

*На правах рукописи*



**Старкова Галина Сергеевна**

**КОМПЛЕКС ЭКОНОМИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ  
ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ПОТРЕБЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ В  
РЕГИОНАХ РФ И ЕГО ИНСТРУМЕНТАЛЬНАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ**

08.00.13 – Математические и инструментальные методы экономики

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени

кандидата экономических наук

Пермь – 2014

Работа выполнена в ФГБОУ ВПО «Пермский государственный национальный исследовательский университет»

Научный руководитель: доктор физико-математических наук, профессор  
**Андрианов Дмитрий Леонидович**

Официальные оппоненты: **Ермолаев Михаил Борисович**  
доктор экономических наук, профессор,  
профессор кафедры экономики и финансов  
Ивановского государственного химико-  
технологического университета

**Уринцов Аркадий Ильич**  
доктор экономических наук, профессор,  
заведующий кафедрой управления знаниями и  
прикладной информатики в менеджменте  
Московского государственного университета  
экономики, статистики и информатики

Ведущая организация: ФГБОУ ВПО «Оренбургский государственный университет»

Защита состоится «29» декабря 2014 г. в 16:00 часов на заседании диссертационного совета ДМ 212.188.09 на базе Пермского национального исследовательского политехнического университета и Пермского государственного национального исследовательского университета по адресу: 614990, г. Пермь, Комсомольский пр., д. 29, ауд. 423б.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеках и на сайтах Пермского национального исследовательского политехнического университета (<http://www.pstu.ru>) и Пермского государственного национального исследовательского университета (<http://www.psu.ru>).

Автореферат разослан «17» ноября 2014 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета,  
кандидат экономических наук, доцент



Жуланов Е.Е.

## I. Общая характеристика работы

**Актуальность темы исследования.** Развитие энергетики в целом и электроэнергетики в частности, выражающееся не только в увеличении объёмов потребляемой энергии, но и в диверсификации её источников и повышении эффективности производства, во многом определяет темпы экономического роста страны. По сравнению с другими видами энергоносителей, электроэнергия используется во всех сферах человеческой деятельности, является ключевой движущей силой роста мировой энергетики.

Проблемы математического моделирования объёмов потребления электроэнергии в условиях современного развития оптового рынка электроэнергии и мощности приобретают особое значение. В силу штрафных санкций со стороны поставщиков при отклонении реального потребления от заявленного ранее крупные энергопотребители заинтересованы в составлении точных заявок планируемого объёма потребления энергии на оптовом рынке электроэнергии и мощности. Производители электроэнергии заинтересованы в прогнозах энергопотребления с целью оперативного реагирования на колебания спроса и оптимального развития инфраструктуры. От достоверности построенных прогнозов потребления электроэнергии во многом зависят эффективность решений по управлению энергопотреблением, возможности экономии энергоресурсов и экономичность режимов работы всей энергосистемы в целом.

По оценкам портала TAdviser, темпы роста российского рынка автоматизации энергетики составляют около 10–12 % в год, при этом доля энергетики в общих ИТ-расходах российского рынка составляет 5 %. Системные интеграторы («Компьюлинк», «КРОК», «Астерос», «Систематика», IT Energy и др.) отмечают, что большинство энергетических компаний России завершают проекты автоматизации первого уровня – внедрение ERP, EAM и СЭД-систем. Основные игроки электроэнергетического сектора, как генераторы, так и поставщики, уже внедрили системы класса управления предприятием. Но данных систем недостаточно для их эффективного функционирования.

Прогнозирование потребления электроэнергии представляет собой многоэтапный и многоуровневый процесс. Решение этой сложной задачи связано с разработкой экономико-математических моделей, методов и инструментальных средств прогнозирования спроса на электроэнергию на региональном уровне, что непосредственно определяет актуальность диссертационной работы.

**Степень разработанности проблемы.** Начиная с 1970-х годов, формируются теоретические разработки, основанные на эконометрических исследо-

ваниях взаимосвязи динамики потребления энергии и темпов экономического роста: D. Stern (применение векторной авторегрессии), исследования для стран Южной и Юго-Восточной Азии – J. Asafu-Adjaye, для Центральной Америки – N. Apergis, J. Payne, для Китайской Народной Республики – S. Makridakis, R.L. Winkler, Z. Zhang и др.

Системные исследования и их методология в области энергетики, глобальные тенденции развития энергетики, экономика электроэнергетики, методы и модели прогнозных исследований взаимосвязей энергетики и экономики представлены в работах Л.А. Мелентьева, Л.С. Беляева, Н.И. Воропая, А.А. Макарова, Е.О. Штейнгауза, Ю.Д. Кононова, О.В. Мазуровой, Е.В. Гальперовой, В.С. Степанова, В.Н. Фоминой, Н.Д. Рогалёва, Б.И. Макоклюева, В.И. Гнатюк, И.И. Надтока, Б.И. Кудрина и др.

Моделирование долгосрочных программ развития энергетики рассматривали А.А. Макаров, М.А. Гершензон, А.С. Макарова, А.А. Папин, Л.Д. Криворуцкий, А.Г. Гранберг, А.С. Некрасов и др.

Исследования в области долгосрочного и среднесрочного прогнозирования энергопотребления и электропотребления проводятся Международным энергетическим агентством (International Energy Agency), Международным институтом прикладного системного анализа (IIASA), Международным агентством по атомной энергии (МАГАТЭ), Институтом систем энергетики им. Л.А. Мелентьева Сибирского отделения РАН, Институтом энергетических исследований РАН, ОАО «Институт «Энергосетьпроект», а также транснациональными корпорациями Exxon Mobil, British Petroleum и рядом других организаций.

Вышеупомянутые авторы внесли значительный вклад в развитие системных исследований в области энергетики, экономики электроэнергетики, в развитие методов и моделей прогнозирования рынка электроэнергии и мощности во взаимосвязи с экономикой. Тематике применения математического моделирования и прогнозирования в электроэнергетике также посвящено много исследований, проводимых для решения отдельных аспектов изучаемой проблемы. При этом получение прогнозных оценок приемлемого качества возможно лишь в случае одновременного включения в модели общих факторов, влияющих на конъюнктуру оптового рынка электроэнергии и мощности и индивидуальных особенностей регионов. Ввиду необходимости обработки значительных объёмов статистических данных и ресурсоёмких вычислений математические методы в настоящее время применяются преимущественно по отношению к отдельным аспектам функционирования оптового рынка электроэнергии и мощности.

