

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**

**АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук**

Пермь 2024

Диссертационная работа выполнена в Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Пермский национальный исследовательский политехнический университет».

Научный руководитель: **Труфанова Наталия Михайловна**
доктор технических наук, профессор

Официальные оппоненты: **Титков Василий Васильевич**
доктор технических наук, профессор,
ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого»,
Высшая школа высоковольтной энергетики,
профессор

Вологдин Сергей Валентинович
доктор технических наук, доцент,
ФГБОУ ВО «Ижевский государственный
технический университет имени М.Т.
Калашникова», кафедра «Информационная
безопасность», заведующий кафедрой

Ведущая организация: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» (г. Томск)

Защита состоится «19» апреля 2024 года в 14:00 на заседании диссертационного совета Пермского национального исследовательского политехнического университета Д ПНИПУ.05.14, по адресу: 614990, г. Пермь, Комсомольский пр. 29, ауд. 345.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГАОУ ВО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет» (www.pstu.ru).

Автореферат разослан «1» марта 2024 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д ПНИПУ.05.14,
доктор технических наук, доцент

Фрейман Владимир Исаакович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

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. Для этого предлагается создать и исследовать 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.

СППР, помогающим оценить техническое состояние системы, посвящены работы Карелина А.Е., Березы А.Н., Казымова И.М., Компанеец 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., Wiecek 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 León F., Халитова В.Р., Грешнякова Г.В., 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:

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» паспорта специальности 2.3.3);

2. *Математические модели* объекта управления, оригинальность которых заключается в учете сложного тепломассообмена 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» паспорта специальности 2.3.3);

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, АСУП, 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» паспорта специальности 2.3.3).

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 загрузок 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, теоретических основ электротехники, теории принятия решений, методы математического моделирования, 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.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность диссертационной работы, сформулированы объект и предмет исследования, цель работы и основные задачи, описаны теоретическая и практическая значимость результатов работы, отражена научная новизна, перечислены положения, выносимые на защиту.

Первая глава посвящена анализу состояния проблемы. Приведен обзор актуальных научных работ, посвященных вопросам математического моделирования и управления процессом распределения электроэнергии в кабельных сооружениях. Показано, что ухудшение диэлектрических и механических свойств изоляции кабелей при воздействии повышенной температуры влияет на ограничение нагрузочного режима и требует анализа температурного состояния кабельного сооружения при управлении режимами нагрузки. Анализ работ, посвященных управлению распределением электроэнергии, показал, что математические модели процессов, протекающих в кабельных линиях, используются, как правило, для выбора оптимальных условий эксплуатации при проектировании новых линий или создания цифровых двойников кабельных сооружений с целью контроля текущего состояния. Однако необходимость оценки температурного состояния линий для различных вариантов нагрузки при определении управляющих воздействий, направленных на увеличение эффективности распределения электроэнергии, указывает на необходимость внедрения системы поддержки принятия решений, включающей в себя математические модели процессов теплопереноса.

Вторая глава посвящена разработке концептуальной модели системы поддержки принятия решений в автоматизированной системе управления распределением электроэнергии в кабельных сооружениях.

Рассматривая процесс распределения электроэнергии как объект управления, можно выделить векторы параметров объекта X , возмущающих Z и управляющих U воздействий, а также выходные параметры Y .

Вектор параметров объекта:

$$X = \{C^j, \lambda^j, \rho^j, G^j, K, C_i\} \quad (1)$$

где C^j – теплоемкость, λ^j – теплопроводность, ρ^j – плотность j -го элемента конструкции кабельного блока; G^j – геометрические параметры j -го элемента конструкции кабельного блока; K – конструкция кабельного блока, C_i – категория потребителя i -й кабельной линии.

Вектор внешних возмущений:

$$Z = \{T_0, C^s, \lambda^s, \rho^s\} \quad (2)$$

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

Вектор управляющих воздействий:

$$U = \{I_i\} \quad (3)$$

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

Вектор выходного состояния:

$$Y^\phi = \{T_i^\phi, I_i^\phi\} \quad (4)$$

где T_i^ϕ – максимальная температура изоляции i -й кабельной линии; I_i^ϕ – токовая нагрузка i -й кабельной линии.

