

На правах рукописи

Варыгина

Варыгина Александра Олеговна

**РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ВЫБОРА ПРОВОДОВ ДЛЯ ЛИНИЙ
ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ В АКТИВНО-АДАПТИВНЫХ СЕТЯХ**

Специальность 2.4.3. Электроэнергетика

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Иркутск – 2026

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Амурский государственный университет» (ФГБОУ ВО «АмГУ»)

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Савина Наталья Викторовна

Официальные оппоненты: **Сулов Константин Витальевич**
доктор технических наук, доцент, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский университет «МЭИ», кафедра гидроэнергетики и возобновляемых источников энергии, профессор

Томин Никита Викторович
кандидат технических наук, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева Сибирского отделения Российской академии наук, отдел электроэнергетических систем, старший научный сотрудник

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Иркутский государственный университет путей сообщения», г. Иркутск

Защита состоится: «14» апреля 2026 года в 09:00 ч на заседании диссертационного совета 24.1.118.01, созданного на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева Сибирского отделения Российской академии наук (ИСЭМ СО РАН) по адресу: 664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 130, к. 355.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИСЭМ СО РАН по адресу: 664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 130, к. 407 и на сайте ИСЭМ СО РАН: <https://isem.irk.ru/dissert2/case/DIS-2026-3/>


Отзывы на автореферат в двух экземплярах с подписью составителя, заверенные печатью организации, просим направлять по адресу: 664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 130, на имя ученого секретаря диссертационного совета.

Автореферат разослан «___» февраля 2026 года.

Ученый секретарь

диссертационного совета 24.1.118.01,

доктор технических наук, доцент



Солодуша Светлана Витальевна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. В Энергетической стратегии Российской Федерации на период до 2050 года отмечена необходимость цифровой трансформации электроэнергетики, на основании которой формируются активно-адаптивные сети (ААС). При этом электрические сети приобретают новые функциональные свойства, которые влияют на выбор провода с оптимальными параметрами, но в настоящее время не учитываются.

Опыт эксплуатации показал, что принятые для выбора сечения методы не отвечают современным требованиям по энергетической эффективности и надежности, не учитывают в полной мере климатические, географические и экономические особенности размещения линий электропередачи (ЛЭП) и не предназначены для появившегося множества марок проводов нового поколения (ПНП), существенно отличающихся по физико-техническим характеристикам от традиционных.

Важность темы подтверждается необходимостью повышения пропускной способности ЛЭП, их низкой энергетической эффективностью и снижением надежности, что напрямую связано с выбором провода и наиболее явно выражено в воздушных ЛЭП и воздушных участках кабельно-воздушных линий (далее совместно – воздушных ЛЭП). Следовательно, необходима разработка методики совокупного выбора марки и сечения провода любой конструкции, включая ПНП, в условиях интенсивного развития электросетевого комплекса, в том числе при переходе на ААС. Исходя из вышесказанного, тема диссертации, посвященная исследованию выбора проводов ЛЭП, является актуальной.

Степень разработанности темы исследования. Исследования по вопросам появления новых функциональных свойств электрической сети при интеллектуализации электроэнергетики приведены в работах И.О. Волковой, Н.И. Воропая, Б.Б. Кобец, Д. Миллера и других.

Большой вклад в развитие методов выбора сечений проводов, начиная с основополагающей работы Дж. Дж. Томсона, внесли зарубежные и отечественные ученые В.М. Блок, И.А. Будзко, В.А. Веников, П.Г. Грудинский, С.Н. Ефентьев, С.А. Кукель-Краевский, Д. С. Лившиц, Р. Пелисье, М.С. Левин и другие.

Развитием тепловых расчетов традиционных проводов и определением допустимого длительного тока занимались ученые В.В. Бургсдорф, Д. Дуглас, Р.Е. Кеннон, Е.И. Сацук, Б.С. Ховингтон и другие.

Исследования закономерности изменения тока во времени с учетом фундаментального свойства неопределенности представлены в работах Л.Н. Герасимова, Н.А. Денисенко, И.Г. Резникова, Н.В. Савиной, Ю.А. Фокина, И.

Хоффман.

Для ПНП исследования ни в части методов выбора оптимальных сечений, ни в части тепловых расчетов, с учетом рыночных условий функционирования ЛЭП, не проводились. Кроме того, выбор проводов с учетом новых функциональных свойств электрической сети ранее не рассматривался.

Цель диссертации: разработка методики выбора провода с оптимальными параметрами, учитывающей процессы сложного теплообмена провода с окружающей средой и стохастический характер протекания тока по ЛЭП напряжением выше 1 кВ в активно-адаптивных сетях.

Основные задачи исследования:

1. Анализ тенденций развития электроэнергетической отрасли в России и мире для выявления функциональных свойств активно-адаптивной сети, влияющих на выбор проводов в электрических сетях напряжением выше 1 кВ, с оценкой их соответствия существующим методам выбора и проверки сечений на основе системного подхода.

2. Развитие тепловой модели провода для определения допустимых длительных токов проводов любого конструктивного исполнения с учетом климатических и географических условий прохождения ВЛЭП и особенностей активно-адаптивных сетей на основе исследования теплового баланса провода.

3. Разработка методического подхода к выбору провода ЛЭП, обеспечивающего оптимальные условия его эксплуатации при минимизации затрат.

4. Разработка методики выбора провода с оптимальными параметрами с учетом особенностей размещения ЛЭП.

Научная новизна исследования:

1. На основе системного подхода выявлена и обоснована необходимость в разработке методики выбора проводов, обеспечивающих оптимальные условия эксплуатации ЛЭП в активно-адаптивных сетях.

2. Предложены обобщенная тепловая модель провода, являющаяся развитием модели, рекомендуемой Международным советом по большим электрическим системам высокого напряжения (СИГРЭ), и ее инженерная реализация, позволяющая учитывать процессы сложного теплообмена между проводом и окружающей средой и отличающаяся возможностью ее применения к проводам различной конструкции, в том числе проводам нового поколения.

3. Разработана интегрированная технико-экономическая модель провода различной конструкции, позволяющая выбирать его оптимальное сечение для всего срока эксплуатации провода, отличающаяся учетом стохастического характера токовой нагрузки, тепловых процессов и неопределенности,

обусловленной условиями функционирования электроэнергетических систем.

4. Предложены универсальные факторы сопоставимости вариантов выбора провода, учитывающие конструктивные отличия проводов, для обеспечения их корректного сравнения при выборе марки и сечения.

5. Впервые предложен метод выбора оптимальной марки провода, принимающий во внимание технические характеристики провода и позволяющий на основе многокритериального анализа выбирать не только оптимальную марку, но и диапазон ее сечений, обеспечивающий выполнение условий размещения ЛЭП.

6. Разработан метод выбора оптимального сечения провода, основанный на определении оптимальной области токов для каждого сечения выбранной марки провода с помощью предложенной в работе интегрированной технико-экономической модели провода, и отличающийся от существующих методов адаптацией к динамичным изменениям в отрасли и экономике. Данный метод применим для активно-адаптивных сетей и традиционных.

7. Впервые разработана методика выбора провода с оптимальными параметрами, обобщающая ограничения и требования к реализации воздушных ЛЭП и обеспечивающая совокупный выбор оптимальных марки и сечения провода воздушных ЛЭП напряжением выше 1 кВ в условиях интенсивного развития электросетевого комплекса и перехода на активно-адаптивные сети.

Объект исследования – воздушные и кабельно-воздушные ЛЭП напряжением выше 1 кВ.

Предмет исследования – методы выбора марки и сечения проводов различной конструкции для применения в электрических сетях напряжением выше 1 кВ с новыми функциональными свойствами.