Между тем формирование прогнозных оценок высокой точности и принятие на их основе обоснованных управленческих решений возможно только в случае комплексного подхода.

Всё вышеперечисленное обуславливает актуальность инструментальной реализации комплекса экономико-математических моделей потребления электроэнергии в регионах, включающего не только модели, но и их информационное обеспечение, а также инструментальную реализацию в виде программного комплекса с пользовательским интерфейсом. Необходимость использования комплексного подхода и принципа системности при прогнозировании потребления электроэнергии, согласно которому все процессы рассматриваются с позиций закономерностей системы в целом и с учётом взаимодействия её составляющих, предопределила общий замысел, выбор цели и задач исследования.

**Цели и задачи исследования.** Целью диссертационной работы является разработка и инструментальная реализация комплекса региональных моделей потребления электроэнергии в Российской Федерации, предназначенного для среднесрочного и стратегического прогнозирования её потребления.

Поставленная в диссертационной работе цель обусловила необходимость решения следующих задач:

– разработка подходов к построению региональных моделей потребления электроэнергии на основе анализа отечественного и зарубежного опыта моделирования потребления электроэнергии;

– разработка экономико-математических моделей потребления электроэнергии в регионах Российской Федерации;

– разработка нового программного комплекса моделирования и прогнозирования развития оптового рынка электроэнергии и мощности с учётом различных сценариев развития экономики и государственной политики.

**Область исследования** соответствует Паспорту специальности ВАК РФ 08.00.13 «Математические и инструментальные методы экономики» по следующим пунктам:

1.4. Разработка и исследование моделей и математических методов анализа микроэкономических процессов и систем: отраслей народного хозяйства, фирм и предприятий, домашних хозяйств, рынков, механизмов формирования спроса и потребления, способов количественной оценки предпринимательских рисков и обоснования инвестиционных решений.

1.7. Построение и прикладной экономический анализ экономических и компьютерных моделей национальной экономики и её секторов.

2.6. Развитие теоретических основ методологии и инструментария проектирования, разработки и сопровождения информационных систем субъектов экономической деятельности: методы формализованного представления предметной области, программные средства, базы данных, корпоративные хранилища данных, базы знаний, коммуникационные технологии.

**Теоретическая и методологическая основа исследования.** Теоретическую и методологическую основу исследования составляют труды отечественных и зарубежных учёных в области теории и методологии экономико-математического моделирования, автоматизированных аналитических систем, систем поддержки принятия управленческих решений. В работе использованы методы системного анализа, статистической обработки данных, экономико-математического моделирования, численные методы, средства разработки и интеграции, встраиваемые аналитические компоненты, инструменты аналитической обработки и представления информации VI-платформы Prognoz Platform 7. Информационной базой исследования служат официальные данные Росстата, Министерства экономического развития РФ, Федеральной службы по тарифам, некоммерческого партнёрства «Совет рынка», Системного оператора Единой энергетической системы, данные метеорологических служб и ряда других официальных источников.

**Объект исследования** – конъюнктура спроса регионального оптового рынка электроэнергии и мощности с учётом влияния рыночных цен для основных групп потребителей.

**Предметом исследования** являются методы, алгоритмы и информационные технологии, обеспечивающие моделирование и прогнозирование процесса потребления электроэнергии на региональном уровне.

**Научная новизна** работы заключается в следующем:

1. Разработан подход к построению региональных экономико-математических моделей, предусматривающий, в отличие от существующих аналогов, оценивание параметров, отражающих социально-экономические и климатические особенности регионов.

2. Разработаны и обоснованы новые спецификации экономико-математических моделей прогнозирования потребления электроэнергии, отражающие особенности влияния факторов потребления в условиях краткосрочного, среднесрочного и долгосрочного периодов, что повышает уровень обоснованности

прогнозов динамики потребления электроэнергии и принимаемых на этой основе управленческих решений. Выявлены принципиальные особенности моделей прогнозирования потребления электроэнергии населением и в рамках ключевых категорий потребителей (промышленность, сельское хозяйство, транспорт и связь, строительство), что позволяет, в отличие от существующих моделей, прогнозировать потребление электроэнергии комплексно, по всему составу видов экономической деятельности.

3. Разработан новый программный комплекс моделирования и прогнозирования развития оптового рынка электроэнергии и мощности с учётом различных сценариев развития экономики и государственной политики. В отличие от существующих аналогов, построенный комплекс реализует все ключевые этапы моделирования.

**Основные положения, выносимые на защиту:**

1. Выбор и обоснование подхода к построению комплекса моделей прогнозирования потребления электроэнергии в регионах РФ.

2. Спецификации и идентификации экономико-математических моделей прогнозирования потребления электроэнергии.

3. Программный комплекс моделирования и сценарного прогнозирования регионального потребления электроэнергии в Российской Федерации.

**Теоретическая и практическая значимость работы.** Теоретические положения и выводы, содержащиеся в работе, вносят вклад в исследование актуальных вопросов моделирования и прогнозирования потребления электроэнергии в контексте формирования обоснованного прогноза электропотребления на основе разработанного программного комплекса моделей, адаптированных к современным российским условиям.

Методы и модели прогнозирования потребления электроэнергии интегрированы в систему стратегического планирования диверсифицированного энергетического холдинга – Группы «Интер РАО» – в виде «Программного комплекса моделирования конъюнктуры оптового рынка электроэнергии и мощности в РФ».

Материалы диссертационной работы используются в проекте, выполняемом в рамках Постановления Правительства РФ № 218 от 09.04.2010 г. «О мерах государственной поддержки развития кооперации российских высших учебных заведений и организаций, реализующих комплексные проекты по созданию высокотехнологичного производства».

Полученные результаты могут быть использованы:

- 1) энергетическими холдингами для обеспечения бесперебойной подачи электроэнергии основным потребителям, для планирования развития в области инфраструктуры электроэнергетики;
- 2) крупными потребителями электроэнергии при составлении заявок планируемых объёмов потребления электроэнергии;
- 3) органами государственной власти при формировании энергетической стратегии регионов и страны в целом.

**Степень достоверности и апробация работы.** Степень достоверности результатов проведенных исследований подтверждена корректным теоретическим обоснованием приведенных утверждений. Все выводы и результаты исследования обоснованы на современном уровне строгости.

Адекватность предложенных моделей доказана с использованием статистических критериев, достоверность прогнозных оценок потребления электроэнергии по различным категориям пользователей подтверждается результатами проведённого бэкстестинга, а также использованием разработанного комплекса экономико-математических моделей в интегрированной системы стратегического планирования для Группы «Интер РАО».

