

На правах рукописи



БИЛАЛОВА АЛИСА ИЛЬДАРОВНА

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ПОТРЕБЛЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ  
ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИМ КОМПЛЕКСОМ ГОРОДСКОЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СЕТИ

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Специальность: 05.09.03 – Электротехнические комплексы и системы

Ульяновск, 2019

Работа выполнена на кафедре «Электропривод и АПУ» в Федеральном государственном образовательном учреждении высшего образования «Ульяновский государственный технический университет» (УлГТУ)

Научный руководитель:

**Доманов Виктор Иванович**

кандидат технических наук, доцент  
зав.кафедрой «Электропривод и АПУ»  
ФГБОУ ВО «Ульяновский государственный  
технический университет»

Официальные оппоненты:

**Кокин Сергей Евгеньевич**

доктор технических наук, профессор  
зам.директора по науке и инновациям Уральского  
энергетического института ФГАОУ ВО «Уральский  
федеральный университет имени первого  
Президента России Б.Н.Ельцина», заведующий  
базовой кафедрой «Электроэнергетика» ОАО  
«МРСК Урала»

**Ведерников Александр Сергеевич**

кандидат технических наук, доцент  
декан Электротехнического факультета  
зав.кафедрой «Электрические станции»  
ФГБОУ ВО «Самарский государственный  
технический университет»

Ведущая организация:

Федеральное государственное бюджетное  
образовательное учреждение высшего образования  
«Омский государственный технический  
университет»

Защита диссертации состоится «10» декабря 2019 г. в 13.00 часов на заседании диссертационного совета Д212.217.04 по адресу г.Самара, ул.Первомайская,18, Самарский государственный технический университет, корпус 1, аудитория 4а.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Самарского государственного технического университета (ул. Первомайская,18) и на сайте <http://samgtu.ru>.

Отзывы на автореферат (в двух экземплярах, заверенных печатью) просим направлять по адресу:443100, г.Самара, ул.Молодогвардейская, 244, Главный корпус, Самарский государственный технический университет, ученому секретарю диссертационного совета Д212.217.04; факс: (846) 278-44-00, e-mail:a-ezhova@yandex.ru.

Автореферат разослан « \_\_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2019 года.

Ученый секретарь  
Диссертационного совета  
Д212.217.04



Е.В.Стрижакова

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы.** Задача планирования и прогнозирования энергопотребления является достаточно значимой в электроэнергетике. Повышение точности прогнозирования объемов потребления электроэнергии обуславливается переходом к рыночным отношениям между субъектами оптового рынка, а также ответственностью за результаты действий, основанных на прогнозе. Прогнозирование электрических нагрузок является важным аспектом в экономических и технических вопросах.

Своевременное получение информации о предстоящей нагрузке позволяет выбрать оптимальный режим работы системы. Правильность результатов прогнозирования нагрузки значительно влияет на показатели электротехнического комплекса в условиях работы на рынке электроэнергии.

Прогнозирование является важным фактором при составлении баланса электроэнергии в энергосистеме, влияя на выбор режимных параметров и расчетных электрических нагрузок. Баланс электроэнергии необходим для обеспечения устойчивой работы энергосистемы. В случае не соблюдения баланса страдает качество электроэнергии (происходит отклонение частоты и напряжения от требуемых значений). Это отражается на работе других элементах электротехнического комплекса – потребителях. Точность прогнозирования дает возможность оптимизировать работу всего электротехнического комплекса.

Операторы распределительных сетей обязаны ежемесячно предоставлять субъектам рынка сведения относительно объема электроэнергии, отпущенного для поддержания баланса в энергосистеме, необходимого для проведения финансовых взаиморасчетов. Значит, сетевые компании должны иметь системы передачи результатов измерений, способные своевременно и оперативно направлять поступающую информацию всем участникам технологического процесса.

Для сетевой компании качественное прогнозирование нагрузок играет ключевую роль в вопросах обеспечения надежности, своевременного преодоления ограничений на перетоки электроэнергии и мощности, а также при планировании управленческих задач.

Отклонение потребления электроэнергии спрогнозированного объема от фактического обуславливает необходимость предприятия закупки недостающего объема электроэнергии или продажи излишнего объема по заведомо невыгодным ценам.

