложен алгоритм расчета процесса нагрева кабеля с помощью метода трапеций. Для оценки адекватности предложенного метода произведен

физический эксперимент по нагреву специально созданной конструкции, моделирующей тепловое поле в кабеле.

Зализный Д.И. с соавторами в работах [62, 64] исследуют тепловые процессы, протекающие в одножильном и двухжильном кабелях, с помощью электрической схемы замещения. Как показывают расчеты, длина кабеля не влияет на расчеты установившегося режима. Для проверки адекватности представленной модели были проведены экспериментальные исследования процесса нагрева двухжильного кабеля. Погрешность модели обусловлена допущениями, принятыми при моделировании процесса теплопереноса.

Авторы в статье [64], используя электрические схемы замещения, анализируют влияние изменения влажности грунта при нагреве кабеля. Уменьшение влажности почвы приводит к снижению теплопроводности, что усугубляет температурные условия работы кабеля.

Замещение тепловых процессов электрическими схемами не позволяет учесть ряд факторов, таких как конвекция в трубе, передача тепла за счет излучения и т.д. Создать модели, включающие в расчет температуры большее количество условий, позволяют специализированные программные пакеты. Проверка адекватности подобных моделей, основанная на сравнении с экспериментальными данными, показывает хорошее согласование.

Леón F. в своих работах [66, 67] рассматривает механизмы теплопередачи в кабельных сооружениях, части конструкции кабелей, являющиеся источниками тепла. Производится расчет тепловых сопротивлений элементов конструкции кабеля. Производится сравнение метода Неера-МакГрафа с методом, реализованным в программе SYMCAP.

Халитов В.Р. в работе [67] исследует блочный способ прокладки кабелей. Автор отмечает отсутствие нормативной базы для расчета длительно допустимых токов в блоках сложных конструкций. С помощью моделирования процессов теплопередачи в программе SYMCAP Халитов В.Р. рассчитал значения длительно допустимых токов для вариантов блоков и их заполнения, указанных в ПУЭ. Результаты в некоторых случаях имеют различие в 30%. Показано, что при

определении значений, указанных в ПУЭ, не были учтены важные факторы, такие как глубина залегания блока. В работе указаны поправочные коэффициенты для рабочих токов для разных вариантов конфигурации и заполнения кабельного блока.

Грешняков Г.В. с соавторами в своих работах [68, 69] исследуют задачу определения длительно допустимых токов трехфазной системы кабельных линий с помощью моделирования температурных полей в программном комплексе ELCUT. При моделировании учитываются тепловые характеристики материалов и сред, в также ток, протекающий в броне.

М.Н. Shwehdia с соавторами в работе [70] также приводят экспериментальные исследования. Работа посвящена исследованию влияния различных факторов на нагрев кабеля. В лабораторных условиях измерялась температура кабеля, проложенного в воздухе и под землей. Показано существенное влияние на температурный режим инсоляции солнца. Оценено влияние наличия грунта на скорость изменения температуры.

Кучерявая И.Н. в работе [45] реализует метод многомасштабного моделирования процессов тепломассопереноса в кабельных туннеле и канале. Решение тепловой задачи проведено численно в программе Comsol. При моделировании учитывается качество материала изоляции, а именно наличие включений. Показана необходимость оценки нагрева кабеля при определении длительно допустимых токов с учетом не только условий прокладки, но и влияния на нагрев областей с частичными разрядами.

Модели с учётом взаимного влияния теплового и электромагнитного полей, рассмотренные в работах [71–73], выполняются в три этапа. На первом этапе выполняется расчет электромагнитного поля для получения пространственного распределения резистивных и диэлектрических потерь и передача результатов в модель теплового поля. На втором этапе рассчитывается состояние теплового поля. На третьем этапе с учётом влияния температуры на сопротивление проводников, итерационным повторением этапов расчета достигается заданная точность схождения решения. Граничным условием задается температура

окружающей среды, либо тепловой поток на границе области расчёта. Особенности грунта, окружающего кабельное сооружение, могут быть учтены тепловой схемой замещения [74–80]. Деление грунта на слои с равными тепловыми сопротивлениями, позволяет при достаточном числе делений получать удовлетворительные по сходимости результаты, однако число делений нужно определять методом подбора и анализа результатов.

Процессы тепломассопереноса в кабельном сооружении с учетом конвекции и переноса энергии радиационным теплообменом и определению допустимых токовых нагрузок рассматривались в [81–84]. Определено, что влияние радиационного теплообмена зависит от разности температур на поверхностях излучающих сред и в стационарных режимах практически не происходит.

Процессы, сопровождающие работу кабельных линий с превышением длительно допустимой токовой нагрузки с учетом условий окружающей среды, рассмотрены в работах [85, 86]. Авторы решали систему дифференциальных уравнений методом конечных разностей с использованием неявной четырехточечной схемы. Получены температурные поля в кабеле с целью прогнозирования возникновения воспламенения кабельных линий.

Взаимное влияние соседних кабелей рассмотрено в работах [75, 87]. Для определения температуры кабеля используется электрическая схема замещения, для которой сначала определяются тепловые потери с учетом высших гармоник тока. Учет рядом проложенных кабелей производится путем изменения теплового сопротивления окружающей кабель среды. Однако такой подход требует предварительного расчета нагрева грунта от соседних линий, что приводит к существенным погрешностям.

В работе [88] авторами оценивается внешнее влияние на процессы тепломассопереноса от инженерных систем, как для случая пересекающей, так и для проходящей вдоль кабельной линии тепловой трассы. Результаты показывают, что наличие вблизи кабельных линий инженерных сетей оказывает существенное влияние на температурное поле и приводит к снижению длительно допустимых токов на 30 %.

Исследования влияния симметричных и несимметричных режимов нагрузки кабельной линии на процессы тепломассопереноса, рассмотренные в [89, 90], позволили сделать вывод, что потери мощности возрастают при значительном коэффициенте несимметрии токов, при этом несинусоидальный характер токов не оказывает значительного влияния и может не учитываться в инженерных расчетах.

Ключевые вопросы организации и решения задач анализа установившихся, переходных и перспективных режимов в энергорайонах, имеющих распределительные сети в кабельном исполнении, современные требования к системам релейной защиты и автоматики, диспетчеризации и бесперебойности электроснабжения описаны в работах [91–94]. Сформулированы основные требования, направленные на безаварийную и бесперебойную работу потребителей электрической энергии и мощности. Данные вопросы активно прорабатываются в соответствующих комитетах СИГРЭ и отражены в [95, 96].

Работы, посвященные определению длительно допустимых токов в сооружениях с несколькими линиями, рассчитывают варианты нагрузочных режимов только при максимальной загрузке всех работающих линий. При этом часть из них в сооружении часто нагружена не на полную допустимую мощность, что дает возможность увеличить рабочий ток соседних линий. Следовательно, необходимо разработать системы анализа состояния и алгоритмы управления нагрузкой кабельных сооружений.

1.5 Анализ подходов в задачах управления распределением электроэнергии в кабельных линиях

В настоящее время вопросам оптимальной загрузки и управления режимами кабельных сооружений уделяется большое внимание. Это связано с увеличением спроса на электроэнергию, большими материальными затратами на строительство новых и реконструкцию существующих линий электропередачи, существенным уплотнением инфраструктуры мегаполисов.

В работе [97] Hamed Dehghani и Behrooz Vahidi рассматривают алгоритм управления распределением нагрузки для микрорайона городской застройки, для кабелей среднего напряжения при этом учитывается тепловой режим, потребности потребителей, ценовой спрос на электроэнергию и оптимальные условия для продавца. Температурный расчет в кабельных линиях проводился по инженерным методикам с учетом срока службы кабеля. Предложено три аналитических модели для определения максимального значения пропускной способности кабелей разного срока службы. Отмечено, что при сроке эксплуатации кабельной линии превышающей 15 лет существенно снижается значение передаваемой мощности. Использование авторами инженерных методик для определения температурного режима в кабельных линиях не позволяет получать достоверные значения величины нагрузки и, следовательно, успешно реализовать процесс управления с заявленными целями.

Использованию математических моделей для решения задач поиска оптимального нагрузочного режима, расположения кабелей, эксплуатационных условий посвящено немало работ.

В работе [98] рассмотрен кабельный канал в метро, в котором в трубах проложены 12 кабелей на среднее напряжение с тремя резервными линиями. Рабочий ток варьируется от 300 до 500 А. Используя схему с тепловыми замещениями, рассчитывается температура в изоляции кабельных линий, вычисления производятся в пакете MATLAB. В результате исследования были определены расположения кабельных линий в канале с разнесенными фазами. Алгоритм расчета оптимальной конфигурации кабельных линий в бетонном блоке позволил максимизировать пропускную способность и минимизировать стоимость системы (стоимость кабеля и стоимость электроэнергии). То есть, рассмотрены две противоположные друг другу целевые функции – увеличение мощности и снижение стоимости, при ограничении по величине температуры. Стоимость кабеля складывается из нескольких факторов: первоначальных инвестиций, джоулевых и диэлектрических потерь. В работе было показано, что

размещение кабельных линий может приводить к изменению величины допустимого тока на 30%.

Авторы в [99] приводят алгоритм оптимизации пропускной способности подземных кабелей с обратной засыпкой с учетом неопределенностей ряда параметров: тепловое сопротивление грунта, температура окружающей среды, ток нагрузки. В этом исследовании представлен алгоритм расчета наилучшей пропускной способности кабеля с учетом экономических аспектов и неопределенности затрагиваемых параметров на основе метода эвристической оптимизации (ICA) и вероятностного подхода (Монте-Карло). В целевую функцию этого алгоритма входят расположение кабеля и размеры засыпки. Показано, что без использования итерационных алгоритмов расчета детерминированная модель расчета нагрузки кабельных линий менее предпочтительна вариационной постановке.

Авторами [100] рассмотрен кабельный канал с 12-ю трубами, в 9-ти из которых проложен силовой кабель. В работе определена допустимая нагрузка кабельных линий и их оптимальное расположение в канале. Расчет температурного поля в кабелях осуществляется с использованием схемы замещения аналогично статье [58]. Влияние на кабель остальных кабельных линий производится с помощью аналитических выражений с учетом расположения кабельных линий, величины нагрузки, взаимовлияния и диэлектрических потерь. Определение наиболее оптимального расположения кабелей в канале осуществляется с помощью итерационного процесса, позволяющего определить место расположения фаз кабельных линий.

В [101] рассмотрена трехфазная кабельная линия, проложенная под землей. В работе представлена оптимизация материальных затрат кабельной линии 400 кВ. Рассмотрена двумерная математическая модель теплопроводности. Решение получено методом конечных элементов. Решение задачи минимизации материальных затрат на кабельную систему (с учетом стоимости прокладки кабеля и передаваемой электроэнергии) представляла собой итерационную

процедуру с перебором геометрических размеров кабеля и энергетических параметров.

Аналогично статье [101] авторы работы [102] анализируют работу кабеля высокого напряжения, проложенного в земле. Рассмотрены три вида засыпки. Определены оптимальные параметры прокладки и эксплуатации кабеля, позволяющие снизить себестоимость кабельной линии при максимальной пропускной способности.

Новый алгоритм оптимального размещения подземных кабелей в бетонном блоке, который позволил одновременно максимизировать пропускную способность и минимизировать стоимость кабельной системы, представлен в работе [103]. Авторами использовался самоадаптирующийся метод оптимизации «роя частиц» (SAPSO), применяемый для решения многоцелевых задач оптимизации, в частности для решения многокритериальной задачи. Тепловая задача реализуется посредством инженерных методик, при этом не учитываются ряд потерь в кабеле и зависимость сопротивления жил от температуры, что существенно занижает величину максимальной температуры в канале.

В работе [104] рассмотрен способ определения оптимальных местоположений пучков кабелей в земле с помощью статистических подходов к анализу стоимости строительства, геометрических ограничений и магнитных полей. Показано, что изменение геометрического расположения кабелей в пространстве оказывает благоприятное влияние на уменьшение магнитного поля.

Оптимизационная задача определения расположения подземных кабелей с учетом тепловых потерь рассматривалась авторами в [105]. Численное решение реализуется с помощью программы COMSOL и сравнивается с результатами аналитического решения. В статье оценивается передаваемая мощность для кабелей, расположенных под землей в ряд в количестве 3, 6, 9, 12, 15 и 30 при условии одинаковой температуры. Мощность внешних кабелей при этом в несколько раз превышает мощность центральных. В результате исследования получена зависимость максимально возможной мощности кабеля от его координаты при расположении линий в ряд.

В работах [98–105] при проектировании новых объектов электропередачи для необходимого уровня нагрузки определяются оптимальные условия эксплуатации, такие как, вид грунтовой засыпки, расположение фаз и самих линий в земле, геометрические размеры кабелей и их расположение в блоке и т.д. Однако в данных работах не уделено внимание определению оптимального режима нагрузки для уже существующих кабельных сооружений.

Использованию СППР в системах электроснабжения посвящено ряд работ. В работе [106] авторами предложена, разработана и апробирована СППР по развитию системы электроснабжения района города. В качестве альтернатив рассматривались мероприятия по реконструкции, техническому перевооружению электрических подстанций в условиях ограниченного объема финансовых инвестиций. Для выбора наилучшей альтернативы используются уравнения по ограничению финансового объема инвестиций и минимизации затрат на ремонт.

Ларин О.М. в своей работе [107] рассматривает использование СППР для оптимизации потерь электроэнергии на предприятии. Предложенная СППР позволяет произвести выбор энергосберегающих мероприятий с учетом таких критериев, как их стоимость и эффект от их внедрения.

Авторы работ [108, 109] исследуют проблемы выбора диспетчерским персоналом оптимального режима работы системы электроснабжения. При выборе питающих источников электроснабжения определяется комбинация источников с минимальными удельными стоимостями электроэнергии. В работе предлагается использование СППР для оценки возможных режимов по критериям экономических и технических ограничений.

В основе рассматриваемых СППР [106–109] лежит оценка экономической эффективности планируемых мероприятий. В качестве критериев рассматриваются объем инвестиций, затраты на ремонт и эффект от внедрения.

Предлагаемая авторами СППР [110] на основе экспертной системы призвана решать проблемы повышения качества электроэнергии, например, путем компенсации отклонения частоты или напряжения от заданных норм, перераспределения нагрузки и т.д. Подобную задачу описывают и авторы работ

[111, 112], рассматривающие возможность использования СППР для оценки потерь в системе электроснабжения. Экспертная система основана на сборе и анализе показаний измерительных приборов и формировании цифрового двойника сети. Данный подход позволяет контролировать качество электрической энергии, а также своевременно выявлять безучётные подключения к сети, что повышает надежность и безопасность электроснабжения.

Третьяков Е.А. в работе [113] рассматривает методы интеллектуального управления режимами в системе электроснабжения железных дорог. Автором предлагается использовать центры принятия решений, основанные на измерении параметров, быстром их анализе и выдаче управляющих воздействий. Все датчики электрических и неэлектрических величин присоединены к виртуальной модели сети, которая позволяет реализовывать взаимодействие элементов сети в системе управления. Моделирование показало высокую эффективность использования подобных систем для снижения потерь электроэнергии и повышения её качества.

В рассмотренных выше работах [110–113] техническое состояние системы электроснабжения оценивается по показателям датчиков, использование которых показывает текущее состояние элементов системы. Однако при изменении распределения электроэнергии необходимо оценивать перспективное температурное состояние кабельных линий.

Управление процессом передачи электроэнергии в кабельных сооружениях в реальном времени подразумевает анализ большого числа расчетов температурного состояния кабельных линий и выбора управляющих воздействий с целью сохранения допустимого режима. Для реализации данной задачи предлагается внедрить систему поддержки принятия решений, учитывающую влияние изменения режима нагрузки на температурный режим.

Выводы по главе

Рассмотрены особенности современных распределительных сетей, способов передачи электроэнергии на территориях городов и промышленных районов. Рассмотрено влияние материала изоляции кабеля на величину длительно допустимого тока.

Выполнен анализ существующих методик определения длительно допустимых токовых нагрузок. Проанализированы различные математические модели процессов теплообмена, полученные другими авторами. Как показал анализ работ в данной области:

- модели, основанные на действующих нормативных документах, не предназначены для анализа кабельных блоков с большим количеством линий различной конфигурации;

- тепловые схемы замещения не позволяют с достаточной точностью определять максимальную температуру в кабельной линии или кабельном блоке и, следовательно, не позволяют достоверно определить величину нагрузки;

- не исследованы температурные поля в сложных кабельных сооружениях с учетом взаимовлияния кабельных линий, зависимости электрических и теплофизических характеристик от температуры, конвективного и лучистого теплообмена в трубах и канале в целом, что существенным образом влияет на конечный результат;

- не достаточно исследованы вопросы оценки динамического температурного режима кабельных сооружений, имеющего большое значение при регулировании нагрузкой и для ряда переходных процессов.

В основе большинства работ, посвященных управлению распределением электроэнергии в кабельных линиях, лежат выбор условий прокладки линий для эффективной, с точки зрения экономических затрат, их эксплуатации, а также управление режимами нагрузки на основе данных о текущем состоянии системы. В то же время не достаточно внимания уделено вопросу управления режимами нагрузки кабельных линий на основе анализа их температурного состояния.

Так как постоянный рост потребления электроэнергии требует повышения эффективности распределения электроэнергии в кабельных сооружениях, с этой целью предлагается разработать и внедрить систему поддержки принятия решений при управлении распределением электроэнергии в существующих кабельных сооружениях с возможностью оценки перспективных рабочих режимов и выбора варианта, удовлетворяющего заданным условиям.

ГЛАВА 2. РАЗРАБОТКА КОНЦЕПТУАЛЬНОЙ МОДЕЛИ СИСТЕМЫ ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ ПРИ УПРАВЛЕНИИ РАСПРЕДЕЛЕНИЕМ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ

Процесс распределения электроэнергии в кабельных сооружениях требует учета большого количества факторов, влияющих на величину длительно допустимых токов, таких как конструктивные особенности кабеля, температура окружающей среды, теплопроводность материалов кабеля, кабельного блока и грунта, геометрические особенности сооружения, уровни нагрузки кабельных линий, приоритетность распределения нагрузки по кабельным линиям и т.д. Правильное определение допустимого нагрузочного режима является необходимым условием безаварийной работы кабельного сооружения.

Изменение режимов нагрузки должно сопровождаться оценкой температурного режима, который зависит от изменения условий эксплуатации. С этой целью разработана подсистема поддержки принятия решений, включенная в состав существующей автоматизированной системы управления распределением электроэнергии, позволяющая определять допустимые режимы нагрузки на основе анализа перспективных температурных состояний.

2.1 Процесс распределения электроэнергии как объект управления

При необходимости изменения режима работы кабельных линий персонал диспетчерского центра проводит оперативные переговоры и выдает диспетчерские команды по управлению электроэнергетическим режимом энергосистемы потребителям, которых питают данные линии. Также в обязанности персонала входит обработка диспетчерских заявок организаций, эксплуатирующих оборудование, изменить режим работы линий электропередачи, и выдать указания совершить или воздержаться от совершения запрашиваемого действия.

Непосредственно передаваемой по кабельным линиям выделенной мощностью управляет потребитель, оборудование которого питается электроэнергией одной или нескольких линий в данном сооружении. Потребитель может снизить нагрузку, отключив часть оборудования, перераспределив нагрузку между источниками, если это возможно, сократив потребляющие мощности двигателей машин и т.д. У каждого потребителя существует некоторый запас мощности, который определяет коэффициент возможного снижения потребления электрической энергии.

Рассматривая процесс распределения электроэнергии в кабельном блоке как объект управления, можно выделить следующие параметры состояния объекта:

- 1) входные параметры, к которым можно отнести параметры объекта X , внешние возмущающие воздействия Z , управляющие воздействия U ;
- 2) выходные параметры Y .

К параметрам объекта относятся:

$$X = \{C^j, \lambda^j, \rho^j, G^j, K, C_i\} \quad (2.1)$$

– теплофизические (теплоемкость C^j , теплопроводность λ^j , плотность ρ^j) свойства j -го элемента конструкции кабельного блока; геометрические параметры G^j j -го элемента конструкции кабельного канала; конструкция кабельного блока K , категория потребителя, подключенного к i -й кабельной линии C_i .

Вектор внешних возмущений формируют:

$$Z = \{T_0, C^s, \lambda^s, \rho^s\} \quad (2.2)$$

– температура окружающей среды T_0 ; теплофизические свойства грунта C^s, λ^s, ρ^s .

К вектору управляющих воздействий относится:

$$U = \{I_i\} \quad (2.3)$$

– токовая нагрузка i -й кабельной линии, $i \in [1; N]$, N – количество линий.

Все эти параметры влияют в различной степени на выходные характеристики объекта управления, составляющие вектор выходного состояния:

$$Y^\phi = \{T_i^\phi, I_i^\phi\}, \quad (2.4)$$

к которому относятся максимальная температура изоляции i -й кабельной линии T_i ; ток, передаваемый по i -й кабельной линии I_i .

Значение температур определяется совокупностью ряда параметров и может быть представлено в виде:

$$T_i = F(X, Z, U) \quad (2.5)$$

где F – оператор, представляющий собой систему дифференциальных уравнений.

Таким образом, объект имеет структуру, представленную на рисунке 2.1.

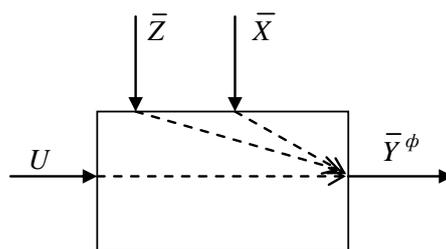


Рисунок 2.1 – Структурная схема объекта управления

2.2 Описание автоматизированной системы управления распределением электроэнергии в кабельных линиях

В существующих автоматизированных системах управления распределением электроэнергии в кабельных сооружениях лицо, принимающее решение (ЛПР), при выработке управляющих воздействий основывается на значениях длительно допустимых токов, определенных по нормативным документам или из проектных данных, которые не учитывают изменение условий эксплуатации.

При оперативном управлении режимами кабельных линий для совокупности потребителей требуется оценка теплового состояния кабельных линий для действующей или планируемой нагрузки и выбор управляющих воздействия для сохранения допустимых условий эксплуатации кабелей. В силу того, что кабельные сооружения имеют уникальные конструкцию, совокупность оборудования и условия их эксплуатации, регулирующий работу кабельных линий персонал сталкивается со сложностями определения оптимальных

вариантов загрузки кабельного канала в целом и выбора допустимых значений токовых нагрузок для каждой линии. С этой целью предложено разработать и внедрить в существующую автоматизированную систему управления процессом распределения электроэнергии в кабельных блоках систему поддержки принятия решений (СППР). СППР является обслуживающей подсистемой, позволяющей ЛПР, выбрать оптимальные управляющие воздействия [114].

Разработанная схема автоматизированной системы управления, включающей в себя СППР, представлена на рисунке 2.2.

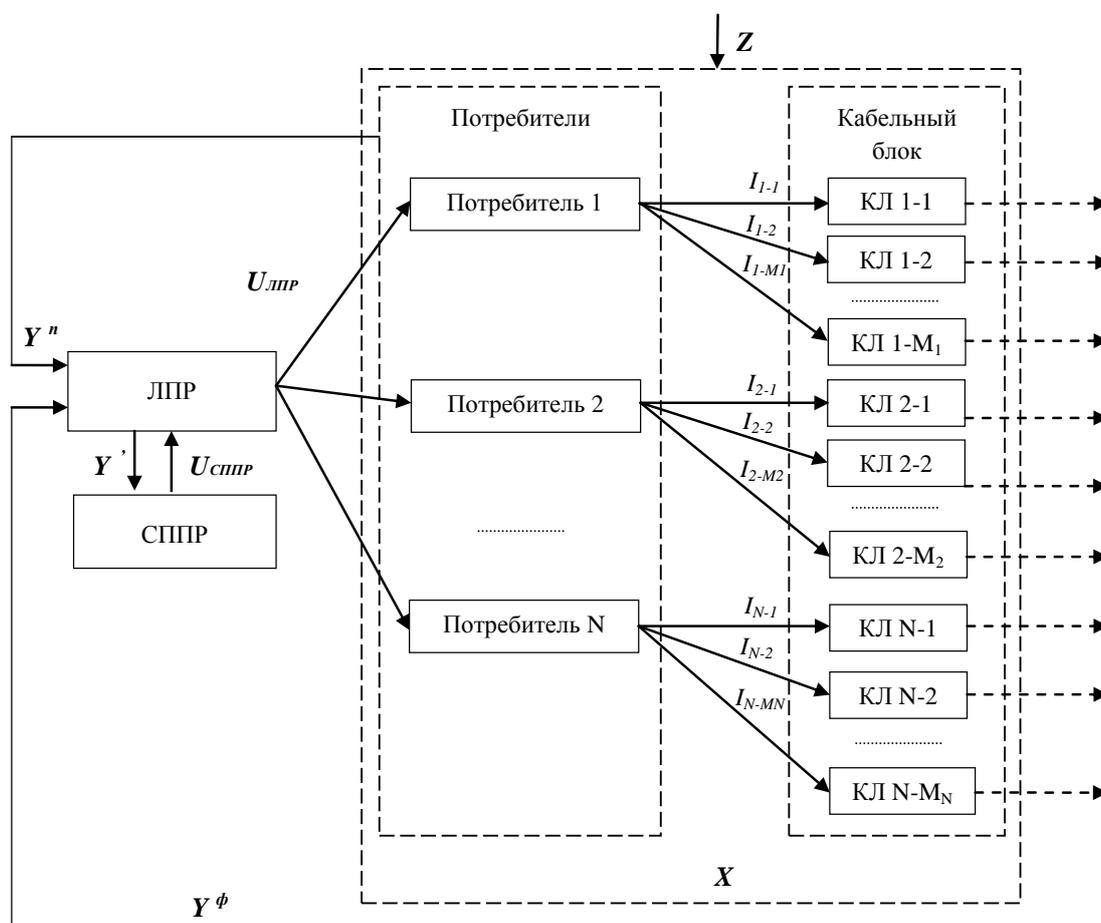


Рисунок 2.2 – Структурная схема автоматизированной системы управления распределением электроэнергии в кабельном блоке

В процессе эксплуатации кабельного блока ЛПР фиксирует изменение фактических значений выходных величин Y^ϕ (при помощи датчиков) или получает запрос от потребителей на изменение текущих нагрузок в виде планируемых значений рабочих токов Y^n . Для проверки допустимости новых

нагрузок Y' с точки зрения температурных ограничений ЛПР обращается к СППР, которая, используя математические модели, рассчитывает температурное состояние элементов конструкции кабельных линий для нового режима нагрузки. В случае фиксации в новом рабочем режиме точек перегрева, СППР определяет рекомендованные управляющие воздействия по снижению нагрузки $U_{СППР}$. При определении уровня снижения нагрузки СППР учитывает диапазоны возможного изменения потребляемой мощности, согласованные с потребителями. По результатам работы СППР ЛПР выдает потребителям утвержденные управляющие воздействия $U_{ЛПР}$. Для проверки выполнения управляющих воздействий контролируются выходные параметры Y^{ϕ} .

2.3 Постановка задачи поиска оптимального значения токовых нагрузок

В процессе распределения электроэнергии требуется обеспечить допустимые температурные режимы работы кабельных линий, а также обеспечить потребителей необходимым объемом электрической энергии.

Для оптимального распределения электрической энергии в кабельном блоке необходимо соблюдать следующие условия:

1) температура изоляции кабелей в месте контакта с токопроводящей жилой T_i не должна превышать максимально допустимую для данного вида изоляции T_{max} :

$$T_i < T_{max} \quad (2.6)$$

2) величина передаваемой по линиям мощности соответствует спросу потребителей или минимально снижена с учетом их категории в случаях возможного перегрева. Для определения суммарного относительного снижения значений рабочих токов было предложено использовать параметр:

$$K(I_i) = \sqrt[N]{\prod_{i=1}^N \frac{(I_i + 1)}{I_i^{\phi}}} \quad (2.7)$$

где I_i – значения рабочих токов, соответствующие новому нагрузочному режиму, А; I_i^ϕ – значения рабочих токов, соответствующие режиму работы линий до изменения нагрузки, А. Использование относительного снижения обусловлено большой разницей в абсолютных значениях рабочих токов линий. Добавление 1 к величине нового значения тока I_i позволяет учесть линии, рекомендуемые к полному выключению. Параметр $K(I_i)$ имеет максимальное значение при сохранении нагрузки относительно величины I_i^ϕ неизменной.

Следовательно, в качестве целевой функции целесообразно принять параметр сохранения нагрузки:

$$J(U) = K(I_i) \rightarrow \max. \quad (2.8)$$

На управляющие воздействия накладывается ряд технологических ограничений:

1) изменение токовых нагрузок линий происходит в диапазоне возможных значений, согласованных с потребителем и обусловленных технологическими возможностями:

$$I_{i\min} \leq I_i \leq I_{i\max} \quad (2.9)$$

где $I_{i\min}$, $I_{i\max}$ – минимальный и максимальный возможные рабочие токи i -й линии соответственно, А;

2) вынужденное снижение токовой нагрузки должно учитывать категорию потребителей, т.е. для потребителей первой категории ток не должен снижаться:

$$I_i|_{C_i=1} = I_i^\phi \quad (2.10)$$

где C_i – категория потребителя i -й кабельной линии.

Задача управления процессом распределения электрической энергии включает в себя задачу определения оптимальных значений токовых нагрузок и может быть сформулирована как:

$$\left\{ K(I_i) = \sqrt[N]{\prod_{i=1}^N \frac{(I_i + 1)}{I_i^\phi}} \rightarrow \max_{I_i} \left\{ \begin{array}{l} T_i = F(X, Z, U); \\ T_i < T_{\max}; \\ I_i \in [I_{i\min}; I_{i\max}]; \\ I_i|_{C_i=1} = I_i^\phi \end{array} \right\} \rightarrow I_i^{opt} \quad (2.11)$$

Таким образом, задача заключается в поиске значений управляющих воздействий I_i , обеспечивающих значение температуры изоляции в допустимых пределах, а нагрузку линий максимально близкой к требуемым значениям.

2.4 Концептуальная модель системы поддержки принятия решений при управлении распределением электроэнергии

Система поддержки принятия решений призвана обеспечить скорость и точность определения управляющих воздействий.

На рисунке 2.3 представлена архитектура предлагаемой СППР.

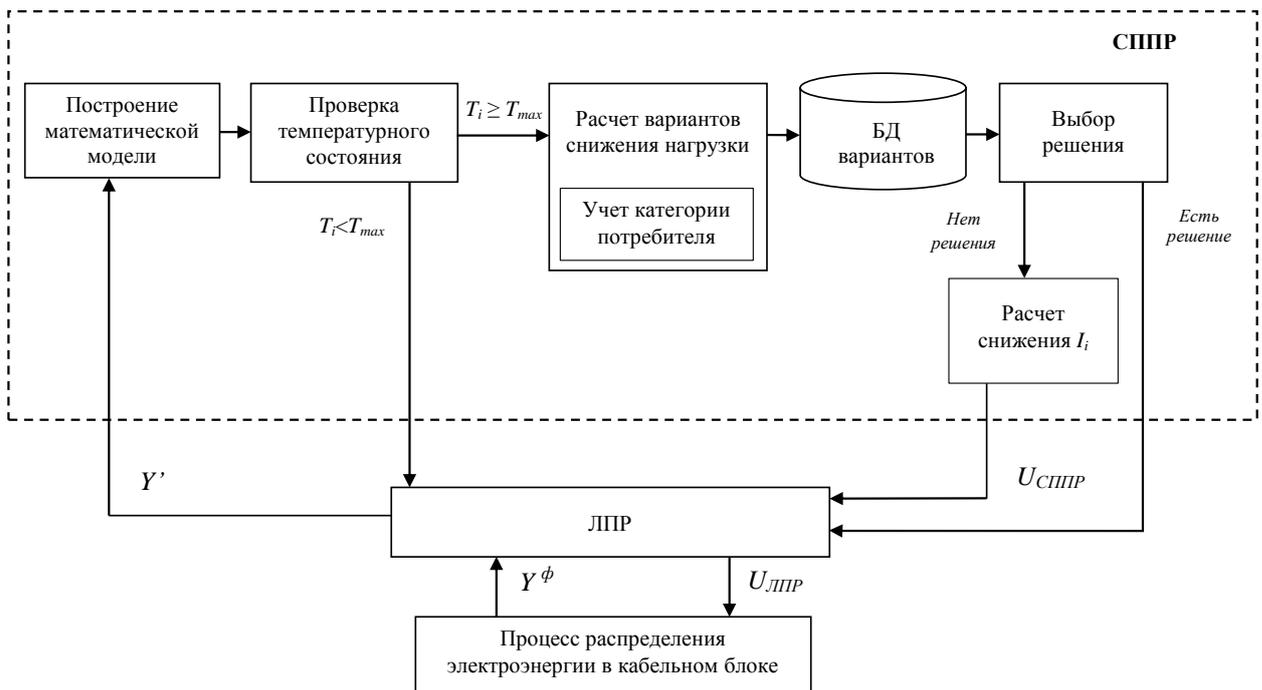


Рисунок 2.3 – Концептуальная модель системы поддержки принятия решений

ЛПР обрабатывает данные о повышении потребления электроэнергии, пришедшие с датчиков токов и температур, и запросы потребителей

электроэнергии на подключение новых линий в действующий блок или увеличение объемов потребления существующими линиями, Y^{ϕ} .

Для оценки безопасности нового нагрузочного режима ЛПР необходимо провести анализ температурного состояния кабельных линий, который установится в результате изменения нагрузки. При внедрении СППР в кабельный блок, при изменении конструктивных особенностей блока или объектов, расположенных вблизи него, необходимо выполнить построение математической модели процессов теплопереноса в данном объекте. Далее используя математическую модель, СППР рассчитывает температуры жил кабелей для планируемого рабочего режима (T_i) и сравнивает их с температурным критерием, определенным для данного вида изоляции T_{\max} .

В случае если выполняется условие ограничения температур, новый режим определяется как допустимый и не требует формирования управляющих воздействий. При фиксации возможного превышения температурного критерия СППР рассчитывает все возможные варианты снижения нагрузки, допустимые для потребителей рассматриваемого кабельного сооружения, и заполняет ими базу данных. При расчете вариантов учитывается категория потребителей. В первую очередь проверяется возможность обеспечения поддержания допустимого температурного режима за счет потребителей низшей категории, снижение потребляемой нагрузки которых не приводит к существенным изменениям условий эксплуатации оборудования. Для каждого потребителя есть свой возможный уровень снижения потребления электроэнергии, который должен учитываться при расчете. Далее при необходимости проверяются варианты снижения потребления электроэнергии потребителями более высоких категорий. Потребителям первой категории величина нагрузки не может быть изменена.

Полученные варианты сортируются по параметру относительного снижения рабочих токов $K(I_i)$, при этом отбрасываются варианты, для которых получившиеся температуры превышают допустимые значения. В качестве рекомендованных управляющих воздействий СППР выдает диспетчеру значения

нагрузок линий, которые необходимо установить для недопущения случая перегрева кабеля $U_{СППР}$. Эти значения выбираются из условия максимального сохранения потребления электроэнергии всеми линиями. Если удовлетворяющего условиям варианта снижения нагрузок не существует, СППР рассчитывает, на сколько необходимо ограничить рост потребления электроэнергии линиями, на которых он зафиксирован, вплоть до полного их выключения.

При необходимости изменить нагрузку каких-либо линий с целью сохранения допустимого режима работы блока персонал диспетчерской службы передает в виде диспетчерской команды новые значения рабочих токов (потребляемой мощности). Эксплуатирующие кабельное оборудование организации обеспечивают нагрузку, не превышающую указанных значений. Частично новый нагрузочный режим контролируется с помощью датчиков температуры и трансформаторов тока на тех линиях, где они установлены. Так как выбор управляющих воздействий зависит от текущего режима и перспективных загрузок, меняющихся со временем, процесс анализа будет уникальным в каждом случае.

Выводы по главе

Процесс распределения электроэнергии в кабельном сооружении описан как объект управления, определены параметры объекта.

Сформулирована задача управления процессом распределения электроэнергии как задача определения оптимальных значений токовых нагрузок линий. Обозначены условия выбора наилучшего варианта режима нагрузки, который соответствует ограничениям по температуре работы изоляции кабелей и позволяет максимально сохранить требуемую передаваемую мощность.

Разработана структура СППР, работающая как подсистема автоматизированной системы управления распределением электроэнергии в кабельном сооружении.

Разработанная СППР позволяет формировать варианты возможных режимов нагрузки кабельных линий и выбирать из них оптимальный вариант на основе анализа температурных состояний, которые соответствуют планируемым режимам работы, что увеличивает эффективность распределения электроэнергии в кабельных линиях.

ГЛАВА 3. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ПЕРЕДАЧИ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ В КАБЕЛЬНОМ БЛОКЕ

Для реализации задачи управления необходим универсальный инструмент, позволяющий достоверно описывать термическое состояние кабельного блока и его отдельных элементов. Проведение серии натурных испытаний позволило бы наиболее точным способом связать токи кабельных линий и рабочие температуры их элементов, однако это потребовало бы больших временных и финансовых затрат. Получить достоверное распределение температуры в исследуемом объекте возможно при помощи методов математического моделирования.

3.1 Математическая модель процессов тепломассопереноса в кабельном блоке

В данной главе представлена двухмерная нестационарная математическая модель процессов тепломассопереноса в кабельном блоке и ее численная реализация методом конечных элементов.

3.1.1 Описание объекта моделирования

В данной работе рассматривается подземный кабельный блок, расположенный на глубине 900 мм, представленный на рисунке 3.1.



Рисунок 3.1 – Схема кабельного блока

Блок представляет собой бетонный монолит, в котором размещены полиэтиленовые трубы в количестве 18-ти. В трубах расположены кабельные линии, включающие в себя три кабеля АПВВнг-LS с сечением жилы 150 мм^2 и изоляцией из сшитого полиэтилена, расположенных треугольником. Трубы заполнены воздухом.

Линии с 1 по 12 на напряжение 6 кВ, линии с 13 по 18 на напряжение 35 кВ. Высота кабельного блока составляет 955 мм, ширина 1480 мм. Трубы имеют внутренний диаметр 160 мм для кабеля на напряжение 6 кВ и 225 мм для кабеля на напряжение 35 кВ. На рисунке 3.2 представлена конструкция кабеля.



Рисунок 3.2 – Конструкция силового кабеля АПВВнг-LS

Токопроводящая жила выполнена из алюминия, экран по жиле и изоляции – из полупроводящего сшитого полиэтилена, обмотка – из электропроводящей ленты, металлический экран состоит из медных проволок и ленты, внутренняя и внешняя оболочка – из поливинилхлоридного пластика пониженной пожароопасности. В таблице 3.1 приведены размеры конструктивных элементов силового кабеля.

Таблица 3.1 – Номинальные размеры элементов конструкции силового кабеля

Размер элемента конструкции кабеля	Кабель на напряжение 35 кВ	Кабель на напряжение 6 кВ
Площадь сечения жилы, мм ²	150	150
Площадь сечения экрана, мм ²	35	35
Толщина полупроводящего экрана, мм	0,6	0,6
Толщина изоляции, мм	9	2,9
Толщина обмотки, мм	0,4	0,2
Толщина медной ленты, мм	0,1	0,1
Толщина внутренней оболочки, мм	2	1,7
Толщина стеклоленты, мм	0,4	0,4
Толщина внешней оболочки, мм	3,2	2,5
Расчетный диаметр кабеля, мм	48,8	33,6

Теплофизические свойства материалов конструкции кабельного блока и грунта принимаются постоянными и представлены в таблице 3.2.

