

МИНОБРНАУКИ РОССИИ
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Амурский государственный университет»

На правах рукописи

Варыгина Александра Олеговна

**РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ВЫБОРА ЭКОНОМИЧЕСКИ ОБОСНОВАННЫХ
СЕЧЕНИЙ ДЛЯ ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ В АКТИВНО-АДАПТИВНЫХ СЕТЯХ**

Направление подготовки 13.06.01 Электро- и теплотехника
Направленность (профиль) подготовки Электрические станции и электроэнергетические
системы

Научный доклад об основных результатах подготовленной научно-квалификационной
работы (диссертации)

Благовещенск, 2020

Работа выполнена на кафедре энергетики федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Амурский государственный университет».

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор Савина Наталья Викторовна

Рецензент: кандидат технических наук, профессор кафедры энергетики ФГБОУ ВО «АмГУ» Мясоедов Юрий Викторович

Рецензент: кандидат технических наук, доцент кафедры энергетики ФГБОУ ВО «АмГУ» Казакул Алексей Александрович

К защите допускаю:

Научный руководитель


_____ Савина Н.В.

Заведующий выпускающей кафедры


_____ Савина Н.В.

Заведующий отделом докторантуры
и аспирантуры


_____ Сизова Е.С.

Актуальность темы исследования.

В соответствии с Энергетической стратегией на период до 2035 года, утвержденной распоряжением Правительства Российской Федерации от 09.06.2020 № 1523-р, в качестве цели развития отмечена интеллектуализация электроэнергетики. Этот факт способствует переходу отрасли на новую технологическую платформу – интеллектуальную энергосистему с активно-адаптивной сетью (ИЭС ААС).

Анализ особенностей функционирования систем передачи и распределения электрической энергии при переходе на новую технологическую платформу показал, что элементы электрической сети претерпевают изменения и она сама наделяется новыми функциональными свойствами. В настоящее время получают широкое распространение провода нового поколения (ПНП), превосходящие по своим характеристикам традиционные.

Важнейшим параметром линии электропередачи (ЛЭП), определяющим ее основные технико-экономические показатели, является сечение провода. Проблема выбора экономически обоснованных (оптимальных) сечений проводников связана с обеспечением требуемого уровня надежности ЛЭП, определением наиболее эффективного способа вложения денежных средств и необходимостью снижения издержек на транспорт электроэнергии.

Традиционно для решения этой задачи, начиная со второй половины XX века, используются методы, в основу которых заложен минимум приведенных народнохозяйственных затрат. Нормируемым обобщенным показателем, используемым на практике уже несколько десятилетий, является экономическая плотность тока. Но в условиях рыночной экономики методические подходы и показатели, использующие устаревший экономический инструментарий, имеют высокий риск получения некорректного результата, что недопустимо.

Современные требования и методики к технико-экономическому обоснованию проектных решений повышают значимость проблемы определения экономически целесообразного сечения провода ЛЭП. Неоптимальный выбор марки провода и его сечения могут привести к неоправданным затратам на сооружение и реконструкцию ЛЭП, повышению себестоимости передачи электроэнергии, поэтому необходима разработка нового методического подхода к выбору сечений проводов, отвечающей вызовам времени и позволяющей достичь значительной экономии затрат.

Однако, методические подходы выбора сечений и методы принятия технических решений в отрасли, появившиеся ещё в советское время и основанные на статичных исходных данных и параметрах, по своей сути не предназначены для учета новых функциональных свойств, а другого подхода для выбора экономически целесообразного сечения для ПНП предложено не было. Таким образом, устаревшие методические подходы выбора сечений не целесообразно использовать ни в случае активно-адаптивной сети, ни в случае

традиционной электрической сети с новыми элементами. В связи с этим тема научно-квалификационной работы актуальна.

Степень разработанности. Исследования по вопросам перевода электроэнергетической системы на новую технологическую платформу приведены в работах Д. Миллера, И.О. Волковой, Н.И. Воропая, Б.Б. Кобец и других.

Большой вклад в исследования методов выбора сечений, начиная с основополагающей работы Дж. Дж. Томсона, внесли зарубежные и отечественные учёные Г.Н. Александров, Ю.Н. Астахов, В.М. Блок, И.А. Будзко, В.А. Веников, А.А. Глазунова, П.Г. Грудинский, С.Н. Ефентьев, Л.М. Зельцбург, Э. Н. Зуев, И.Н. Ковалев, С.А. Кукель-Краевский, Д. С. Лившиц, К.Г. Марквардт, А.С. Мартьянов, Р. Пелисье, Е. Н. Приклонский, Н.Н. Тиходеев, М.С. Левин, И.Б. Пешков, А.А. Федоров, Н.Н. Кожевников, А.В. Ляхомской, М.А. Осипов, В.С. Степанов, Т.Б. Степанова, В.П. Фрайштетер и другие.

Исследованиями в области тепловых расчетов традиционных проводов и определением допустимого длительного тока занимались ученые В.В. Бургсдорф, Д. Дуглас, А.С. Засыпкин, Р.Е. Кеннон, Т.Е. Петрова, Е.И. Сацук, Е.П. Фигурнов, Б.С. Ховингтон и другие.

Для ПНП исследования ни в части методов выбора оптимальных сечений, ни в части тепловых расчетов не проводились.

Объект исследования – провода воздушных линий электропередачи.

Предмет исследования – методы выбора сечений проводов линий электропередачи.

Цель диссертации: разработка методических подходов и методов выбора экономически целесообразных сечений проводов линий электропередачи всех классов номинального напряжения свыше 1 кВ для электрических сетей, адаптированных под новую технологическую платформу.

Основные задачи исследования:

1. исследование функциональных свойств активно-адаптивной сети и современного состояния электрических сетей напряжением свыше 1 кВ;
2. разработка тепловой модели проводов нового поколения и усовершенствование тепловой модели традиционных проводов;
3. формирование технико-экономической модели для выбора сечений проводников;
4. формирование методического подхода к выбору марки провода нового поколения;
5. разработка методов выбора и проверки сечений проводов для ВЛ нового поколения напряжением свыше 1 кВ и адаптация их к традиционным ВЛ.

Научная новизна исследования:

1. Доказана неправомерность и нецелесообразность использования существующих нормативов и методов выбора сечений проводников в

современных экономических условиях и реализации постепенного перехода электроэнергетики на новую технологическую платформу.

2. Впервые предложена модель определения токовой нагрузки провода нового поколения, основанная на его тепловом балансе, и усовершенствована модель теплового расчета для традиционного провода.

3. Предложена технико-экономическая модель провода любой конструкции как для активно-адаптивных электрических сетей, так и традиционных, с учетом случайного процесса протекания тока по проводу.

4. Предложен методический подход к выбору марки провода нового поколения на основе метода анализа иерархий, который позволяет количественно оценить веса критериев отбора и степень соответствия марки провода поставленным целям.

5. Разработан метод выбора и проверки оптимальных сечений проводов нового поколения, учитывающий особенности функционирования активно-адаптивных сетей, современные экономические условия и тепловые процессы, протекающие в проводе.

Теоретическая и практическая значимость.

- разработанная математическая модель определения и исследования токовой нагрузки проводов нового поколения, основанная на тепловом балансе провода, позволяет решать широкий круг практических и проектных задач, связанных с обеспечением требуемого уровня надежности электросетевого комплекса;

- разработанные методы выбора оптимальных марок и сечений проводов нового поколения, основанные на комплексном подходе учета физических процессов протекания тока и современных экономических условиях, позволяют достоверно определять оптимальное сечение проводов воздушных линий электропередачи и, тем самым, получить новый инструментарий выбора экономически обоснованных сечений ЛЭП напряжением свыше 1 кВ в проектной практике и эксплуатации. Эти методы адаптированы к традиционным проводам ЛЭП.

Методология и методы исследования.

При выполнении исследований в научно-квалификационной работе использовались: системный подход, теория принятия решений, современные методы технико-экономического обоснования проектных решений и оценки эффективности инвестиционных проектов. Для реализации, исследования и анализа полученных результатов использовались системы компьютерной математики.

Положения, выносимые на защиту.

- тепловая модель проводов различного конструктивного исполнения, в том числе проводов нового поколения;

- технико-экономическая модель провода, разработанная для традиционных и активно-адаптивных электрических сетей;

- методический подход к выбору марки провода нового поколения;

- метод выбора и проверки экономически обоснованных сечений проводов ЛЭП различного конструктивного исполнения.

Степень достоверности и апробация результатов.

Достоверность полученных результатов, сделанных выводов и рекомендаций подтверждается корректностью выбора математического аппарата, верификационными расчетами и сопоставлением проведенных расчетов с контрольными результатами и данными.

Апробация результатов выполнена в качестве выступлений на 4 конференциях регионального, всероссийского и международного уровня:

1. XIV научно-практическая конференция «Молодежь XXI века: шаг в будущее» на базе ФГБОУ ВО «Благовещенский государственный педагогический университет» г. Благовещенск, 2013 г.;

2. X Международная научно-практической конференция "Современные технологии: актуальные вопросы, достижения инновации" на базе МЦНС «Наука и Просвещение», г. Пенза, 27 октября 2017 г.;

3. Международная мультидисциплинарная конференция по промышленному инжинирингу и современным технологиям «FarEastCon 2018» на базе ДВФУ, г. Владивосток, 02-04 октября 2018 г.;

4. IX Международная научно-техническая конференция «ЭНЕРГЕТИКА: УПРАВЛЕНИЕ, КАЧЕСТВО И ЭФФЕКТИВНОСТЬ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ЭНЕРГОРЕСУРСОВ» на базе ФГБОУ ВО «АмГУ», г. Благовещенск, 11-12 марта 2019 г.