Основные результаты исследования представлялись в виде докладов и получили положительную оценку на научных семинарах Лаборатории конструктивных методов исследования динамических моделей (г. Пермь, ПГНИУ, 2012–2014 гг.), открытом городском семинаре Perm Workshop on Applied Economic Modeling (г. Пермь, 23 мая 2014 г.). Основные положения работы докладывались на Пятой международной научной конференции «Инновационное развитие экономики России: сценарии и стратегии» (г. Москва, МГУ имени М.В. Ломоносова, 18–20 апреля 2012 г.), Региональной научно-практической конференции молодых учёных «Междисциплинарные исследования» (г. Пермь, ПГНИУ, 9–11 апреля 2013 г.), Международной конференции Informational Modelling (Болгария, г. Варна, 28 июня – 1 июля 2012 г.), Девятой международной конференции Information Research and Applications (Болгария, г. Варна, 5 июля 2013 г. – заочно), Всероссийской научно-практической конференции молодых учёных с международным участием «Современные проблемы математики и ее прикладные аспекты-2013» (г. Пермь, ПГНИУ, 29–31 октября 2013 г.), Региональной научно-практической конференции молодых специалистов «Статистика – главный информационный ресурс современного общества» (г. Пермь,

3 декабря 2013 г.), Международной конференции Information Theories and Applications (Болгария, г. Варна, 30 июня – 14 июля 2014 г.).

Материалы диссертационной работы используются в учебном процессе ФГБОУ ВПО «Пермский государственный национальный исследовательский университет» при преподавании дисциплин «Методы оптимальных решений», «Групповое проектное обучение», «Эконометрика» и «Современные информационные системы в управлении организацией».

**Публикации.** По материалам диссертационной работы опубликовано 10 работ объёмом 3,81 п.л., из них 4 работы, отражающие основные результаты исследования, опубликованы в изданиях, входящих в список, определенный Высшей аттестационной комиссией при Министерстве образования и науки РФ.

**Объём и структура диссертации.** Диссертационная работа изложена на 153 страницах машинописного текста, состоит из введения, трёх глав, заключения и приложений, иллюстрирована 46 таблицами и 18 рисунками. Библиографический список содержит 110 наименований литературных источников, в том числе 84 отечественных, 26 зарубежных.

Во **введении** обоснована актуальность проведённого исследования, сформулирована научная новизна, приведены цель и задачи исследования, перечислены наиболее существенные результаты, дана общая характеристика диссертационной работы.

В **первой главе** «Анализ отечественного и зарубежного опыта построения моделей потребления электроэнергии» рассмотрены особенности энергетической отрасли, проведён анализ развития электроэнергетики России, методов и моделей, применяемых для прогнозирования потребления электроэнергии, приведены цель и задачи построения комплекса экономико-математических моделей потребления электроэнергии в регионах РФ, а также определены принципы построения и обоснован выбор методов прогнозирования в рамках инструментальной реализации комплекса региональных моделей.

Во **второй главе** «Региональные модели прогнозирования потребления электроэнергии в РФ» приведена структура комплекса региональных моделей, рассмотрены способы расчёта основных сценарных переменных, приведены разработанные спецификации некоторых моделей потребления электроэнергии в рамках видов экономической деятельности, модели потребления электроэнергии населением, модели потерь электроэнергии (коммерческие и технологические потери), модели потребления электроэнергии по трем основным категориям, выделяемым Федеральной службой по тарифам РФ, модели, позволяющие

рассчитывать число часов использования мощности и локальные максимумы потребления мощности.

В **третьей главе** «Программный комплекс моделирования и сценарного прогнозирования регионального потребления электроэнергии в РФ» дано описание инструментальной реализации комплекса региональных экономико-математических моделей, приведены результаты идентификации и прогнозных расчётов на основе комплекса моделей.

В **заключении** приведены основные выводы, оценено практическое значение и даны предложения по дальнейшему развитию комплекса экономико-математических моделей.

## **II. Основное содержание диссертационной работы**

**1. Разработан подход к построению региональных экономико-математических моделей, предусматривающий, в отличие от существующих аналогов, оценивание параметров, отражающих социально-экономические и климатические особенности регионов.**

При построении экономико-математических моделей потребления электроэнергии в регионах РФ за основу был выбран метод конечного использования, основывающийся на предположении о том, что спрос на электроэнергию – производный спрос. Электроэнергия рассматривается не как изолированный объект моделирования, а в непосредственной связи с потребителями.

Выбор математических методов, применяемых при реализации комплекса региональных моделей потребления электроэнергии, осуществлялся в соответствии со следующими критериями:

- возможность автоматизации процесса моделирования;
- интерпретируемость полученных результатов;
- наличие формализованных критериев проверки качества построенных моделей;
- возможность корректировки и уточнения спецификаций построенных моделей.

Для решения поставленной задачи прогнозирования потребления электроэнергии предлагается построение комплекса региональных моделей на основе эконометрических уравнений, отражающих различные аспекты электропотребления. Одним из исходных условий надёжности полученных прогнозных значений является многофакторность. В построенных моделях динамика по-

требления электроэнергии описывается во взаимосвязи с экономическим ростом и экономической эффективностью производства. Основное внимание уделялось также получению статистически значимых оценок параметров моделей и самих моделей в целом, обладающих возможностью экономической интерпретации полученных результатов.

На текущий момент комплекс моделей включает в себя 12 тысяч уравнений, из них 130 уравнений эконометрического характера для каждой из 69 региональных энергосистем, а также для двух городов федерального значения, для семи Объединённых энергетических систем и для Единой энергетической системы в целом. В комплекс входят модели потребления электроэнергии по видам экономической деятельности (промышленность, сельское хозяйство, транспорт и связь, строительство, другие виды экономической деятельности), модели потребления электроэнергии населением (городское и сельское население), модели потерь электроэнергии (коммерческие и технологические потери), модели потребления электроэнергии по трем основным категориям, выделяемым Федеральной службой по тарифам РФ, модели, позволяющие рассчитывать число часов использования мощности и локальные максимумы потребления мощности. Укрупнённая схема прогнозирования на основе комплекса моделей приведена на рисунке 1.