Таблица 3.2 – Теплофизические свойства материалов

Материал	Плотность, ρ (кг/м ³)	Удельная теплоемкость, C (Дж/(кг·С))	Теплопроводность, λ (Вт/(м·С))
Алюминий	2698	930	237
Полупроводящий сшитый полиэтилен	1050	2250	0,33
Сшитый полиэтилен	942	2300	0,35
Электропроводящая лента	980	1340	0,14
Медь	8920	385	401
Стеклолента	1650	1170	0,043
ПВХ пониженной пожароопасности	1620	1000	0,17
Бетон	1400	750	0,6
Полиэтилен низкого давления (трубы)	930	2600	0,4
Железобетон	2500	840	1,55
Песок	1900	800	0,35
Грунт	2000	2500	0,833

В задачах с бесконечными объемами (массив земли, массив воздуха) важным является разумное ограничение рассматриваемой области. Для задачи теплопроводности в массиве земли на бесконечном удалении от источников тепла задается нулевой поток тепла от объекта. В работах показано, что для задачи схожей конфигурации достаточно учесть 10-метровый участок грунта [115]. При этом погрешность значений теплового поля менее 1%, что достаточно для решения инженерной задачи.

3.1.2 Описание математической модели

Математическая модель тепломассообмена основывается на законах сохранения массы, количества движения и энергии.

При разработке математической модели процессов тепломассопереноса в подземном кабельном блоке сделаны следующие допущения:

- кабельные линии представляются в виде линейных бесконечно длинных элементов с постоянным расположением внутри блока, что позволяет рассматривать поперечное сечение блока в двумерной декартовой системе координат;
- в трубе реализуется ламинарный режим движения воздуха;
- воздух, заполняющий полость трубы, удовлетворяет приближению Буссинеска;
- воздушная среда считается прозрачной, а твердые поверхности, участвующие в теплообмене – серыми поверхностями;
- на границах раздела разнородных сред реализуется условие идеального теплового контакта;
- градиент температуры в массиве земли на удаленном расстоянии от кабельного блока равен нулю;
- теплофизические характеристики всех элементов конструкции постоянны, кроме токопроводящих жил.

С учетом сделанных допущений система дифференциальных уравнений имеет вид:

– уравнения движения для воздуха

$$\rho_0 \left(\frac{\partial v_x}{\partial t} + v_x \frac{\partial v_x}{\partial x} + v_y \frac{\partial v_x}{\partial y} \right) = -\frac{\partial P}{\partial x} + \mu_0 \left(\frac{\partial^2 v_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v_x}{\partial y^2} \right) \quad (3.1)$$

$$\rho_0 \left(\frac{\partial v_y}{\partial t} + v_x \frac{\partial v_y}{\partial x} + v_y \frac{\partial v_y}{\partial y} \right) = -\frac{\partial P}{\partial y} + \mu_0 \left(\frac{\partial^2 v_y}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v_y}{\partial y^2} \right) + \rho_0 g \beta (T - T_0) \quad (3.2)$$

– уравнение неразрывности для воздуха

$$\frac{\partial \rho_0}{\partial t} + v_x \frac{\partial \rho_0}{\partial x} + v_y \frac{\partial \rho_0}{\partial y} = -\rho_0 \left(\frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_y}{\partial y} \right) \quad (3.3)$$

– уравнение энергии для воздуха

$$\rho_0 c_0 \left(\frac{\partial T}{\partial t} + v_x \frac{\partial T}{\partial x} + v_y \frac{\partial T}{\partial y} \right) = \lambda_0 \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) \quad (3.4)$$

– уравнение теплопроводности для токопроводящей жилы

$$\lambda_{\text{тпжс}} \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) + q_v = c_{\text{тпжс}} \rho_{\text{тпжс}} \frac{\partial T}{\partial t} \quad (3.5)$$

– уравнение теплопроводности для твердых элементов конструкции

$$\lambda_i \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) = c_i \rho_i \frac{\partial T}{\partial t}, \quad (3.6)$$

где x, y – декартовы координаты; v_x, v_y – компоненты вектора скорости воздуха; t – время; $\rho_0, \mu_0, \lambda_0, c_0$ – плотность, динамическая вязкость, теплопроводность, теплоемкость воздуха; T – температура; T_0 – температура равная 20°C ; P – отклонения давления воздуха от гироскопического; g – ускорение свободного падения; β – температурный коэффициент плотности воздуха; $\lambda_{\text{тпжс}}, c_{\text{тпжс}}, \rho_{\text{тпжс}}$ – теплопроводность, теплоемкость, плотность токопроводящей жилы; q_v – мощность внутреннего источника тепла; λ_i, c_i, ρ_i – теплопроводность, теплоемкость, плотность твердых тел, кроме ТПЖ.

Уравнение для плотности воздуха:

$$\rho_0 = \rho_0 [1 - \beta(T - T_0)] \quad (3.7)$$

где ρ_0 – плотность воздуха при температуре T_0 .

Источник внутренних потерь q_v определяется суммой потерь в токопроводящей жиле и металлическом экране:

$$q_V = q_{тпж} + q_{экр}, \quad (3.8)$$

которые определяются интегральным соотношением:

$$q_{тпж} = \iint_{S_{тпж}} \frac{I_{тпж}^2}{\sigma_{тпж}} dS \quad (3.9)$$

$$q_{экр} = \iint_{S_{экр}} \frac{I_{экр}^2}{\sigma_{экр}} dS, \quad (3.10)$$

где $I_{тпж}$, $I_{экр}$ – номинальные токи жилы и металлического экрана; $\sigma_{тпж}$, $\sigma_{экр}$ – коэффициенты удельной электропроводности ТПЖ и металлического экрана; $S_{тпж}$, $S_{экр}$ – площадь сечения ТПЖ и металлического экрана.

Система уравнений (3.1)–(3.10) замыкалась следующими граничными условиями:

1. На внутренних поверхностях труб и на поверхности кабелей задаются нулевые компоненты скорости;

2. Граничные условия по температуре задаются в следующем виде:

– на поверхности земли – граничное условие конвективного теплообмена

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial n} = \alpha(T - T_{cp}), \quad (3.11)$$

где α – коэффициент теплоотдачи с поверхности земли, равен 5 Вт/(м²·С); T_{cp} – температура окружающей среды;

– на других границах массива земли задаются адиабатические условия теплообмена

$$\frac{\partial T}{\partial n} = 0; \quad (3.12)$$

– на твердых контактах разнородных сред задаются условия 4-го рода и равенство температур

$$\lambda_i \frac{\partial T}{\partial n} = \lambda_j \frac{\partial T}{\partial n} \quad (3.13)$$

$$T_i = T_j, \quad (3.14)$$

где i и j – конструктивные элементы кабельного блока и грунт, $i \neq j$;

– с учетом излучения на поверхности силового кабеля задается граничное условие радиационного теплообмена

$$\lambda_{\kappa} \frac{\partial T}{\partial x} = \lambda_{\epsilon} \frac{\partial T}{\partial x} + E_{\text{изл}} \quad (3.15)$$

$$T_{\kappa} = T_{\epsilon}, \quad (3.16)$$

где λ_{κ} – теплопроводность внешней оболочки кабеля; $E_{\text{изл}}$ – плотность потока излучения; T_{κ} и T_{ϵ} – температуры поверхности кабеля и воздуха соответственно.

Плотность потока излучения определяется для каждого отдельного элемента поверхности как разность эффективного $E_{\text{эф}}$ и падающего $E_{\text{пад}}$ потоков:

$$E_{\text{изл}} = E_{\text{эф}} - E_{\text{пад}} \quad (3.17)$$

Плотность эффективного потока в свою очередь определяется:

$$E_{\text{эф}} = E_{\text{соб}} + (1 - \epsilon_i) E_{\text{пад}} \quad (3.18)$$

где ϵ_i – степень черноты i -го элемента поверхности; $E_{\text{соб}}$ – собственное излучение поверхности; $E_{\text{пад}}$ – падающее на поверхность излучение.

Собственное и падающее излучение определяются соответственно:

$$E_{\text{соб}} = \epsilon_i \sigma T_i^4 \quad (3.19)$$

$$E_{\text{пад}} = \sum E_{\text{эф}_j} \varphi_{ij} \quad (3.20)$$

где T_i – температура i -го элемента поверхности; σ – постоянная Стефана-Больцмана, равная $5,67 \cdot 10^{-8} \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}^4)$; φ_{ij} – угловые коэффициенты.

В результате подстановки плотность излучения с поверхности кабеля может быть определена по формуле:

$$E_{\text{изл}} = \epsilon_i \sigma T_i^4 - \epsilon_i \sum E_{\text{эф}_j} \varphi_{ij} \quad (3.21)$$

Угловые коэффициенты для двумерной модели рассчитываются методом натянутых нитей.

3.1.3 Численная реализация модели

Сформулированная система дифференциальных уравнений (3.1-3.6), дополненная граничными условиями решалась численным методом конечных

элементов (МКЭ). Для дискретизации счетной области использовался трехузловой плоский симплекс-элемент. Для каждого симплекс-элемента задавалась своя локальная координатная система и интерполяционная функция. Общая схема одной счетной итерационной процедуры для воздуха выглядит следующим образом:

1. Уточняются некоторые свойства воздуха (плотность), на основании предыдущей итерации.

2. Поочередно решаются компонентные уравнения движения с использованием обновленных значений давления и расходов воздуха через грани конечных элементов.

3. Корректируется значение давления с использованием уточненного поля скоростей и массовых расходов.

4. Уточняется массовый расход через грани конечных элементов, давление и компоненты скорости с учетом корректировки давления предыдущего шага.

5. Решается уравнение энергии и излучения. Для решения задачи излучения используется дополнительная вложенная итерационная процедура.

6. Проверяется критерий сходимости (базовые невязки).

Данная процедура повторяется некоторое количество раз до тех пор, пока критерий сходимости не станет меньше заранее установленного малого значения. В качестве базовых невязок используются итерационные разницы основных узловых значений, таких как скорости, температура, давление.

Для твердых материалов решается только задача теплопроводности (пункты 5 и 6).

В итоге решение представляет собой совокупность значений в узловых переменных (компоненты скорости, температуры, давления, свойств материалов), реализующих скалярные, векторные и тензорные поля рассматриваемой задачи.

В качестве программного пакета, реализующего вышеописанный метод, применялся программный продукт ANSYS Fluent.

Параметры сходимости численного метода

Описанная ранее процедура численного решения носит итерационный характер. Количество итераций обычно заранее неизвестно и требует дополнительного уточнения. На рисунке 3.3 приведены изменения некоторых узловых параметров задачи (температуры, скалярной скорости) в зависимости от количества счетных итераций. По графикам видно, что стабилизация параметров происходит после 1250 итерации.

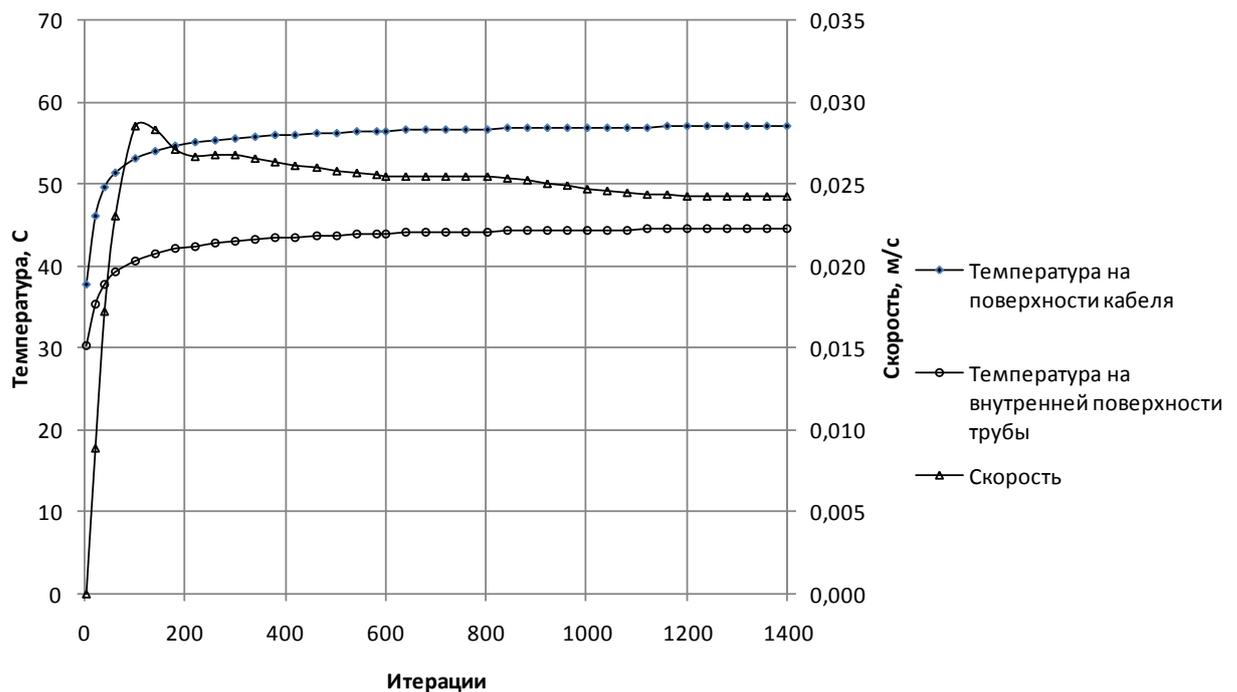


Рисунок 3.3 – Сходимость задачи по итерациям

Исследование параметров дискретизации модели

Исследования показывают, что размеры конечных элементов сетки достаточно сильно влияют как на скорость счета, так и на точность получаемых результатов [116]. Особенно это актуально для областей, в которых определены уравнения (3.1–3.3), т.е. для подвижных сред. В исследуемой задаче содержатся объекты с резко отличающимися геометрическими размерами. Данное обстоятельство не позволяет создать равноразмерную сетку с малым количеством элементов. Учитывая эти особенности, в данной задаче используется неструктурированная сетка с трехузловыми элементами.

На рисунке 3.4 представлен график сходимости решения задачи от числа элементов сетки.

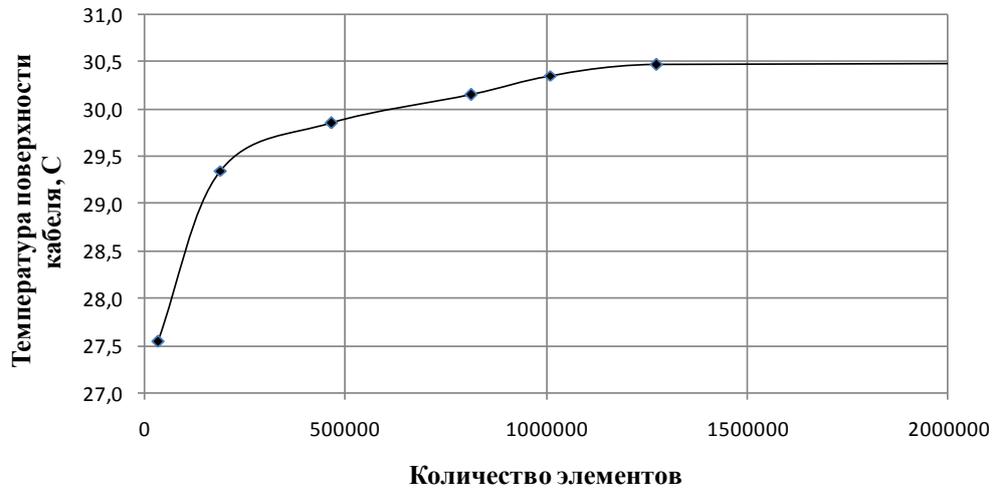


Рисунок 3.4 – График сходимости решения в зависимости от числа элементов сетки

Как видно из результатов при сетке с общим числом элементов 1275000 температуры в узлах принимают значения, которые при дальнейшем уменьшении размеров элементов сетки меняются менее чем на 1 %. Следовательно, данную степень разбиения можно считать достаточной для получения адекватных результатов.

На рисунке 3.5 приведены фрагменты сетки. Дальнейшее увеличение количества элементов не привело к изменению результатов, однако существенно замедлило счет.

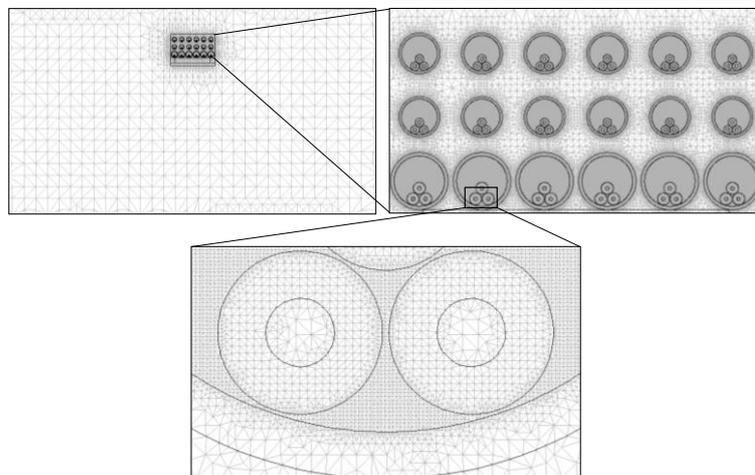


Рисунок 3.5 – Фрагменты сетки

Упрощение математической модели

Конструкция кабеля АПвВнг-LS состоит из множества слоев. При численном моделировании сложных кабельных блоков, состоящих из большого числа кабельных линий, целесообразным является замена многослойной конструкции кабеля на эквивалентный слой с усредненными параметрами.

Выражения для определения эквивалентных параметров имеют следующий вид:

$$\lambda_{\text{экв}} = \frac{\ln\left(\frac{d_n}{d_1}\right)}{\sum_1^n \frac{1}{\lambda_i} \ln\left(\frac{d_i}{d_{i-1}}\right)}, \quad c_{\text{экв}} = \frac{\ln\left(\frac{d_n}{d_1}\right)}{\sum_1^n \frac{1}{c_i} \ln\left(\frac{d_i}{d_{i-1}}\right)}, \quad \rho_{\text{экв}} = \frac{\ln\left(\frac{d_n}{d_1}\right)}{\sum_1^n \frac{1}{\rho_i} \ln\left(\frac{d_i}{d_{i-1}}\right)}, \quad (3.22)$$

где i – номер слоя, d_i – диаметр i -го слоя, λ_i , c_i , ρ_i – теплопроводность, удельная теплоемкость, плотность i -го слоя.

Так как в эквивалентном слое отсутствует экран, мощность тепловыделений экрана необходимо добавить к мощности тепловыделений жилы. Поправочный коэффициент для определения общей тепловой мощности (экран и жила) определяется из соотношения площадей сечения жилы и экрана [117]:

$$k = \frac{35}{150} = 0,23 \quad (3.23)$$

В таблице 3.3 представлены значения максимальной температуры в кабельном канале для различной токовой нагрузки при рассмотрении многослойной конструкции кабеля и кабеля с эквивалентным слоем.

Таблица 3.3 – Значения максимальной температуры

Ток, А	Температура на жиле при многослойной конструкции, °С	Температура на жиле при эквивалентном слое, °С	Погрешность, %
50	23,9	24	0,4
100	34,6	35,2	1,7
150	52,2	53	1,5
200	73,8	76	2,9

На рисунке 3.6 представлены температурные поля в кабельной линии при использовании многослойной конструкции и эквивалентного слоя.

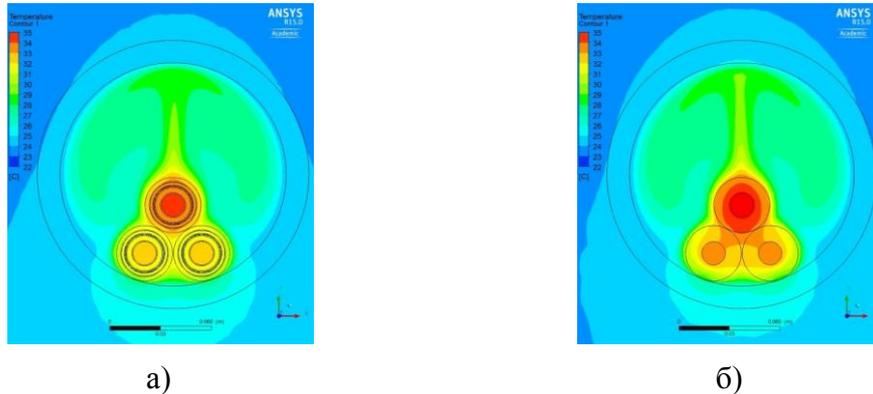


Рисунок 3.6 – Температурные поля в кабельной линии при а) многослойной структуре и б) эквивалентном слое

В таблице 3.4 представлены теплофизические свойства эквивалентного слоя.

Таблица 3.4 – Теплофизические характеристики эквивалентного слоя кабеля

Свойства для кабеля на напряжение:	Плотность, ρ ($\text{кг}/\text{м}^3$)	Удельная теплоемкость, C ($\text{Дж}/(\text{кг}\cdot\text{С})$)	Теплопроводность, λ ($\text{Вт}/(\text{м}\cdot\text{С})$)
6 кВ	1103	1180,14	0,18
35 кВ	1000	1557,24	0,22

Как видно из полученных результатов, значения максимальной температуры и распределение температуры по кабельной линии для рассматриваемых вариантов расчета согласуются достаточно хорошо. Следовательно, можно сделать вывод о допустимости использования конструкции с эквивалентным слоем для построения расчетных областей кабельных блоков.

Обоснование допущения о двумерной постановке задачи

Использование двумерной модели при исследовании температурных режимов работы длинной подземной кабельной линии позволяет значительно сократить требуемые счетные ресурсы, а также время счета. С целью проверки возможности использования двумерной постановки задачи было произведено сравнение результатов, полученных с помощью двумерной и трехмерной моделей

[118]. На рисунке 3.7 представлены температурные поля, полученные для одной и той же нагрузки на линии при разной реализации задачи.

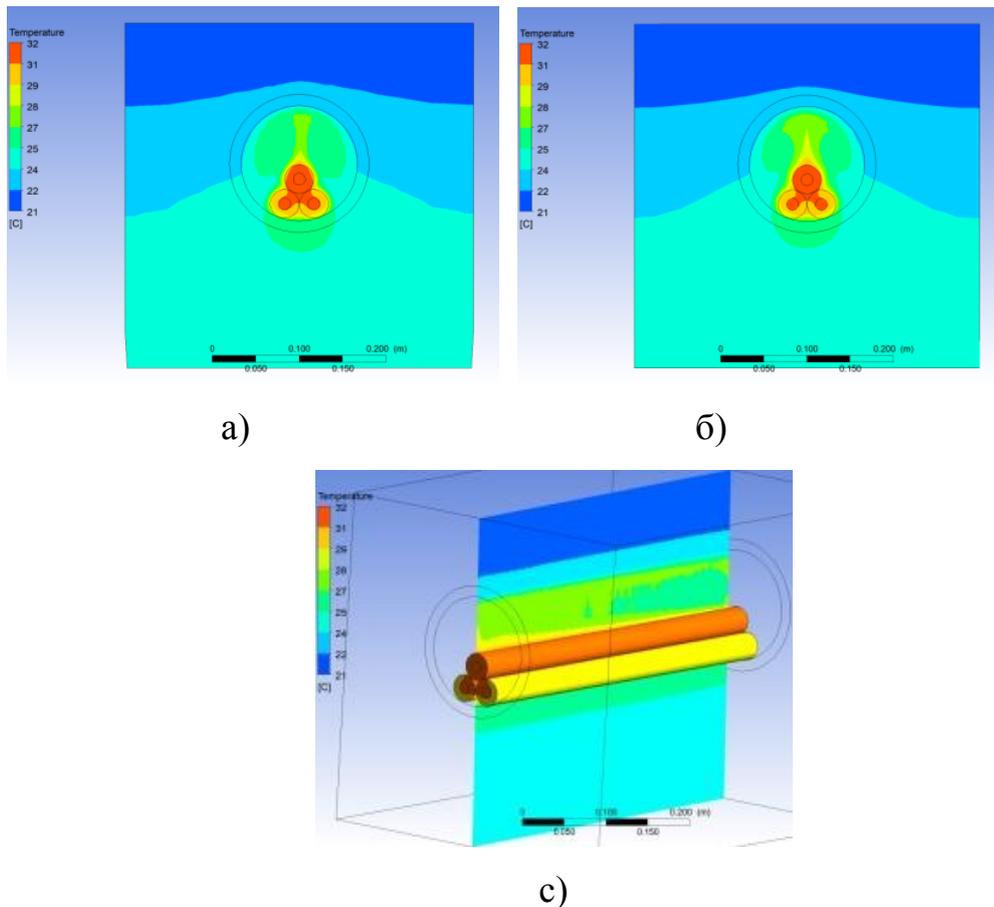


Рисунок 3.7 – Распределение температуры: а) в поперечном сечении кабельного блока в 2D; б) в поперечном сечении кабельного блока в 3D; в) вдоль кабельного блока в 3D

Как видно из полученных результатов, температурные поля в поперечном сечении получились идентичные. Распределение температуры вдоль кабельной линии равномерное, температуры частей конструкций кабелей одинаковые по всей длине. Следовательно, можно сделать вывод о допустимости использования двумерных моделей для исследования сложных кабельных конструкций.

Анализ тепловых потерь в токопроводящих металлических элементах конструкции кабельной линии

Нагрев кабеля при протекании электрического тока возникает не только вследствие тепловых потерь в токопроводящей жиле, но и при наведении токов в электрическом экране, а также за счет диэлектрических потерь в изоляции [119].

Для кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена на напряжение 6 кВ и выше диэлектрические потери в изоляции пренебрежимо малы [120]. Однако необходимо учитывать потери в металлическом экране.

На рисунке 3.8 представлены полученные зависимости максимальной температуры на поверхности жилы от величины тока с учетом и без учета потерь тепла в медном экране.

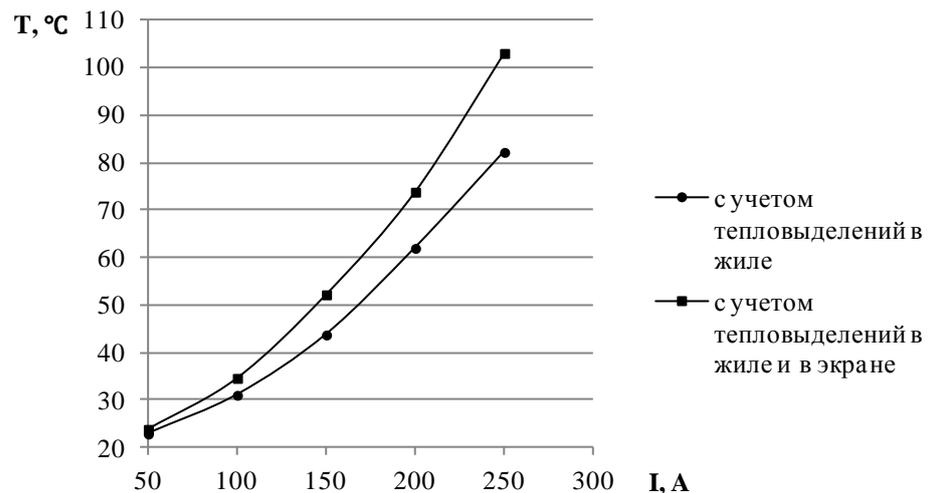


Рисунок 3.8 – Зависимости максимальной температуры на жиле кабеля от тока

Из полученных данных видно, что существенный процент нагрева кабеля составляет нагрев от экрана, и влияние его увеличивается с ростом тока. При определении номинальных токовых нагрузок необходимо учитывать тепловыделения в экранах для обеспечения допустимых температур в изоляции кабеля.

Дополнительное влияние на нагрев кабеля оказывает увеличение сопротивления жилы при росте температуры, вызванном протеканием электрического тока [121]. Зависимость сопротивления жилы кабеля от температуры можно определить, как:

$$\rho = \rho_{20}(1 + \alpha(T - 20^\circ)), \quad (3.24)$$

где ρ_{20} удельное сопротивление материала жилы при 20°C ; α – температурный коэффициент сопротивления.

При увеличении температуры жилы увеличивается сопротивление и возрастают тепловые потери в кабеле, которые приводят к росту температуры изоляции.

На рисунке 3.9 представлены зависимости температуры поверхности жилы кабеля от тока без учета и с учетом зависимости величины удельного сопротивления от температуры.

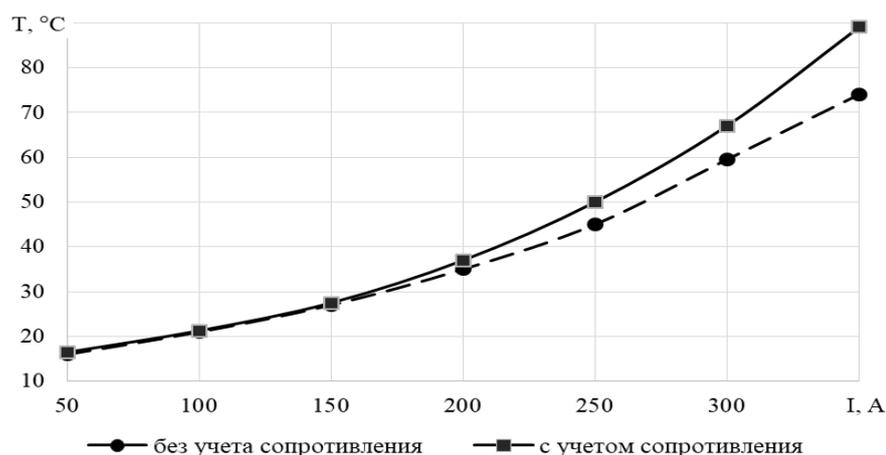


Рисунок 3.9 – Зависимость температуры на поверхности жилы от тока без учета и с учетом изменения сопротивления

На рисунке 3.9 видно, что при токе 250 А отличие по температуре на поверхности токопроводящей жилы без учета и с учетом изменения сопротивления составляет 5°C, и при дальнейшем увеличении нагрузки разница возрастает до 17°C. Полученные результаты определяют необходимость учета изменения сопротивления жилы кабеля при расчете режимов работы линий.

3.1.4 Проверка адекватности счетной модели

Для подтверждения достоверности полученных численных результатов моделирования процесса тепломассопереноса было проведено сравнение с данными натуральных экспериментов.

Экспериментальное исследование нагрева кабеля в лабораторных условиях

Целью экспериментального исследования являлось определение температуры кабеля в различных точках конструкции в условиях заданной

нагрузки и сравнение полученных результатов с результатами численного моделирования.

В лабораторном помещении площадью 36 м² и объемом 108 м³ проводились испытания по нагреву кабеля с использованием лабораторного автотрансформатора (ЛАТР), трансформатора тока и измерителей температуры. Исследовался образец кабеля АПвП-1х240-10 кВ с изоляцией из сшитого полиэтилена, алюминиевой жилой сечением 240 мм². Длина образца 1,6 метра. Во время испытания кабель располагался на двух кронштейнах на расстоянии 700 мм от пола и на 300 мм от столешницы с испытательным оборудованием. На рисунке 3.10 показана схема подачи и измерения величины переменного тока промышленной частоты, протекающего по ТПЖ кабеля. Регулируемое напряжение от лабораторного автотрансформатора (ЛАТР) подается на трансформатор Тр. Измерение тока проводилось токоизмерительными клещами FLUKE 303 с пределом допустимой основной погрешности $\pm 1,8\%$.

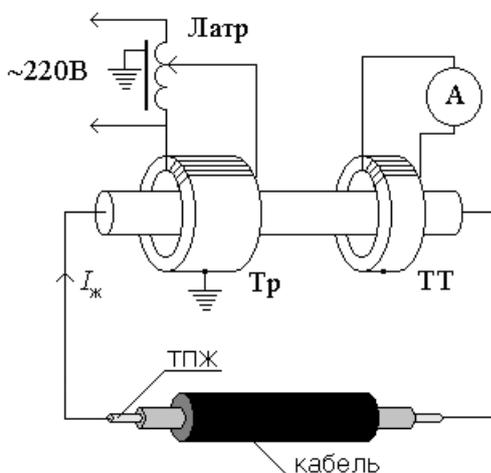


Рисунок 3.10 – Схема подачи тока

Металлические оболочки образца не заземлялись, поэтому потерями в них можно пренебречь. Диэлектрические потери в изоляции также отсутствуют. В ходе исследования на кабель подавался ток, соответствующий длительно допустимому для данной марки кабеля, равный 585 А, и измерялась температура на поверхности жилы, металлической оболочки и поверхности кабеля. Всего было проведено 15 испытаний. Для приведения в тепловой контакт термопар и

соответствующих элементов конструкции кабеля в центральной части образца в оболочке были сделаны отверстия. В качестве измерителя температур жилы и металлической оболочки использовался двухканальный измеритель–регулятор ОВЕН ТРМ202 с пределом допустимой основной погрешности $\pm 0,5\%$. Температура оболочки измерялась при помощи измерителя ТРМ500 с пределом допустимой основной погрешности $\pm 0,5\%$. Для выравнивания теплового поля на поверхности кабеля термопара измерителя располагалась под одним слоем медной бандажной ленты толщиной 0,1 мм и шириной 10 мм. Температура окружающего воздуха T_0 измерялась на высоте крепления кабеля и на расстоянии около 2м от него при помощи термометра DPP400W.

С целью сравнения результатов экспериментального и численного исследования нагрева кабеля была реализована математическая модель (3.1–3.10) процессов тепломассопереноса при загрузке кабеля АПвП-1х240-10 кВ на номинальный ток в условиях прокладки соответствующей эксперименту [122].

На рисунке 3.11 представлены графики нагрева токопроводящей жилы при протекании тока 585 А, полученные путем измерения в ходе выполнения лабораторного эксперимента и в результате моделирования процесса тепломассопереноса. В таблице 3.5 представлены сравнительные результаты средних значений экспериментального и численного исследования.

Таблица 3.5 – Температуры элементов конструкции кабеля

Элемент конструкции	Средняя температура, полученная в лаборатории, °С	Температура, полученная по модели, °С	Абсолютная погрешность, °С	Относительная погрешность, %
Токопроводящая жила	90,56	88,98	1,58	1,74
Металлический экран	71,93	72,95	1,02	1,42
Поверхность кабеля	65,9	63,33	2,57	3,9

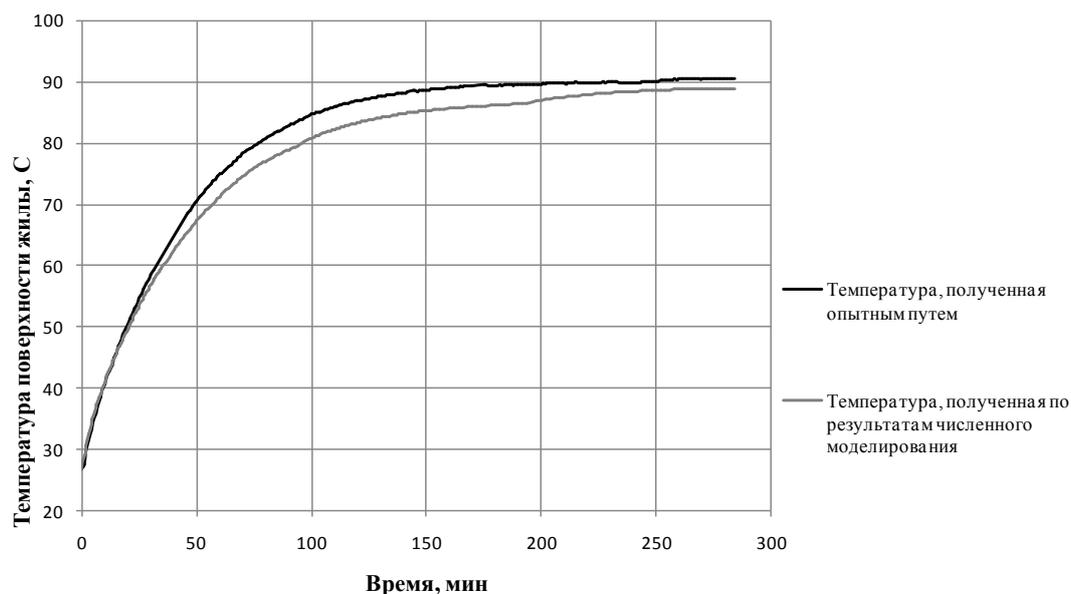


Рисунок 3.11 – Графики нагрева кабеля

Как видно из результатов, разница в значениях температуры поверхности жилы кабеля, определенных опытным путем и численно, не превышает 2%, также близкими по характеру и значениям получились кривые нагрева в нестационарном режиме, рисунок 3.11. Сравнения экспериментальных и численных результатов подтверждает адекватность математической модели.

Экспериментальное измерение температуры кабелей в существующем кабельном блоке

С целью оценки соответствия математической модели процессам, протекающим в реальных подземных кабельных блоках, были проведены экспериментальные измерения температуры на поверхности кабелей и внутренних стенках труб в существующем подземном кабельном блоке «Южная-Дзержинская» Пермских электрических сетей.

На рисунке 3.12 показаны точки замера температуры с помощью портативного инфракрасного пирометра Raynger MX6.

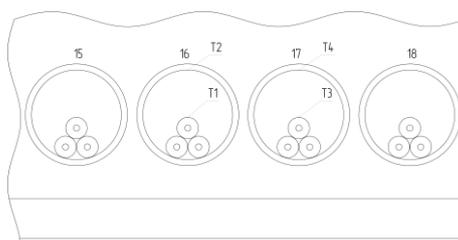


Рисунок 3.12 – Точки замера температуры в кабельном блоке

В таблице 3.6 представлены условия, при которых проводились измерения.

Таблица 3.6 – Условия при проведении экспериментальных измерений

Рабочий ток линии 16, А	107
Рабочий ток линии 17, А	13
Температура воздуха, °С	15

Результаты экспериментальных измерений и результатов численного моделирования представлены в таблице 3.7.

Таблица 3.7 – Температуры в исследуемых точках

Точка измерения	T ₁	T ₂	T ₃	T ₄
Температуры, полученные при измерении, °С	26	23	22	21
Рассчитанные температуры, °С	27,4	22	20,8	20
Погрешность, %	5,4	4,3	5,5	4,8

Как видно из результатов, максимальное отличие в температурах не превышает 5,5 %, что говорит о достаточно хорошей сходимости численного расчета и натурального эксперимента.

3.2 Оценка влияния условий эксплуатации кабельной линии на величину длительно допустимого тока

Использование математических моделей процессов, протекающих в кабельном сооружении, позволяет провести неограниченное количество численных экспериментов с целью получения зависимостей величины длительно допустимого тока от различных условий эксплуатации.

Анализ влияния местоположения кабельной линии в блоке на максимальное значение температуры поверхности жилы

Реализация разработанной математической модели (3.1)–(3.10) позволила получить изменение температурных полей в кабельном канале во времени при различных режимах нагружения. Для стационарных прокладок кабельных линий

необходимо рассматривать установившиеся температурные процессы, которые были рассмотрены ниже.

Длительно допустимый ток для трех кабелей с алюминиевой жилой сечением 150 мм^2 и изоляцией из сшитого полиэтилена, проложенных треугольником в трубе, согласно техническим условиям производителей составляет $I_{\text{длит}}=289,8 \text{ А}$. Однако это значение не учитывает диаметр трубы, в которой проложена кабельная линия. В ряде работ показано, что диаметр трубы имеет существенное влияние на значение допустимого тока [6, 123].

