

*На правах рукописи*

*lof*

Согласно соглашению с научной этической комиссией Цельесообразной консультации

**Соломахо Ксения Львовна**

**ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА ГЛАВНЫХ КОМПОНЕНТ  
ДЛЯ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ОБЪЕМОВ ЭЛЕКТРОПОТРЕБЛЕНИЯ  
ЭНЕРГОСБЫТОВОГО ПРЕДПРИЯТИЯ**

Специальность 05.09.03 – «Электротехнические комплексы и системы»

Научный руководитель – кандидат технических наук, доцент, профессор кафедры «Энергетика и электрификация промышленности» Уральского государственного технического университета им. С.М. Кирова

1	10%	22%	32%	0%	21%
2	10%	22%	32%	0%	21%

**Автореферат**

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

На тему: «Предиктивное моделирование объемов электропотребления энергосбытового предприятия с использованием метода главных компонент»

Научный руководитель кафедры «Энергетика и электрификация промышленности» Уральского государственного технического университета им. С.М. Кирова

Научный руководитель кафедры «Энергетика и электрификация промышленности» Уральского государственного технического университета им. С.М. Кирова

Научный руководитель кафедры «Энергетика и электрификация промышленности» Уральского государственного технического университета им. С.М. Кирова

Научный руководитель кафедры «Энергетика и электрификация промышленности» Уральского государственного технического университета им. С.М. Кирова

Научный руководитель кафедры «Энергетика и электрификация промышленности» Уральского государственного технического университета им. С.М. Кирова

Научный руководитель кафедры «Энергетика и электрификация промышленности» Уральского государственного технического университета им. С.М. Кирова

Научный руководитель кафедры «Энергетика и электрификация промышленности» Уральского государственного технического университета им. С.М. Кирова

Научный руководитель кафедры «Энергетика и электрификация промышленности» Уральского государственного технического университета им. С.М. Кирова

Научный руководитель кафедры «Энергетика и электрификация промышленности» Уральского государственного технического университета им. С.М. Кирова

Научный руководитель кафедры «Энергетика и электрификация промышленности» Уральского государственного технического университета им. С.М. Кирова

Научный руководитель кафедры «Энергетика и электрификация промышленности» Уральского государственного технического университета им. С.М. Кирова

Научный руководитель кафедры «Энергетика и электрификация промышленности» Уральского государственного технического университета им. С.М. Кирова

Научный руководитель кафедры «Энергетика и электрификация промышленности» Уральского государственного технического университета им. С.М. Кирова

Научный руководитель кафедры «Энергетика и электрификация промышленности» Уральского государственного технического университета им. С.М. Кирова

Научный руководитель кафедры «Энергетика и электрификация промышленности» Уральского государственного технического университета им. С.М. Кирова

Челябинск – 2015

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Южно-Уральский государственный университет» (национальный исследовательский университет) на кафедре электротехники и возобновляемых источников энергии.

Научный руководитель –

доктор технических наук, профессор **Кирпичникова Ирина**

**Михайловна.**

Официальные оппоненты:

**Кудрин Борис Иванович**, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий» Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Национальный исследовательский университет «МЭИ», г. Москва.

**Никольский Олег Константинович**, доктор технических наук, профессор, зав. кафедрой «Электрификация производства и быта» Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова», г. Барнаул.

**Ведущая организация** – Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Уфимский государственный авиационный технический университет», г. Уфа.

Защита состоится 24 апреля 2015 г. в 10:00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.298.05 при ФГБОУ ВПО «Южно-Уральский государственный университет» (национальный исследовательский университет) по адресу: г. Челябинск, пр. им. В.И. Ленина, 76, ауд. 1001.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВПО «Южно-Уральский государственный университет» (национальный исследовательский университет) и на интернет-портале ЮУрГУ по адресу: <http://www.susu.ac.ru/ru/dissertation/d-21229805/solomaho-kseniya-lvovna>.

Автореферат разослан « \_\_\_ » 2015 г.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью учреждения, просим направлять по адресу: 454080, г. Челябинск, пр. им. В.И. Ленина, 76, гл. корпус, Ученый совет ЮУрГУ, тел./факс: +7 (351) 267-91-23, e-mail: grigorevma@susu.ac.ru.

Ученый секретарь

диссертационного совета Д 212.298.05

д-р техн. наук, доцент.

Григорьев

Максим Анатольевич

## **ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ**

**Актуальность работы.** Актуальная для современных предприятий проблема энергоемкости была обозначена Президентом Российской Федерации в Указе от 4 июня 2008 года №889 «О некоторых мерах по повышению экологической и энергетической эффективности России». В Указе была поставлена глобальная задача по снижению энергоемкости российской экономики на 40 % относительно 2007 года. В связи с этим на предприятиях, работающих в области электроэнергетики, стали проводить мероприятия по энергоэффективности, которые оказывают влияние на увеличение прибыли за счет сокращения убытков. Одной из важных составляющих мероприятий по оптимизации энергетических затрат предприятия стало прогнозирование объемов электрической энергии, что является неотъемлемой частью ежедневной работы.

В настоящее время на большинстве предприятий применяются методы экспертных оценок, когда прогноз осуществляется сотрудником компании на основе использования простейших арифметических операций, что не может обеспечить высокую точность. Однако современные подходы к экономическому и техническому управлению, развитие информационных технологий предъявляют все более жесткие требования к точности решения задач прогнозирования. Эффективным решением данной задачи является создание математической модели прогнозирования, адекватно описывающей исследуемый процесс. Использование при прогнозировании автоматизированных математических моделей на предприятии позволяет строить прогнозы с высокой точностью, сокращает время, затрачиваемое на процесс прогнозирования, а так же помогает принимать управленческие решения.

Статистических методов, лежащих в основе математической модели, в настоящее время известно большое количество, все они имеют свои достоинства и недостатки. Выбор статистического метода осуществляется под требования конкретного предприятия путем сопоставления положительных и отрицательных качеств метода и исследования эффективности его применения на данном предприятии. Выбор статистического метода – очень важный этап при построении математической модели. Для выбора оптимального метода четко формулируют исходные требования: цель, интервал и точность прогноза, адаптивность прогнозной модели, ее быстродействие и т.д.