В структуре рассматриваемого программного комплекса региональных моделей можно выделить три вида моделей в зависимости от периода прогнозирования. В соответствии с поставленной задачей это краткосрочные модели с периодом прогнозирования 1 год с динамикой по месяцам, среднесрочные модели квартальной динамики с периодом прогнозирования на 4 последующих года и долгосрочные модели годовой динамики с периодом прогнозирования на последующие 15 лет.

В ретроспективном периоде (с 1993 по 2012 год включительно) анализ временных рядов, характеризующих потребление электроэнергии, позволил выявить изменчивую амплитуду сезонного фактора и отсутствие относительно постоянной сезонной вариации. Выявленные факты свидетельствуют о присутствии мультипликативных моделей сезонности. В рамках данной работы сезонная декомпозиция была выполнена с помощью метода сезонной корректировки Census II, принятого Статистическим управлением США (US Bureau of the Census). Для целей дальнейшего моделирования была использована «очищенная» от сезонности тренд-циклическая составляющая, после получения соответствующих прогнозов искомые временные ряды были определены при помощи обратных преобразований.

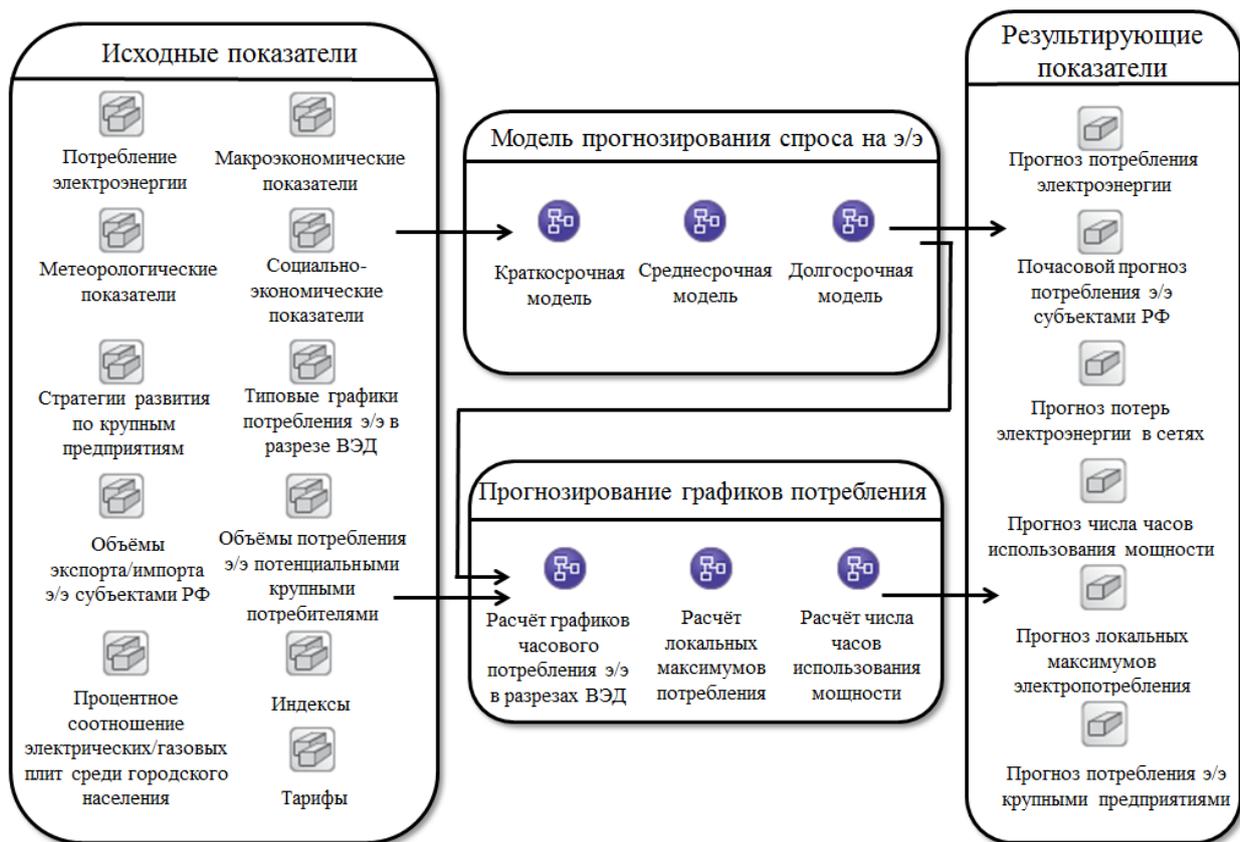


Рис. 1 – Укрупнённая схема прогнозирования на основе комплекса моделей

При краткосрочном прогнозировании потребления электроэнергии (на год вперёд) были использованы экстраполяционные модели, при построении которых была проведена проверка на стационарность временных рядов, анализ автокорреляционных (АКФ) и частных автокорреляционных (ЧАКФ) функций, тесты на единичные корни, в частности расширенный тест Дики – Фуллера. При идентификации моделей использовался оптимизационный метод одновременного вычисления коэффициентов – метод Левенберга – Марквардта.

В отличие от краткосрочного моделирования, основанного на экстраполяционных моделях, среднесрочное и долгосрочное моделирование в рамках рассматриваемого программного комплекса региональных моделей потребления электроэнергии в РФ опирается на факторные модели. Рассматривается единый подход к построению моделей в годовой динамике при долгосрочном прогнозировании и в месячной динамике при среднесрочном прогнозировании:

- используемый тип моделей – множественная регрессия;
- оценка параметров регрессии с помощью метода наименьших квадратов;
- включение в модели статистически значимых и улучшающих качество модели факторов.

2. Разработаны и обоснованы новые спецификации экономико-математических моделей прогнозирования потребления электроэнергии, отражающие особенности влияния факторов потребления в условиях краткосрочного, среднесрочного и долгосрочного периодов, что повышает уровень обоснованности прогнозов динамики потребления электроэнергии и принимаемых на этой основе управленческих решений. Выявлены принципиальные особенности моделей прогнозирования потребления электроэнергии населением и в рамках ключевых категорий потребителей (промышленность, сельское хозяйство, транспорт и связь, строительство), что позволяет, в отличие от существующих моделей, прогнозировать потребление электроэнергии комплексно, по всему составу видов экономической деятельности.

На рисунке 2 приведена укрупнённая схема факторных моделей среднедушевого потребления электроэнергии в рамках созданного комплекса экономико-математических моделей прогнозирования потребления электроэнергии.