Теоретическая значимость работы заключается в разработке нового методического подхода к выбору провода ЛЭП и основанной на нем методики для ААС напряжением выше 1 кВ, обеспечивающих оптимальные марку и сечение провода с учетом конкретных условий размещения ЛЭП и инструментария для реализации данного подхода. Диссертационная работа развивает теоретические основы проектирования ЛЭП.

Практическая значимость заключается в обеспечении оптимальных условий транспорта электроэнергии по ЛЭП на всем сроке ее службы, выраженных в получении интегрированного экономического эффекта, учитывающего: повышение пропускной способности ЛЭП, снижение потерь электроэнергии, снижение эксплуатационных затрат в целом.

Методология и методы исследования. В работе использованы: системный подход, теория теплопередачи, современные методы технико-экономического обоснования проектных решений и оценки эффективности инвестиционных

проектов, теория принятия решений, математический аппарат алгебры матриц, методы математического моделирования электрических сетей. Для реализации, исследования и анализа полученных результатов использовались лицензионные программно-вычислительные комплексы для расчета и анализа электрических режимов и системы компьютерной математики.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Обобщенная тепловая модель провода, предназначенная для исследования проводов различных конструкций, в том числе проводов нового поколения, и учитывающая условия функционирования ЛЭП.

2. Интегрированная технико-экономическая модель провода, базирующаяся на удельных дисконтированных затратах, учете стохастического характера протекания тока и новых функциональных свойств активно-адаптивной сети.

3. Метод выбора оптимальной марки провода на основе многокритериального анализа.

4. Метод выбора оптимального сечения провода, основанный на разработанной интегрированной технико-экономической модели провода.

5. Методика выбора провода с оптимальными параметрами для ЛЭП напряжением выше 1 кВ в активно-адаптивной и традиционной электрических сетях.

Соответствие диссертации паспорту научной специальности.

Диссертационная работа соответствует следующим направлениям исследований паспорта специальности ВАК 2.4.3. Электроэнергетика:

Пункт 9. «Оптимизация структуры, параметров и схем электрических соединений электростанций, подстанций и электрических сетей энергосистем, мини- и микрогрид». В третьей главе разработана интегрированная технико-экономическая модель провода любой конструкции, учитывающая новые свойства ААС (положение 2, выносимое на защиту). В четвертой главе дана оценка получаемых эффектов от практической реализации предложенных в диссертации методического подхода, методов и методики выбора провода с оптимальными параметрами на реальных примерах действующих электрических сетей и модели ААС (положения 3, 4, 5, выносимые на защиту).

Пункт 17. «Исследования по транспорту электроэнергии переменным и постоянным током, включая проблемы повышения пропускной способности транспортных каналов, разработки и применения FACTS-устройств, накопителей энергии». Во второй главе предложена обобщенная тепловая модель неизолированного провода для определения допустимых длительных токов (ДДТ) проводов различной конструкции и даны практические рекомендации расчетов ДДТ (положение 1, выносимое на защиту). В четвертой главе предложен новый

методический подход и на его основе разработаны методы выбора оптимальных марки и сечения провода, методика выбора провода с оптимальными параметрами, показана его реализация на примерах действующих электрических сетей и модели ААС (положения 3, 4, 5, выносимые на защиту).

Реализация диссертационной работы. Результаты исследований в рамках диссертационной работы и ее материалы были использованы:

- в учебном процессе ФГБОУ ВО «АмГУ»,
 - в производственной деятельности акционерного общества «Дальневосточная распределительная сетевая компания»,
- что подтверждается актами о внедрении (Приложение Ж).

Достоверность полученных результатов. Достоверность полученных результатов и сделанных выводов подтверждена верификационными расчетами электрических режимов и нагрева проводов, выполненными для отдельных ЛЭП реальных электрических сетей, а также сопоставлением проведенных расчетов с паспортными данными проводов.

Апробация работы. Результаты работы представлялись на научных семинарах кафедры энергетики ФГБОУ ВО «АмГУ» (руководитель семинара – д.т.н., профессор, Н.В. Савина) и отдела электроэнергетических систем Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева Сибирского отделения Российской академии наук (руководитель семинара – д.т.н., С.В. Подковальников); докладывались на следующих конференциях: Международная научно-практической конференция *«Инновации в науке и технике»* на базе Кыргызско-Российского Славянского университета имени Б. Н. Ельцина (Киргизия, Бишкек, 2022); Международная научно-техническая конференция *«Пром-Инжиниринг»* (Россия, Сочи, 2020); IX Международная научно-техническая конференция *«Энергетика: управление, качество и эффективность использования энергоресурсов»* на базе ФГБОУ ВО «АмГУ» (Россия, Благовещенск, 2019); Международная мультидисциплинарная конференция по промышленному инжинирингу и современным технологиям *«FarEastCon 2018»* на базе ДВФУ (Россия, Владивосток, 2018); X Международная научно-практической конференция *«Современные технологии: актуальные вопросы, достижения инновации»* на базе МЦНС «Наука и Просвещение» (Россия, Пенза, 2017).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 10 статей, в том числе 4 – в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК РФ по специальности 2.4.3 (К1 – 3 публикации, К2 – 1 публикация), 3 – в изданиях, индексируемых в Scopus и (или) Web of Science, 3 – в иных изданиях.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка сокращений и условных обозначений, списка литературы из 168 наименований, 7 приложений. Общий объем работы составляет 179 страниц основного текста, включает 31 рисунок и 80 таблиц.

Личный вклад. Личный вклад автора состоит в исследовании новых функциональных свойств активно-адаптивной сети и разработке нового инструментария выбора провода с оптимальными параметрами. Совместно с научным руководителем Савиной Натальей Викторовной были сформулированы цели и задачи работы, выполнены обзорно-аналитические работы, в результате чего автором была предложена методика выбора провода с оптимальными параметрами для решения проблем повышения энергетической эффективности и пропускной способности ЛЭП. Автор самостоятельно провел верификацию предложенных моделей, методического подхода выбора провода с оптимальными параметрами, метода выбора оптимальной марки провода, метода выбора оптимального сечения провода и методики для реальных ЛЭП традиционной сети и модельных схем ААС, результаты которой подтвердили повышение энергетической эффективности и пропускной способности ЛЭП, а также получение дополнительных интегрированных эффектов.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении представлена общая характеристика работы, обоснована актуальность темы, сформулированы цели и задачи исследования, представлены научная новизна, теоретическая и практическая значимость результатов, апробация полученных результатов, сформулированы выносимые на защиту положения.

В первой главе проведен анализ инновационного развития электрических сетей напряжением выше 1 кВ в мире, в том числе развития конструктивного исполнения проводов ЛЭП. Приведена характеристика существующих методов выбора проводов, дана оценка их соответствия нормативно-методической базе в современных условиях функционирования и развития электрических сетей.

Выявлены новые функциональные свойства ААС, влияющие на выбор марки и сечения провода: конструктивное исполнение инновационных проводов, применение новых технологий транспорта электроэнергии, повышение управляемости режимов работы, адаптивное управление потоками мощности, повышенная пропускная способность связей, неопределенность электропотребления, цифровая трансформация. Это влияние заключается в увеличении разнообразия конструктивного исполнения проводов и линий, изменении их технико-экономических показателей, переводе ЛЭП в статус

активного элемента электрической сети. Ранее связь между свойствами ААС и выбором проводов не рассматривалась.

Существующие подходы и методы выбора провода принципиально не могут учесть эти свойства. Мировая практика показала, что внедрение большого количества ПНП, превосходящих по физико-техническим характеристикам традиционные провода, требует выбора марки провода по совокупности технических и экономических критериев. Таких методов в настоящее время нет.

