

«Утверждаю»

Проректор – начальник Управления
научной политики и организации
научных исследований ФГБОУ ВО
«Московский государственный
университет им. М.В. Ломоносова»,
д.ф.н., профессор РАН
Федянин А.А.



2018 г.

ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова» на диссертацию Васьковской Татьяны Александровны «*Анализ оптимальных режимов электроэнергетических систем на основе множителей Лагранжа*», представленную на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 05.14.02 – «Электрические станции и электроэнергетические системы».

Диссертация Васьковской Т.А. посвящена разработке аналитических методов исследования электроэнергетических режимов, складывающихся под воздействием ценовых заявок электрических станций в современных условиях распределенного рынка электроэнергии России. Для расчета оптимальных рыночных режимов на территории единой электроэнергетической системы (ЭЭС) России проводится централизованный аукцион, определяющий оптовые цены продажи/покупки электроэнергии на каждый час предстоящих суток в каждом из более 8000 узлов расчетной модели рынка и поблочную загрузку электрических станций – торговый график (ТГ). При этом решается задача оптимизации функции благосостояния рынка с балансовыми ограничениями, соответствующими уравнениям установившегося режима ЭЭС, где множители Лагранжа (МЛ) к балансам активной мощности в узлах задают узловые цены рынка. В диссертационной работе Васьковской Т.А. выявлена закономерность между показателями экономичности функционирования ЭЭС и параметрами оптимальных рыночных режимов на базе разложения МЛ на составляющие, характеризующие вклад каждого ограничения по отдельности.

Предложенные в отечественной и зарубежной литературе методы анализа МЛ подробно описаны во введении к работе. В зарубежной литературе они относятся, в основном, к линеаризованным задачам. В силу использования в действующей модели рынка электроэнергии в России исходных нелинейных уравнений баланса – методы, разрабатываемые соискателем, представляют не только непосредственно практический, но и теоретический интерес. Поэтому можно сделать вывод об **актуальности** темы исследования.

Научная ценность работы Васьковской Т.А. обусловлена полученной декомпозицией МЛ, ею разработан новый метод декомпозиции относительно ценообразующих узлов (генерирующих единиц электрических станций, цены в заявках которых формируют рыночную цену электроэнергии в данный час) с весовыми коэффициентами, имеющими понятную физическую природу. Для этого в диссертации подробно изучены необходимые условия оптимальности установившегося электроэнергетического режима в возникающей сложной задаче нелинейного программирования. Задача расчета установившегося режима (OPF – optimal power flow) относится к классическим и доказательство для нее новых аналитических результатов является безусловно важным. Кроме того, практическая постановка, используемая в рынке электроэнергии России, содержит дополнительные ограничения связи между часами (на скорость сброса и набора нагрузки, на суточную выработку ГЭС), добавляющие к OPF трудности, с которыми соискатель успешно справилась. На базе указанных общенаучных результатов Васьковская Т.А. предложила новые принципы построения агрегированных моделей ЭЭС для оценки перспективной цены на электроэнергию, решения задач прогнозирования и планирования развития ЭЭС с существенным сокращением размерности, что имеет непосредственное значение для дальнейшего продвижения отраслевой науки.

Диссертация изложена на 312 страницах, состоит из введения, семи глав, заключения, словаря терминов и содержит список цитируемой литературы из 285 наименований.

Во введении сформулирована цель работы, аргументирована её актуальность, научная новизна и практическая ценность. Дано краткое описание используемых в работе методов и подходов.

В первой главе работы проведен обзор известных методов решения задач оптимизации электроэнергетических режимов ЭЭС, построена нелинейная математическая модель ЭЭС и дан спектр постановок задач оптимизации на этой модели, изучаемых в диссертации. Выписаны необходимые условия оптимальности 1-го порядка (теорема Каруша-Куна-Таккера) для почасовой постановки (в отсутствие связующих ограничений) и предложена новая

классификация узлов модели ЭЭС на основе прямых и двойственных переменных. Введение в рассмотрение, кроме параметров установившегося режима (УР), двойственных переменных (МЛ) в задаче оптимизации УР позволило анализировать экономичность производства электрической энергии с учетом ее транспортировки и требований потребителей.