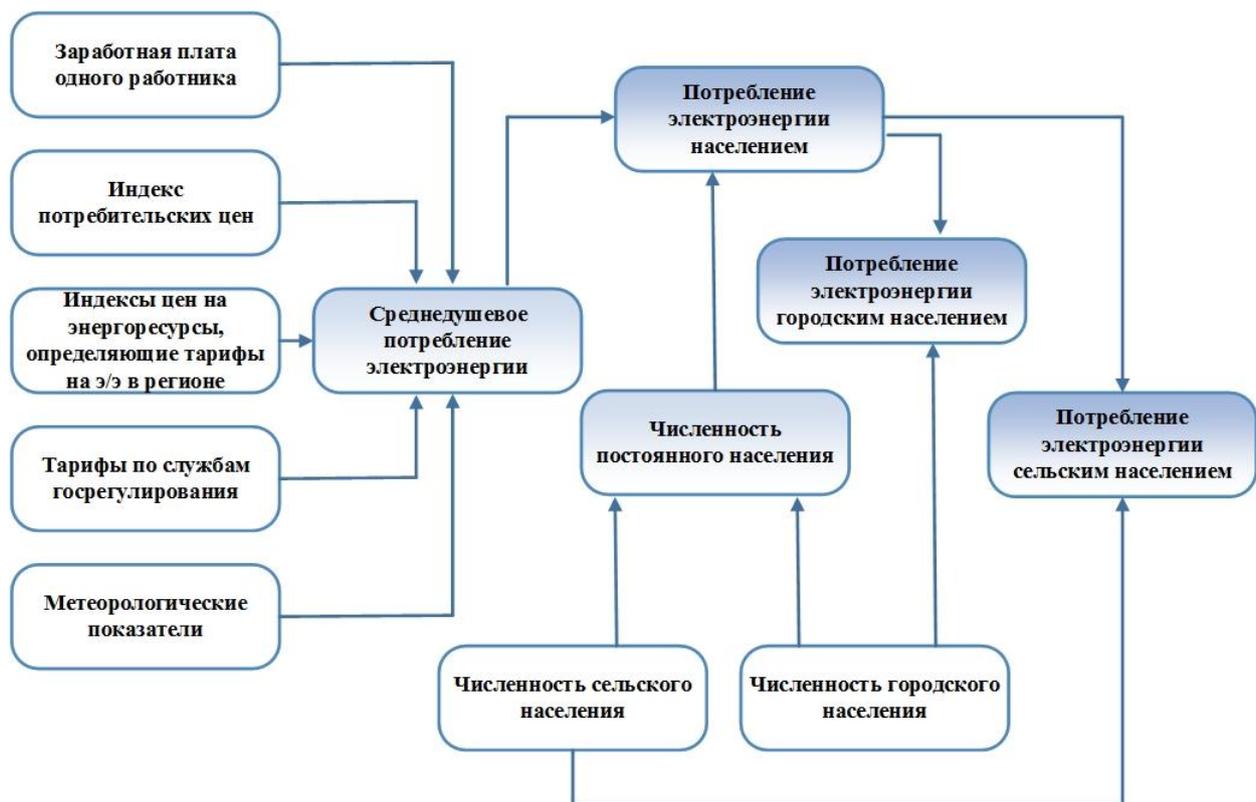


Рис. 2 – Укрупнённая схема модели потребления электроэнергии населением

Среднедушевое потребление электроэнергии определяется исходя из размера заработной платы одного сотрудника, индекса потребительских цен, индексов цен на энергоресурсы, непосредственно определяющих тарифы на элек-

троэнергию в регионе, тарифов по службам государственного регулирования, а также с учётом метеорологических данных.

В качестве примера рассмотрим модель среднесрочного прогнозирования среднедушевого потребления электроэнергии в Пермском крае (таблица 1). Введём ряд обозначений:  ${}^{TC}Y_{i,t}^j$  – тренд-циклическая составляющая временного ряда  $Y_{i,t}^j$ , где  $i$  характеризует номер субъекта Российской Федерации,  $j$  соответствует номеру описываемого показателя.

При построении модели среднесрочного прогнозирования среднедушевого потребления электроэнергии в Пермском крае было использовано преобразование «темпы прироста к соответствующему периоду прошлого года» для моделируемой переменной  $(T_{np}YoY({}^{TC}Y_{1,t}^1))$ , для обеспечения стационарности моделируемого временного ряда:

$$T_{np}YoY({}^{TC}Y_{1,t}^1) = \left( \frac{{}^{TC}Y_{1,t}^1}{{}^{TC}Y_{1,t-12}^1} - 1 \right) \cdot 100. \quad (1)$$

Таблица 1 – Модель среднесрочного прогнозирования среднедушевого потребления электроэнергии в Пермском крае  $T_{np}YoY({}^{TC}Y_{1,t}^1)$

Коэффициент	Значение	Стандартная ошибка	t-статистика	Вероятность
Константа	4,9603	0,0186	2,4573	0,0148
$T_{np}YoY(X_{1,t}^9)$	-0,1372	0,0559	-2,2073	0,0722
$T_{np}YoY({}^{TC}Y_{1,t-1}^1)$	0,8655	0,0352	6,5704	0,0001
$adjR^2$	0,8518			
$F_{stat}$	302,9711			

*Примечание.*  ${}^{TC}Y_{1,t}^1$  – тренд-циклическая составляющая временного ряда, отражающего среднедушевое потребление электроэнергии в Пермском крае, кВт·час/чел;  $X_{1,t}^9$  – численность населения со среднедушевыми денежными доходами ниже величины прожиточного минимума, % к общей численности населения Пермского края.

При моделировании потребления электроэнергии промышленными производствами необходимо учитывать наличие промышленных предприятий на территории рассматриваемых субъектов Российской Федерации, являющихся крупными потребителями электроэнергии. В рамках данной работы под круп-

ным потребителем электроэнергии будем понимать открытые акционерные общества, публикующие актуальную отчетность о своей финансовой деятельности в открытых источниках и при этом являющиеся конечными потребителями электрической энергии, приобретающие её непосредственно с оптового рынка электроэнергии и мощности, минуя энергоснабжающую организацию в силу высоких объемов потребления электрической энергии (объемов, превышающих минимально допустимые значения, устанавливаемые правилами оптового рынка). При наличии крупных потребителей электроэнергии на территории субъектов Российской Федерации для данных регионов строятся отдельные модели потребления электроэнергии предприятиями на основе стратегий их развития.