Проведенный анализ существующих методов выбора сечения провода выявил их основные недостатки, определяющими из которых являются: принципиальная несовместимость с технологиями Индустрии 4.0, отсутствие учета стохастического характера нагрузки, наличие неустраняемых методических погрешностей. Нормативно-методическая база выбора провода не гармонизирована с изменениями, происходящими в энергетике, и нуждается в корректировке.

Необходима разработка принципиально иных методического подхода, методов и основанной на них методики совокупного выбора оптимальных марки и сечения провода, учитывающие новые функциональные свойства ААС, процессы сложного теплообмена между проводом и окружающей средой и отвечающие изменившимся условиям функционирования ЛЭП.

Во второй главе предложена обобщенная тепловая модель неизолированного провода для определения допустимых длительных токов (ДДТ) проводов различной конструкции, являющая развитием модели, приведенной в руководстве СИГРЭ¹. Предложены практические рекомендации для определения ДДТ в виде инженерной реализации для неизолированных проводов любой конструкции.

Основой для разработки обобщенной тепловой модели провода выбрано уравнение теплового баланса провода при стационарном режиме по руководству СИГРЭ, так как оно описывает его наиболее полно. В результате исследования теплового баланса проводов традиционной конструкции выявлена целесообразность развития их тепловой модели в части более точного определения ее параметров. Это подтверждается наличием большого количества несистематизированных уточнений определения ДДТ проводов, широкими диапазонами рекомендованных значений параметров и коэффициентов реализаций тепловой модели провода в различных источниках (например, для коэффициентов поглощения и излучения провода диапазон рекомендаций составляет от 5 % до 86 %), необходимостью более точного учета климатических и географических условий трассы ЛЭП. Кроме того, тепловая модель для ПНП не разрабатывалась.

¹ CIGRE Technical brochure: Guide for thermal rating calculation of overhead lines // WG B2.43, 2014. – 95 p.

Следовательно, необходима разработка модели неизолированного провода, которая будет учитывать совокупность условий сложного теплообмена между ним и окружающей средой, характеристик любого его конструктивного исполнения для определения ДДТ как в ААС, так и традиционной сети.

Такая модель названа обобщенной тепловой моделью провода и предложена в виде:

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

где $I_{\text{доп}}$ – ток в проводе, А; α_k – коэффициент, характеризующий процесс теплоотдачи при теплообмене конвекцией, Вт/(м²·°C); α_l – коэффициент, характеризующий процесс теплоотдачи при лучистом теплообмене, Вт/(м²·°C); F – площадь теплообмена одного метра провода, м²; T_{av} – температура провода, °C; T_a – температура воздуха, °C; ε_n – коэффициент поглощения провода; D – диаметр провода, м; k_H – коэффициент, учитывающий влияние высоты над уровнем моря; W_p – интенсивность суммарной радиации, Вт/м²; ψ_c – активный угол наклона солнечных лучей, который зависит от времени года и суток, °; P_i – потери мощности на корону одного метра провода, Вт; R_{20} – сопротивление одного метра провода постоянному току при температуре 20 °C, Ом; k_M – коэффициент учета магнитных потерь; k_j – коэффициент поверхностного эффекта; β_r – температурный коэффициент сопротивления, 1/°C.

Основным отличием данной модели от модели провода по рекомендациям СИГРЭ является более высокая точность расчета ДДТ, достигнутая за счет: включения в расчет коэффициента магнитных потерь, коэффициента, учитывающего высоту прокладки трассы ЛЭП над уровнем моря, потерь мощности на корону; значений коэффициентов поглощения и излучения провода. Преимущество предложенной модели заключается в учете конкретных условий прохождения ЛЭП и конструктивных особенностей ПНП.

Проведенные исследования на модели (1) выявили следующие влияющие факторы на величину ДДТ провода: климатические и географические факторы размещения ЛЭП, площадь поверхности теплообмена провода, магнитные потери и потери мощности на корону, коэффициенты поглощения и излучения, проявление поверхностного эффекта. Их учет позволяет уточнять справочные и паспортные значения ДДТ для конкретной ЛЭП в зависимости от конструктивных особенностей проводов и условий прохождения ее трассы. Наибольшее влияние на результат расчета тока оказывают климатические факторы.

Выявлено, что при расчете ДДТ проводов всех конструкций пороговое значение учета высоты прокладки трассы ЛЭП над уровнем моря составляет 335 м,

а допустимое усредненное значение интенсивности суммарной радиации составляет 1000 Вт/м^2 для зон с умеренным климатом.

В связи с тем, что рекомендуемые значения коэффициентов поглощения и излучения провода имеют широкий разброс, проведены исследования по выбору их оптимальных значений для традиционных проводов и получено, что они должны приниматься равными 0,9 и 0,7 соответственно.

На основе анализа теплового поведения неизолированных проводов любой конструкции выявлены закономерности влияния разных факторов на величину ДДТ ПНП. В качестве примера на Рисунках 1 и 2 показана оценка влияния температуры воздуха и скорости ветра на величину ДДТ распространенного во всем мире ПНП с композитным сердечником марки АССС (модели провода разных сечений 160, 230, 530, 650, 1050) при следующих условиях расчета: скорость ветра $0,6 \text{ м/с}$ (для Рисунка 1), направление ветра перпендикулярно ЛЭП, температура воздуха 25°C (для Рисунка 2), мощность солнечной радиации 1000 Вт/м^2 .

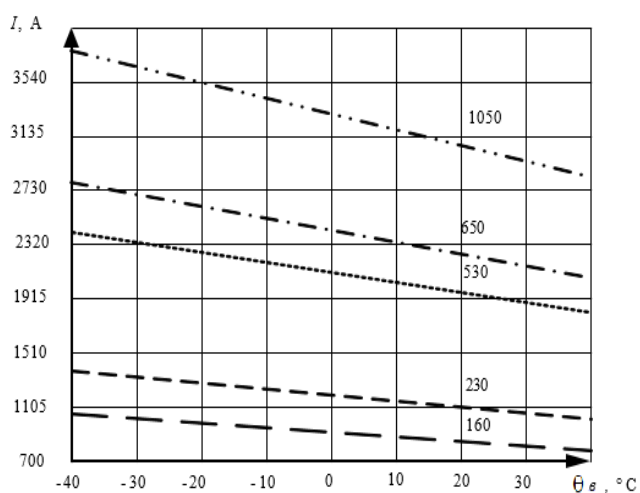


Рисунок 1 – Влияние изменения температуры воздуха на величину ДДТ проводов марки АССС

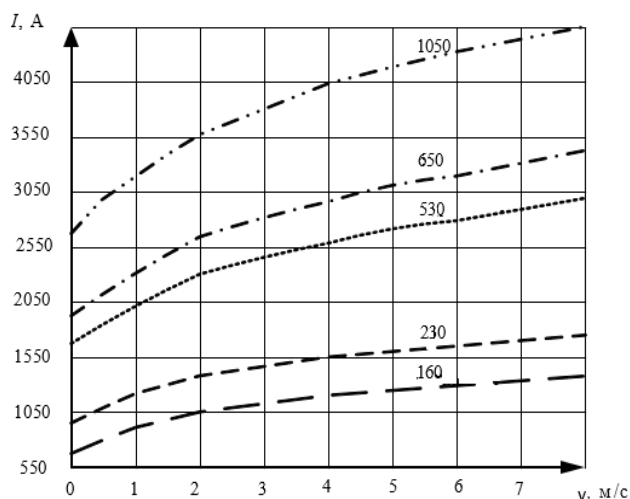


Рисунок 2 – Влияние изменения скорости ветра на величину ДДТ проводов марки АССС

Определено, что при расчете ДДТ ПНП: пороговое значение сечения для учета поверхностного эффекта составляет 600 мм^2 ; значения коэффициентов излучения и поглощения должны приниматься равными 0,5 и 0,9 соответственно; для проводов сечением до 500 мм^2 , с формой профиля проволоки токоведущей части отличной от круглой, целесообразно рассчитывать площадь поверхности теплообмена через эквивалентный диаметр, а свыше 500 мм^2 – через диаметр провода.

