

**Хрущев Юрий Васильевич,**  
доктор технических наук, профессор,  
ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский  
Томский политехнический университет»,  
Инженерная школа энергетики,  
Отделение электроэнергетики и электротехники,  
профессор

## **ОТЗЫВ**

официального оппонента  
на диссертацию Герасименко Алексея Алексеевича  
«Статистическая методология моделирования многорежимности  
в задаче оптимальной компенсации реактивных нагрузок систем  
распределения электрической энергии»  
на соискание учёной степени доктора технических наук по специальности  
05.14.02 «Электрические станции и электроэнергетические системы»

**1. Актуальность темы диссертации** обусловлена тем, что в последние годы в связи с введением новых нормативных документов в части условий потребления и компенсации реактивной мощности и директивных постановлений в области энергосбережения возникла необходимость в обосновании коэффициентов реактивной мощности для различных узлов электроэнергетических систем, оптимальные значения которых способствуют достижению системного технико-экономического эффекта в виде уменьшения потерь электрической энергии и нормализации уровней напряжений в сетях, и следовательно снижения себестоимости транспорта электрической энергии и роста возможностей сетей.

Регулирование реактивной мощности является одним из наиболее действенных мероприятий по снижению потерь электрической энергии и тем самым полностью соответствуют политике энерго - и ресурсосбережения, проводимой в последние годы российскими энергокомпаниями. Наибольшего эффекта от снижения потерь можно добиться путём определения оптимальных мест размещения и устанавливаемых мощностей компенсирующих устройств как в эксплуатируемых, так и проектируемых сетях и системах, а также при оптимальном распределении реактивных мощностей существующих источников. При этом нетрудоёмкий учёт всего многообразия электрических режимов на рассматриваемых интервалах времени принципиально важен для полного решения рассматриваемой оптимизационной задачи, имеющей проблемный уровень. Поэтому тему диссертации, направленную на создание статистической методологии нетрудоёмкого моделирования и учёта многорежимности в задаче оптимальной компенсации реактивных нагрузок систем распределения электрической энергии, характеризующихся дефицитом реактивной мощности и наибольшими потерями, с полным учётом многорежимности, следует считать актуальной.

**2. Анализ содержания и структуры диссертации.** Диссертация состоит из введения, шести глав, заключения, списка использованной литературы и

приложений. Изложена на 344 страницах основного текста, содержит список литературы из 333 наименований, 13 приложений, 30 рисунков и 41 таблицу.

Введение содержит достаточно полное обоснование актуальности и значимости решения проблемы оптимальной компенсации реактивных нагрузок, изложены основные положения данной проблемы с анализом ряда ранних и новых нормативных документов, кратко обоснована актуальность и необходимость учёта многорежимности в решении данной проблемы при функционировании и краткосрочном развитии систем распределения электрической энергии. Сформулированы научная новизна и основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе представлены общая и математическая постановки оптимизационной задачи и результаты проведённого автором анализа методов оптимизации электрических режимов и расчёта потерь электрической энергии в распределительных сетях энергосистем. Отдельно следует отметить глубокое изучение соискателем сути проблемы компенсации реактивной мощности, её исторического развития и причин возникновения в распределительных сетях единой энергосистемы страны, а также состояния проблемы в некоторых зарубежных странах.

Вполне обоснована постановка данной динамической задачи в терминах нелинейного математического программирования с чётко математически очерченным преобразованием в статическую с приемлемым по сути учётом динамики развития на основе скользящего планирования (адаптивного подхода). Наряду с данным учётом динамического характера задачи диссертант предложил учитывать множество режимов расчётами их интегральных характеристик без существенной потери точности. Эффективность предложенной стратегии решения, как показано в последующих главах диссертации, предопределена применением статистического подхода для сжатого и нетрудоёмкого моделирования множества режимов, используя идеи и принципы факторного анализа. Предложенный диссертантом новый подход в части моделирования и учёта всей совокупности режимов создаёт основу для успешного решения данной проблемы как в эксплуатационной, так и проектной постановках. В последнем общем случае в качестве целевого принят критерий приведенных затрат, проверенный многолетней отечественной практикой и преобразованный к существующим экономическим реалиям. Из ряда проанализированных подходов и направлений решения задач оптимизации принят к развитию метод обобщённого приведенного градиента как наиболее успешно применяемый в отечественной и зарубежной практике. В качестве замечания (предложения) можно отметить, что эволюционные и генетические алгоритмы хорошо приспособлены к определению мест установки источников реактивной мощности и их вполне можно было бы использовать и исследовать в данной работе.