По теме научно-квалификационной работы опубликовано 7 статей. Ещё одна статья принята к публикации.

1 СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ПРОБЛЕМЫ ВЫБОРА СЕЧЕНИЯ ПРОВОДОВ ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ

В первой главе исследовано современное состояние развития электрических сетей напряжением выше 1 кВ, особенности функционирования систем передачи и распределения электрической энергии при переходе на инновационную платформу и обоснована необходимость разработки нового метода выбора экономически целесообразного сечения проводов линий электропередачи.

Анализ современного состояния проблемы выбора сечения проводов ЛЭП выполнен в соответствии со схемой, представленной на рисунке 1.



Рисунок 1 – Составляющие анализа рассматриваемой проблемы

В соответствии с [1] одной из основных отраслевых задач электроэнергетики является модернизация и развитие ЕЭС в сочетании с интеллектуализацией систем. Переход на инновационную платформу развития, а также постоянный рост энергопотребления потребуют от ЛЭП большей гибкости и увеличения пропускной способности. Наблюдается постепенный переход электроэнергетики России на инновационную технологическую платформу ИЭС ААС, в которой одной из наиболее важных подсистем определены активно-адаптивные сети [2-4]. Анализ инновационного развития электрических сетей напряжением выше 1 кВ показал, что появились новые принципы формирования и функционирования систем передачи и распределения электроэнергии, требующие изучения [30]. В то же время, связь между новыми функциональными свойствами активно-адаптивной сети и выбором сечений проводов ранее не рассматривалась.

В таблице 1 представлена классификация функциональных свойств электрической сети. Часть этих свойств будет носить системный характер, а специфические - будут иметь место только для конкретного класса номинального напряжения. В ней выделены четыре группы, которые определены тенденциями современных принципов построения электрических сетей. Примером таких тенденций может служить перевод сети на более высокий класс напряжения. Также учтены особенности ЛЭП СВН.

Таблица 1 – Функциональные свойства

Класс ном. напряжения, кВ	Новые функциональные свойства	
	Системные	Специфические
до 20	- адаптивность; -повышение управляемости режимов работы;	-клиентоориентированный подход; -неопределенность электропотребления.

	- способность к саморегулированию и самовосстановлению;	- включение распределенной генерации и накопителей электроэнергии;
35-150	- живучесть; - изменение конструктивного исполнения; - внутренняя самоустойчивость; - интеллектуализация;	- включение источников локальной генерации и накопителей электроэнергии; - обеспечение параллельной работы;
220	- применение новых технологий транспорта электроэнергии.	- управление межсистемными перетоками; - адаптивное управление потоками активной и реактивной мощности;
330-1150		- управление межсистемными перетоками; - повышенная пропускная способность связей;

Перечисленные функциональные свойства обусловлены изменением параметров активно-адаптивной электрической сети по сравнению с традиционной. В таблице 2 приведены ожидаемые изменения параметров сети при переходе на ИЭС ААС.

Таблица 2 – Изменение параметров сети

Активно-адаптивная электрическая сеть		
№	Параметр	Характеристика
1	топология	сложнозамкнутая
2	структура	максимальный коэффициент связности
4	количество цепей ЛЭП	многоцепность
5	сопротивление ЛЭП	изменение значения при включении активных элементов
6	конструктивное исполнение проводов	большое количество конструкций
7	конструктивное исполнение опор	большое количество конструкций
8	потери электроэнергии в электрической сети	минимальны
9	режим работы электрической сети	изменение путем автоматической реконфигурацией электрической сети для получения оптимальных параметров режима

Основными особенностями активно-адаптивной электрической сети станут её резервированная структура и гибкость. Устаревшая техническая и технологическая база в ряде случаев делают невозможным обеспечение соответствия сети современным требованиям и условиям в отрасли.

Повышенная степень износа и большая протяженность сетей, высокий уровень потерь электроэнергии в электрических сетях, необходимость увеличения пропускной способности ВЛ и усиления межсистемных связей на основе прогноза роста нагрузок и потребления электроэнергии, рост экономических и экологических требований к вновь сооружаемым и реконструируемым объектам - лишь часть проблем электросетевого комплекса, требующих внимания. Традиционные технические способы и

подходы не всегда в полной мере могут обеспечить решение существующих проблем, не говоря уже об осуществлении перехода на инновационную платформу развития. Например, общепринятое решение проблемы гололедно-ветровых воздействий на ЛЭП -плавка гололедных отложений - при переходе на новую технологическую платформу ИЭС АСС заменится использованием ПНП вместо традиционных. Это позволяет снизить расход электроэнергии на собственные нужды электросетевой компании и увеличить рабочий ресурс провода [5].

«Провода нового поколения» (ПНП) – представляют собой группы современных проводников, обладающие повышенными механическими и электрическими свойствами и характеристиками по сравнению с традиционными. ПНП на сегодняшний день нашли своё применение уже во многих проектах. Их конкурентоспособность легко подтверждается анализом возможных путей повышения пропускной способности. Например, для ВЛ 220 кВ, с учетом технического ограничения по нагреву длительно допустимым током, удаётся достичь повышения пропускной способности на величину равную: при сближении фаз 4 - 6 %; при увеличении сечения провода с 240 до 400 мм² 3,4 % - 4 %; при расщеплении фазы на два провода 26 % - 37 %; в то время как применение ПНП позволяет увеличить пропускную способности ВЛ в несколько раз – от 2 до 4 раз. Но подходов и методов выбора как марки ПНП, так их сечений на сегодняшний день нет.

За счет существенных конструктивных изменений линий электропередачи и их элементов существенно расширился их перечень и техническое исполнение. Анализ показал, что увеличение разнообразия конструкций проводов, опор, изолирующей подвески, а также использование новых материалов повлияли на такие параметры ВЛ как: механическая прочность, показатели грозоупорности, стоимостные характеристики, тип и размер опор, пропускная способность, стрела провеса, габарит ВЛ, сечение провода, отвод земли, длина пролета, импульсная прочность линейной изоляции. При этом, ключевым фактором является сечение проводника, так как оно явно или неявно оказывает влияние на все основные параметры линии, следовательно, влияя на всю ЛЭП в целом.

В итоге, использование принципиально новых технических решений в электрической сети, её компоновке средствами управления и применения нетрадиционных способов регулирования параметров режимов позволяют получить «ВЛ нового поколения». Однако высокая стоимость инноваций в электросетевом комплексе заставляет с осторожностью относиться к их применению. Это заставляет задуматься о целесообразности использования методических подходов и методов принятия технических решений в отрасли, появившихся ещё в советское время. Особенно это касается именно сечения проводников, так как оно определяет условия экономического функционирования ЛЭП.

Критический анализ существующих методов выбора сечений проводов позволил их разделить на четыре группы, представленные на рисунке 2.



Рисунок 2 – Классификация методов выбора сечений проводников

Представителями первой группы являются такие методы как: метод экономической плотности тока (ЭПТ), метод экономических токовых интервалов (ЭТИ) [6], методика определения экономических интервалов мощности (ЭИМ). Вторая группа методов базируется на величине допустимого длительного тока при выборе сечения проводника. Третья группа включает методы с использованием величины допустимой потери напряжения. Четвертая группа, устаревшая и показавшая свою несостоятельность, включает в себя методы, основанные на материальных показателях таких как: коэффициент дефицитности металла, «энергетическая» плотность тока [7]. В виду несостоятельности четвертая группа методов далее не рассматривается.

Наиболее значимыми и общепринятыми методами являются метод ЭПТ и ЭТИ, но их анализ показал наличие множества недостатков, а в некоторых случаях - невозможность использования. Более того, эти методы могут дать различные результаты. Применение устаревших методов может привести к ошибке проектировщиков, к тому же, зачастую, к реализации выбирается «привычный» вариант, «проверенный временем». В таблице 3 приведены основные недостатки методов выбора сечений проводов, основанных на критерии минимума приведенных народнохозяйственных затрат.

Таблица 3 – Недостатки существующих методов выбора сечений

№	Недостаток	Методы
1	устаревший экономический инструмент расчета	ЭПТ, ЭТИ, ЭИМ
2	отсутствие значения коэффициента мощности в ряде случаев	ЭИМ
3	получение неоднозначного результата	ЭПТ
4	линейная зависимость капитальных вложений в ВЛ от ее длины	ЭПТ
5	не учитываются изменения экономических характеристик и стоимости потерь во времени	ЭПТ, ЭТИ, ЭИМ
6	завышение величины потерь электроэнергии при расчете	ЭПТ, ЭТИ, ЭИМ
7	не предусмотрен учет конструктивных изменений ЛЭП	ЭПТ, ЭТИ, ЭИМ
8	не учтено влияние изменения передаваемой мощности с момента ввода ЛЭП в эксплуатацию до того момента, когда нагрузка достигнет расчетного значения	ЭПТ
9	зависимость стоимости ЛЭП от сечения проводов принимается одинаковой для линий всех классов номинальных напряжений и опор любой конструкции	ЭПТ

10	невозможность применения для индивидуального проектирования	ЭПТ, ЭТИ, ЭИМ
11	не учитываются климатогеографические особенности объекта проектирования	ЭПТ
12	большое количество проверок выбранного сечения	ЭПТ

Важно отметить, что для всех указанных методов характерно отсутствие учета стохастического характера изменения нагрузок. Наибольшее количество недостатков отмечено для метода ЭПТ, который закреплен в основных отраслевых нормативных документах [8-9]. Соответственно и учебная литература [10] рекомендует для выбора сечения проводов ВЛ напряжением 500 кВ и ниже использовать метод ЭПТ, а для ВЛ напряжением выше 500 кВ – осуществлять выбор на основании расчетов, вот только нет уточнения об алгоритме этих расчетов.