Деятельность энергосбытовой компании, являющейся участником оптового рынка электроэнергии, включает в себя закуп объемов электроэнергии на этом рынке и ее реализацию розничным потребителям. При этом объемы электроэнергии, закупаемые на оптовом рынке, должны быть равны составленным прогнозам. В случае отклонения фактически потребленной электроэнергии от заявленной, энергосбытовое предприятие вынуждено докупать объемы электроэнергии или продавать излишне закупленные объемы электроэнергии на балансирующем рынке по невыгодной для предприятия

цене. В конечном итоге все затраты отразятся в цене для потребителя. Кроме того, при больших отклонениях на энергосбытовое предприятие могут быть наложены меры оперативного воздействия. Так же создаются риски смены сбытовых компаний розничными потребителями. В итоге энергосбытовое предприятие, являющееся гарантирующим поставщиком, несет финансовые потери и снижение экономических показателей.

Таким образом, разработка математической модели прогнозирования на энергосбытовом предприятии является актуальной, а ее реализация позволит повысить точность прогнозирования потребления объемов, влияя тем самым на снижение затрат предприятия.

**Степень научной обоснованности проблемы.** Решению проблемы прогнозирования электроэнергии посвящено немало работ. Особый интерес представляют работы по краткосрочному прогнозированию объемов электропотребления таких учёных, как Воронов, И.В., Демура, А.В., которые предложили прогнозирование на основе нейронной сети, Гнатюка, В.И., Лагуткина, О.Е., которые предложили метод на основе техноценоза, Манусова В.З., Никифорова Г.В., которые предложили прогнозирование на основе регрессионного анализа, Клеопатрова Д.И., предложившего прогнозирование на основе экспоненциального сглаживания. Однако предложенные методы не могут быть применены к решению задачи прогнозирования объемов потребления электроэнергии на энергосбытовом предприятии в связи с некоторыми ограничениями, к которым относятся: невозможность использования большого числа факторов, использование субъективных оценок, необходимость использования статистических выборок за большой период времени, требования к техническим и программным инструментам. Данные ограничения отсутствуют в статистическом методе главных компонент, который в энергетике до сегодняшнего дня не использовался.

**Объект исследования** – статистические данные энергосбытового предприятия по реализации объемов электроэнергии розничным потребителям, заключившим договоры с энергосбытовым предприятием на расчеты за электроэнергию.

**Предмет исследования** – процесс прогнозирования объемов электропотребления потребителей энергосбытового предприятия.

**Целью** диссертационной работы является применение и адаптация статистического метода главных компонент для прогнозирования объемов электропотребления в области энергетики.

**Идея работы.** Прогнозирование объемов электроэнергии следует вести на основе метода главных компонент с учетом факторов и закономерностей, оказывающих влияние на изменение объемов электропотребления. Модель должна иметь высокую скорость вычисления прогнозных значений и сравнимую с другими моделями точность прогнозирования различных временных рядов. Погрешность не должна быть больше заданной величины.

### **Задачи исследования:**

- анализ статистических методов и моделей прогнозирования объемов потребления электроэнергии на промышленных предприятиях, определение наиболее эффективного метода прогнозирования;
- анализ факторов, влияющих на потребление объемов электроэнергии;
- разработка математической модели прогнозирования на основе метода главных компонент;
- оценка работы модели при прогнозировании объемов потребления электроэнергии на энергосбытовом предприятии и сравнительный анализ полученной модели по точности прогнозов с моделью на основе регрессионного анализа;
- экономическая оценка предложенной модели.

**Методы исследования.** В работе использовались теоретические методы и экспериментальные исследования, заключающиеся в научном анализе тенденций изменения объемов электропотребления в зависимости от изменения факторов, методы математической статистики, статистические выборки, факторы и данные метеослужбы. В работе использовались доклады предприятий, использующих статистические методы с результатами их использования.

**Достоверность полученных результатов** подтверждается на основе расчетов с помощью двух статистических методов, относительным совпадением результатов, совпадением результатов, полученных методом главных компонент, и исходных данных с учетом погрешности, не противоречащей поставленной задаче.

### **Научные положения, выносимые на защиту, и их научная новизна**

1. С учетом общих тенденций изменения объемов электропотребления разработана математическая модель прогнозирования объемов электропотребления на основе метода главных компонент, отличающаяся от используемого метода регрессионного анализа меньшей погрешностью.
2. Определены наиболее значимые факторы, влияющие на энергопотребление, которые необходимо учитывать для повышения точности прогнозирования.
3. Предложена модель прогнозирования потребления объемов электроэнергии, значительно снижающая погрешность расчетов и обеспечивающая сокращение издержек энергосбытового предприятия в два и более раза.

**Практическое значение** работы заключается в следующем:

- модель прогнозирования энергопотребления энергосбытового предприятия разработана на основе заявки предприятия по снижению погрешности при составлении прогнозов потребления электроэнергии;

– разработанный метод прогнозирования объемов электропотребления на предприятии на основе метода главных компонент позволяет сократить издержки при составлении прогноза;

– модель прогнозирования энергопотребления внедрена в Центральном филиале ОАО «Челябэнергосбыт» для решения задачи прогнозирования объемов электропотребления, что подтверждается актом о внедрении.

**Апробация работы.** В полном объеме работа докладывалась и обсуждалась на расширенных заседаниях кафедр «Электротехника и возобновляемые источники энергии» и «Системы электроснабжения» ФГБОУ ВПО «Южно-Уральский государственный университет», г. Челябинск.

Основные положения и результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на конференциях и семинарах, в том числе на: Общероссийской научно-практической конференции «Социально-экономические проблемы развития общества», г. Красноярск, 2009 г.; 62-й, 63-й, 66-й научно-практических конференциях аспирантов ЮУрГУ, г. Челябинск, 2010, 2011, 2014 гг.; заочной научно-практической конференции «Современные технологии в физико-математическом образовании», ЮУрГУ, г. Челябинск, 2014 г.

**Публикации.** По теме диссертации опубликовано 11 научных статей (из них – 3 в периодических изданиях, рекомендованных ВАК РФ), 4 доклада на конференциях, 1 акт о внедрении модели на предприятии.

**Личный вклад автора** состоит в постановке задач исследования, исследовании методов решения, в формулировании и доказательстве научных положений, разработке модели для решения задач прогнозирования.

**Структура и объем работы.** Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, изложенных на 134 страницах машинописного текста, содержит 22 рисунка, 7 таблиц, список используемой литературы из 134 наименований.