Потребление электроэнергии промышленными производствами рассчитывается с использованием индексов промышленного производства, производств важнейших видов промышленной продукции, индексов цен на энергоресурсы, непосредственно определяющих тарифы на электроэнергию в регионе, тарифов по службам государственного регулирования, с учётом метеорологических данных, а также с учётом потребления электроэнергии крупными потребителями.

В рамках комплекса региональных моделей потребления электроэнергии в РФ для прогнозирования фактических потерь электроэнергии в энергосетях регионов вводится вспомогательный показатель – коэффициент потерь ( $K_{i,t}^{27}$ ):

$$Y_{i,t}^{26} = K_{i,t}^{27} \cdot (Y_{i,t}^{28} + Y_{i,t}^2 + Y_{i,t}^5 + Y_{i,t}^6 + Y_{i,t}^7 + Y_{i,t}^8), \quad (2)$$

где  $Y_{i,t}^{26}$  – фактические потери электроэнергии в сетях, кВт·ч;  $K_{i,t}^{27}$  – коэффициент фактических потерь, %;  $Y_{i,t}^{28}$  – потребление электроэнергии населением, кВт·ч;  $Y_{i,t}^2$  – потребление электроэнергии промышленными производствами, кВт·ч;  $Y_{i,t}^5$  – потребление электроэнергии транспортом и связью, кВт·ч;  $Y_{i,t}^6$  – потребление электроэнергии сельским хозяйством, кВт·ч;  $Y_{i,t}^7$  – потребление электроэнергии строительством, кВт·ч;  $Y_{i,t}^8$  – потребление электроэнергии прочими ВЭД, кВт·ч.

Программный комплекс позволяет производить расчёт технологических и коммерческих потерь. Доли технологических потерь на периоде идентификации определялись на основании данных электросетевых компаний (например, ОАО «Россети»). Величина коммерческих потерь определялась как разность

между величиной фактических и технологических потерь. На рисунке 3 приведены прогнозные оценки отчётных потерь электроэнергии в сетях за 2015 год по базовому сценарию.

Программный комплекс региональных экономико-математических моделей прогнозирования потребления электроэнергии также позволяет моделировать значения потребления электроэнергии не только в разрезе видов экономической деятельности и населения, но и для основных категорий потребителей, выделяемых Федеральной службой по тарифам РФ: категория 1 (свыше 10 МВт·ч); категория 2 (от 670 кВт·ч до 10 МВт·ч) и категория 3 (до 670 кВт·ч). Потребление электроэнергии по данным категориям определяется на основе весовых коэффициентов.



Рис. 3 – Прогнозные оценки отчётных потерь электроэнергии в сетях по базовому сценарию за 2015 год

Расчёт локальных максимумов потребления электроэнергии для отдельных категорий потребителей выполняется на основе графиков часового потребления электроэнергии в разрезах секторов экономики и ВЭД, а также числа часов использования мощности (ЧЧИМ).

Число часов использования мощности  $Y_{l,t}^{31}$  определяется для  $l$ -й категории потребителей как отношение суммарного заявленного годового электропотреб-

ления данной категорией потребителей  $Y_{i,t}^{32}$  в  $i$ -м регионе к фактической максимальной мощности  $l$ -й категории потребителей в часы максимальных нагрузок по каждому региону  $\left( (P_{\max})_{l,i,t} \right)$ :

$$Y_{i,t}^{31} = \frac{Y_{i,t}^{32}}{\left( P_{\max} \right)_{l,i,t}}. \quad (3)$$

Для расчёта фактической максимальной мощности выделенных групп потребителей необходимо выполнить следующий алгоритм:

1. Для каждого сектора экономики и вида экономической деятельности определяется число часов работы в месяц во всех рассматриваемых регионах РФ  $\left( (T_{\max})_{p_{i,t}} \right)$ , где  $p_{i,t}$  соответствует виду экономической деятельности.

При расчёте числа часов работы в месяц необходимо также учесть количество рабочих, выходных, праздничных и предпраздничных дней в месяце (производственный календарь) рассматриваемого года.

2. После расчёта числа часов работы в месяц для  $p_{i,t}$ -го вида экономической деятельности можно вычислить расчётный месячный объём фактического пикового потребления мощности ВЭД:

$$\left( P_{\text{расч}} \right)_{p_{i,t}} = \frac{Y_{p_{i,t}}^{32}}{\left( T_{\max} \right)_{p_{i,t}}}, \quad (4)$$

где  $\left( P_{\text{расч}} \right)_{p_{i,t}}$  – расчётный месячный объём фактического пикового потребления мощности  $p_{i,t}$ -го ВЭД, кВт;  $Y_{p_{i,t}}^{32}$  – потребление электрической энергии  $p_{i,t}$ -го ВЭД в месяц, кВт·ч;  $\left( T_{\max} \right)_{p_{i,t}}$  – число часов работы в месяц, ч.

3. На основе полученных расчётных месячных объёмов фактического пикового потребления мощности секторов экономики и видов экономической деятельности можно получить значения расчётных месячных объёмов фактического потребления мощности по рассматриваемым категориям потребителей  $(l)$ ,  $\lambda$  – множество категорий потребителей:

$$\left( P_{\text{расч}} \right)_{l,i,t} = \sum_{p_{i,t} \in \lambda_{i,t}} \left( P_{\text{расч}} \right)_{p_{i,t}}. \quad (5)$$

4. После нахождения значений фактического потребления мощности по рассматриваемым категориям потребителей в динамике по месяцам необходимо определить величину фактической максимальной мощности  $l$ -й категории потребителей в часы максимальных нагрузок по каждому региону ( $P_{\max l_{i,t}}$ ):

$$(P_{\max})_{l_{i,t}} = \max_{t=1,12} (P_{\text{расч}})_{l_{i,t}} . \quad (6)$$

С помощью описанного выше алгоритма был проведён расчёт числа часов использования мощности для всех категорий потребителей электроэнергии, согласно выбранной классификации Федеральной службы по тарифам РФ в периоде идентификации моделей (1993–2012 годы).

В таблице 2 приведены прогнозные значения числа часов использования мощности по некоторым регионам РФ за 2015 год по базовому сценарию расчёта.