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

$$T_i = F(X, Z, U) \quad (5)$$

где F – оператор, представляющий собой систему дифференциальных уравнений.

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 требуется оценка теплового состояния для планируемой нагрузки и выбор управляющих воздействий для сохранения допустимых условий эксплуатации кабелей. С этой целью предложено разработать и внедрить в автоматизированную систему управления (рисунок 1) процессом распределения электроэнергии в кабельных блоках систему поддержки принятия решений. СППР является обслуживающей подсистемой, позволяющей ЛПР, выбрать оптимальные управляющие воздействия.

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'' . Для проверки допустимости новых нагрузок Y' и определения необходимых управляющих воздействий ЛПР

обращается к СППР, которая определяет рекомендованные управляющие воздействия по снижению нагрузки $U_{СППР}$ в случае возможного перегрева кабельных линий. По результатам работы СППР ЛПР выдает потребителям утвержденные управляющие воздействия $U_{ЛПР}$. Для проверки выполнения управляющих воздействий контролируются выходные параметры Y^ϕ .

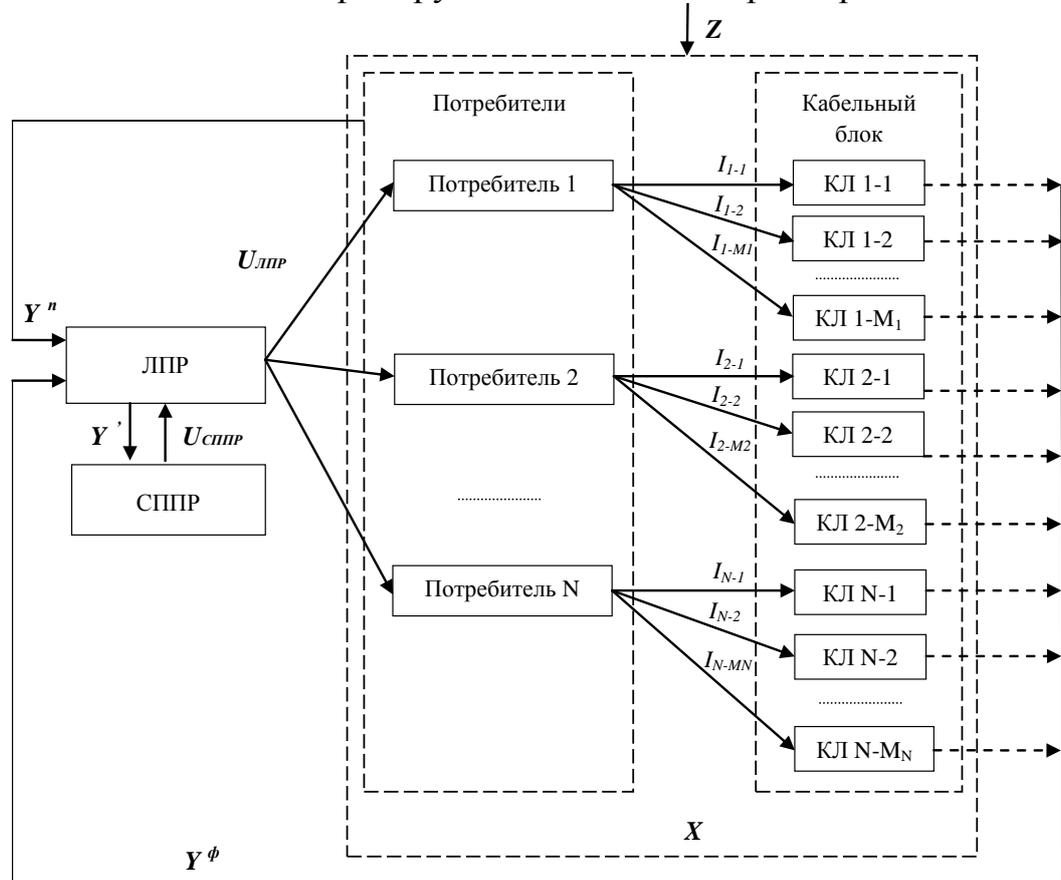


Рисунок 1 – Структурная схема автоматизированной системы управления распределением электроэнергии в кабельном блоке

Управляющие воздействия в виде рекомендованного режима нагрузки определяются с учетом следующих условий:

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

$$T_i < T_{max} \quad (6)$$

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:

$$K(I_i) = \sqrt[N]{\prod_{i=1}^N \frac{(I_i + 1)}{I_i^\phi}} \quad (7)$$

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.

