

## ОТЗЫВ

официального оппонента доктора технических наук, профессора  
Беляева Андрея Николаевича  
на диссертацию Геркусова Алексея Анатольевича  
**«Развитие методов статической и динамической оптимизации  
конструктивных и режимных параметров линий электропередачи»**,  
представленную на соискание ученой степени доктора технических наук  
по специальности 05.14.02 – Электрические станции и  
электроэнергетические системы

### **1. Актуальность темы диссертации**

Топливо-энергетический комплекс играет огромную роль в жизнеобеспечении населения и является важнейшей структурной составляющей развития производительных сил страны и ее регионов. В энергетической стратегии России на период до 2035 года ставится цель достижения максимальной эффективности использования топливо-энергетических ресурсов и потенциала энергетического сектора для роста экономики и повышения качества жизни. Особое внимание должно уделяться ускоренному технологическому обновлению энергетики, обеспечивающему выход ее на современные, отвечающие уровню развитых стран, рубежи энергоэффективности и энергосбережения.

Одной из стратегических целей развития электроэнергетики в рассматриваемой перспективе является повышение эффективности функционирования и обеспечение устойчивого развития на базе современных технологий. Для выполнения инновационной программы отрасли необходимо осуществить комплекс научных исследований и разработок, среди которых можно выделить такие направления как развитие межсистемных электрических передач с повышенной пропускной способностью и гибких электрических передач переменного тока.

Развитие технологий «smart grid» (активно-адаптивных сетей) состоит, в конечном счете, в создании полностью интегрированной, саморегулирующейся и самовосстанавливающейся электроэнергетической системы (ЭЭС), включающей в себя генерирующие источники, магистральные и распределительные сети, а также все виды потребителей электрической энергии, управляемые единой сетью информационно-управляющих устройств в режиме реального времени. Во всем мире назрела необходимость кардинального решения проблем, связанных с крупномасштабными системными авариями, значительными потерями в электрических сетях, трудностями включения в энергосистему новых потребителей и альтернативных источников энергии. Целью внедрения рассматриваемых технологий являются качественное улучшение функционирования ЭЭС, существенное повышение их эффективности и надежности. Важными этапами развития активно-адаптивных сетей являются внедрение современных сенсоров, преобразователей, создание элементов сетевой инфраструктуры для сбора и передачи информации. Центральной проблемой при этом является

разработка технологий, моделей и алгоритмов обеспечения реального контроля над энергосистемой на основе полученных от сенсоров параметров состояния сети.

В диссертационном исследовании Геркусова Алексея Анатольевича выполнена дальнейшая разработка методологии энергосбережения в электроэнергетике, совершенствуются методы оптимизации конструкции и сечения фаз воздушных линий (ВЛ), вырабатываются критерии перехода к конструкциям повышенной натуральной мощности, что позволит добиться значительной экономии затрат, снизить относительные потери электроэнергии. Данный подход позволяет совершенствовать теоретические основы и методы статической и динамической оптимизации конструктивных и режимных параметров линий электропередачи и систем электроснабжения, обеспечивая их качественное проектирование, реконструкцию и эксплуатацию. Предлагаемые в диссертации научно-технические решения обогащают инструментарий, используемый при выборе параметров сети, ее рабочего режима и в целом системы электроснабжения, позволяющие рассчитывать оптимальную нагрузку в линиях электропередачи и расход электроэнергии, соответствующий минимуму относительных технических потерь без ущерба для потребителей, в том числе за счет оптимизации оперативной схемы сети и параметров ее режима. На основании этого можно сделать вывод, что тема диссертации Геркусова Алексея Анатольевича является актуальной.

## **2. Степень обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации**

Во **введении** обоснована актуальность темы диссертационной работы, сформулированы цели и задачи исследований, научная новизна; показаны теоретическая и практическая ценность полученных результатов; основные положения, выносимые на защиту.

**Первая глава** диссертации посвящена анализу современных методов расчетов технических потерь электроэнергии в электрических сетях, как в условиях нормальных режимов, так и при отклонении параметров режима от условий допустимости: по уровню несимметрии тока нагрузки и по уровню отклонения напряжения от номинальных величин.

Получена зависимость оптимального расхода электроэнергии от выбранных параметров режима и конфигурации системы электроснабжения, для которых можно добиться минимума технических потерь электроэнергии, без снижения ее полезного отпуска и без сокращения объемов производства промышленной продукции.

При этом предлагается изменить принципы нормирования потерь электроэнергии и определять их норматив как характеристику, зависящую от количества отпущенной электроэнергии, оперативной схемы и параметров режима системы электроснабжения, плотности заполнения графика нагрузки, состава и технических характеристик работающего оборудования.

**Вторая глава** посвящена разработке методов выбора оптимальных параметров электропередачи и ее режима в условиях рыночной экономики.