В настоящее время для традиционных проводов проблема выбора сечения обостряется в связи изменением рыночных условий, повышением требований к технико-экономическим характеристикам линий, необходимости снижения издержек компаний. Также следует отметить, что наблюдается тенденция изменения значений ЭПТ в сторону снижения [11]. Установлено, что даже пересчет ЭПТ не позволит решить проблему выбора сечения традиционных проводов [11-12]. В итоге, выбор сечения провода классической конструкции может оказаться не корректным. Для ПНП эти методы и вовсе не предназначены.

Нормативно-правовое обеспечение не гармонизировано с происходящими изменениями в отрасли и значительно от них отстаёт, а в некоторых случаях устарело. Как следствие, компании вынуждены выпускать множество стандартов организаций для того, чтобы дать эксплуатационному персоналу и проектировщикам соответствующий инструментарий и базу в решении поставленных задач. В качестве примера можно отметить документы ПАО «ФСК ЕЭС» [13-16]. Исходя из названий и года выпуска стандартов наглядно прослеживается тенденция попытки гармонизировать отраслевые технологические изменения с предъявляемыми требованиями и выдаваемыми рекомендациями. Следует выделить, что модернизация сетевого комплекса - это многофакторный и сложный процесс, который должен базироваться на согласованном и комплексном применении инновационных технологий наряду с традиционными решениями. Именно такой подход, учитывающий реальные технико-экономические, экологические, режимные и климатические условия позволит обеспечить максимальные технические и экономические эффекты.

Таким образом, анализ современного состояния по выделенной проблеме показал, что невозможно корректно осуществить выбор сечения, основываясь на существующем нормативно-правовом обеспечении. Доказана необходимость разработки нового метода выбора оптимального сечения с учетом перехода на инновационную платформу развития ИЭС ААС и адаптации его к традиционному исполнению электрической сети.

2 РАЗРАБОТКА ТЕПЛОЙ МОДЕЛИ ПРОВОДА НОВОГО ПОКОЛЕНИЯ И УСОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕПЛОЙ МОДЕЛИ ТРАДИЦИОННОГО ПРОВОДА

Во второй главе исследован тепловой баланс проводов традиционной конструкции воздушных линий электропередачи, разработана обобщенная тепловая модель проводника и реализована её адаптация для определения длительно-допустимого тока проводников нового поколения.

Решающим фактором для выбора сечения провода любой конструкции является величина допустимого длительного тока. Применение любого существующего метода и подхода выбора или проверки сечения провода в итоге предусматривает явную или неявную проверку по условию нагрева провода допустимым длительным током в условиях проектирования и эксплуатации. Допустимый длительный ток характеризует тепловой перенос электрической энергии, следовательно, необходимо проанализировать существующие модели его определения для традиционных проводов и получить модель для ПНП. Корректная оценка допустимых нагрузок ЛЭП имеет важное практическое значение, так как непосредственно влияет на надежность работы электрической сети. Некорректный расчет может привести как к неполному использованию линий электропередачи и избыточным управляющим воздействиям устройств противоаварийной автоматики, так и перегрузке линии при эксплуатации.

Определение допустимой токовой загрузки ЛЭП осуществляется тепловым расчетом. Для наглядного представления в таблице 4 представлена характеристика основных существующих подходов теплового расчета.

Таблица 4 – Методические подходы теплового расчета провода

Методический подход	Концепция	Основные особенности
в соответствии с руководством [17]	расчет основан на уравнении теплового баланса провода	Для расчёта теплообмена конвекцией используются различные эмпирические выражения и критерии: Nu - критерий Нуссельта; Re - критерий Рейнольдса для учета вынужденной конвекции; Gr - критерий Грасгофа для учета свободной конвекции; Pr - критерий Прандтля для учета молекулярных свойств охлаждающей среды.
в соответствии со стандартом [18]		Специфика и формулы расчета сопротивления провода упрощают его и подходят для грубых расчетов тепловых характеристик для температур проводника до 175 °С. Такой подход может использоваться для приблизительных расчетов вплоть до точки плавления типичных проводниковых материалов. В итоге, данный подход не является универсальным. Для теплового расчета большого количества проводников потребуются дополнительная инженерная оценка.

в соответствии с [19-21] метод конечных элементов	рассчитывается стационарное распределение температур и тепловых потоков в твердом двумерном объекте по уравнению теплопроводности	В силу сложности и объемности расчетов, как правило, реализуется с помощью различного программного обеспечения.
---	---	---

Анализ литературных источников показал, что все перечисленные подходы имеют большую практическую значимость и позволяют решать широкий спектр задач. Особенности реализации расчетов в подходах обуславливают их сильные и слабые стороны. Основанные на общей концепции, первый и второй методические подходы, несмотря на наличие общих черт, всё же разительно отличаются при непосредственной реализации расчетов составляющих параметров. Применение того или иного подхода на сегодняшний день зависит исключительно от предпочтений инженера, так как области их применения не выделены ни в одном случае. Проведенные исследования показали [31], что вероятность получения различных результатов при применении методов высока. Отклонение результатов между методами может варьироваться до 15 %.

В силу актуальности и большой практической значимости обсуждения как по сравнению существующих методических подходов, так и по их улучшению не утихают [22-24], но для ПНП таких подходов до сих пор не определено. Следовательно, для нахождения допустимого длительного тока необходимо выбрать методический подход, определить оптимальный способ расчета составляющих математической модели и адаптировать её применение к ПНП.

Разработка обобщенной тепловой модели проводника относится к случаю теплового расчета, когда ток находится при максимальной допустимой величине температуры провода. Выявленная универсальность первого методического подхода способствовала представлению уравнения теплового баланса провода при стационарном (установившемся) режиме в виде:

$$P_j + P_M + P_S + P_i = P_c + P_r + P_w \quad (1)$$

где P_j – нагрузочные потери в проводе, Вт;

P_M – магнитные потери, Вт;

P_S – мощность солнечного излучения, поглощаемая проводом, Вт;

P_i – потери мощности на корону, Вт;

P_c – мощность, отдаваемая проводом в воздух за счет конвективного теплообмена, Вт;

P_r – мощность, отдаваемая проводом в воздух за счет излучения, Вт;

P_w - мощность, отдаваемая проводом в воздух за счет испарения, Вт.

Математическая модель тока, при пренебрежении эффектами испарительного охлаждения:

$$I_{oon} = \sqrt{\frac{P_c + P_r - P_s - P_i}{P_j + P_M}} \quad (2)$$

Проведенный анализ всех составляющих общей токовой модели показал, что универсальная математическая модель длительно допустимого тока имеет вид:

$$I_{oon} = \sqrt{\frac{(\alpha_k + \alpha_l) \cdot F \cdot (T_{av} - T_a) - \varepsilon_n \cdot k_H \cdot D \cdot W_p \cdot \sin \psi_c - P_i}{k_M \cdot k_j \cdot R_{20} \cdot (1 + \beta_r \cdot (T_{av} - 20))}} \quad (3)$$

где α_k – коэффициент, характеризующий процесс теплоотдачи при теплообмене конвекцией, $Bm / m^2 \cdot ^\circ C$;

α_l – коэффициент, характеризующий процесс теплоотдачи при лучистом теплообмене, $Вт / (м2 \cdot ^\circ C)$;

F – площадь теплообмена, $м^2$;

T_{av} – температура провода, $^\circ C$;

T_a – температура воздуха, $^\circ C$;

ε_n – коэффициент поглощения провода;

D – диаметра провода, м;

k_H – коэффициент, учитывающий влияние высоты над уровнем моря;

W_p – интенсивность прямой и отраженной радиации (суммарной), Bm / m^2 , рассчитываемая в зависимости от времени года по формулам для воздуха разной степени загрязненности;

ψ_c – активный угол наклона солнечных лучей, который зависит от времени года и суток;

R_{20} – сопротивление постоянному току при температуре $20^\circ C$, Ом;

β_r – температурный коэффициент сопротивления, $1/^\circ C$;

k_j – коэффициент, учитывающий увеличение сопротивления за счет поверхностного эффекта;

k_M – коэффициент учета магнитных потерь для проводов со стальным сердечником.

Подробное описание модели приведено в [31]. По справочным данным длительно допустимый ток провода АС-70/11 равен 265 А. Расчёт по представленной в статье математической модели дал результат в 272 А для данного провода. Разница составила 2,6 %. При этом величина тока по

расчетной модели выше, чем по справочным данным, что в условиях эксплуатации позволит обеспечить больший транспорт электроэнергии.

Преимуществом полученной модели является её универсальность, возможность использования и для нахождения допустимого длительного тока, так и для аварийно-допустимого тока (в зависимости от подставляемой в формулу величины температуры длительно допустимой или аварийно-допустимой соответственно).

Универсальная модель включает в себя множество параметров и уточняющих коэффициентов. В последние годы для проводов традиционной конструкции появилось много разрозненных уточнений параметров тепловой модели, направленных на повышение ее достоверности. Данный факт создаёт определённые трудности перед инженерно-техническим персоналом при решении практических задач. Следовательно, важной частью расчета является грамотное и корректное задание как исходных данных, так и определение всех коэффициентов. Коэффициенты, определение которых основано на эмпирических данных, показаны в таблице 5. Диапазоны возможных и рекомендуемых значений показаны для проводов марки АС.

Таблица 5 – Коэффициенты тепловой модели, определение которых основано на эмпирических данных

№	Учитываемое свойство	Коэффициент	Диапазон значений	Рекомендуемое значение
1	увеличение сопротивления за счет поверхностного эффекта	k_j	расчетная величина	1,0123
2	магнитные потери	k_M	1,01 - 1,15	1,01 - 1,15
3	поглощательная способность	ε_n	0,23 - 0,95	0,5 - 0,9
4	излучательная способность	ε_u	0,11 - 0,8	0,6 - 0,7

Такие параметры как постоянные излучения и поглощения провода можно назвать неопределенными, так как они могут изменяться в широких пределах за время эксплуатации ВЛ. Оценка степени влияния позволила определить наилучшие значения, которые в дальнейшем были взяты для последующих расчетов.