В качестве целевой функции принят параметр сохранения нагрузки:

$$J(U) = K(I_i) \rightarrow \max. \quad (8)$$

На управляющие воздействия накладывается ряд технологических ограничений:

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

$$I_{i \min} \leq I_i \leq I_{i \max} \quad (9)$$

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:

$$I_i|_{C_i=1} = I_i^\phi \quad (10)$$

где C_i – категория потребителя i -й кабельной линии.

Задача управления процессом распределения электрической энергии включает в себя задачу определения оптимальных значений токовых нагрузок:

$$\left\{ K(I_i) = \sqrt[N]{\prod_{i=1}^N \frac{(I_i + 1)}{I_i^\phi}} \rightarrow \max_{I_i} \left\{ \begin{array}{l} T_i = F(X, Z, U); \\ T_i < T_{\max}; \\ I_i \in [I_{i \min}; I_{i \max}]; \\ I_i|_{C_i=1} = I_i^\phi \end{array} \right\} \rightarrow I_i^{opt}. \quad (11)$$

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.

СППР (рисунок 2) призвана обеспечить скорость и точность определения управляющих воздействий. В работе СППР можно выделить следующие этапы:

1. Сбор информации. При внедрении СППР в кабельный блок необходимо выполнить построение математической модели процессов теплопереноса в данном объекте. Дальнейшее использование СППР происходит в ситуациях, когда зафиксировано изменение режима потребления электроэнергии. Для оценки безопасности нового нагрузочного режима ЛПР при получении данных о повышении потребления электроэнергии необходимо провести анализ температурного состояния кабельных линий, который установится в результате изменения нагрузки. 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.

2. Формирование вариантов управляющих воздействий. При фиксации вероятного превышения температурного критерия СППР рассчитывает все

возможные варианты снижения нагрузки и соответствующие им значения температуры изоляции кабельных линий, и заполняет ими базу вариантов. При расчете вариантов учитывается категория потребителей.

