

## ОТЗЫВ

официального оппонента  
**Коровкина Николая Владимировича**  
на диссертационную работу  
**Васьковской Татьяны Александровны**  
**«Анализ оптимальных режимов электроэнергетических систем  
на основе множителей Лагранжа»,**  
представленной на соискание ученой степени  
доктора технических наук  
по специальности *05.14.02 – Электрические станции и  
электроэнергетические системы*

### Актуальность избранной темы

В современных условиях оптимизация режимов электроэнергетических систем (ЭЭС) проводится не только для целей оперативно-диспетчерского управления технологическими режимами ЭЭС, но и для обеспечения экономических расчетов между субъектами электроэнергетики – участниками рынка электроэнергии. Экономическими характеристиками оптимального распределения мощности являются множители Лагранжа к мощностным балансовым уравнениям. Их использование в нашей стране на рынке электроэнергии в качестве нерегулируемых цен обусловило появление ряда исследовательских задач выделения компонент множителей Лагранжа, характеризующих тот или иной фактор их формирования, кластеризации узлов ЭЭС и идентификации зон в ней, повышения предсказуемости при прогнозировании цен.

Традиционная декомпозиция множителей Лагранжа обладает рядом недостатков: зависимостью от балансирующего (референтного) узла, отсутствием физического смысла компонент и отсутствием связи полученных компонент с входными ценовыми параметрами целевой функции. Известные модификации классического метода декомпозиции множителей Лагранжа – использование распределенного балансирующего узла, выбор референтного или распределенного балансирующего узла по различным критериям оптимальности призваны лишь решить первый вопрос зависимости от референтного узла, но проблема отсутствия физического смысла компонент множителей Лагранжа осталась нерешенной. Иные подходы к декомпозиции также не решили эту проблему. Поэтому особенно важно, что в диссертационной работе проведены исследования взаимосвязи между ними и технологическими параметрами оптимальных режимов на основе математических методов в электроэнергетике. Также, кроме устранения названных недостатков, предложена физическая интерпретация множителей Лагранжа.

Разработанный автором новый метод взвешенной декомпозиции множителей Лагранжа, основанный на рассмотрении установившегося оптимального режима ЭЭС с балансированием активной мощности в регулирующих узлах ЭЭС, позволяет на его базе идентифицировать краткосрочные и долгосрочные зоны (кластеры узлов) влияния на узловыe цены ограничений сети и ограничений по напряжению в ЭЭС, создавать регрессионные эквивалентные модели ЭЭС, позволяющие моделировать перспективные цены и стоимость электроэнергии.

Диссертационная работа, заключающаяся в разработке методов анализа оптимальных режимов ЭЭС и выявлении системы закономерностей между множителями Лагранжа и

параметрами оптимальных режимов, является актуальной и направленной на развитие, как теоретических основ управления режимами ЭЭС в рыночных условиях, так и практических приложений на рынках электроэнергии.

### **Научная новизна исследования и представленных результатов**

*В первой главе* приводится полная нелинейная задача оптимизации установившихся режимов ЭЭС, рассматриваемой в диссертации. Выбор ограничений задачи в полной мере отражает ситуацию на рынке в России. Проведен анализ необходимых условий оптимальности и предложена новая классификация узлов, основанная на взаимосвязи оптимального режима и множителей Лагранжа. Введен новый термин для узлов, множители Лагранжа в которых берется из соответствующего ценового параметра целевой функции. Показано, что данные узлы являются балансирующими или регулируемыми.

*Во второй главе* разработаны схемы взаимосвязи зависимых и независимых переменных в оптимальных режимах с использованием новой классификации узлов. Разработаны математические модели чувствительности относительно реакций, когда реакции рассчитываются напрямую из системы линейных уравнений, и относительно воздействий, когда реакции определяются в виде линейной комбинации управляющего базиса воздействий. Модели чувствительности рассматриваются автором для последующего анализа множителей Лагранжа, которые по сути являются частными производными целевой функции к правой части соответствующих ограничений.

*В третьей главе* разработан метод взвешенной декомпозиции, который основан на представлении оптимального режима в виде установившегося режима ЭЭС с регулируемыми узлами, балансирующими изменения активной мощности. Именно такое представление позволяет автору использовать аппарат анализа режимов ЭЭС для анализа множителей Лагранжа. Далее, автор представляет эти множители в виде режимной компоненты, компонент влияния ограничений на поток мощности в контролируемых сечениях, компонент ограничений по напряжению. Таким образом, предложена декомпозиция множителей Лагранжа на компоненты, каждая из которых имеет физическую и экономическую интерпретацию. Физическая формируется на основании отклика регулирующих узлов, экономическая определяется параметрами целевой функции (ценами в заявках на продажу или покупку электроэнергии).

*В четвертой главе* рассматриваются области применения математических моделей чувствительности и метода взвешенной декомпозиции множителей Лагранжа для решения различных задач применительно к оптовому рынку электроэнергии. Автором показано, что метод взвешенной декомпозиции эффективно использовать при анализе узловых цен рынка на сутки вперед, когда возникают вопросы о разнице узловых множителей Лагранжа, формировании достаточно высоких и низких множителей Лагранжа, множителях Лагранжа в смежных узлах, находящихся на границах энергосистем, и других сложных случаев ценообразования.