Для оценки степени влияния всех параметров были построены графики зависимостей длительно-допустимого тока как для традиционных, так и для инновационных проводов. Это позволило не только определить значения коэффициентов, но и выбрать наиболее оптимальные модели расчета остальных параметров (например, наиболее полную модель конвективного теплообмена).

Исследование показало, что на результат расчета токовой нагрузки провода наибольшее влияние оказывают климатические факторы. В качестве примера на рисунке 3 показана зависимость величины расчетного тока от скорости ветра на графике 1, а на графике 2 – зависимость от температуры воздуха по данным для провода АС-70/11. Полное количество графиков зависимостей отражено в [30].

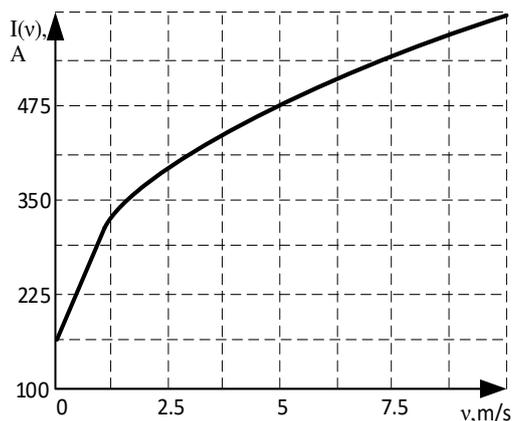


График 1

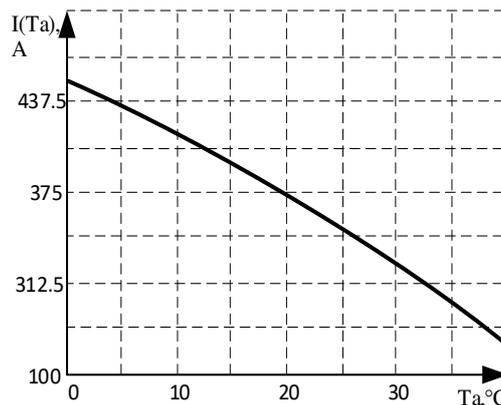


График 2

Рисунок 3 – Влияние климатических факторов на ток провода АС-70/11

На рисунке 4, в качестве примера, показано влияние изменения скорости ветра и влияние изменения температуры воздуха на величину длительно допустимого тока инновационного провода АССС различных сечений на графиках 3 и 4 соответственно.

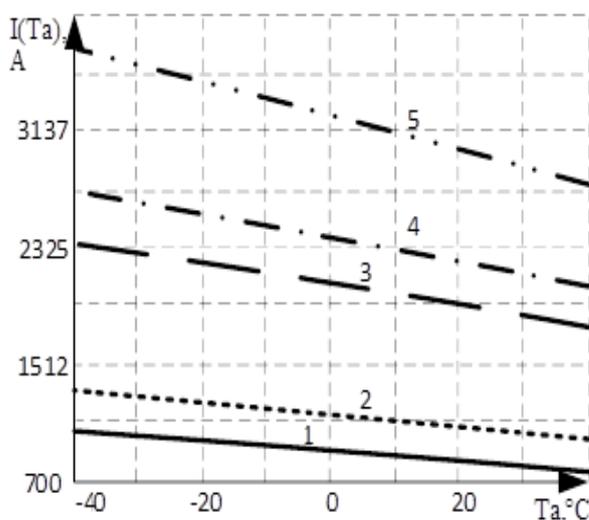


График 3

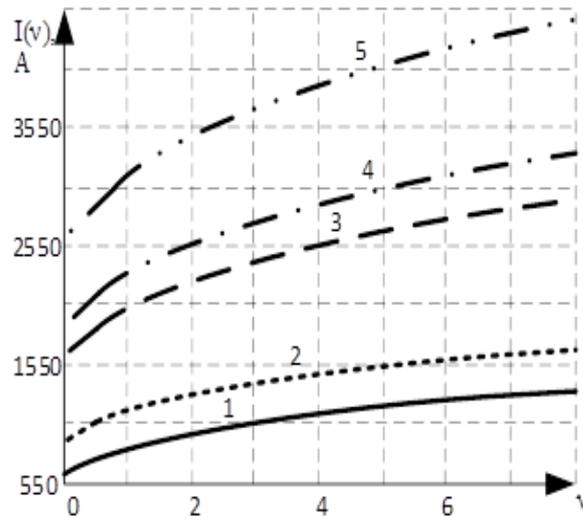


График 4

Рисунок 4 – Влияние климатических факторов на ток проводов марки АССС (1 - Helsinki 160, 2 - Copenhagen 230, 3- Warsaw 530, 4 - Vienna 650, 5 - Madrid 1050)

В соответствии с рисунком 5 наименьшее влияние на результат расчета длительно допустимого тока из климатических факторов оказывает интенсивность солнечного излучения, что позволяет пользоваться упрощёнными способами расчета параметра. С графиками остальных зависимостей по примеру можно ознакомиться в [29].

Резюмируя, на сегодняшний день нет единого утвержденного методического подхода к расчету предельной токовой нагрузки для проводников традиционной конструкции.

Для ПНП методика расчета предельных токовых нагрузок и вовсе отсутствует.

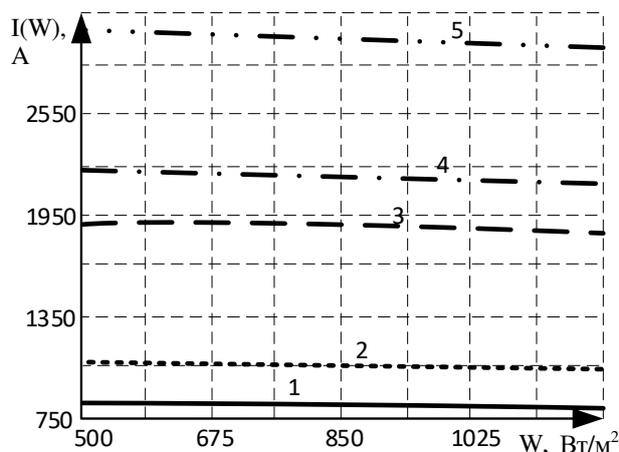


Рисунок 5 – Влияние изменения интенсивности суммарной солнечной радиации на величину длительно допустимого тока проводов марки АССС

Для анализа возможности адаптации модели к расчету ПНП все составляющие её параметры были разделены на четыре группы по влияющим факторам или их сочетанию (конструктивное исполнение, климатические факторы). Такая классификация параметров в соответствии с влияющими факторами позволила осуществить комплексный анализ модели и получить расчетные данные допустимого длительного тока для различных марок проводов. Для проводов традиционной конструкции и ПНП отклонения результатов расчета от данных заводов-изготовителей находятся в пределах + 4 %, что говорит о жизнеспособности представленной модели.

Для получения корректного результата расчета длительно допустимого тока были выполнены вариантные расчеты, позволившие его уточнить и существенно снизить процент отклонения.

Проведенные во второй главе исследования позволили:

1. получить универсальную токовую модель провода, основанную на его тепловом балансе и пригодную для исследования как ПНП, так и проводов традиционной конструкции;
2. уточнить все параметры тепловой модели для расчета допустимого длительного тока провода традиционной конструкции;
3. впервые предложить инструментарий расчета допустимого длительного тока проводов нового поколения.

3 РАЗРАБОТКА ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ПРОВОДА ДЛЯ АКТИВНО-АДАПТИВНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЕЙ

Третья глава посвящена критическому анализу существующих методов технико-экономического обоснования (ТЭО) проектных решений, на основании которого разработана технико-экономическая модель сечения провода для активно-адаптивных электрических сетей, учитывающая тепловую модель провода и случайный характер изменения тока, передаваемого по ЛЭП.

Для обеспечения экономичности функционирования электрических сетей, кроме рассмотренной тепловой модели, обязательен учет экономических критериев при выборе оптимального сечения проводника. Только совместный учет экономических и технических параметров позволит получить не просто принципиально новый метод выбора сечения проводника, отличающийся от всех существующих, но и обеспечить его соответствие современным требованиям в отрасли. Исходя из вышесказанного, предлагаемая технико-экономическая модель провода для выбора сечения показана на рисунке 6.



Рисунок 6 – Общее представление модели

Технико-экономическая модель, которая включает в себя разнообразные признаки, построена с использованием предиката целостности. Модель провода может быть представлена в этом случае выражением:

$$F = \langle \psi_{\text{тех}}, \psi_{\text{эк}}, P(\psi_{\text{тех}}, \psi_{\text{эк}}) \rangle \quad (4)$$

где $\psi_{\text{тех}}$ - подмодель, учитывающая конструктивные особенности провода и условия протекания тока по проводу;

$\psi_{\text{эк}}$ - подмодель, учитывающая современные экономические критерии;

$P(\psi_{\text{тех}}, \psi_{\text{эк}})$ - предикат целостности.

Процесс разработки и исследования модели провода включает следующие этапы:

- выбор единого экономического критерия, который будет применим как к проводам традиционной конструкции, так и ПНП, и будет соответствовать современным экономическим условиям;

- выявление и формулирование математических закономерностей, связывающих основные экономические критерии и технические параметры, характеризующие провод и его сечение;
- детализация технико-экономической модели, с учетом тепловой модели провода и случайного характера изменения тока, передаваемого по ЛЭП;
- исследование применимости модели к проводникам любой конструкции;
- сопоставление результатов исследования полученной модели с результатом опыта для проверки ее соответствия объекту исследования и для доказательства её пригодности.