**Соответствие научной специальности:** исследование, проводимое в рамках диссертационной работы, полностью соответствует формуле и п. 4 области исследования, приведенной в паспорте специальности 05.09.03.

**Во введении** обоснована актуальность работы, сформулированы научные положения, их новизна, практическая значимость.

**В первой главе** диссертации обоснована необходимость повышения точности прогнозирования энергопотребления региона с целью экономии природных ресурсов при выработке электроэнергии и борьбы с высокой энергоемкостью предприятий в России.

Описана важность повышения точности прогнозирования энергопотребления для энергосбытового предприятия, являющегося посредником между энерговырабатывающими станциями и конечными потребителями. Показано, что экономические показатели энергосбытового предприятия зависят от полезного отпуска электроэнергии конечному

потребителю. Основными функциями энергосбытового предприятия является закупка электрической энергии на оптовом рынке и продажа потребителям, а так же заключение договоров с потребителями на расчеты за электроэнергию. Объем электроэнергии, закупаемый на оптовом рынке, равен спрогнозированному объему. В случае составления неточного прогноза могут возникать следующие проблемы:

1. Нехватку объемов либо лишние объемы энергосбытовое предприятие докупает либо реализует на оптовом рынке по невыгодной цене (балансирующий рынок, оплата отклонений фактической мощности от заявленной).
2. Дополнительные затраты в конечном итоге отражаются в цене потребителя розничного рынка.
3. Создаются риски смены сбытовых компаний розничными потребителями.
4. Снижаются экономические показатели предприятия в целом.

Определены требования для решения задачи прогнозирования электропотребления. Для решения задач прогнозирования энергосбытовым предприятием были определены следующие требования к модели прогнозирования:

1. По методике расчета стоимости отклонений, утвержденной Федеральной службой составления прогнозов с заданной точностью, допускается отклонение на 2–3 % от заявки, поэтому при прогнозировании погрешность должна попадать в заданный диапазон.
2. Модель должна быть реализована и возможна к использованию на соответствующих технических средствах, то есть быть физически осуществимой на данном уровне развития техники.
3. В связи с постоянным изменением количества потребителей и изменением в области законодательства модель должна работать на небольших статистических выборках.
4. Модель должна удовлетворять требованиям адаптивности и эволюционности: она должна обеспечивать возможность включения достаточно широкого диапазона изменений, добавлений, чтобы было возможно последовательное приближение к модели, удовлетворяющей по точности результатам прогнозирования.

На основании изложенного сделан вывод о необходимости разработки математической модели для составления прогнозов объемов электропотребления на энергосбытовом предприятии с учетом особенностей его деятельности, сформулирована цель и поставлены задачи исследования.

**Во второй главе** выполнен обзор существующих математических методов прогнозирования, использующихся на крупных промышленных предприятиях. Используемые методы сгруппированы. На основе исследования статистических методов для прогнозирования на крупных промышленных предприятиях были выделены несколько групп:

1. Прогнозная экстраполяция.

2. Регрессионный анализ (прогнозирование с использованием искусственных нейронных сетей; прогнозирование на базе ARIMA-моделей).
3. Адаптивные методы прогнозирования.
4. Прогнозирование с использованием гибридных систем.
5. Техноценоз.

Проведен анализ научных работ, посвященных тематике прогнозирования в области энергетики. Выявлено, что предложенные математические модели прогнозирования обладают специфическими особенностями и не могут быть применены для прогнозирования на энергосбытовом предприятии.

Энергосбытовое предприятие имеет свои особенности и требования при решении задачи прогнозирования объемов электропотребления. Важный этап при решении данной задачи – выбрать наиболее эффективный статистический метод. Для того чтобы выбрать оптимальный метод для последующего построения на его основе прогнозной модели электропотребления промышленного предприятия, были сформулированы все исходные требования: цель, интервал и точность прогноза, адаптивность прогнозной модели, ее быстродействие и т.д. Исходные требования определялись действующими правилами оптового рынка электроэнергии и мощности России. Цель краткосрочного прогноза предприятия – участника рынка, была сформулирована так: «Определить прогнозные значения потребления электроэнергии на неделю X в неделю X-1». Иными словами, цель прогноза – определить прогнозные значения недельного потребления электроэнергии на предстоящую неделю.

Потребление электрической энергии розничными потребителями зависит от множества зачастую быстро меняющихся факторов. В результате обзора выявлено, что в число факторов могут входить (в зависимости от типа потребителя): параметры окружающей среды (температура воздуха, наличие осадков, облачность, давление, скорость и направление ветра), сезонность, выходные и праздничные дни, изменение климата, количество предприятий, количество автоматизированных электросчетчиками организаций (АСКУЭ), которые, передавая показания, делают возможным рассчитать наиболее точное потребление.

Оптимальная прогнозная модель должна учитывать как можно больше влияющих факторов. Кроме того, факторы могут быть взаимозависимыми друг от друга. Поэтому определить «вклад» каждого фактора в изменение величины потребления электроэнергии в сложной, постоянно изменяющейся системе, как, например, предприятие ОАО «Челябэнергосбыт», достаточно трудно и является одной из задач данного исследования. При исследовании существующих статистических методов было выявлено, что нет подходящего метода, который бы смог учесть все особенности предприятия и факторы, которые оказывают существенное влияние на изменение электропотребления. В связи с этим был сделан вывод о том, что необходимо найти новый подход для решения задачи прогнозирования на предприятии ОАО «Челябэнергосбыт».

**В третьей главе** диссертации приведено построение различных математических моделей и создание прогнозов на основе построенных моделей для более подробного изучения изменения электропотребления и выбора оптимальной модели. Подробно изучен процесс электропотребления, выявлены законы, которые влияют на изменение объемов потребления.

Процесс электропотребления является сложным случайным нестационарным процессом, который может быть представлен несколькими регулярными и нерегулярной (случайной) составляющими. Методом моделирования электропотребления как случайного нестационарного процесса выполняется разделение исходного процесса на регулярную (тренд) и нерегулярную составляющие. Тренд описывает устойчивые тенденции изменения процесса в интервале времени. Нерегулярная составляющая характеризует случайную непрогнозируемую часть потребления и вероятные отклонения фактических значений электропотребления от тренда, выделенного из исходного процесса.