Также это значение не учитывает место размещения кабельной линии в блоке. На рисунке 3.13 представлено температурное поле сечения кабельного блока при нагружении кабельных линий №1 и №11 на длительно допустимый ток, определенный по техническим условиям.

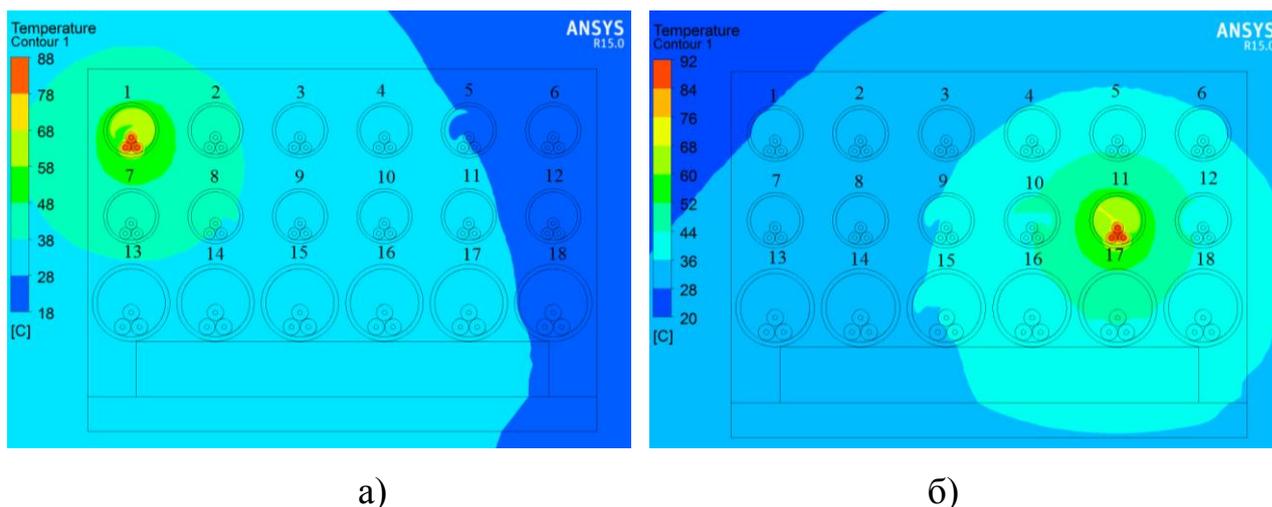


Рисунок 3.13 – Температурное поле в сечении кабельного блока при подаче длительно допустимого тока на: а) линию №1; б) линию №11

При данных условиях прокладки максимальная температура жилы кабеля №1 достигает 88° С . Температура же поверхности жилы линии №11 равна $91,5^\circ \text{ С}$, что превышает предельно допустимое значение. Разница в значениях обусловлена глубиной залегания кабельной линии, близостью границы блока.

Анализ влияния тепловыделений соседних линий на величину длительно допустимого тока

На рисунке 3.14 представлено температурное поле сечения блока при нагружении линии №11 на длительно допустимый ток, определенный по ТУ.

Как видно из результатов, при протекании электрического тока по кабелю нагревается не только сама кабельная линия, но и окружающее пространство. Кабельные линии, находящиеся в блоке, подвергаются тепловому воздействию от соседних линий, что приводит к ограничению значения допустимого тока.

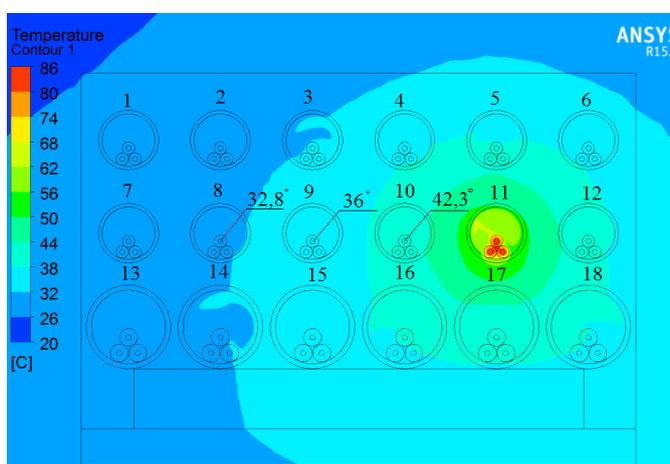


Рисунок 3.14 – Температурное поле сечения блока

При добавлении нагрузки на соседние линии и сохранении рабочего тока в пределах указанного длительно допустимого значения температура жилы линии начнет повышаться сверх допустимых норм. Следовательно, для сохранения допустимого режима работы при подключении, например, линии №2, ток линии №1 необходимо снижать. Чем выше ток на соседней линии, тем меньшее значение может иметь собственный длительно допустимый ток [124]. На рисунке 3.15 представлен график зависимости длительно допустимого тока линии №1 от нагрузки линии №2.

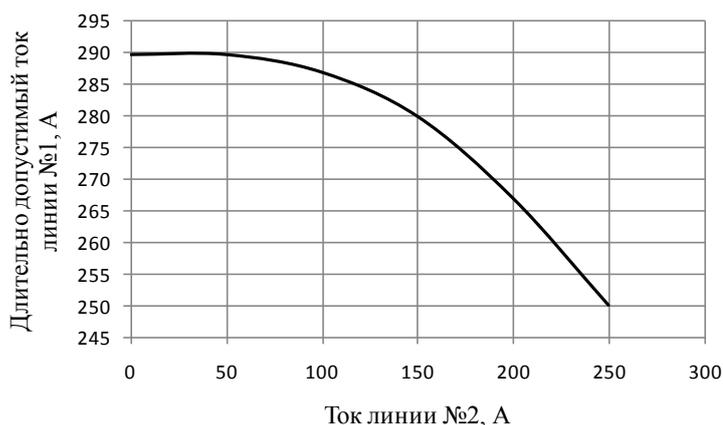


Рисунок 3.15 – Зависимость длительно допустимого тока линии №1 от тока линии №2

Увеличение количества работающих линий приводит к дальнейшему снижению длительно допустимого тока [125]. На рисунке 3.16 представлена зависимость длительно допустимого тока линии №1 от нагрузки линий №2 и №7. При рабочих токах на линиях №2 и №7 равных 200 А, максимальную нагрузку на первой линии необходимо снизить на 25%.

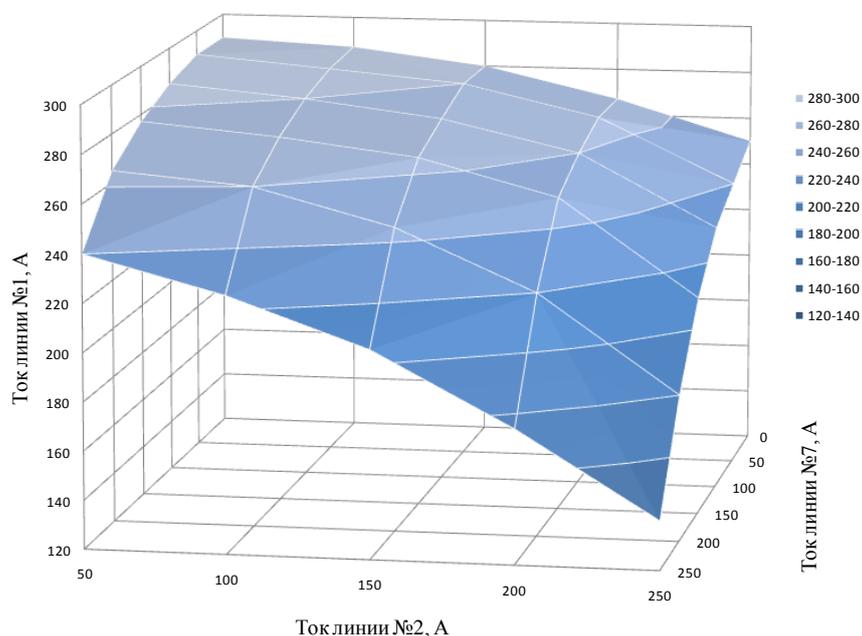


Рисунок 3.16 – Зависимость длительно допустимого тока линии №1 от тока линий №2 и №7

На рисунке 3.17 представлено температурное поле сечения кабельного блока для условия загрузки всех кабельных линий на ток $I_{\text{длит}}=289,8$ А.

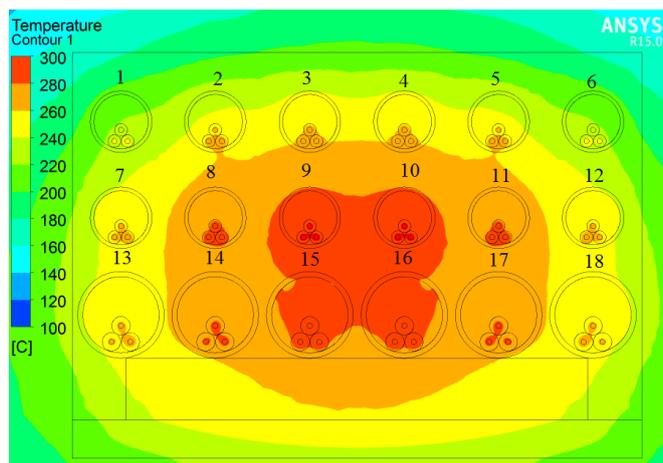


Рисунок 3.17 – Температурное поле блока при загрузке всех линий на длительно допустимый ток

Как видно из результатов, температура всех линий в таких условиях превышает допустимую. Причем чем ближе линия находится к центру, тем её температура выше.

Согласно ПУЭ в кабельном блоке необходимо выделить до 10% из всех линий в качестве резервных. Результаты расчета показали, что наиболее рациональный вариант размещения - в самой неблагоприятной с точки зрения температурного режима части блока, т.е. в центральной части [67]. Для блока с 18-ю линиями в качестве резервных необходимо выделить две. На рисунке 3.18 представлено температурно поле сечения кабельного блока для условия загрузки всех кабельных линий кроме резервных, на ток $I_{\text{длит}}=289,8$ А.

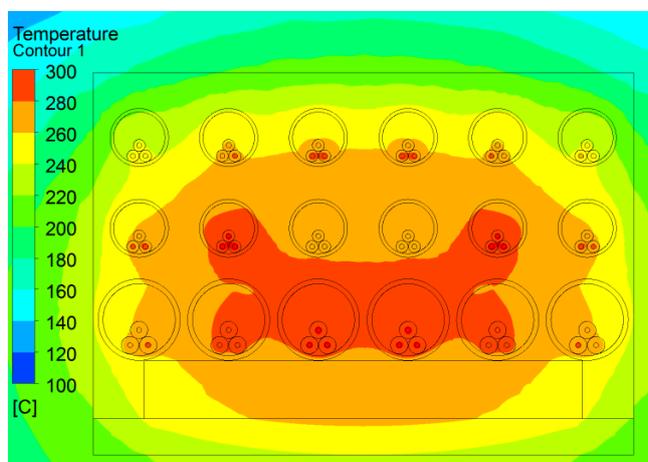


Рисунок 3.18 – Температурное поле блока при загрузке всех линий кроме резервных

При данных условиях эксплуатации все работающие линии также находятся в состоянии превышения допустимой температуры.

Для того чтобы кабельный блок сохранял свою работоспособность, рабочие токи линий необходимо снижать до определенного значения. Для определения рациональной безопасной нагрузки для каждой из линий решалась задача тепломассопереноса в кабельном блоке и окружающей среде при условии относительно равномерного снижения величины допустимого тока в кабельных линиях. В результате расчетов получены и представлены в таблице 3.8 поправочные коэффициенты, которые необходимо применить к значению длительно допустимого тока линии в зависимости от её расположения в блоке при условии выделения в качестве резервных линий №9 и №10 [126, 127]. Как видно из результатов, при максимально возможной безопасной нагрузке всех линий рабочий ток некоторых из них достигает всего 35 % от длительно допустимого.

Таблица 3.8 – Поправочные коэффициенты для длительно допустимого тока

Номер линии	1	2	3	4	5	6
Поправочный коэффициент	0,61	0,48	0,47	0,47	0,48	0,61
Номер линии	7	8	9	10	11	12
Поправочный коэффициент	0,48	0,35	0	0	0,35	0,48
Номер линии	13	14	15	16	17	18
Поправочный коэффициент	0,54	0,41	0,40	0,40	0,41	0,54

На рисунке 3.19 представлено температурное поле сечения блока, соответствующее нагрузке, учитывающей данные коэффициенты. Температура поверхностей жил кабелей всех линий соответствует 88° С.

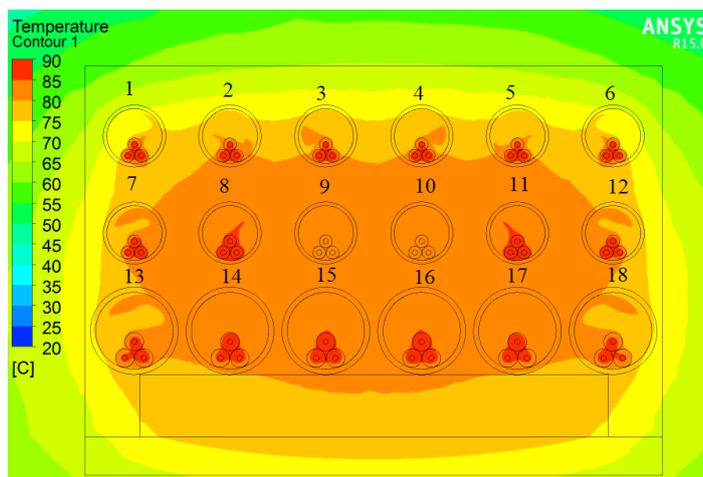


Рисунок 3.19 – Температурное поле блока при нагрузке, учитывающей понижающие коэффициенты

В данном режиме кабельные линии нагружаются на максимально возможное значение тока равномерно по блоку. Однако при необходимости выделения приоритетных линий результаты могут существенно изменяться, в этом случае возникает необходимость управления и распределения нагрузки по кабельным линиям.

В таблице 3.9 представлены коэффициенты для случая приоритетных линий №1 и №6, требующих нагрузки равной $0,8 \cdot I_{\text{длит}}$.

Таблица 3.9 – Поправочные коэффициенты для условий приоритетных линий №1 и №6

Номер линии	1	2	3	4	5	6
Поправочный коэффициент	0,8	0,23	0,37	0,37	0,23	0,8
Номер линии	7	8	9	10	11	12
Поправочный коэффициент	0,23	0,22	0	0	0,22	0,23
Номер линии	13	14	15	16	17	18
Поправочный коэффициент	0,5	0,4	0,4	0,4	0,4	0,5

Любое изменение нагрузки части линий приводит к перераспределению пропускной способности всех линий и требует анализа температурного режима.

Подобным изменением нагрузочного режима блока может служить подключение резервных линий, которые согласно ПУЭ предназначены для использования, например, в период ремонтных работ. Так как в качестве резервных выделяют трубы, находящиеся в самом термически неблагоприятном месте блока, то есть в центре, прокладываемые в них линии могут передавать ограниченную мощность.

Как видно из рисунка 3.19, еще до подключения резервных линий к нагрузке, температура на поверхности их жил составляет $82,7^{\circ}\text{C}$. Это приводит к существенному ограничению возможной подключаемой нагрузки. Как показали расчеты, в данных условиях при использовании линии №9, она может передавать 674 кВА. При использовании линий №9 и №10, можно передать суммарно 830 кВА.

Однако учитывая, что конструкция кабельного блока обладает существенной тепловой инерцией, и нагрев до максимальных температур происходит не мгновенно, то на ограниченный промежуток времени к резервным линиям можно подключить и большую нагрузку.

3.3 Анализ нестационарного режима работы кабельных линий

На практике в ряде случаев возникает необходимость увеличить нагрузку одной или нескольких кабельных линий или использовать резервную линию ограниченное время. Анализ процессов, протекающих в нестационарном режиме, позволяет определить оптимальные управляющие воздействия в каждом конкретном случае для поддержания блока в рабочем состоянии. В этом случае решалась описанная выше нестационарная математическая модель. Результаты анализа приведены ниже.

На рисунке 3.20 представлен график нагрева поверхности жил линий № 8 и 9 при нагружении резервной линии №9 на мощность 1МВА.

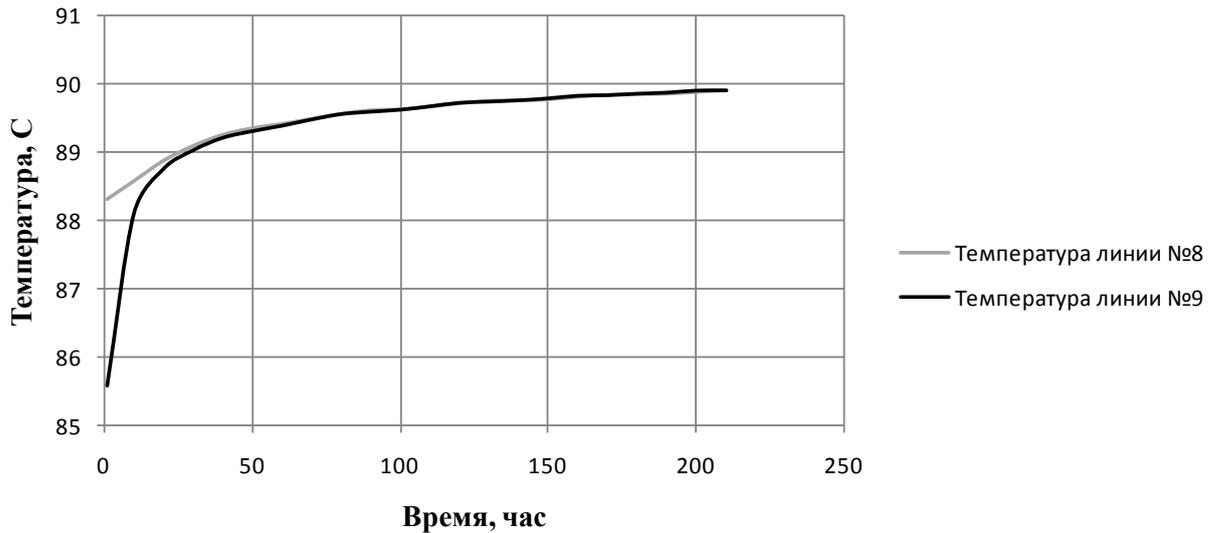


Рисунок 3.20 – График изменения температуры линий № 8 и 9

Как видно из графика, при такой нагрузке линии не нагреются до критических температур первые 10 дней. Следовательно, при необходимости кратковременного использования резервной линии, например, на период ремонта, нагрузка на ней может превышать длительно допустимую.

На рисунке 3.21 представлен график нагрева поверхности жил линий №№3, 8, 9 при нагружении резервной линии №9 на мощность 1,1МВА.

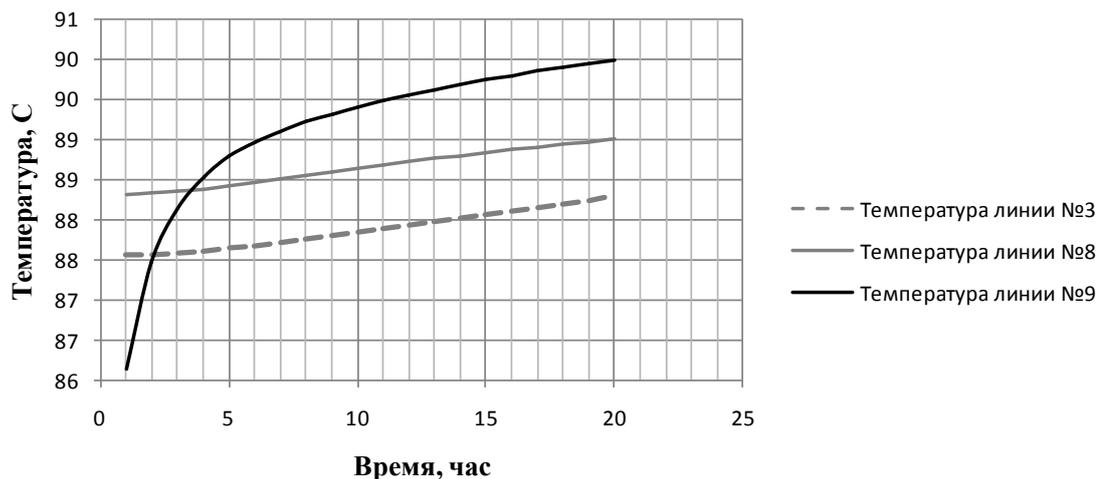


Рисунок 3.21 – График изменения температуры линий №3, 8 и 9

Видно, что предельной температуры линия №9 достигнет через 20 часов. Следовательно, если необходимость в подобной нагрузке ограничена по времени, для неё можно использовать резервные линии с меньшим значением длительно

допустимого тока. Подобные ограничения по времени могут иметь потребители с периодическим характером потребления, например, освещение, которое включается только в темное время суток.

На рисунке 3.22 представлены графики изменения температур поверхностей жил линий №№ 8, 9 при периодическом включении резервной линии, имитирующем работу освещения микрорайона в период с 21:00 до 7:00 часов. Видно, что температура изоляции резервной линии при заданной нагрузке 1,1 МВА изменяется циклически в пределах заданного ограничения. Очевидно, что при увеличении токовой нагрузки будет возрастать температура и снижаться время безопасной работы, что необходимо учитывать при управлении работой кабельного блока.

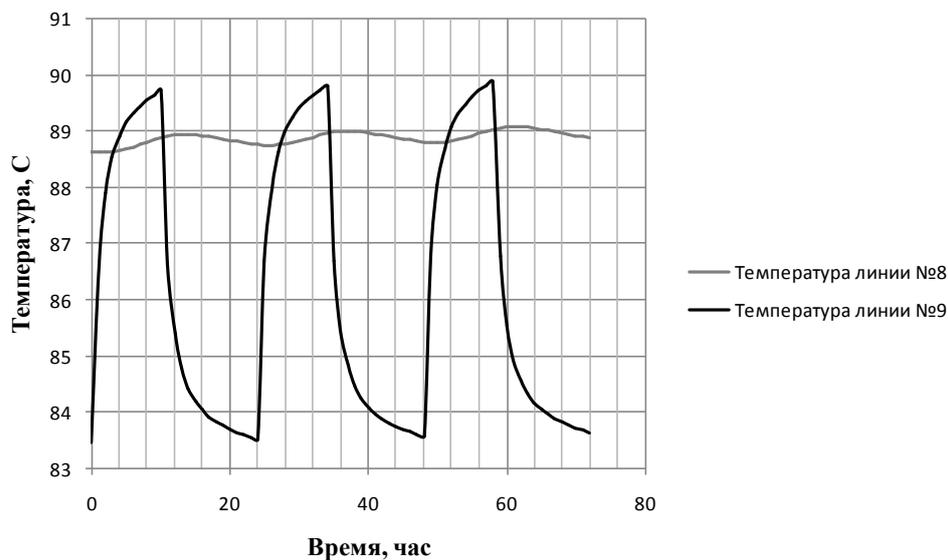


Рисунок 3.22 – График изменения температур при периодическом включении резервной линии

Для многих предприятий характерен неравномерный режим потребления электрической энергии с выраженными пиками во времени минимального и максимального потребления. В этом случае температурный режим линий кабельного блока в целом также будет меняться, что может быть использовано при рациональном управлении нагрузкой кабельного канала.

Так для торгового центра Рубин (Пермь) почасовая нагрузка представлена в таблице 3.10. Потребляемая нагрузка в ночное время суток и в часы максимального количества посетителей отличается в 2 раза.

Таблица 3.10 – Почасовая нагрузка торгового центра

Время, час	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Рабочий ток, А	88	82	84	88	86	101	118	137	144	154	162	152
Время, час	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
Рабочий ток, А	149	154	143	146	156	157	166	156	145	130	112	97

На рисунке 3.23 представлен график изменения температуры поверхности жилы в течение суток.

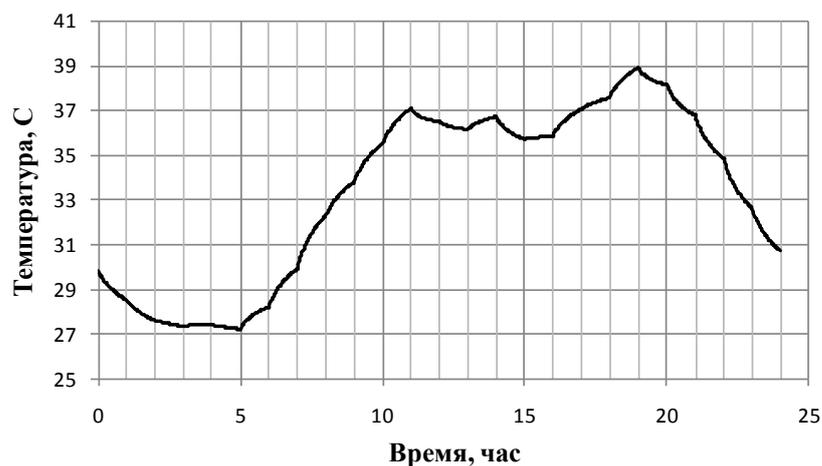


Рисунок 3.23 – График изменения температуры кабельной линии в течение суток

Как видно из результатов, максимальная температура, соответствующая пику посетителей в 19 часов, превышает температуру в ночное время на 12° С. Снижение нагрузки в ночное время позволяет подключать дополнительных потребителей, основная часть потребления электроэнергии которых приходится на ночь.

3.4 Параметрическая модель температурных и токовых режимов в кабельном блоке

Решение задачи управления токовой нагрузкой кабельного блока требует большого количества расчетов и быстрой выборки наилучшего решения из всего набора вариантов. Поэтому на основе предложенной ранее модели построена параметрическая модель, связывающая температуру жилы кабеля и токовые нагрузки линий и позволяющая получать результат без существенных временных и ресурсных затрат.

В основе параметрической модели лежит система аналитических выражений, формирующих искомые функции в явном виде. Для подобных аналитических выражений необходимо сформулировать ряд требований:

1. Функция должна быть непрерывной на всем возможном диапазоне изменения влияющих на исследуемый процесс факторов. Это требование позволяет получать искомые распределения при любом возможном сочетании факторов.

2. Функция должна быть максимально простой, при этом с достаточной точностью описывать полученные в ходе экспериментирования результаты. Это необходимо для возможности внедрения готовой системы в микроконтроллерные устройства.

3. Вид функциональной зависимости для всех линий должен быть одинаковый. Это позволит упростить задачу поиска аналитических выражений, сводя их к определению нескольких коэффициентов по однотипным методикам.

Поскольку данная модель формируется на основе предложенной ранее математической конечно-элементной модели, для нее будут актуальны и все физические допущения базы.

Задача нагрева-охлаждения в кабельном блоке решается с использованием принципа суперпозиции [128]. Каждая кабельная линия в канале рассматривается как отдельный источник тепла, способный выделять тепловую энергию от нуля до некоторого максимального значения (максимальное значение определяется

$$T_i = T_0 + \sum_{j=1}^N \Delta T_{i-j}(I_j), \quad (3.26)$$

где T_i – температура поверхности жилы i -й кабельной линии, $i \in [1 \div N]$; I_i – рабочий ток i -й линии; ΔT_{i-j} – приращение температуры линии № i от тока линии № j .

С целью параметрической идентификации системы уравнений для рассматриваемого блока, содержащего 18 линий, была проведена серия численных экспериментов, в результате которых были получены значения приращений температуры поверхности жил каждой кабельной линии, обусловленных рабочим током каждой линии в отдельности. Приращения температуры определены для ряда дискретных значений рабочих токов. В таблице 3.11 приведен пример полученных результатов. Все результаты численных экспериментов приведены в приложении А.

Таблица 3.11 – Значения приращения температуры жилы кабельной линии №1 от собственного тока и тока линии №2

Ток линии №1, А	0	50	100	150	200	250	300
Приращение температуры ΔT_{1-1} , С	0	2,49	9,63	21,06	36,71	55,21	77,64
Ток линии №2, А	0	50	100	150	200	250	300
Приращение температуры ΔT_{1-2} , С	0	0,76	2,94	6,43	11,22	19,62	27,56

Для возможности определения температуры на всем диапазоне рабочих токов была проведена аппроксимация полученных данных. Для описания данных эксперимента был выбран полином 3 степени:

$$\Delta T_{i-j} = a + bI_j + cI_j^2 + dI_j^3. \quad (3.27)$$

Коэффициенты для выражений, описывающих приращения для всего блока, содержащего 18 линий, представлены в приложении Б.

На рис. 3.24 приведены примеры полученных в процессе аппроксимации графиков зависимостей приращения температуры от значения тока. Видно, что кривые, построенные с помощью выражения (3.27), достаточно хорошо описывают рассматриваемые процессы.

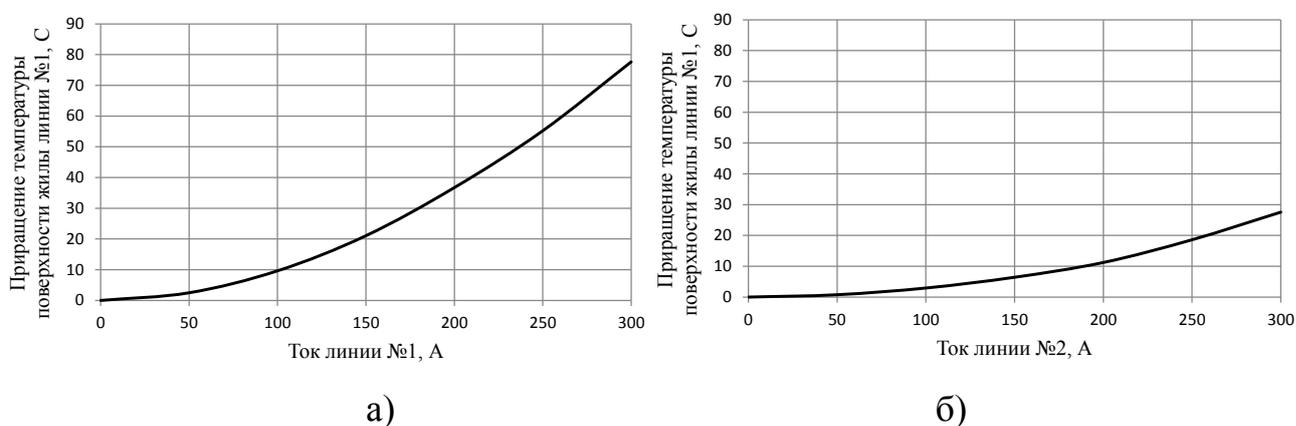


Рисунок 3.24 – Зависимости приращения температуры поверхности жил линии №1 от а) собственного тока I_1 , б) тока линии №2 I_2

Проверка адекватности параметрической модели

Для верификации предлагаемой в работе параметрической математической модели были проведены тестовые сравнения результатов расчёта с данными натурального эксперимента по измерению температуры в действующем кабельном блоке, описанного в пункте 3.4.

Результаты экспериментальных измерений и результатов численного моделирования представлены в таблице 3.12.

Таблица 3.12 – Температуры в исследуемых точках

Точка измерения	T_1	T_3
Температуры, полученные при измерении, °С	26	22
Рассчитанные температуры, °С	28	24
Погрешность, %	7,1	8,3

Как видно из результатов, разница в значениях температуры, определенной опытно и с помощью параметрической модели, не превышает 8,5 %, что свидетельствует о достаточной для инженерных расчетов точности модели. При этом данная модель позволяет оперативно определить максимальный уровень

нагрева поверхности жилы каждой из линий канала с минимальными затратами времени и счетных ресурсов. Кроме того, устраняется проблема дискретного характера представления результатов, что позволяет упростить процесс осуществления выборки по произвольным исходным данным.

Выводы по главе

Разработана двумерная нестационарная математическая модель процессов тепломассопереноса в кабельном блоке, основанная на законах сохранения энергии, массы и количества движения. Модель учитывает все виды теплопередачи в кабельном блоке.

Проведена верификация математической модели и её реализации путем сравнения результатов моделирования с данными натуральных экспериментов, произведенных в лаборатории и в существующем подземном кабельном блоке. Разница в значениях температур поверхности жилы кабеля, полученных экспериментальными и расчетными методами, не превышает 5,5 %.

Проведен анализ влияния расположения кабельных линий в блоке на величину максимальной температуры изоляции. Оценено влияние на температурный режим блока нагруженной линии и, как следствие, на величину длительно допустимого тока соседних линий.

Проведен анализ нестационарных режимов работы кабельного блока при подключении резервных линий. Рассмотрен периодический график работы резервной линии, позволяющий подключить к ней большую нагрузку, чем при постоянном режиме.

На основе результатов численных экспериментов построена параметрическая модель, связывающая температуру на поверхности жилы кабеля со значениями рабочих токов всех линий, позволяющая существенно снизить счетные и временные ресурсы, затрачиваемые на расчет температурных полей.

ГЛАВА 4. МЕТОД И АЛГОРИТМЫ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ ПРИ УПРАВЛЕНИИ ПРОЦЕССОМ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ В КАБЕЛЬНОМ БЛОКЕ В УСЛОВИЯХ ИЗМЕНЕНИЯ НАГРУЗКИ

В процессе эксплуатации кабельных сооружений происходят изменения нагрузочных режимов как запланированные, так и вынужденные. В виду ограничений, накладываемых на рабочую температуру изоляции кабелей, необходимо контролировать тепловое состояние всего сооружения и своевременно производить снижение нагрузки при опасности возникновения точек перегрева. В обязанности диспетчерского персонала входит проведение оперативных переговоров и формирование диспетчерских команд по управлению электроэнергетическими режимами с целью сохранения допустимых температур.

Задача управления распределением электроэнергии в кабельных сооружениях заключается в определении управляющих воздействий, обеспечивающих максимально близкий к требуемому режим нагрузки при сохранении допустимого температурного состояния [130, 131].

Предложен следующий метод определения управляющих воздействий:

1. Построение математической модели процессов тепломассопереноса в кабельном сооружении.
2. Построение параметрической модели зависимости температуры изоляции кабелей от рабочих токов линий на основе результатов численных экспериментов.
3. При изменении режима нагрузки проверка допустимости нового температурного состояния кабельных линий.
4. При фиксации возможного превышения температур изоляции максимально возможных значений определение необходимого уровня снижения рабочих токов для сохранения допустимого режима эксплуатации линий.

Метод реализован в виде алгоритмов определения управляющих воздействий в условиях планового и вынужденного увеличения нагрузки.

Описанные ранее математические модели используются для оценки температурного состояния блока.

4.1 Определение максимально возможного значения тока вновь вводимой линии

При введении в эксплуатацию кабельного блока, как правило, в нем содержится большее число каналов (труб, в которых проложены кабельные линии), чем требуется на момент строительства. Часть дополнительных каналов могут быть использованы для прокладки новых линий в процессе эксплуатации блока и часть представляют собой резервные каналы, используемые в экстренных ситуациях. Так как уже действующие линии определяют интенсивность теплового поля в блоке, значения длительно допустимых токов прокладываемых вновь линий необходимо рассчитывать с учетом текущего нагрузочного режима. На рисунке 4.1 представлен алгоритм поиска максимально возможного тока новой линии с учетом нагрузки уже существующих линий.

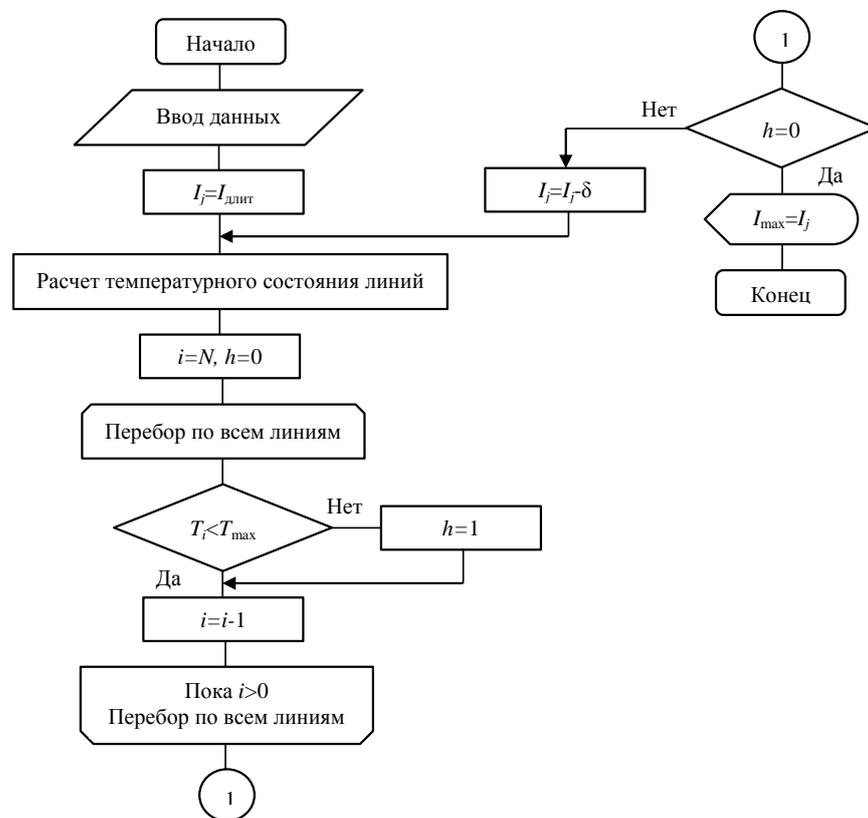


Рисунок 4.1 – Алгоритм поиска максимально возможного значения тока

Входными данными являются значения действующих рабочих токов существующих линий I_i , максимально допустимая температура поверхности жилы кабеля, зависящая от типа изоляции, T_{\max} , количество линий в блоке N . Изначально максимально возможное значение тока новой линии I_j принимается равным длительно допустимому, определенному по ТУ производителя, $I_{\text{длит}}$. Далее производится расчет температурного состояния блока, и температура каждой линии T_i сравнивается с максимально возможной. Переменная h используется как индикатор, принимающий значение «1» в случае обнаружения превышения температуры какой-нибудь линии сверх допустимого значения. При $h=1$ величина тока новой линии уменьшается на заданный шаг δ , и снова производится расчет температур. Итерационный процесс повторяется до тех пор, пока не будет найдено такое значение рабочего тока новой линии, при котором не происходит превышение предельного значения температуры. Это значение тока указывается, как максимально допустимое в данных условиях I_{\max} . Кроме того, представленный алгоритм позволяет выбрать наиболее подходящее место расположения вновь вводимой линии при наличии нескольких свободных труб, исходя из максимально возможного значения тока.

4.2 Определение управляющих воздействий для сохранения допустимого температурного режима в условиях планового увеличения нагрузки линий

Как отмечалось ранее, большинство потребителей электроэнергии обладают неравномерным в течение дня уровнем потребления. Основная часть нагрузки сосредоточена в дневное и вечернее время суток. Это приводит к образованию пиков у графика общего потребления в энергосистеме, что неблагоприятно сказывается на экономических показателях работы как электростанций, так и потребителей. С целью уменьшения пиковой нагрузки разработан механизм управления спросом (demandresponse) [132]. В его основе лежит побуждение к изменению профиля нагрузки конечных потребителей в обмен на стимулирующие

выплаты. Основным способом участия в управлении спросом заключается в смещении графика потребления на периоды спада общего потребления, а также уменьшение нагрузки в часы пика путем снижения интенсивности производственного процесса, использования собственных источников питания, частичного отключения освещения и кондиционирования и т.д. Распределение максимумов потребления электроэнергии среди потребителей по времени суток позволяет использовать кабельные сооружения более рационально, а также сокращать потребность в строительстве новых. Например, резервные трубы, которые, как было показано ранее, обладают достаточно ограниченной пропускной способностью, можно использовать для прокладки линий, нагруженных в основном в ночное время. Это могут быть линии, питающие освещение микрорайонов города, или промышленные предприятия, участвующие в процессе управления спросом.