В качестве универсального экономического критерия приняты дисконтированные затраты на 1 км сооружаемой ВЛ, так как они соответствуют всем экономическим требованиям обеспечения эффективности вложения капитала в тот или иной инвестиционный проект, а их использование позволяет упростить расчет по сравнению с другими критериями. Важно отметить, что выбранный критерий учитывает фактор времени, что в соответствии с [25] является одним из основных принципов оценки эффективности, и концепцию дисконтирования денежных потоков для получения более точной оценки эффективности вложения инвестиций.

Учет или не учет фактора времени делит все методы ТЭО на две группы, как показано на рисунке 7.



Рисунок 7 – Классификация методов ТЭО по учету фактора времени

Используемые в настоящее время методы выбора экономически целесообразного сечения проводов основаны на статическом показателе нахождения минимума функции приведенных затрат, что не соответствует современным экономическим условиям. Более того статические показатели чаще используются для действующих производств, а не для предпроектной или проектной стадий.

Проведенный анализ методов и показателей экономического обоснования показал, что инструментарий на сегодняшний день сильно расширился, но большая часть критериев непосредственно связана с ЧДД (например, ВНД, ИДД), дополняет его (дисконтированный срок окупаемости), а некоторые критерии могут и не применяться в зависимости от конкретных условий (модифицированная внутренняя норма доходности). Однако для решения задачи выбора экономически обоснованного сечения провода целесообразно принять суммарные дисконтированные затраты как частный случай ЧДД.

Каноническая формула дисконтированных затрат инвестиционного периода ВЛ на 1 км имеет вид:

$$Z_{\text{диск}} = \sum_{t=0}^T (K_t + I_t + H_t) \cdot (1 + E)^{-t} \quad (5)$$

где K_t – капитальные затраты в год, руб.;

I_t - эксплуатационные издержки, руб.;

H_t - налоговые платежи в год периода объекта;

E - коэффициент дисконтирования;

t - любой год периода объекта;

T - последний год периода объекта.

В дальнейшем экономический критерий будет называться удельными дисконтированными затратами. После подстановки всех учитываемых в формуле составляющих, формула удельных дисконтированных затрат будет выражена как:

$$Z_{\text{диск}} = \sum_{t=0}^T [K_t \cdot (1 + \alpha_{\text{ам}} + \alpha_{\text{РЭО}}) + c \cdot (3 \cdot I^2 \cdot R \cdot T + 8760 \cdot \Delta P_{\text{кор}} + \frac{U_n^2 \cdot T_{\text{вл.л.}} \cdot N_{\text{сир}}}{3 \cdot N_{\text{из}} \cdot R_{\text{из}}})] \cdot (1 + E)^{-t} \quad (6)$$

где $\alpha_{\text{ам}}$ – норма отчислений на амортизацию, 1/год;

R - удельное сопротивление линии, Ом/км;

$\alpha_{\text{РЭО}}$ - норма отчислений на ремонт и обслуживание, 1/год;

U_n - номинальное напряжение линии, кВ;

c - тариф на электроэнергию, руб./кВт·ч;

$\Delta P_{\text{кор}}$ - удельные потери мощности на корону в проводах ВЛ, кВт/км;

$N_{из}$ - число изоляторов в гирлянде, шт.;

$N_{гир}$ - число гирлянд на 1 км ВЛ, шт./км;

$R_{из}$ - сопротивление одного подвешенного изолятора в гирлянде, Ом;

$T_{вл.п.}$ - среднее число часов влажной погоды в году, ч.

Техническую подмодель представим токовой нагрузкой линии, которая в активно-адаптивной сети в общем виде имеет вид [26]:

$$I(t) = I_{cp}(t) + I_s(t) + \varepsilon(t) \quad (7)$$

где $I_{cp}(t)$ - среднее значение токовой нагрузки (математическое ожидание);

$I_s(t)$ - стационарный эргодический процесс с нулевым математическим ожиданием;

$\varepsilon(t)$ - шум, описывающий нестационарную случайную составляющую процесса.

Значение $I_{cp}(t)$ представляется тепловой моделью провода с учетом свойств графиков электрической нагрузки. Ниже приведена инженерная реализация технической подмодели, основанная на тепловой модели провода с учетом случайного характера изменения тока, передаваемого по линии, в привычном для эксплуатационной практики виде:

$$I_э^2 = I_{cp}^2 \cdot K_\phi^2 = I_{max}^2 \cdot K_{зан}^2 \cdot K_\phi^2 \quad (8)$$

где $I_э$ - эквивалентное (среднеквадратическое) значение тока для стационарного эргодического процесса, А;

$K_\phi = \sqrt{1 + \gamma^2}$ - коэффициент формы, определяемый с помощью коэффициента вариации γ [27];

$K_{зан}$ - коэффициент заполнения графика нагрузок;

I_{max} - максимальное значение тока провода, определяемое по его тепловой модели.

Реализация и исследование модели для выбора экономически обоснованного сечения провода может быть осуществлена в виде указанной на рисунке 8 структурной схемы работы с моделью в любой удобной пользователю системе компьютерной математики, например, MathCad или MATLAB.

Анализ предложенной модели показал её универсальность. При исследовании применимости технико-экономической модели к выбору сечения ПНП выявлено, что подходы к оценке составляющих модели будут отличаться от традиционных. В отличие от общепринятого подхода к расчету капитальных вложений в ЛЭП, включающих в себя стоимость изыскательских работ, подготовки трассы линии, отвода земли, опор, проводов и изоляторов,

в случае с ПНП рекомендуется рассматривать целиком систему опора-провод-трос-арматура-фундамент, учитывая дополнительные расходы, включающие в себя стоимость системы светоограждения, стоимость мероприятий по борьбе с гололедообразованием, транспортные расходы, стоимость СМР, стоимость средств защиты персонала от падения с высоты при подъеме на опору и другие. В работе показано, что не учет этих составляющих может привести к ошибке при выборе сечения провода.

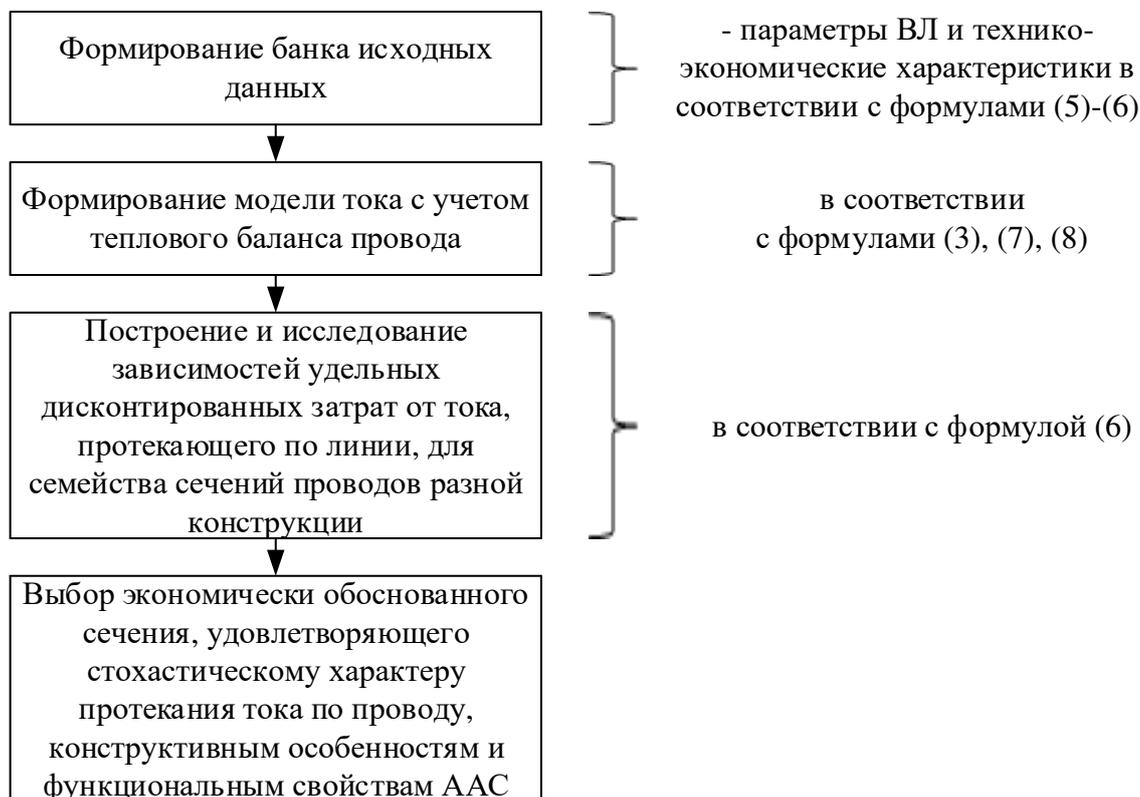


Рисунок 8 – Структурная схема работы с моделью

В результате проведенных исследований по третьей главе установлена и раскрыта взаимосвязь между техническими параметрами провода и современными экономическими критериями, которая позволила разработать методику выбора оптимального сечения провода любой конструкции.

4 РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ ВЫБОРА И ПРОВЕРКИ СЕЧЕНИЙ ПРОВОДОВ ВЛЭП В СОВРЕМЕННЫХ УСЛОВИЯХ И ИХ РЕАЛИЗАЦИЯ

Четвертая глава посвящена формированию методических подходов к выбору марки проводников, разработке методов выбора и проверки сечений на основе тепловой и технико-экономической модели проводников ВЛЭП и анализу системных эффектов от применения предложенных моделей и методов.