Во второй главе на базе новой классификации узлов разработаны схемы взаимосвязи переменных при оптимальном УР и построена математическая модель чувствительности оптимальных УР к малым изменениям исходных данных. Васьковской Т.А. дан обзор имеющихся методов и математических моделей чувствительности для ЭЭС, показывающий их недостатки или то, что их довольно сложно применить на практике. Несмотря на то, что для анализа чувствительности оптимального УР достаточно найти частные производные по возмущению для решения системы уравнений, соответствующей условиям оптимальности 1-го порядка, от диссертантки потребовался аккуратный учет всех нелинейных связей переменных, причем в аналитической форме. Ею отдельно рассчитана модель чувствительности относительно базовых реакций ЭЭС и модель чувствительности в отношении воздействий на ЭЭС с анализом независимости воздействий и оценкой их значимости.

В третьей главе модели, предложенные в первой и второй главах, применены для решения задачи декомпозиции МЛ относительно параметров целевой функции, названных «МЛ-формирующими» (отражающих экономику производства электроэнергии на различных станциях), с одновременным расчетом весов факторов влияния остальных параметров УР. Изложена и обоснована основная конструкция работы – метод взвешенной декомпозиции. Проведено сравнение с другими методами декомпозиции (дан подробный обзор литературы). Явно выделена роль контролируемых сечений и их вклад в МЛ, а также подтверждена физическая интерпретация составляющей МЛ, которая формируется на основании откликов регулирующих узлов в УР.

В четвертой главе рассмотрены возможности применения результатов второй и третьей глав на оптовом рынке электроэнергии в России в режиме «на сутки вперед» и при корректировках на час вперед («балансирующий рынок»), где применяется узловой маржинальное ценообразование на основе МЛ. Для этого полученные результаты обобщены на постановки с наличием связующих ограничений между часами. Васьковской Т.А. проведен также ряд модельных расчетов на ЭЭС с небольшим числом узлов, демонстрирующих влияние указанных ограничений в задаче оптимизации суточного набора УР. Отдельно в четвертой главе проведена попытка моделирования влияния на МЛ управляющих сетевых устройств и компенсаторов реактивной мощности в форме дробно-полиномиальных функций, параметры которых предлагается

определять путем имитационного моделирования на линеаризованной модели ЭЭС. По итогам применения результатов данной главы соискателем получены акты о внедрении.

В пятой главе, используя предложенные методы, Васьковская Т.А. вводит понятия зон влияния, в частности на МЛ, и предлагает эвристический алгоритм выделения в ЭЭС зон влияния.

Шестая глава диссертации посвящена эквивалентным моделям ЭЭС. Дается обоснование методологии укрупнения ЭЭС, сохраняющего отношение режимных параметров и МЛ, с помощью регрессионной модели.

Способы применения результатов пятой и шестой глав для анализа оптового рынка электроэнергии разрабатываются *в седьмой главе* диссертации Васьковской Т.А. Соискатель рассмотрела две прикладные задачи: по оценке перспективной стоимости электроэнергии в Мурманской обл. и по созданию иерархической системы структурно связанных моделей единой ЭЭС России с той же целью оценки перспективной стоимости электроэнергии на различных территориях при реализации инвестиционных проектов, предусмотренных в схемах и программах развития ЕЭС России (утверждаются Министерством энергетики РФ на 7 лет вперед), для Акционерного общества «Администратор торговой системы оптового рынка электроэнергии» (АТС).

Доказательства утверждений не вызывают сомнений в их строгости. Все предлагаемые автором эвристические алгоритмы подтверждены статистикой экспериментальных данных. Так что можно сделать вывод о **достоверности результатов** диссертационной работы.

Практическая значимость диссертации подробно обоснована автором и состоит в том, что полученные теоретические результаты могут служить для разработки программно-алгоритмического обеспечения с целью решения прикладных задач анализа конкурентных рыночных цен на электроэнергию, стоящих перед АТС, выбора наилучших вариантов рыночной стратегии для поставщиков оптового рынка электроэнергии и управления факторами, влияющими на узловые цены, для потребителей электроэнергии. Построенные в диссертации методы перехода к эквивалентным агрегированным ЭЭС дают возможность принятия решений на обозримых моделях и при этом учитывают неточность имеющейся и прогнозной информации.