С учетом установленных закономерностей, для снижения трудоемкости подготовки исходных данных и расчета ДДТ проводов, предложена инженерная

реализация обобщенной тепловой модели провода:

$$I_{\text{доп}} = \sqrt{\frac{D \cdot [(\alpha_k + \alpha_l) \cdot (A - B \cdot T_a) - 900 \cdot k_H] - P_i}{C \cdot R_{20}}}, \quad (2)$$

где A, B, C – расчетные коэффициенты, примеры значений которых представлены в Таблице 1 в зависимости от марки провода и его сечения.

Интерпретация применения инженерной реализации (2) предложенной тепловой модели провода показана на примере распространенных марок проводов в Таблице 1.

Таблица 1 – Значения расчетных коэффициентов A, B, C формулы (2)

Марка провода	АС			АССС		АСТ				АСк2у
Сечение, мм ²	до 95	95 – 300	400 и выше	до 600	600 и выше	до 95	95 – 330	400 – 550	600 и выше	240 – 500
A	293,362			713,079		847,099				365,304
B	4,191			3,962		4,034				4,059
C	1,451	1,312	$1,388 \cdot k_j$	1,645	$1,645 \cdot k_j$	2,031	1,836	1,942	$1,942 \cdot k_j$	1,333

Таким образом, определены параметры обобщенной тепловой модели провода и представлена ее инженерная реализация для уточнения ДДТ неизолированных проводов любой конструкции по условиям прохождения трассы ЛЭП. Выявлено, что значения ДДТ, рассчитанные для ПНП, более чувствительны к изменению параметров этой модели по сравнению с проводами традиционной конструкции.

В третьей главе разработан интегрированный технико-экономический критерий выбора сечения провода для получения интегрированной технико-экономической модели (ИТЭМ) провода любой конструкции, учитывающей новые свойства АСС и процессы сложного теплообмена между проводом и окружающей средой при стохастическом протекании тока по линии.

Идея ИТЭМ провода заключается в объединении технического и экономического критериев выбора сечения в единый, с помощью связующего параметра – тока линии, что концептуально показано как:

$$F = \langle \psi_I, \psi_{\text{эк}}, P(\psi_I, \psi_{\text{эк}}) \rangle, \quad (3)$$

где ψ_I – технический критерий, описывающий связь сечения и тока, протекающего по проводу; $\psi_{\text{эк}}$ – экономический критерий, выраженный минимумом удельных дисконтированных затрат; $P(\psi_I, \psi_{\text{эк}})$ – предикат целостности, позволяющий объединить вышеприведенные критерии в единое целое.

Учитывая концептуальное представление ИТЭМ провода, предложен

интегрированный технико-экономический критерий выбора оптимального сечения провода в виде:

$$Z_{удз} \rightarrow \min, \quad (4)$$

где $Z_{удз}$ – удельные дисконтированные затраты (УДЗ), руб/км.

При выборе сечения провода присутствует неопределенность двух видов, обусловленная схемно-режимной ситуацией и функционированием рынка.

Для учета схемно-режимной ситуации при определении УДЗ целесообразно заменить случайный процесс изменения тока, протекающего по ЛЭП, на его эквивалентное значение для более точного прогноза потерь электроэнергии в ЛЭП. Определение эквивалентного тока линии зависит от вида случайного процесса и типа информационного потока. Под информационным потоком понимается совокупность данных режимного и схемного характера, необходимых для определения закономерности изменения тока ЛЭП во времени. Для формирования прогнозируемой реализации тока используются значения ретроспективных и текущей реализаций. После определения прогнозируемого графика тока, протекающего по линии, определяются его среднее квадратическое и максимальное значения. Прогнозирование графика токовой нагрузки проводится общепринятыми методами. Отличительной особенностью определения эквивалентного тока является «встраивание» обобщенной тепловой модели провода в его токовую модель.

Предложенный критерий по формуле (4) определяет диапазоны тока для каждого сечения провода, обеспечивающие минимальные УДЗ:

$$Z_{удз} = \sum_{t=0}^T [K_t(1 + \alpha_{ам} + \alpha_{РЭО}) + C_{\Delta W}(3 \cdot I_{э\kappa\text{в}}^2 \cdot R \cdot T_p + 8760 \cdot \Delta P_{кор} + \frac{U_n^2 \cdot T_{вл.п.} \cdot N_{гир}}{3 \cdot N_{из} \cdot R_{из}})] \cdot (1+r)^{-t}, \quad (5)$$

где T – период эксплуатации и строительства ЛЭП, лет; t – конкретный год рассматриваемого периода; K_t – капитальные вложения, руб/км; $\alpha_{ам}$ – коэффициент амортизационных отчислений; $\alpha_{РЭО}$ – коэффициент (норма) отчислений на ремонт, эксплуатацию и обслуживание ЛЭП; $C_{\Delta W}$ – удельная стоимость потерь электроэнергии, руб/Вт·ч; $I_{э\kappa\text{в}}$ – эквивалентный ток линии, А; R – сопротивление 1 км линии, Ом/км; T_p – число рабочих часов ЛЭП за год, ч; $\Delta P_{кор}$ – удельные потери мощности на корону в проводах ВЛ, Вт/км; U_n – номинальное напряжение линии, В; $T_{вл.п.}$ – среднее число часов влажной погоды в году, ч; $N_{гир}$ – число гирлянд на 1 км ЛЭП, шт./км; $N_{из}$ – число изоляторов в гирлянде, шт.; $R_{из}$ – сопротивление подвесного изолятора в гирлянде, Ом; r – ставка (норма) дисконтирования.

Таким образом, первый вид неопределенности при выборе сечения обусловлен новыми функциональными свойствами ААС и учтен при расчете

эквивалентного тока гауссовым шумом, описывающим нестационарную случайную составляющую процесса. Второй вид неопределенности учитывается в ИТЭМ провода ставкой дисконтирования, рассчитанной с использованием текущей ставки рефинансирования ЦБ РФ и прогнозируемых темпов инфляции, стоимостью потерь электроэнергии и коэффициентом инфляции.

Исследование ИТЭМ провода выявило ее чувствительность к точности задания капитальных вложений в ЛЭП, поэтому они должны определяться по текущим ценам; при этом целесообразно рассматривать целиком всю систему «опора – провод – трос – арматура – фундамент» с учетом дополнительных затрат, которые могут включать, например, стоимость мероприятий по борьбе с гололедообразованием. Расчетным периодом должен быть нормативный срок эксплуатации провода. Необходимо учитывать район расположения ЛЭП.

Предложенные критерий и модель позволяют разработать метод выбора сечения провода на принципиально иной основе за счет учета современных экономических условий, процессов сложного теплообмена провода с окружающей средой и стохастического характера тока линии в условиях неопределенности.

В четвертой главе показана разработка и реализация новой методики выбора провода с оптимальными параметрами, базирующейся на предложенном методическом подходе к выбору провода и разработанных методах выбора его оптимальных марки и сечения.

Данный методический подход, сущность которого показана на Рисунке 3, реализуется последовательно тремя процедурами:

- 1) формирование области возможных решений для выбора провода с оптимальными параметрами,
- 2) выбор оптимальной марки провода,
- 3) выбор оптимального сечения провода выбранной марки.