Во второй главе диссертации выполнено обобщение применения факторного анализа для моделирования графиков электрических нагрузок и впервые предложено использование данного подхода для моделирования электропотребления на месячном (произвольном) интервале времени. Данное статистическое моделирование подробно рассмотрено на базе ортогонального преобразования матрицы корреляционных моментов и построение на его основе общего

алгоритма для расчёта потерь электрической энергии, моделирования неизвестных графиков нагрузок и определения необходимых для оптимизации интегральных параметров множества режимов. По результатам решения проблемы собственных значений получены, выделены главные компоненты - обобщённые графики нагрузок (ОГН) (2.20, 2.21) и , отражающие закономерности изменения нагрузок и обладающие свойством статистической независимости (ортogonalности). С учётом обоснованного и доказанного по результатам исследований свойства статистической устойчивости исходные графики нагрузок моделируются с приемлемой для практики точностью (со средней погрешностью в различных выборках от 1,5 до 4.0 %), отражая тремя-четырьмя ОГН до 85 - 95 % полного рассеяния исходных нагрузок (2.31).

К несомненному достоинству данного алгоритма следует отнести представленную автором модифицированную факторную модель (2.25) - (2.27), которая позволяет моделировать неизвестные графики для так называемой области неопределенности (неполноты)режимных параметров, что в отсутствие АИИС КУЭ, данных контрольных замеров, характерно для значительной части распределительных сетей.

В третьей главе получены расчётные выражения интегральных характеристик множества режимов на интервале времени: потерь электрической энергии, графиков (диаграмм), диапазонов изменения анализируемых реактивной мощности источников и напряжений в пунктах сети, полученные на основе статистического моделирования матрицы корреляционных моментов и графиков нагрузок. Данные характеристики, взаимосвязи и алгоритмы их получения образуют представленную в диссертации модифицированную стохастическую модель множества установившихся режимов электрической сети произвольной конфигурации. Данное факторное сжатое отображение многорежимности электрических систем являются центральным результатом рецензируемой диссертационной работы и составляют основу полученного эффективного решения целевой задачи компенсации реактивных нагрузок. Поскольку определение интегральных характеристик выполняется за один расчёт установившегося режима по математическим ожиданиям нагрузок (в том числе и учёт ограничений на траектории оптимизации) и не требует проведения вычислений по интервалам постоянства графиков нагрузок.

Основное назначение четвёртой главы представить разработанных диссертантом комплекс методов и алгоритмов, направленных на снижение систематических погрешностей расчёта потерь электрической энергии. Предложено четыре алгоритма определения фактической температуры и активного сопротивления проводов и жил кабелей с учётом рабочего тока и температуры окружающей среды, а для воздушных линий по данным скорости ветра и солнечного излучения. За основу приняты традиционные уравнения теплового баланса, а также предложен алгоритм, использующий дифференциальные уравнения теплопроводности. Особо следует выделить алгоритм определения температуры жил кабелей 6 -220 кВ с учётом видов конструкций и условий прокладки и полученные аналитические зависимости для определения температуры жил, что тем более ценно, т.к не существует прямого способа (непосредственно, без расчётов) измерения температуры жил. По результатам расчётов следует отметить

достаточную точность предложенных алгоритмов: средняя погрешность для жил менее 5 °С, учёта солнечного излучения на потери электрической энергии до 2%. Вместе с тем, сложности получения данных о продолжительности учитываемых погодных условий снижает для ВЛ объективность полученных оценок. Установление значений поправочных коэффициентов для суточного и месячных интервалов к выражениям детерминированного и стохастического вида, динамических поправок в зависимости от структуры и загрузки схемы, применение комбинированного подхода позволяет минимизировать ошибки расчёта нагрузочных потерь до 0, 5% и разбросом до 2,5 % с общетехнической достоверностью 0,95, и в итоге свидетельствует о разработке полезного добротного аппарата.