Новое главное требование к методикам прогнозирования в электроэнергетике заключается в расчетах объемов потребления электроэнергии в различные интервалы

времени. И если до сих пор можно было обойтись простым методом линейной регрессии или методом ежедневного сопоставления показателей, то теперь появилась необходимость учитывать нелинейные влияния внешних возмущающих факторов. В связи с этим оценке параметров зависимости энергопотребления от вышеуказанных факторов придается большое значение, однако очевидно, что надежный прогноз нагрузки невозможен без качественной метеорологической экспертизы.

Тем не менее, в число факторов, осложняющих прогнозирование, входит не только отсутствие непосредственного доступа к данным об энергопотреблении, но зачастую и качественные изменения в самой оцениваемой функции, которые возникают как в результате колебаний структуры полезного отпуска, так и под воздействием сезонных особенностей.

Таким образом, **актуальной и имеющей большое практическое значение научно-технической задачей** является разработка методики прогнозирования потребления электрической энергии на основе изучения системных свойств и связей в электротехническом комплексе и составления моделей статистических данных.

**Цель диссертации** – повышение энергоэффективности прогнозирования потребления электрической энергии электротехническим комплексом на базе абонентов сетевой компании, обеспечивающей снижение погрешности прогнозирования относительно применяемого метода прогнозирования.

**Задачи диссертационного исследования:**

1. Анализ структуры потребителей на примере МУП «Ульяновская городская электросеть» и исходных данных для составления прогноза.
2. Выбор метода или их совокупности, обеспечивающих повышение точности прогноза потребления электроэнергии абонентами сетевой компании.
3. Разработка методики и алгоритма расчета ожидаемого объема потребления электроэнергии электротехническим комплексом абонентов сетевой компанией с помощью простейших инженерных методов расчета.

**Объект исследования** – электротехнический комплекс городской электрической сети, включающий в себя сетевое предприятие и различные категории абонентов сетевой компании.

**Предмет исследования** – режим энергопотребления электротехническим комплексом городской электросети в условиях воздействия метеофакторов, прогнозирование потребления электроэнергии.

**Методы исследования.** Для решения поставленных в диссертационной работе научных задач применялись методы математического моделирования, теории вероятностей,

математической статистики, экспоненциального сглаживания, регрессионного и корреляционного анализа.

### **Научная новизна**

1. Предложена комбинация статистических методов прогнозирования потребления электрической энергии электротехническим комплексом городской электросети на основе данных предыдущих лет, отличающаяся оригинальным сочетанием математического аппарата регрессионного и корреляционного анализа и позволяющая уменьшить погрешность прогноза.

2. Предложена математическая модель прогнозирования ожидаемых объемов потребления электроэнергии электротехническим комплексом городской электрической сети, отличающаяся уравнениями регрессии и функциональной связи между потреблением электроэнергии в разные месяцы.

3. Разработаны усовершенствованная методика прогнозирования и алгоритм расчета объемов потребления электроэнергии электротехническим комплексом городской электрической сети, отличающиеся последовательностью и аналитическими формулами вычислений, обеспечивающих снижение погрешности прогноза.

### **Практическая ценность**

1. Снижены финансовые затраты сетевой компании за счет повышения качества среднесрочного прогноза объемов потребления электроэнергии электротехническим комплексом городской электрической сети.

2. Разработанная методика прогнозирования потребления электрической энергии электротехническим комплексом городской электрической сети доведена до такого уровня детализации, что не требует применения специализированного программного обеспечения и может производиться с помощью простейших инженерных расчетов.

### **На защиту выносятся следующие научные положения**

1. Методика последовательного поиска комбинации методов прогнозирования потребления электрической энергии электротехническим комплексом городской электрической сети, обеспечивающей требуемую погрешность прогноза.

2. Результаты статистического анализа исходных данных для прогнозирования потребления электрической энергии электротехническим комплексом городской электрической сети.

3. Методика и алгоритм расчета ожидаемого объема потребления электроэнергии сетевой компанией по исходным данным предыдущих лет, отличающаяся повышенной точностью прогноза.

4. Результаты сравнительного анализа прогнозов, полученные различными методами.

**Степень разработанности проблемы.** Российскими и зарубежными учеными, внесшими значительный вклад в предметную область разработки моделей прогнозирования, являются Кудрин Б.И., Ведерников А.С., И.В.Воронов, В.Н.Афанасьев, А.В.Гофман, В.И.Гнатюк, Макоклюев Б.И., Старцева Т.Б., Baker A.B, Bunn D.W, Gupta P.C. В значительной степени эти исследования охватывают лишь вопросы краткосрочного прогнозирования, не рассматривая проблемы среднесрочного прогноза.