Ранее проблема выбора марки провода не была столь острой, так как в большинстве случаев к использованию брался провод АС. На сегодняшний день номенклатура проводов значительно расширилась и перспективе будет только увеличиваться, делая задачу формирования методических подходов к выбору марки проводников особенно актуальной. Примерами марок ПНП являются: ААССР, АСк2у, АССС, АСТ, АСВП, АСВТ, АААС – Z, АСку, СЕНИЛЕК АТЗП/С, ТАССР/АС, ТАССР/НАСIN, ГТАССР (GZТАССР) и другие. И это далеко не полный перечень проводниковой продукции.

С учетом высокой стоимости сооружения электроэнергетических объектов, большой разницы в цене между различными марками проводов, их различным улучшенным характеристикам, задача оптимального выбора марки провода стала первоначальной и важной при новом строительстве или реконструкции ЛЭП. Если параметры проектируемой ЛЭП изначально будут выбраны нерационально, то последующая разработка проекта и эксплуатация объекта не будут максимально эффективными, что повлечет дополнительные затраты. Отсюда следует исключительная важность грамотного выбора марки провода.

Процесс выбора марки провода представляет собой последовательную реализацию трёх шагов: 1. формирование группы рассматриваемых марок путём проверки их по условиям сопоставимости, 2. непосредственная реализация методического подхода по выбору марки провода; 3. обработка результатов.

На первом этапе все возможные (альтернативные) варианты оцениваются по следующим условиям сопоставимости:

1 - их применение должно быть допустимо по условиям эксплуатации в соответствии с климатогеографическим расположением ЛЭП;

2 - их применение соответствует назначению и использование возможно на требуемом классе номинального напряжения.

Имея сформированную группу марок проводов, переходят к непосредственной реализации методического подхода по выбору оптимальной.

Сравнение и выбор варианта или даже нескольких среди альтернативных (взаимоисключающих) предлагается реализовывать с помощью системного подхода, в частности используя метод анализа иерархий. Данный метод нашел не просто широкое применение во многих отраслях, но и положительно себя зарекомендовал для решения абсолютно разных задач, что говорит об его удобстве и универсальности. Использование

данного метода предполагает систематизацию данных по определённым критериям. Каждый критерий характеризует параметр или характеристику (в нашем случае марки провода), от которых зависит достижение объектом основной цели, определяемой его назначением и сопутствующих. Метод анализа иерархий направлен на поиск варианта, который наилучшим образом позволяет решить проблему с выполнением соответствующих требований и условий. Классическое построение иерархии по методу в общем виде показано на рисунке 9.

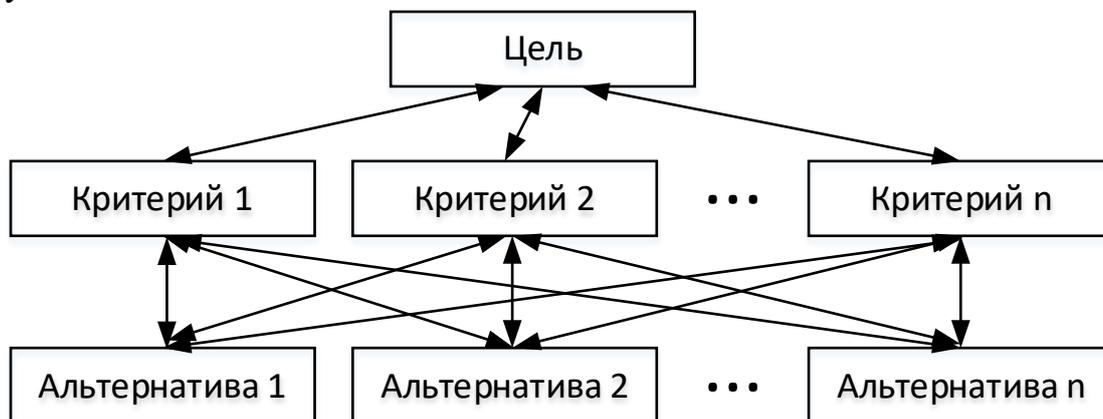


Рисунок 9 – Построение иерархии

Этапы метода для выбора марки провода будут следующими:

1. Определение цели из выделенной проблемы. Подготовка исходной информации о ЛЭП.

2. Установление основных критериев.

3. Формирование альтернативных (взаимоисключающих) вариантов марок проводов, отвечающих условиям сопоставимости.

4. Построение иерархии от поставленной цели через критерии к альтернативным вариантам марок провода.

5. Формирование матрицы попарных сравнений критериев и альтернативных вариантов марок провода по критериям.

6. Анализ полученных матриц (включает в себя нахождение суммы элементов каждого столбца, осуществление нормировки матрицы, расчет среднего значения для каждой строки – веса критериев).

7. Расчет весов альтернативных вариантов по системе иерархии.

Сравнение критериев и вариантов осуществляется попарно по качественной шкале с присвоением баллов: одинаковая характеристика по критерию = 1; данная марка провода немного лучше (хуже) следующей марки по критерию = 3 (1/3); лучше по критерию = 5 или хуже = 1/5; характеристика данной марки провода значительно лучше (хуже) = 7 (1/7); принципиально лучше (хуже) = 9 (1/9). При наличии промежуточного мнения соответственно используются промежуточные баллы 2 (1/2), 4 (1/4), 6 (1/6), 8 (1/8).

Конечно, большое количество факторов и альтернативных вариантов увеличивают работу и занимает большее количество времени, но используя логику транзитивности при заполнении матриц есть возможность ускорить их

заполнение в два раза (т.е. если характеристика данной марки провода по критерию лучше характеристики другой марки провода, то марка второго провода хуже первой марки провода по этой же характеристике – выставляются баллы 5 и 1/5 соответственно). Использование же любого табличного редактора позволяет сделать процесс выбора оптимального варианта ещё быстрее. Для упрощения при равно значимых критериях вполне можно воспользоваться множеством Парето. Затем реализуется алгоритм, но уже с меньшим количеством марок.

Проведенные исследования по ситуационному применению метода анализа иерархий для выбора марки провода показали, что удаётся получать удобные к восприятию результаты. В качестве примера рассмотрим ситуацию, когда цель - это увеличения пропускной способности ВЛ 110 кВ в 2 раза с использованием существующих опор. Выделенная проблема – невозможность реализации проекта при увеличении сечения провода АС. Исходные данные: регион – Московская область, провод АС 240/32, протяженность линии 13,1 км. Основные критерии: критерий 1 - длительно-допустимый ток; критерий 2 - масса провода (контролирующий критерий); критерий 3 - стоимость. В качестве альтернативных вариантов определены марки: АСВТ, СЕНИЛЕК АТЗ/С, СЕНИЛЕК АТЗП/С, АССС, АССР, GTACSR (GZTACSR), АСВП. Результат применения метода, выраженный в долевым и процентном соответствии установленным критериям, представлен в таблице 6. Выбрана марка провода АССР.

Таблица 6 – Пример реализации метода анализа иерархий

Марка	АСВТ	СЕНИЛЕК АТЗ	СЕНИЛЕК АТЗП	АССС	АССР	GZTACSR
Итоговый результат в долях	0,065	0,165	0,112	0,132	0,303	0,224
Итоговый результат в %	6,5	16,5	11,2	13,2	30,3	22,4

Подтверждением корректности результата является реализованный проект реконструкции ВЛ 110 кВ Очаково–Одинцово, где использован провод марки АССР 477-Т16 Hawk сечением 238 мм² с учетом ТЭО. Полученные эффекты по реализации: увеличение пропускной способности на 98 %, отсутствие необходимости замены опор, обеспечение безопасного габарита до земли, отсутствие необходимости проведения дорогостоящих и масштабных строительных работ.

После того, как реализован выбор марки провода, выбирается непосредственно его сечение.

Проведенный анализ существующих методик и подходов к выбору и проверке сечений проводников показал, что постоянно изменяющиеся экономические условия, стоимость оборудования, стоимость потерь электроэнергии, а также технологическое и техническое развитие науки и отрасли делают невозможным разработку метода на долгосрочную

перспективу, опирающегося на фиксированные нормированные значения какого-либо показателя. Таким образом, важно получение гибкого инструментария для решения поставленной задачи, способного отвечать текущих и будущим изменениям.

Предложенная технико-экономическая модель позволяет определять значение тока, при котором целесообразно осуществить переход от одного сечения провода к другому. Построение семейства зависимостей для ряда сечений по сути позволяет получить серию параболических кривых, где точками пересечения являются границы диапазонов целесообразного применения конкретного сечения, удовлетворяющего современным экономическим требованиям, условиям функционирования ААС и соответствующего тепловой модели провода. Исследование представленных ранее формул показало, что условиями наличия пересечения зависимостей являются:

$$K_{ЛЭП(i+1)} > K_{ЛЭП(i)} \text{ и } r_{ЛЭП(i+1)} < r_{ЛЭП(i)} \quad (9)$$

где $K_{ЛЭП(i+1)}$ - капитальные вложения в ЛЭП $i+1$ варианта исполнения;

$K_{ЛЭП(i)}$ - капитальные вложения в ЛЭП i варианта исполнения;

$r_{ЛЭП(i+1)}$ - погонное сопротивление ЛЭП $i+1$ варианта исполнения;

$r_{ЛЭП(i)}$ - погонное сопротивление ЛЭП i варианта исполнения.

На рисунке 10 в качестве первого примера показано построение семейства зависимостей для ВЛ 110 кВ одноцепного исполнения с использованием марки провода АС, железобетонных опор и расположением объекта в Московской области. Рисунок 11 представляет собой результат расчета, где по шкале отмечается величина тока, а в диапазоне указывается соответствующее сечение провода.