В пятой главе представлен разработанный диссертантом градиентный метод решения задачи оптимальной компенсации реактивных нагрузок в двух постановках: оптимального функционирования и оптимального развития систем распределения электрической энергии. С единых методических позиций и математически строго в основе на методе приведенного градиента применительно к однорежимной задаче и разработанной стохастической модели анализа установившихся режимов (3.12) - (3.26), (3.29) - (3.33) диссертантом получено выражение обобщённого приведенного градиента (5.41) и всех составляющих оптимизационного алгоритма со стохастическим моделированием и учётом всей совокупности режимов на интервале времени (5.42) - (5.58)). Предложенный алгоритм позволяет за один расчёт по средним нагрузкам найти оптимальные загрузки установленных источников реактивной мощности, устанавливаемые мощности и загрузки проектируемых компенсирующих устройств, графики их временной загрузки, значения потерь электрической энергии в исходном и оптимальном режимах. Введение в алгоритм интегральных характеристик (3.22), (3.30) - (3.33), предложенный рациональный выбор состава переменных (5.5), (5.34) и нетрудоёмкая смена базиса определяют надёжность контроля выполнения балансовых и интервальных ограничений, сходимости итерационной процедуры и эффективность алгоритма решения данной задачи в целом. Представлено принципиальное решение проектной задачи оптимального выбора ИРМ на примере сети напряжением ПО кВ: получены оптимальная установленная мощность КУ и соответствующее наименьшее значение расчётных затрат и её составляющих. Составив алгоритм выбора источников реактивной мощности, и выполнив экспериментальные расчёты, соискатель тем самым подтвердил научную значимость выполненных исследований.

Диссертант продемонстрировал высокий уровень аналитического представления данной задачи. Результаты данной главы заслуживают особого внимания и высокой оценки.

Шестая глава содержит обобщения представленных в диссертации алгоритмов в программных разработках автора и иллюстрации практического применения разработанных диссертантом программ для ЭВМ в решении задач анализа и оптимизации режимов, оптимальной компенсации реактивной мощности; представлены детальные блок-схемы программных модулей. Рассмотрены результаты практического применения программ REG10PVT, SETI, ORES A на примере расчёта потерь электрической энергии в распределительных сетях предприятий ОАО «Красноярскэнерго». Расчёты на реальных схемах показали

эффективность разработанных алгоритмов и программ стохастической оптимизации, возможность их применения при решении эксплуатационных задач анализа и оптимизации режимов сетей. В итоге приводится оценка точности на примере эквивалента реальной системы распределения электрической энергии напряжением 220 кВ, составляющей центральную часть Красноярской энергосистемы. Проверка программ, оценка точности полученных расчётных интегральных характеристик по рассмотренным алгоритмам, выполненная методом статистических испытаний на репрезентативном множестве схем сетей, подтвердила правильность заложенных в алгоритмы принципов, работоспособность и приемлемую для практического анализа форму представления результатов.

В заключении диссертант формулирует главный вывод о разработке комплекса вычислительных методов и практических алгоритмов статистического учёта и моделирования многорежимности в эксплуатационной и проектной постановках задачи оптимальной компенсации реактивных нагрузок систем распределения электрической энергии. Данный комплекс формирует единую методологию решения данной проблемной задачи. С этим выводом диссертанта следует согласиться.

**3. Методологическая основа исследований.** Полученные в диссертации научные результаты базируются на основных положениях теории и принципах системных исследований в энергетике. Применение системных положений определило логику, направление и методики исследований, взвешено и последовательно реализованных диссертантом. Чётко определена проблемная область актуальных решений, предложена и разработана соответствующая методология сжатого учёта многорежимности в алгоритмах анализа множества режимов и вычисления их интегральных характеристик, оптимизации эксплуатационных и проектных решений. В работе предложен метод использования факторного анализа для решения на ЭВМ задач классификации признаков, определяющих изменения электрических нагрузок, через небольшое число некоррелированных между собой главных факторов - обобщённых графиков нагрузок. Квалифицированное использование метода главных компонент -компонентного анализа (разновидность факторного) обеспечивает уменьшение временных затрат на работу предложенных программ фактически без потери точности. Достигнутый результат стал основой новых решений в области теории и методов постановки и решения задач нелинейного математического программирования. На основе принципиальных положений и теории градиентных методов решения однорежимных задач, расчётов стационарных режимов электроэнергетических систем, эталонной сути метода статистических испытаний диссертант обосновал направление развития методических основ метода приведенного градиента для эффективного решения задач анализа и оптимизации электрических режимов без непосредственного расчёта всей совокупности электрических состояний.

**4. Научная новизна результатов.** Решена научно-техническая проблема создания статистической методологии компактного нетрудоёмкого учёта и анализа множества установившихся режимов (многорежимности) в задаче оптимальной компенсации реактивных нагрузок в системах электроснабжения и

распределения электрической энергии. Представлено решение названной задачи в эксплуатационной и проектной постановках. Наиболее существенные научные результаты, полученные в процессе создания такой статистической методологии, заключаются в следующем:

4.1. Сформулированы методические основы формирования минимизируемого динамического функционала - расчётных (приведенных) затрат на развитие и функционирование сети, применительно к задаче оптимальной компенсации реактивных нагрузок как задачи краткосрочного оптимального развития. На основе адаптивного подхода предложен метод решения динамической задачи, использующий преимущества статических решений.