**Реализация и внедрение результатов работы.** Разработанные алгоритм и комбинированный метод прогнозирования внедрены в практику работы МУП «Ульяновская городская электросеть» (г.Ульяновск) и ООО «Ульяновская воздушно-кабельная сеть» (г.Ульяновск).

**Апробация работы.** Основные положения и результаты диссертации докладывались и обсуждались на следующих конференциях: Конференции «Современные наукоемкие инновационные технологии», г.Самара, 2014; I и II Поволжской научно-практической конференции «Приборостроение и автоматизированный электропривод в топливно-энергетическом и жилищно-коммунальном хозяйстве», г.Казань, 2015, 2016; Одиннадцатой и двенадцатой международной научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Энергия-2016», «Энергия-2017», г.Иваново, 2016, 2017; XXIX и XXX Международной научной конференции «Математические методы в технике и технологиях» (ММТТ-29, ММТТ-30), г.Санкт-Петербург, 2016, 2017; VII международной научно-практической конференции «Актуальные проблемы энергетики АПК», г.Саратов, 2016; V международном Балтийском форуме, Калининград, 2017.

**Публикации.** По теме диссертации опубликованы 19 работ, в том числе 5 статей в журналах, рекомендованных ВАК, 3 свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ.

**Структура и объем диссертации.** Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения. Основная часть исследования изложена на 166 страницах и содержит 30 рисунков, 25 таблиц и 3 приложения. Библиографический список состоит из 142 наименований на 18 страницах.

**Соответствие научной специальности 05.09.03 «Электротехнические комплексы и системы»:** Исследование, проводимое в рамках диссертационной работы, соответствует формуле специальности «...исследования по общим закономерностям ... передачи и использования электрической энергии и электротехнической информации...».

Объектом изучения: «...являются электротехнические комплексы и системы ... электроснабжения ... промышленных ... предприятий и организаций, ... служебных и жилых зданий ...».

Область исследования соответствует пунктам: 1 «...изучение системных свойств и связей, ... математическое ... и компьютерное моделирование компонентов электротехнических комплексов и систем»; 2 «Обоснование ... экономических ... критериев оценки принимаемых решений в области ... эксплуатации электротехнических комплексов и систем»; 4 «Исследование работоспособности и качества функционирования электротехнических комплексов и систем в различных режимах, при разнообразных внешних воздействиях».

## **СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** сформулирована актуальность работы, характеризуется степень ее разработанности, определяются цели и задачи, научные положения, выносимые на защиту, их новизна и практическая значимость.

**В первой** главе проводится анализ предметной области.

Рассмотрено современное состояние рынка электроэнергии России.

В настоящее время условия российского рынка электроэнергии предъявляют все более жесткие требования к объемам покупаемой и продаваемой электроэнергии, в соответствие с этим вопрос прогнозирования является фундаментальным для финансового планирования субъектов.

Учитывается все большее количество факторов, используются новые методы, усложняются алгоритмы расчетов.

Обоснована необходимость снижения погрешности прогнозирования значений потребления электроэнергии с целью уменьшения финансовых издержек энергопредприятий и повышения сроков работоспособности элементов рассматриваемого комплекса.

Выполнен обзор существующих математических методов прогнозирования, использующихся на промышленных предприятиях. Наиболее широко распространенными методами являются прогнозная экстраполяция, регрессионный анализ, экспоненциальное сглаживание, а также нейронные сети. Проведен сравнительный анализ наиболее распространенных методов прогнозирования.

Сформулированы цель и задачи исследования.

**Во второй** главе описывается объект исследования, отмечаются его особенности и специфика работы.

Рассмотрена структура потребителей предприятия «Ульяновская городская электросеть». Одной из отличительных черт является тот факт, что основным потребителем сетевой организации является население, которое потребляет около 60% общего объема электроэнергии. К основным потребителям предприятия МУП «УЛЬГЭС» относятся коммунально-бытовые потребители. Это различные объекты, расположенные в жилых районах города – административно-управленческие здания, жилые здания, торговые центры, общественные территории, объекты здравоохранения и образования и т.д.

Необходимо учитывать, что для каждой группы потребителей свойственны свои тенденции изменения объемов потребления электроэнергии.