При прокладке новых линий в уже функционирующий кабельный блок необходимо проверить, сохранится ли допустимый температурный режим в случае добавления новых источников тепла.

На рисунке 4.2 представлен алгоритм проверки согласованности существующей и проектируемой нагрузки по температурному показателю в зависимости от времени суток.

Исходными данными для анализа являются плановые графики нагрузок действующих и проектируемых потребителей в дневное и ночное время суток. Расчет температурного состояния блока производится с использованием математической модели процессов тепломассопереноса с учетом времени действия дневных и ночных режимов.

В случае, если прокладка новых линий приводит к увеличению температур в некоторых точках контроля сверх максимально допустимых, необходимо разработать управляющие воздействия, направленные на сохранение работоспособности блока путем установления нагрузочного режима, оптимального для данных условий.

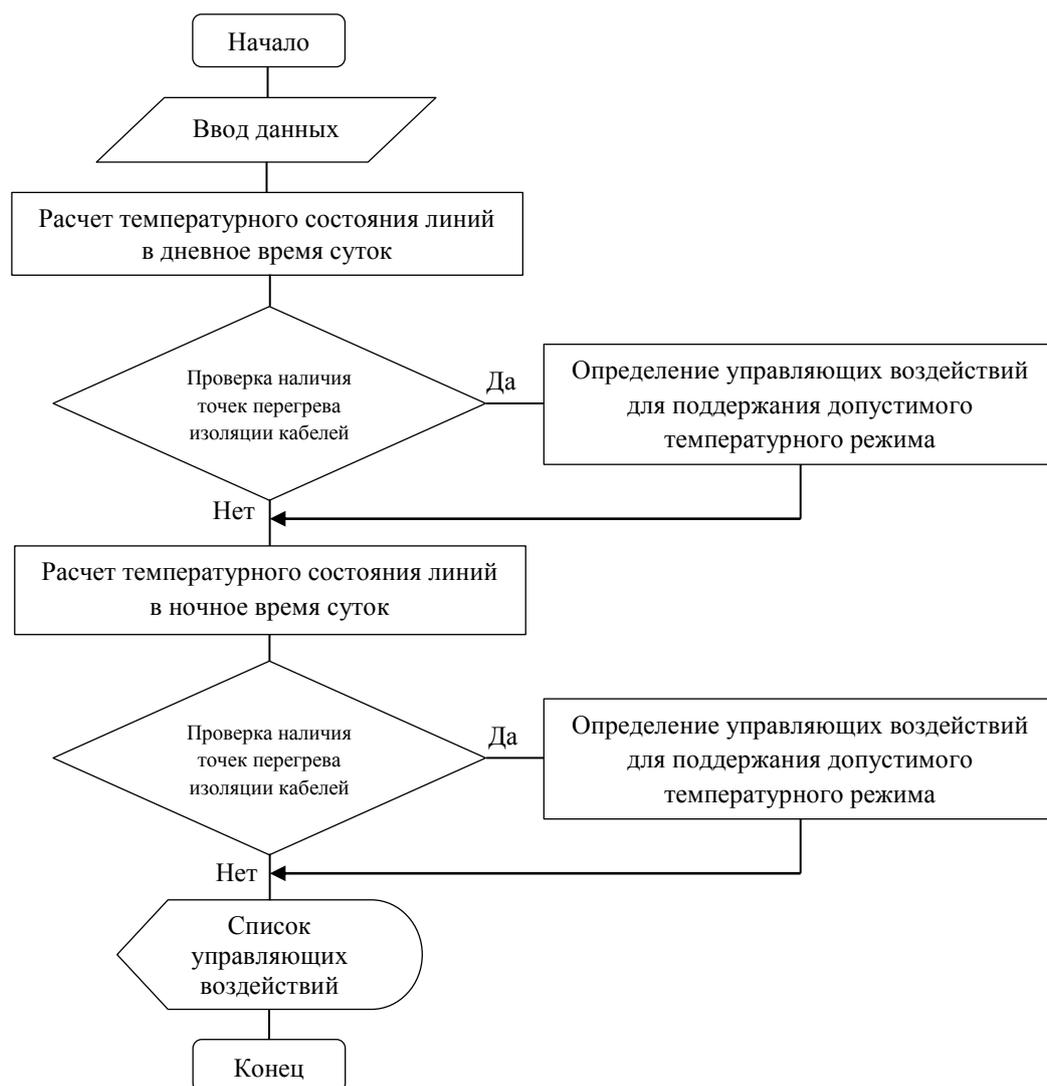


Рисунок 4.2 – Алгоритм проверки температурного режима блока при прокладке новой линии

Управляющие воздействия заключаются в рекомендации снижения потребляемой мощности некоторыми потребителями на определенное значение и указанный временной промежуток [133]. Из рассмотрения возможного снижения нагрузки исключаются потребители первой категории, перерывы в электроснабжении которых не допустимы.

При решении задачи подбора оптимальной токовой загрузки необходимо соблюдение следующих условий:

- температура изоляции кабелей в месте контакта с токопроводящей жилой не должна превышать максимально допустимую для данного вида изоляции:

$$T_i < T_{\max} ;$$

– величина передаваемой по линиям мощности должна соответствовать спросу потребителей или минимально снижена с учетом категории в случаях возможного перегрева. Для определения суммарного снижения значения рабочих токов относительно спроса (I_i^Φ) используется параметр:

$$K(I_i) = \sqrt[N]{\prod_{i=1}^N \frac{(I_i + 1)}{I_i^\Phi}} \rightarrow \max. \quad (4.1)$$

Для выбора оптимального режима нагрузки необходимо сравнить все возможные варианты загрузки блока при постепенном снижении рабочего тока линий. С этой целью заполняется база данных вариантов рабочих токов с определенным шагом снижения. На рисунке 4.3 представлен алгоритм заполнения базы данных для дневного и ночного режимов работы блока.

Входными данными для этого этапа расчетов являются значения рабочих токов линий для дневного $I_{(d)i}$ и ночного $I_{(n)i}$ режимов работы, $i \in (1; N)$; переменная C_i , соответствующая категории потребителей, подключенных к i -й линии. Величины дневной и ночной нагрузок могут существенно отличаться, вследствие чего при формировании списков возможных значений токов количество вариантов $I_{(d)i}^j$ и $I_{(n)i}^g$ у одной и той же линии будет разным, для их подсчета введены вспомогательные переменные j и g . Значения формируются путем постепенного уменьшения токов, начиная с действующих величин, соответствующих дневному и ночному графику нагрузки, на заданный шаг δ , исключая потребителей 1 категории.

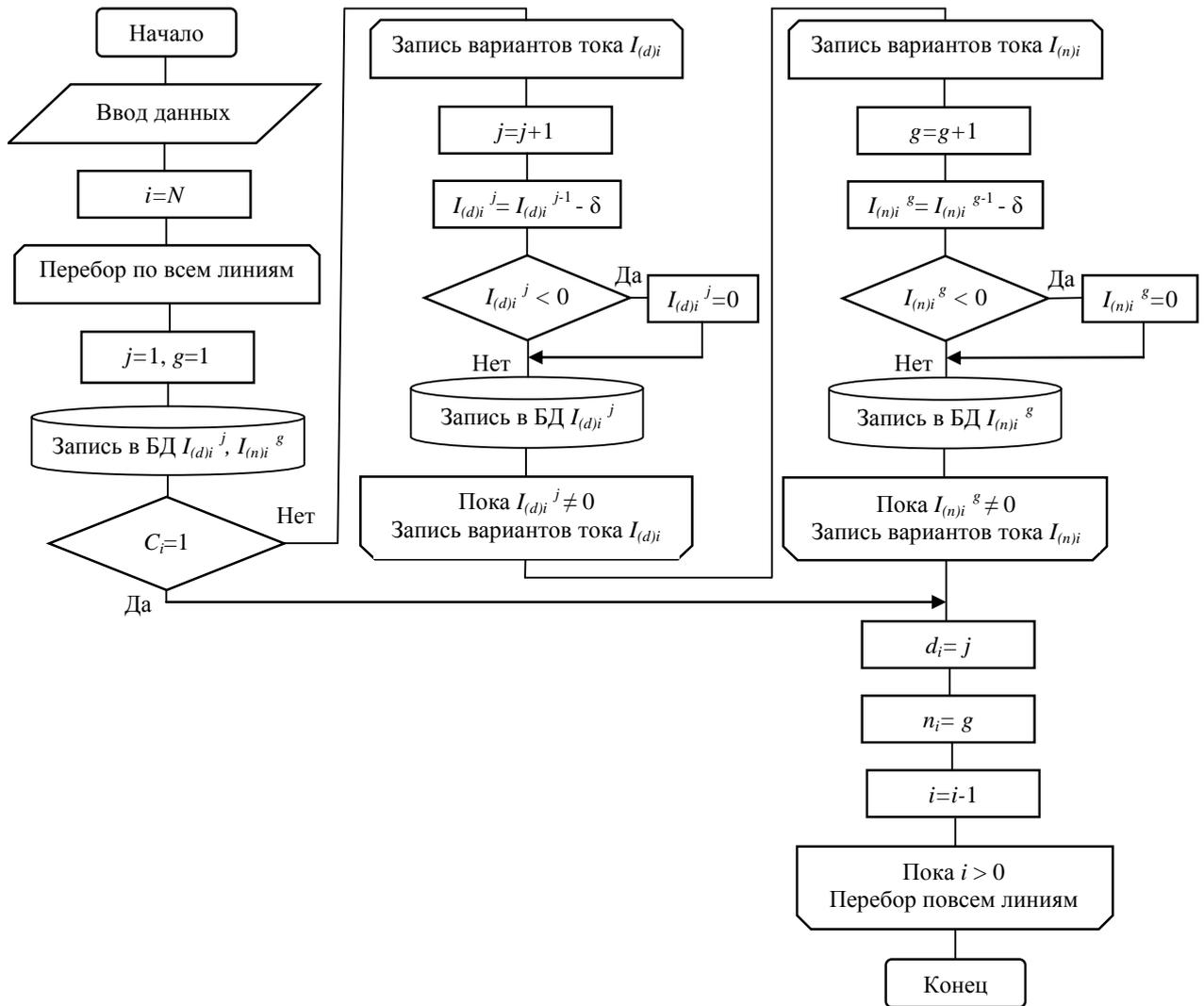


Рисунок 4.3 – Алгоритм заполнения базы данных вариантов рабочих токов

Так как n_i и d_i это количество вариантов дневной и ночной нагрузки i -й линии соответственно, количество всех возможных комбинаций токов в дневной период буде равно (4.2):

$$n = \prod_{i=1}^N n_i . \quad (4.2)$$

В ночной период (4.3):

$$d = \prod_{i=1}^N d_i . \quad (4.3)$$

Следующим этапом необходимо рассчитать температуры поверхности жил кабелей при всех комбинациях нагрузок отдельно для дневного и ночного режима. На рисунке 4.4 представлен алгоритм расчета температур для ночного

режима. Для расчета температур при дневном режиме работы алгоритм аналогичный.

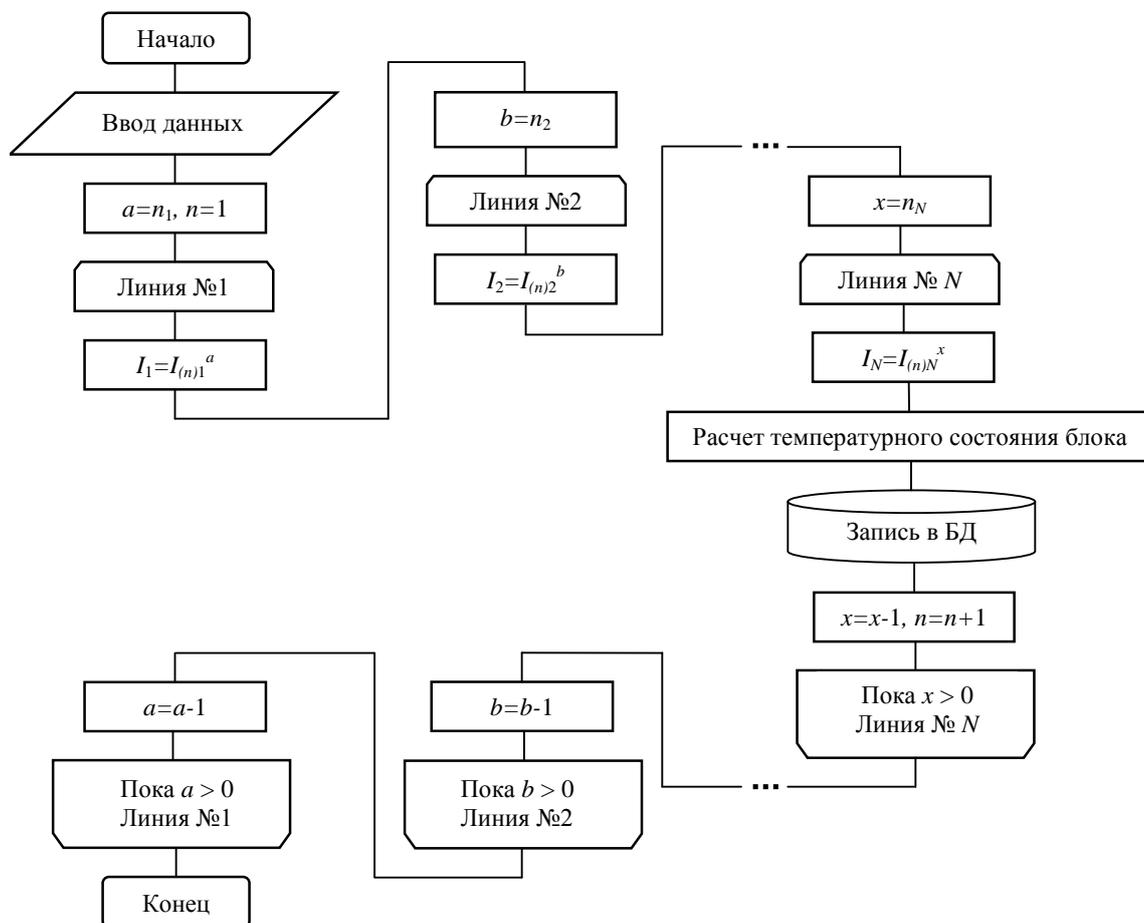


Рисунок 4.4 – Алгоритм заполнения базы данных результатами расчета комбинаций токов

В качестве входных данных на этом этапе используется база данных вариантов загрузок линий $I_{(n)i}^g$, полученная ранее. Используя вспомогательные переменные $a, b \dots x$, перебираются все комбинации значений токов линий. На основе реализации математической модели (2.1) – (2.6) для каждого варианта загрузки блока определяются температуры поверхности жил, которые сохраняются в базе данных. Также подсчитывается общее количество комбинаций n . Заполненная таким образом база данных содержит все возможные варианты нагрузочных режимов блока, в том числе и такие, при которых температура некоторых линий превышает максимально допустимое значение.

Полученная база данных, содержащая температуры для всех возможных комбинаций нагрузок, сортируется по параметру относительного снижения нагрузки $K(I_i)$. Алгоритм данного этапа представлен на рисунке 4.5.

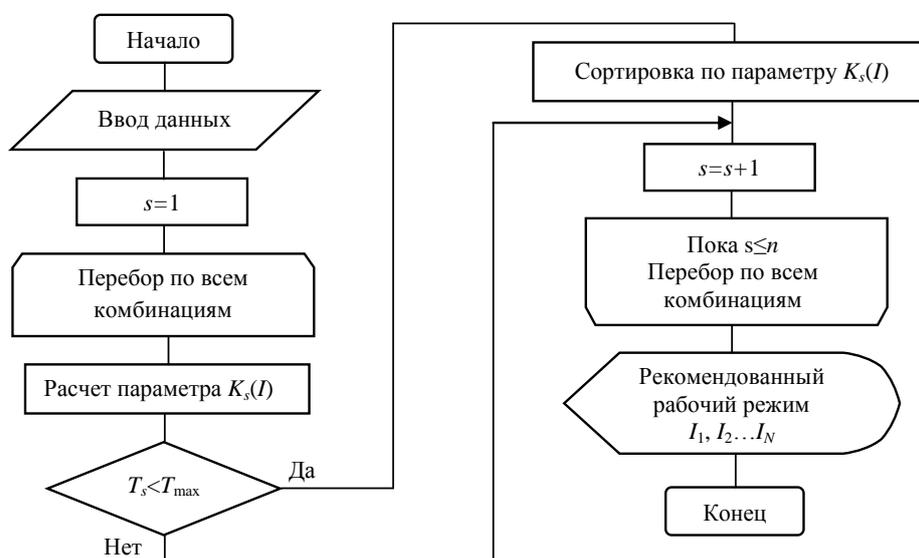


Рисунок 4.5 – Алгоритм сортировки результатов

Входными данными является база данных, полученная на предыдущем этапе. Для каждой комбинации производится проверка температур поверхностей жил всех линий T_s с максимально возможным значением T_{max} . Величина предельно допустимой температуры T_{max} зависит от материала, из которого выполнена изоляция кабелей. Проверка будет производиться со значением, соответствующим используемому изоляционному материалу. В случае превышения температуры на какой-нибудь линии данная комбинация отбрасывается и не участвует в сортировке. В качестве рекомендованного режима выбирается тот, для которого параметр $K(I_i)$ будет иметь максимальное значение, то есть максимально сохранится относительная суммарная нагрузка, и температура на поверхности всех жил останется в пределах допустимых значений. Если удовлетворяющего условиям режима не существует, необходимо рассматривать вариант распределения новой нагрузки на несколько линий, расположенных в разных трубах.

4.3 Определение управляющих воздействий для сохранения допустимого температурного режима кабельного блока в условиях вынужденного увеличения нагрузки

При эксплуатации кабельных сооружений возникают ситуации незапланированного роста нагрузки, например, как результат аварийных событий. Подобное увеличение потребления электроэнергии требует своевременной оценки нового режима с точки зрения температурного состояния блока для сохранения допустимых значений температур. Анализ должен показать, требуются ли управляющие воздействия по снижению рабочих токов части потребителей с целью недопущения увеличения температур сверх максимально возможных [134]. На рисунке 4.6 представлен алгоритм проверки температурного состояния линий при вынужденном росте рабочих токов.

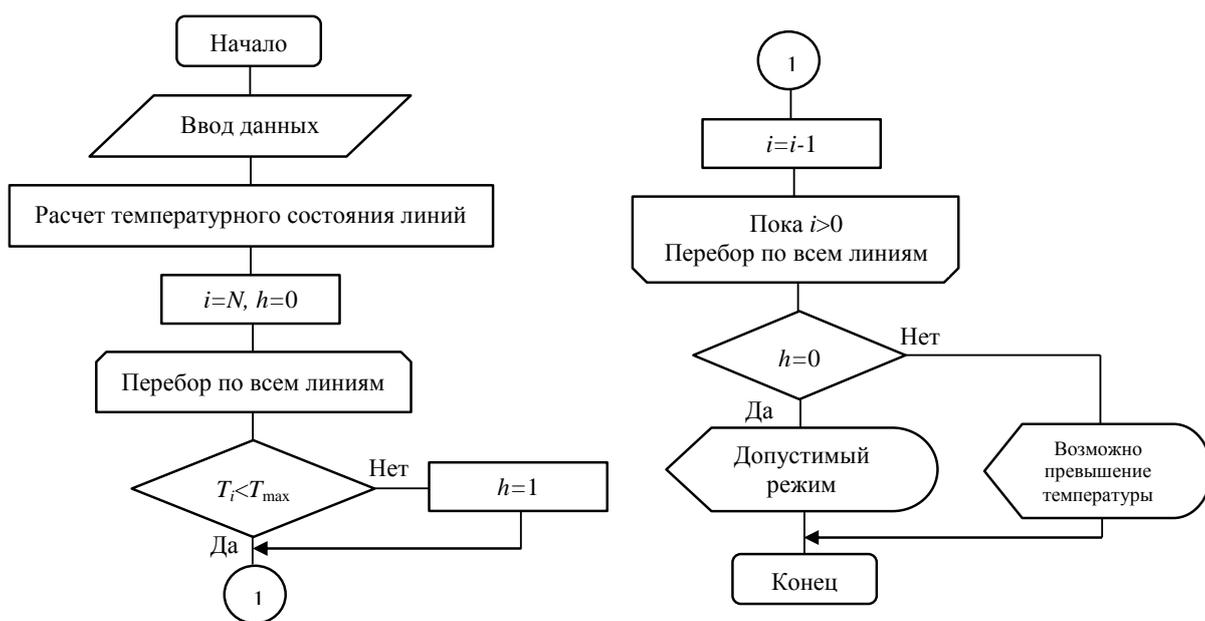


Рисунок 4.6 – Алгоритм проверки температурного состояния линий при изменении нагрузки

Входными данными на этом этапе анализа являются новые значения рабочих токов I_i , $i \in (1; N)$, значение температурного параметра T_{max} , который ограничивает температуру эксплуатации кабельной изоляции. После расчета температурного поля блока производится проверка на превышение температуры поверхностей жил каждой линии T_i . Переменная h используется для индикации

ситуации перегрева. Если результаты расчета показывают, что значения температур останутся в допустимых пределах, новый рабочий режим принимается без изменений. В противном случае необходимо определить, на каких линиях и на сколько снизить нагрузку для поддержания допустимого режима. На рисунке 4.7 представлен алгоритм действий в случае возможного перегрева элементов конструкции блока.

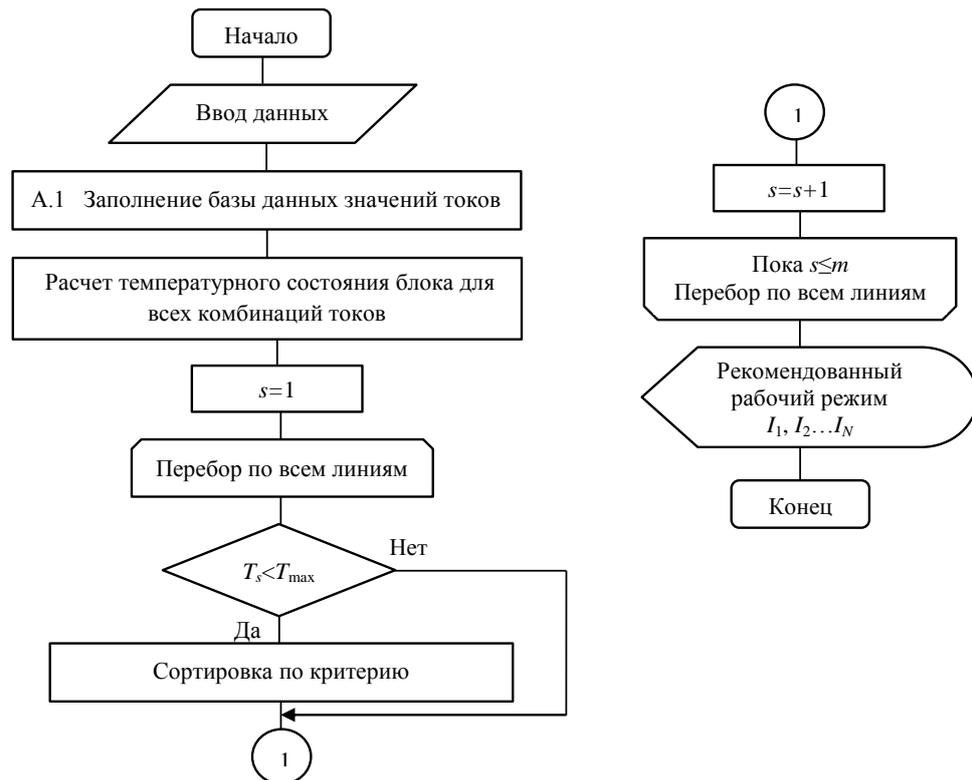


Рисунок 4.7 – Алгоритм определения управляющих воздействий

Исходными данными для определения управляющих воздействий являются значения новых рабочих токов, а также максимально допустимая температура изоляции. Для выбора варианта комбинации рабочих токов линий, удовлетворяющих требованиям, необходимо проанализировать температурные поля для различных вариантов снижения нагрузок на линиях. С этой целью необходимо в первую очередь создать базу данных с возможными значениями тока (А.1). На рисунке 4.8 представлена блок-схема алгоритма заполнения базы данных вариантов нагрузки с учетом категории потребителя электроэнергии.

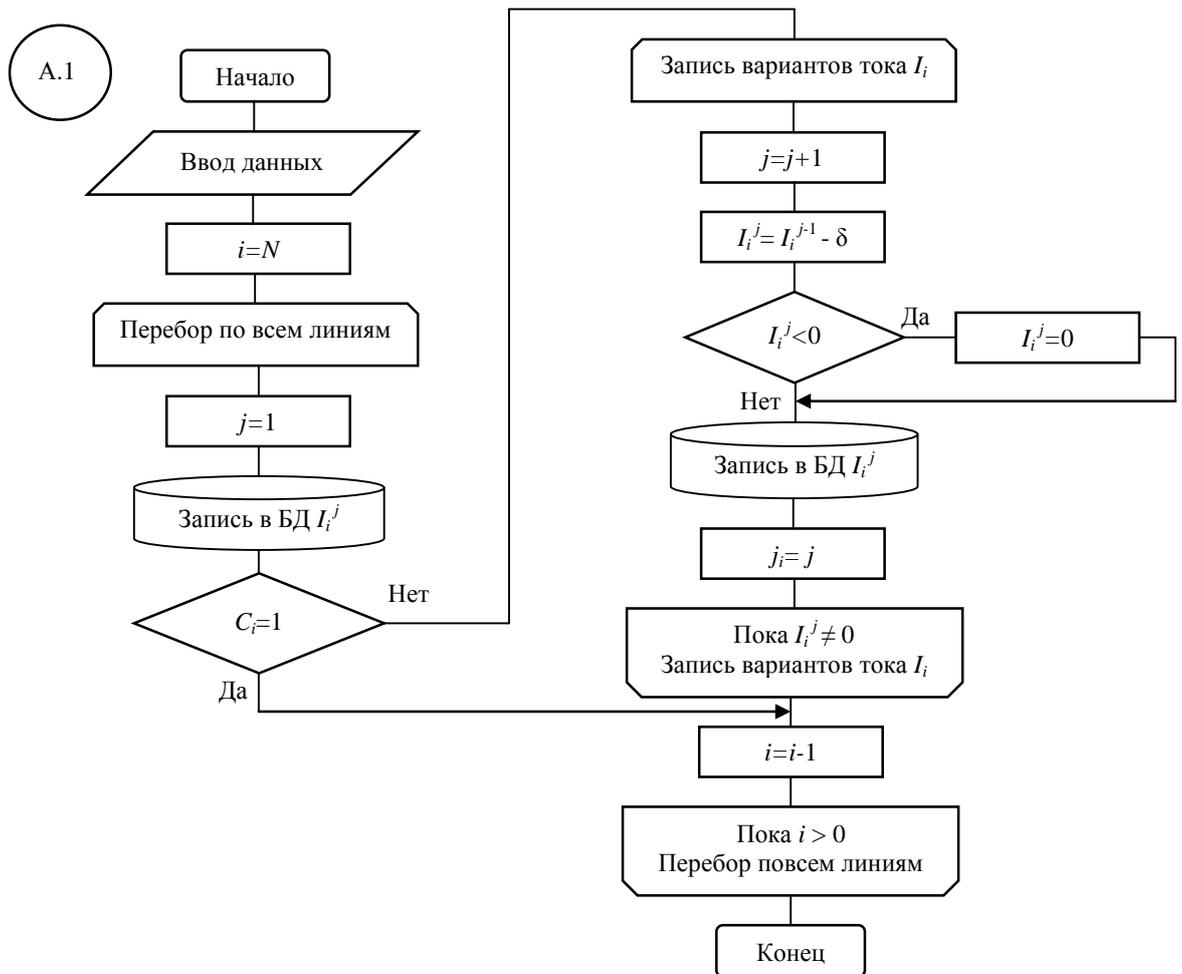


Рисунок 4.8 – Алгоритм заполнения базы данных вариантов значений рабочих токов

Входными данными для алгоритма являются действующие значения токов I_i , шаг понижения величины тока δ , категория потребителя C_i . Значения токов для потребителей первой категории принимаются равными текущим, так как снижение нагрузки для них не допустимо. Для остальных линий формируются ряды значений от текущего до 0 с определенным шагом δ .

На следующем этапе рассчитываются температуры наиболее нагретых участков изоляции кабельных линий для всех комбинаций токов. Массив, в котором будут храниться результаты, должен включать в себя всю совокупность уникальных решений состояний кабельного блока, рассчитанных для конкретных токовых нагрузок. Каждая отдельная запись должна включать следующие данные:

1. I_i^j – токи, для которых производится расчёт.

2. T_i^j – совокупность температур наиболее нагретых элементов изоляции каждой линии, соответствующих данному набору нагрузок.

Таким образом, массив с результатами будет иметь вид:

$$T[I_i^j, T_i^j]. \quad (4.4)$$

Алгоритм заполнения массива результатов расчета всех комбинаций нагрузок аналогичен представленному на рис. 4.4. Для подсчета количества комбинаций используется переменная m .

Объем массива определяется количеством вариантов значений тока j_i , которое для каждой i -й линии свое, и может быть определено:

$$m = \prod_{i=1}^N j_i. \quad (4.5)$$

Далее для определения рекомендованного набора рабочих токов необходимо произвести сортировку данных массива по параметру $K(I_i)$ (рисунок 4.7). При сортировке производится проверка температур изоляции всех линий $T_s = \{T_1, T_2 \dots T_N\}$. Варианты, в которых присутствуют значения температур выше максимально допустимого, отбрасываются и не участвуют в сортировке.

В результате сортировки определяются значения рабочих токов линий, которые указываются диспетчеру как рекомендованный режим. Диспетчер передает новые значения нагрузки тем потребителям, рабочий ток которых необходимо уменьшить. Потребители в свою очередь обеспечивают значение потребляемой электроэнергии не больше указанного. Данный режим продолжает функционировать до момента восстановления исходного состояния линии (или линий), подвергшихся незапланированному росту нагрузки.

Выводы по главе

В главе разработаны и описаны методы и алгоритмы управления процессом распределения электрической энергии в кабельном блоке для различных режимов работы.

Рассмотрен поиск максимального допустимого значения рабочего тока для новой линии, прокладываемой в эксплуатируемом блоке. Алгоритм учитывает токи уже размещенных в данном блоке линий.

Предложен алгоритм определения условий планового увеличения нагрузки линий в кабельном блоке, учитывающий дневной и ночной графики потребления действующих и перспективных режимов. Алгоритм, путем анализа температурного состояния блока, позволяет выбрать из возможных вариантов изменения нагрузочного режима, удовлетворяющий требованиям.

Предложен алгоритм управления кабельным блоком в условиях аварийного увеличения нагрузки путем частичного снижения рабочих токов с учетом плановых графиков дневного и ночного времени суток. Алгоритм позволяет определить управляющие воздействия, направленные на поддержание работоспособности блока, при условии минимального вынужденного снижения нагрузки линий.

ГЛАВА 5. РЕЗУЛЬТАТЫ ВНЕДРЕНИЯ МОДЕЛЕЙ И АЛГОРИТМОВ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ ПРИ УПРАВЛЕНИИ ПРОЦЕССОМ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ

На основании полученных в главе 4 алгоритмов разработана программа для ЭВМ, позволяющая анализировать температурное состояние блока для различных вариантов загрузки и выбирать оптимальный режим, позволяющий наиболее эффективно использовать пропускную способность блока при условии сохранения допустимого температурного режима.

Элементы предложенной системы поддержки принятия решений при управлении процессом распределения электроэнергии в кабельных блоках внедрены на предприятии ООО «Опытно-конструкторское предприятие «ЭЛКА-Кабель». ООО «ОКП «ЭЛКА-Кабель» занимается разработкой, производством, реализацией кабельной продукции, и сопровождением при эксплуатации кабельных линий.

5.1 Программная реализация алгоритмов поиска оптимального режима работы кабельного блока в условиях вынужденного увеличения нагрузки.

В процессе поиска оптимального режима работы кабельного блока с несколькими линиями необходимо учитывать большое количество различных вариантов их токовой загрузки. Для сокращения временных и счетных издержек при проведении однотипных операций расчета теплового состояния кабельного блока был разработан комплекс программ, функционирующий на основе параметрической модели, описанной в главе 3.

5.1.1 Характеристики программного комплекса «Выбор оптимального режима нагрузки кабельного блока»

В таблице 5.1 представлены основные характеристики программного комплекса. Листинг программы представлен в приложении В.

Таблица 5.1 – Основные характеристики программного комплекса

Тип ЭВМ	IBM PC
Язык программирования	Phyton 3.8
Операционная система	Windows 7 и выше
Объем программы (исключая типовые модули и функции)	6 кБ
Аннотация	<p>Программный комплекс «Выбор оптимального режима нагрузки кабельного блока» предназначен для работы в составе системы поддержки принятия решений оператора диспетчерской службы распределения электроэнергии в условиях изменяющейся нагрузки.</p> <p>Программа состоит из модулей, обеспечивающих следующий функционал:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Первичная проверка результатов численного эксперимента и их представление в виде параметрической модели; 2. Расчет тепловых состояний для всех возможных комбинаций токовых нагрузок; 3. Сортировку полученных комбинаций по выбранному параметру с исключением экстремальных режимов.

5.1.2 Описание программного комплекса «Выбор оптимального режима нагрузки кабельного блока»

Программа «Выбор оптимального режима нагрузки кабельного блока» («Optimal load mode») предназначена для расчета температуры на поверхности жил кабельных линий в кабельном блоке для заданного количества вариантов загрузки.

По заданным токовым нагрузкам максимальные значения температур в кабельных линиях определяются по выражению (3.5). Для получения исходных зависимостей приращения тепла линии от собственного тока и токов остальных линий блока были проведены численные эксперименты, результаты которых приведены в Приложении А. Пример исходных для расчета данных представлен на рисунке 5.1.

	A	B	C	D	E
1	current	delta_t			
2	0	0			
3	50	2,49			
4	100	9,63			
5	150	21,06			
6	200	36,71			
7	250	55,21			
8	300	77,64			
9	350	103,76			
10					
11					
12					

а)

	A	B	C	D	E
1	current	delta_t			
2	0	0			
3	50	0,76			
4	100	2,94			
5	150	6,43			
6	200	11,22			
7	250	19,62			
8	300	27,56			
9	350	36,8			
10					
11					
12					

б)

Рисунок 5.1 – Значения приращений температуры линии №1 от значения тока: а) на самой линии №1; б) на линии №2

Серия численных результатов, полученных для каждой зависимости $\Delta T_{i,j}$, фиксируется в отдельном файле формата .csv. Обозначение в файле LX_i-f-X_j определяет - X_i – номер линии, для которой определяется приращение температуры, X_j – номер линии, от тока которой определяется приращение температуры для линии X_i . Например, документ с названием L01-f-02 показывает приращения температуры линии №1 от тока, протекающего по линии №2. Для блока, содержащего n линий, количество таких файлов будет n^2 . Столбец «current» содержит значения токов, для которых определялось приращение температуры, столбец «delta_t» соответствующие току приращения в °С. Подобная структура заглавия файла позволяет однозначно идентифицировать зависимость и упрощает анализ исходных данных.

Модуль 1 программного комплекса позволяет аппроксимировать полученные результаты и перейти от дискретной области точечных значений к непрерывной функции.

В качестве аппроксимирующей функции использован полиномиальный ряд, степень которого можно задать в модуле настроек в виде параметра *polynomial_degree*, рисунок 5.2.

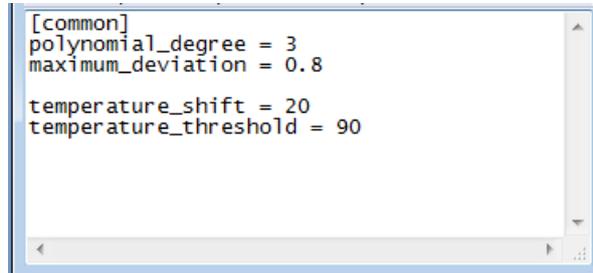


Рисунок 5.2 – Модуль настроек

Результатом работы Модуля 1 является таблица с набором коэффициентов полинома выбранной ранее степени для каждой зависимости ΔT_{i-j} . В таблице 5.2 приведена часть коэффициентов для полинома 3 степени:

$$\Delta T_{i-j} = k_0 + k_1 \cdot I_j + k_2 \cdot I_j^2 + k_3 \cdot I_j^3.$$

Таблица 5.2 – Коэффициенты для полинома 3 степени

	A	B	C	D	E
1	file	k3	k2	k1	k0
2	L01-f-01.csv	-4,800E-07	1,001E-03	1,400E-03	-1,357E-02
3	L01-f-02.csv	9,333E-08	2,894E-04	-2,848E-03	7,571E-02
4	L01-f-03.csv	1,511E-07	1,862E-04	-2,759E-03	7,548E-02
5	L01-f-04.csv	7,978E-07	-1,449E-04	2,428E-02	-1,883E-01
6	L01-f-05.csv	-8,000E-08	1,559E-04	5,000E-05	-1,429E-03
7	L01-f-06.csv	-5,111E-08	1,025E-04	8,730E-06	-7,143E-04
8	L01-f-07.csv	-2,178E-07	3,830E-04	-9,960E-04	-2,881E-02
9	L01-f-08.csv	-2,022E-07	3,367E-04	-1,068E-03	-2,905E-02
10	L01-f-09.csv	1,511E-07	1,934E-04	-2,873E-03	7,881E-02
11	L01-f-10.csv	-2,511E-07	3,060E-04	-1,476E-02	1,260E-01
12	L01-f-11.csv	-8,000E-08	1,596E-04	4,143E-04	-4,048E-03
13	L01-f-12.csv	2,031E-07	8,685E-05	-3,093E-03	7,990E-02
14	L01-f-13.csv	-1,044E-07	2,329E-04	-1,437E-04	1,905E-03
15	L01-f-14.csv	-1,022E-07	2,312E-04	-2,540E-05	-2,143E-03
16	L01-f-15.csv	-8,222E-08	1,851E-04	1,032E-05	-1,190E-03

Также в модуле настроек задается параметр *maximum_deviation*, позволяющий отслеживать численные значения, которые имеют большое отклонение от значений, вычисленных по полиному, что помогает отслеживать некорректные экспериментальные точки. Коэффициенты для полиномов, не превышающих этот параметр, также записываются в файл с названием *good_files.csv*, а имеющие точки с превышением параметра в файл *bad_files.csv*. При необходимости отсеянные таким образом результаты численного эксперимента

могут быть либо уточнены, либо (при большом количестве отклонений) принята иная форма аппроксимирующей зависимости.

Модуль 2 позволяет построить график полинома с отмеченными на нем значениями, полученными в ходе численного эксперимента, и значениями отклонений температур этих точек от вычисленного по полиному. Пример графика показан на рисунке 5.3. Для построения графика используется библиотека Matplotlib.