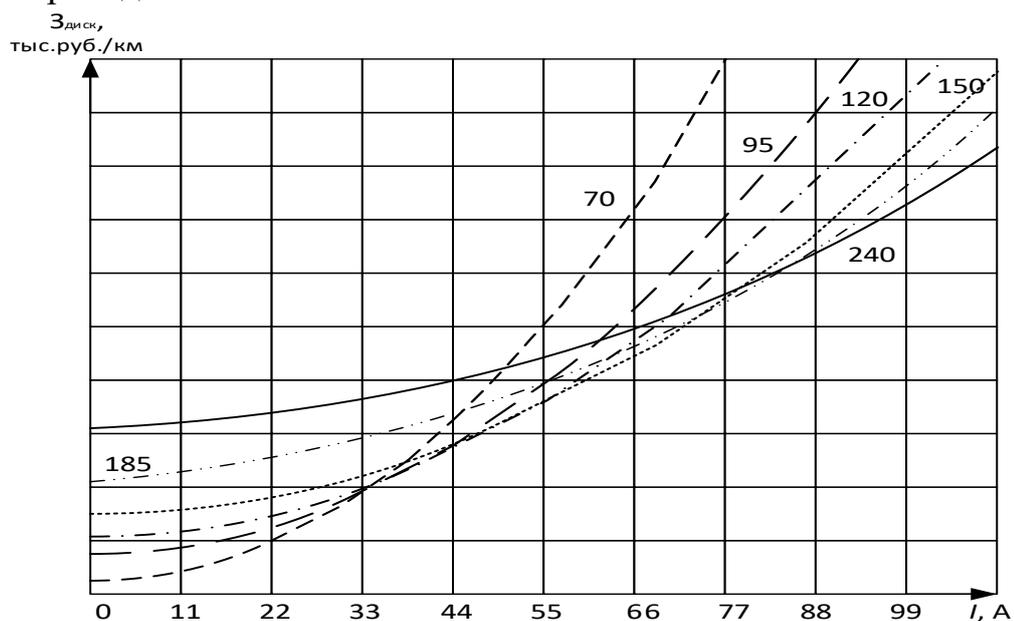


Рисунок 10 – Построение семейства зависимостей затрат для ВЛ 110 кВ

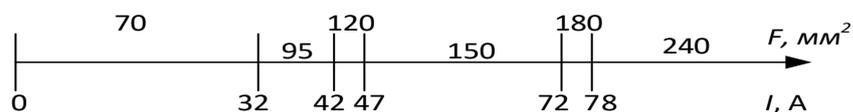


Рисунок 11 – Результат расчета для провода АС

Полученные значения токов и токовых интервалов значительно отличаются от значений, найденных с использованием методов ЭПТ и ЭТИ.

По сути в предлагаемом методе происходит поиск экономических предельных токов, ограничивающих применение того или иного сечения провода, что и позволяет назвать соответственно метод – методом предельных экономических токов (ПЭТ).

На рисунках 12 и 13 в качестве примера показана реализация метода для ПНП марки СЕНИЛЕК АТЗП/С с теми же условиями, что и в первом примере.

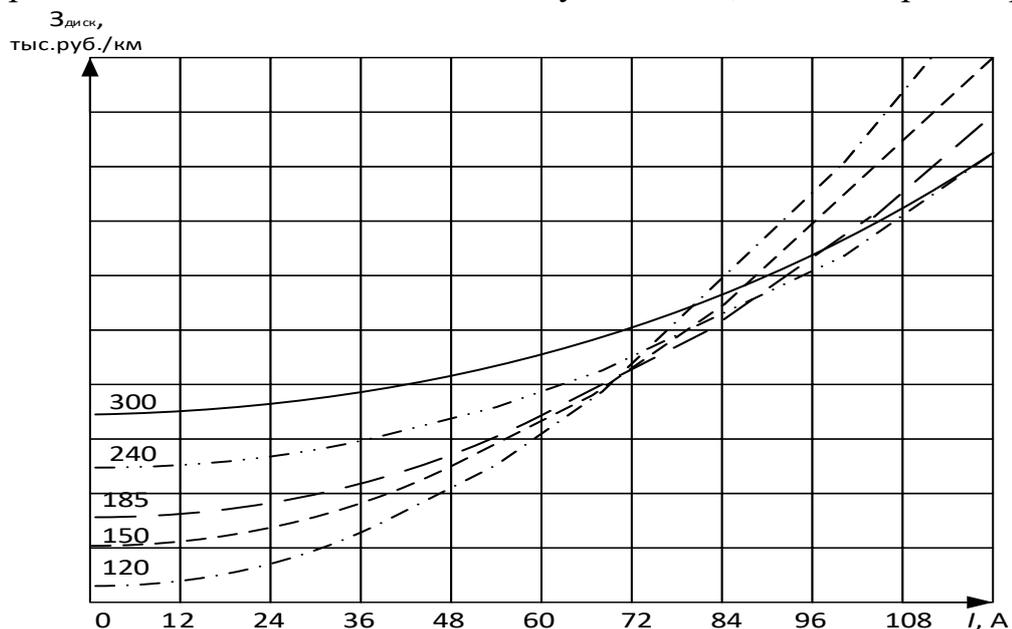


Рисунок 12 – Построение семейства зависимостей затрат для ВЛ 110 кВ

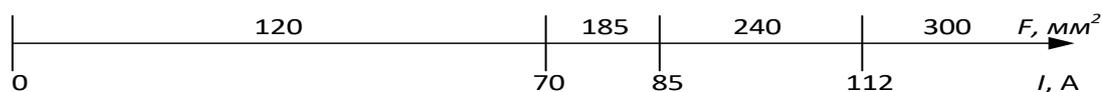


Рисунок 13 – Результат расчета для провода СЕНИЛЕК АТЗП/С

Важно отметить, что проведенные исследования показали тенденцию к увеличению оптимального сечения проводов любой конструкции по сравнению со значениями, полученными общепринятыми методами.

Условия проверки выбранного сечения провода хорошо известны и все, кроме условия длительно допустимого нагрева в послеаварийном режиме, заложены в механизм предлагаемого метода.

В итоге, разработан метод, который свободен от недостатков существующих. Реализация метода ПЭТ с помощью любой удобной для проектировщика системы компьютерной математики упрощает его использование, экономит время и освобождает от использования приближенных методов. В таблице 7 отражены преимущества использования

метода ПЭТ в соответствии с выявленными недостатками существующих методов, отраженных в таблице 3 ранее.

Таблица 7 - Перечень преимуществ метода ПЭТ

№	Преимущества
1	современный экономический инструмент расчета
2	не требуется значения коэффициента мощности
3	получение однозначного результата
4	нет допущения о линейной зависимости капитальных вложений в ВЛ от ее длины
5	учитываются изменения экономических характеристик и стоимость потерь
6	отсутствует завышение величины потерь электроэнергии при расчете
7	предусмотрен учет конструктивных изменений ЛЭП
8	учтено влияние изменения передаваемой мощности во времени
9	учтено влияние класса номинального напряжений и опор любой конструкции
10	возможно применение для индивидуального проектирования
11	учитываются климатогеографические особенности объекта проектирования
12	все традиционные проверки выбранного сечения, кроме проверки по длительно допустимому нагреву в послеаварийном режиме, заложены внутри механизма метода

Перечисленные преимущества разработанного метода позволяют получить проектное решение, которое обеспечивает оптимальное соотношение капитальных вложений и издержек в течение всего жизненного цикла объекта, что улучшает технические и экономические показатели как самого объекта, так и эксплуатирующей его компании. Таким образом, методика выбора экономических сечений для ЛЭП в активно-адаптивных сетях будет состоять из трёх блоков: 1- реализация системного подхода выбора марки провода, 2- реализация метода ПЭТ для непосредственного выбора сечения; 3 – проверке выбранного сечения в послеаварийном режиме по допустимому длительному току, найденному по тепловой модели провода.

В итоге, разработанная методика выбора экономически обоснованного сечения провода позволяет получить совокупность положительных системных эффектов, таких как: повышение пропускной способности ЛЭП, усиление межсистемных связей, повышение надежности электросетевого комплекса, повышение уровня энергоэффективности электрических сетей, повышение прибыли и снижение издержек сетевых компаний.

В результате проведенных исследований по четвертой главе доказана целесообразность разработки и последующего закрепления метода выбора сечений проводников с фиксированными нормированными значениями в современных условиях. Обоснована важность получения гибкого современного инструментария для выбора сечения провода любой конструкции. Предложен на основе системного подхода методический подход выбора марки ППП, а также подтверждена корректность получаемых результатов с использованием метода анализа иерархий. Впервые разработана принципиально новая методика выбора сечений провода ЛЭП для активно-адаптивных электрических сетей, использование которой также возможно для традиционной электрической сети.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выполненные в работе исследования позволили получить следующие выводы и результаты:

1. Развитие рыночных отношений и переход электроэнергетики на новую технологическую платформу ИЭС ААС повысили значимость проблемы выбора сечений проводников ЛЭП.

2. Проведенный анализ функциональных свойств активно –адаптивной сети показал, что нормативно-правовое обеспечение выбора оптимального сечения проводника устарело и нуждается в гармонизации с изменениями, происходящими в электроэнергетике.

3. Разработана и детализирована обобщенная тепловая модель проводов нового поколения различных конструкций, использование которой возможно как для активно-адаптивной сети, так и традиционной электрической сети. Реализована адаптация предложенной модели к расчету допустимого длительного тока традиционных проводов. Предложенная модель носит универсальный характер, т.к. позволяет решать широкий круг проектных и эксплуатационных задач.