Проведен анализ исходных данных для составления прогноза потребления электроэнергии, рассчитаны коэффициенты корреляции между различными параметрами прогноза. В качестве исходных были использованы статистические данные, накопленные в МУП «Ульяновская городская электросеть» за период 2013 – 2016 годов.

Параметрами, дополняющими построение прогноза, являются метеофакторы. Анализ показывает, что наибольшее влияние на потребление электроэнергии в рассматриваемой ситуации оказывают температура и влажность. Этот вывод основывается на расчетах коэффициента корреляции. Он во многом определяют сезонные колебания, а также нерегулярные колебания графиков потребления.

Для расчетов используются значения месячного потребления электроэнергии в кВт·ч за 4 года, а также среднемесячные значения температуры окружающего воздуха, полученные от Ульяновского центра по гидрометеорологии.

Проанализирована возможность применения метода экспоненциального сглаживания для прогнозирования при использовании абсолютных значений потребления электроэнергии. С учетом использования статистических данных за четыре предыдущих года формула для расчета прогноза на  $i$ -ый месяц  $j$ -го года этим методом будет выглядеть следующим образом

$$E_{ij}^{p.esa} = \alpha E_{i(j-1)} + \alpha(1-\alpha)E_{i(j-2)} + \alpha(1-\alpha)^2 E_{i(j-3)} + \alpha(1-\alpha)^3 E_{i(j-4)} + \frac{(1-\alpha)^4 (E_{i(j-4)} + E_{i(j-3)} + E_{i(j-2)})}{3}, \quad (1)$$

где  $E_{i(j-1)}$ ,  $E_{i(j-2)}$ ,  $E_{i(j-3)}$  и  $E_{i(j-4)}$  – абсолютные значения потребления электроэнергии в одноименном месяцы в предыдущие годы,  $\alpha$  – параметр сглаживания, взятый в расчетах равным 0,3.

Анализ результатов, полученных по формуле (1) показал, что применение метода экспоненциального сглаживания для прогноза потребления электроэнергии в сетевой компании

«Ульяновская городская электросеть» в 2017 году дает большие погрешности. За пределы 3 % выходят погрешности прогноза на январь, май, сентябрь и октябрь, причем максимальная погрешность составляет 4,869 %.

Проведен статистический анализ и обоснована необходимость приведения исходных данных к нормальному распределению.

Проведена оценка распределений исходных данных. Использован критерий согласия, позволяющий подтвердить или отвергнуть предположение о виде распределения случайных процессов.

Оценка распределения показала, что все три параметра исходной информации по критерию согласия  $\chi^2$  существенно отличаются от нормального закона распределения. Для устранения этого предложено использовать разностное значение величин. После проведенных преобразований данные по электроэнергии и температуре стали приближаться к закону нормального распределения.

Рассмотрено применение метода экспоненциального сглаживания для прогнозирования потребления электроэнергии при использовании разностных значений. При этом относительные ошибки прогноза в ряде месяцев значительно уменьшились, однако среднеквадратическая ошибка прогноза потребления электроэнергии на 2017 год равна  $\delta E_{2017}^{sqr.t.esd} = 3,544$ , что значительно больше, чем при использовании абсолютных значений, причем это определяется в основном аномальным выбросом погрешности в сентябре месяце.

Анализ полученных данных показывает, что применение метода экспоненциального сглаживания в чистом виде не дает желаемого результата, поскольку не принимает во внимание изменение метеофакторов. В связи с этим необходим поиск методов прогноза, которые учитывают, как минимум, температуру окружающей среды, а может быть и комбинации методов.

**В третьей главе** проанализировано применение регрессионного анализа для прогноза потребления электроэнергии абонентами сетевой компании. Для расчета ожидаемого объема потребления электрической энергии предложено использовать следующее уравнение регрессии

$$E_{ij}^{p.r} = \alpha_{1i} E_{i(j-1)} + \alpha_{2i} \Delta t_{i(j-1)}, \quad (2)$$

где  $\alpha_{1i}$  и  $\alpha_{2i}$  – коэффициенты регрессии, которые определяются из системы уравнений

$$\left. \begin{aligned} E_{i(j-2)} &= \alpha_{1i} E_{i(j-3)} + \alpha_{2i} \Delta t_{i(j-3)}; \\ E_{i(j-1)} &= \alpha_{1i} E_{i(j-2)} + \alpha_{2i} \Delta t_{i(j-2)}. \end{aligned} \right\}; \quad (3)$$

$$\Delta t_{i(j-1)} = t_{i(j-1)} - t_{i(j-2)}; \Delta t_{i(j-2)} = t_{i(j-2)} - t_{i(j-3)}; \Delta t_{i(j-3)} = t_{i(j-3)} - t_{i(j-4)};$$

$t_{i(j-1)}$ ,  $t_{i(j-2)}$ ,  $t_{i(j-3)}$  и  $t_{i(j-4)}$  – среднемесячные значения температуры в  $i$ -ом месяце за предыдущие четыре года.