4.2. Получена модифицированная вероятностно-статистическая обобщённая модель электрических нагрузок, представленная в виде системы некоррелированных обобщённых графиков нагрузок и отражающая общие закономерности изменения мощностей исходной совокупности нагрузок.

4.3. Разработаны методики и алгоритмы расчёта интегральных характеристик электрических режимов, позволяющие учесть всю совокупность электрических режимов без традиционного выполнения множества интервальных расчётов установившихся режимов с достаточной для практических целей точностью.

4.4. Разработан уточнённый детерминированный метод и алгоритм расчёта и анализа потерь электрической энергии на основе реальной информации о многорежимности и разработанных алгоритмах учёта ряда, схемно-структурных и режимно-атмосферных факторов.

4.5. Предложены комбинированные алгоритмы расчёта технических потерь электроэнергии на основе объединения детерминированного и стохастического методов, использующий их возможности и существенно компенсирующий их недостатки.

4.6. Разработана модификация метода обобщённого приведенного градиента при стохастическом моделировании многорежимности, на основе которой впервые предложен алгоритм и создана программа ORESA для ЭВМ стохастической (совмещённой) оптимизации с учётом многорежимности решения эксплуатационной задачи оптимального функционирования, не прибегая к оптимизации режимов на каждом интервале стационарности нагрузок.

4.7. Предложены методика и алгоритм оптимального выбора ИРМ, разработанные на основе обобщения данных результатов исследований, позволяют решить проектную задачу краткосрочного планирования развития систем распределения электрической энергии.

**5. Обоснованность, достоверность основных научных положений и выводов диссертации.** Достоверность полученных результатов определяется корректным использованием принципов и методов математического моделирования, вероятностно - статистического (факторного, корреляционного, регрессионного) анализа и моделирования, нелинейного математического программирования, вычислительного и производственного экспериментирования, а также сходимостью результатов, полученных различными методами. Научная обоснованность разработанных алгоритмов подтверждена экспериментально с использованием различных схем и реализаций метода статистических испыта-

ний на тестовых и реальных схемах электрических сетей, с использованием результатов, полученных по лицензированным программам.

Вывод 1 обоснован, поскольку опирается на анализ аналитической и экономической сути проблемы компенсации реактивных нагрузок и стимулируется введением соответствующих нормативных документов.

Вывод 2 практически значим. На основе применения адаптивного подхода (скользящего планирования), нетрудоёмкого учёта многорежимности и преобразования динамической задачи в поэтапно решаемую статическую, обоснованы направления и средства практического решения данной проблемы.

Вывод 3 достоверен и практически значим, а разработанные положения представляют научную новизну, так как разработана научная база моделирования восстановления и учёта многорежимности, что особенно важно применительно к системам распределения электрической энергии.

Вывод 4 дополняет и частично дублирует предыдущий и может быть опущен.

Вывод 5 достоверен, практически значим и указанные результаты научно состоятельны, поскольку получен практический инструмент (методики и алгоритмы) невысокой трудоёмкости решения научной задачи учёта многорежимности при расчёте интегральных характеристик множества режимов с высокой надёжностью (с погрешностью до 1 % и вероятностью 0,95).

Вывод 6 достоверен, практически значим и научно состоятелен, так как получена уточнённая методика и алгоритм расчёта классическим детерминированным методом потерь электрической энергии с минимизацией методических ошибок на основе разработанных алгоритмов учёта ряда схемно-структурных и режимно-атмосферных факторов; данные результаты реализованы в программно-вычислительном комплексе, имеющем многолетнее применение.

Вывод 7 достоверен, практически значим, поскольку использование наряду с детерминированной стохастической информации даёт более строгое решение, чем при детерминированном подходе с возможностью минимизации погрешности потерь до близкого к нулевому значению и разбросом в пределах ошибок данных; разработанные положения имеют научное значение.

В выводе 8 установлено, что разработанные алгоритм и программа OPRES оптимизации отдельных режимов по реактивной мощности и напряжению даёт результаты, идентичные результатам применяемых в России программных комплексов, что создаёт основу для разработки программно-вычислительного аппарата оптимизации с моделированием всей совокупности режимов. Вывод практически значим.

Вывод 9 достоверен, практически значим и научно состоятелен, поскольку разработаны модификация метода обобщённого приведенного градиента, алгоритм и программа оптимальной компенсации реактивных нагрузок при управлении функционированием распределительных сетей с учётом всей совокупности режимов.

Вывод 10 достоверен, практически значим, а указанные результаты, научно состоятельны, так как предложены методика и алгоритм оптимальной компенсации реактивной мощности в задаче планирования оптимального краткосрочного развития с минимизацией целевой функции приведенных затрат.