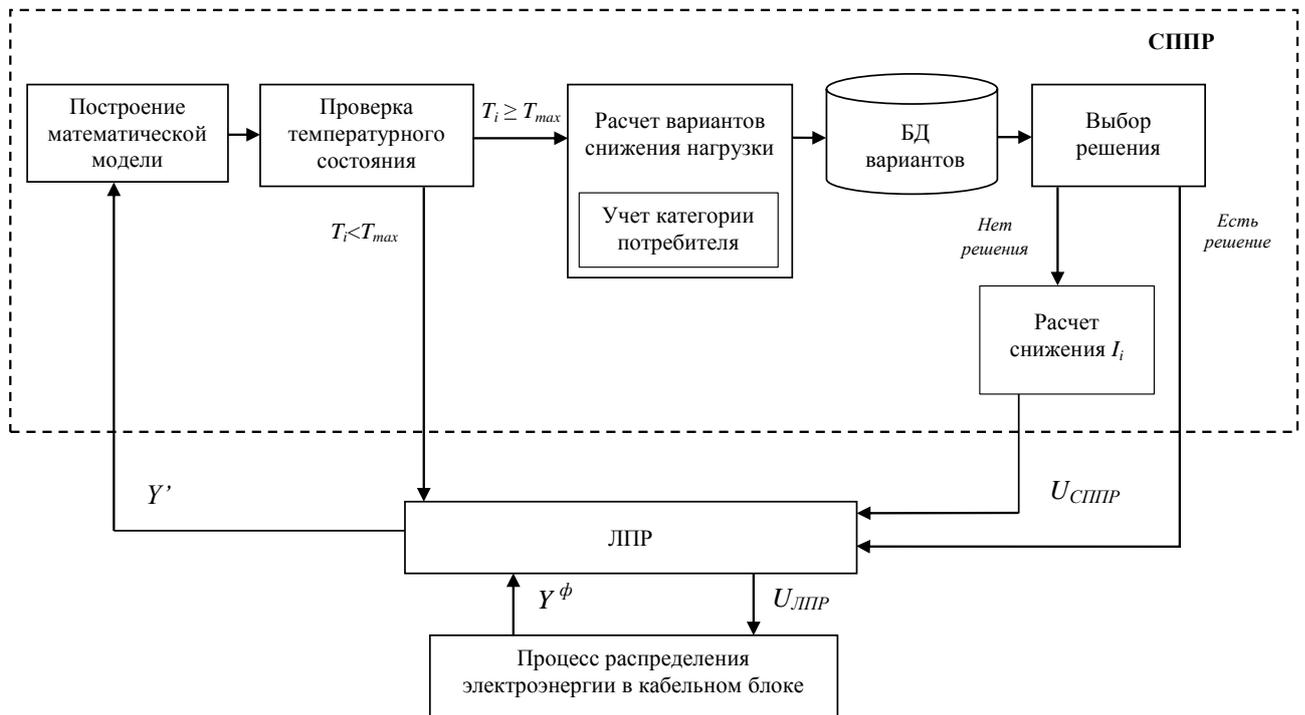


Рисунок 2 – Концептуальная модель системы поддержки принятия решений

При определении уровня снижения нагрузки СППР учитывает диапазоны возможного изменения потребляемой мощности, согласованные с потребителями.

3. Сравнение вариантов и выбор управляющих воздействий. 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 кабелей $U_{СППР}$. 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 планируемых загрузок, меняющихся со временем, процесс анализа будет уникальным в каждом случае.

Используемая математическая модель учитывает температуру окружающей среды, зависящую от времени года, конструктивные особенности кабельного блока, такие как глубина залегания, диаметр и количество труб и т.д. Варьируя данными параметрами на этапе проектирования нового кабельного блока есть возможность определить оптимальные для прокладываемых линий условия эксплуатации.

Третья глава посвящена разработке математических моделей процессов, протекающих в кабельных сооружениях при передаче электроэнергетики.

Использование математической модели процессов теплопереноса в кабельном блоке обусловлено необходимостью определения термического состояния кабельных линий для реализации задачи управления.

Математическое описание процессов теплопереноса основано на законах сохранения массы, количества движения и энергии. При разработке модели принимались следующие допущения: кабели представляются в виде линейных длинных элементов, что позволяет рассматривать поперечное сечение блока; режим движения воздуха ламинарный; воздушная среда прозрачная, поверхности твердых тел серые; на границах раздела сред условие идеального теплового контакта; градиент температуры в земле на удаленном расстоянии равен нулю; теплофизические свойства элементов конструкции (кроме жилы кабелей) постоянны.

С учетом допущений система уравнений имеет следующий вид:

$$\left\{ \begin{array}{l} \rho_6 \left(\frac{\partial v_x}{\partial t} + v_x \frac{\partial v_x}{\partial x} + v_y \frac{\partial v_x}{\partial y} \right) = -\frac{\partial P}{\partial x} + \mu_6 \left(\frac{\partial^2 v_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v_x}{\partial y^2} \right) \\ \rho_6 \left(\frac{\partial v_y}{\partial t} + v_x \frac{\partial v_y}{\partial x} + v_y \frac{\partial v_y}{\partial y} \right) = \\ = -\frac{\partial P}{\partial y} + \mu_6 \left(\frac{\partial^2 v_y}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v_y}{\partial y^2} \right) + \rho_6 g \beta (T - T_0) \\ \frac{\partial \rho_6}{\partial t} + v_x \frac{\partial \rho_6}{\partial x} + v_y \frac{\partial \rho_6}{\partial y} = -\rho_6 \left(\frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_y}{\partial y} \right) \\ \rho_6 c_6 \left(\frac{\partial T}{\partial t} + v_x \frac{\partial T}{\partial x} + v_y \frac{\partial T}{\partial y} \right) = \lambda_6 \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) \\ \lambda_{тпж} \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) + q_v = c_{тпж} \rho_{тпж} \frac{\partial T}{\partial t} \\ \lambda_i \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) = c_i \rho_i \frac{\partial T}{\partial t}, \end{array} \right. \quad (12)$$

