

## О Т З Ы В

официального оппонента на диссертационную работу

**Беляевского Романа Владимировича**

«Повышение энергоэффективности территориальных сетевых организаций при оптимизации потребления реактивной мощности», представленную на соискание учёной степени кандидата технических наук по специальности 05.09.03 – «Электротехнические комплексы и системы»

Диссертационная работа Беляевского Р.В. состоит из введения, четырёх глав, заключения и 2 приложений. Материал диссертации изложен на 132 страницах машинописного текста и содержит 37 рисунков, 7 таблиц и список литературы, включающий 102 наименования.

По теме диссертации опубликовано 50 печатных работ, включая 12 работ в изданиях, которые рекомендованы ВАК Министерства образования и науки РФ для публикации основных результатов диссертаций на соискание учёной степени кандидата технических наук. Основные положения и результаты работы неоднократно докладывались на международных и всероссийских научно-практических конференциях.

Содержание автореферата отражает основные положения и научные результаты диссертации. Используемая терминология, стиль изложения и оформление диссертационной работы соответствуют нормам, общепринятым в научно-технической литературе.

**Актуальность работы.** На сегодняшний день вопросы энергосбережения являются актуальными не только в России, но и во всем мире. Однако если энергосбережением при потреблении электроэнергии занимались всегда, то вопрос о проведении мероприятий по энергосбережению при передаче и распределении электроэнергии встал перед электросетевыми компаниями наиболее остро совсем недавно. Ежегодное увеличение электропотребления существующими потребителями и вновь подключаемыми абонентами при отсутствии возможности проведения реконструкции распределительных сетей приводит к значительным перегрузкам сетевого оборудования (трансформаторов, линий электропередачи), снижению надёжности передачи и распределения электроэнергии и росту её потерь.

Распределительные сети территориальных сетевых организаций (РС ТСО) характеризуются значительными потерями электроэнергии, обусловленными, как правило, их нерациональным построением. Существенной проблемой является загрузка сетей реактивной мощностью, что также приводит к увеличению потерь электроэнергии. Вместе с тем, Федеральный закон от 23.11.2009 № 261-ФЗ «Об энергосбережении и о повышении энергетической

эффективности...» и Энергетическая стратегия России на период до 2035 года предусматривают реализацию потенциала организационного и технологического энергосбережения в электросетевом комплексе и повышение энергоэффективности передачи и распределения электроэнергии.

В этом отношении решаемая в диссертационной работе задача по снижению потерь электроэнергии в распределительных сетях ТСО и повышению их энергоэффективности при оптимизации потребления реактивной мощности интересна как с практической, так и с научной точки зрения, а тема диссертации, безусловно, является актуальной.

**Содержание работы.** В первой главе проведен анализ текущего состояния РС ТСО, сформулирована актуальность и обозначены направления исследований. Приведена характеристика электросетевого комплекса ТСО, проанализирована структура технологических потерь электроэнергии в электрических сетях, выполнен анализ нормативно-правовой базы в области нормирования и снижения потерь электроэнергии и компенсации реактивной мощности (КРМ), а также основных подходов к снижению потерь электроэнергии в распределительных сетях. На основании проведенного анализа определены основные задачи исследований.

Во второй главе проведено исследование процесса потребления реактивной мощности в РС ТСО. Произведена оценка влияния реактивной мощности на параметры распределительных сетей 6–10 кВ, в результате которой получены зависимости относительных значений пропускной способности, потерь электроэнергии и потерь напряжения от коэффициента реактивной мощности. На основе аналитического метода исследования функциональных зависимостей получены уравнения и исследованы зависимости коэффициента реактивной мощности от коэффициента загрузки силовых трансформаторов и асинхронных двигателей. На основании полученных зависимостей проведена оценка эффективности организационных мероприятий по КРМ, потребляемой силовыми трансформаторами. В ходе расчётов установлено, что замена малозагруженных трансформаторов значительно снижает потери электроэнергии в РС ТСО и обеспечивает высокий экономический эффект, который составит 614,58 тыс. руб./год при сроке окупаемости менее 2 лет.