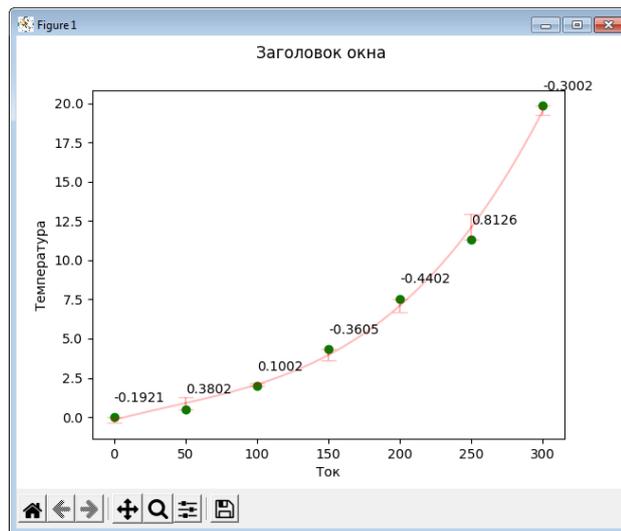


Рисунок 5.3 – График зависимости температуры от тока

Модуль 3 рассчитывает температуры на поверхности жил линий в зависимости от начальной температуры и дополнительного тепла от протекающих по данной и остальным линиям токов. Начальная температура задается в модуле настроек константой *temperature_shift*.

Для расчета необходимо задать варианты токовых нагрузок для всех линий в файле *current.csv*. Пример файла с этими данными приведен на рисунке 5.4. Каждый столбец соответствует возможным значениям рабочего тока линии, номер которой указан после буквы L.

	A	B	C	D	E	F	G	H
1	L01	L02	L03	L04	L05	L06	L07	L08
2		0	0	0	100	0	100	0
3		200	125	180		150	200	160
4								
5								
6								
7								
8								80

Рисунок 5.4 – Пример задаваемых вариантов значений токов

В результате расчета Модуль 3 формирует файл (result_table.csv), в котором записаны значения температур поверхностей жил всех кабельных линий для всех перечисленных в current.csv комбинаций токовых нагрузок. В таблице 5.3 приведена часть расчетов для приведенных значений нагрузки.

Таблица 5.3 – Результаты расчета Модуля 3

A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U	V	W	X	Y	Z	AA	AB	AC	AD	AE	AF	AG	AH	AI	AJ	
1	L01	L02	L03	L04	L05	L06	L07	L08	L09	L10	L11	L12	L13	L14	L15	L16	L17	L18	L01_t	L02_t	L03_t	L04_t	L05_t	L06_t	L07_t	L08_t	L09_t	L10_t	L11_t	L12_t	L13_t	L14_t	L15_t	L16_t	L17_t	L18_t
2	0	0	0	100	0	100	0	80	0	0	0	150	0	0	0	0	0	7.06	9.30	10.99	17.39	13.96	7.88	13.48	10.91	12.74	14.02	29.00	8.57	9.81	9.46	11.69	11.73	12.67		
3	0	0	0	100	0	100	0	80	0	0	0	150	0	0	0	0	190	11.68	13.92	17.11	23.93	21.63	27.99	12.50	19.60	18.51	21.87	24.73	41.17	14.70	15.94	17.11	20.87	23.96	43.18	
4	0	0	0	100	0	100	0	80	0	0	0	150	0	0	0	150	0	10.01	13.19	14.83	22.28	18.83	25.18	11.79	18.17	16.57	19.94	21.62	35.78	12.48	14.67	15.11	19.45	31.10	20.41	
5	0	0	0	100	0	100	0	80	0	0	0	150	0	0	0	150	190	14.63	17.81	20.95	28.79	26.49	32.84	16.41	24.30	24.17	28.67	32.33	47.96	18.61	20.79	22.76	28.64	43.33	50.90	
6	0	0	0	100	0	100	0	80	0	0	0	150	0	0	0	100	0	8.82	10.84	13.20	19.60	16.17	22.10	9.45	15.85	14.00	16.00	17.11	30.97	10.77	12.71	12.99	20.49	15.26	15.32	
7	0	0	0	100	0	100	0	80	0	0	0	150	0	0	0	100	190	13.44	15.46	19.32	26.14	23.83	29.76	14.07	21.98	21.60	25.13	27.82	43.15	16.90	18.84	20.65	26.97	27.49	45.81	
8	0	0	0	100	0	100	0	80	0	0	0	150	0	0	0	100	150	0	11.77	14.73	17.04	24.47	21.04	26.95	13.36	20.55	19.65	22.80	24.71	37.76	14.68	17.56	18.64	28.25	34.63	23.06
9	0	0	0	100	0	100	0	80	0	0	0	150	0	0	0	100	150	190	16.39	19.35	23.16	31.00	28.70	34.61	17.98	26.67	27.25	31.93	35.42	49.93	20.81	23.69	26.29	37.44	46.86	53.55
10	0	0	0	100	0	100	0	80	0	0	0	150	0	0	140	0	0	10.47	13.56	15.24	21.65	17.25	23.72	12.01	19.42	17.52	18.69	18.93	32.63	13.66	16.61	26.41	18.48	18.72	16.90	
11	0	0	0	100	0	100	0	80	0	0	0	150	0	0	140	0	0	19.0	15.09	18.18	21.37	28.19	24.92	31.38	16.63	25.55	25.12	27.62	29.63	44.81	19.79	24.70	34.06	27.67	28.95	47.39
12	0	0	0	100	0	100	0	80	0	0	0	150	0	0	140	0	150	0	13.41	17.45	19.08	26.52	22.12	28.57	15.92	24.12	23.17	25.48	26.33	39.42	17.57	21.46	32.05	26.25	36.09	24.64
13	0	0	0	100	0	100	0	80	0	0	0	150	0	0	140	0	150	190	18.03	22.07	25.21	33.05	29.78	36.23	20.54	30.25	30.77	34.62	37.23	51.59	23.70	27.99	39.71	35.44	48.32	55.13
14	0	0	0	100	0	100	0	80	0	0	0	150	0	0	140	100	0	12.23	15.09	17.45	23.86	19.46	25.49	13.58	21.80	20.60	21.95	22.01	34.61	15.86	19.51	29.94	27.28	20.25	19.55	
15	0	0	0	100	0	100	0	80	0	0	0	150	0	0	140	100	0	16.85	19.72	23.58	30.40	27.13	33.15	18.20	27.93	28.20	31.08	32.72	46.78	21.99	25.64	37.59	36.47	32.48	50.04	
16	0	0	0	100	0	100	0	80	0	0	0	150	0	0	140	100	150	0	15.17	18.99	21.29	28.73	24.33	30.34	17.49	26.50	26.26	28.75	29.61	41.40	19.77	24.36	35.59	35.05	39.62	27.29
17	0	0	0	100	0	100	0	80	0	0	0	150	0	0	140	100	150	190	19.79	23.61	27.42	35.26	31.99	38.00	22.11	32.62	33.86	37.88	40.32	53.57	25.90	30.49	43.24	44.24	51.85	57.78
18	0	0	0	100	0	100	0	80	0	0	0	150	0	125	0	0	0	10.47	12.72	14.40	19.94	16.70	22.40	11.63	18.70	15.68	16.60	17.21	31.75	14.01	23.42	14.92	15.80	15.14	15.42	
19	0	0	0	100	0	100	0	80	0	0	0	150	0	125	140	0	0	13.88	16.97	18.66	24.20	19.99	25.79	16.76	24.65	23.28	25.73	27.92	43.92	20.14	28.54	22.57	24.98	27.37	45.91	
20	0	0	0	100	0	100	0	80	0	0	0	150	0	125	0	0	150	0	13.42	16.61	18.24	24.81	21.56	27.25	16.54	23.40	21.34	23.40	24.82	38.53	17.93	28.27	20.56	23.56	34.51	23.16
21	0	0	0	100	0	100	0	80	0	0	0	150	0	125	0	0	150	190	18.04	21.23	24.37	31.34	29.23	34.91	21.17	29.52	28.94	32.53	35.52	50.71	24.05	34.40	28.22	32.75	46.73	53.65
22	0	0	0	100	0	100	0	80	0	0	0	150	0	125	0	100	0	16.25	18.25	20.61	22.15	18.91	24.17	14.20	21.08	18.77	19.86	20.30	33.72	16.21	26.34	18.45	24.60	18.67	18.06	
23	0	0	0	100	0	100	0	80	0	0	0	150	0	125	0	100	190	16.85	18.87	22.74	28.69	26.57	31.83	18.83	27.21	26.37	28.99	31.01	45.90	22.34	32.41	26.10	33.79	30.90	48.56	
24	0	0	0	100	0	100	0	80	0	0	0	150	0	125	0	100	150	0	15.18	18.15	20.45	27.02	23.77	29.02	18.12	25.78	24.43	26.66	27.90	40.51	20.12	31.17	24.09	32.37	38.04	25.81
25	0	0	0	100	0	100	0	80	0	0	0	150	0	125	0	100	150	190	19.80	22.77	26.58	33.55	31.44	36.68	22.74	31.90	32.03	35.79	38.61	52.68	26.25	37.29	31.75	41.55	50.27	56.30
26	0	0	0	100	0	100	0	80	0	0	0	150	0	125	140	0	0	13.88	16.97	18.66	24.20	19.99	25.79	16.76	24.65	23.28	25.73	27.92	43.92	19.10	30.21	22.86	22.59	20.13	19.65	
27	0	0	0	100	0	100	0	80	0	0	0	150	0	125	140	0	0	190	18.50	21.59	24.79	30.74	27.65	33.45	21.38	30.78	29.89	31.68	32.82	47.56	25.23	36.34	39.52	31.78	32.36	50.14
28	0	0	0	100	0	100	0	80	0	0	0	150	0	125	140	0	150	0	16.82	20.87	22.50	29.07	24.85	30.64	20.67	29.35	27.95	29.85	32.72	42.17	23.02	30.67	37.51	30.86	39.50	27.39
29	0	0	0	100	0	100	0	80	0	0	0	150	0	125	140	0	150	190	21.44	25.49	28.63	35.60	32.52	38.30	25.29	35.47	35.55	38.48	40.43	54.34	29.14	41.19	45.17	39.55	51.73	57.88
30	0	0	0	100	0	100	0	80	0	0	0	150	0	125	140	100	0	0	15.64	18.51	20.87	26.41	22.20	27.56	18.33	27.03	25.38	25.81	25.20	37.36	21.30	33.11	35.99	31.40	23.66	22.30
31	0	0	0	100	0	100	0	80	0	0	0	150	0	125	140	100	0	190	20.26	23.13	27.00	32.95	29.86	35.22	22.95	33.16	32.98	34.94	35.91	49.53	27.43	39.24	43.05	40.58	35.89	52.79
32	0	0	0	100	0	100	0	80	0	0	0	150	0	125	140	100	150	0	18.58	22.40	24.71	31.28	27.06	32.41	22.25	31.72	31.03	32.61	32.81	44.14	25.22	37.96	41.04	39.16	43.03	30.04
33	0	0	0	100	0	100	0	80	0	0	0	150	0	125	140	100	150	190	23.20	27.02	30.84	37.81	34.73	40.07	26.87	37.85	36.83	41.74	43.51	56.32	31.24	44.09	48.70	48.35	55.26	60.53
34	0	0	0	100	0	100	0	80	0	0	0	150	170	0	0	0	0	13.25	15.49	16.08	22.34	17.70	24.06	17.65	22.13	18.23	18.82	18.97	32.73	33.21	19.70	16.88	17.87	16.68	17.62	
35	0	0	0	100	0	100	0	80	0	0	0	150	170	0	0	0	190	17.87	20.11	22.21	28.88	25.86	31.72	22.27	28.25	25.93	29.68	32.86	44.91	39.34	25.82	24.54	27.06	28.91	48.11	
36	0	0	0	100	0	100	0	80	0	0	0	150	170	0	0	0	150	0	16.20	19.38	19.92	27.21	22.56	28.91	21.56	26.82	23.88	25.61	26.57	39.52	37.13	24.55	25.64	26.05	25.36	
37	0	0	0	100	0	100	0	80	0	0	0	150	170	0	0	0	150	190	20.82	24.01	26.05	33.75	30.22	36.58	26.18	32.95	31.48	34.75	37.28	51.69	43.25	30.68	30.19	34.82	48.28	55.85
38	0	0	0	100	0	100	0	80	0	0	0	150	170	0	0	100	0	15.01	17.03	18.29	24.55	19.91	25.83	19.22	24.51	21.31	22.08	22.06	34.71	35.41	22.59	20.42	26.67	20.21	20.27	
39	0	0	0	100	0	100	0	80	0	0	0	150	170	0	0	100	0	19.63	21.65	24.42	31.09	27.57	33.49	23.84	30.63	28.91	31.21	32.77	46.88	41.54	28.71	2				

Таблица 5.4 – Результаты расчета Модуля 4

A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U	V	W	X	Y	Z	AA	AB	AC	AD	AE	AF	AG	AH	AI	AJ	AK	mean_g																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																							
1	101	102	103	104	105	106	107	108	109	110	111	112	113	114	115	116	117	118	119	120	121	122	123	124	125	126	127	128	129	130	131	132	133	134	135	136	137	138	139	140	141	142	143	144	145	146	147	148	149	150	151	152	153	154	155	156	157	158	159	160	161	162	163	164	165	166	167	168	169	170	171	172	173	174	175	176	177	178	179	180	181	182	183	184	185	186	187	188	189	190	191	192	193	194	195	196	197	198	199	200	201	202	203	204	205	206	207	208	209	210	211	212	213	214	215	216	217	218	219	220	221	222	223	224	225	226	227	228	229	230	231	232	233	234	235	236	237	238	239	240	241	242	243	244	245	246	247	248	249	250	251	252	253	254	255	256	257	258	259	260	261	262	263	264	265	266	267	268	269	270	271	272	273	274	275	276	277	278	279	280	281	282	283	284	285	286	287	288	289	290	291	292	293	294	295	296	297	298	299	300	301	302	303	304	305	306	307	308	309	310	311	312	313	314	315	316	317	318	319	320	321	322	323	324	325	326	327	328	329	330	331	332	333	334	335	336	337	338	339	340	341	342	343	344	345	346	347	348	349	350	351	352	353	354	355	356	357	358	359	360	361	362	363	364	365	366	367	368	369	370	371	372	373	374	375	376	377	378	379	380	381	382	383	384	385	386	387	388	389	390	391	392	393	394	395	396	397	398	399	400	401	402	403	404	405	406	407	408	409	410	411	412	413	414	415	416	417	418	419	420	421	422	423	424	425	426	427	428	429	430	431	432	433	434	435	436	437	438	439	440	441	442	443	444	445	446	447	448	449	450	451	452	453	454	455	456	457	458	459	460	461	462	463	464	465	466	467	468	469	470	471	472	473	474	475	476	477	478	479	480	481	482	483	484	485	486	487	488	489	490	491	492	493	494	495	496	497	498	499	500	501	502	503	504	505	506	507	508	509	510	511	512	513	514	515	516	517	518	519	520	521	522	523	524	525	526	527	528	529	530	531	532	533	534	535	536	537	538	539	540	541	542	543	544	545	546	547	548	549	550	551	552	553	554	555	556	557	558	559	560	561	562	563	564	565	566	567	568	569	570	571	572	573	574	575	576	577	578	579	580	581	582	583	584	585	586	587	588	589	590	591	592	593	594	595	596	597	598	599	600	601	602	603	604	605	606	607	608	609	610	611	612	613	614	615	616	617	618	619	620	621	622	623	624	625	626	627	628	629	630	631	632	633	634	635	636	637	638	639	640	641	642	643	644	645	646	647	648	649	650	651	652	653	654	655	656	657	658	659	660	661	662	663	664	665	666	667	668	669	670	671	672	673	674	675	676	677	678	679	680	681	682	683	684	685	686	687	688	689	690	691	692	693	694	695	696	697	698	699	700	701	702	703	704	705	706	707	708	709	710	711	712	713	714	715	716	717	718	719	720	721	722	723	724	725	726	727	728	729	730	731	732	733	734	735	736	737	738	739	740	741	742	743	744	745	746	747	748	749	750	751	752	753	754	755	756	757	758	759	760	761	762	763	764	765	766	767	768	769	770	771	772	773	774	775	776	777	778	779	780	781	782	783	784	785	786	787	788	789	790	791	792	793	794	795	796	797	798	799	800	801	802	803	804	805	806	807	808	809	810	811	812	813	814	815	816	817	818	819	820	821	822	823	824	825	826	827	828	829	830	831	832	833	834	835	836	837	838	839	840	841	842	843	844	845	846	847	848	849	850	851	852	853	854	855	856	857	858	859	860	861	862	863	864	865	866	867	868	869	870	871	872	873	874	875	876	877	878	879	880	881	882	883	884	885	886	887	888	889	890	891	892	893	894	895	896	897	898	899	900	901	902	903	904	905	906	907	908	909	910	911	912	913	914	915	916	917	918	919	920	921	922	923	924	925	926	927	928	929	930	931	932	933	934	935	936	937	938	939	940	941	942	943	944	945	946	947	948	949	950	951	952	953	954	955	956	957	958	959	960	961	962	963	964	965	966	967	968	969	970	971	972	973	974	975	976	977	978	979	980	981	982	983	984	985	986	987	988	989	990	991	992	993	994	995	996	997	998	999	1000	1001	1002	1003	1004	1005	1006	1007	1008	1009	1010	1011	1012	1013	1014	1015	1016	1017	1018	1019	1020	1021	1022	1023	1024	1025	1026	1027	1028	1029	1030	1031	1032	1033	1034	1035	1036	1037	1038	1039	1040	1041	1042	1043	1044	1045	1046	1047	1048	1049	1050	1051	1052	1053	1054	1055	1056	1057	1058	1059	1060	1061	1062	1063	1064	1065	1066	1067	1068	1069	1070	1071	1072	1073	1074	1075	1076	1077	1078	1079	1080	1081	1082	1083	1084	1085	1086	1087	1088	1089	1090	1091	1092	1093	1094	1095	1096	1097	1098	1099	1100	1101	1102	1103	1104	1105	1106	1107	1108	1109	1110	1111	1112	1113	1114	1115	1116	1117	1118	1119	1120	1121	1122	1123	1124	1125	1126	1127	1128	1129	1130	1131	1132	1133	1134	1135	1136	1137	1138	1139	1140	1141	1142	1143	1144	1145	1146	1147	1148	1149	1150	1151	1152	1153	1154	1155	1156	1157	1158	1159	1160	1161	1162	1163	1164	1165	1166	1167	1168	1169	1170	1171	1172	1173	1174	1175	1176	1177	1178	1179	1180	1181	1182	1183	1184	1185	1186	1187	1188	1189	1190	1191	1192	1193	1194	1195	1196	1197	1198	1199	1200	1201	1202	1203	1204	1205	1206	1207	1208	1209	1210	1211	1212	1213	1214	1215	1216	1217	1218	1219	1220	1221	1222	1223	1224	1225	1226	1227	1228	1229	1230	1231	1232	1233	1234	1235	1236	1237	1238	1239	1240	1241	1242	1243	1244	1245	1246	1247	1248	1249	1250	1251	1252	1253	1254	1255	1256	1257	1258	1259	1260	1261	1262	1263	1264	1265	1266	1267	1268	1269	1270	1271	1272	1273	1274	1275	1276	1277	1278	1279	1280	1281	1282	1283	1284	1285	1286	1287	1288	1289	1290	1291	1292	1293	1294	1295	1296	1297	1298	1299	1300	1301	1302	1303	1304	1305	1306	1307	1308	1309	1310	1311	1312	1313	1314	1315	1316	1317	1318	1319	1320	1321	1322	1323	1324	1325	1326	1327	1328	1329	1330	1331	1332	1333	1334	1335	1336	1337	1338	1339	1340	1341	1342	1343	1344	1345	1346	1347	1348	1349	1350	1351	1352	1353	1354	1355	1356	1357	1358	1359	1360	1361	1362	1363	1364	1365	1366	1367	1368	1369	1370	1371	1372	1373	1374	1375	1376	1377	1378	1379	1380	1381	1382	1383	1384	1385	1386	1387	1388	1389	1390	1391	1392	1393	1394	1395	1396	1397	1398	1399	1400	1401	1402	1403	1404	1405	1406	1407	1408	1409	1410	1411	1412	1413	1414	1415	1416	1417	1418	1419	1420	1421	1422	1423	1424	1425	1426	1427	1428	1429	1430	1431	1432	1433	1434	1435	1436	1437	1438	1439	1440	1441	1442	1443	1444	1445	1446	1447	1448	1449	1450	1451	1452	1453	1454	1455	1456	1457	1458	1459	1460	1461	1462	1463	1464	1465	1466	1467	1468	1469	1470	1471	1472	1473	1474	1475	1476	1477	1478	1479	1480	1481	1482	1483	1484	1485	1486	1487	1488	1489	1490	1491	1492	1493	1494	1495	1496	1497	1498	1499	1500	1501	1502	1503	1504	1505	1506	1507	1508	1509	1510	1511	1512	1513	1514	1515	1516	1517	1518	1519	1520	1521	1522	1523	1524	1525	1526	1527	1528	1529	1530	1531	1532	1533	1534	1535	1536</

5.1.3 Демонстрационный пример использования системы поддержки принятия решений при распределении нагрузки в кабельном блоке

Рассмотренный в главе 3.3 (таблица 3.6) режим работы кабельного блока содержит линию №15, температура которой превышает допустимые 90° С. Рассмотрим пример поиска значений рабочих токов, которые необходимо установить для поддержания удовлетворяющего ограничениям температурного состояния блока, с помощью программного комплекса.

Кабельные линии №№ 1, 2, 3, 4 и 12 обеспечивают электроэнергией потребителей 1 категории, следовательно, снижение рабочих токов на этих линиях не допустимо. Если нагрузка линии №15 увеличилась вследствие вынужденного/ аварийного перераспределения загрузки линий, снижение её рабочего тока невозможно до момента устранения причины, приведшей к данному режиму блока. Следовательно, необходимо определить, на каких из оставшихся линий возможно снизить нагрузку. В таблице 5.5 представлены варианты снижения рабочих токов линий с выбранным шагом понижения 50 А.

Таблица 5.5 – Варианты рабочих токов с шагом понижения 50 А

Номер линии	Варианты значений рабочего тока, А			
1	200			
2	50			
3	25			
4	100			
5	150	100	50	0
6	100	50	0	
7	100	50	0	
8	50	0		
9	0			
10	0			
11	100	50	0	
12	50			
13	150	100	50	0
14	100	50	0	
15	200			
16	50	0		
17	150	100	50	0
18	100	50	0	

При данном шаге понижения нагрузки количество комбинаций составит 62 208. В таблице 5.7 представлена часть результатов, которая получается после расчета всех вариантов, сортировки и отбрасывания комбинаций, не удовлетворяющих условию максимального значения температуры.

Как видно из результатов, три верхние комбинации имеют одинаковое значение параметра $K(I_i)$. Для сохранения температурного режима блока в допустимых пределах достаточно снизить рабочий ток до 50 А в одной из линий: №17, №5 или №13.

Варианты снижения рабочих токов для шага 20 А представлены в таблице 5.6.

Таблица 5.6 – Варианты рабочих токов с шагом понижения 20 А

Номер линии	Варианты значений рабочего тока, А									
	200	150	130	110	90	70	50	30	10	0
1	200									
2	50									
3	25									
4	100									
5	150	130	110	90	70	50	30	10	0	
6	100	80	60	40	20	0				
7	100	80	60	40	20	0				
8	50	30	10	0						
9	0									
10	0									
11	100	80	60	40	20	0				
12	50									
13	150	130	110	90	70	50	30	10	0	
14	100	80	60	40	20	0				
15	200									
16	50	30	10	0						
17	150	130	110	90	70	50	30	10	0	
18	100	80	60	40	20	0				

Количество комбинаций токов для данных значений составит 90 699 264. В таблице 5.8 представлена часть результирующей таблицы для данного варианта шага понижения. Как видно из результатов, наибольшее значение параметра $K(I_i)$ имеют две комбинации рабочих токов. Сохранение допустимых температур возможно при снижении рабочего тока до 80 А в линии №17 или в линии №13. При одинаковых значениях параметра $K(I_i)$ окончательный выбор управляющих воздействий производит диспетчер, основываясь на своем опыте и характеристиках потребителей.

Таблица 5.7 – Часть итоговой таблицы для шага 50 А

№	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U	V	W	X	Y	Z	AA	AB	AC	AD	AE	AF	AG	AH	AI	AJ	AK											
1	L01	L02	L03	L04	L05	L06	L07	L08	L09	L10	L11	L12	L13	L14	L15	L16	L17	L18	L19_t	L20_t	L23_t	L24_t	L25_t	L26_t	L27_t	L28_t	L29_t	L30_t	L31_t	L32_t	L33_t	L34_t	L35_t	L36_t	L37_t	L38_t	L39_t	L40_t	L41_t	L42_t	L43_t	L44_t	L45_t	L46_t	L47_t	L48_t	L49_t	mean_g
2	200	50	25	100	150	100	100	50	0	0	100	50	150	100	200	50	50	100	85,17	65,47	57,74	67,34	74,52	61,92	73,70	71,43	69,14	68,37	71,73	61,75	77,68	75,48	88,64	69,08	63,61	65,13	0,0185											
3	200	50	25	100	50	100	100	50	0	0	100	50	150	100	200	50	150	100	84,91	65,93	56,64	65,03	60,22	60,41	74,30	72,12	70,43	68,93	72,04	62,20	78,28	76,80	89,28	71,39	76,02	67,86	0,0185											
4	200	50	25	100	150	100	100	50	0	0	100	50	50	100	200	50	150	100	83,47	64,60	57,74	68,21	76,23	63,62	70,22	69,78	69,13	70,01	75,25	65,18	64,02	72,91	87,95	71,65	77,30	68,53	0,0185											
5	200	50	25	100	150	100	50	50	0	0	50	50	150	100	200	50	150	100	83,99	65,31	58,16	67,91	75,06	63,24	68,54	71,78	70,59	70,39	70,07	63,98	77,45	76,00	89,33	72,19	76,79	68,55	0,0139											
6	200	50	25	100	150	100	50	50	0	0	100	50	150	100	200	50	150	50	84,15	65,65	58,56	68,92	76,05	63,89	68,69	71,99	70,87	70,92	75,24	64,04	77,20	76,21	89,59	72,46	76,78	64,28	0,0139											
7	200	50	25	100	150	100	100	50	0	0	50	50	150	100	200	50	150	50	85,63	66,57	58,27	68,14	74,54	62,27	75,02	72,96	70,85	69,94	68,90	62,50	78,76	76,93	89,56	71,72	75,48	63,12	0,0139											
8	200	50	25	100	150	100	50	50	0	0	100	50	150	50	200	50	150	100	83,50	65,00	58,22	68,92	76,38	64,54	67,38	70,70	70,19	70,93	75,93	65,32	75,89	70,96	88,60	72,72	77,77	69,51	0,0139											
9	200	50	25	100	150	100	100	50	0	0	100	50	150	50	200	50	150	50	85,14	66,26	58,33	69,15	75,86	63,57	73,86	71,88	70,44	70,48	74,76	63,84	77,20	71,90	88,83	72,25	76,46	64,08	0,0139											
10	200	50	25	100	150	100	100	50	0	0	50	50	150	50	200	50	150	100	84,98	65,92	57,94	68,14	74,88	62,92	73,71	71,67	70,16	69,94	69,58	63,79	77,45	71,69	88,58	71,98	76,47	68,35	0,0139											
11	200	50	25	100	150	50	100	50	0	0	100	50	150	50	200	50	150	100	85,41	66,18	58,64	68,78	75,02	58,06	74,21	72,11	70,65	71,07	75,03	63,89	77,43	72,13	89,47	72,76	77,47	68,88	0,0139											
12	200	50	25	100	50	100	100	50	0	0	100	50	150	50	200	50	150	100	83,27	64,29	54,99	63,78	58,90	59,41	72,00	69,51	68,12	66,98	70,42	60,88	75,66	70,24	86,65	69,68	74,38	66,54	0,0093											
13	200	50	25	100	50	100	50	50	0	0	100	50	150	100	200	50	150	100	82,28	63,67	55,22	63,55	59,08	59,73	66,82	69,63	68,55	67,42	70,91	61,07	75,65	74,55	87,41	69,89	74,70	66,73	0,0093											
14	200	50	25	100	50	50	100	50	0	0	100	50	150	100	200	50	150	100	84,19	64,85	55,64	63,41	57,73	53,25	73,65	71,04	69,01	67,57	70,01	59,64	77,19	75,72	88,28	69,92	74,40	66,10	0,0093											
15	200	50	25	100	150	100	100	50	0	0	100	50	50	50	200	50	150	100	81,83	62,96	56,09	66,97	74,91	62,62	67,91	67,18	66,83	68,06	73,63	63,85	61,40	66,35	85,32	69,93	75,66	67,21	0,0093											
16	200	50	25	100	150	100	100	50	0	0	100	50	150	100	200	50	50	50	84,18	64,47	56,43	66,09	72,87	60,28	72,71	70,12	67,52	66,41	69,43	59,15	76,36	74,17	87,00	67,10	60,98	58,57	0,0093											
17	200	50	25	100	150	100	100	50	0	0	50	50	50	100	200	50	150	100	82,32	63,26	56,03	65,95	73,60	61,32	69,07	68,26	67,23	67,52	67,77	62,52	62,95	71,38	86,05	69,40	74,68	66,25	0,0093											
18	200	50	25	100	150	50	100	50	0	0	100	50	150	100	200	50	50	100	84,45	64,39	56,74	65,72	72,03	54,76	73,06	70,35	67,73	67,01	69,71	59,19	76,59	74,40	87,64	67,61	61,99	63,37	0,0093											
19	200	50	25	100	150	100	100	50	0	0	50	50	150	100	200	50	50	100	84,02	64,13	56,04	65,08	71,89	59,63	72,55	69,91	67,24	65,88	64,26	59,09	76,61	73,96	86,74	66,83	60,99	62,84	0,0093											
20	200	50	25	100	50	100	100	50	0	0	100	50	150	100	200	50	150	50	83,92	64,94	55,32	63,78	58,57	58,76	73,31	70,80	68,81	66,97	69,74	59,60	76,96	75,48	87,64	69,42	73,39	61,30	0,0093											
21	200	50	25	100	150	100	50	50	0	0	100	50	50	100	200	50	150	100	80,84	62,34	56,32	66,74	75,10	62,94	62,74	67,30	67,26	68,51	74,12	64,05	61,39	70,66	86,07	70,15	75,98	67,40	0,0093											
22	200	50	25	100	150	100	100	50	0	0	100	50	150	50	200	50	50	100	83,53	63,82	56,10	66,10	73,20	60,93	71,40	68,83	66,84	66,42	70,11	60,43	75,06	68,92	86,01	67,36	61,97	63,80	0,0093											
23	200	50	25	100	150	50	100	50	0	0	100	50	50	100	200	50	150	100	82,75	63,52	56,73	66,59	73,74	56,46	69,57	68,70	67,72	68,65	73,22	62,62	62,93	71,82	86,95	70,18	75,68	66,77	0,0093											
24	200	50	25	100	150	100	100	50	0	0	100	50	50	100	200	50	150	50	82,48	63,61	56,42	66,97	74,58	61,97	69,22	68,47	67,51	68,06	72,94	62,57	62,70	71,59	86,30	69,67	74,67	61,97	0,0093											
25	200	50	25	100	50	100	100	50	0	0	50	50	150	100	200	50	150	100	83,76	64,59	54,93	62,77	57,58	58,11	73,15	70,59	68,53	66,44	64,56	59,54	77,21	75,27	87,38	69,14	73,40	65,58	0,0093											
26	200	50	25	100	150	100	50	50	0	0	100	50	150	100	200	50	50	100	82,54	63,21	56,32	65,86	73,39	61,25	66,22	68,95	67,27	66,86	70,60	60,62	75,05	73,23	86,77	67,57	62,29	64,00	0,0093											
27	200	50	25	100	150	50	50	50	0	0	100	50	150	50	200	50	150	100	82,77	63,92	57,22	67,30	73,89	57,38	66,74	69,62	68,78	69,57	73,90	62,76	74,80	69,88	87,60	71,25	76,15	67,75	0,0069											
28	200	50	25	100	150	100	100	50	0	0	50	50	150	50	200	50	150	50	83,99	64,93	56,62	66,89	73,23	61,27	72,72	70,35	68,54	67,99	67,28	61,18	76,14	70,37	86,93	70,00	73,84	61,80	0,0069											
29	200	50	25	100	150	50	100	50	0	0	50	50	150	50	200	50	150	100	84,26	64,84	56,93	66,52	72,39	55,76	73,06	70,59	68,75	68,59	67,56	61,22	76,36	70,61	87,57	70,51	74,85	66,59	0,0069											
30	200	50	25	100	150	100	50	50	0	0	100	50	150	50	200	50	150	50	82,50	64,01	56,91	67,68	74,73	62,89	69,39	68,57	68,98	73,63	62,71	74,58	69,65	86,96	70,75	75,14	62,95	0,0069												
31	200	50	25	100	150	50	50	50	0	0	50	50	150	100	200	50	150	100	83,27	64,23	57,16	66,29	72,57	56,08	67,89	70,70	69,18	69,03	68,04	61,42	76,36	74,91	88,33	70,72	75,17	66,79	0,0069											
32	200	50	25	100	150	50	50	50	0	0	100	50	150	100	200	50	150	50	83,42	64,57	57,56	67,30	73,56	56,73	68,05	70,91	69,46	69,57	73,22	61,47	76,11	75,12	88,59	70,99	75,16	62,52	0,0069											
33	200	50	25	100	150	100	50	50	0	0	50	50	150	50	200	50	150	100	82,35	63,66	56,52	66,66	73,74	62,25	66,23	69,18	68,29	68,44	68,45	62,65	74,83	69,44	86,70	70,47	75,15	67,22	0,0069											
34	200	50	25	100	150	50	100	50	0	0	50	50	150	100	200	50	150	50	84,91	65,49	57,27	66,52	72,06	55,11	74,37	71,88	69,43	68,58	66,87	59,94	77,67	75,85	88,56	70,25	73,86	61,36	0,0069											
35	200	50	25	100	150	100	50	50	0	0	50	50	150	100	200	50	150	50	83,00	64,31	56,85	66,66	73,41	61,60	67,54	70,47	68,97	68,44	67,77	61,37	76,13	74,68	87,69	70,21	74,16	61,99	0,0069											
36	200	50	25	100	150	50	100	50	0	0	100	50	150	50	200	50	150	50	84,41	65,18	57,33	67,53	73,37	56,41	73,22	70,80	69,03	69,12	72,73	61,28	76,11	70,82	87,83															

Таблица 5.8 – Часть итоговой таблицы для шага 20 А

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U	V	W	X	Y	Z	AA	AB	AC	AD	AE	AF	AG	AH	AI	AJ	AK
1	L01	L02	L03	L04	L05	L06	L07	L08	L09	L10	L11	L12	L13	L14	L15	L16	L17	L18	L01 t	L02 t	L03 t	L04 t	L05 t	L06 t	L07 t	L08 t	L09 t	L10 t	L11 t	L12 t	L13 t	L14 t	L15 t	L16 t	L17 t	L18 t	mean g
2	200	50	25	100	150	100	100	50	0	0	100	50	150	100	200	50	80	100	85,69	66,16	58,37	68,20	75,38	62,79	74,40	72,26	70,14	69,57	73,08	62,96	78,37	76,34	89,57	70,46	67,05	66,50	0,0296
3	200	50	25	100	150	100	100	50	0	0	100	50	80	100	200	50	150	100	84,33	65,47	58,36	68,90	76,75	64,14	71,56	70,99	70,13	70,84	75,94	65,70	67,45	74,28	88,98	72,51	77,99	69,22	0,0296
4	200	50	25	100	150	100	100	50	0	0	100	50	80	100	200	50	150	100	83,86	64,99	57,74	68,28	75,97	63,36	71,09	70,37	69,34	69,89	74,84	64,44	66,83	73,66	88,20	71,57	76,74	66,10	0,0237
5	200	50	25	100	150	100	80	50	0	0	100	50	150	100	200	50	80	100	84,44	65,08	57,67	67,48	74,85	62,44	70,85	71,06	69,25	68,86	72,54	62,42	77,13	75,27	88,68	69,74	66,37	65,97	0,0237
6	200	50	25	100	80	100	100	50	0	0	80	50	150	100	200	50	150	100	84,95	65,76	56,61	65,23	62,73	60,39	74,33	72,02	70,23	68,76	69,84	61,95	78,32	76,58	89,16	71,13	75,68	67,48	0,0237
7	200	50	25	100	150	80	100	50	0	0	100	50	150	100	200	50	80	100	85,35	65,64	57,86	67,39	74,18	59,39	74,06	71,75	69,45	68,90	72,09	61,74	77,85	75,83	89,07	69,78	66,23	65,65	0,0237
8	200	50	25	100	80	100	80	50	0	0	100	50	150	100	200	50	150	100	84,24	65,36	56,76	65,58	63,44	61,14	71,33	71,54	70,24	69,25	72,85	62,68	77,61	76,24	89,17	71,48	76,25	68,03	0,0237
9	200	50	25	100	80	100	100	50	0	0	100	50	150	100	200	50	150	80	85,02	65,97	56,84	65,69	63,19	60,70	74,40	72,12	70,34	69,02	72,29	61,95	78,23	76,68	89,28	71,26	75,67	65,45	0,0237
10	200	50	25	100	150	100	80	50	0	0	100	50	80	100	200	50	150	100	83,08	64,39	57,66	68,18	76,21	63,79	68,01	69,79	69,25	70,12	75,40	65,16	66,21	73,22	88,09	71,80	77,32	68,69	0,0237
11	200	50	25	100	150	100	100	50	0	0	80	50	80	100	200	50	150	100	83,79	64,78	57,51	67,83	75,50	63,05	71,01	70,27	69,23	69,63	72,39	64,44	66,92	73,56	88,08	71,44	76,75	68,14	0,0237
12	200	50	25	100	80	80	100	50	0	0	100	50	150	100	200	50	150	100	85,15	65,93	56,96	65,49	62,77	58,09	74,54	72,23	70,43	69,29	72,40	62,00	78,33	76,79	89,55	71,52	76,11	67,71	0,0237
13	200	50	25	100	150	100	100	50	0	0	80	50	150	100	200	50	80	100	85,15	65,47	57,51	67,13	74,13	61,69	73,85	71,54	69,24	68,37	69,53	61,69	77,84	75,62	88,67	69,39	65,80	65,42	0,0237
14	200	50	25	100	150	100	100	50	0	0	100	50	80	80	200	50	150	100	83,55	64,68	57,58	68,28	76,12	63,67	70,46	69,73	69,04	69,89	75,14	65,07	66,21	71,16	87,73	71,73	77,21	68,59	0,0237
15	200	50	25	100	150	80	100	50	0	0	100	50	80	100	200	50	150	100	83,99	64,95	57,86	68,09	75,55	60,74	71,22	70,48	69,44	70,16	74,95	64,48	66,93	73,77	88,48	71,83	77,18	68,37	0,0237
16	200	50	25	100	80	100	100	50	0	0	100	50	150	80	200	50	150	100	84,71	65,66	56,68	65,69	63,35	61,01	73,78	71,48	70,03	69,02	72,59	62,58	77,61	74,18	88,81	71,41	76,14	67,94	0,0237
17	200	50	25	100	150	100	100	50	0	0	100	50	150	100	200	50	80	80	85,22	65,69	57,74	67,58	74,60	62,00	73,92	71,64	69,35	68,62	71,98	61,69	77,75	75,72	88,79	69,52	65,80	63,38	0,0237
18	200	50	25	100	150	100	100	50	0	0	100	50	150	80	200	50	80	100	84,91	65,37	57,58	67,59	74,76	62,31	73,30	71,00	69,04	68,62	72,29	62,33	77,13	73,22	88,32	69,67	66,27	65,87	0,0237
19	200	50	25	100	150	80	80	50	0	0	100	50	150	80	200	50	150	80	84,92	66,06	58,68	68,86	75,67	61,21	71,71	72,19	70,89	71,09	75,27	64,13	77,50	74,44	89,68	72,83	77,21	66,82	0,0228
20	200	50	25	100	150	80	100	50	0	0	80	50	150	80	200	50	150	80	85,63	66,45	58,52	68,51	74,96	60,46	74,71	72,67	70,88	70,60	72,26	63,40	78,21	74,79	89,67	72,47	76,64	66,27	0,0228
21	200	50	25	100	150	100	80	50	0	0	80	50	150	80	200	50	150	80	84,72	65,89	58,32	68,60	75,62	63,51	71,50	71,98	70,69	70,56	72,70	64,08	77,49	74,23	89,28	72,44	76,78	66,59	0,0228
22	200	50	25	100	150	80	80	50	0	0	80	50	150	80	200	50	150	100	84,85	65,85	58,44	68,41	75,20	60,90	71,63	72,09	70,79	70,84	72,82	64,13	77,59	74,34	89,56	72,70	77,21	68,86	0,0228
23	200	50	25	100	150	100	100	50	0	0	100	50	150	100	200	50	60	100	85,32	65,66	57,91	67,59	74,77	62,17	73,90	71,66	69,42	68,71	72,11	62,09	77,88	75,73	88,93	69,47	64,59	65,52	0,0222
24	200	50	25	100	150	100	100	50	0	0	100	50	60	100	200	50	150	100	83,72	64,85	57,91	68,41	76,38	63,77	70,59	70,13	69,41	70,24	75,44	65,33	64,99	73,30	88,24	71,90	77,50	68,73	0,0222
25	200	50	25	100	60	100	100	50	0	0	100	50	150	100	200	50	150	100	85,08	66,07	56,85	65,38	61,29	60,71	74,46	72,28	70,62	69,21	72,42	62,47	78,44	76,93	89,50	71,60	76,27	68,05	0,0222
26	200	50	25	100	150	80	80	50	0	0	100	50	80	100	200	50	150	100	82,74	63,88	57,16	67,36	75,01	60,39	67,68	69,27	68,55	69,45	74,41	63,95	65,69	72,70	87,59	71,12	76,50	67,83	0,0190
27	200	50	25	100	150	100	100	50	0	0	80	50	150	100	200	50	80	80	84,68	65,00	56,89	66,51	73,35	60,91	73,38	70,91	68,45	67,42	68,43	60,43	77,21	74,99	87,89	68,45	64,55	62,30	0,0190
28	200	50	25	100	150	100	100	50	0	0	80	50	150	80	200	50	80	100	84,37	64,69	56,73	66,51	73,51	61,22	72,75	70,28	68,14	67,42	68,74	61,06	76,59	72,50	87,42	68,61	65,02	64,79	0,0190
29	200	50	25	100	150	100	80	50	0	0	100	50	80	80	200	50	150	100	82,30	63,61	56,88	67,56	75,59	63,32	66,91	68,52	68,15	69,17	74,61	64,53	64,96	70,09	86,84	71,02	76,53	68,06	0,0190
30	200	50	25	100	80	80	100	50	0	0	100	50	150	100	200	50	150	80	84,67	65,45	56,33	64,87	61,99	57,30	74,07	71,61	69,64	68,34	71,30	60,73	77,71	76,17	88,77	70,58	74,86	64,59	0,0190
31	200	50	25	100	150	100	100	50	0	0	100	50	150	80	200	50	80	80	84,44	64,90	56,96	66,97	73,97	61,53	72,82	70,37	68,25	67,67	71,19	61,06	76,50	72,60	87,54	68,73	65,02	62,75	0,0190
32	200	50	25	100	150	100	100	50	0	0	80	50	80	100	200	50	150	80	83,32	64,31	56,88	67,21	74,71	62,26	70,54	69,64	68,44	68,68	71,29	63,17	66,29	72,94	87,30	70,50	75,49	65,02	0,0190
33	200	50	25	100	150	80	100	50	0	0	100	50	150	80	200	50	80	100	84,57	64,86	57,08	66,77	73,55	58,91	72,96	70,49	68,35	67,95	71,30	61,11	76,61	72,71	87,82	69,00	65,45	65,02	0,0190
34	200	50	25	100	80	80	100	50	0	0	100	50	150	80	200	50	150	100	84,36	65,14	56,17	64,87	62,15	57,61	73,44	70,97	69,34	68,34	71,61	61,37	77,09	73,67	88,30	70,74	75,33	67,08	0,0190
35	200	50	25	100	80	80	100	50	0	0	80	50	150	100	200	50	150	100	84,60	65,24	56,10	64,42	61,52	57,00	74,00	71,51	69,53	68,09	68,85	60,73	77,80	76,07	88,65	70,45	74,86	66,63	0,0190
36	200	50	25	100	150	80	80	50	0	0	100	50	150	100	200	50	80	100	84,10	64,57	57,16	66,66	73,64	59,04	70,51	70,54	68,56	68,19	71,55	61,20	76,61	74,76	88,18	69,06	65,56	65,11	0,0190
37	200	50	25	100	150																																

Разработанный программный комплекс позволяет производить анализ большого числа вариантов управляющих воздействий и их сортировку, что существенно сокращает временные и ресурсные затраты.

