

## УТВЕРЖДАЮ

Проректор по научной работе Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник

Кружаков В.В.

«13» апреля 2020 г.

## ОТЗЫВ

Ведущей организацией Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина» на диссертационную работу Подковальникова Сергея Викторовича «Совершенствование методологии обоснования развития электроэнергетики России в условиях интеграции и deregулирования», представленную к защите в Диссертационном совете Д 003.017.01 при Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева Сибирского отделения Российской академии наук на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 05.14.01 – Энергетические системы и комплексы

**Актуальность темы диссертации.** Методология обоснования развития электроэнергетики в России (ранее в СССР) и за рубежом формировалась в течение длительного времени в постоянно меняющихся условиях. Кардинальные экономические преобразования, произошедшие в нашей стране в девяностые годы, потребовали коренного пересмотра этой методологии. Новые система управления и методология обоснования развития российской электроэнергетики, адекватные вновь сложившимся условиям, пока ещё полностью не сформировались и требуются дальнейшие усилия исследователей в данном направлении. В частности, необходимо адекватное отражение в методологии обоснования процессов deregулирования российской электроэнергетики, существенно её преобразившие.

Процессы дерегулирования сопровождаются электроэнергетической интеграцией, т.е. объединением национальных энергосистем с формированием межгосударственных электрических связей (МГЭС) и энергообъединений (МГЭО) в разных регионах мира. Данная тенденция, являясь глобальной, охватывает практически все обжитые территории планеты, и долгосрочной. Россия играет важную роль в Евразийской электроэнергетической интеграции, в том числе в её Восточно-Азиатском сегменте.

Таким образом, работы по совершенствованию методологии обоснования развития российской электроэнергетики в современных условиях, характеризующихся её дерегулированием и интеграцией, являются актуальными и востребованными.

**Научная новизна** работы состоит в следующем.

1. Сформулирована обновлённая концепция обоснования развития электроэнергетики, в которой помимо традиционного рассмотрения физико-технических и технико-экономических факторов с выделением ЭЭС разного территориально-технологического уровня и их составляющих (генерирующих мощностей различных типов, электросетевых объектов), электроэнергетика также рассматривается с учетом ее организационной структуры (с разделением на генерирующие компании – ГенКо и национальные электроэнергетические системы), что повышает качество обосновываемых решений. При этом учитываются современные тенденции развития электроэнергетики, включая интеграцию и дерегулирование.

2. Усовершенствована имеющаяся методология обоснования развития электроэнергетики, ЭЭС и энергокомпаний, представляющая собой иерархически взаимоувязанную последовательность этапов, на каждом из которых решаются методические задачи обоснования решений по развитию электроэнергетики с учётом её организационного разделения на отдельные хозяйствующие субъекты (начиная с иерархического уровня национальных электроэнергетических комплексов и заканчивая уровнем отдельных генерирующих компаний).

3. Разработана методика разделения системных эффектов, достигаемых в результате интеграции национальных ЭЭС в рамках межгосударственного энергообъединения, между участвующими в МГЭО странами.

4. Разработана методика согласования интересов участвующих в МГЭО стран с максимизацией эффективности такого участия для каждой страны и с последующим поиском согласованного решения.

5. Сформулирована и решена задача обоснования развития электроэнергетики России с учётом её организационного разделения на отдельные энергокомпании с максимизацией функции эффективности каждой из них и достижением долгосрочного равновесия.

6. Разработана информационно-вычислительная система, содержащая семейство оптимизационных (прямых и двойственных) и равновесных математических моделей развития энергосистем и энергокомпаний, а также базу исходных данных. Данная система позволяет в совокупности учитывать,

с одной стороны, технические ограничения и балансовые соотношения при работе ЭЭС, с другой – организационную структуру электроэнергетики и экономические показатели энергосистем и энергокомпаний.