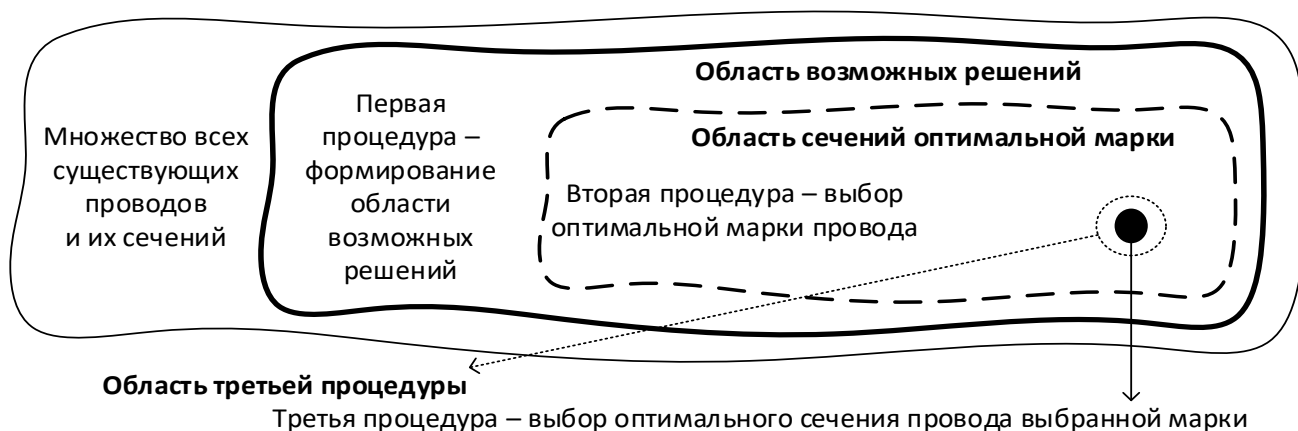


Рисунок 3 – Сущность методического подхода к выбору провода с оптимальными параметрами

Принципиальные отличия методического подхода к выбору провода с оптимальными параметрами от существующих заключаются в учете: конкретных видов и условий реализаций инвестиционных проектов, конструктивных особенностей проводов и ЛЭП, актуальных экономических данных, дисконтирования денежных средств, всего периода строительства и эксплуатации ЛЭП.

Область возможных решений определяется требованиями технической осуществимости, допустимости и сопоставимости, которые формируют ограничения при выборе провода.

Технические требования включают в себя: обеспечение требуемой механической прочности; исключение коронного разряда и радиопомех от короны; соответствие стандартному ряду сечений, определенному для каждого класса напряжения; выполнение условия длительно допустимого нагрева.

Требования по допустимости определяются экономическими, экологическими, социальными, политическими аспектами электроэнергетики.

Для корректного сравнения различных по своим характеристикам и параметрам альтернативных вариантов проводов в работе предложены факторы сопоставимости, показанные в Таблице 2.

Таблица 2 – Факторы сопоставимости вариантов выбора провода

№	Фактор	Приведение в сопоставимый вид
1	Надежность	Учет ущерба в вариантах с разной надежностью.
2	Пропускная способность	Уточнение ДДТ по условиям прохождения трассы.
3	Срок службы провода	Реализация расчета для одного временного промежутка.
4	Технико-экономические эффекты	Всесторонняя оценка влияния принятого технического решения на выбор оптимального варианта исполнения ВЛ.

Для выполнения второй процедуры разработан метод выбора оптимальной марки провода с помощью метода анализа иерархий. Он обеспечивает учет множества технических и экономических критериев, наиболее полно отвечает требованиям и ограничениям при проектировании ЛЭП, которые традиционно проверяются после выбора провода.

Отличительной особенностью предлагаемого метода является получение ряда отобранных сечений по техническим условиям, что ограничивает множество альтернативных вариантов для дальнейшего выбора оптимального сечения.

Построение иерархии для выбора марки провода показано на Рисунке 4.

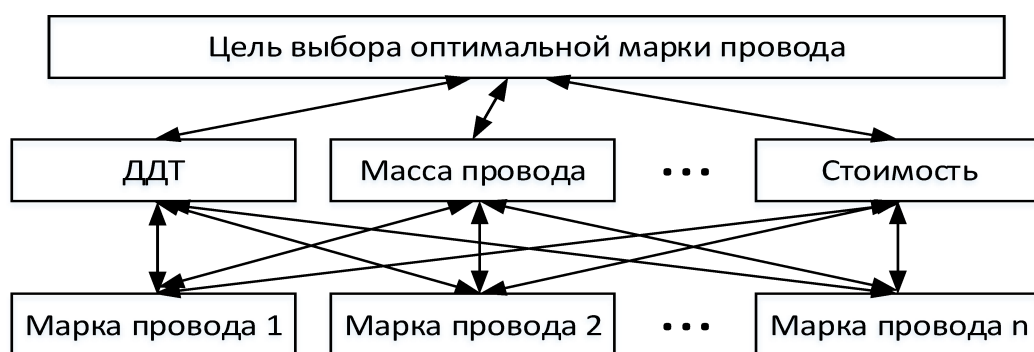


Рисунок 4 – Построение иерархии для выбора марки провода

Порядок реализации разработанного метода представлен на Рисунке 5.

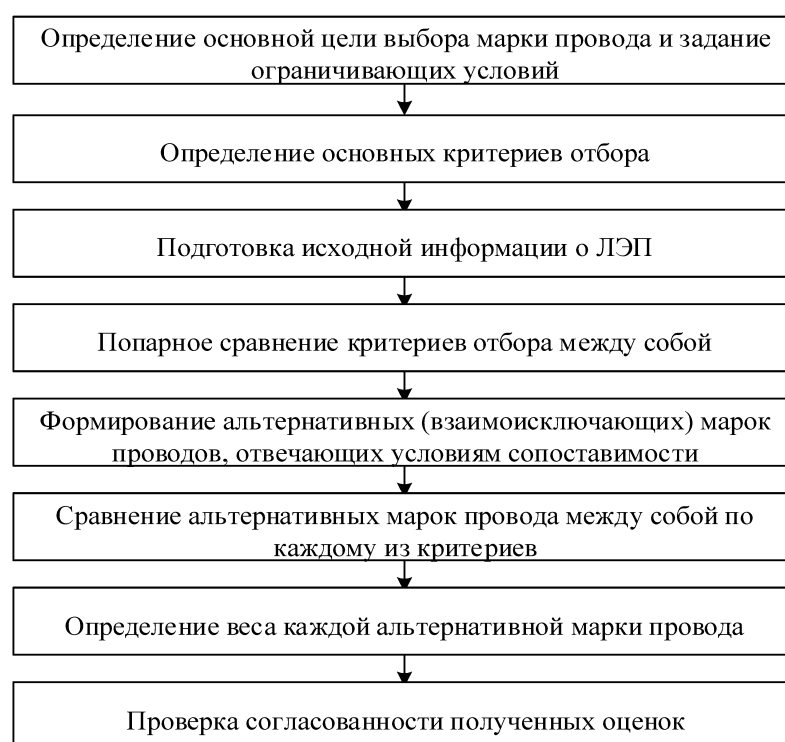


Рисунок 5 – Порядок реализации метода выбора оптимальной марки провода

Перечень альтернативных вариантов марок проводов и основных критериев формируется на основе целей проектирования, условий его реализации и ограничений.

Для каждой марки определяется провод-представитель с конкретным сечением, для которого формируется перечень данных, достаточный для оценки ограничений и реализации сравнения альтернативных вариантов по определенным критериям. Такие представители отбираются с учетом выявленных ограничений.

Вначале выбирается представитель провода традиционных марок рассматриваемого класса напряжения для:

- существующей ЛЭП на основании данных об используемом проводе и

значении его сечения, если это сечение удовлетворяет выявленным ранее ограничениям; в противном случае принимается наименьшее возможное сечение для обеспечения требуемой пропускной способности ЛЭП. При невозможности максимального значения сечения данного класса напряжения обеспечить требуемую пропускную способность, данная марка исключается из рассмотрения;

- новой ЛЭП по значению наименьшего возможного сечения для обеспечения требуемой пропускной способности ЛЭП с проверкой его по другим вышеприведенным ограничениям.