5.2 Внедрение моделей и методов принятия решений в автоматизированную систему управления распределением электроэнергии в кабельном блоке

5.2.1 Описание объекта внедрения

При реконструкции блока Южно-Сахалинской ТЭЦ выполнялся анализ возможности увеличения нагрузки подземного кабельного блока. На рисунке 5.5 представлен рассматриваемый кабельный блок.

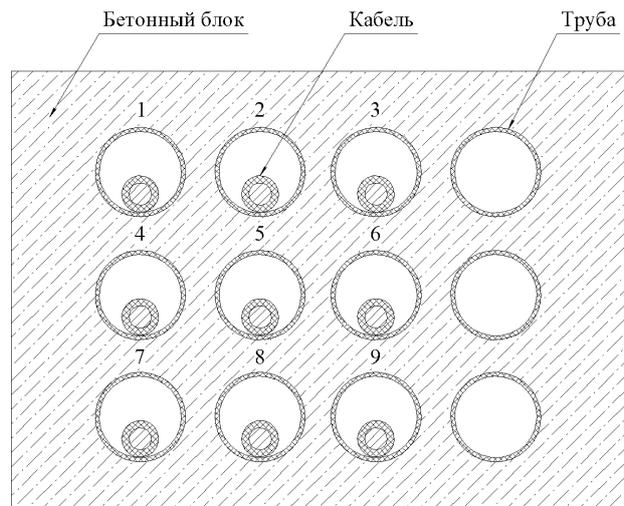


Рисунок 5.5 – Схема исследуемого блока

В блоке расположены три трехфазные кабельные линии, каждая фаза в отдельной трубе, кабель типа ПвВнг(А)-LS с сечением жилы 500 мм^2 на напряжение 10 кВ. Дополнительно присутствуют три резервные трубы для возможности прокладки в них дополнительных линий. Текущая нагрузка кабельных линий составляет 480 А в каждой фазе. Суммарная передаваемая мощность по блоку равна 24,94 МВА.

Внедрение моделей и методов принятия решений в автоматизированную систему управления распределением нагрузки в кабельном блоке предназначено для решения следующих задач:

- увеличение объема передаваемой мощности по существующим кабельным линиям;
- определение возможных режимов работы кабелей, размещенных в резервных трубах.

5.2.2 Результаты внедрения

Для анализа температурных состояний при различных рабочих токах и выбора режима нагрузки была построена модель процессов тепломассопереноса в данном блоке, реализация которой показала, что при равномерном распределении нагрузки по кабелям в самых сложных термических условиях находится кабель №5. Следовательно, для определения возможности увеличения рабочих токов линий необходимо оценивать температуру жилы данного кабеля с учетом влияния токовых нагрузок и температур всех кабельных линий.

Анализ возможности увеличения нагрузки линий

Использование подходов и методов принятия решений, изложенных в главе 4 была получена зависимость температуры жилы от рабочего тока линий, представленная на рисунке 5.6.

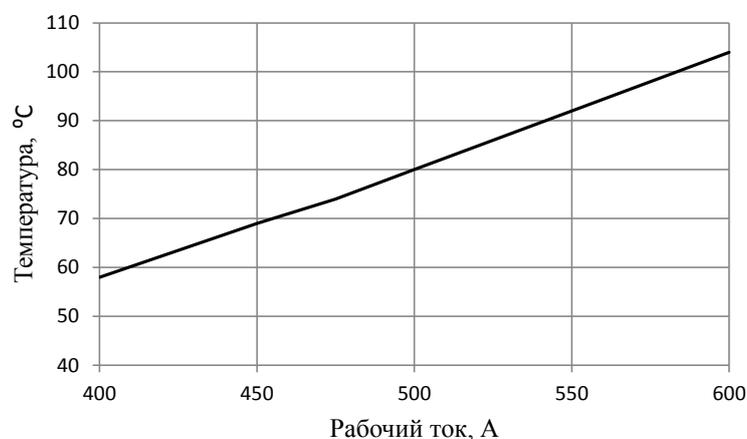


Рисунок 5.6 – Зависимость температуры жилы кабеля №5 от рабочего тока линий

Как показали результаты, при рабочем токе $I = 540$ А температура элементов конструкции кабелей блока сохраняется в допустимых значениях. Причем наименьшая температура поверхности жилы наблюдается в кабелях, расположенных в верхних углах блока, и составляет 76° С, а наибольшая у кабеля, расположенного в центре, и она равна 88° С. Суммарная передаваемая мощность блока составит 28 МВА. Таким образом, для увеличения пропускной способности кабельного блока рабочий ток в кабельных линиях можно поднять до 540 А, при этом передаваемая мощность по блоку возрастет на 12,3 %.

Анализ режимов работы резервных линий

На практике при эксплуатации кабельного блока возникает необходимость использования резервных линий. Нужно отметить, что при максимальной загрузке всех основных линий в блоке температура резервных даже в ненагруженном режиме достигает достаточно больших значений, что существенно ограничивает величину допустимого рабочего тока в них.

Используя модели и методы принятия решений, описанные в главе 4, в том числе алгоритм поиска максимально возможного значения рабочего тока вновь вводимой линии (рисунок 4.1), был определен максимальный допустимый ток резервных линий. С этой целью был проанализирован температурный режим кабельного блока для ряда значений рабочего тока резервных линий. Рассматривались значения тока, начиная с максимально возможного для действующих линий в блоке, т.е. 540 А, с постепенным снижением с шагом 10 А. В результате анализа было определено, что при необходимости подключения резервных линий на длительный промежуток времени допустимый ток составляет $I_{рез} = 190$ А, что в 2,8 раза меньше номинального значения. Суммарная передаваемая мощность при подключении данной нагрузки к резервным линиям при существующем режиме составит 28,23 МВА, а при повышении рабочих токов до 540 А, она составит 31,3 МВА, что на 10,9 % больше.

При необходимости подключения к резервным линиям большей нагрузки, чем длительно допустимая (в данном случае 190 А), необходимо определение возможного времени работы линии. В результате анализа нестационарного

режима работы резервных линий при рабочем токе $I_{рез} = 270$ А получен график нагрева кабелей, представленный на рисунке 5.7.

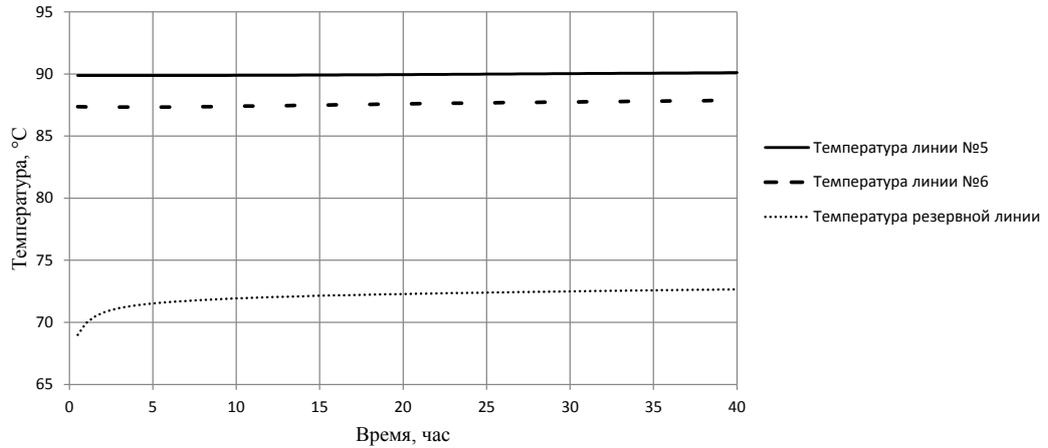


Рисунок 5.7 – График нагрева линий № 5, №6 и резервной линии

Как видно из результатов, при данной нагрузке резервных линий через сутки температура жилы кабеля №5 превысит допустимые пределы. Длительно при рабочем токе 270 А резервные линии работать не могут. Однако периодический режим работы позволяет нагружать кабели на рабочий ток больше длительно допустимого.

Используя алгоритм управления работы кабельных линий, был получен периодический режим нагрева и охлаждения резервных линий, представленный на рисунке 5.8. Резервные линии включаются на 12 часов с перерывом 12 часов.

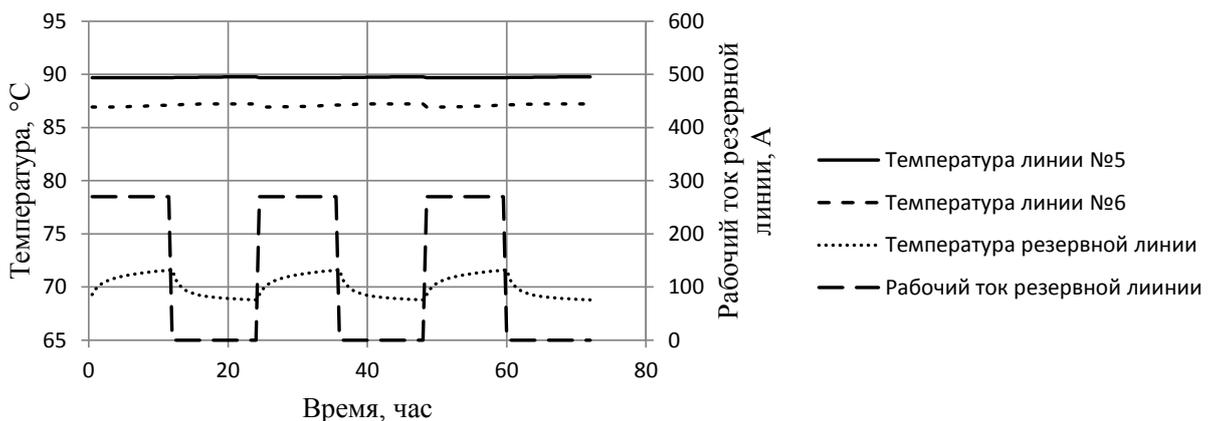


Рисунок 5.8 – Графики нагрева линий №5, 6 и резервной линии при заданной нагрузке

Как видно из результатов, при периодическом режиме работы резервных линий рабочий ток может превышать длительно допустимый.

Дальнейшее использование СППР в автоматизированной системе управления распределением электроэнергии в кабельном блоке позволит определять допустимые режимы нагрузки с учетом действующих условий эксплуатации.

В результате внедрения СППР в автоматизированную систему управления распределением электроэнергии в кабельном блоке суммарная передаваемая мощность была увеличена на 12,3 % для действующих кабельных линий и дополнительно на 10,9 % с учетом максимальной загрузки резервных линий.

Выводы по главе

В данной главе представлен разработанный программный комплекс, реализующий поиск оптимального режима, удовлетворяющего температурным и нагрузочным условиям. Программный комплекс состоит из 4 модулей, реализующих обработку данных, полученных с помощью численных экспериментов, расчет температурных состояний кабелей и сортировку по параметру снижения потребляемой энергии. Программный комплекс позволяет существенно снизить временные и ресурсные затраты для анализа большого количества вариантов нагрузочных режимов, может использоваться в системах автоматизации процесса распределения электрической энергии, а также в смежных областях.

В главе представлены результаты внедрения элементов системы поддержки принятия решений при управлении распределением электроэнергии в кабельном блоке Южно-Сахалинской ТЭЦ.

Разработана математическая модель процессов тепломассопереноса с целью анализа температурных состояний кабелей в различных режимах нагрузки.

Определена величина длительно допустимого тока основных линий для действующих условий эксплуатации, что позволило увеличить объем передаваемой мощности на 12,3 %.

Определена максимальная возможная нагрузка резервных линий в стационарном длительном режиме эксплуатации и периодическом, что позволило увеличить объем передаваемой мощности на 10,9 %.

Акт внедрения результатов диссертационной работы представлен в приложении Д.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе исследования получены следующие основные результаты:

1. В процессе анализа научных подходов выявлены особенности и недостатки существующих методов управления распределением электроэнергии в кабельных сооружениях, методов определения значений длительно допустимых токов кабельных линий. Выбраны направления диссертационного исследования.

2. Разработана концептуальная модель системы поддержки принятия решений при управлении распределением электроэнергии в кабельных сооружениях, позволяющая определять допустимые режимы нагрузки за счет анализа температурного состояния.

3. Построена математическая модель процессов тепломассопереноса в подземном кабельном блоке на основе законов сохранения массы, энергии и количества движения, предназначенная для определения температуры элементов кабельных линий для различных условий эксплуатации. Модель учитывает все виды теплопередачи, а также зависимость сопротивления токопроводящей жилы от температуры. Построена параметрическая модель, учитывающая зависимость температуры поверхности жил кабелей от уровня нагрузки линий.

4. Разработан метод определения управляющих воздействий при распределении электроэнергии. Метод реализован в виде алгоритмов определения управляющих воздействий при запланированном и вынужденном росте потребления электроэнергии, позволяющих сохранить температурный режим блока в допустимых пределах путем частичного снижения нагрузки на некоторых линиях.

5. Разработан комплекс программ для определения рационального нагрузочного режима, удовлетворяющего условию ограничения рабочей температуры изоляции и позволяющий максимально сохранить требуемую нагрузку. Апробация и внедрение разработанных моделей и алгоритмов системы поддержки принятия решений в автоматизированную систему управления распределением электроэнергии в подземном кабельном блоке обеспечило

увеличение объема передаваемой мощности на 12,3 % без учета резервных линий и дополнительно на 10,9 % за счет максимальной загрузки резервных линий.

Предложенные в работе математические, программные и методические инструменты могут быть востребованы энергокомпаниями в рамках развивающегося процесса цифровизации энергосистемы.

Список литературы

1. Сазыкин, В.Г. Иерархия энергетических систем. Общие подходы к управлению / В.Г.Сазыкин, А.Г. Кудряков // Роль технических наук в развитии общества: сб. статей межд. научно-практ. конференции. Т. 1. – Уфа, Аэтерна.2014. – С. 40–43.
2. Никулин, П.А. Проблемы и перспективы развития распределенной генерации в российской федерации / П.А. Никулин // Экономика и социум. – 2018. – №6(49) – С. 802-804.
3. Могиленко, А. Цифровизация и повышение энергетической эффективности / А. Могиленко // Новости ЭлектроТехники. – 2020. – №(124)–5(125). – С.82-85.
4. Мифтахов, А. Р. Методы прокладки коммуникаций в рамках проектирования электроснабжения в городских агломерациях / А. Р. Мифтахов, А. Е. Юдина // НАУКА XXI ВЕКА: ВЫЗОВЫ, СТАНОВЛЕНИЕ, развитие: сборник статей IV Международной научно-практической конференции, Петрозаводск, 20 июня 2022 года. – Петрозаводск: Международный центр научного партнерства «Новая Наука» (ИП Ивановская И.И.), 2022. – С. 112-115.
5. Сажина, А.Д. Бестраншейный метод прокладки наружных коммуникаций / А.Д. Сажина, И.В. Можаяев // Межвузовский сборник статей лауреатов конкурсов: Сборник статей / Редколлегия: В.Н. Бобылев [и др.]. Том Выпуск 23. – Нижний Новгород: Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет, 2023. – С. 709–715.
6. Дмитриев, М. О полиэтиленовых трубах для прокладки кабельных линий / М. Дмитриев, А. Овсянникова // Электроэнергия. Передача и распределение. – 2015. – № 2(29). – С. 60-63.
7. Ларина, Э.Т. Силовые кабели и высоковольтные кабельные линии. – 2-е изд, перераб. и доп. / Э.Т. Ларина // – М.: Энергоатомиздат, 1996. – 464 с.
8. Скворцов, В. В. Выбор способа прокладки кабельных линий распределительной сети предприятия / В. В. Скворцов, О. А. Родак // Введение в энергетику : сборник материалов II Всероссийской (с международным участием)

молодежной научно-практической конференции, Кемерово, 23–25 ноября 2016 года. – Кемерово: Кузбасский государственный технический университет им. Т.Ф. Горбачева, 2016. – С. 161.

9. Голота, М. Б. Передовые технологии при сооружении кабельных коллекторов в России / М. Б. Голота // Метро и тоннели. – 2009. – № 3. – С. 30-32.

10. Николаев, К. В. Определение границ различных способов прокладки кабельной линии в грунте / К. В. Николаев, С. С. Филимонов, Ш. Д. Исрафилов // XVI Всероссийская открытая молодежная научно-практическая конференция «Диспетчеризация и управление в электроэнергетике», Казань, 20–21 октября 2021 года. – Казань: Общество с ограниченной ответственностью "Издательско-полиграфическая компания "Бриг", 2022. – С. 153-155.

11. Петров, Д. В. Влияние отсрочек ремонта кабельных линий 6 и 10 КВ на сроки проведения ремонтных работ / Д. В. Петров, В. И. Маругин, С. И. Лещев // Вестник Северо-Кавказского федерального университета. – 2020. – № 4(79). – С. 15-22. – DOI 10.37493/2307-907X.2020.4.2.

12. Минеев, Е. Н. Процесс теплового старения изоляции проводов и кабелей / Е. Н. Минеев // Материалы международной научно-технической конференции "Системы безопасности". – 2014. – № 23. – С. 41-42.

13. Данилов, А.В. Эксплуатационные и режимные факторы, определяющие ресурс изоляции силовых кабелей распределительных сетей. / А.В. Данилов, Л.В. Быковская // Инновации в науке и практике: Материалы международной научно-практической конференции: Уфа, 10 января 2023 г. – Уфа: Изд. НИЦ Вестник науки. – 2023. – С.23–27.

14. Власов, А. Б. Анализ изменения твердости изоляции кабелей в процессе ускоренного старения при повышенной температуре / А. Б. Власов, С. В. Власова, В. А. Мухалев // Судостроение. – 2016. – № 3(826). – С. 31-33.

15. Дубяго, М. Н. Совершенствование методов диагностики и прогнозирования электроизоляционных материалов систем энергоснабжения : монография / М. Н. Дубяго, Н. К. Полуянович. - Ростов н/Д : ЮФУ, 2019. – 192 с.

URL : <https://prior.studentlibrary.ru/book/ISBN9785927533749.html> (дата обращения: 19.09.2023).

16. Saha, T.K. Experience With Dielectric Response Measurements On Oil-Paper Insulated Cables / T.K. Saha, J.H.Yew, P. Purkait // XIIIth International symposium on high voltage engineering, Netherlands, 2003.

17. Лавров, Ю.А. Системный подход к проектированию воздушных и кабельных линий электропередачи среднего и высокого напряжения / Ю.А. Лавров // Линии электропередачи 2008: проектирование, строительство опыт эксплуатации и научно-технический прогресс: материалы III российской научн.-практ. конф. с международным участием. Новосибирск, 2008. – С. 17–27.

18. Лавров, Ю.А. Кабели 6–35 кВ с пластмассовой изоляцией. Факторы эксплуатационной надежности/ Ю.А. Лавров // Новости электротехники. – 2006. – № 6.

19. ГОСТ Р 55025 – 2012 Кабели силовые с пластмассовой изоляцией на номинальное напряжение от 6 до 35 кВ включительно. Общие технические условия. – М.: Стандартинформ, 2014. – 32 с.

20. Олексюк, И.В. Старение изоляции из сшитого полиэтилена кабельных линий / И.В. Олексюк // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. – 2021. – Т. 64. – № 2. – С. 121–129.

21. Кучерявая, И. Н. Численное исследование распределения электрического и температурного поля в полиэтиленовой изоляции силового кабеля с микровключением / И. Н. Кучерявая // Праці Інституту електродинаміки Національної академії наук України. – 2010. – № 27. – С. 117-123.

22. Кучерявая, И. Н. Компьютерный анализ электрического поля и сил в полиэтиленовой изоляции силового кабеля при наличии дефекта / И. Н. Кучерявая // Праці Інституту електродинаміки Національної академії наук України. – 2010. – № 25. – С. 126-132.

23. Кучерявая, И. Н. Применение мультифизического моделирования в решении задач электротехники / И. Н. Кучерявая // Праці Інституту

електродинаміки Національної академії наук України. – 2015. – № 42. – С. 112-123.

24. Хлебников, В. К. Влияние климатических условий на потери мощности и электроэнергии в кабельных линиях электропередачи / В. К. Хлебников // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. – 2009. – № 2. – С. 69-73.

25. Роженцова, Н. В. Факторы надежности при проектировании и эксплуатации кабельных линий с изоляцией из сшитого полиэтилена / Н. В. Роженцова, А. М. Ларионова, С. Н. Ларионов // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. – 2010. – № 4. – С. 32-36.

26. Дубяго, М. Н. Метод исследования термофлуктуационных процессов в задачах диагностики и прогнозирования изоляционных материалов / М. Н. Дубяго, Н. К. Полуянович, В. Х. Пшихопов // Вестник Дон. гос. техн. ун-та. — 2017. — Т.17. — № 3. — С. 117–127.

27. Дубяго, М. Н. Оценка и прогнозирование изоляционных материалов силовых кабельных линий / М. Н. Дубяго, Н. К. Полуянович, В. Х. Пшихопов // Известия ЮФУ. Технические науки. — 2015. — № 7 (168). — С. 230–237.

28. Dubyago, M. N. Prediction of residual life of isolating materials in the process of thermal power equipment deterioration / M. N. Dubyago, N. K. Poluyanovich // AEECE 2015 : International Conference on Advances in Energy, Environment and Chemical Engineering. Changsha : Atlantis Press. – 2015. – P. 49–54.

29. Дубяго, М.Н. Термофлуктуационная теория разрушения и оценка долговечности электрической изоляции спэ кабелей / М.Н. Дубяго, Н.К. Полуянович, Д.В. Бурьков // Известия ЮФУ. Технические науки. 2021. – №6 (223). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/termofluktuationnaya-teoriya-razrusheniya-i-otsenka-dolgovechnosti-elektricheskoy-izolyatsii-spe-kabeley> (дата обращения: 16.09.2023).

30. Neher, J.H. The calculation of the temperature rise and load capability of cable systems / J.H. Neher, M.H. McGrath // AIEE Transactions – Power Apparatus and System. Part III. – 1957. – Vol. 76. – P. 752–772.

31. Neher, J.H. Calculation of the Temperature Rise and Load Capability of Cable Systems / J.H. Neher, M.H. McGrath // AIEE Transactions. – 1957. – Vol. 76. – Part 3. – P. 755–772.

32. Pollak P. Neher-McGrath Calculations for Insulated Power Cables / P. Pollak // IEEE Transactions on Industry Applications. – 1985. – Vol. IA–21(5). – P. 1319–1323.

33. Sellers, S.M. Refinements to the Neher-McGrath Model for Calculating the Ampacity of Underground Cables / S.M. Sellers, W.Z. Black // IEEE Transactions on Power Delivery. – 1996. – Vol. 11(1). – P. 12–30.

34. ГОСТ Р МЭК 60287 – 1 – 2 – 2009. Кабели электрические. Расчет номинальной токовой нагрузки. Часть 1–2. – М.: Стандартинформ, 2009. – 20 с.

35. ГОСТ Р МЭК 60287 – 1 – 3 – 2009. Кабели электрические. Расчет номинальной токовой нагрузки. Часть 1–3. – М.: Стандартинформ, 2009. – 16 с.

36. IEEE Standard Power Cable Ampacity Tables, IEEE Std. 835–1994, 1994.

37. Грешняков, Г.В. Цепно-полевой подход к оценке нагрузочной способности кабельных систем / Г.В. Грешняков // Cabex 2014: Международная выставка кабельно-проводниковой продукции. Новые разработки в области кабельных изделий и материалов: семинар. – Москва. – 2014. – 17 с. URL: <http://www.cabex.ru/ru-RU/home/press/news/18513.aspx>. (Дата обращения: 12.08.2016).

38. Baazzim, M.S. Comparison of Finite-Element and IEC Methods for Cable Thermal Analysis under Various Operating Environments / M.S. Baazzim, M.S. Al-Saud, M.A. El-Kady // International Journal of Electrical, Computer, Energetic, Electronic and Communication Engineering. – 2014. – Vol. 8(3). – P. 484–489.

39. Удовиченко, О.В. Температурный мониторинг кабельных линий высокого напряжения на основе кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена / О.В. Удовиченко // Линии электропередачи 2008: проектирование, строительство опыт эксплуатации и научно-технический прогресс: материалы III российской научн.-практ. конф. с международным участием. – Новосибирск, 2008. – С. 301–304.

40. Ukil, A. Distributed temperature sensing: review of technology and applications / A. Ukil, H. Braendle, P. Krippner // *Sensors Journal, IEEE*. – 2012. – Vol. 12(5). – P. 885–892.
41. Singh, K. Cable Monitoring Solution - Predict with Certainty / K. Singh, D. Watley // *Second Seminar on Undergrounding of Electric Distribution Networks (Cabos'11)*. Maceió. Alagoas., 2011.
42. Якунин, А.В. Мониторинг теплового режима эксплуатации кабельных линий 110-500 кВ / А.В. Якунин // *Линии электропередачи 2010: проектирование, строительство опыт эксплуатации и научно-технический прогресс: материалы IV российской научн.-практ. конф. с международным участием*. – Новосибирск, 2010. – С. 306–310.
43. Ларин, Ю.Т. Применение системы температурного мониторинга с помощью оптического кабеля для контроля распределения температуры вдоль электрического силового кабеля / Ю.Т. Ларин, Ю.В. Смирнов, М.Л. Гринштейн // *Кабель-news*. – 2009. – № 8. – С. 48–53.
44. Карпов, К. Р. Мониторинг подземных высоковольтных кабельных сетей / К. Р. Карпов // *Энергослужба предприятия*. – № 4. – 2007. – С. 15–17.
45. Кучерявая, И. Н. Применение мультифизического моделирования в решении задач электротехники / И. Н. Кучерявая // *Праці Інституту електродинаміки Національної академії наук України*. – 2015. – № 42. – С. 112-123.
46. Real Time Monitoring of Power Cables by Fibre Optic Technologies. Tests, Applications and Outlook / G.J. Anders, J.-M. Braun, A. Downes John [and other] // *6th International Conference on Insulated Power Cables (JiCable'03)*. Paris, 2003.
47. Goehlich, L. Monitoring of HV Cables Offers Improved Reliability and Economy by Means of «Power Sensors» / L. Goehlich, F. Donazzi, R. Gaspari // *Power Engineering Journal*. – 2002. – Vol. 16(3). – P. 103 – 110.
48. Ким, В. С. Методика экспериментального определения номинальных токовых нагрузок кабельных изделий / В. С. Ким, В. А. Лавринович, О. А. Анисимова // *Интернет-журнал Науковедение*. – 2013. – № 3(16). – С. 75.

49. Gołębiowski, J. The simplified method for transient thermal field analysis in a polymeric DC cable / J. Gołębiowski, M. Zaręba // *Electrical Engineering, Springer*. – 2011. – Vol. 93(4). – P. 209-216.
50. Дудник, А. Е. Нестационарная задача теплопроводности для электрического кабеля с ПВХ изоляцией / А. Е. Дудник, А. С. Чепурненко, С. В. Литвинов // *Научно-технический вестник Поволжья*. – 2015. – № 6. – С. 49-51.
51. Расчет теплового поля системы трех однофазных кабелей / М.С. Сарычев, В.А. Абрамсон, С.В. Коломийцева, Е.П. Суляндзига // *Научно-техническое и социально-экономическое сотрудничество стран АТР в XXI веке: Труды Всероссийской научно-практической конференции творческой молодежи с международным участием, Хабаровск, 17–19 апреля 2018 года / Под редакцией С.А. Кудрявцева*. – Хабаровск: Дальневосточный государственный университет путей сообщения, 2018. – С. 76-80.
52. IEC Electric Cables - Calculation of the Current Rating - Thermal Resistance - Calculation of Thermal Resistance. International Electrotechnical Commission Standard 60287-2-1, edition 1.1, Nov., 2001.
53. Чиркин, В. С. Теплофизические свойства материалов. Справочник. / В.С. Чиркин // М.: ФИЗМАТГИЗ, 1959. – 356 с.
54. Вассерман, А.А. Теплофизические свойства воздуха и его компонентов / А.А. Вассерман, Я.З. Казавчинский, В.А. Рабинович // – М.: Наука, 1966. – 375 с.
55. Вассерман, А.А. Теплофизические свойства жидкого воздуха и его компонентов / А.А. Вассерман, В.А. Рабинович // – М.: Изд-во стандартов, 1968. – 239 с.
56. Термодинамические свойства воздуха / В.В. Сычев, А.А. Вассерман, А.Д. Козлов [и др.] // – М.: Изд-во стандартов, 1978. – 276 с.
57. Camerlingh, O. H. Expression of the equation of state of gases and liquids by means of series / O.H. Camerlingh // *Comm. Leiden*. – 1901. – No 71. – P. 1–25.
58. Wang, J. A novel transient thermal circuit model of buried power cables for emergency and dynamic load / J. Wang, Y. Liang, C. Ma // *Energy Reports*. – Vol. 9. – 2023. – P. 963-971. DOI:10.1016/j.egy.2022.11.097.

59. Dynamic thermal analysis for underground cables under continuously fluctuant load considering time-varying van wormer coefficient / P. Wang, L. Kang, Z. Xu [and other] // *Electric Power Systems Research*. – 2021. – Vol. 199. DOI: 10.1016/j.epsr.2021.107395.

60. Лебедев, В. Д. Расчет температуры жилы однофазного высоковольтного кабеля с изоляцией из сшитого полиэтилена в режиме реального времени / В. Д. Лебедев, Е. С. Зайцев // *Вестник Ивановского государственного энергетического университета*. – 2015. – № 4. – С. 11-16. – DOI 10.17588/2072-2672.2015.4.011-016.

61. Зайцев, Е. С. Разработка математической модели для прогнозирования нагрева жил высоковольтной кабельной линии / Е. С. Зайцев, В. Д. Лебедев // *Состояние и перспективы развития электро- и теплотехнологии : Материалы международной научно-технической конференции : (XVIII Бенардосовские чтения)*, Иваново, 27–29 мая 2015 года. Том 3. – Иваново: Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина, 2015. – С. 467-471.

62. Математическое моделирование тепловых процессов в силовых кабелях с пластмассовой изоляцией / Д. И. Зализный, О. Г. Широков, Н. М. Ходанович, А. Ю. Шутов // *Вестник Гомельского государственного технического университета им. П.О. Сухого*. – 2009. – № 3(38). – С. 65-75.

63. Зализный, Д. И. Математическая модель тепловых процессов одножильного силового кабеля / Д. И. Зализный, С. Н. Прохоренко // *Энергетика. Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ*. – 2012. – № 5. – С. 25-34.

64. Calculation of Ampacity of Underground Cables Under Humidity Migration Conditions / M. Gao, T. Wang, C. Gu [and other] // *2015 IEEE 11th International Conference on the Properties and Applications of Dielectric Materials (ICPADM)*. July 2015. DOI: 10.1109/ICPADM.2015.7295442.

65. León, F. Effects of Backfilling on Cable Ampacity Analyzed With the Finite Element Method / F. León, G. J. Anders // *IEEE Transactions on Power Delivery*. – 2008. – Vol. 23(2). – P. 537–543.

66. León, F. Calculation of underground cable ampacity / F. León // *Physics*, 2005.
67. Халитов, В. Р. Расчет блочной канализации для кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена / В. Р. Халитов // *Энергоэксперт*. – 2020. – № 4(76). – С. 28-33.
68. Грешняков, Г.В. К вопросу о выборе предельно допустимых токов силовых кабелей / Г.В. Грешняков, Г.В. Ковалев, С.Д. Дубницкий // *Кабели и провода*. – 2011. – № 6. – С. 12–16.
69. Грешняков, Г.В. О расчете предельно допустимых токов силовых кабелей 110 кВ с изоляцией из сшитого полиэтилена и проволочной броней из алюминиевого сплава / Г.В. Грешняков, С.Д. Дубницкий, А. Рудаков // *Силовая Электроника*. – 2011. – № 3. – С. 8–11.
70. Shwehdi, M. H. Investigating and Studying the Thermal Effect of the Underground Cables / M. H. Shwehdi, F. S. AL-Ismail, A. A. AL-Nuaim // 2010 IEEE International Symposium on Electrical Insulation. June 2010. DOI:10.1109/ELINSL.2010.5549813.
71. Dubitsky, S. Refinement of Underground Power Cable Ampacity by Multiphysics FEA Simulation / S. Dubitsky, G. Greshnyakov, N. Korovkin // *International Journal of Energy*. – 2015. – No. 9. – P. 12–19.
72. Грешняков, Г.В. Численный метод анализа нагрузочной способности высоковольтной кабельной системы / Г.В. Грешняков, Г.Г. Ковалёв // *КАБЕЛЬ-
news*. – 2013. – № 3. – С. 32–37.
73. Электромагнитный и тепловой расчёт токовой нагрузки кабельной системы методом конечных элементов / Г.В. Грешняков, С.Д. Дубницкий, Г.Г. Ковалев, Н.В. Коровкин // *Наука и техника*. – 2013. – №4. – С. 15–21.
74. Olsen, R.S. Dynamic Temperature Estimation and Real Time Emergency Rating of Transmission Cables / R.S. Olsen, J. Holboll, U.S. Gudmundsdottir // IEEE Power and Energy Society General Meeting. San Diego. USA.– 2012.– P. 1–8.

75. Echavarren, F.M. Dynamic Thermal Modeling of Isolated Cables / F.M. Echavarren, L. Rouco, A. Gonzalez // 17th Power Systems Computation Conference. Stockholm. Sweden. – 2011. – Vol. 1. – P. 611–617.

76. Terracciano, M. Thermal Analysis of Cables in Unfilled Troughs: Investigation of the IEC Standard and a Methodical Approach for Cable Rating / M. Terracciano, S. Purushothaman // IEEE Transactions on Power Delivery. – 2012. – Vol. 27(3). – P. 1423 – 1431.