**Диссертационная работа соответствует паспорту научной специальности 05.14.01 – Энергетические системы и комплексы, в т.ч. следующим пунктам паспорта:**

П.1. «Разработка научных основ исследования общих свойств, создания и принципов функционирования энергетических систем и комплексов, фундаментальные и прикладные системные исследования проблем развития энергетики городов, регионов и государства, топливно-энергетического комплекса страны»;

П.3. «Использование на этапе проектирования и в период эксплуатации методов математического моделирования с целью исследования и оптимизации структуры и параметров энергетических систем и комплексов и происходящих в системах энергетических процессов»;

П.5. «Разработка и исследование в области энергосбережения и ресурсосбережения при производстве тепловой и электрической энергии, при транспортировке теплоты и энергоносителей в энергетических системах и комплексах»;

П.6. «Исследование влияния технических решений, принимаемых при создании и эксплуатации энергетических систем и комплексов, на их финансово-экономические и инвестиционные показатели, региональную экономику и экономику природопользования».

**Диссертант сформулировал и выносит на защиту следующие основные положения.**

1. Обновлённая концепция обоснования развития электроэнергетики с учетом технико-экономических и организационных факторов в условиях электроэнергетической интеграции и дерегулирования.

2. Усовершенствованная методология обоснования развития электроэнергетики, ЭЭС и энергокомпаний с учетом современных тенденций.

3. Информационно-вычислительная система для обоснования развития электроэнергетики с учетом технико-экономических и организационных факторов.

4. Результаты анализа глобальных тенденций электроэнергетической интеграции и дерегулирования.

5. Структуризация и анализ формирующейся в России системы управления развитием электроэнергетики.

6. Результаты исследования энергоэкономической эффективности электроэнергетической интеграции России и других стран Северо-Восточной Азии (СВА) с созданием МГЭС и МГЭО в условиях их организационного разделения на национальные электроэнергетические комплексы с оценкой эффектов для участвующих сторон.

7. Результаты исследования развития российской электроэнергетики в условиях её организационного разделения на электрогенерирующие компании с учётом их интересов.

**Теоретическая значимость** диссертационной работы состоит в развитии системных исследований в энергетике в части совершенствования концептуально-методологической базы и модельно-вычислительного инструментария для обоснования решений по развитию электроэнергетики в современных условиях.

**Практическая значимость** работы состоит в том, что полученные результаты позволяют улучшить обоснованность решений по развитию электроэнергетики в стране и при совершенствовании форм её структурной организации. В частности, они будут полезны для российских энергокомпаний, Минэнерго РФ, других субъектов электроэнергетики для развития внешних электрических связей, при формировании эффективных сценариев участия ЕЭС России в МГЭО СВА, при разработке рациональных стратегий, программ и схем развития ЕЭС, объединённых энергосистем, региональных ЭЭС, Единой национальной и региональных электрических сетей.

Результаты проведенных в рамках диссертации исследований использовались в прикладных работах, выполненных с участием автора по договорам между ИСЭМ СО РАН и Сколковским институтом науки и технологий (2014-2016 гг.), ЗАО «Глобализация и Устойчивое развитие. Институт энергетической стратегии» (2014-2015 гг.), Минэнерго РФ (2014 г.), ОАО «Иркутская электросетевая компания» (2013 г.), ООО «Сибирская генерирующая компания» (2012 г.), АО «Энергетический институт им. Г.М. Кржижановского» (2008-2012 гг.), ПАО «ИнтерРАО» (2003 г., 2011 г.) и другими организациями.

**Достоверность результатов** определяется адекватностью используемых математических моделей реальному ЭЭС с опорой на базовые законы электротехники, фундаментальный принцип равновесия Нэша, энергоэкономической сущностью двойственных оценок, как индикаторов узловых цен на электроэнергию. Проводимые исследования опирались на достоверные данные о современном состоянии и перспективах развития электроэнергетики России и других стран СВА, полученные из национальных статистических отчётов и стратегий, программ, схем развития данной отрасли.

**Методология и методы исследования**, используемые в работе, имеют в качестве научной базы, прежде всего, системные исследования, получившие широкое применение в энергетике и доказавшие свою эффективность. При решении конкретных задач использовались методы сравнительного технико-экономического обоснования вариантов решений и оптимизации, теория двойственности, методика Курно для поиска состояний долгосрочного равновесия при развитии энергосистем и энергокомпаний.