Выделенная в результате разделения траектория, выраженная в математическом виде, используется в дальнейшем в качестве прогнозирующей математической модели, т.е. модели, применяемой для расчета прогнозных значений электропотребления. Моделью выполняется замена (аппроксимация) известных значений электропотребления на ретроспективном интервале времени и на интервале упреждения согласно выявленным закономерностям. Для оценки адекватности модели определяется погрешность между исходными данными и результатами работы математической модели.

В общем случае прогнозирующая математическая модель электропотребления может включать в себя элементарные функции от любых независимых переменных, принимаемых в качестве факторов, влияющих на величину потребления, по которым имеются достоверные фактические данные, а также прогнозы, получаемые из официальных источников. Модель допускает использование следующих независимых переменных или влияющих факторов: сезонность, продолжительность светового дня, суточные графики температуры окружающей среды.

Долгосрочные и краткосрочные метеопрогнозы, включающие метеорологические параметры, необходимые для использования в процессе прогнозирования электропотребления, взяты из архивных данных Гидрометцентра России.

Для проведения исследований в качестве исходных данных было взято почасовое потребление за 2009–2013 годы. После анализа исходных данных было выявлено, что данные имеют большие различия в рабочие дни, выходные и праздничные. Четко просматривалась общая тенденция энергопотребления: в понедельник – заниженное потребление, к среде – рост потребления, к пятнице – спад, и в выходные и праздничные дни потребление очень низкое. Это связано с большим количеством потребителей – крупных промышленных предприятиях. Так же явно просматривалась сезонность: в зимние месяцы потребление электричества растет, в летние месяцы происходит спад. Это

связано с тем, что в зимние месяцы потребление электроэнергии увеличивается для процесса обогрева. В связи с этим для каждого дня недели была построена отдельная модель прогнозирования, праздничные и выходные дни объединены в одну модель.

При выборе факторов, которые будут использоваться при прогнозировании объемов электроэнергии, экспертно были определены те, которые предположительно могли бы оказывать влияние на исследуемый процесс: день недели, сезонность, продолжительность светового дня, метеорологические факторы за каждый день (температура окружающей среды, облачность, влажность, давление). Далее была построена корреляционная матрица для выявления факторов, оказывающих значимое влияние на потребление электроэнергии. С помощью парного линейного коэффициента корреляции измеряется теснота связи между двумя признаками. Линейный коэффициент корреляции рассчитывается по формуле:

$$r_{xy} = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 (y_i - \bar{y})^2}},$$

где  $x_i$  и  $y_i$  — значения факторов  $x$  и  $y$  соответственно для  $i$ -го объекта,  $i=1, .., n$ ;  $n$  — число объектов;  $\bar{x}, \bar{y}$  — средние арифметические значения признаков  $x$  и  $y$  соответственно.

Линейный коэффициент корреляции изменяется в пределах от  $-1$  до  $+1$ . Равенство коэффициента нулю свидетельствует об отсутствии линейной связи. Равенство коэффициента  $-1$  или  $+1$  показывает наличие функциональной связи (т. е. изменение одного явления сопровождается изменением другого).

Программный продукт STATISTICA позволяет вывести корреляционную зависимость в виде графика для наглядного определения факторов, оказывающих влияние на показатель «потребление объемов электроэнергии». Анализ корреляции выбранных факторов представлен на рис. 1.

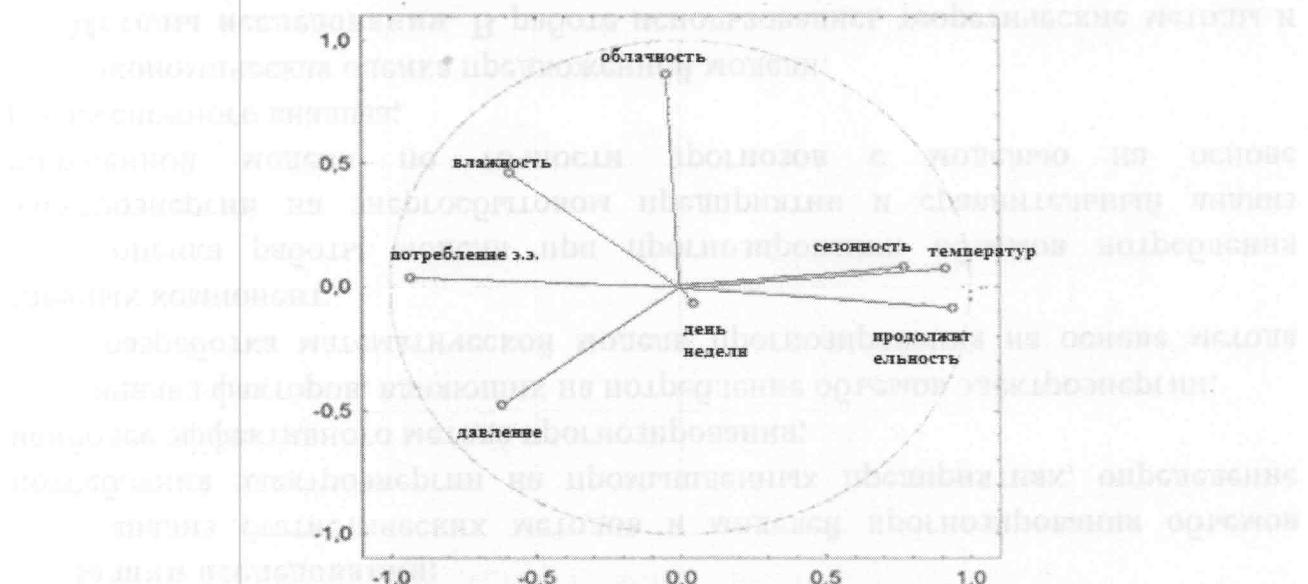


Рис. 1. Корреляция факторов

Факторы, напрямую влияющие на изменение объемов данных, лежат по другой стороне оси от искомого показателя. Выявлено, что напрямую на изменение объемов электроэнергии влияют сезонность, температура воздуха окружающей среды и продолжительность светового дня. Основываясь на этих данных, можно спрогнозировать потребление электроэнергии.

**В четвертой главе** диссертации выполнено прогнозирование согласно разработанным математическим моделям. Для сравнения погрешностей результатов прогнозирование выполнялось моделью, основанной на регрессионном анализе, и моделью, основанной на методе главных компонент.