77. Millar, R.J. Real-Time Transient Temperature Computation of Power Cables Including Moisture Migration Modelling / R.J. Millar, M. Lehtonen // 15th Power Systems Computation Conference. Liege. Belgium. – 2005. – Vol. 1. – Session 39. – Paper 4. – P. 1388–1395.

78. Thermal Transient Analysis of Underground Cables / J. Desmet, D. Putman, G. Vanalme [and other] // 7th International Conference on Insulated Power Cables (JiCable'07). Paris, 2007.

79. Thermal Analysis of Parallel Underground Energy Cables / J. Desmet, D. Putman, G. Vanalme [and other] // 18th International Conference on Electricity Distribution. Turin, 2005.

80. Tang, A. The Study of Dynamic Thermal Mathematical Model for EHV XLPE Cable / A. Tang, Y. Zhao, D. Jiang // International Journal of Electronics, Mechanical and Mechatronics Engineering. – 2010. – Vol. 1(1). – P. 7–10.

81. Hwang, C. Extensions to the finite element method for thermal analysis of underground cable systems / C. Hwang, Y. Jiang // Electric Power Systems Research. – 2003. – V. 64. – P.159-164.

82. Hatziathanassiou, V. Coupled magneto-thermal field computation in three-phase gas insulated cables. Part 1 / V. Hatziathanassiou, D. Labridis // Elektrotechnik. – 1993. – V.76. – P. 285 – 292.

83. Hatziathanassiou, V. Coupled magneto-thermal field computation in three-phase gas insulated cables. Part 2 / V. Hatziathanassiou, D. Labridis // Elektrotechnik. – 1993. – V.76. – P. 397 – 404.

84. Kuang, J. Pipe – type cable losses for balanced and unbalanced currents / J. Kuang, S. Boggs // *IEEE Transactions on Power Delivery*. – 2002. – V. 17(2). – P. 313 – 317.

85. Григорьева, М.М. Тепломассоперенос в условиях электрической перегрузки кабельных линий / М.М. Григорьева, Г.В. Кузнецов // *Известия Томского политехнического университета*. – 2010. – Т.316. – №4. – С. 34–38.

86. Григорьева, М.М. Численное моделирование температурных полей кабельных линий в условиях электрической перегрузки / М.М. Григорьева, Г.В. Кузнецов // *Сборник трудов XVI Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Современные техника и технологии»*. – Томск: Изд. ТПУ, 2010. – С. 174–175.

87. Бирюлин, В.И. Расчет температуры нагрева изоляции кабеля с учетом влияния рядом проложенных кабелей / В. И. Бирюлин, Д.В. Куделина, А.Н. Горлов // *Вестник КГЭУ*. – 2019. – №2(42). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/raschet-temperature-nagreva-izolyatsii-kabeleya-s-uchetom-vliyaniya-ryadom-prolozhennyh-kabeley> (дата обращения: 16.09.2023).

88. The Capacity Limitations of Power Transmission Cable Lines in the Structure of Civil and Industry Engineering Networks / V.V. Titkov, S.M. Dudkin, R.D. Tukeev, A.V. Kosorukov // *Magazine of Civil Engineering*. – 2014. – No. 6. – P. 75–83.

89. Ingersoll, L.R. Theory of the Ground Pipe Heat Source for the Heat Pump / L.R. Ingersoll, H.J. Plass // *Heating, Piping & Air Conditioning*. – 1948. – Vol. 20. – P. 119–122.

90. Xiao-Bang, X. Investigation of the magnetic field produced by unbalanced phase current in an underground three-phase pipe-type cable / X. Xiao-Bang., L. Guanghao // *Electric Power Systems Research*. – 2002. – V. 62. – P. 153 – 160.

91. Гумин, М.И. Принципы и средства совершенствования управления подстанциями 110–220 кВ / М.И. Гумин, С.Н. Макаровский // *Энергетик*. – 2004. – № 5.

92. Илюшин, П.В. Подходы к оценке возможности обеспечения надежного электроснабжения потребителей за счет строительства объектов распределенной

генерации / П.В. Илюшин, Ю.Н. Кучеров // ЭЛЕКТРО. Электротехника, электроэнергетика, электротехническая промышленность. – 2014. – № 5. – С. 2–7.

93. Кучеров, Ю.Н. Проблемы обеспечения безопасности потребителей и объектов электроэнергетики при нарушениях работы энергосистемы / Ю.Н. Кучеров, Ю.Е. Гуревич // Энергетик. – 2007. – № 8. – С. 8–12.

94. Гуревич, Ю.Е. Особенности электроснабжения, ориентированного на бесперебойную работу промышленного потребителя / Ю.Е. Гуревич, К.В. Кабиков // М.: Элекс-КМ, 2005.

95. Working Group 02, CIGRE Study Committee 21: Current Ratings of Cables for Cyclic and Emergency Loads. Part 1. Cyclic Ratings (Load Factor less than 100%) and Response to a Step Function // *Electra*. 1972. No. 24. P. 63–96.

96. Working Group 21-03, CIGRE Study Committee 21: Current Ratings of Cables for Cyclic and Emergency Loads. Part 2. Emergency Ratings and Short Duration Response to a Step Function // *Electra*. 1976. No. 44. P. 95–108.

97. Dehghani, H. Evaluating the effects of demand response programs on distribution cables life expectancy / H. Dehghani, B. Vahidi // *Electric Power Systems Research*. – 2022. – Vol. 213 (4). DOI:10.1016/j.epsr.2022.108710.

98. Zarchi, D. A. Multi objective self adaptive optimization method to maximize ampacity and minimize cost of underground cables / D. A. Zarchi, B. Vahidi // *Journal of Computational Design and Engineering*. – 2018. – Vol. 5. – Iss. 4. – P. 401–408. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jcde.2018.02.004>.

99. Shabani, H. A probabilistic approach for optimal power cable ampacity computation by considering uncertainty of parameters and economic constraints / H. Shabani, B. Vahidi // *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*. – 2019. – Vol. 106. – P. 432–443. DOI:10.1016/j.ijepes.2018.10.030.

100. Research on optimal placement methodology of power cable in ductbank / J. Wang, L. Bin, D. Li [and other] // *Energy Reports*. – Vol. 9. – 2023. – P. 46–57. DOI:10.1016/j.egy.2022.10.363.

101. Octon, P. The effect of soil thermal conductivity and cable ampacity on the thermal performance and material costs of underground transmission line / P. Octon // *Energy*. – 2021. – Vol. 231. DOI:10.1016/j.energy.2021.120803.

102. Thermal performance optimization of the underground power cable system by using a modified Jaya algorithm / P. Octon, P. Cisek, M. Rerak [and other] // *International Journal of Thermal Sciences*. – 2018. – Vol. 123. – P. 162-180. DOI:10.1016/j.ijthermalsci.2017.09.015.

103. Zarchi, D.A. Multi objective self adaptive optimization method to maximize ampacity and minimize cost of underground cables / D.A. Zarchi, B. Vahidi // *Journal of Computational Design and Engineering*. – 2018. – Vol. 5. – Is. 4. – P. 401–408. DOI:10.1016/j.jcde.2018.02.004.

104. Víctor, J. Optimal statistical calculation of underground cable bundles positions for time-varying currents / J. Víctor, E. Castronuovo, I. Sanchez // *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*. – 2018. – Vol. 95. – P. 26–35.

105. Optimal Position of Buried Power Cables / G. De Mey, P. Xynis, I. Papagiannopoulos [and other] // *Elektronika ir Elektrotechnika*. – 2014. – Vol. 20(5). DOI:10.5755/j01.eee.20.5.7097.

106. Семенова, Н. Г. Процесс принятия решения по развитию систем электроснабжения района области / Н. Г. Семенова, А. Д. Чернова // *Электротехнические системы и комплексы*. – 2021. – № 3(52). – С. 4-11. – DOI 10.18503/2311-8318-2021-3(52)-4-11.

107. Ларин, О. М. Методы, модели и алгоритмы для системы поддержки принятия решений оптимизации потерь электроэнергии в системе электроснабжения промышленного предприятия : специальность 05.13.10 "Управление в социальных и экономических системах" : автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук / Ларин Олег Михайлович. – Курск, 2004. – 18 с.

108. Милосердов, Е. П. Алгоритмы поддержки принятия решений по выбору режимов в системах электроснабжения / Е. П. Милосердов, М. А.

Кузнецов, А. А. Мукучян // Состояние и перспективы развития электро- и теплотехнологии (XIX Бенардосовские чтения) : Материалы Международной научно-технической конференции, Иваново, 31 мая – 02 2017 года. Том III. – Иваново: Ивановский государственный энергетический университет им. В.И. Ленина, 2017. – С. 28-30.

109. Мукучян, А. А. Использование алгоритмов "задачи о рюкзаке" для поддержки принятия решений по выбору режимов в системах электроснабжения / А. А. Мукучян, М. А. Кузнецов // Энергия-2018 : Тринадцатая международная научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых: Материалы конференции. В 6-ти томах, Иваново, 03–05 апреля 2018 года. Том 5. – Иваново: Ивановский государственный энергетический университет им. В.И. Ленина, 2018. – С. 74.

110. Карелин, А. Е. Экспертная система для поддержки принятия решений оператора в системе электроснабжения города / А. Е. Карелин, А. Н. Береза // Инженерный вестник Дона. – 2019. – № 4(55). – С. 28.

111. Казымов, И. М. Обработка информации и принятие решений в системе контроля параметров электрической энергии в распределительной сети / И. М. Казымов, Б. С. Компанец // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. – 2021. – Т. 10, № 3(55). – С. 19-24. – DOI 10.46548/21vek-2021-1055-0003.

112. Семенова, Н. Г. Математические модели частных критериев и их программная реализация в оценке принимаемого решения по развитию системы электроснабжения Промышленного района города / Н. Г. Семенова, А. Д. Чернова // Интеллект. Инновации. Инвестиции. – 2016. – № 4. – С. 94-99.

113. Третьяков, Е. А. Управление системой электроснабжения железных дорог / Е. А. Третьяков // Современные проблемы науки и образования. – 2015. – № 1-1. – С. 231.

114. Кухарчук, И.Б. Система поддержки принятия решений при управлении режимами нагрузки в кабельном блоке / И.Б. Кухарчук, Н.М. Труфанова // Электротехника. – 2023. – №11. – С. 20-24. – DOI 10.53891/00135860_2023_11_20.

115. Kukharchuk, I.B. Investigation of heating of 150 kV underground cable line for various conditions of laying / I.B. Kukharchuk, A.V. Kazakov, N.M. Trufanova // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. – Vol. 327. – 2018. DOI:10.1088/1757-899X/327/2/022041.

116. Николаева, О. В. Точность схем метода конечных элементов для решения уравнения переноса на неструктурированных тетраэдрических и призматических сетках / О. В. Николаева, А. С. Казанцева // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Математическое моделирование физических процессов. – 2020. – № 1. – С. 3-19.

117. Труфанова, Н.М. Расчет теплового поля кабельного канала с учетом тепловых потерь в экранах кабелей / Н.М. Труфанова, И.Б. Кухарчук, Н.В. Фефилова // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Электротехника, информационные технологии, системы управления. – 2018. – № 28. – С. 179-193.

118. Нифантьева, Н. В. Особенности моделирования работы подземного кабельного канала / Н.В. Нифантьева, И.Б. Кухарчук, Н.М. Труфанова // Автоматизированные системы управления и Информационные технологии : Мат. всерос. науч.-техн. конф. В двух томах, Пермь, 09–11 июня 2020 года. Том 2. – Пермь: Пермский национальный исследовательский политехнический университет. – 2020. – С. 4-8.

119. Фефилова, Н. В. Расчет теплового поля кабеля с ПВХ-изоляцией / Н. В. Фефилова, И. Б. Кухарчук, Н. М. Труфанова // Автоматизированные системы управления и информационные технологии : Материалы всероссийской научно-технической конференции. В 2-х томах, Пермь, 17 мая 2018 года. Том 2. – Пермь: Пермский национальный исследовательский политехнический университет, 2018. – С. 110-114.

120. ГОСТ Р МЭК 60287 – 1 – 1 – 2009. Кабели электрические. Расчет номинальной токовой нагрузки. Часть 1–1. – М.: Стандартинформ, 2009. – 24 с.

121. Труфанова, Н.М. Численное исследование влияния зависимости сопротивления токопроводящей жилы от температуры на работу кабельной линии

/ Н.М. Труфанова, И.Б. Кухарчук, А.М. Ковригина // Автоматизированные системы управления и информационные технологии: Мат. всерос. наук. В 2-х томах, Пермь, 09-11 июня 2021 г. Том 2. – Пермь: Пермский национальный исследовательский политехнический университет, 2021. – С. 48-53.

122. Kukharchuk, I.B. Experimental Determination of Load Current of Cables with Impregnated–Paper Insulation in the Steady-State Thermal Mode / I.B. Kukharchuk, A.E. Terlych, N.M. Trufanova // Russian Electrical Engineering. – 2021. – Vol. 92(11). – P. 654-658. – DOI 10.3103/S1068371221110080.

123. Титков, В.В. Кабельные линии 6–10 кВ и выше. Влияние способов прокладки на температурный режим / В.В. Титков, С.М. Дудкин // Новости электротехники. – 2012. – № 3.

124. Феофилова, Н.В. Исследование взаимного влияния кабельных линий на температурный режим / Н.В. Феофилова, И.Б. Кухарчук, Н.М. Труфанова // Инновационные технологии: теория, инструменты, практика, 2020: мат. XI Межд. интер.-конф. мол. уч., аспирантов, студентов, 15 нояб.-31 дек. 2019 г. – С. 209-214.

125. Kukharchuk, I.B. Features of Determining the Long-Term Permissible Current of Cable Lines in a Cable Channel / I.B. Kukharchuk, N.M. Trufanova // IEEE Xplore Proceedings, International Russian Automation Conference, RusAutoCon 2021, Sochi, 05–11 September 2021 г. – Sochi: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2021. P. 655-659. – DOI 10.1109/RusAutoCon52004.2021.9537525.

126. Trufanova N.M. An Analysis of Cable-Trough Capacity / N.M. Trufanova, A.V. Kazakov, I.B. Kukharchuk // Russian Electrical Engineering. – 2022. – Vol. 93(11). – P. 681-684.

127. Кухарчук, И.Б. Особенности расчета токовой нагрузки кабельного канала / И.Б. Кухарчук, Н.М. Труфанова // Инновационные технологии: теория, инструменты, практика, 2019: мат. X Межд. интер.-конф. мол. уч., аспирантов, студентов, 20 нояб.-31 дек. 2018 г. – С. 173-177.

128. Меркухин, Е. Н. Синтез тепловой модели на основе принципа суперпозиции температурных полей для платы микроблока электронной

аппаратуры / Е. Н. Меркухин // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. – 2016. – № 10-4. – С. 534-538.

129. Труфанова, Н.М. Подходы к представлению зависимости температур кабельных линий в канале от их загрузки в виде параметрической модели / Н.М. Труфанова, А.В. Казаков, И.Б. Кухарчук // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Электротехника, информационные технологии, системы управления. – 2021. – № 40. – С. 61-75. – DOI 10.15593/2224-9397/2021.4.04.

130. Кухарчук, И.Б. Алгоритмы поиска допустимого режима эксплуатации кабельного канала на основе оценки его температурного состояния / И.Б. Кухарчук // Прикладная математика и вопросы управления. – 2022. – № 1. – С. 109-122. – DOI: 10.15593/2499-9873/2022.1.06.

131. Kukharchuk, I.B. Control of Electrical Energy Distribution in a Cable Channel / I.B. Kukharchuk, N.M. Trufanova // Russian Electrical Engineering. – 2019. – Vol. 90(11). – P. 703-708. – DOI 10.3103/S1068371219110099.

132. Унжакова, С. М. Управление спросом в электроэнергетике / С. М. Унжакова, Т. А. Наумова // Байкальская наука: идеи, инновации, инвестиции, Иркутск, 30 мая 2019 года. – Иркутск: Иркутский национальный исследовательский технический университет, 2019. – С. 56-58.

133. Kukharchuk, I.B. Algorithms for Determining the Optimal Load Mode of the Cable Block / I.B. Kukharchuk, N.M. Trufanova // IEEE Xplore Proceedings, International Russian Automation Conference, RusAutoCon 2022, Sochi, 04–10 September 2022 г. – Sochi: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2022. P. 602-606 DOI: 10.1109/RusAutoCon54946.2022.9896319.

134. Труфанова, Н.М. Оценка работоспособности кабельного канала на основе численного моделирования процессов термодинамики / Н.М. Труфанова, И.Б. Кухарчук // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Электротехника, информационные технологии, системы управления. – 2020. – № 35. – С. 30-42. – DOI 10.15593/2224-9397/2020.3.02.

50	0,64	0,89	0,64	0,51	0,38	0,376	0,76	2,6	0,76	0,66	0,53	0,39	0,79	0,79	0,79	0,56	0,45	0,45
100	2,9	3,38	2,9	1,98	1,48	1,45	2,9	10,04	2,9	2,55	2,05	1,52	3,08	3,08	3,08	2,2	1,77	1,77
150	5,37	7,51	5,37	4,33	3,23	3,18	7,39	21,94	7,39	5,58	4,48	3,32	6,79	7,75	6,79	5,81	4,85	3,9
200	11,04	13,1	11,04	7,55	7,49	5,54	12,88	38,28	12,88	9,72	7,8	5,79	11,84	13,52	11,84	10,12	8,45	6,75
250	16,63	19,39	16,63	14,11	11,24	8,346	19,39	57,41	19,39	14,57	11,68	8,69	17,98	20,54	17,98	15,39	12,84	10,31
300	23,35	27,23	23,35	19,85	15,79	11,72	27,23	80,61	27,23	20,46	16,41	12,2	25,29	28,88	25,29	21,61	18,09	14,52
Tok	ΔT_{9,1}	ΔT_{9,2}	ΔT_{9,3}	ΔT_{9,4}	ΔT_{9,5}	ΔT_{9,6}	ΔT_{9,7}	ΔT_{9,8}	ΔT_{9,9}	ΔT_{9,10}	ΔT_{9,11}	ΔT_{9,12}	ΔT_{9,13}	ΔT_{9,14}	ΔT_{9,15}	ΔT_{9,16}	ΔT_{9,17}	ΔT_{9,18}
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
50	0,5	0,64	0,89	0,64	0,51	0,376	0,65	0,76	2,6	0,76	0,66	0,52	0,57	0,79	0,79	0,79	0,56	0,45
100	1,93	2,9	3,38	2,9	1,98	1,45	2,52	2,9	10,04	2,9	2,55	2,02	2,21	3,08	3,08	3,08	2,2	1,77
150	4,23	5,37	7,51	5,37	4,33	4,23	5,51	7,39	21,94	7,39	5,58	4,41	5,82	6,79	7,75	6,79	5,81	4,86
200	7,37	11,04	13,1	11,04	7,55	7,376	9,61	12,88	38,28	12,88	9,72	7,7	10,16	11,84	13,52	11,84	10,12	8,45
250	13,86	16,63	19,39	16,63	14,11	11,105	14,38	19,39	57,41	19,39	14,57	11,55	15,43	17,98	20,54	17,98	15,39	12,87
300	19,48	23,35	27,23	23,35	19,85	15,6	20,24	27,23	80,61	27,23	20,46	16,22	21,7	25,29	28,88	25,29	21,61	18,11
Tok	ΔT_{10,1}	ΔT_{10,2}	ΔT_{10,3}	ΔT_{10,4}	ΔT_{10,5}	ΔT_{10,6}	ΔT_{10,7}	ΔT_{10,8}	ΔT_{10,9}	ΔT_{10,10}	ΔT_{10,11}	ΔT_{10,12}	ΔT_{10,13}	ΔT_{10,14}	ΔT_{10,15}	ΔT_{10,16}	ΔT_{10,17}	ΔT_{10,18}
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
50	0,376	0,51	0,64	0,89	0,64	0,5	0,52	0,66	0,76	2,6	0,76	0,65	0,45	0,56	0,79	0,79	0,79	0,57
100	1,45	1,98	2,9	3,38	2,9	1,93	2,02	2,55	2,9	10,04	2,9	2,52	1,77	2,2	3,08	3,08	3,08	2,21
150	4,23	4,33	5,37	7,51	5,37	4,23	4,41	5,58	7,39	21,94	7,39	5,51	4,86	5,81	6,79	7,75	6,79	5,82
200	7,376	7,55	11,04	13,1	11,04	7,37	7,7	9,72	12,88	38,28	12,88	9,61	8,45	10,12	11,84	13,52	11,84	10,16
250	11,105	14,11	16,63	19,39	16,63	13,86	11,55	14,57	19,39	57,41	19,39	14,38	12,87	15,39	17,98	20,54	17,98	15,43
300	15,6	19,85	23,35	27,23	23,35	19,48	16,22	20,46	27,23	80,61	27,23	20,24	18,11	21,61	25,29	28,88	25,29	21,7
Tok	ΔT_{11,1}	ΔT_{11,2}	ΔT_{11,3}	ΔT_{11,4}	ΔT_{11,5}	ΔT_{11,6}	ΔT_{11,7}	ΔT_{11,8}	ΔT_{11,9}	ΔT_{11,10}	ΔT_{11,11}	ΔT_{11,12}	ΔT_{11,13}	ΔT_{11,14}	ΔT_{11,15}	ΔT_{11,16}	ΔT_{11,17}	ΔT_{11,18}
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
50	0,376	0,38	0,51	0,64	0,89	0,64	0,39	0,53	0,66	0,76	2,6	0,76	0,45	0,45	0,56	0,79	0,79	0,79
100	1,45	1,48	1,98	2,9	3,38	2,9	1,52	2,05	2,55	2,9	10,04	2,9	1,77	1,77	2,2	3,08	3,08	3,08
150	3,18	3,23	4,33	5,37	7,51	5,37	3,32	4,48	5,58	7,39	21,94	7,39	3,9	4,85	5,81	6,79	7,75	6,79
200	5,54	7,49	7,55	11,04	13,1	11,04	5,79	7,8	9,72	12,88	38,28	12,88	6,75	8,45	10,12	11,84	13,52	11,84
250	8,346	11,24	14,11	16,63	19,39	16,63	8,69	11,68	14,57	19,39	57,41	19,39	10,31	12,84	15,39	17,98	20,54	17,98
300	11,72	15,79	19,85	23,35	27,23	23,35	12,2	16,41	20,46	27,23	80,61	27,23	14,52	18,09	21,61	25,29	28,88	25,29
Tok	ΔT_{12,1}	ΔT_{12,2}	ΔT_{12,3}	ΔT_{12,4}	ΔT_{12,5}	ΔT_{12,6}	ΔT_{12,7}	ΔT_{12,8}	ΔT_{12,9}	ΔT_{12,10}	ΔT_{12,11}	ΔT_{12,12}	ΔT_{12,13}	ΔT_{12,14}	ΔT_{12,15}	ΔT_{12,16}	ΔT_{12,17}	ΔT_{12,18}
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
50	0,25	0,38	0,39	0,51	0,64	0,89	0,39	0,4	0,53	0,66	0,92	2,6	0,34	0,46	0,45	0,56	0,68	0,79
100	0,97	1,48	1,49	1,98	2,46	3,38	1,52	1,54	2,05	2,55	3,58	10,04	1,33	1,78	1,76	2,2	3,08	3,08
150	2,13	3,23	3,25	4,32	5,36	7,51	3,32	3,38	4,47	5,58	7,81	21,94	2,93	3,9	3,87	4,84	6,77	7,75
200	3,71	5,64	5,67	7,55	11,22	13,1	5,79	5,87	7,79	9,72	13,61	38,28	5,11	6,81	8,41	8,44	11,8	13,52
250	8,346	8,47	11,32	11,3	16,83	19,39	8,69	8,78	11,79	14,57	20,39	57,41	7,76	10,34	12,79	15,35	17,91	20,54
300	11,72	11,89	15,89	19,85	23,63	27,23	12,2	12,34	16,39	20,46	28,6	80,61	10,92	14,52	17,98	21,6	25,21	28,88
Tok	ΔT_{13,1}	ΔT_{13,2}	ΔT_{13,3}	ΔT_{13,4}	ΔT_{13,5}	ΔT_{13,6}	ΔT_{13,7}	ΔT_{13,8}	ΔT_{13,9}	ΔT_{13,10}	ΔT_{13,11}	ΔT_{13,12}	ΔT_{13,13}	ΔT_{13,14}	ΔT_{13,15}	ΔT_{13,16}	ΔT_{13,17}	ΔT_{13,18}
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
50	0,63	0,51	0,51	0,39	0,38	0,25	0,91	0,79	0,66	0,53	0,4	0,39	2,26	0,9	0,68	0,56	0,46	0,45
100	1,93	1,97	1,98	1,49	1,48	1,45	3,52	3,07	2,55	2,05	1,54	1,52	8,79	3,52	2,64	2,2	1,78	1,77
150	5,28	4,3	4,32	3,25	3,23	3,18	7,7	6,7	5,58	4,47	3,38	3,32	19,33	7,73	5,81	4,83	3,9	3,9
200	9,2	7,49	7,55	5,67	5,64	5,54	13,43	11,68	9,72	7,79	5,87	5,79	33,72	13,47	10,12	8,41	6,81	6,75
250	13,86	14,64	11,3	8,51	8,47	8,346	20,16	17,49	14,57	11,79	11,68	8,69	51,2	20,45	15,35	12,79	10,34	10,31
300	19,48	19,71	15,9	15,89	11,89	11,72	28,29	24,53	20,46	16,39	16,41	12,2	72,01	28,79	21,6	17,98	14,52	14,52
Tok	ΔT_{14,1}	ΔT_{14,2}	ΔT_{14,3}	ΔT_{14,4}	ΔT_{14,5}	ΔT_{14,6}	ΔT_{14,7}	ΔT_{14,8}	ΔT_{14,9}	ΔT_{14,10}	ΔT_{14,11}	ΔT_{14,12}	ΔT_{14,13}	ΔT_{14,14}	ΔT_{14,15}	ΔT_{14,16}	ΔT_{14,17}	ΔT_{14,18}
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
50	0,5	0,63	0,5	0,51	0,38	0,376	0,78	0,91	0,78	0,66	0,53	0,39	0,91	2,26	0,91	0,68	0,56	0,45
100	1,93	1,93	1,93	1,98	1,48	1,45	3,02	3,52	3,02	2,55	2,05	1,52	3,53	8,79	3,53	2,64	2,2	1,77
150	4,23	5,28	4,23	4,33	3,23	3,18	6,6	7,7	6,6	5,58	4,48	3,32	7,75	19,33	7,75	5,81	4,85	3,9
200	9,2	9,2	9,2	7,55	5,63	5,54	11,52	13,43	11,52	9,72	7,8	7,7	13,52	33,72	13,52	10,12	8,45	6,75
250	13,86	13,86	13,86	11,3	11,24	8,346	17,29	20,16	17,29	14,57	11,68	11,55	20,54	51,2	20,54	15,39	12,84	10,31
300	19,48	19,48	19,48	15,9	15,79	11,72	24,27	28,29	24,27	20,46	16,41	16,22	28,88	72,01	28,88	25,19	18,09	14,52
Tok	ΔT_{15,1}	ΔT_{15,2}	ΔT_{15,3}	ΔT_{15,4}	ΔT_{15,5}	ΔT_{15,6}	ΔT_{15,7}	ΔT_{15,8}	ΔT_{15,9}	ΔT_{15,10}	ΔT_{15,11}	ΔT_{15,12}	ΔT_{15,13}	ΔT_{15,14}	ΔT_{15,15}	ΔT_{15,16}	ΔT_{15,17}	ΔT_{15,18}
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
50	0,5	0,5	0,63	0,5	0,51	0,376	0,65	0,78	0,91	0,78	0,66	0,52	0,68	0,91	2,26	0,91	0,68	0,566
100	2,42	1,93	1,93	1,93	1,98	1,45	2,52	3,02	3,52	3,02	2,55	2,02	2,65	3,53	8,79	3,53	2,64	2,21
150	4,23	4,23	5,28	4,23	4,33	3,18	5,51	6,6	7,7	6,6	5,58	4,41	5,82	7,75	19,33	7,75	5,81	4,86
200	7,37	9,2	9,2	9,2	7,55	5,54	9,61	11,52	13,43	11,52	9,72	7,7	10,16	13,52	33,72	13,52	10,12	8,45
250	11,1	13,86	13,86	13,86	11,3	11,105	14,38	17,29	20,16	17,29	14,57	11,55	15,43	20,54	51,2	20,54	15,39	12,87
300	15,61	19,48	19,48	19,48	15,9	15,6	20,24	24,27	28,29	24,27	20,46	16,22	21,7	28,88	72,01	28,88	25,19	18,11
Tok	ΔT_{16,1}	ΔT_{16,2}	ΔT_{16,3}	ΔT_{16,4}	ΔT_{16,5}	ΔT_{16,6}	ΔT₁											

100	1,45	1,98	1,93	1,93	1,93	2,42	2,02	2,55	3,02	3,52	3,02	2,52	2,21	2,64	3,53	8,79	3,53	2,65
150	3,18	4,33	4,23	5,28	4,23	4,23	4,41	5,58	6,6	7,7	6,6	5,51	4,86	5,81	7,75	19,33	7,75	5,82
200	5,54	7,55	9,2	9,2	9,2	7,37	7,7	9,72	11,52	13,43	11,52	9,61	8,45	10,12	13,52	33,72	13,52	10,16
250	11,105	11,3	13,86	13,86	13,86	11,1	11,55	14,57	17,29	20,16	17,29	14,38	12,87	15,39	20,54	51,2	20,54	15,43
300	15,6	15,9	19,48	19,48	19,48	15,61	16,22	20,46	24,27	28,29	24,27	20,24	18,11	25,19	28,88	72,01	28,88	21,7
Toc	ΔT₁₇₋₁	ΔT₁₇₋₂	ΔT₁₇₋₃	ΔT₁₇₋₄	ΔT₁₇₋₅	ΔT₁₇₋₆	ΔT₁₇₋₇	ΔT₁₇₋₈	ΔT₁₇₋₉	ΔT₁₇₋₁₀	ΔT₁₇₋₁₁	ΔT₁₇₋₁₂	ΔT₁₇₋₁₃	ΔT₁₇₋₁₄	ΔT₁₇₋₁₅	ΔT₁₇₋₁₆	ΔT₁₇₋₁₇	ΔT₁₇₋₁₈
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
50	0,376	0,38	0,51	0,5	0,63	0,5	0,39	0,53	0,66	0,78	0,91	0,78	0,45	0,56	0,68	0,91	2,26	0,91
100	1,45	1,48	1,98	1,93	1,93	1,93	1,52	2,05	2,55	3,02	3,52	3,02	1,77	2,2	2,64	3,53	8,79	3,53
150	3,18	3,23	4,33	4,23	5,28	4,23	3,32	4,48	5,58	6,6	7,7	6,6	3,9	4,85	5,81	7,75	19,33	7,75
200	5,54	5,63	7,55	9,2	9,2	9,2	7,7	7,8	9,72	11,52	13,43	11,52	6,75	8,45	10,12	13,52	33,72	13,52
250	8,346	11,24	11,3	13,86	13,86	13,86	11,55	11,68	14,57	17,29	20,16	17,29	10,31	12,84	15,39	20,54	51,2	20,54
300	11,72	15,79	15,9	19,48	19,48	19,48	16,22	16,41	20,46	24,27	28,29	24,27	14,52	18,09	25,19	28,88	72,01	28,88
Toc	ΔT₁₈₋₁	ΔT₁₈₋₂	ΔT₁₈₋₃	ΔT₁₈₋₄	ΔT₁₈₋₅	ΔT₁₈₋₆	ΔT₁₈₋₇	ΔT₁₈₋₈	ΔT₁₈₋₉	ΔT₁₈₋₁₀	ΔT₁₈₋₁₁	ΔT₁₈₋₁₂	ΔT₁₈₋₁₃	ΔT₁₈₋₁₄	ΔT₁₈₋₁₅	ΔT₁₈₋₁₆	ΔT₁₈₋₁₇	ΔT₁₈₋₁₈
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
50	0,25	0,38	0,39	0,51	0,51	0,63	0,39	0,4	0,53	0,66	0,79	0,91	0,45	0,46	0,56	0,68	0,9	2,26
100	1,45	1,48	1,49	1,98	1,97	1,93	1,52	1,54	2,05	2,55	3,07	3,52	1,77	1,78	2,2	2,64	3,52	8,79
150	3,18	3,23	3,25	4,32	4,3	5,28	3,32	3,38	4,47	5,58	6,7	7,7	3,9	3,9	4,83	5,81	7,73	19,33
200	5,54	5,64	5,67	7,55	7,49	9,2	5,79	5,87	7,79	9,72	11,68	13,43	6,75	6,81	8,41	10,12	13,47	33,72
250	8,346	8,47	8,51	11,3	14,64	13,86	8,69	11,68	11,79	14,57	17,49	20,16	10,31	10,34	12,79	15,35	20,45	51,2
300	11,72	11,89	15,89	15,9	19,71	19,48	12,2	16,41	16,39	20,46	24,53	28,29	14,52	14,52	17,98	21,6	28,79	72,01

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

Таблица Б.1 – Коэффициенты полиномов

	d	c	b	a		d	c	b	a
ΔT_{1-1}	-4,800e-07	1,001e-03	1,400e-03	-1,357e-02	ΔT_{10-1}	-2,344e-07	2,703e-04	-8,165e-03	2,105e-02
ΔT_{1-2}	9,333e-08	2,894e-04	-2,848e-03	7,571e-02	ΔT_{10-2}	1,511e-07	1,860e-04	-2,702e-03	7,452e-02
ΔT_{1-3}	1,511e-07	1,862e-04	-2,759e-03	7,548e-02	ΔT_{10-3}	-1,733e-07	3,325e-04	-6,331e-03	6,905e-02
ΔT_{1-4}	7,978e-07	-1,449e-04	2,428e-02	-1,883e-01	ΔT_{10-4}	-2,200e-07	3,689e-04	-2,357e-04	-5,714e-03
ΔT_{1-5}	-8,000e-08	1,559e-04	5,000e-05	-1,429e-03	ΔT_{10-5}	-1,733e-07	3,325e-04	-6,331e-03	6,905e-02
ΔT_{1-6}	-5,111e-08	1,025e-04	8,730e-06	-7,143e-04	ΔT_{10-6}	1,511e-07	1,824e-04	-2,844e-03	7,643e-02
ΔT_{1-7}	-2,178e-07	3,830e-04	-9,960e-04	-2,881e-02	ΔT_{10-7}	-1,089e-07	2,123e-04	1,270e-04	-2,381e-03
ΔT_{1-8}	-2,022e-07	3,367e-04	-1,068e-03	-2,905e-02	ΔT_{10-8}	-1,378e-07	2,676e-04	2,754e-04	-3,810e-03
ΔT_{1-9}	1,511e-07	1,934e-04	-2,873e-03	7,881e-02	ΔT_{10-9}	-3,067e-07	4,201e-04	-7,883e-03	2,143e-02
ΔT_{1-10}	-2,511e-07	3,060e-04	-1,476e-02	1,260e-01	ΔT_{10-10}	-5,422e-07	1,055e-03	7,675e-04	-1,000e-02
ΔT_{1-11}	-8,000e-08	1,596e-04	4,143e-04	-4,048e-03	ΔT_{10-11}	-3,067e-07	4,201e-04	-7,883e-03	2,143e-02
ΔT_{1-12}	2,031e-07	8,685e-05	-3,093e-03	7,990e-02	ΔT_{10-12}	-1,289e-07	2,617e-04	5,056e-04	-6,429e-03
ΔT_{1-13}	-1,044e-07	2,329e-04	-1,437e-04	1,905e-03	ΔT_{10-13}	-2,200e-07	2,916e-04	-7,464e-03	1,881e-02
ΔT_{1-14}	-1,022e-07	2,312e-04	-2,540e-05	-2,143e-03	ΔT_{10-14}	-2,533e-07	3,419e-04	-7,874e-03	2,143e-02
ΔT_{1-15}	-8,222e-08	1,851e-04	1,032e-05	-1,190e-03	ΔT_{10-15}	-1,467e-07	3,257e-04	-2,262e-04	4,762e-04
ΔT_{1-16}	-8,222e-08	1,852e-04	-9,683e-05	4,762e-04	ΔT_{10-16}	-2,911e-07	4,339e-04	-7,856e-03	2,190e-02
ΔT_{1-17}	-6,444e-08	1,410e-04	-5,794e-05	-4,762e-04	ΔT_{10-17}	-1,467e-07	3,257e-04	-2,262e-04	4,762e-04
ΔT_{1-18}	-6,222e-08	1,402e-04	-6,825e-05	-2,381e-04	ΔT_{10-18}	-2,467e-07	3,401e-04	-7,655e-03	2,190e-02
ΔT_{2-1}	-3,067e-07	4,201e-04	-7,883e-03	2,143e-02	ΔT_{11-1}	-7,556e-08	1,526e-04	5,794e-05	-6,667e-04
ΔT_{2-2}	-4,800e-07	1,001e-03	1,400e-03	-1,357e-02	ΔT_{11-2}	-2,400e-07	2,943e-04	-1,424e-02	1,207e-01
ΔT_{2-3}	-3,067e-07	4,201e-04	-7,883e-03	2,143e-02	ΔT_{11-3}	1,511e-07	1,860e-04	-2,702e-03	7,452e-02
ΔT_{2-4}	-2,644e-07	3,463e-04	-1,413e-02	1,190e-01	ΔT_{11-4}	-1,733e-07	3,325e-04	-6,331e-03	6,905e-02
ΔT_{2-5}	1,733e-07	1,349e-04	-2,876e-03	7,643e-02	ΔT_{11-5}	-2,200e-07	3,689e-04	-2,357e-04	-5,714e-03
ΔT_{2-6}	-7,556e-08	1,526e-04	5,794e-05	-6,667e-04	ΔT_{11-6}	-1,733e-07	3,325e-04	-6,331e-03	6,905e-02
ΔT_{2-7}	-1,933e-07	3,314e-04	-1,145e-03	-2,714e-02	ΔT_{11-7}	-8,222e-08	1,598e-04	9,603e-05	-2,143e-03
ΔT_{2-8}	-2,178e-07	3,830e-04	-9,960e-04	-2,881e-02	ΔT_{11-8}	-1,089e-07	2,137e-04	3,556e-04	-4,286e-03
ΔT_{2-9}	-1,933e-07	3,314e-04	-1,145e-03	-2,714e-02	ΔT_{11-9}	-1,378e-07	2,676e-04	2,754e-04	-3,810e-03
ΔT_{2-10}	-2,778e-07	3,589e-04	-1,467e-02	1,248e-01	ΔT_{11-10}	-3,067e-07	4,201e-04	-7,883e-03	2,143e-02
ΔT_{2-11}	-2,511e-07	3,061e-04	-1,473e-02	1,252e-01	ΔT_{11-11}	-5,422e-07	1,055e-03	7,675e-04	-1,000e-02
ΔT_{2-12}	-8,222e-08	1,598e-04	9,603e-05	-2,143e-03	ΔT_{11-12}	-3,067e-07	4,201e-04	-7,883e-03	2,143e-02
ΔT_{2-13}	-1,044e-07	2,329e-04	-1,437e-04	1,905e-03	ΔT_{11-13}	-7,111e-08	1,817e-04	2,873e-04	-3,095e-03
ΔT_{2-14}	-1,044e-07	2,329e-04	-1,437e-04	1,905e-03	ΔT_{11-14}	-2,178e-07	2,903e-04	-7,353e-03	1,786e-02
ΔT_{2-15}	-1,044e-07	2,329e-04	-1,437e-04	1,905e-03	ΔT_{11-15}	-2,533e-07	3,419e-04	-7,874e-03	2,143e-02
ΔT_{2-16}	1,444e-07	1,686e-04	-2,935e-03	7,262e-02	ΔT_{11-16}	-1,467e-07	3,257e-04	-2,262e-04	4,762e-04
ΔT_{2-17}	-7,778e-08	1,841e-04	8,254e-05	-1,667e-03	ΔT_{11-17}	-2,911e-07	4,339e-04	-7,856e-03	2,190e-02
ΔT_{2-18}	-6,222e-08	1,402e-04	-6,825e-05	-2,381e-04	ΔT_{11-18}	-1,467e-07	3,257e-04	-2,262e-04	4,762e-04
ΔT_{3-1}	-6,222e-08	1,402e-04	-6,825e-05	-2,381e-04	ΔT_{12-1}	1,964e-07	8,322e-05	-3,026e-03	7,748e-02
ΔT_{3-2}	-3,067e-07	4,201e-04	-7,883e-03	2,143e-02	ΔT_{12-2}	-8,000e-08	1,559e-04	5,000e-05	-1,429e-03
ΔT_{3-3}	-4,800e-07	1,001e-03	1,400e-03	-1,357e-02	ΔT_{12-3}	1,733e-07	1,361e-04	-2,926e-03	7,929e-02
ΔT_{3-4}	-3,067e-07	4,201e-04	-7,883e-03	2,143e-02	ΔT_{12-4}	7,756e-07	-9,481e-05	2,445e-02	-1,921e-01
ΔT_{3-5}	-2,644e-07	3,463e-04	-1,413e-02	1,190e-01	ΔT_{12-5}	-2,933e-07	3,971e-04	-1,417e-02	1,219e-01
ΔT_{3-6}	1,736e-07	1,329e-04	-2,945e-03	7,733e-02	ΔT_{12-6}	-2,200e-07	3,689e-04	-2,357e-04	-5,714e-03
ΔT_{3-7}	1,556e-07	1,890e-04	-2,708e-03	7,571e-02	ΔT_{12-7}	-8,222e-08	1,598e-04	9,603e-05	-2,143e-03
ΔT_{3-8}	-1,933e-07	3,314e-04	-1,145e-03	-2,714e-02	ΔT_{12-8}	-8,222e-08	1,606e-04	3,246e-04	-4,048e-03
ΔT_{3-9}	-2,178e-07	3,830e-04	-9,960e-04	-2,881e-02	ΔT_{12-9}	-1,356e-07	2,255e-04	-8,278e-04	7,857e-03
ΔT_{3-10}	-1,933e-07	3,314e-04	-1,145e-03	-2,714e-02	ΔT_{12-10}	-1,378e-07	2,676e-04	2,754e-04	-3,810e-03
ΔT_{3-11}	-2,440e-07	3,451e-04	-1,334e-02	1,103e-01	ΔT_{12-11}	-2,000e-07	3,766e-04	2,786e-04	-5,476e-03
ΔT_{3-12}	-2,489e-07	2,825e-04	-8,473e-03	2,048e-02	ΔT_{12-12}	-5,422e-07	1,055e-03	7,675e-04	-1,000e-02
ΔT_{3-13}	1,467e-07	1,686e-04	-2,924e-03	7,214e-02	ΔT_{12-13}	-6,222e-08	1,402e-04	-6,825e-05	-2,381e-04
ΔT_{3-14}	-1,044e-07	2,329e-04	-1,437e-04	1,905e-03	ΔT_{12-14}	-8,667e-08	1,877e-04	-1,262e-04	2,143e-03
ΔT_{3-15}	-1,044e-07	2,329e-04	-1,437e-04	1,905e-03	ΔT_{12-15}	-2,244e-07	3,101e-04	-1,304e-02	1,117e-01
ΔT_{3-16}	-1,044e-07	2,329e-04	-1,437e-04	1,905e-03	ΔT_{12-16}	1,267e-07	2,131e-04	-2,824e-03	7,048e-02
ΔT_{3-17}	1,444e-07	1,686e-04	-2,935e-03	7,262e-02	ΔT_{12-17}	-1,644e-07	3,327e-04	-9,722e-04	-2,238e-02