На основании изложенного материала можно выделить следующие пункты, характеризующие **научную новизну** результатов:

1. Построена классификация узлов ЭЭС в оптимальном УР, учитывающая свойства как прямых (режимных), так и двойственных (экономических) переменных задачи оптимизации УР, возникающей на оптовом рынке электроэнергии.

2. Разработаны математические модели анализа чувствительности УР ЭЭС и МЛ по отношению к базовым воздействиям на ЭЭС и относительно реакции ЭЭС на воздействия; аналитически выведена зависимость МЛ от входа задачи оптимизации и получено представление МЛ линейной комбинацией ценовых параметров целевой функции с определением вклада каждого из сетевых ограничений и ограничений по напряжению.
3. Предложены алгоритмы выделения в ЭЭС устойчивых областей (зон) влияния различных факторов, в частности сетевых ограничений, на МЛ, позволившие выявить зоны высоких и зоны низких цен на рынке «на сутки вперед» оптового рынка электроэнергии в России.
4. Разработана методология формирования эквивалентных агрегированных ЭЭС для решения задач прогнозирования и планирования (в условиях неполной информированности) с сохранением зависимости МЛ в новой сети от ее укрупненных характеристик. На ее основе найдены оценки перспективной стоимости электроэнергии на оптовом рынке в России.

Рекомендации по использованию результатов диссертации:

Результаты диссертации Васьковской Т.А. могут быть использованы для решения практических задач, связанных с анализом текущей ситуации на оптовом рынке электроэнергии в России – для АТС – и планов развития отрасли – для Минэнерго России, а также с формированием прогнозов цен на электроэнергию и выбора наилучших альтернатив – для участников рынка. Их рекомендуется применять при проведении деловых игр по правилам рынков электроэнергии и занятий со студентами, в том числе на ф-те ВМиК МГУ им. М.В. Ломоносова по курсу «Математические модели в электроэнергетике».

Замечания по диссертационной работе Васьковской Т.А.:

1. При изложении в главе 5 алгоритма формирования зон влияния соискатель использует термин «эффективный», хотя и не дает никаких оценок сложности предлагаемого метода. Тогда как указанный термин общепризнан в качестве синонима полиномиальности алгоритма. Кроме того, автором не указано, что алгоритм является эвристическим. Однако отсутствует строгое обоснование выбора параметра γ , в частности его связи с w_{\min} . Модификация алгоритма формирования кластеров на базе нечетких множеств, заявленная в конце п. 5.4.2, вообще не исследована в работе.
2. На стр. 35 автореферата используется не введенное обозначение ЭЭС-2746 (такие обозначения введены только в тексте диссертации).
3. Столь представительный и довольно полный список цитируемой литературы трудно воспринимается при расположении ссылок в порядке цитирования, а не в алфавитном порядке.

Данные замечания не снижают общего положительного впечатления о работе, выполненной на хорошем научном уровне. Автореферат (кроме отмеченного недостатка) соответствует содержанию текста диссертации.

Диссертация Васьковской Т.А. представляет собой законченную научно-квалификационную работу, в которой на основании выполненных автором исследований получены новые результаты, совокупность которых можно квалифицировать как научное достижение в области анализа оптимальных режимов и конкурентных цен рынка электроэнергии, развивающее теорию и практику оптимизации ЭЭС, внедрение которых вносит значительный вклад в развитие электроэнергетики страны. Диссертантка является автором 16 статей (6 в соавторстве), опубликованных в журналах из списка научных изданий, рекомендованных ВАК. Основные положения, выносимые на защиту, полностью отражены в публикациях и прошли всестороннюю апробацию.

Диссертационная работа удовлетворяет всем требованиям ВАК, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 05.14.02 – «Электрические станции и электроэнергетические системы», а ее автор, Васьковская Татьяна Александровна, заслуживает присуждения ей искомой ученой степени.

Отзыв обсужден и одобрен на научном семинаре кафедры исследования операций ф-та ВМК МГУ им. М.В. Ломоносова 18.12.2018 г, протокол № 1.