где x, y – декартовы координаты;

v_x, v_y – компоненты вектора скорости воздуха;

t – время; $\rho_6, \mu_6, \lambda_6, c_6$ – 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;

λ_i, c_i, ρ_i – теплопроводность, теплоемкость, плотность твердых тел, кроме ТПЖ;

$\lambda_{тпж}, c_{тпж}, \rho_{тпж}$ – теплопроводность, теплоемкость, плотность токопроводящей жилы; q_v – мощность внутреннего источника тепла; λ_i, c_i, ρ_i – теплопроводность, теплоемкость, плотность твердых тел, кроме ТПЖ.

Источник внутренних потерь q_v определяется суммой потерь в токопроводящей жиле и металлическом экране с учетом зависимости электрического сопротивления от температуры. Система (12) замыкается

следующими граничными условиями: на границах раздела сред задается условие идеально теплового контакта; на поверхности земли задается условие конвективного теплообмена; на других границах массива земли – адиабатические условия теплообмена; на разнородных поверхностях задается условие не прилипания и не проникновения; на поверхности силового кабеля задается условие радиационного теплообмена. Полученная система уравнений решалась методом конечных элементов в программном комплексе Ansys.

Проверка адекватности предложенной модели проводилась путем сравнения полученных результатов с результатами натуральных экспериментов, проведенных в лаборатории и на реальном кабельном блоке, расхождения не превысили 5,5 %.

Разработанная математическая модель процессов тепломассопереноса в кабельном блоке позволяет рассчитывать температуру элементов кабельных линий для действующих и перспективных нагрузочных режимов, а также получить кривые нагрева для оценки времени разогрева кабелей при изменении нагрузки. С использованием полученной математической модели был проведен ряд численных экспериментов с целью анализа влияния различных условий эксплуатации кабельных линий на величину длительно допустимых токов.

Параметрическая модель температурных и нагрузочных режимов в кабельном блоке

Поиск максимально возможного значения рабочего тока при изменениях нагрузочного режима блока сопряжен с анализом большого количества вариантов загрузки. С целью сокращения временных и ресурсных затрат на основе предложенной математической модели построена параметрическая модель, использующая принцип суперпозиции. Согласно этой модели температуры поверхностей жил кабелей определяются как сумма начальной температуры и приращений температур, обусловленных протекающими по кабелям токами. Система уравнений, которая лежит в основе параметрической модели, для блока с N линиями имеет вид:

$$\begin{cases} T_1 = T_0 + \Delta T_{1-1}(I_1) + \Delta T_{1-2}(I_2) + \dots + \Delta T_{1-N}(I_N) \\ T_2 = T_0 + \Delta T_{2-1}(I_1) + \Delta T_{2-2}(I_2) + \dots + \Delta T_{2-N}(I_N) \\ \dots \\ T_N = T_0 + \Delta T_{N-1}(I_1) + \Delta T_{N-2}(I_2) + \dots + \Delta T_{N-N}(I_N). \end{cases} \quad (13)$$

где T_0 – начальная температура линии, обусловленная температурой окружающей среды; 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 .

В общем виде систему можно представить следующим образом:

$$T_i = T_0 + \sum_{j=1}^N \Delta T_{i-j}(I_j). \quad (14)$$

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. Для возможности определения температуры на всем диапазоне рабочих токов была проведена аппроксимация полученных данных. При разработке пакета прикладных программ на основе описанной модели для всех приращений температур $\Delta T_{i,j}$ выбран один вид полинома 3 степени, описывающего данные численного эксперимента:

$$\Delta T_{i,j} = a + bI_j + cI_j^2 + dI_j^3. \quad (15)$$

При сравнении результатов моделирования с данными натуральных экспериментов показано, что разница в значениях температуры не превышает 8,5 %, что свидетельствует о достаточной для инженерных расчетов точности параметрической модели. При этом данная модель позволяет оперативно определить максимальный уровень нагрева поверхности жилы каждой из линий канала с минимальными затратами времени и счетных ресурсов.