Изучаемая задача оптимизация дополнена суточными ограничениями выработки электроэнергии гидроэлектростанциями и ограничениями на сброс/набор мощности. Метод взвешенной декомпозиции сформулирован для суточных режимов с межчасовыми ограничениями. Также автором рассматривается возможность управления множителями Лагранжа путем применения гибких систем электропередачи и компенсирующих устройств реактивной мощности.

*В пятой главе* предложены методы выделения в ЭЭС зон влияния на множители Лагранжа различных факторов. Разработаны новые подходы на основе весовых коэффициентов метода взвешенной декомпозиции. С помощью разработанных подходов эффективно выделяются зоны:

- передачи маргинальной мощности из регулирующих узлов (зон обслуживания регулирующих узлов);
- карманов нагрузки, то есть части ЭЭС, передача электроэнергии в которые осуществляется целиком или в основном по контролируемому сечению и в которой множители Лагранжа являются «отрезанными» от остальной части ЭЭС.
- влияния сетевых ограничений,
- влияния ограничений по напряжению.

Разработан алгоритм сравнения зон между собой и выделения устойчивых зон.

*В шестой главе* рассматриваются эквивалентные модели ЭЭС и дается обоснование принципам укрупнения ЭЭС на основе сохранения взаимоотношения между режимными параметрами и множителями Лагранжа, рассматривается подходящий для этого метод эквивалентирования ЭЭС. Используемые данные упрощенной ЭЭС включают такие переменные, как мощность генераторов, мощность нагрузок и эквивалентные взаимные сопротивления. Эквивалентные сопротивления предлагается рассчитать по данным о включении в сеть и ремонтах линий электропередачи и трансформаторов. Сформированы эквивалентные модели для объединенных энергосистем Сибири, Урала, Средней Волги, Северо-Запада и Юга на основе статистических данных, опубликованных коммерческим оператором оптового рынка электроэнергии.

*В седьмой главе* рассмотрено применение разработанных методов идентификации устойчивых зон влияния сетевых ограничений и формирования эквивалентных моделей ЭЭС применительно к оптовому рынку электроэнергии в России. Рассматриваются зоны высоких и низких множителей Лагранжа, сформированных на рынке на сутки вперед оптового рынка электроэнергии и мощности в России. Показано использование укрупненных зон и моделирование взаимосвязи множителей Лагранжа между ними для оценки экономических следствий при реализации схем и программ перспективного развития ЕЭС России.

### **Практическая значимость работы для науки и реализация результатов**

Работа имеет выраженную практическую направленность на создание эффективных методов анализа, прогнозирования и моделирования узловых цен на оптовом рынке электроэнергии. Результаты работы в настоящее время применяются в практике работ коммерческого оператора оптового рынка электроэнергии, участников рынка.

### **Достоверность научных положений, выводов и рекомендаций**

Результаты диссертационной работы получены при корректном использовании положений теории ЭЭС, обоснованном применении методов математического программирования. Наблюдается согласованность результатов в большом количестве примеров и используемыми реальными данными. Кроме того, достоверность положений, выводов и рекомендаций подтверждаются актами внедрения, приведенными в приложении диссертации.

## Соответствие работы научной специальности

Объект, предмет и методы исследования соответствуют паспорту научной специальности 05.14.02 – Электрические станции и электроэнергетические системы, а именно п. 6 «Разработка методов математического и физического моделирования в электроэнергетике», п. 7 «Разработка методов расчета установившихся режимов, переходных процессов и устойчивости электроэнергетических систем», п. 8 «Разработка методов статической и динамической оптимизации для решения задач в электроэнергетике», п. 10 «Теоретический анализ и расчетные исследования по транспорту электроэнергии переменным и постоянным током, включая проблему повышения пропускной способности транспортных каналов» и п. 13 «Разработка методов использования ЭВМ для решения задач в электроэнергетике».

### По материалам, представленным в работе, могут быть сделаны следующие замечания

1. Рассмотрение ЭЭС автором производится весьма укрупненно. Так варьируемыми переменными являются мощности в узлах. В то же время, для достижения этих мощностей необходимо обеспечение определенного режима работы генераторов станции, что в значительной мере определяет экономичность работы всей станции. Эти важные «внутренние» параметры не рассматриваются в работе.
2. При исследованиях автор широко использует понятие «чувствительность», применяя, однако, так называемую «чувствительность в малом». Теория чувствительности достаточно хорошо развита к настоящему времени и для «чувствительность в большом», что позволяет расширить диапазон изменения параметров при анализе чувствительности. Выражения для вычисления «чувствительности в большом» несколько сложнее, но при использовании современных вычислителей это не имеет принципиального значения. Не ясно, я чем связан выбор автора?
3. Значительная часть работы посвящена решению задачи разбиения узлов ЭЭС на кластеры. По прочтении осталось не ясным, является ли однозначным разбиение, предложенное автором?
4. График суточной нагрузки (рис. 4.6 работы) не обладает обычным для таких зависимостей свойством – начинаться и заканчиваться при одной и той же нагрузке. С чем это связано?
5. Соотношение 4.4.7 содержит в знаменателе полином второй степени, в то время, как для рассматриваемых систем, полином должен быть первой степени. В чем причина появления квадратичного члена?
6. Значительное место в последних главах работы уделено графикам, демонстрирующим зависимость отношения множителей Лагранжа от потоков мощности сквозь контролируемые сечения. Желательно дать более подробное пояснения, как эти зависимости могут использоваться далее при прогнозировании цен.