Представители ПНП выбираются: при известном значении сечения провода-представителя традиционной марки – по принципу соразмерности сечений; при отсутствии возможности установить сечение для традиционного провода-представителя – по соответствию значения ДДТ для обеспечения требуемой пропускной способности ЛЭП.

После выбора оптимальной марки провода выбирается сечение из диапазона отобранных сечений выбранной марки. Предлагаемый метод выбора оптимального сечения основан на ИТЭМ провода, свободен от недостатков существующих традиционных методов и применим как для традиционной электрической сети, так и ААС, поскольку способен учитывать ее новые функциональные свойства. Для реализации этого метода необходимо построить зависимости УДЗ от тока, протекающего по линии с помощью ИТЭМ провода.

Построение зависимостей УДЗ от тока для смежных сечений выбранной марки позволяет найти токовые диапазоны, обеспечивающие минимальные УДЗ для каждого сечения. Оптимальное сечение провода определяется по попаданию прогнозируемого эквивалентного тока в токовый диапазон, обеспечивающий минимальное значение УДЗ для конкретного сечения. В точках пересечений зависимостей УДЗ от тока для смежных сечений провода происходит переход на большее значение сечения, так как оно обеспечивает большую пропускную способность ЛЭП при равных УДЗ.

Сущность предлагаемого метода выбора оптимального сечения провода заключается в установлении соответствия прогнозируемого тока диапазону токов для каждого сечения выбранной марки провода, обеспечивающего меньшее значение УДЗ, с помощью ИТЭМ провода.

Преимуществом этого метода является реализация большинства традиционных проверок провода до технико-экономического сопоставления, что упрощает выбор оптимального сечения путем сокращения ряда сечений оптимальной марки провода. В отличие от существующих методов, предлагаемый метод исключает потенциальные противоречия метода выбора сечения и его проверок.

Учитывая вышесказанное, перечень проверок выбранного сечения включает в себя только:

1) проверку по наиболее тяжелому послеаварийному режиму для воздушных линий (ВЛ) напряжением выше 1 кВ с учетом климатических условий. Данная проверка реализуется по формуле:

$$I_{\text{макс}} \leq I_{\text{ДДТ}}, \quad (6)$$

где $I_{\text{ДДТ}}$ – ДДТ проверяемого сечения провода, А;

$I_{\text{макс}}$ – значение максимального прогнозируемого тока линии в наиболее опасном послеаварийном режиме, А.

2) проверку по условию статической (динамической) устойчивости для ВЛ контролируемого сечения напряжением 110 кВ и выше, реализуемую в соответствии с требованиями Методических указаний по устойчивости энергосистем², традиционные проверки дальних электропередач сверхвысокого напряжения (при необходимости).

Алгоритм предлагаемого метода показан на Рисунке 6.

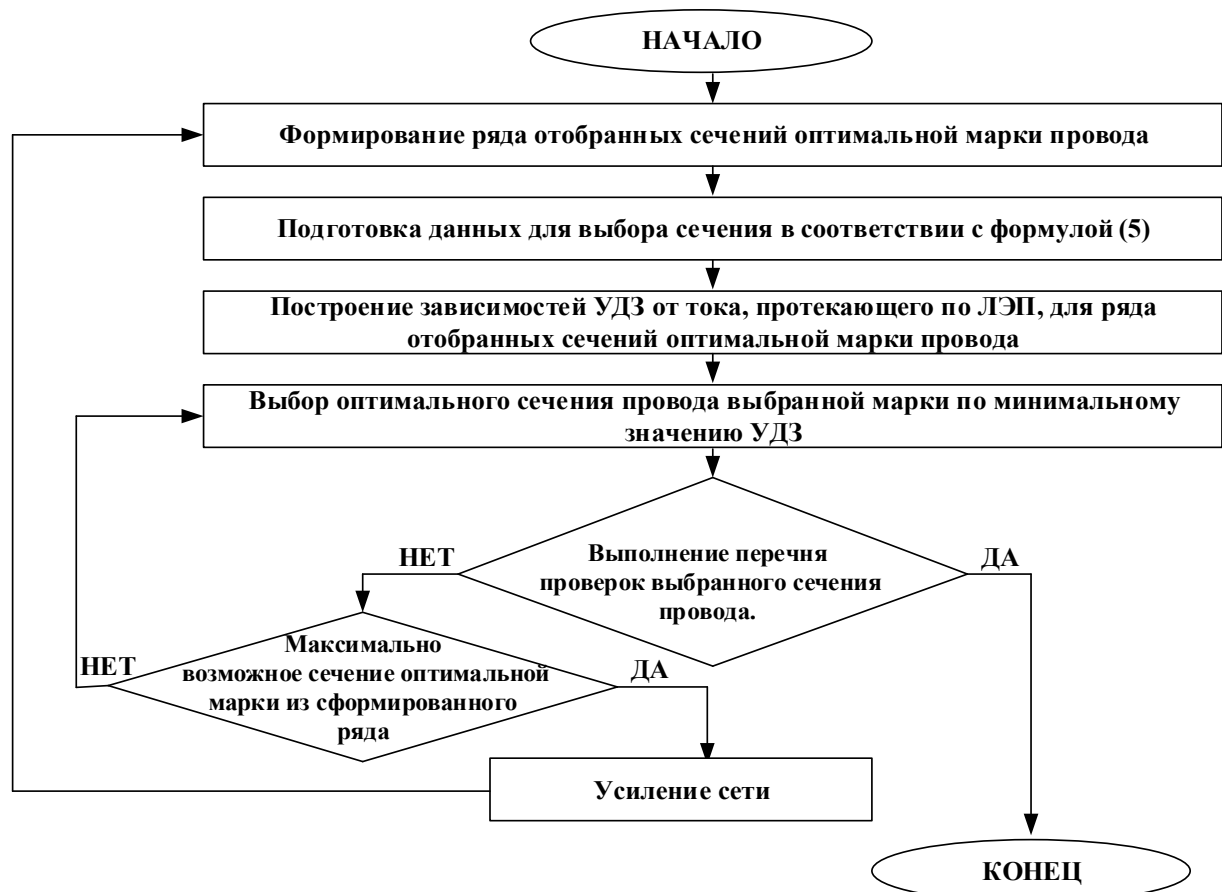


Рисунок 6 – Алгоритм метода выбора оптимального сечения провода

² Приказ Минэнерго России от 03.08.2018 N 630 (ред. от 20.12.2022) «Об утверждении требований к обеспечению надежности электроэнергетических систем, надежности и безопасности объектов электроэнергетики и энергопринимающих установок «Методические указания по устойчивости энергосистем»» (Зарегистрировано в Минюсте России 29.08.2018 N 52023). – 2022. – 17 с.

Реализация метода показана на примере выбора сечения провода марки АС при реконструкции одноцепной ВЛ 110 кВ Московской области. По алгоритму данного метода, требуется построение зависимостей УДЗ от тока линии для сформированного ряда сечений оптимальной марки провода для каждого рассматриваемого случая. Такое построение для примера показано на Рисунке 7.