Таблица 2 – Прогноз ЧЧИМ за 2015 г. по базовому сценарию

№ п/п	Субъект РФ	ЧЧИМ 1-й категорией потребителей, ч	ЧЧИМ 2-й категорией потребителей, ч	ЧЧИМ 3-й категорией потребителей, ч
1	Вологодская область	8012	7206	7152
2	Республика Хакасия	7799	7069	5352
3	Липецкая область	7638	6972	6279
4	Тюменская область	7549	7550	6172
5	Белгородская область	7532	6827	7550
6	Хабаровский край	7500	5007	5007
7	Челябинская область	7452	7152	6425
8	Владимирская область	7433	6879	6399
9	Волгоградская область	7328	6552	6827
10	Свердловская область	7276	6425	7069

На периоде прогнозирования число часов использования мощности определялось с помощью ARIMA моделей либо с помощью трендовых моделей с подбором функциональной зависимости.

Исходя из формулы (3), величина фактической максимальной мощности категории потребителей в часы максимальных нагрузок по каждому региону была найдена как отношение суммарного заявленного годового электропотребления данной категорией потребителей к числу часов использования мощности.

**3. Разработан новый программный комплекс моделирования и прогнозирования развития оптового рынка электроэнергии и мощности с учётом различных сценариев развития экономики и государственной политики. В отличие от существующих аналогов, построенный комплекс реализует все ключевые этапы моделирования.**

Комплекс экономико-математических моделей прогнозирования потребления электроэнергии в регионах РФ, объединяющий современные технологии хранилищ данных, визуализации, оперативного анализа данных (OLAP), формирования отчётности, а также моделирования и прогнозирования бизнес-процессов, создан с использованием Prognoz Platform 7 – BI-платформы для создания и разработки настольных, web и мобильных приложений. Комплекс региональных моделей инструментально разработан с использованием языка Microsoft Visual C++. Взаимодействие компонентов комплекса осуществляется с помощью COM-технологии (Microsoft Component Object Model), часть механизмов взаимодействия реализована с использованием web-сервисов.

В рамках рассматриваемого программного комплекса региональных моделей прогнозирования потребления электроэнергии были построены краткосрочные модели с периодом прогнозирования 1 год и шагом расчёта месяц, среднесрочные модели на следующие 4 года в квартальной динамике и долгосрочные модели на последующие 15 лет с шагом расчёта в 1 год. На рисунке 4 приведены полученные прогнозные оценки потребления электроэнергии при расчёте комплекса моделей по базовому сценарию 7 Объединёнными энергетическими системами на период с 2013 по 2017 год.

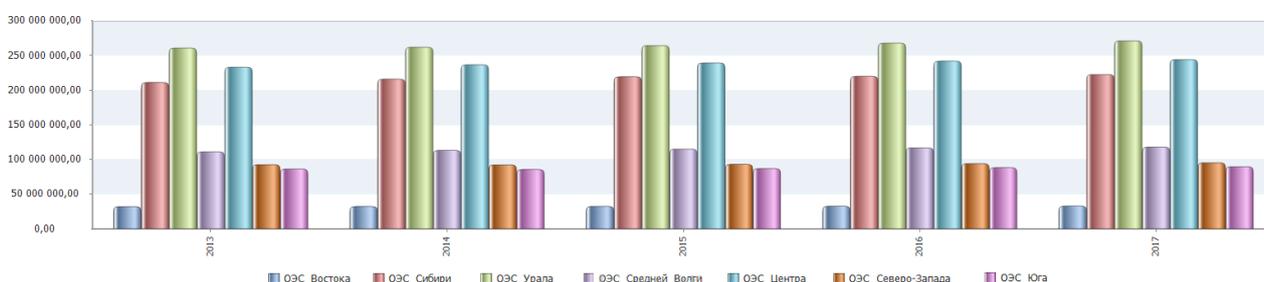


Рис. 4 – Прогноз потребления электроэнергии Объединёнными энергетическими системам на 2013–2017 годы по базовому сценарию

В качестве примера рассмотрим базовый сценарий, предполагающий среднегодовой рост ВВП порядка 3 %, среднегодовой темп роста индекса потребительских цен в размере 4,33 %, среднегодовой темп роста номинальной

начисленной заработной платы 7,8 % и ряд других показателей, некоторые значения которых приведены в таблице 3.

Благодаря удобному и интуитивно понятному пользовательскому интерфейсу существует возможность настройки следующих параметров расчёта: период идентификации моделей; период прогнозирования; сценарий расчёта; субъект РФ. Соответственно пользователь самостоятельно настраивает параметры расчёта, что позволяет значительно экономить время расчёта всего комплекса моделей. Существует возможность отдельно проводить расчёт для краткосрочных, среднесрочных и долгосрочных моделей для каждого субъекта в отдельности и в целом для страны по одному или нескольким выбранным сценариям.

Таблица 3 – Основные макроэкономические показатели  
в рамках комплекса региональных моделей для базового сценария  
развития экономики РФ на 2013–2033 годы

Показатель	Годы										
	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2025	2030	2033
ВВП	1,02	1,02	1,02	1,02	1,03	1,03	1,03	1,04	1,03	1,03	1,03
Темп роста индекса потребительских цен (ИПЦ)	1,06	1,05	1,05	1,05	1,05	1,05	1,04	1,04	1,04	1,04	1,04
Темп роста индекса цен производителей (ИЦП)	1,06	1,06	1,06	1,06	1,06	1,06	1,05	1,05	1,04	1,04	1,03
Темп роста номинальной начисленной заработной платы	1,1	1,09	1,1	1,11	1,11	1,11	1,09	1,08	1,07	1,06	1,06
Темп роста индекса-дефлятора валового накопления основного капитала (инвестиций)	1,07	1,07	1,07	1,05	1,05	1,05	1,04	1,04	1,03	1,03	1,03
Темп роста индекса-дефлятора ВВП РФ	1,06	1,05	1,05	1,05	1,05	1,05	1,04	1,04	1,04	1,04	1,04
Темп роста индекса-дефлятора услуг строительства	1,07	1,07	1,07	1,07	1,06	1,06	1,05	1,05	1,03	1,03	1,03
Темп роста индекса-дефлятора услуг транспорта и связи	1,09	1,08	1,07	1,07	1,07	1,07	1,06	1,04	1,04	1,03	1,03
Обменный курс евро/доллар США	1,31	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3
Ставка рефинансирования ЦБ РФ	7,75	7,75	7,75	7,5	7,5	7,25	7,25	7,25	6,75	6,5	6,25

На рисунке 5 приведен пример разработанной отчётной формы визуализации полученных результатов сценарного моделирования и прогнозирования потребления электроэнергии Российской Федерации по трём сценариям (базовый, оптимистический и пессимистический).