**Личный вклад диссертанта** не вызывает сомнений. Все научно-методические исследования, в частности, разработка усовершенствованной

концепции, модернизированной методологией, разработка конкретных методик выполнены автором самостоятельно. Работы по математическому моделированию, созданию информационно-вычислительной системы, вычислительные, обзорно-аналитические и прикладные исследования, представленные в диссертации, проведены, под его научным руководством и при его непосредственном участии.

**Апробация результатов** выполнялась на многих международных и российских конференциях, в частности на: а) International Conference of Electrical Engineering (ICEE), Республика Корея, 2002 г., 2014 г.; Китай, 2015 г.; б) IEEE PES PowerTech Conference, Россия, 2005 г.; Норвегия, 2011 г.; в) Международная конференция «Азиатская энергетическая кооперация», Россия, 2000 г., 2002 г., 2004 г., 2006 г., 2008 г., 2012 г., 2014 г., 2017 г.; г) Международная конференция «Управление развитием крупномасштабных систем» (MLSD), Россия, 2011 г.; д) Международная конференция «Евразийская экономическая интеграция», Казахстан, 2011 г.; Россия, 2012 г.; е) International Association for Energy Economics (IAEE) European Energy Conference, Италия, 2014 г.; ж) Всероссийская конференция «Энергетика России в XXI в.», Россия, 2010 г., 2015 г.; з) Международная научно-техническая конференция «Силовые и распределительные трансформаторы. Реакторы. Системы диагностики», Россия, 2016 г.; и) Northeast Asia Regional Power Interconnection and Cooperation (NEA RPIC) Forum, Китай, 2016 г.; Монголия, 2018 г.; к) Мелентьевские чтения, Россия, 2017 г.; л) IEEE PES Asia Pacific Power and Energy Engineering Conference (APPEEC), Малайзия, 2018 г.; м) International Congress on Advanced Materials Sciences and Engineering, Япония, 2019 г.; с) 91<sup>е</sup> заседание международного семинара им. Ю.Н. Руденко «Методические вопросы исследования надёжности больших систем энергетики», Узбекистан, 2019 г.

**Публикации.** Основное содержание диссертации отражено в 40 публикациях, в том числе в 20 статьях в научных журналах из перечня ВАК, в 17 публикациях в трудах международных конференций и статьях в зарубежных журналах, индексируемых в международных реферативных базах данных Web of Science и Scopus, а также в 3 российских монографиях.

**Объем и структура диссертационной работы.** Диссертация состоит из введения, шести глав, заключения, списка литературы, содержащего 250 наименований и 3 приложений. Материал изложен на 292 страницах, из которых 275 страниц основного текста и 17 страниц приложений.

В **введении** обосновывается актуальность темы диссертации, сформулированы цели и задачи исследований, приведены положения, выносимые на защиту, указаны новизна полученных результатов, их научная и практическая значимость, представлены структура диссертации и основные результаты исследований.

В **первой главе** выполнен ретроспективный анализ методологии и математических моделей обоснования развития электроэнергетики для условий СССР, России и зарубежья. В частности, рассмотрен системный подход при обосновании решений по развитию электроэнергетики,

сложившийся в СССР в период централизованного управления этой отраслью, и метод интегрированного планирования ресурсов, сформировавшийся в этот же период за рубежом. Проанализированы продолжающая своё формирование методология обоснования развития электроэнергетики в современных условиях России, в т.ч. её монографические обобщения, выполненные ИНЭИ РАН, ЭНИН им. Г.М.Кржижановского и ИСЭМ СО РАН, и появившаяся в последние годы за рубежом методология холистического планирования электроэнергетики. Методологию обоснования развития электроэнергетики в современных условиях ИСЭМ СО РАН, как в наибольшей степени проработанную и целостную, автором предлагается использовать в качестве основы для дальнейшего совершенствования.