В третьей главе рассмотрены технические мероприятия по КРМ, связанные с установкой компенсирующих устройств (КУ) в электрических сетях. Рассмотрено описание задачи оптимизации размещения КУ с позиции системного подхода. На основании теории многоуровневых систем предложена иерархическая модель оптимизации размещения КУ (в первую очередь, конденсаторных батарей – КБ) в РС ТСО, позволяющая более чётко структурировать задачу на разных этапах ее реализации. Математически сформу-

лирована задача оптимизации размещения конденсаторных батарей в РС ТСО и произведен выбор метода оптимизации. В результате анализа установлено, что в наибольшей степени требованиям точности, полноты и удобства реализации для решения задачи оптимизации размещения КБ в РС ТСО отвечает метод неопределенных множителей Лагранжа. На основе данного метода получена система уравнений, решение которой позволяет получать оптимальные значения мощности, загрузки КБ, установленных в узлах сети, при обеспечении минимума потерь активной мощности. Также разработан алгоритм оптимизации размещения КБ с использованием метода неопределенных множителей Лагранжа, учитывающий предварительную оценку коэффициентов загрузки силовых трансформаторов в РС ТСО.

В четвертой главе подробно описано создание имитационной модели РС ТСО. С помощью разработанной модели произведена оценка эффективности оптимизации мест установки и загрузки КБ на основе предложенного алгоритма. Установлено, что в результате оптимизации на стороне 6 кВ потери электроэнергии в РС ТСО при среднем коэффициенте загрузки трансформаторов  $\beta = 0,15$  снизились на 15,7 %, при  $\beta = 0,502$  – на 3,3 %; на стороне 0,4 кВ потери при среднем коэффициенте загрузки трансформаторов  $\beta = 0,15$  уменьшились на 16,7 %, при  $\beta = 0,502$  – на 4,3 %. Также произведен расчет экономического эффекта. Полученные результаты свидетельствуют о высокой эффективности предложенного алгоритма.

Содержание работы полностью отражает все научные положения, выносимые на защиту.

**Обоснованность и достоверность научных положений, выводов и рекомендаций**, сформулированных в диссертации, подтверждается корректным применением математических методов оптимизации и моделей, адекватность которых реальным процессам подтверждена результатами экспериментальной проверки теоретических выводов на имитационной модели РС ТСО, построенной на основании фактических данных о нагрузках сети, полученных по показаниям приборов учёта, а также согласованностью результатов моделирования с экспериментальными данными. Положительные результаты, полученные при оптимизации размещения и загрузки КБ с использованием разработанной имитационной модели РС ТСО, подтверждают обоснованность предложенных научных положений, выводов и технических решений.

**Научная новизна работы** заключается в следующем:

1. Впервые получены зависимости относительного изменения параметров электрической сети – пропускной способности, потерь электроэнергии и потерь напряжения – при изменении коэффициента реактивной мощности.

2. Определены оптимальные диапазоны нагрузок, при которых целесообразно производить замену малозагруженных силовых трансформаторов и асинхронных двигателей менее мощными, отличающиеся от принятых на практике меньшим критическим значением коэффициента загрузки.

3. Разработан алгоритм оптимизации размещения и загрузки КБ в РС ТСО, основанный на методе неопределенных множителей Лагранжа, отличающийся от известных алгоритмов предварительной оценкой коэффициентов загрузки силовых трансформаторов.

4. Построена имитационная модель РС ТСО, отличающаяся от известных моделей возможностью осуществлять управление реактивной мощностью в сети в зависимости от коэффициентов загрузки трансформаторов.

**Практическая значимость работы** заключается в получении обоснованного алгоритма оптимальной КРМ в РС ТСО. Имитационная модель РС ТСО позволяет производить выбор мощности и мест установки КБ в существующей электрической сети с целью минимизации потерь электроэнергии, а также осуществлять управление реактивной мощностью в зависимости от коэффициента загрузки силовых трансформаторов. Полученные результаты могут использоваться при разработке программ энергосбережения в электросетевом комплексе.

По диссертационной работе имеются следующие вопросы и замечания:

1. Утверждение о принадлежности проектной задачи к классу задач безусловной оптимизации является ошибочным. Сформулированная в диссертационной работе проектная задача оптимизации краткосрочного развития в статической постановке и оптимизационная задача, решённая в эксплуатационной постановке, относятся к классу задач нелинейного математического программирования.

2. В диссертационной работе отсутствует анализ свойств функций цели, ограничений и матрицы Якоби. В таком случае всякое общее решение системы уравнений, отражающей необходимое условие экстремума, является только «подозрительным» на экстремум функции Лагранжа. В связи с этим – является ли полученное решение собственно оптимальным, т.е. допустимым и глобальным?

3. Решение оптимизационной задачи выполнено в предположении непрерывности оптимизируемых переменных и является теоретическим. Учёт

дискретности мощностей КБ даёт решение более приближённое к практическому. Оценка погрешности реализации задачи отсутствует.