### Заключение по диссертационной работе

Сделанные замечания не снижают высокой в целом ценности проведенных исследований. Автореферат достаточно полно отражает содержание диссертационной работы. Диссертация является завершенным, самостоятельным исследованием, обладает внутренним единством, содержит новые научные результаты и положения, выдвигаемые для публичной защиты, и свидетельствует о личном вкладе автора в науку. В диссертации

содержатся сведения о практическом использовании полученных автором научных результатов. Предложенные автором диссертации решения обоснованы, приводится сравнение с другим известными решениями. Основные научные результаты опубликованы в 24 изданиях, из которых 16 статей – в рецензируемых научных изданиях, рекомендуемых ВАК, и в журналах, индексируемых в реферативных базах данных Scopus и Web Of Science.

На основании изложенного считаю, что диссертационная работа «Анализ оптимальных режимов электроэнергетических систем на основе множителей Лагранжа» отвечает всем требованиям Положения о присуждении ученых степеней, утвержденного Постановлением Правительства РФ от 24 сентября 2013 г. №842, а ее автор Васильковская Татьяна Александровна заслуживает присуждения ученой степени доктора технических наук по специальности 05.14.02 – Электрические станции и электроэнергетические системы.

Официальный оппонент,

д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой «Теоретическая электротехника и электромеханика» Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого» (ФГАОУ ВО «СПбПУ»)



Коровкин Николай Владимирович

«01» февраля 2019г.

Адрес электронной почты: [nikolay.korovkin@gmail.com](mailto:nikolay.korovkin@gmail.com)

Телефон: +7 (812) 552-75-72

Подпись заведующего кафедрой Теоретическая электротехника и электромеханика» ФГАОУ ВО «СПбПУ» заверяю



Контактные данные организации:

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого»  
ул. Политехническая, д. 29, Санкт-Петербург, 195251  
Тел.: 8 (800) 707-18-99 , [office@spbstu.ru](mailto:office@spbstu.ru)

## Сведения об официальном оппоненте

ФИО	Коровкин Николай Владимирович
Ученая степень и наименование отрасли науки, научных специальностей, по которым защищена диссертация	Доктор технических наук 05.09.05 – Теоретическая электротехника
Ученое звание	Профессор
Полное наименование организации, являющейся основным местом работы, должность	Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого», заведующий кафедрой «Теоретическая электротехника и электромеханика».
Почтовый адрес организации	ул. Политехническая, д. 29, Санкт-Петербург, 195251
Телефон	+7 (812) 552-76-43;
Адрес электронной почты	nikolay.korovkin@gmail.com
Основные публикации по теме диссертации в рецензируемых научных изданиях за последние 5 лет (не более 15)	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Korovkin N. V., Odintsov M. V., Frolov O. V. Operational Planning in Power Systems Based on Multi-Objective Optimization // Power Technology and Engineering. 2016. Vol. 50, № 1. P. 75–78.</li> <li>2. Chernavin A., Korovkin N. Interactive Methods Efficiency Analysis of Multicriteria Optimization of Electric Energy Systems Static Operating Modes // 2016 IEEE North West Russia Section Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering Conference, EIConRusNW 2016. 2016. P. 527–529.</li> <li>3. Belyaev N.A., Korovkin N. V, Chudny V.S. Investigation of voltage level control in electric power systems // 2015 IEEE Eindhoven PowerTech, PowerTech 2015. 2015. № 2. P. 1–5.</li> <li>4. Belyaev N.A., Korovkin N.V. et al. Reduction of Active Power Losses in Electric Power Systems with Optimal Placement of FACTS Devices // 2015 IEEE North West Russia Section Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering Conference, EIConRusNW 2015. 2015. P. 150–154.</li> <li>5. Belyaev N.A., Korovkin N.V. et al. Clustering of Electric Network for Effective Management of Smart Grid // IEEE 23rd International Symposium on Industrial Electronics (ISIE). 2014. P. 1987–1990.</li> </ol>

	<p>6. Коровкин Н.В., Одинцов М.В., Фролов О.В. Управление установившимися режимами энергосистем с использованием векторного критерия качества // Электричество. 2015. № 1. С. 13–19.</p> <p>7. Беляев Н.А., Коровкин Н.В., Фролов О.В., Чудный В.С. Исследование методов оптимизации режимов работы энергосистем // Электротехника. 2013. № 2. С. 21–28.</p>
--	--