Постановка задачи. Пусть значения исходного временного ряда  $Z(t)$  доступны в дискретные моменты времени  $t = 1, 2, \dots, T$ . Предполагается, что на значения  $Z(t)$  оказывает влияние набор внешних факторов. Пусть первый внешний фактор  $X_1(t_1)$  доступен в дискретные моменты времени  $t_1 = 1, 2, \dots, T_1$ , второй внешний фактор  $X_2(t_2)$  доступен в моменты времени  $t_2 = 1, 2, \dots, T_2$  и так далее. В случае если дискретность исходного временного ряда и внешних факторов, а также значения  $T, T_1, \dots, T_S$  различны, то временные ряды внешних факторов  $X_1(t_1), \dots, X_S(t_S)$  необходимо привести к единой шкале времени  $t$ .

В момент прогноза  $T$  необходимо определить будущие значения исходного процесса  $Z(t)$  в моменты времени  $T+1, \dots, T+P$ , учитывая влияние внешних факторов  $X_1(t), \dots, X_S(t)$ . При этом считаем, что значения внешних факторов в моменты времени  $X_1(T+1), \dots, X_1(T+P), \dots, X_S(T+1), \dots, X_S(T+P)$  являются доступными.

Регрессионный анализ — это статистический метод исследования зависимости случайной величины  $y$  от переменных  $x_j$  ( $j = 1, 2, \dots, k$ ), рассматриваемых в регрессионном анализе как неслучайные величины независимо от истинного закона распределения  $x_j$ .

Обычно предполагается, что случайная величина  $y$  имеет нормальный закон распределения с условным математическим ожиданием  $\gamma = \varphi(x_1, \dots, x_k)$ , являющимся функцией от аргументов  $x_j$ , и с постоянной, не зависящей от аргументов, дисперсией  $\sigma^2$ .

Для проведения регрессионного анализа из  $(k + 1)$ -мерной генеральной совокупности  $(y, x_1, x_2, \dots, x_j, \dots, x_k)$  берется выборка объемом  $n$ , и каждое  $i$ -е наблюдение (объект) характеризуется значениями переменных  $(y_i, x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{ij}, \dots, x_{ik})$ , где  $x_{ij}$  — значение  $j$ -й переменной для  $i$ -го наблюдения ( $i = 1, 2, \dots, n$ ),  $y_i$  — значение результативного признака для  $i$ -го наблюдения. Наиболее часто используемая множественная линейная модель регрессионного анализа имеет вид:  $y_i = \beta_0 + \beta_1 x_{i1} + \dots + \beta_j x_{ij} + \dots + \beta_k x_{ik} + \varepsilon_i$ , где  $\beta_j$  — параметры регрессионной модели,  $\varepsilon_i$  — случайные ошибки наблюдения, не зависимые друг от друга, имеют нулевую среднюю и дисперсию  $\sigma^2$ .

В работе при выполнении прогнозирования методом регрессионного анализа используется два вида регрессионных моделей: линейная регрессионная модель и нелинейная регрессионная модель. Был проведен сравнительный анализ полученных результатов. Построение регрессионной модели для

изучения зависимости изменения объемов потребления электроэнергии было проведено с учетом следующих факторов:

- признак выходного, праздничного или рабочего дня;
- день недели;
- продолжительность дня от восхода солнца до захода солнца;
- ежедневные метеорологические показатели по Челябинской области;
- потребление электроэнергии потребителем за каждый день в кВт·ч.

Линейная регрессионная модель строилась на основе формулы:

$$y = \alpha_0 + \alpha_1 x_4 + \alpha_2 x_5 + \alpha_3 x_6 + \alpha_4 x_7,$$

где  $y$  – потребление электроэнергии;  $x_4$  – признак выходного, праздничного или рабочего дня;  $x_5$  – день недели;  $x_6$  – продолжительность дня от восхода солнца до захода солнца;  $x_7$  – среднесуточная температура.

Для построения нелинейной регрессионной модели изначально была взята 21 комбинация факторов. Отбросив незначимые комбинации, нелинейная регрессионной модель была построена по формуле:

$$y = \alpha_0 + \alpha_1 x_4 + \alpha_2 x_5 + \alpha_3 x_6 + \alpha_4 x_7 + \alpha_5 x_4^2 + \alpha_6 x_4 x_5 + \alpha_7 x_4 x_6 + \alpha_8 x_4 x_7 + \alpha_9 x_5^2 + \\ + \alpha_{10} x_5 x_6 + \alpha_{11} x_5 x_7 + \alpha_{12} x_6^2 + \alpha_{13} x_6 x_7 + \alpha_{14} x_7^2.$$

Была дана оценка значимости коэффициентов регрессионной модели. Выполнены исследования по улучшению регрессионной модели путем удаления статистически незначимых коэффициентов. Результаты, полученные от использования линейной и нелинейной моделей, сравнивались между собой.

Метод главных компонент – это совокупность приемов, позволяющих выделить ведущие факторы вариации исследуемых случайных величин. Он основан на нахождении собственных чисел и собственных векторов корреляционной матрицы с последующим взвешиванием компонентов собственных векторов. Эти компоненты после соответствующего взвешивания дают значения коэффициентов корреляции с независимыми факторами, представленными через линейную комбинацию значений исследуемых случайных величин. Комбинации находятся таким образом, что представляют собой оси ортогональной системы координат и являются независимыми друг от друга. Метод имеет большие перспективы, может быть использован во всех случаях, когда можно предполагать, что значения случайной величины изменяются под воздействием ограниченного числа причин, и эти причины могут быть выражены через исследуемые случайные величины. Данный метод изучается в ЮУрГУ под управлением профессора Мокеева В.В. для распознавания образов.

Метод главных компонент – один из основных способов уменьшить размерность данных, потеряв наименьшее количество информации. Обычно он используется в задачах для обработки многомерных наблюдений, когда исследователя интересуют лишь те признаки, которые обнаруживают наибольшую изменчивость при переходе от одного объекта к другому. Метод осуществляет переход к новой системе координат  $u_1, \dots, u_p$  в исходном

пространстве признаков  $x_1, \dots, x_p$ , которая является системой ортонормированных линейных комбинаций. Данный метод совмещает в себе достоинства многих других методов, в частности, анализа Фурье и регрессионного анализа. Одновременно он отличается простотой и наглядностью в управлении. Базовый вариант метода состоит в преобразовании одномерного ряда в многомерный, в исследовании полученной многомерной траектории с помощью анализа главных компонент (сингулярного разложения), в восстановлении (аппроксимации) ряда по выбранным главным компонентам. Таким образом, результатом применения метода является разложение временного ряда на простые компоненты: медленные тренды, сезонные и другие периодические или колебательные составляющие, а также шумовые компоненты. Полученное разложение может служить основой корректного прогнозирования как самого ряда, так и его отдельных составляющих.