Показано, что зависимость рентабельности от тока нагрузки фазы ВЛ является дискретной технико-экономической моделью линии, позволяющей осуществлять успешное среднесрочное планирование токовой нагрузки и выбирать оптимальную длину, за пределами которой передача электроэнергии потребителям становится убыточной. Выявлено, что для каждой вновь проектируемой и эксплуатируемой линии существуют области и предел экономической устойчивости, являющийся током нагрузки линии, при превышении которого ее эксплуатация становится нерентабельной.

**В третьей главе** выполняется пофакторный анализ изменения тарифов на электроэнергию, в результате отклонений параметров режима и энергосистемы от их запланированных значений, а также объемов электроэнергии, отпускаемой электростанциями.

При этом установлено, что экономически обоснованные тарифы на электроэнергию не являются постоянной величиной, а зависят от целого ряда технико-экономических показателей и, в первую очередь, от параметров режима электростанций и электрических сетей, цены на топливо и тарифной энергосистемы, а также от параметров самой энергосистемы, регулируемой балансовой прибылью отдельных электростанций и генерирующих компаний в целом, ставки налогов, расхода электроэнергии на собственные нужды и т.п.

**В четвертой главе** рассматриваются вопросы оптимизации сечения и конструкции фаз воздушных линий не только по экономическим требованиям, но и с учетом технических ограничений.

Обосновано применение ВЛ 220 кВ повышенной натуральной мощности взамен установки дополнительных источников реактивной мощности для сильно загруженных по максимальному току линий, но с низкими значениями числа часов использования максимума нагрузки.

Показано, что при существующей на сегодняшний день тарифной политике, применяемые в настоящее время сечения проводов близки к оптимальным и не требуют пересмотра; разработка новой шкалы сечений проводов нецелесообразна.

Отмечено, что двукратное превышение нормированного значения экономической плотности тока вместо увеличения количества цепей сверх необходимого по условиям надежности допустимо для одноцепных ВЛ 220 кВ только для весьма небольших токовых нагрузок данной линии. В случае необходимости сооружения дополнительной цепи, допустимое превышение экономической плотности тока будет составлять меньшую величину.

**Пятая глава** посвящена оптимизации себестоимости и КПД при передаче электроэнергии в электрических сетях. Получена целевая функция и выполнена оптимизация основных параметров режима работы линии электропередачи, при которых ее относительные потери будут минимальны.

Отмечено, что оптимальная токовая нагрузка ВЛ 110-220 кВ, отвечающая минимуму себестоимости передачи электроэнергии, зависит от номинального напряжения ВЛ, времени потерь, типа, материала опор, а также

средневзвешенного тарифа на электроэнергию, сечения проводов и режима энергопотребления. Разработан критерий перехода к линиям повышенной натуральной мощности и подтвержден вывод о его целесообразности при передаче по ВЛ 220 кВ мощности больше натуральной.

Таким образом, изложенное позволяет утверждать, что научные положения, выводы и рекомендации, сформулированные в диссертации, в достаточной мере обоснованы в рассмотренных пяти главах.

### **3. Достоверность научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации**

Разработанные в диссертационной работе научные положения основываются на известных методах математического анализа, линейной алгебры, динамической оптимизации, численных методов, теоретических основ электротехники, экономической теории и реализованы в известных программных средах Mathcad и Excel.

Степень достоверности полученных результатов работы и их обоснованность подтверждается опытом эксплуатации электрических сетей, а также использованием при решении поставленных задач корректных экономических и математических методов, физической обоснованностью применяемых допущений, сопоставлением с известными, опубликованными в научной литературе исследованиями.

### **4. Научная новизна положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации**

В ходе диссертационного исследования получен ряд результатов, имеющих научную новизну. Наиболее важными из них являются:

1. На основании минимизации функции удельных дисконтированных затрат разработана методика нормирования потерь электроэнергии в системах электроснабжения и электросетевого комплекса в целом, позволяющая не только снижать затраты на передачу электроэнергии, но и экономически стимулировать потребителей и энергоснабжающие организации к внедрению предлагаемой методики. Применение статической и динамической оптимизации функции относительных потерь электроэнергии позволило предложить режимные и технические мероприятия по снижению абсолютных и относительных потерь электроэнергии во время реконструкции и развития эксплуатируемой системы электроснабжения и проведения в ней энергосберегающих мероприятий.

2. Разработана методика определения причин возникновения различных видов потерь электроэнергии в воздушных линиях электропередачи 110-500 кВ, позволяющая оценить необходимость и первоочередность проведения намечаемых энергосберегающих мероприятий во время реконструкции и энергетических обследований.

3. Предложен критерий экономической устойчивости для определения условий рентабельной и безубыточной работы линий электропередачи и определены их экономически целесообразные длины.