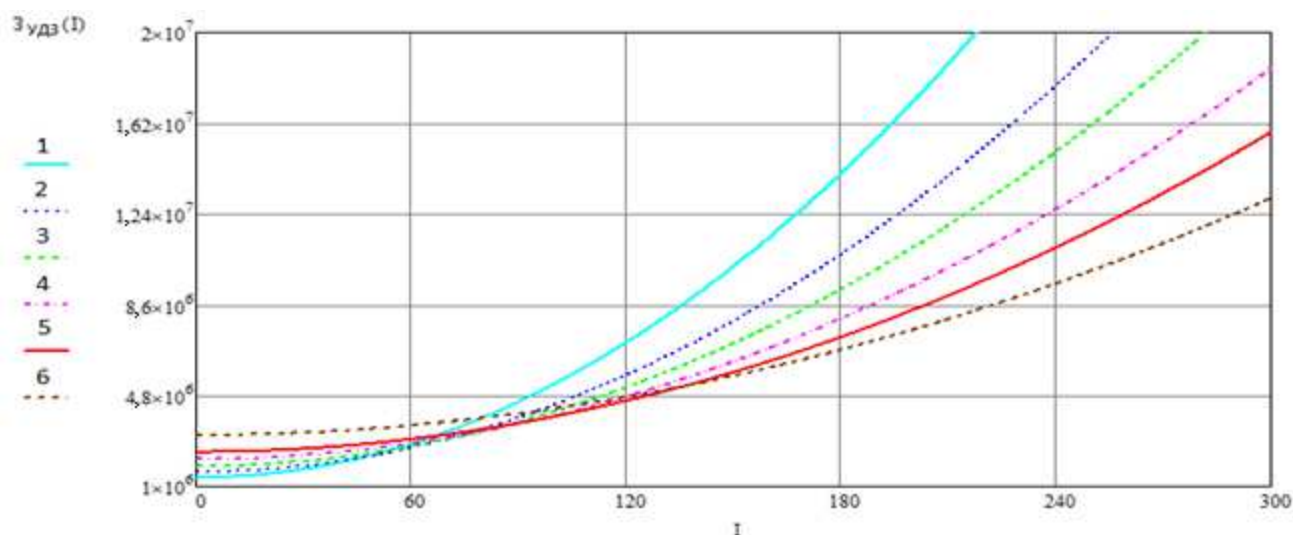


Рисунок 7 – Семейство зависимостей УДЗ (руб/км) от тока линии (А) для рассматриваемого случая с проводами марки АС следующих сечений: 1 – АС 70/11, 2 – АС 95/16, 3 – АС 120/19, 4 – АС 150/24, 5 – АС 185/29, 6 – АС 240/32

При значении прогнозируемого тока в режиме зимнего максимума 100 А, выбран провод АС 185/29. Сравнительная оценка результатов данного метода с результатами традиционных методов выбора сечения – метода экономической плотности тока (ЭПТ) и метода экономических токовых интервалов (ЭТИ), показана в Таблице 3 и отражает чистый дисконтированный доход (ЧДД) для каждого случая.

Таблица 3 – Сравнение результатов выбора сечения провода марки АС разными методами с предложенным методом выбора оптимального сечения

Параметры провода	Метод выбора сечения			Сравнение параметров выбранных проводов по предлагаемому методу с, %	
	Метод ЭПТ	Метод ЭТИ	Предложенный метод	Методом ЭПТ	Методом ЭТИ
Сечение	АС 95/16	АС 150/24	АС 185/29	–	–
Расчетное значение ДДТ по условиям г. Москва, А	336	447	530	+ 57,7	+ 18,6
УДЗ, тыс. руб/км	4417,6	3952,8	3916,0	- 11,4	- 0,9
ЧДД при сроке службы ЛЭП 50 лет, млрд руб	783,4	1042,2	1235,8	+ 57,7	+18,6

На основе предложенных методического подхода и методов выбора оптимальных марки и сечения получена методика выбора провода с оптимальными параметрами, порядок реализации которой представлен на Рисунке 8.

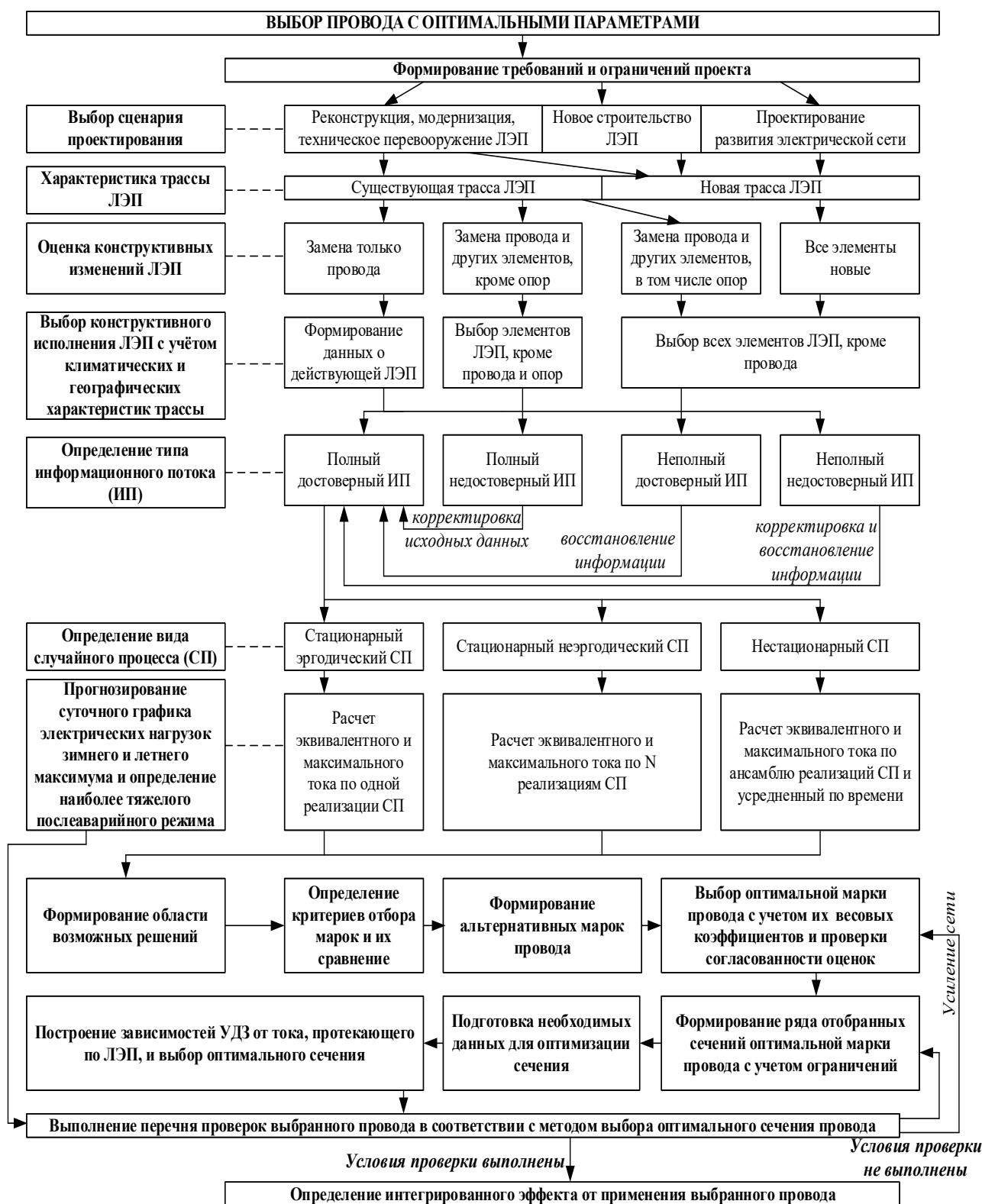


Рисунок 8 – Порядок реализации методики выбора провода с оптимальными параметрами

Областью применения этой методики являются воздушные ЛЭП, напряжением выше 1 кВ с дальнейшей проверкой пропускной способности линий сверхвысокого напряжения по условиям статической (динамической) устойчивости, с учетом особенностей их функционирования при дальних электропередачах общепринятыми методами.