Заместитель декана ф-та ВМК МГУ,
д.ф.-м.н., профессор

С.А. Ложкин

Заместитель заведующего кафедрой исследования операций
ВМК МГУ, д.ф.-м.н., профессор

А.А. Васин

Доцент кафедры исследования операций
ВМК МГУ, к.ф.-м.н.

М.Р. Давидсон

Почтовый адрес:

119991 г. Москва, Ленинские горы, д.1

Веб-сайт:

<https://msu.ru/>

Телефон:

+7 (495) 939-30-10

Адрес электронной
почты:

cmc@cs.msu.ru



Подпись удостоверяю
Ведущий специалист по кадрам
Т.Г. Коваленко

Сведения о ведущей организации

| | |
|---|---|
| <p>Полное и сокращённое наименование организации</p> | <p>Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова» МГУ имени М.В.Ломоносова</p> |
| <p>Место нахождения</p> | <p>г. Москва</p> |
| <p>Почтовый адрес, телефон, адрес электронной почты, адрес официального сайта в сети Интернет</p> | <p>119991, г. Москва, Ленинские горы, д. 1 +7 (495) 939-30-10 cmc@cs.msu.ru https://www.msu.ru/, https://cs.msu.ru/</p> |
| <p>ФИО, должность лица, утвердившего отзыв</p> | <p>Федянин Андрей Анатольевич, д.ф.-м.н., профессор РАН, проректор – начальник Управления научной политики и организации научных исследований ФГБОУ ВО «Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова»</p> |
| <p>ФИО, должность лиц, составивших отзыв</p> | <p>Ложкин Сергей Андреевич, д.ф.-м.н., профессор, заместитель декана факультета Высшей математики и кибернетики Васин Александр Алексеевич, д.ф.-м.н., профессор, заместитель заведующего кафедрой исследования операций Давидсон Михаил Рувимович, к.ф.-м.н., профессор, доцент кафедры исследования операций</p> |
| <p>Основные публикации работников организации по теме диссертации в рецензируемых научных изданиях за последние 5 лет (не более 15)</p> | <ol style="list-style-type: none"> 1. Vasin A. A., Lesik I. A., Grigor'eva O. M. Designing a transport system for a multinode competitive market with variable demand // Computational Mathematics and Modeling. — 2018. — Vol. 29, no. 2. — P. 211–227. 2. Васин А.А., Григорьева О.М., Цыганов Н.И. Оптимизация транспортной системы энергетического рынка // Доклады Академии Наук. 2017. Т. 475, № 4. P. 377–381. 3. Vasin A., Kartunova P. Cournot oligopoly theory for simple electricity markets // Equilibrium Theory for Cournot Oligopolies and Related Games. — Springer, 2016. 4. Vasin A., Dolmatova M. Optimization of Transmission Capacities for Multinodal Markets // Procedia Computer Science. 2016. Vol. 91. P. 238–244. 5. Васин А.А., Гусев А.Г. Теоретико-игровые модели управления рынком мощности и электроэнергии // Известия РАН. Теория и системы управления. 2015. № 6. P. 52–62. 6. Давидсон М.Р., Селезнев А.В. Математическая модель расчета ценовых индикаторов в задаче выбора состава генерирующего оборудования в условиях конкурентного рынка электроэнергии в России // Известия РАН. Теория и системы управления. 2014. № 3. С. 61–70. |

7. Васин А.А., Дайлова Е.А. Двухузловой рынок в условиях несовершенной конкуренции // Математическая теория игр и ее приложения. 2014. Т. 6, № 3. С. 3–31.
8. Васин А.А., Дайлова Е.А. Об оптимальной пропускной способности системы перемещения товара между двумя рынками // Вестник Московского университета. Серия 15 Вычислительная математика и кибернетика. 2014. № 3. С. 40–45.
9. Daylova E., Vasin A. Determination of transmission capacity for a two-node market // Procedia Computer Science. 2nd International Conference on Information Technology and Quantitative Management, ITQM. — Vol. 31. — 2014. — P. 151–157.
10. Васин А.А., Дайлова Е.А. Анализ краткосрочной эффективности механизмов оптового рынка электроэнергии // Журнал Новой экономической ассоциации. 2013. Т. 2, № 18. С. 35–60.