4. По простым и дисконтированным показателям экономической эффективности капиталовложений разработаны универсальные методы выбора оптимальных сечений проводов воздушных и кабельных линий электропередачи напряжением 110-220 кВ; путем минимизации функции удельных дисконтированных затрат значительно уточнена методика выбора номинального напряжения проектируемой или реконструируемой линии и экономически рационального источника электроснабжения электрифицируемого объекта.

5. На основе оптимального значения целевой функции суммарных дисконтированных затрат и допустимой напряженности электрического поля на поверхности проводов проведена оптимизация сечения и конструкции фаз ВЛ 110-220 кВ и определены условия при которых рекомендуется расщепление фаз и применение линий повышенной натуральной мощности.

Положения, выносимые на защиту, обладают научной новизной и обеспечивают полное представление о проведенных автором в рамках диссертационной работы исследованиях и полученных результатах. Обоснованность научных положений, рекомендаций и выводов, представленных в диссертационной работе Геркусова А.А., не вызывает сомнений.

#### **5. Оценка содержания диссертации, ее завершенности**

Диссертационная работа изложена логически грамотно, автор обосновывает все теоретические выкладки и подтверждает полученные результаты модельными экспериментами и расчетными примерами. Автореферат полностью соответствует диссертационной работе. Теоретические и прикладные результаты диссертации опубликованы в 31 печатных работах, в том числе 13 работ опубликованы в ведущих рецензируемых журналах и изданиях, рекомендуемых Высшей аттестационной комиссией РФ.

Диссертационная работа Геркусова А.А. выполнена на 362 страницах машинописного текста и содержит введение, 5 разделов, заключение, список литературы из 158 наименований, 108 рисунков, 23 таблиц и 3 приложений.

Результаты работы докладывались и получили одобрение на всероссийских и международных научно-технических конференциях, а также были внедрены в Казанском филиале ОАО «Электропроект», Магистральных электрических сетях ФСК ЕЭС Северо-Запада и «Ленинградской областной электросетевой компании» ЛОЭСК (г. Санкт-Петербург), ассоциации «РОСЭЛЕКТРОМОНТАЖ» (г. Москва), а также в акционерном обществе «Зеленодольский завод им. А.М. Горького».

Диссертация содержит все необходимые элементы законченной научной работы: обоснование актуальности темы на основании анализа литературы; выбор инструментов теоретического и экспериментального исследования; разработка методов оптимизации параметров линий электропередачи путем минимизации функции суммарных дисконтированных затрат и относительных потерь электроэнергии, нормирования потерь в электрических

сетях, оптимального планирования и обоснования мероприятий по их снижению; выбор экономически рентабельных длин линий, оптимальных сечений проводов, номинального напряжения и количества цепей при различных условиях эксплуатации и с учетом динамики роста нагрузки; построение альтернативно существующей шкалы экономических плотностей тока; оптимизация сечения и конструкции фазы воздушных линий электропередачи, выработка критерия перехода к ВЛ повышенной натуральной мощности; исследование и минимизация целевой функции себестоимости передачи электроэнергии и относительных потерь мощности и электроэнергии в электрических сетях напряжением до 220 кВ; разработка мероприятий по повышению КПД линий электропередачи.

Полученные Геркусовым А.А. в результате исследований методики, способы и рекомендации следует применять в электросетевых компаниях, научно-исследовательских и проектных организациях, а также в вузах соответствующего профиля для подготовки специалистов в области проектирования электрических сетей и систем электроснабжения.

Все это позволяет сделать вывод о завершенности данной работы.

В качестве дальнейшего направления исследований автору можно рекомендовать развивать предложенный подход к анализу межсистемных линий электропередачи 330-750 кВ.

## **6. Замечания по диссертационной работе**

1) При построении зависимости суммарных относительных технических потерь электроэнергии от годового потребления (рис. 1.3, стр. 29) кривая 7 (черная) резко отличается от остальных по количеству (одна либо восемь) и длине (1 / 4-5 км) отходящих линий, в связи с чем переход из точки А в точку В (одновременное строительство 5-7 линий) не представляется возможным. Точно так же и переход из точки В в точку С маловероятен, поскольку это означает снижение энергопотребления практически в три раза (с 1 300 000 до 350 000 кВт·ч по оси абсцисс). Никакими энергосберегающими технологиями этого достичь не удастся. При этом в пояснениях на стр. 33 ошибочно указано, что относительные потери снижаются с 52 до 8%, на самом деле с 13 (точка А) до 4,5% (точка В).