Пусть экономический объект описывается набором признаков  $x_{ki}^0$ , где  $i$  – номер признака ( $i = 1, 2, 3, \dots, n$ ),  $k$  – обозначает момент времени ( $i = 1, 2, 3, \dots, m$ ),  $n$  – количество признаков,  $m$  – количество моментов времени. Все значения каждого признака в различные моменты времени образуют временной ряд, который обозначается вектором  $x_i = \{x_{1i}^0, x_{2i}^0, \dots, x_{mi}^0\}^T$ . Пространство признаков экономического объекта можно представить в виде матрицы временных рядов  $\mathbf{X}^0$ . Каждый столбец матрицы содержит все значения одного признака в различные моменты времени, а каждая строка включает значения всех признаков объекта в один момент времени. Таким образом, пространство признаков экономического объекта будет описываться матрицей

$$\mathbf{X}^0 = [x_1 \ x_2 \ \cdots \ x_n].$$

Среднеарифметические значения признаков используются в качестве центра распределения пространства признаков. Отцентрированное пространство признаков будет описано матрицей. Дисперсии признаков экономического объекта представлены ковариационной матрицей, порядок которой равен размерности вектора исходных признаков. Ковариационная матрица определяется по формуле:

$$\mathbf{A} = \frac{1}{n} \mathbf{X}^T \mathbf{X}$$

Собственные векторы ковариационной матрицы  $\mathbf{A}$  определяются из решения уравнения:

$$(\mathbf{A} - \lambda \mathbf{I}) \mathbf{v}_0 = 0,$$

где  $\mathbf{I}$  – единичная матрица,  $\mathbf{v}_0$  – собственный вектор,  $\lambda$  – собственное значение. Собственные векторы  $\mathbf{v}_{0i}$ , которым соответствуют наибольшие собственные значения, называются главными компонентами.

Далее выполнен сравнительный анализ эффективности моделей регрессионного анализа и моделей, построенных методом главных компонент. Рассчитана погрешность при прогнозировании с помощью моделей. Полученные модели проверяются на диапазоне, который не использовался при

построении моделей. Прогнозные значения сравниваются с исходными данными. В результате вычислены шесть видов ошибок:

- среднее абсолютное отклонение (Mean Absolute Deviation, MAD);
- среднеквадратическая ошибка (Mean Squared Error, MSE);
- сумма квадратов ошибок (Sum Squared Error, SSE);
- средняя абсолютная ошибка в процентах (Mean Absolute Percentage Error, MAPE);
- средняя процентная ошибка (Mean Percentage Error, MPE);
- стандартная ошибка оценки (Mean Standard Error, MSEN).

Основной ошибкой, позволяющей оценить адекватность модели, является средняя абсолютная ошибка в процентах (MAPE). По этой ошибке происходило сравнение моделей.

При построении классической регрессионной модели, исключив статистически незначимые коэффициенты, оптимальной была признана модель с четырьмя факторами. Погрешности представлены в табл. 1.

Таблица 1  
Ошибки линейной регрессионной модели

Число факторов	MAD	MSE	SSE	MAPE, %	MPE, %	MSEN, %
4	2,3	10,6	55,6	25,1	0,4	51,7

Коэффициент детерминации, то есть доля дисперсии (отклонения от математического ожидания) зависимой переменной, составляет 0,55 %.

График с реальными данными и спрогнозированными с помощью линейной регрессионной модели показан на рис. 2.

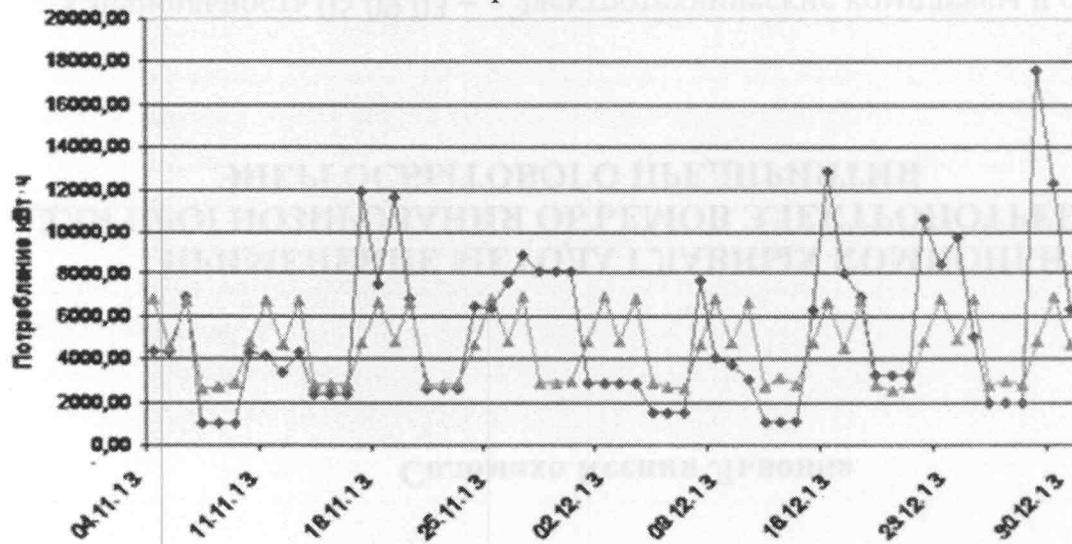


Рис. 2. Прогноз, полученный с помощью линейной регрессионной модели

Классическая нелинейная регрессионная модель. Изначально для построения модели взят 21 коэффициент. При исключении всех незначимых коэффициентов выявлено, что оптимальным вариантом является 12-ти факторная модель. Погрешности представлены в табл. 2.

Таблица 2

## Ошибки нелинейной регрессионной модели

Число факторов	MAD	MSE	SSE	MAPE, %	MPE, %	MSEN, %
12	2,2	10,7	48,7	8,9	0,5	51,9

Коэффициент детерминации, то есть доля дисперсии (отклонения от математического ожидания) зависимой переменной, составляет 0,49 %.