4. Центральным при решении данной оптимизационной задачи (особенно в эксплуатационной постановке) является учёт всего множества электрических режимов – многорежимности электросетевого объекта на анализируемом (отчётном) интервале времени, их интегральных характеристик. Каким образом осуществляется переход от потерь мощности к потерям электрической энергии? Как учитывались диапазоны изменения реактивной мощности источников и напряжений в узлах, как формировался режим (графики) работы КБ?

5. Решение оптимизационной задачи в эксплуатационной постановке на отчётном интервале времени  $T$  сводится к последовательному расчёту оптимального режима для каждого интервала постоянства электрических нагрузок и связано с суммированием экономических характеристик режимов. В связи с этим неясно – сколько характерных режимов  $N$  принято к реализации? Следует отметить, что расчёт одного-двух режимов даёт лишь оценочное решение, обработка же большого количества режимов делает данную задачу чрезмерно громоздкой. Обоснования количества характерных режимов не приводится.

6. В представленном диссертантом решении (с.108) задачи в эксплуатационной постановке определяются не оптимальными значениями устанавливаемых мощностей КБ, а оптимальные загрузки и места установки существующих компенсирующих устройств, располагаемых предприятием. Какая суммарная установленная мощность КБ учитывалась в балансовых ограничениях на интервалах стационарности нагрузок? Отмечу, что выбор мест и устанавливаемых мощностей КБ без ограничения на суммарную мощность КБ предопределяет учёт в целевой функции инвестиционной составляющей.

7. Эффективность решения данной задачи, стимулирующей снижение потерь электроэнергии, в многом определяется точностью определения, расчёта потерь электроэнергии. Применение для этой цели метода времени наибольших потерь, ориентированного на проектные расчёты, в которых потери электроэнергии не являются главным доминирующим критерием, может привести к чрезмерным ошибкам. Принятие произвольного времени  $\tau$ , приемлемо точно учитывающим многорежимность в разомкнутых электрических сетях, уменьшает доверие к оценке экономической эффективности.

8. Разработка имитационной модели РС ТСО является недостаточно продуктивной для использования и применения данной модели для большого объёма расчётов реальных распределительных сетей.

**Заключение.** В целом, диссертационная работа выполнена на высоком научно-техническом уровне и представляет собой законченное научное исследование, в результате которого решена актуальная задача снижения потерь электроэнергии в РС ТСО. Отмеченные недостатки не снижают ценности данной работы для науки и практики.

На основании вышеизложенного считаю, что диссертационная работа «Повышение энергоэффективности территориальных сетевых организаций при оптимизации потребления реактивной мощности» соответствует требованиям ВАК Министерства образования и науки РФ, установленным пп.9-14 Положения о присуждении учёных степеней для кандидатских диссертаций, а её автор **Беляевский Роман Владимирович** заслуживает присуждения ему учёной степени кандидата технических наук по специальности 05.09.03 – «Электротехнические комплексы и системы».

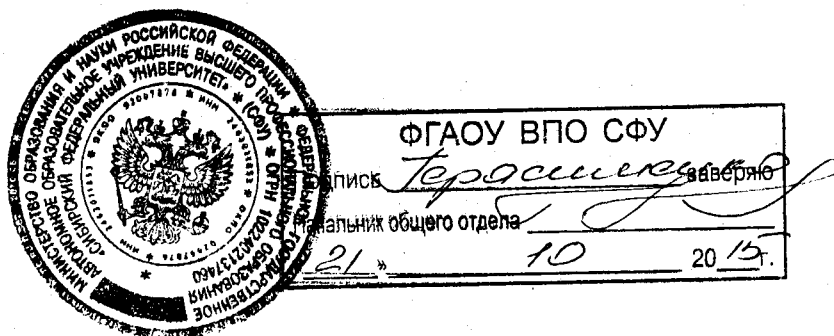
Официальный оппонент,

кандидат технических наук, профессор

*А. Герасименко*

Герасименко Алексей

Алексеевич



Шифр и наименование специальности: 05.14.02 – «Электростанции и электроэнергетические системы».

Наименование организации: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Сибирский федеральный университет».

Должность: профессор кафедры электрических станций и электроэнергетических систем.

Адрес организации: 660041, г. Красноярск, пр. Свободный, 79/10.

Адрес электронной почты: [gerasimenkoa@yandex.ru](mailto:gerasimenkoa@yandex.ru)

Телефон: +7 (391) 227-08-56, +7 (391) 249-73-97