4. Разработана технико-экономическая модель провода ЛЭП, основанная на использовании современного экономического критерия - удельных дисконтированных затрат, учитывающая стохастический характер изменения тока, протекающего по проводу, и применимая как к активно-адаптивной электрической сети, так и традиционной.

5. Предложен удобный в использовании методический подход выбора марки проводов нового поколения, основанный на системном анализе и позволяющий учитывать конкретные условия проектирования ЛЭП, а также количественно оценить степень соответствия марки провода поставленным целям и задачам.

6. Разработан метод предельных экономических токов для выбора экономически обоснованных сечений провода любой конструкции для ЛЭП всех классов номинального напряжения свыше 1 кВ, свободный от недостатков общепринятых методов выбора сечений проводов и учитывающий особенности перехода электроэнергетики на новую технологическую платформу.

7. Предложен универсальный инструментарий для выбора и проверки сечений проводов различных конструкций, отличающийся от существующего учетом конкретных условий при выборе марки провода, современных экономических критериев, функциональных свойств активно-адаптивной сети, физических процессов протекания тока по проводу, стохастического характера изменения нагрузки и конструктивных особенностей ЛЭП.

Список используемых источников

1. Энергетическая стратегия на период до 2035 года, утвержденная распоряжением Правительства Российской Федерации от 09.06.2020 № 1523-р.
2. Кобец, Б. Б. Инновационное развитие электроэнергетики на базе концепции Smart Grid / Б. Б. Кобец, И. О. Волкова – М.: ИАЦ Энергия, 2010. – 208 с.
3. Основные положения Концепции развития интеллектуальной электроэнергетической системы России с активно- адаптивной сетью Изд-во: Научно-технический центр Федеральной сетевой компании Единой энергетической системы (Москва) – 2012. – 51 с.
4. Дорофеев, В. В. Активно-адаптивная сеть – новое качество ЕЭС России / В. В. Дорофеев, А. А. Макаров // Энергоэксперт. – 2009. – № 4. – С. 28-34.
5. Шевченко, Н. Ю. Обзор и анализ конструктивных особенностей проводов воздушных линий электропередачи с повышенной стойкостью к гололедно-ветровым нагрузкам / Н. Ю. Шевченко, Г. Г. Угаров, С. Н. Кириллова, Ю. В. Лебедева // Вопросы электротехнологии. – 2018. - №4(21). – С. 53-63.
6. Блок, В. М. Выбор оптимальных сечений проводов и кабелей с учетом экономических интервалов / В. М. Блок, Р. Э. Зеберг, С. А. Гусева // Электричество. – 1964. – №5. – С. 13–16.
7. Зуев, Э. Н. Техничко-экономические основы проектирования электрических сетей. – М.: МЭИ, 1988 – 70 С.
8. Правила устройства электроустановок (ПУЭ). – 7-е изд. – СПб.: ДЕАН, 2008. – 704 с.
9. Рекомендации по технологическому проектированию воздушных линий электропередачи напряжением 35 кВ и выше», утвержденные приказом Министерства Энергетики РФ от 30.06.2003 № 284.
10. Электроэнергетические системы и сети: учеб. пособие / В. Я. Горячев, Л. М. Инаходова, Т. Ю. Бростилова и др. – М.: Издательство МЭИ, 2018. – 172 С.
11. Зуев, Э. Н. К вопросу об актуализации нормативов на экономическую плотность тока/ Э. Н. Зуев // Электро. – 2002. – №6. – С. 39-45.
12. Савина, Н.В. Оценка целесообразности применения методов экономической плотности тока и экономических токовых интервалов в современных условиях / Н. В. Савина, Д. А. Цысь // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». – 2017. – Т. 17, № 1. – С. 34–41.
13. СТО 56947007-29.240.55.016-2008 Нормы технологического проектирования воздушных линий электропередачи напряжением 35-750 кВ.
14. СТО 70238424.29.240.20.001-2011 Воздушные линии напряжением 0,4-20 кВ. Условия создания, нормы и требования.

15. СТО 34.01-2.2-001-2015 Методические указания по проектированию ВЛ 110-220 кВ с применением композитных опор.
16. СТО 56947007-29.060.50.268-2019 Указания по проектированию ВЛ 220 кВ и выше с неизолированными проводами нового поколения.
17. CIGRE P. Guide for Thermal Rating Calculations of Overhead Lines // Technical Brochure, vol. 601, 2014.
18. IEEE Standard for Calculating the Current-Temperature Relationship of Bare Overhead Conductors, IEEE Std 738–2012 (Revision of IEEE Std 738–2006 - Incorporates IEEE Std 738–2012 Cor 1–2013). 2013. pp. 1-72.
19. F.A. Gomez, J. M. Garcia De Maria, D. Garcia Puertas, A. Bairi, R. Granizo Arrabe "Numerical study of the thermal behaviour of bare overhead conductors in electrical power lines," Proceedings of the 10th WSEAS international conference on communications, electrical & computer engineering, and 9th WSEAS international conference on Applied electromagnetics, wireless and optical communications. World Scientific and Engineering Academy and Society, pp. 149-153, 2011.
20. J. Nahman, M. Tanaskovic "Determination of the current carrying capacity of cables using the finite element method," Electric Power Systems Research, vol. 61, pp. 109–117, 2002.
21. B. Burks, D. L. Armentrout and M. Kumosa "Failure Prediction Analysis of an ACCC Conductor Subjected to Thermal and Mechanical Stresses" IEEE Trans. Power Delivery, pp. 588–596, 2010.
22. Staszewski L., Rebizant W. The differences between IEEE and CIGRE heat balance concepts for line ampacity considerations // Modern Electric Power Systems (MEPS): Proceedings of the International Symposium. 2010. pp. 1-4.
23. Bangay J., Coleman M., Batten R. Comparison of IEEE and CIGRE methods for predicting thermal behaviour of powerlines and their relevance to distribution networks // 2015 IEEE Eindhoven PowerTech. 2015. pp. 1-5.
24. Rahman S. A. and Kopsidas K. Impact of Simplified Convection Model in Overhead Lines Thermal Rating Calculation Methods // 2018 IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exposition (T&D). 2018. pp. 1-9.
25. Методические рекомендации по оценке эффективности инвестиционных проектов, утвержденными Министерством экономики РФ, Министерством финансов РФ, Государственным комитетом РФ по строительной, архитектурной и жилищной политике от 21.06.1999 N ВК 477.
26. Мясоедова, Л. А. Моделирование токовой нагрузки в активно-адаптивных распределительных электрических сетях / Л. А. Мясоедова, Ю. В. Мясоедов, Н. В. Савина // В сборнике: Энергетика: управление, качество и эффективность использования энергоресурсов. Сборник трудов восьмой международной научно-технической конференции. отв. ред. Н. В. Савина. 2015. С. 33-40.
27. Савина, Н. В. Системный анализ потерь электроэнергии в электрических распределительных сетях / Н.В. Савина. – Новосибирск: Наука, 2008 – 228 С.

Список работ, опубликованных по теме диссертации

Научные статьи, опубликованные в изданиях по списку ВАК:

28. Варыгина, А. О. Анализ целесообразности применения существующих методических подходов проектирования к воздушным линиям нового поколения / А. О. Варыгина, Н. В. Савина // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». – 2019. – Т. 19, № 2. – С. 69–79. DOI: 10.14529/power190208.

29. Варыгина, А. О. Расчет длительно допустимого тока проводов нового поколения воздушных линий / А. О. Варыгина, Н. В. Савина // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. – Казань, 2020. – Т.22. – № 4. (Справка о принятии к публикации от 08.09.2020 № 3050/29).

Научные статьи, опубликованные в изданиях по списку Scopus, Web of Science:

30. Varygina A. O., Savina N. V. The Influence of New Functional Properties of Active-Adaptive Electrical Networks on the Correctness of Selection and Verification of Conductor Cross-Sections by Existing Methods // 2018 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies (FarEastCon). 2018. pp. 1-5.

31. Varygina A. O., Savina N. V. Specification of the Method for Calculating the Long-Term Permissible Current of Overhead Line Conductors. 2020 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM); Sochi; Russia. 2020. pp. 1-8.

Научные статьи, опубликованные в других изданиях:

32. Варыгина, А. О. Оценка целесообразности применения на ВЛ проводников нового поколения / А. О. Варыгина, Н. В. Савина // СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ: АКТУАЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ, ДОСТИЖЕНИЯ И ИННОВАЦИИ : сборник статей X Международной научно-практической конференции / под ред. Г. Ю. Гуляева. – Пенза: Изд-во «Наука и Просвещение», 2017. – С. 50–55.

33. Варыгина, А. О. Развитие методов выбора сечений проводников и их адаптация к современным условиям / А. О. Варыгина, Н. В. Савина // Вестник Амурского государственного университета. Серия «Естественные и экономические науки». – Благовещенск: Изд-во АмГУ, 2018. – Вып. 81. – С. 50–55.

34. Варыгина, А. О. Развитие видов опор ВЛЭП и их адаптация к современным условиям / А. О. Варыгина, Н. В. Савина // ЭНЕРГЕТИКА: УПРАВЛЕНИЕ, КАЧЕСТВО И ЭФФЕКТИВНОСТЬ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ЭНЕРГОРЕСУРСОВ : сборник трудов IX Международной научно-технической конференции Благовещенск: Изд-во АмГУ, 2019. – С. 347–352.

35. Варыгина, А. О. Планирование режимов электропотребления при диспетчерском управлении электрическими сетями / Молодёжь XXI века: шаг в будущее // Материалы XIV-й регион. науч.-практ. конф. с межрегион. и междунар. участием, (22 мая 2013 г., Благовещенск). – Благовещенск: Изд-во БГПУ, 2013. – Т.7. – С. 155–156.