По формулам (2) и (3) рассчитан прогноз на все месяцы 2017 года и представлен график погрешностей прогнозирования (рисунок 1). Анализ полученных результатов показывает, что погрешности расчета в январе, августе, сентябре и ноябре значительно превышают требуемые 3 %, причем наибольшая погрешность опять же наблюдается в прогнозе сентября.

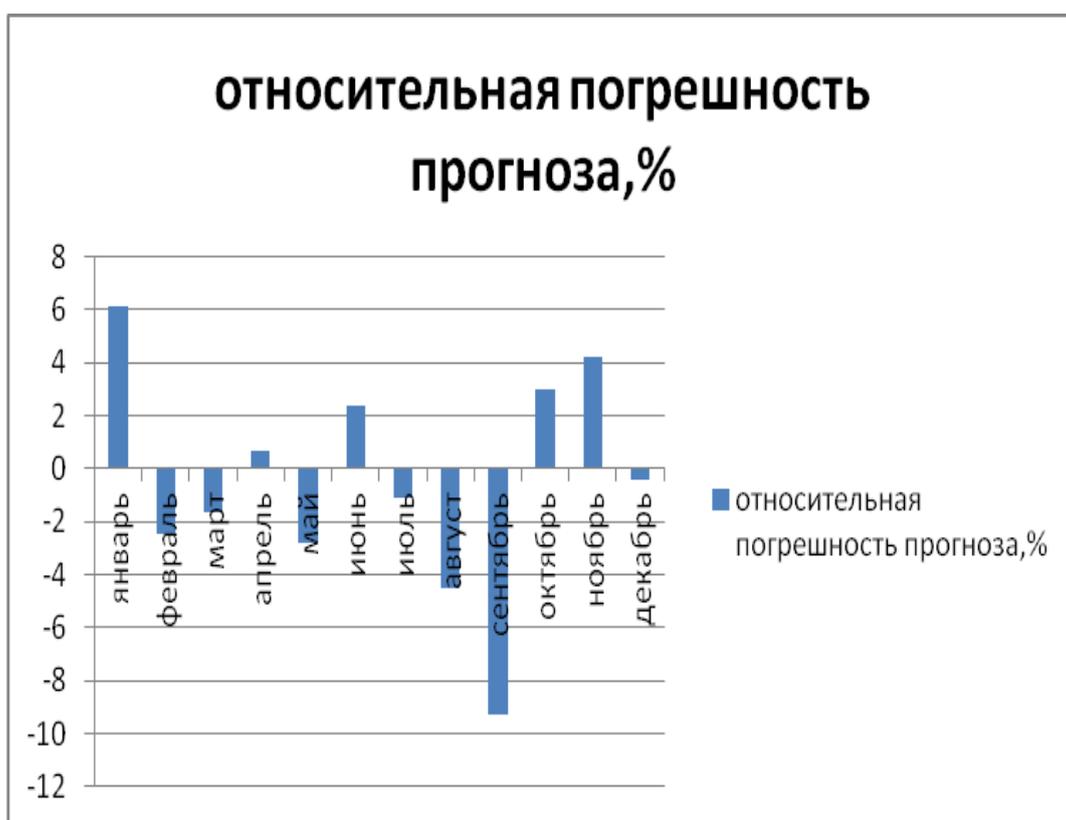


Рисунок 1 – График погрешности прогноза на 2017 год методом регрессионного анализа

Среднеквадратическая ошибка прогноза в 2017 году составляет 4,026 %.