График с реальными данными и спрогнозированными с помощью нелинейной регрессионной модели показан на рис. 3.

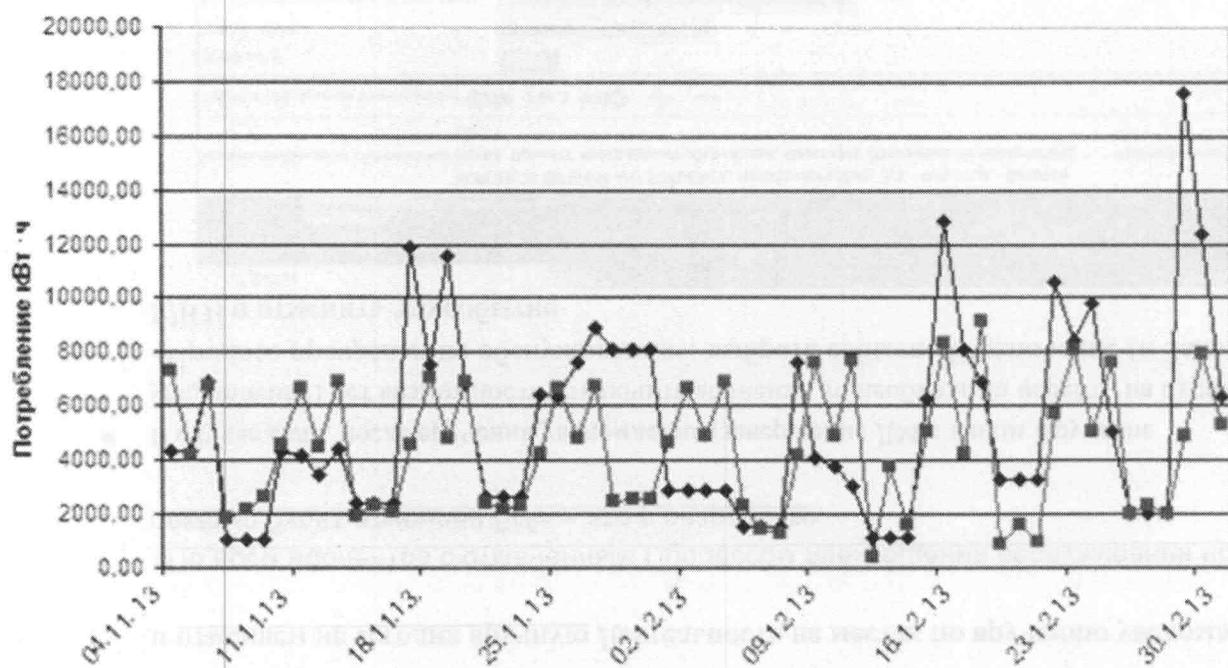


Рис. 3. Прогноз, полученный с помощью нелинейной регрессионной модели

На графиках видны точки максимума, что может быть связано с погрешностями данных либо корректировками данных учета электроэнергии перерасчетами. Однако модель выявляет общие тенденции изменения электропотребления.

Результаты расчета на основе метода главных компонент представлены на рис. 4.

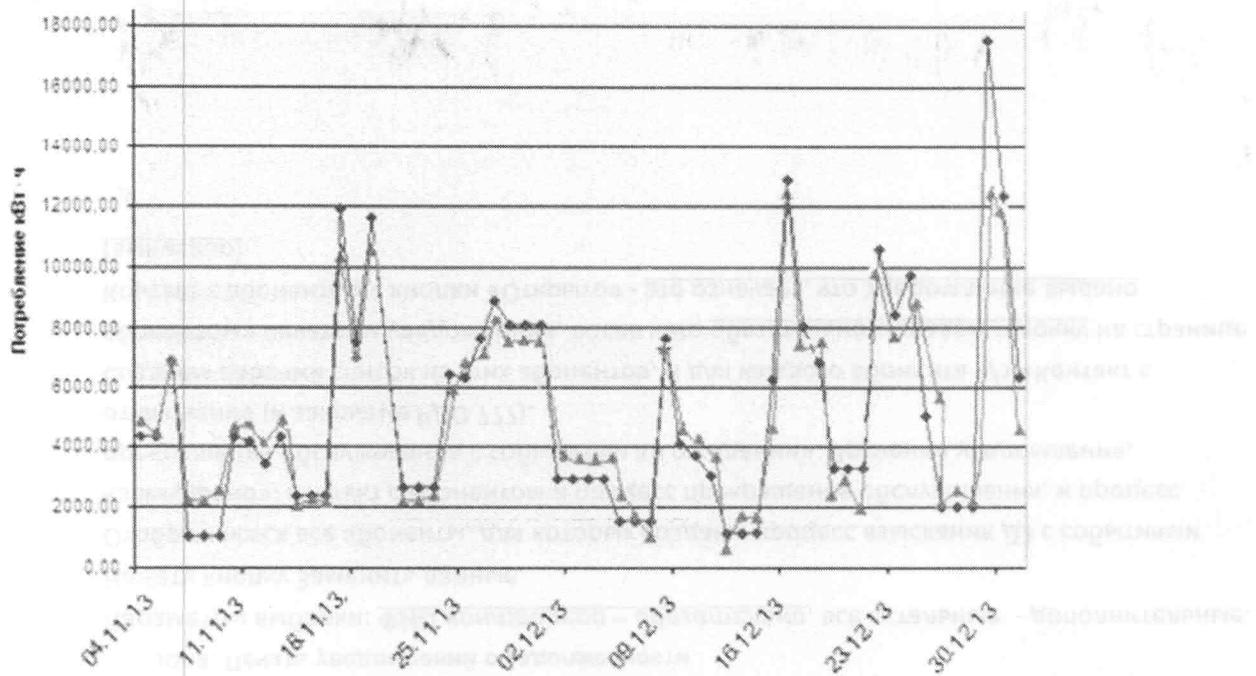


Рис. 4. Прогноз, полученный с помощью метода главных компонент.

Погрешности представлены в табл. 3.

Таблица 3  
Ошибки модели на основе метода главных компонент

Число главных компонент	MAD	MSE	SSE	MAPE, %	MPE, %	MSEN, %
5	0,98	4,8	22,4	2,5	0	10,7

При использовании метода главных компонент погрешность модели составляет менее 3%. Модель протестирована на выборках различного периода и дает удовлетворительные результаты. Наиболее эффективной моделью является модель почасового прогнозирования на 3 часа вперед.