ΔT_{3-18}	-7,111e-08	1,817e-04	2,873e-04	-3,095e-03	ΔT_{12-18}	-2,911e-07	4,339e-04	-7,856e-03	2,190e-02
ΔT_{4-1}	1,736e-07	1,329e-04	-2,945e-03	7,733e-02	ΔT_{13-1}	-2,267e-07	3,062e-04	-6,769e-03	4,476e-02
ΔT_{4-2}	-2,644e-07	3,463e-04	-1,413e-02	1,190e-01	ΔT_{13-2}	1,333e-08	2,462e-04	-8,640e-03	1,340e-01
ΔT_{4-3}	-3,067e-07	4,201e-04	-7,883e-03	2,143e-02	ΔT_{13-3}	-1,022e-07	2,061e-04	3,103e-04	-4,048e-03
ΔT_{4-4}	-4,800e-07	1,001e-03	1,400e-03	-1,357e-02	ΔT_{13-4}	7,978e-07	-1,449e-04	2,428e-02	-1,883e-01
ΔT_{4-5}	-3,067e-07	4,201e-04	-7,883e-03	2,143e-02	ΔT_{13-5}	-8,000e-08	1,559e-04	5,000e-05	-1,429e-03
ΔT_{4-6}	-2,578e-07	3,401e-04	-1,409e-02	1,202e-01	ΔT_{13-6}	-1,036e-07	1,652e-04	-1,162e-03	-2,467e-02
ΔT_{4-7}	-2,489e-07	2,825e-04	-8,473e-03	2,048e-02	ΔT_{13-7}	-1,933e-07	3,718e-04	1,048e-04	-2,619e-03
ΔT_{4-8}	-2,778e-07	3,589e-04	-1,467e-02	1,248e-01	ΔT_{13-8}	-1,733e-07	3,237e-04	1,905e-04	-4,286e-03
ΔT_{4-9}	-1,933e-07	3,314e-04	-1,145e-03	-2,714e-02	ΔT_{13-9}	-1,378e-07	2,676e-04	2,754e-04	-3,810e-03
ΔT_{4-10}	-2,178e-07	3,830e-04	-9,960e-04	-2,881e-02	ΔT_{13-10}	-1,356e-07	2,255e-04	-8,278e-04	7,857e-03
ΔT_{4-11}	-1,933e-07	3,314e-04	-1,145e-03	-2,714e-02	ΔT_{13-11}	1,778e-07	1,405e-04	-2,883e-03	7,833e-02
ΔT_{4-12}	1,556e-07	1,890e-04	-2,708e-03	7,571e-02	ΔT_{13-12}	-8,222e-08	1,598e-04	9,603e-05	-2,143e-03
ΔT_{4-13}	-7,111e-08	1,817e-04	2,873e-04	-3,095e-03	ΔT_{13-13}	-4,133e-07	9,250e-04	-3,524e-04	2,381e-03
ΔT_{4-14}	1,444e-07	1,686e-04	-2,935e-03	7,262e-02	ΔT_{13-14}	-1,578e-07	3,665e-04	1,825e-04	-2,619e-03
ΔT_{4-15}	-1,044e-07	2,329e-04	-1,437e-04	1,905e-03	ΔT_{13-15}	-1,222e-07	2,763e-04	7,460e-05	-9,524e-04
ΔT_{4-16}	-1,044e-07	2,329e-04	-1,437e-04	1,905e-03	ΔT_{13-16}	-1,022e-07	2,305e-04	-3,254e-05	-7,143e-04
ΔT_{4-17}	-1,044e-07	2,329e-04	-1,437e-04	1,905e-03	ΔT_{13-17}	-8,667e-08	1,877e-04	-1,262e-04	2,143e-03
ΔT_{4-18}	1,467e-07	1,686e-04	-2,924e-03	7,214e-02	ΔT_{13-18}	-7,111e-08	1,817e-04	2,873e-04	-3,095e-03
ΔT_{5-1}	-7,556e-08	1,526e-04	5,794e-05	-6,667e-04	ΔT_{14-1}	-2,556e-07	3,392e-04	-1,403e-02	1,200e-01
ΔT_{5-2}	1,733e-07	1,349e-04	-2,876e-03	7,643e-02	ΔT_{14-2}	-2,267e-07	3,062e-04	-6,769e-03	4,476e-02
ΔT_{5-3}	-2,644e-07	3,463e-04	-1,413e-02	1,190e-01	ΔT_{14-3}	-2,556e-07	3,392e-04	-1,403e-02	1,200e-01
ΔT_{5-4}	-3,067e-07	4,201e-04	-7,883e-03	2,143e-02	ΔT_{14-4}	-1,022e-07	2,060e-04	3,675e-04	-5,000e-03
ΔT_{5-5}	-4,800e-07	1,001e-03	1,400e-03	-1,357e-02	ΔT_{14-5}	1,733e-07	1,349e-04	-2,876e-03	7,643e-02
ΔT_{5-6}	-3,067e-07	4,201e-04	-7,883e-03	2,143e-02	ΔT_{14-6}	-7,556e-08	1,526e-04	5,794e-05	-6,667e-04
ΔT_{5-7}	-8,222e-08	1,598e-04	9,603e-05	-2,143e-03	ΔT_{14-7}	-1,644e-07	3,184e-04	1,135e-04	-2,381e-03
ΔT_{5-8}	-2,511e-07	3,061e-04	-1,473e-02	1,252e-01	ΔT_{14-8}	-1,933e-07	3,718e-04	1,048e-04	-2,619e-03
ΔT_{5-9}	-2,778e-07	3,589e-04	-1,467e-02	1,248e-01	ΔT_{14-9}	-1,644e-07	3,184e-04	1,135e-04	-2,381e-03
ΔT_{5-10}	-1,933e-07	3,314e-04	-1,145e-03	-2,714e-02	ΔT_{14-10}	-1,378e-07	2,676e-04	2,754e-04	-3,810e-03
ΔT_{5-11}	-2,178e-07	3,830e-04	-9,960e-04	-2,881e-02	ΔT_{14-11}	-1,089e-07	2,137e-04	3,556e-04	-4,286e-03
ΔT_{5-12}	-1,933e-07	3,314e-04	-1,145e-03	-2,714e-02	ΔT_{14-12}	-2,489e-07	3,032e-04	-1,470e-02	1,243e-01
ΔT_{5-13}	-6,222e-08	1,402e-04	-6,825e-05	-2,381e-04	ΔT_{14-13}	-1,644e-07	3,704e-04	-8,651e-05	1,905e-03
ΔT_{5-14}	-7,778e-08	1,841e-04	8,254e-05	-1,667e-03	ΔT_{14-14}	-4,133e-07	9,250e-04	-3,524e-04	2,381e-03
ΔT_{5-15}	1,444e-07	1,686e-04	-2,935e-03	7,262e-02	ΔT_{14-15}	-1,644e-07	3,704e-04	-8,651e-05	1,905e-03
ΔT_{5-16}	-1,044e-07	2,329e-04	-1,437e-04	1,905e-03	ΔT_{14-16}	6,667e-07	6,810e-06	2,163e-02	-1,681e-01
ΔT_{5-17}	-1,044e-07	2,329e-04	-1,437e-04	1,905e-03	ΔT_{14-17}	-9,778e-08	2,302e-04	2,540e-05	-2,143e-03
ΔT_{5-18}	-1,044e-07	2,329e-04	-1,437e-04	1,905e-03	ΔT_{14-18}	-7,111e-08	1,817e-04	2,873e-04	-3,095e-03
ΔT_{6-1}	-5,111e-08	1,025e-04	8,730e-06	-7,143e-04	ΔT_{15-1}	1,333e-08	1,452e-04	7,424e-03	-4,881e-02
ΔT_{6-2}	-8,000e-08	1,559e-04	5,000e-05	-1,429e-03	ΔT_{15-2}	-2,556e-07	3,392e-04	-1,403e-02	1,200e-01
ΔT_{6-3}	7,978e-07	-1,449e-04	2,428e-02	-1,883e-01	ΔT_{15-3}	-2,267e-07	3,062e-04	-6,769e-03	4,476e-02
ΔT_{6-4}	1,511e-07	1,862e-04	-2,759e-03	7,548e-02	ΔT_{15-4}	-2,556e-07	3,392e-04	-1,403e-02	1,200e-01
ΔT_{6-5}	9,333e-08	2,894e-04	-2,848e-03	7,571e-02	ΔT_{15-5}	-1,022e-07	2,060e-04	3,675e-04	-5,000e-03
ΔT_{6-6}	-4,800e-07	1,001e-03	1,400e-03	-1,357e-02	ΔT_{15-6}	1,736e-07	1,329e-04	-2,945e-03	7,733e-02
ΔT_{6-7}	2,031e-07	8,685e-05	-3,093e-03	7,990e-02	ΔT_{15-7}	-1,289e-07	2,617e-04	5,056e-04	-6,429e-03
ΔT_{6-8}	-8,000e-08	1,596e-04	4,143e-04	-4,048e-03	ΔT_{15-8}	-1,644e-07	3,184e-04	1,135e-04	-2,381e-03
ΔT_{6-9}	-2,511e-07	3,060e-04	-1,476e-02	1,260e-01	ΔT_{15-9}	-1,933e-07	3,718e-04	1,048e-04	-2,619e-03
ΔT_{6-10}	1,511e-07	1,934e-04	-2,873e-03	7,881e-02	ΔT_{15-10}	-1,644e-07	3,184e-04	1,135e-04	-2,381e-03
ΔT_{6-11}	-2,022e-07	3,367e-04	-1,068e-03	-2,905e-02	ΔT_{15-11}	-1,378e-07	2,676e-04	2,754e-04	-3,810e-03
ΔT_{6-12}	-2,178e-07	3,830e-04	-9,960e-04	-2,881e-02	ΔT_{15-12}	-1,089e-07	2,123e-04	1,270e-04	-2,381e-03
ΔT_{6-13}	-6,222e-08	1,402e-04	-6,825e-05	-2,381e-04	ΔT_{15-13}	-1,244e-07	2,788e-04	-1,294e-04	9,524e-04
ΔT_{6-14}	-6,444e-08	1,410e-04	-5,794e-05	-4,762e-04	ΔT_{15-14}	-1,644e-07	3,704e-04	-8,651e-05	1,905e-03
ΔT_{6-15}	-8,222e-08	1,852e-04	-9,683e-05	4,762e-04	ΔT_{15-15}	-4,133e-07	9,250e-04	-3,524e-04	2,381e-03
ΔT_{6-16}	-8,222e-08	1,851e-04	1,032e-05	-1,190e-03	ΔT_{15-16}	-1,644e-07	3,704e-04	-8,651e-05	1,905e-03
ΔT_{6-17}	-1,022e-07	2,312e-04	-2,540e-05	-2,143e-03	ΔT_{15-17}	6,667e-07	6,810e-06	2,163e-02	-1,681e-01
ΔT_{6-18}	-1,044e-07	2,329e-04	-1,437e-04	1,905e-03	ΔT_{15-18}	-9,644e-08	2,297e-04	1,192e-04	-1,000e-03
ΔT_{7-1}	-2,200e-07	3,689e-04	-2,357e-04	-5,714e-03	ΔT_{16-1}	1,736e-07	1,329e-04	-2,945e-03	7,733e-02
ΔT_{7-2}	-2,933e-07	3,971e-04	-1,417e-02	1,219e-01	ΔT_{16-2}	-1,022e-07	2,060e-04	3,675e-04	-5,000e-03
ΔT_{7-3}	7,756e-07	-9,481e-05	2,445e-02	-1,921e-01	ΔT_{16-3}	-2,556e-07	3,392e-04	-1,403e-02	1,200e-01
ΔT_{7-4}	1,733e-07	1,361e-04	-2,926e-03	7,929e-02	ΔT_{16-4}	-2,267e-07	3,062e-04	-6,769e-03	4,476e-02

ΔT_{7-5}	-8,000e-08	1,559e-04	5,000e-05	-1,429e-03	ΔT_{16-5}	-2,556e-07	3,392e-04	-1,403e-02	1,200e-01
ΔT_{7-6}	1,964e-07	8,322e-05	-3,026e-03	7,748e-02	ΔT_{16-6}	1,333e-08	1,452e-04	7,424e-03	-4,881e-02
ΔT_{7-7}	-5,422e-07	1,055e-03	7,675e-04	-1,000e-02	ΔT_{16-7}	-1,089e-07	2,123e-04	1,270e-04	-2,381e-03
ΔT_{7-8}	-2,000e-07	3,766e-04	2,786e-04	-5,476e-03	ΔT_{16-8}	-1,378e-07	2,676e-04	2,754e-04	-3,810e-03
ΔT_{7-9}	-1,378e-07	2,676e-04	2,754e-04	-3,810e-03	ΔT_{16-9}	-1,644e-07	3,184e-04	1,135e-04	-2,381e-03
ΔT_{7-10}	-1,356e-07	2,255e-04	-8,278e-04	7,857e-03	ΔT_{16-10}	-1,933e-07	3,718e-04	1,048e-04	-2,619e-03
ΔT_{7-11}	-8,222e-08	1,606e-04	3,246e-04	-4,048e-03	ΔT_{16-11}	-1,644e-07	3,184e-04	1,135e-04	-2,381e-03
ΔT_{7-12}	-8,222e-08	1,598e-04	9,603e-05	-2,143e-03	ΔT_{16-12}	-1,289e-07	2,617e-04	5,056e-04	-6,429e-03
ΔT_{7-13}	-2,911e-07	4,339e-04	-7,856e-03	2,190e-02	ΔT_{16-13}	-9,644e-08	2,297e-04	1,192e-04	-1,000e-03
ΔT_{7-14}	-1,644e-07	3,327e-04	-9,722e-04	-2,238e-02	ΔT_{16-14}	6,667e-07	6,810e-06	2,163e-02	-1,681e-01
ΔT_{7-15}	1,267e-07	2,131e-04	-2,824e-03	7,048e-02	ΔT_{16-15}	-1,644e-07	3,704e-04	-8,651e-05	1,905e-03
ΔT_{7-16}	-2,244e-07	3,101e-04	-1,304e-02	1,117e-01	ΔT_{16-16}	-4,133e-07	9,250e-04	-3,524e-04	2,381e-03
ΔT_{7-17}	-8,667e-08	1,877e-04	-1,262e-04	2,143e-03	ΔT_{16-17}	-1,644e-07	3,704e-04	-8,651e-05	1,905e-03
ΔT_{7-18}	-6,222e-08	1,402e-04	-6,825e-05	-2,381e-04	ΔT_{16-18}	-1,244e-07	2,788e-04	-1,294e-04	9,524e-04
ΔT_{8-1}	-1,733e-07	3,325e-04	-6,331e-03	6,905e-02	ΔT_{17-1}	-7,556e-08	1,526e-04	5,794e-05	-6,667e-04
ΔT_{8-2}	-2,200e-07	3,689e-04	-2,357e-04	-5,714e-03	ΔT_{17-2}	1,733e-07	1,349e-04	-2,876e-03	7,643e-02
ΔT_{8-3}	-1,733e-07	3,325e-04	-6,331e-03	6,905e-02	ΔT_{17-3}	-1,022e-07	2,060e-04	3,675e-04	-5,000e-03
ΔT_{8-4}	1,511e-07	1,860e-04	-2,702e-03	7,452e-02	ΔT_{17-4}	-2,556e-07	3,392e-04	-1,403e-02	1,200e-01
ΔT_{8-5}	-2,400e-07	2,943e-04	-1,424e-02	1,207e-01	ΔT_{17-5}	-2,267e-07	3,062e-04	-6,769e-03	4,476e-02
ΔT_{8-6}	-7,556e-08	1,526e-04	5,794e-05	-6,667e-04	ΔT_{17-6}	-2,556e-07	3,392e-04	-1,403e-02	1,200e-01
ΔT_{8-7}	-3,067e-07	4,201e-04	-7,883e-03	2,143e-02	ΔT_{17-7}	-2,489e-07	3,032e-04	-1,470e-02	1,243e-01
ΔT_{8-8}	-5,422e-07	1,055e-03	7,675e-04	-1,000e-02	ΔT_{17-8}	-1,089e-07	2,137e-04	3,556e-04	-4,286e-03
ΔT_{8-9}	-3,067e-07	4,201e-04	-7,883e-03	2,143e-02	ΔT_{17-9}	-1,378e-07	2,676e-04	2,754e-04	-3,810e-03
ΔT_{8-10}	-1,378e-07	2,676e-04	2,754e-04	-3,810e-03	ΔT_{17-10}	-1,644e-07	3,184e-04	1,135e-04	-2,381e-03
ΔT_{8-11}	-1,089e-07	2,137e-04	3,556e-04	-4,286e-03	ΔT_{17-11}	-1,933e-07	3,718e-04	1,048e-04	-2,619e-03
ΔT_{8-12}	-8,222e-08	1,598e-04	9,603e-05	-2,143e-03	ΔT_{17-12}	-1,644e-07	3,184e-04	1,135e-04	-2,381e-03
ΔT_{8-13}	-1,467e-07	3,257e-04	-2,262e-04	4,762e-04	ΔT_{17-13}	-7,111e-08	1,817e-04	2,873e-04	-3,095e-03
ΔT_{8-14}	-2,911e-07	4,339e-04	-7,856e-03	2,190e-02	ΔT_{17-14}	-9,778e-08	2,302e-04	2,540e-05	-2,143e-03
ΔT_{8-15}	-1,467e-07	3,257e-04	-2,262e-04	4,762e-04	ΔT_{17-15}	6,667e-07	6,810e-06	2,163e-02	-1,681e-01
ΔT_{8-16}	-2,533e-07	3,419e-04	-7,874e-03	2,143e-02	ΔT_{17-16}	-1,644e-07	3,704e-04	-8,651e-05	1,905e-03
ΔT_{8-17}	-2,178e-07	2,903e-04	-7,353e-03	1,786e-02	ΔT_{17-17}	-4,133e-07	9,250e-04	-3,524e-04	2,381e-03
ΔT_{8-18}	-7,111e-08	1,817e-04	2,873e-04	-3,095e-03	ΔT_{17-18}	-1,644e-07	3,704e-04	-8,651e-05	1,905e-03
ΔT_{9-1}	1,511e-07	1,824e-04	-2,844e-03	7,643e-02	ΔT_{18-1}	-1,036e-07	1,652e-04	-1,162e-03	-2,467e-02
ΔT_{9-2}	-1,733e-07	3,325e-04	-6,331e-03	6,905e-02	ΔT_{18-2}	-8,000e-08	1,559e-04	5,000e-05	-1,429e-03
ΔT_{9-3}	-2,200e-07	3,689e-04	-2,357e-04	-5,714e-03	ΔT_{18-3}	7,978e-07	-1,449e-04	2,428e-02	-1,883e-01
ΔT_{9-4}	-1,733e-07	3,325e-04	-6,331e-03	6,905e-02	ΔT_{18-4}	-1,022e-07	2,061e-04	3,103e-04	-4,048e-03
ΔT_{9-5}	1,511e-07	1,860e-04	-2,702e-03	7,452e-02	ΔT_{18-5}	1,333e-08	2,462e-04	-8,640e-03	1,340e-01
ΔT_{9-6}	-2,344e-07	2,703e-04	-8,165e-03	2,105e-02	ΔT_{18-6}	-2,267e-07	3,062e-04	-6,769e-03	4,476e-02
ΔT_{9-7}	-1,289e-07	2,617e-04	5,056e-04	-6,429e-03	ΔT_{18-7}	-8,222e-08	1,598e-04	9,603e-05	-2,143e-03
ΔT_{9-8}	-3,067e-07	4,201e-04	-7,883e-03	2,143e-02	ΔT_{18-8}	1,778e-07	1,405e-04	-2,883e-03	7,833e-02
ΔT_{9-9}	-5,422e-07	1,055e-03	7,675e-04	-1,000e-02	ΔT_{18-9}	-1,356e-07	2,255e-04	-8,278e-04	7,857e-03
ΔT_{9-10}	-3,067e-07	4,201e-04	-7,883e-03	2,143e-02	ΔT_{18-10}	-1,378e-07	2,676e-04	2,754e-04	-3,810e-03
ΔT_{9-11}	-1,378e-07	2,676e-04	2,754e-04	-3,810e-03	ΔT_{18-11}	-1,733e-07	3,237e-04	1,905e-04	-4,286e-03
ΔT_{9-12}	-1,089e-07	2,123e-04	1,270e-04	-2,381e-03	ΔT_{18-12}	-1,933e-07	3,718e-04	1,048e-04	-2,619e-03
ΔT_{9-13}	-2,467e-07	3,401e-04	-7,655e-03	2,190e-02	ΔT_{18-13}	-7,111e-08	1,817e-04	2,873e-04	-3,095e-03
ΔT_{9-14}	-1,467e-07	3,257e-04	-2,262e-04	4,762e-04	ΔT_{18-14}	-8,667e-08	1,877e-04	-1,262e-04	2,143e-03
ΔT_{9-15}	-2,911e-07	4,339e-04	-7,856e-03	2,190e-02	ΔT_{18-15}	-1,022e-07	2,305e-04	-3,254e-05	-7,143e-04
ΔT_{9-16}	-1,467e-07	3,257e-04	-2,262e-04	4,762e-04	ΔT_{18-16}	-1,222e-07	2,763e-04	7,460e-05	-9,524e-04
ΔT_{9-17}	-2,533e-07	3,419e-04	-7,874e-03	2,143e-02	ΔT_{18-17}	-1,578e-07	3,665e-04	1,825e-04	-2,619e-03
ΔT_{9-18}	-2,200e-07	2,916e-04	-7,464e-03	1,881e-02	ΔT_{18-18}	-4,133e-07	9,250e-04	-3,524e-04	2,381e-03

ПРИЛОЖЕНИЕ В

Листинг программы для ЭВМ «Выбор оптимального режима нагрузки кабельного блока» («Optimal load mode»)

Модуль 1

```

import numpy as np
import csv
from pathlib import Path
from configparser import ConfigParser
import find_polynomial_coefficients

def write_scv_file(out_filename, data_filename, field_name, data):
    file_exists = Path(out_filename).exists()
    with open(out_filename, mode='a') as csv_file:
        headers = ['file'] + field_name
        writer = csv.DictWriter(csv_file, delimiter=';', lineterminator='\n', fieldnames=headers)
        if not file_exists:
            writer.writeheader()
        data = [Path(data_filename).name]+[k for k in data]
        data = dict(zip(headers, data))
        writer.writerow(data)
    csv_file.close()
config = ConfigParser()
config.read('settings.ini')
maximum_deviation = config.getfloat('common', 'maximum_deviation')
polynomial_degree = config.getint('common', 'polynomial_degree')
number_of_bad_data_files = 0
number_of_bad_format_files = 0
k_column_name = ['k{ }'.format(i) for i in range(polynomial_degree, -1, -1)]
if not Path('./result/').exists():
    Path('./result/').mkdir()
if Path('./result/bad_files.csv').exists():
    Path('./result/bad_files.csv').unlink()
if Path('./result/good_files.csv').exists():
    Path('./result/good_files.csv').unlink()
if Path('./result/all_files.csv').exists():
    Path('./result/all_files.csv').unlink()
if Path('./sort_dataset.log').exists():
    Path('./sort_dataset.log').unlink()
for file in list(Path('./dataset').glob('*.*csv')):
    print(Path(file).name)
    try:
        dataset_lists = find_polynomial_coefficients.read_dataset(file)

```

```

current_list = dataset_lists[0]
delta_t_list = dataset_lists[1]
polynomial_coefficients =
find_polynomial_coefficients.finding_polynomial_coefficients(current_list, delta_t_list)
poly1d_fn = np.poly1d(polynomial_coefficients)
len_current_list = len(current_list)
data_good = True
for i in range(len_current_list):
    y_error = poly1d_fn(current_list[i]) - delta_t_list[i]
    if abs(y_error) > maximum_deviation:
        print('bad data in file {}'.format(file))
        number_of_bad_data_files += 1
        data_good = False
        break
if data_good:
    write_scv_file('./result/good_files.csv', file, k_column_name, polynomial_coefficients)
else:
    write_scv_file('./result/bad_files.csv', file, k_column_name, polynomial_coefficients)
write_scv_file('./result/all_files.csv', file, k_column_name, polynomial_coefficients)
except Exception as e:
    print(e)
    number_of_bad_format_files += 1
    with open('./sort_dataset.log', mode='a') as sort_dataset_log:
        sort_dataset_log.write('bad format in file {}\n'.format(file))
    sort_dataset_log.close()

```

Модуль 2

```

import sys
import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt
import pandas as pd
import easygui
from pathlib import Path
from configparser import ConfigParser

def read_dataset(input_file):
    data = pd.read_csv(input_file, sep=';', decimal=",", keep_default_na=False)
    data.columns = ["current", "delta_t"]
    current_list = list(data.current)
    delta_t_list = list(data.delta_t)
    return current_list, delta_t_list

def finding_polynomial_coefficients(current_list, delta_t_list):
    config = ConfigParser()
    config.read('settings.ini')
    polynomial_degree = config.getint('common', 'polynomial_degree')
    maximum_deviation = config.getfloat('common', 'maximum_deviation')

```

```

print(current_list)
print(delta_t_list)
coefficients = np.polyfit(current_list, delta_t_list, polynomial_degree)
print(coefficients)
return coefficients
def main():
    if Path('./dataset').exists():
        input_file = easygui.fileopenbox(default='./dataset/', filetypes=["*.csv"])
        if input_file is not None:
            dataset_lists = read_dataset(input_file)
            current_list = dataset_lists[0]
            delta_t_list = dataset_lists[1]
            poly1d_fn = np.poly1d(finding_polynomial_coefficients(current_list, delta_t_list))
            fig = plt.figure()
            ax = fig.add_subplot()
            fig.suptitle('Заголовок окна')
            ax.set_xlabel('Ток')
            ax.set_ylabel('Температура')
            # plt.xlim(0, 400)
            # plt.ylim(0, 400)
            plt.plot(current_list, delta_t_list, 'go')
            len_current_list = len(current_list)-1
            for i in range(len_current_list):
                x = np.linspace(current_list[i], current_list[i+1], 100)
                plt.plot(x, poly1d_fn(x), color='red', alpha=0.25)
                y_error = poly1d_fn(current_list) - delta_t_list
                plt.errorbar(current_list, poly1d_fn(current_list), yerr=y_error, fmt='None', capsize=6,
color='red', alpha=0.25)
            for i in enumerate(delta_t_list):
                ann = '{:.4f}\n'.format(poly1d_fn(current_list[i[0]]) - i[1])
                plt.annotate(ann, xy=(current_list[i[0]], i[1]))
            plt.show()
        else:
            print('./dataset not exists')
if __name__ == '__main__':
    main()
    sys.exit(0)

```

Модуль 3

```

import sys
import pandas as pd
import numpy as np
from itertools import product

```

```

from pathlib import Path
import time

start_time = time.time()
if Path('./result/all_files.csv').exists():
    data_f = pd.read_csv('./result/all_files.csv', sep=';', decimal=".")
else:
    print('file ./result/all_files.csv not exists')
    sys.exit(0)
if Path('./current.csv').exists():
    data_i = pd.read_csv('./current.csv', sep=';', decimal=",")
else:
    print('file ./current.csv not exists')
    sys.exit(0)
data_i_lists = []
data_i_keys = data_i.keys()
out_data_frame = pd.DataFrame(columns=[data_i_keys])
out_data_frame['I_sum'] = None
for key in data_i_keys:
    data_i_list = [x for x in data_i[key].tolist() if not np.isnan(x)]
    data_i_lists.append(data_i_list)
    out_data_frame["{}_t".format(key)] = None
print(data_i_lists)
for term in product(*data_i_lists):
    out_data_frame.loc[out_data_frame.shape[0], data_i_keys] = list(term)
    row = out_data_frame.index[-1]
    out_data_frame.loc[row, 'I_sum'] = out_data_frame.loc[row, data_i_keys].sum()
for i in data_i.head():
    for ind in out_data_frame.index:
        result = 0
        for key in data_i_keys:
            value = out_data_frame.loc[ind, key].values[0]
            df1 = list(data_f[data_f['file'].str.contains(i) & data_f['file'].str.contains("-{}".format(key[1:]))].values[0])
            poly1d_fn = np.poly1d(df1[1:])
            result += poly1d_fn(value)
        out_data_frame.at[ind, '{}_t'.format(i)] = round(result, 6)
print("--- %s seconds ---" % (time.time() - start_time))
print(out_data_frame)
out_data_frame.to_csv('./result/result_table.csv', sep=';', index=False,)

```

Модуль 4

```

import sys
from configparser import ConfigParser
import pandas as pd

```

```

from pathlib import Path

config = ConfigParser()
if Path('settings.ini').exists():
    config.read('settings.ini')
else:
    print('file settings.ini not exists')
    sys.exit(0)
temperature_shift = config.getfloat('common', 'temperature_shift')
temperature_threshold = config.getfloat('common', 'temperature_threshold')
if Path('./result/result_table.csv').exists():
    data = pd.read_csv('./result/result_table.csv', sep=';', decimal=".")
else:
    print('file ./result/result_table.csv not exists')
    sys.exit(0)
print(data)
columns_shift = data.columns.get_loc("I_sum")
data_head = list(data.head())[columns_shift+1:]
data_head_len = len(data_head)
pd.set_option('display.max_columns', None)
for i in data_head:
    data = data[data[i] < temperature_threshold - temperature_shift]
    data[i] = data[i].apply(lambda x: x + temperature_shift)
data_head = list(data.head())[:columns_shift]
data['mean_g'] = 1
for i in data_head:
    max_i = data[i].max()
    if max_i != 0:
        data['mean_g'] = (data['mean_g'].values * data[i].apply(lambda x: 1 / max_i if x == 0 else x /
max_i))
data['mean_g'] = data['mean_g'].values**1/data_head_len
data = data.sort_values(by='mean_g', ascending=False)

print(data)
data.to_csv('./result/sort_result_table.csv', sep=';', index=False, float_format='%.12f')

```

Модуль настроек

```

[common]
polynomial_degree = 3
maximum_deviation = 0.8
temperature_shift = 20
temperature_threshold = 90

```

ПРИЛОЖЕНИЕ Г

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2022683236

«**Определение теплового состояния кабельного блока**»
 («**Thermal analysis of the block**»)

Правообладатель: *Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Пермский национальный исследовательский политехнический университет» (ПНИПУ) (RU)*

Авторы: *Кухарчук Ирина Борисовна (RU), Казаков Алексей Владимирович (RU), Труфанова Наталия Михайловна (RU)*

Заявка № 2022683294

Дата поступления 02 декабря 2022 г.

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ 02 декабря 2022 г.



*Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности*

ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ
 Сертификат 68b80077014e5010294edbd24145d5c7
 Владелец: **Зубов Юрий Сергеевич**
 Действителен с 20.12.2022 по 16.05.2025

Ю.С. Зубов

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2023618673

«Выбор оптимального режима нагрузки кабельного блока» («Optimal load mode»)

Правообладатель: *Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Пермский национальный исследовательский политехнический университет» (ПНИПУ) (RU)*

Авторы: *Кухарчук Ирина Борисовна (RU), Казаков Алексей Владимирович (RU)*



Заявка № 2023617797

Дата поступления 27 апреля 2023 г.

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ 27 апреля 2023 г.

Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

документ подписан электронной подписью
Сертификат 68b80077614c4010a94edbd24145d5c7
Владелец: **Зубов Юлий Сергеевич**
Действителен с 20.07.2022 по 26.05.2025

Ю.С. Зубов

ПРИЛОЖЕНИЕ Д



www.elkacable.ru

Общество с ограниченной ответственностью
Опытно-конструкторское предприятие
«ЭЛКА-Кабель»

Россия, 614042, г. Пермь, ул. Гальперина, д. 17, каб. 23
Тел.: +7 (342) 206-29-39

УТВЕРЖДАЮ

Директор ООО «ОКП «ЭЛКА-Кабель»

/ Гаркунов А.В. /



« 19 » декабря 2023 г.

о внедрении результатов диссертационной работы
Кухарчук Ирины Борисовны,
представленной на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Настоящим актом подтверждается, что научно-технические результаты диссертационной работы Кухарчук И.Б., посвященной разработке моделей и методов принятия решений при управлении распределением электроэнергии в кабельных сооружениях, внедрены и используются в процессе проектирования и эксплуатации кабельных сооружений компанией ООО «Опытно-конструкторское предприятие «ЭЛКА-Кабель». К использованию в ООО «ОКП «ЭЛКА-Кабель» приняты:

1. Результаты экспериментальных и численных исследований нагрева элементов конструкции кабеля при протекании электрического тока.
2. Режимы нагрузки кабелей в проектируемых и существующих кабельных блоках.
3. Система поддержки принятия решений при управлении процессом распределения электроэнергии в кабельных блоках, позволяющая обеспечить эффективное распределение нагрузки кабельных линий.

Использование разработанных Кухарчук Ириной Борисовной моделей и алгоритмов определения оптимального нагрузочного режима позволило увеличить объем передаваемой мощности на 12,3 % без использования резервных линий и дополнительно на 11,8 % при максимальной загрузке резервных линий.

Технический директор, к.т.н.

В. Г. Савченко

« 19 » декабря 2023 г.

УТВЕРЖДАЮ



Проректор по образовательной деятельности
 ФГАОУ ВО ПНИПУ,
 доктор технических наук, доцент

[Signature] /А.Б. Петроченков/

[Signature] 2023 г.

Акт

**о внедрении результатов, полученных Кухарчук Ириной Борисовной
 при выполнении диссертационной работы
 на соискание ученой степени кандидата технических наук
 «МОДЕЛИ И МЕТОДЫ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ В АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ
 СИСТЕМАХ УПРАВЛЕНИЯ РАСПРЕДЕЛЕНИЕМ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ С УЧЕТОМ
 ДИНАМИКИ ИЗМЕНЕНИЯ НАГРУЗКИ»
 по специальности 2.3.3. Автоматизация и управление технологическими
 процессами и производствами**

Комиссия в составе:

Председатель: декан Электротехнического факультета ПНИПУ, к.т.н.
 Черняев В.В.

Члены комиссии: профессор кафедры «Конструирование и технологии в
 электротехнике», д.т.н. Щербинин А.Г.
 доцент кафедры «Конструирование и технологии в
 электротехнике», к.т.н. Субботин Е.В.

составила настоящий акт о том, что основные результаты диссертационной работы Кухарчук И.Б. используются в образовательном процессе, реализуемом для магистров направления подготовки 13.04.02 «Электроэнергетика и электротехника».

Предложенные модели и методы принятия решений при управлении процессом распределения электрической энергии в кабельных блоках нашли применение в дисциплине «Математические пакеты для инженерных и научных расчетов».

Разработанное программное обеспечение «Определение теплового состояния кабельного блока» используется в рамках лабораторных занятий по дисциплине «Математические пакеты для инженерных и научных расчетов» для моделирования управлением рабочими режимами кабельного блока.

Эффект от внедрения результатов диссертационной работы заключается в повышении уровня освоения профессиональных компетенций и их компонентов в области управления и информационных технологий в электротехнике, что соответствует требованиям Федеральных государственных образовательных стандартов высшего образования.

Итоги внедрения результатов диссертационной работы обсуждались на заседании кафедры «Конструирование и технологии в электротехнике» ПНИПУ «03» октября 2023г. Протокол № 3.

Председатель комиссии:


Черняев В.В.

Члены комиссии:


Щербинин А.Г.


Субботин Е.В.

«03» октября 2023 г.