Во второй главе анализируются тенденции интеграции и дерегулирования, протекающие в электроэнергетике России и других стран мира, а также используемые при их исследовании математические модели и методические подходы. Отмечается, что тенденция электроэнергетической интеграции, проявляющаяся в создании МГЭС и формировании МГЭО, имеет более чем вековую историю и охватывает практически все обжитые регионы мира. Указывается, что для России важным является восточное направление электроэнергетической интеграции. Тенденция дерегулирования, представляющая собой переход к рыночным механизмам управления развитием и функционированием электроэнергетики, также проявляется в глобальном масштабе, охватывая Россию, хотя и имеет менее продолжительную историю. Данные тенденции представляются первоочередными, они оказывают существенное влияние на развитие ЭЭС и требуют адекватного отражения в методологии обоснования этого развития.

В третьей главе рассматривается и структурируется формирующаяся в России система управления развитием электроэнергетики (СУРЭ). На базе данной СУРЭ предлагается разработанная доктором наук обновлённая концепция обоснования развития электроэнергетики, ЭЭС и энергокомпаний в современных условиях. Она охватывает технические, экономические и организационные аспекты, учитывает основные тенденции, протекающие в электроэнергетике России и мира (включая интеграцию и дерегулирование), а также предлагает модельный инструментарий для исследования. На основе представленной концепции, предложен состав новых методических задач, отображающих учет указанных тенденций в рамках этапов методологии обоснования ИСЭМ СО РАН.

В четвёртой главе для решения сформированных задач предлагается информационно-вычислительная система, включая семейство математических моделей и информационную базу. В эту систему входят оптимизационные (прямые и двойственные) и равновесные модели, что позволяет комплексно исследовать электроэнергетику с учётом физико-технологических, технико-экономических и организационных факторов и с рассмотрением отдельных субъектов электроэнергетики, дополняя исследования, проводимые в рамках традиционной методологии обоснования

развития электроэнергетики. Первая группа моделей включает в себя системную модель развития и режимов ЭЭС/МГЭО, оптимизирующую общую целевую функцию ЭЭС/МГЭО (без разделения на отдельные субъекты), её модификацию, учитывающую интересы входящих в МГЭО стран/субъектов путём раздельной оптимизации их целевых функций, а также системную оптимационную двойственную модель развития и режимов ЭЭС/МГЭО. Вторая группа моделей включает в себя равновесную модель развития генерирующих мощностей в условиях однопродуктовой организационной структуры электроэнергетики (когда торговля ведётся одним товаром – электроэнергией), а также двухпродуктовую равновесную модель развития генерирующих мощностей, когда торговля ведётся двумя товарами – электроэнергией и мощностью.

**Пятая глава** посвящена использованию предлагаемого в диссертации модельно-методического инструментария для решения актуальной прикладной задачи обоснования развития внешних электрических связей ЕЭС России в достаточно новом для страны и пока ещё фактически не освоенном Восточно-Азиатском направлении. Данная задача решается в рамках более общей проблемы обоснования развития межгосударственного энергообъединения в СВА с общесистемных позиций и с учётом его организационного разделения на национальные ЭЭС, а также интересов России и других потенциальных участников МГЭО. Полученные результаты указывают на эффективность участия Азиатской части ЕЭС России в межгосударственное объединение СВА.

В **шестой главе** приводятся результаты решения актуальной прикладной задачи обоснования развития электроэнергетики в условиях её организационного разделения на энергокомпании с использованием разработанного в диссертации модельно-методического аппарата. При этом оценивается насколько решения по развитию, принимаемые отдельными энергокомпаниями в своих интересах, согласуются с решениями, оптимальными с общесистемных позиций. Проведенные расчёты показали, что учёт структурной организации электроэнергетики при решении задач её развития приводит к снижению вводов генерирующих мощностей по сравнению с идеализированными условиями оптимизации по единой целевой функции. Причем, вводы оказываются выше для условий двухпродуктовой структурной организации электроэнергетики.

В **заключении** сформированы основные результаты диссертационной работы, главными из которых являются совершенствование системного подхода в энергетике в области обоснования решений по развитию электроэнергетики, ЭЭС и энергокомпаний, учитывая современные тенденции, и решение актуальных прикладных задач в указанной области.