В результате исследования метода главных компонент доказано, что он может применяться в области электроэнергетики и является более эффективным, чем наиболее применяемый метод на основе регрессионного анализа. Выявлено, что преимуществами метода главных компонент являются:

- уменьшение размерности данных (описание изучаемого процесса числом главных компонент  $m$ , значительно меньшим, чем число первоначально взятых признаков  $n$ ; главные компоненты отражают исходную информацию в более компактной форме);
- высокая точность (позволяет учитывать различные критические ситуации, выбросы);
- возможность реализовать на простом программном обеспечении;
- возможность выявить «латентные» переменные, управляющие тенденциями изменения данных (отыскание скрытых, но объективно существующих закономерностей, определяемых воздействием внутренних и внешних причин);

– возможность добавить новый фактор, не изменяя модели.

**В заключении** сформулированы основные выводы, и даны результаты исследований в соответствии с целью и задачами исследований.

**В приложении** имеется акт о внедрении результатов работы в производственный процесс.

## ВЫВОДЫ

1. Анализ статистических методов и моделей прогнозирования объемов потребления электроэнергии на промышленных предприятиях показал, что наиболее эффективным является метод главных компонент, обеспечивающий энергетическую эффективность потребления электроэнергии и энергосбережение в целом.

2. При анализе факторов, влияющих на энергопотребление, установлено, что для повышения точности прогноза следует как минимум использовать такие факторы как: температура окружающей среды, признак сезонности, продолжительность светового дня. Предложено для повышения точности прогнозирования разбивать данные на рабочие и выходные дни. Выходные и праздничные дни возможно объединить в одну группу.

3. Разработанная математическая модель прогнозирования на основе метода главных компонент имеет высокую скорость вычисления прогнозных значений и точность прогнозирования различных временных рядов.

4. Проведенная оценка эффективности работы предложенной модели показала, что ее использование значительно снижает погрешность расчетов при прогнозировании, в случае построения модели – на 3 часа. Такая модель позволяет добиться погрешности 2,2 % по сравнению с 6 % при использовании регрессионного анализа.

5. Установлено, что издержки энергосбытового предприятия, вызванные ошибками прогнозирования, прямо пропорционально зависят от величины отклонения от реального энергопотребления. При использовании метода главных компонент издержки в среднем по энергосбытовым предприятиям сокращаются в два и более раза.

## **ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ ДИССЕРТАЦИИ ОПУБЛИКОВАНЫ В СЛЕДУЮЩИХ РАБОТАХ**

### **Издания из перечня ВАК для кандидатских диссертаций**

1. Мокеев, В.В. Об использовании метода главных компонент для анализа деятельности предприятий / Мокеев В.В., **Соломахо К.Л.** // Вестник ЮУрГУ. Серия «Экономика и менеджмент». – 2013 г. – Том 7. – № 3. – С. 41–46.

2. Кирпичникова, И.М. Прогнозирование объемов потребления электроэнергии / Кирпичникова И.М., **Соломахо К.Л.** // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». – 2014 г. – Том 14. – № 2, С. 16–22.

3. **Соломахо, К.Л.** Тенденции изменения процесса энергопотребления на примере энергосбытового предприятия / Соломахо К.Л. // Электротехнические комплексы и системы управления. Раздел «Моделирование процессов и систем». – 2015 г. – №1.

### **Другие научные издания**

1. Анисимов, В.Н. Об эффективности модели ARIMA при прогнозировании экономических процессов / Анисимов В.Н., **Соломахо К.Л.** // Известия Челябинского научного центра. – 2009 г. – т. 44. – № 2. – С. 27–31.

2. Мокеев, В.В. Технология принятия управленческих решений в предпринимательских структурах на основе регрессионных моделей / Мокеев В.В., **Соломахо К.Л.** // Управление инвестициями и инновациями. – 2011. – С. 26–33.

3. Мокеев, В.В. Анализ и прогнозирование регионального потребления/ Мокеев В.В., **Соломахо К.Л.** // Материалы 63-й научно-практической конференции аспирантов ЮУрГУ, Издательский центр ЮУрГУ. – 2011. – С. 143-146.

4. **Соломахо, К.Л.** Об использовании метода главных компонент в задачах анализа объема продаж/ Соломахо К.Л. // Материалы Общероссийской научной конференции «Социально-экономические проблемы развития общества», г. Красноярск. – 2009. – С. 187-189.

5. Мокеев, В.В. Анализ объемов продаж товаров методом главных компонент/ Мокеев В.В., **Соломахо К.Л.** // Материалы 62-й научно-практической конференции аспирантов ЮУрГУ, Издательский центр ЮУрГУ. – 2010. – С. 193-195.

6. Кирпичникова, И.М. Обоснование использования метода главных компонент при прогнозировании объемов электроэнергии / Кирпичникова И.М., **Соломахо К.Л.** // Наука ЮУрГУ [Электронный ресурс]: материалы 66-й

научной конференции. Секции технических наук. – Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2014.

7. Кирпичникова, И.М. Анализ статистических методов прогнозирования электропотребления сбытового предприятия / Кирпичникова И.М., Соломахо К.Л. // Материалы Всероссийской научно-практической конференции «Современные технологии в физико-математическом образовании». – 2014. – С. 45-50.

8. Кирпичникова, И.М. Исследование методов прогнозирования электропотребления сбытового предприятия / Кирпичникова И.М., Соломахо К.Л. // Электротехнические системы и комплексы г. Магнитогорск. – 2014. – №3(24). – С. 39-43.

**Соломахо Ксения Львовна**

**ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА ГЛАВНЫХ КОМПОНЕНТ  
ДЛЯ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ОБЪЕМОВ ЭЛЕКТРОПОТРЕБЛЕНИЯ  
ЭНЕРГОСБЫТОВОГО ПРЕДПРИЯТИЯ**

Специальность 05.09.03 – “Электротехнические комплексы и системы”

**Автореферат**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Издательский центр Южно-Уральского государственного университета

Подписано в печать . .2015. Формат 60x84 1/16. Печать цифровая.  
Усл. печ. л. 1,25. Уч.-изд. л. 1,0. Тираж 100 экз. Заказ \_\_

Отпечатано в типографии Издательского центра ЮУрГУ  
454080, г. Челябинск, пр. им. В.И. Ленина, 76.