Доказана методологическая обоснованность и практическая состоятельность стохастического решения данной проблемы.

**6. Практическая значимость.** Наиболее существенными научными результатами, полученными лично соискателем и имеющими практическое значение, являются:

- программно-вычислительный комплекс расчёта установившихся режимов и технических потерь электрической энергии и других интегральных характеристик режимов POTERI VI. 1: SETI, REG10PVT, принятый в эксплуатацию на ряде предприятий ОАО Красноярскэнерго, АО Хакасэнерго и используемый в учебном процессе СФУ (приложение Н диссертации);

- программа стохастической оптимизации множества режимов ORESA, предназначенная для оптимального распределения реактивных нагрузок существующих источников на интервале времени и принятая в опытную эксплуатацию проектной организацией г. Красноярска;

- методика и алгоритм оптимального выбора источников реактивной мощности, которые позволяют определять мощности новых компенсирующих устройств с минимальными затратами реализацией технико-экономического эффекта и могут быть использованы в сетевых компаниях и проектных организациях.

Программный аппарат для ЭВМ зарегистрирован на государственном уровне (приложение М диссертации). Кроме того, три учебных пособия автора, имеющие грифы высокого уровня, выпущены в издательствах г. Москва и г. Ростов-на-Дону значительным тиражом в течение 2006 -2016 годов.

**7. Замечания по диссертации.** Имеются следующие замечания и вопросы:

1. Вид источника реактивной мощности принимается в качестве исходных данных и не рассматривается вопрос выбора вида компенсирующего устройства в связи с особенностью режима конкретного узла распределительной системы.

2. Неясно, выполнялась ли оценка влияния коммутаций в сетях на результаты решений по выбору оптимальной загрузки источников реактивной мощности?

3. Применение адаптивного подхода следовало бы дополнить поэтапными расчётами, уточняющими предыдущие решения.

4. В работе даётся оценка погрешностей нагрузочной составляющей потерь электрической энергии, однако на практике реальную ценность имеют технические потери в целом.

5. Каким образом учитывается многорежимность при определении и анализе потерь электрической энергии холостого хода трансформаторов?

Данные замечания не ставят под сомнение ценность научных и практических результатов диссертации, представленных в 90 работах, в том числе в изданиях РАН, центральных отраслевых и вузовских журналах. Из 45 наиболее значимых публикаций диссертанта, указанных в автореферате, 20 статей опублико-



ваны в журналах Перечня изданий, рекомендованных ВАК, две работы индексируются в Scopus и Web of Science; выпущено две монографии, получены три свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ. Материалы диссертации в работах отражены достаточно полно. Автореферат диссертации отражает основные положения диссертационной работы, полностью соответствует её тексту. Диссертация написана правильным русским языком, технически грамотно, на достойном математическом уровне.

**8. Заключение** о соответствии диссертации требованиям. Диссертационная работа А.А. Герасименко является законченной научно-квалификационной работой, которую можно квалифицировать как научное достижение в разработке прикладных математических методов решения актуальных задач электроэнергетики России. Диссертация А.А. Герасименко соответствует паспорту научной специальности 05.14.02 – Электрические станции и электроэнергетические системы: пункты П.6, П.7, П.13.

Диссертационная работа «Статистическая методология моделирования многорежимности в задаче оптимальной компенсации реактивных нагрузок систем распределения электрической энергии» соответствует п.п. 9-14 «Положения «О порядке присуждения учёных степеней», а её автор Герасименко Алексей Алексеевич заслуживает присуждения учёной степени доктора технических наук по специальности 05.14.02 – Электрические станции и электроэнергетические системы.

Официальный оппонент,  
профессор инженерной школы энергетики  
Федерального государственного автономного  
образовательного учреждения высшего образования  
Национального исследовательского  
Томского политехнического университета  
доктор технических наук,  
профессор

*Ю. В. Хрущёв*  
29.10.2018

Хрущёв Юрий Васильевич

Адрес: 634150, г. Томск, пр. Ленина, д.30,  
ФГАОУ ВО НИ ТПУ  
E-mail: [tpbalex13@tpu.ru](mailto:tpbalex13@tpu.ru) . [ELTI@enin.tpu.ru](mailto:ELTI@enin.tpu.ru)  
Сайт: <http://tpu.ru/>  
тел.: 9(3822) 653 787

Подпись Ю.В. Хрущёва удостоверяю  
Учёный секретарь Национального исследовательского  
Томского политехнического университета



*О. А. Ананьева*  
Ананьева Ольга Афанасьевна