Реализация методики показана на примере замены физически изношенного провода без замены опор на ВЛ 110 кВ Западная – Давыдовка. Пример реализован для существующей традиционной сети и предложенной на ее базе модели ААС с новыми функциональными свойствами: применение новых технологий транспорта электроэнергии; повышение управляемости режимов работы; адаптивное управление потоками реактивной мощности; неопределенность электропотребления; повышенная пропускная способность связей.

Придание этих свойств ААС реализовано для сети, содержащей ВЛ 110 кВ Западная – Давыдовка, следующим образом:

- выбран статический тиристорный компенсатор (СТК) в качестве инновационного активного устройства;
- определены узлы для включения СТК (ПС Западная, ПС Давыдовка) для получения наибольшего эффекта гибкости электропередачи по критериям минимума потерь мощности и изменения перетоков реактивной мощности;
- проверено соответствие модели сети свойствам ААС по ее чувствительности к величине потерь мощности.

В результате, для традиционной сети и разработанной в ПВК RastrWin3 модели ААС с СТК по методике, приведенной на Рисунке 8, выбран провод СЕНИЛЕК АТЗ/С 150/24. Корректность и достоверность предложенного инструментария выбора провода с оптимальными параметрами доказаны верификационными расчетами на реальных примерах электрической сети и подтверждены максимальным значением ЧДД для выбранного провода.

Кроме основного эффекта от применения выбранного провода, заключающегося в повышении пропускной способности ВЛ на 165 % без замены опор, получился интегрированный эффект, выраженный в: снижении потерь активной и реактивной мощности на 19,0 % и 3,2 % соответственно для традиционной сети, и на 13,3 % и 13,4 % для модели ААС; повышении надежности ВЛ за счет снижения гололедообразования на проводах.

Основные преимущества новой методики в отличие от традиционных заключаются в: использовании интегрированного технико-экономического критерия выбора сечения; использовании актуальных экономических данных; дисконтировании затрат; применении для ААС и традиционной; учете условий

прохождения трассы ЛЭП; получении интегрированного эффекта от внедрения провода.

Подтвержден вывод о необходимости внедрения нового инструментария выбора провода с оптимальными параметрами в инженерную и проектную практику.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выполненные в работе исследования позволили получить следующие выводы и результаты:

1. Изменение условий функционирования рынков электрической энергии и мощности, переход электроэнергетики на новую технологическую платформу ИЭС ААС в рамках Индустрии 4.0, неопределенность в сценариях развития электроэнергетических систем существенно повысили значимость проблемы выбора проводов. Это стало возможным как за счет появления большого количества новых технических решений при проектировании ЛЭП, так и за счет роста требований к технико-экономическому обоснованию проектов.

2. Общепринятый методический подход к выбору сечения провода не соответствует новым функциональным свойствам ААС, а также современным условиям функционирования электрических сетей. Появилось большое количество новых марок проводов, которые по своим физико-техническим характеристикам превосходят традиционные провода. Обоснована необходимость выбора марки провода.

3. Предложена обобщенная тепловая модель провода на основе уравнения стационарного режима теплового баланса провода в развитие модели, рекомендованной СИГРЭ. Отличие предложенной модели от модели СИГРЭ заключается во включении в расчет коэффициента магнитных потерь, коэффициента, учитывающего высоту прокладки трассы ЛЭП над уровнем моря, потерь мощности на корону, значения коэффициентов поглощения и излучения провода. Область применения обобщенной тепловой модели провода включает в себя как провода традиционной конструкции, так и ПНП. Получена инженерная реализация обобщенной тепловой модели провода для расчета ДДТ проводов любой конструкции, учитывающая процессы сложного теплообмена между проводом и окружающей средой.

4. Предложен интегрированный технико-экономический критерий выбора сечения провода, полученный путем объединения экономического и технического критериев с помощью связующего параметра – электрического тока, протекающего по линии и имеющего стохастический характер. Для выражения критерия

используются минимум удельных дисконтированных затрат и связь между сечением и током. На основе предложенного критерия выбора сечения провода разработана интегрированная технико-экономическая модель провода любой конструкции. ИТЭМ провода позволяет учитывать процессы сложного теплообмена между проводом и окружающей средой, а также современные условия функционирования электроэнергетических систем.

5. Разработан методический подход на принципиально иной основе совокупного выбора марки и сечения провода любой конструкции, учитывающий особенности реализации проектов в электросетевом комплексе. В отличие от традиционных подходов большинство проверок провода включены в сам процесс его выбора, за исключением проверок по наиболее тяжелому послеаварийному режиму и по условию статической устойчивости для ВЛ контролируемого сечения напряжением 110 кВ и выше.

6. Впервые предложен метод выбора оптимальной марки провода на основе метода анализа иерархий, предназначенный для проводов любого конструктивного исполнения и учитывающий новые функциональные свойства ААС.

7. Разработан метод выбора оптимального сечения неизолированного провода любой конструкции. Данный метод основан на выборе оптимального сечения по соответствию прогнозируемого тока линии одному из диапазонов тока, определенного для конкретного сечения из ограниченного ряда выбранной марки провода по интегрированному технико-экономическому критерию. Областью применения этого метода являются как ААС, так и традиционные электрические сети. Отличительными особенностями метода являются: учет динамичных изменений в электроэнергетике и экономике, реализация большинства традиционных проверок провода до технико-экономического сопоставления проводов, а не после него.

8. Разработана методика выбора провода с оптимальными параметрами, которая включает в себя методы выбора оптимальных марки и сечения провода на основе нового методического подхода. Она применима к неизолированным проводам любой конструкции в ААС и традиционной сети и позволяет получать интегрированный эффект, за счет которого применение ПНП становится конкурентоспособным.

9. Обоснована целесообразность применения предложенного инструментария выбора провода с оптимальными параметрами в современных условиях функционирования электрических сетей, в том числе при переходе на ААС, включающего в себя: метод выбора оптимальной марки провода, метод выбора оптимального сечения провода и методику, объединяющую эти методы. Верификация предложенного инструментария показана на примерах решения

практических задач для реальных электросетевых объектов. Его использование позволяет получить существенный эффект от применения выбранного провода с оптимальными параметрами.

10. Нормативно-методическая база выбора провода нуждается в гармонизации с изменениями, происходящими в электроэнергетике.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ АВТОРОМ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК РФ по специальности 2.4.3. Электроэнергетика:

1. 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.

2. 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. – С. 3–15.

3. Варыгина, А. О. Выбор оптимальной марки провода высоковольтных воздушных линий электропередачи на основе критериального анализа / А. О. Варыгина, Н. В. Савина // iPolytech Journal. – 2023. – № 27(2). – С. 339–353.

4. Варыгина, А. О. Методика выбора оптимальных марки и сечения провода на основе интегрированного технико-экономического критерия / А. О. Варыгина, Н. В. Савина // iPolytech Journal. – 2024. – № 28(3). – С. 462–474.

Публикации в изданиях, индексируемых Scopus и (или) Web of Science:

5. Varygina, A. O. 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 / A. O. Varygina, N. V. Savina // 2018 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies (FarEastCon); Russia. – 2018. – Pp. 1–5.

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

7. Varygina, A. O. Technical and Economic Model of the Conductor Cross-Section for Active-adaptive Electrical Networks / A. O. Varygina, N. V. Savina // Majlesi Journal of Electrical Engineering; Iran. – 2022. – Vol. 16. – № 3. – Pp. 27–34.

Публикации в других изданиях:

8. 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.

9. 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.

10. 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.

Подписано в печать 06.02.2026. Формат 60 х 90 / 16.
Бумага офсетная. Печать цифровая. Усл. печ. л. 1,75.
Тираж 120 экз. Зак. 04-08к.
Отпечатано в Издательстве
ФГБОУ ВО «Иркутский национальный
исследовательский технический университет»
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83