В **приложении А** приведены исходные данные для расчётов на математических моделях.

В **приложении Б** даны численные результаты расчётов на моделях.

В **приложении В** содержит информацию об использовании результатов диссертационной работы.

**Автореферат** соответствует содержанию диссертации и полностью отражает основные научные и прикладные результаты диссертационного исследования.

Автореферат и текст диссертации хорошо структурированы, логично изложены и обладают внутренним единством. По объёму, структуре и оформлению диссертационная работа полностью соответствует требованиям ВАК, предъявляемым к диссертациям на соискание учёной степени доктора технических наук.

### **Замечания по диссертационной работе**

1. Рост мощностей распределённой генерации, который активно идёт в последние годы, в перспективе может повлиять на развитие процесса электроэнергетической интеграции. Неясно насколько устойчивы результаты исследований электроэнергетической интеграции в СВА к такому влиянию.

2. В разработанных моделях развития электроэнергетики отсутствует учёт неопределённости исходной информации.

3. При обосновании развития электроэнергетики требуется учёт рисков, в т.ч. политических.

4. Необходимо пояснение вопроса учёта резервирования в разработанных моделях развития электроэнергетики.

5. Отсутствие учёта электрических сетей в разработанных равновесных моделях развития генерирующих мощностей может привести к неэффективному развитию ЭЭС.

6. Требует пояснения вопрос, насколько разработанные методология и математические модели могут способствовать тому, чтобы предложения, сформулированные в государственных директивных документах в сфере электроэнергетики России и её регионов, включая стратегии, программы и схемы перспективного развития, адекватно транслировались на уровень энергокомпаний, обосновывающих и принимающих решения по развитию своих производственных мощностей.

Указанные замечания не снижают общей положительной оценки работы и не подвергают сомнению достоверность, обоснованность и новизну полученных и представленных в диссертации результатов.

### **Заключение**

Диссертационная работа Подковальникова Сергея Викторовича «Совершенствование методологии обоснования развития электроэнергетики России в условиях интеграции и deregулирования», представленная на соискание ученой степени доктора технических наук по научной специальности 05.14.01 – Энергетические системы и комплексы, отвечает всем требованиям и критериям действующего Постановления Правительства РФ № 842 от 24.09.2013 «О порядке присуждения учёных степеней», которым должна соответствовать диссертация на соискание учёной степени доктора технических наук.

Диссертация удовлетворяет требованиям пп. 9-14 «Положения о присуждении учёных степеней», утверждённого Постановлением Правительства РФ № 842 от 24.09.2013 «О порядке присуждения учёных

степеней» (ред. от 01.10.2018), предъявляемым ВАК к диссертациям на соискание учёной степени доктора наук.

Автор диссертации, Подковальников Сергей Викторович, заслуживает присуждения учёной степени доктора технических наук по специальности 05.14.01 – Энергетические системы и комплексы.

Отзыв подготовлен доктором технических наук, заведующим кафедрой «Автоматизированные электрические системы», профессором Паздериным Андреем Владимировичем.

Отзыв на диссертацию обсужден и одобрен на заседании кафедры «Автоматизированные электрические системы» Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», протокол заседания № 3 от 19 марта 2020 г.

Заведующий кафедрой  
«Автоматизированные электрические  
системы», доктор технических наук,  
профессор

Паздерин Андрей Владимирович

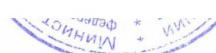
Тел: 8 (343) 3754875  
Эл. почта: [a.v.pazderin@urfu.ru](mailto:a.v.pazderin@urfu.ru)

Дата: 08.04.2020



Министерство науки  
и высшего образования Российской Федерации  
Паздерин А.В.

Подпись заверяю:



#### Сведения о ведущей организации

Полное наименование организации: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина»

Юридический адрес: 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19

Сайт: <https://urfu.ru/>

Тел: 8 (343) 3754444

Эл. почта: [rector@urfu.ru](mailto:rector@urfu.ru)