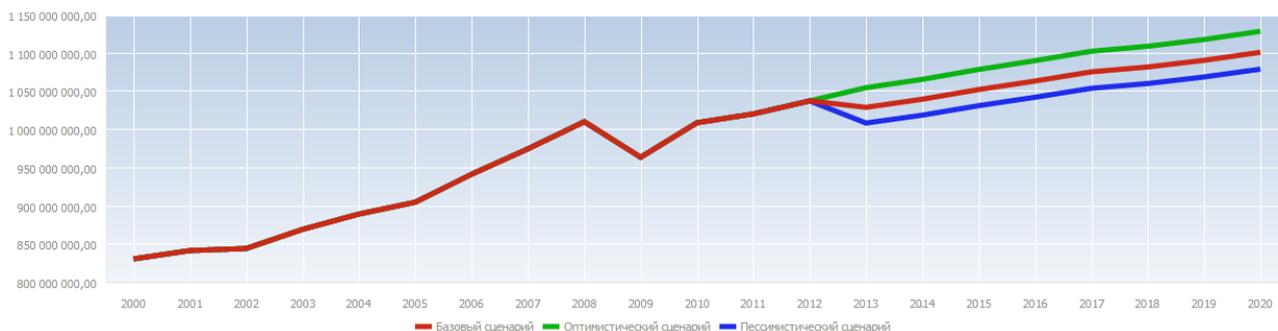


Рис. 5 – Пример разработанной отчётной формы визуализации полученных результатов сценарного моделирования и прогнозирования потребления электроэнергии РФ

## Заключение

В диссертационной работе получили развитие подходы и региональные модели потребления электроэнергии, разработанные на основе эконометрических методов.

Спецификации региональных экономико-математических моделей потребления электроэнергии, предназначенные для целей среднесрочного и стратегического прогнозирования, позволяют учесть различные сценарии развития экономики и государственной политики.

Определяющими являются модели потребления электроэнергии, построенные по видам экономической деятельности (промышленность, сельское хозяйство, транспорт и связь, строительство, другие виды экономической деятельности).

Модели потребления электроэнергии населением (городское и сельское население), модели потерь электроэнергии (коммерческие и технологические потери), модели потребления электроэнергии по трём основным категориям, выделяемым Федеральной службой по тарифам РФ, а также модели, позволяющие определять число часов использования мощности и локальные максимумы потребления мощности являются существенным дополнением к основополагающим моделям.

Новый программный комплекс моделирования и сценарного прогнозирования регионального потребления электроэнергии в РФ способствует повышению уровня обоснованности прогноза динамики потребления электроэнергии.

Предложенная в диссертационной работе визуализация данных с помощью карт, диаграмм с функциями настройки необходимых данных позволяет пользователю проводить оперативный высококачественный анализ как полученных прогнозных оценок, так и их фактических значений в периоде идентификации моделей, а также модуль консенсус-прогнозов.

Полученные в диссертации теоретические и прикладные результаты позволяют рассматривать их как предпосылку будущих исследований, посвящённых созданию систем поддержки принятия управленческих решений в области стратегического развития инфраструктуры электроэнергетики, решению задач управления и оптимизационных задач.

### **III. Список работ, опубликованных по теме диссертации**

Работы, опубликованные в российских рецензируемых научных журналах, рекомендованных ВАК при Министерстве образования и науки РФ:

1. Андрианов Д.Л., Науменко Д.О., Старкова Г.С. Анализ методов и моделей энергопотребления на макроуровне // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Экономические науки. – СПб., 2012. – № 4. – С. 215–219.

2. Андрианов Д.Л., Старкова Г.С. Разработка программного комплекса региональных моделей конъюнктуры оптового рынка электроэнергии и мощности в части спроса на электроэнергию в Российской Федерации [Электронный ресурс] // Управление экономическими системами: электронный научный журнал. – 2013. – № 12(60). – URL: <http://www.uecs.ru>.

3. Андрианов Д.Л., Старкова Г.С. Создание региональной комплексной модели конъюнктуры оптового рынка электроэнергии и мощности Российской Федерации // Вестник Пермского университета. Сер.: Экономика. – 2014. – №1(20). – С. 8–13.

4. Старкова Г.С. Программная реализация комплекса региональных моделей потребления электроэнергии в РФ на базе Prognoz Platform // Управление экономическими системами: электронный научный журнал. – 2014. – № 9 (69). – URL: <http://www.uecs.ru>.

Другие работы, опубликованные по теме диссертации:

5. Старкова Г.С. Методы и модели прогнозирования электропотребления на региональном уровне // International Journal “Information theories and applications”. – 2012. – Vol. 19, № 4. – P. 378–383.

6. Старкова Г.С. Программный комплекс региональной модели конъюнктуры оптового рынка электроэнергии и мощности РФ // Актуальные проблемы механики, математики, информатики: сб. тез. науч.-практ. конф. (г. Пермь, 30 октября – 1 ноября 2012) / Перм. гос. нац. исслед. ун-т. – Пермь, 2012. – С. 121.

7. Старкова Г.С. Создание региональной модели конъюнктуры оптового рынка электроэнергии и мощности Российской Федерации. Междисциплинарные исследования: сб. матер. науч.-практ. конф. (г. Пермь, 9–11 апреля 2013 г.) / гл. ред. Ю.А. Шарапов. – Пермь: Изд-во Перм. гос. нац. исслед. ун-та, 2013. – Т. 1. – С. 145–152.

8. Старкова Г.С. Программный комплекс анализа конъюнктуры оптового рынка электроэнергии и мощности // International Journal “Information Models and Analyses”. – 2013. – Vol. 2, № 3. – P. 292–299.

9. Старкова Г.С. Разработка программного комплекса региональных моделей конъюнктуры оптового рынка электроэнергии и мощности РФ // Сб. материалов науч.-практ. конф. «Статистика – главный информационный ресурс современного общества» (декабрь 2013) / Пермьстат. – Пермь, 2013. – С. 35–37.

10. Старкова Г.С., Фролова Н.В. Программный комплекс региональных моделей потребления электроэнергии в Российской Федерации // International Journal “Information theories and applications”. – 2014. – Vol. 21, № 3. – P. 283–293.

---

Подписано в печать \_\_.\_\_.\_\_\_\_. Формат 90×60/16.  
Усл. печ. л. 1,5. Тираж 130 экз. Заказ № \_\_\_\_\_.

---

Типография Пермского государственного национального  
исследовательского университета.  
Адрес: 614990, г. Пермь, ул. Букирева, 15.