Четвертая глава посвящена разработке метода определения управляющих воздействий при управлении распределением электроэнергии в кабельном блоке в различных условиях эксплуатации.

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

Предложенный метод определения управляющих воздействий заключается в следующем:

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 температуры 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.

Алгоритм определения управляющих воздействий для сохранения допустимого температурного режима кабельного блока в условиях планового увеличения нагрузки

К плановому увеличению нагрузки в функционирующем кабельном блоке можно отнести прокладку новых линий в резервных трубах или увеличение нагрузки на существующих линиях. Для принятия решения ЛПР необходимо провести проверку согласованности существующей и планируемой нагрузки по температурному показателю в зависимости от времени суток. Алгоритм определения управляющих воздействий в данном случае можно представить следующими этапами:

1. Ввод исходных данных, к которым относятся: плановые графики нагрузок действующих и проектируемых потребителей в дневное и ночное время суток.

2. Расчет температурного состояния линий для нового режима в дневное время суток с использованием математической модели процессов тепломассопереноса с учетом времени действия дневных режимов.

3. Проверка наличия точек перегрева изоляции кабельных линий. В случае если увеличение нагрузки приводит к росту температур сверх максимально допустимых, необходимо определить управляющие воздействия, направленные на сохранение работоспособности кабельных линий блока путем установления нагрузочного режима, оптимального для данных условий. Управляющие воздействия заключаются в рекомендации снижения потребляемой мощности некоторыми потребителями на определенное значение и указанный временной промежуток.

4. Определение управляющих воздействий для дневного времени суток. Для выбора оптимального режима нагрузки необходимо выполнить следующие пункты:

а) Заполнить базу вариантов рабочих токов. Варианты формируются путем снижения рабочих токов, например, для потребителей, участвующих в программе управления спросом. Согласно этой программе потребители стараются сместить график максимального потребления электроэнергии на периоды спада общего потребления или уменьшить нагрузки в часы пика;

б) Рассчитать температуры поверхности жил кабелей при всех комбинациях нагрузок для дневного режима. Полученные значения температур формируют базу данных результатов расчета. 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;

в) Провести сортировку результатов расчета по параметру $K(I_i)$. При сортировке для каждой комбинации производится проверка температур поверхностей жил всех линий с максимально возможным значением. 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.

5. Для ночного времени суток также выполняются пункты 2-4.

В результате реализации алгоритма формируется перечень управляющих воздействий для дневного и ночного времен суток, позволяющий при плановом увеличении режима нагрузки сохранить допустимые значения температур линий.

Распределение максимумов потребления электроэнергии среди потребителей по времени суток позволяет использовать кабельные сооружения более рационально, а также сокращать потребность в строительстве новых.

Алгоритм определения 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 аварии на линиях электропередачи. Подобное увеличение потребления электроэнергии требует своевременной оценки нового режима с точки зрения температурного состояния блока и выработки управляющих воздействий. Алгоритм действий содержит следующие этапы:

1. Ввод исходных данных, к которым относятся новые рабочие токи кабельных линий.

2. Расчет температурного режима всех линий, который установится при зафиксированном росте нагрузки.

3. Сравнение температуры изоляции кабельных линий с заданным максимально возможным значением для данного вида изоляции. При выполнении условия ограничение рабочих температур изоляции новый режим принимается как допустимый и выработка управляющих воздействий не требуется.

4. При обнаружении того, что в результате действия нового режима нагрузки температура изоляции каких-либо линий превысит допустимые значения, необходимо определить управляющие воздействия по снижению загрузки линий. С этой целью формируются варианты возможных комбинаций рабочих токов при постепенном снижении их на заданный шаг. При формировании вариантов комбинаций токов учитывается категория потребителей.

5. Расчет температуры изоляции кабельных линий для всех вариантов комбинации рабочих токов. Получившийся массив значений включает в себя всю совокупность уникальных решений состояний кабельного блока, рассчитанных для конкретных токовых нагрузок.

6. Сортировка полученных результатов расчета по параметру $K(I_i)$. При сортировке происходит сравнение получившихся температур изоляции кабелей с допустимыми значениями. Комбинации, для которых условие ограничения температуры не выполняется, отбрасываются и в сортировке не участвуют.