2) При определении потерь активной электроэнергии от протекания емкостного и рабочего токов в ВЛ 500 кВ (раздел 1.5, стр. 74) не учитываются возможности установки нескольких шунтирующих реакторов (ШР) на протяженных линиях ( $U_{1В} = 529,5$  кВ на стр. 75 при допустимых 475...525) с их последующей коммутацией при изменении режима работы линии, а также возможной установки управляемых реакторов или СТК, в этом случае уровень напряжения на промежуточных подстанциях будет практически неизменным. В этой связи и уровень потерь от емкостных токов (здесь 4.8% на стр. 77) будет существенно ниже.

Аналогично, при расчетах приведенных затрат на сооружение и эксплуатацию ВЛ в главе 4 (формула (4.45), стр. 294) и себестоимости передачи электроэнергии по ВЛ 220 кВ в главе 5 (формулы 5.9 и 5.10), в

диапазоне  $0 \dots P_{\text{нат}}$  предполагается использование обычных ШР (коэффициент  $k_p$ ), а для передачи мощности больше натуральной – ИРМ (то есть, регулируемые средства компенсации и, соответственно, параметр  $k_{\text{ирм}}$ ). Режимы таких ВЛ будут далеки от оптимальных со значительными изменениями напряжения. В качестве примера можно привести выполнение 60-70 коммутаций традиционных ШР мощностью 180 МВар в сутки на транзите 500 кВ «Север-Юг» республики Казахстан.

3) При построении зависимостей суммарных относительных потерь электроэнергии от действующего напряжения для ВЛ 35, 110 и 500 кВ (рис. 1.38-1.40, стр. 121 и табл. 1.7, стр. 118) совершенно непонятно, с какой целью рассматриваются столь значительные изменения напряжения: 17-45 (для класса 35 кВ), 60-130 (110 кВ), 250-600 (500 кВ), в то время как для класса 500 кВ имеет смысл только часть графика в диапазоне 475-525 кВ, а в нем потери растут линейно (рис. 1.40), что не соответствует действительности.

4) Почему кривые для разного поперечного сечения (синяя для  $70 \text{ мм}^2$  и черная для  $150 \text{ мм}^2$ ) в областях экономической устойчивости (рис. 2.6, стр. 166) имеют максимумы при одинаковых значениях  $I_{\text{нб}}$  (наибольший нагрузочный ток линии)? Логично предположить, что при увеличении сечения точка Н должна при прочих равных смещаться вправо в область бóльших токов, как это произошло с зеленой кривой (для  $240 \text{ мм}^2$ ). Увеличение же длины линии или числа цепей может приводить только к изменению максимума данной кривой.

5) Методика построения оптимальных токовых интервалов (стр.188-192) учитывает изменение нагрузки за расчетный период (формула 2.42, стр. 188), но не учитывает возможные аналогичные изменения тарифа ( $\text{Ц}=0,26 \text{ руб/кВт}\cdot\text{ч}$  принят постоянным)

6) При построении зависимостей рекомендуемой мощности перехода  $P_{\text{п}}$  от числа часов использования максимума нагрузки  $T_{\text{нб}}$  (рис. 2.36-2.37, стр. 224-225), какой смысл имеет представленный диапазон оси ординат до 350 МВт, если натуральная мощность линий 110 и 220 кВ равна соответственно 30 и 135 МВт? Фактически это означает, что верхняя половина диаграммы соответствует уже классу напряжения 330, а не 220 кВ.

7) В списке литературы отсутствуют зарубежные источники.

## **7. Заключение по диссертационной работе**

Отмеченные замечания не снижают научной и практической ценности представленной работы. Диссертация Геркусова Алексея Анатольевича выполнена на достаточно высоком уровне, является самостоятельным, целостным исследованием, имеет внутренне единство и является завершенной научно-квалификационной работой. Проведенные автором исследования содержат решение важной и актуальной научно-технической проблемы оптимизации конструктивных и режимных параметров линий электропередачи и систем электроснабжения.

По объему, уровню научных и практических результатов представленная работа соответствует критериям пп. 9-14 «Положения о присуждении ученых



степеней», утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 г. № 842 «О порядке присуждения ученых степеней», предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени доктора технических наук и соответствует Паспорту специальности 05.14.02 – Электрические станции и электроэнергетические системы, а ее автор, Геркусов Алексей Анатольевич, заслуживает присуждения ученой степени доктора технических наук по соответствующей специальности.

**Официальный оппонент,**  
доктор технических наук, доцент,  
профессор высшей школы электроэнергетических систем  
ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический  
университет Петра Великого»

\_\_\_\_\_ Беляев Андрей Николаевич

21 февраля 2022 г.

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого» (ФГАОУ ВО «СПбПУ»)  
195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29.  
Контактные телефоны: +7 (812) 552-50-72; +7 (921) 902-64-17  
Электронная почта: belyaev.a@spbstu.ru, andreybelyaev@yandex.ru