Проведено усреднение результатов прогнозов, полученных методами экспоненциального сглаживания и регрессионного анализа. Формулу для расчета прогноза  $E_{ij}^{p.av}$  методом усреднения результатов, полученных методами экспоненциального сглаживания (при оперировании приращениями) и регрессионного анализа можно записать следующим образом

$$E_{ij}^{p.av} = 0,5 \left[ (1 + \alpha_{1i}) E_{i(j-1)} + \alpha \Delta E_{i(j-1)} + \alpha (1 - \alpha) \Delta E_{i(j-2)} + 0,5(1 - \alpha)^2 (\Delta E_{i(j-1)} + \Delta E_{i(j-2)}) + \alpha_{2i} \Delta t_{i(j-1)} \right] \quad (4)$$

Анализ выражения (1) позволяет сделать вывод, что относительная ошибка  $\delta E_{ij}^{av}$  среднего прогноза будет равна

$$\delta E_{ij}^{av} = \frac{\delta E_{ij}^{esd} + \delta E_{ij}^r}{2}, \quad (5)$$

где  $\delta E_{ij}^{esd}$  – относительная ошибка прогнозирования методом экспоненциального сглаживания при использовании данных в приращениях;  $\delta E_{ij}^r$  – относительная ошибка прогнозирования методом регрессионного анализа.

В соответствии с формулами (4) и (5) сделан прогноз потребления электроэнергии в 2017 году и рассчитаны относительные погрешности (рис. 2).

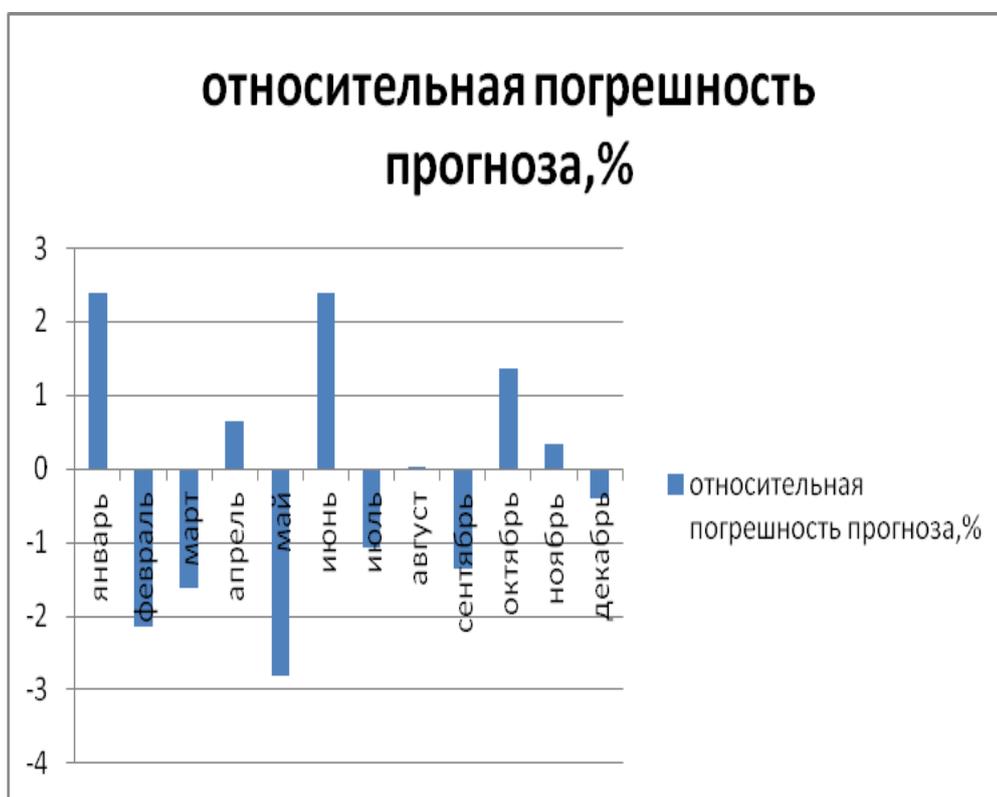


Рисунок 2 – График погрешности прогноза на 2017 год методом усреднения результатов экспоненциального сглаживания и регрессионного анализа

Применение усреднения уменьшило погрешности, и достигло желаемого результата в январе, августе и сентябре.

Следует отметить, что прогноз на июль месяц осуществляется любым методом (экспоненциального сглаживания, регрессионного анализа и усреднения результатов) с достаточно малой погрешностью, не превышающей 2 %. Поэтому был применен математический аппарат корреляционного анализа для установления возможной взаимосвязи

между объемами потребляемой электроэнергии по месяцам. Найдены коэффициенты корреляции между объемами потребляемой электроэнергии в каком-либо месяце и в июле.