7. 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 более заданного. Данный режим используется до момента восстановления исходного состояния линии (или линий), подвергшихся незапланированному росту нагрузки.

На основании полученных в главе 4 алгоритмов разработана программа для ЭВМ, позволяющая анализировать температурное состояние блока для различных вариантов загрузки и выбирать оптимальный режим.

В пятой главе приведены разработанный программный комплекс, реализующий выбор оптимального режима нагрузки, а также результаты внедрения разработанных моделей и алгоритмов принятия решений при управлении распределением электроэнергии в кабельном блоке, проведенного для ООО «ОКП «ЭЛКА-Кабель».

Внедрение разработанной СППР в автоматизированную систему управления распределением электроэнергии в подземном кабельном блоке имело следующие задачи:

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

В блоке расположены три трехфазные кабельные линии, каждая фаза в отдельной трубе. Дополнительно присутствуют три резервные трубы для возможности прокладки в них дополнительных линий. Текущая нагрузка кабельных линий составляет 480 А.

Для исследуемого блока были получены зависимости максимальной температуры изоляции кабелей от величины рабочего тока. Было определено, что при заданных условиях эксплуатации длительно допустимый ток линий можно увеличить до 540 А. Результаты приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Результаты внедрения СППР

Передаваемая мощность в действующем режиме, МВА	Передаваемая мощность в рекомендованном режиме, МВА	Увеличение передаваемой мощности, МВА	Увеличение передаваемой мощности, %
24,94	28	3,06	12,3

Проведен анализ режимов работы резервных линий. Используя методы определения максимально возможной нагрузки резервных линий, определено, что при постоянной их работе длительно допустимый ток равен $I_{рез} = 190$ А. Результаты приведены в таблице 2.

Также рассмотрен периодический режим работы резервных линий, позволяющий увеличить длительно допустимый ток до величины $I_{рез} = 270$ А при режиме эксплуатации 12/12 часов. Получены рекомендации для дальнейшей эксплуатации резервных линий при постоянной и периодической нагрузке.

Таблица 2 – Результаты внедрения СППР с учетом резервных линий

Передаваемая мощность в действующем режиме с учетом резервных линий, МВА	Передаваемая мощность в рекомендованном режиме с учетом резервных линий, МВА	Увеличение передаваемой мощности, МВА	Увеличение передаваемой мощности, %
28,23	31,3	3,07	10,9

Внедрение СППР в автоматизированную систему управления распределением электроэнергии в кабельном блоке позволило увеличить передаваемую мощность на 12,3 % на действующих линиях и дополнительно на 10,9 % за счет максимальной загрузки резервных линий.

III. ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

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 процессов цифровизации электроэнергетических систем.

IV. СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в ведущих рецензируемых научных изданиях

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

2. 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.

3. 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.

4. **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.

5. **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.

Публикации в журналах, индексируемых в международной базе SCOPUS

6. **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.

7. **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.

8. 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.

Свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ

9. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ. Российская Федерация. Определение теплового состояния кабельного блока (Thermal analysis of the block) / **Кухарчук И.Б.**, Казаков А.В., Труфанова Н.М.; правообладатель Пермский национальный исследовательский политехнический университет – № 2022683236; поступл. 02.12.2022; опубл. 02.12.2022. – 1 с.

10. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ. Российская Федерация. Выбор оптимального режима нагрузки кабельного блока (Optimal load mode) / **Кухарчук И.Б.**, Казаков А.В.; правообладатель Пермский национальный исследовательский политехнический университет – № 2023618673; поступл. 27.04.2023; опубл. 27.04.2023. – 1 с.

Прочие публикации

11. Феофилова, Н.В. Расчет теплового поля кабеля с ПВХ-изоляцией / Н.В. Феофилова, **И.Б. Кухарчук**, Н.М. Труфанова // Автоматизированные системы управления и информационные технологии: Мат. всерос. науч.-техн. конф. В 2-х томах, Пермь, 17 мая 2018 года. Том 2. – Пермь: Пермский национальный исследовательский политехнический университет, 2018. – С. 110-114.

12. **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.

13. 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.
14. 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.
15. 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.
16. **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.
17. **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.