Для прогнозирования потребления электроэнергии в январе, феврале, октябре и ноябре, основанного на результатах прогноза на июль, найдены коэффициенты корреляции Пирсона. Значения коэффициентов позволили сделать вывод, что прогноз на август и сентябрь следует осуществлять, используя устойчивую корреляционную связь потребления электроэнергии в эти месяцы с объемами потребления в мае.

Формула для расчета коэффициент корреляции Пирсона при использовании данных за предыдущие 4 года, например для января относительно июля, может быть записана следующим образом

$$r_{17} = \frac{\begin{aligned} &(3E_{713} - E_{714} - E_{715} - E_{716})(3E_{113} - E_{114} - E_{115} - E_{116}) + \\ &+ (3E_{714} - E_{713} - E_{715} - E_{716})(3E_{114} - E_{113} - E_{115} - E_{116}) + \\ &+ (3E_{715} - E_{713} - E_{714} - E_{716})(3E_{115} - E_{113} - E_{114} - E_{116}) + \\ &+ (3E_{716} - E_{713} - E_{714} - E_{715})(3E_{116} - E_{113} - E_{114} - E_{115}) \end{aligned}}{\sqrt{\begin{aligned} &[(3E_{713} - E_{714} - E_{715} - E_{716})^2 + (3E_{714} - E_{713} - E_{715} - E_{716})^2 + \\ &+ (3E_{715} - E_{713} - E_{714} - E_{716})^2 + (3E_{716} - E_{713} - E_{714} - E_{715})^2] \times \\ &\times [(3E_{113} - E_{114} - E_{115} - E_{116})^2 + (3E_{114} - E_{113} - E_{115} - E_{116})^2 + \\ &+ (3E_{115} - E_{113} - E_{114} - E_{116})^2 + (3E_{116} - E_{113} - E_{114} - E_{115})^2] \end{aligned}}}$$

Аналогично записываются коэффициенты корреляции и для других месяцев.

Анализ полученных значений коэффициентов корреляции  $r_{17}$  (таблица 1) позволил сделать вывод, что между потреблением электроэнергии в июле месяце существует хорошая линейная корреляционная связь с соответствующим потреблением в январе, феврале октябре и ноябре. Поэтому при составлении прогноза на эти месяцы можно воспользоваться этой корреляцией и использовать для расчета данные июля.

Коэффициенты корреляции определены также для августа и сентября относительно мая  $r_{85} = -0,9722$ ;  $r_{95} = -0,9434$ . Отсюда сделан вывод, по майским данным можно прогнозировать потребление электроэнергии в августе и сентябре.

На основе проведенного анализа предложено комбинированное применение уравнений регрессии и функциональной связи между потреблением электроэнергии в разные месяцы, что позволяет получить в целом погрешность прогноза меньше 3 %.

Таблица 1 – Значения коэффициентов корреляции Пирсона  
по отношению к потреблению электроэнергии в июле, полученные  
по данным 2013 – 2016 годов

Месяц	Коэффициент корреляции $r_{i7}$	Месяц	Коэффициент корреляции $r_{i7}$
Январь	0,9337	Июль	1
Февраль	0,849	Август	0,994
Март	0,9675	Сентябрь	0,9082
Апрель	0,9649	Октябрь	0,94
Май	-0,9523	Ноябрь	0,6204
Июнь	0,7236	Декабрь	0,8678

Прогноз на такие месяцы, как март, апрель, май, июнь, июль и декабрь, осуществляется с помощью уравнений регрессии (2) и (3). Прогноз потребления электроэнергии в январе, феврале, октябре и ноябре предлагается осуществлять по формуле

$$E_{ij}^{p.com} = k_{i7(j-1)} E_{7j}^{p.r}, \quad (6)$$

где коэффициент  $k_{i7(j-1)}$  определяется из соотношения объемов потребления электроэнергии в  $i$ -ом и 7-ом (июле) месяцах года, предыдущего прогнозируемому

$$k_{i7(j-1)} = \frac{E_{i(j-1)}}{E_{7(j-1)}}. \quad (7)$$

Для прогноза на август и сентябрь берется за базу фактическое потребление электроэнергии в мае месяце  $E_{5j}$  расчетного года

$$E_{ij}^{p.com} = k_{i5(j-1)} E_{5j}, \quad (8)$$

где коэффициент  $k_{i5(j-1)}$  определяется из соотношения объемов потребления электроэнергии в  $i$ -ом и 5-ом (мае) месяцах года, предыдущего прогнозируемому

$$k_{i5(j-1)} = \frac{E_{i(j-1)}}{E_{5(j-1)}}. \quad (9)$$

По формулам (2), (3), (6) – (9) сделан прогноз на 2017 год и рассчитаны погрешности прогноза для каждого месяца (рисунок 3).

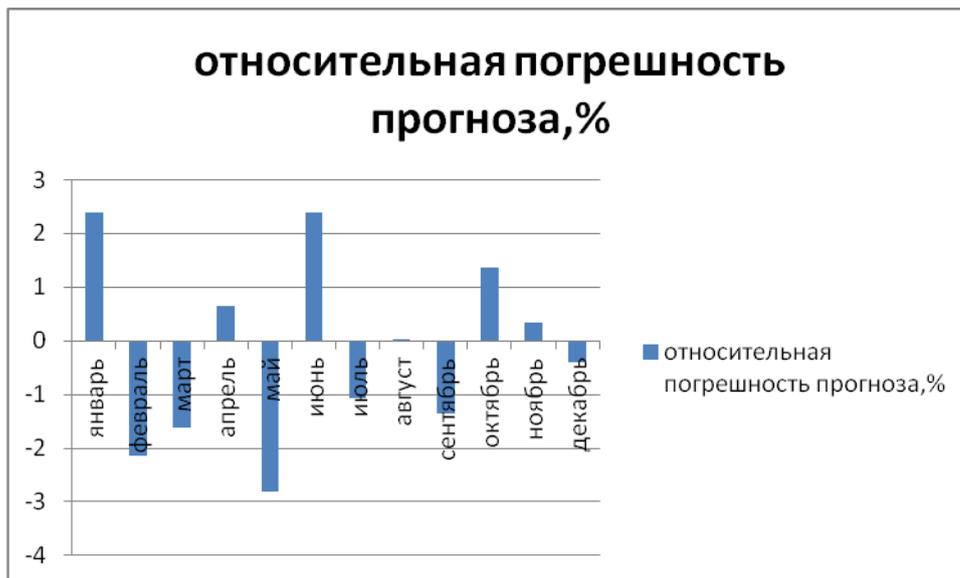


Рисунок 3 – График погрешности комбинированного прогноза на 2017 год

Анализ полученных результатов позволяет сделать вывод, что задача поставленная в диссертации успешно решена посредством комбинации различных методов прогнозирования.

**В четвертой главе** разработаны методика и алгоритм прогнозирования потребления электроэнергии электротехническим комплексом абонентов сетевой компании. При этом следует учесть, что из одной задач поставленной в диссертации является отказ от применения дорогостоящих специализированных лицензионных программных комплексов.

Получена формула для расчета ожидаемого объема потребления электрической энергии абонентами сетевой компании («Ульяновская городская электросеть»), в такие месяцы, как март, апрель, май, июнь, июль и декабрь, которые подчиняются предложенному в третьей главе уравнению регрессии.

$$E_{ij}^{p,r} = \frac{E_{i(j-1)}}{E_{i(j-3)}} \left[ E_{i(j-2)} - \frac{(E_{i(j-1)}E_{i(j-3)} - E_{i(j-2)}^2) \Delta t_{i(j-3)}}{\Delta t_{i(j-2)}E_{i(j-3)} - \Delta t_{i(j-3)}E_{i(j-2)}} \right] + \frac{(E_{i(j-1)}E_{i(j-3)} - E_{i(j-2)}^2) \Delta t_{i(j-1)}}{\Delta t_{i(j-2)}E_{i(j-3)} - \Delta t_{i(j-3)}E_{i(j-2)}} \quad (10)$$

Расчет объемов потребления в январе, феврале, октябре и ноябре производится по комбинации формул (6) и (7). В то же время прогноз на август и сентябрь рекомендовано осуществлять по совокупности выражений (8) и (9)

Исследования, проведенные в третьей главе, и формулы (6) – (10) позволили разработать методику прогнозирования потребления электрической энергии электротехническим комплексом абонентов сетевой компании, изображенной в виде алгоритма расчета (рисунок 4).

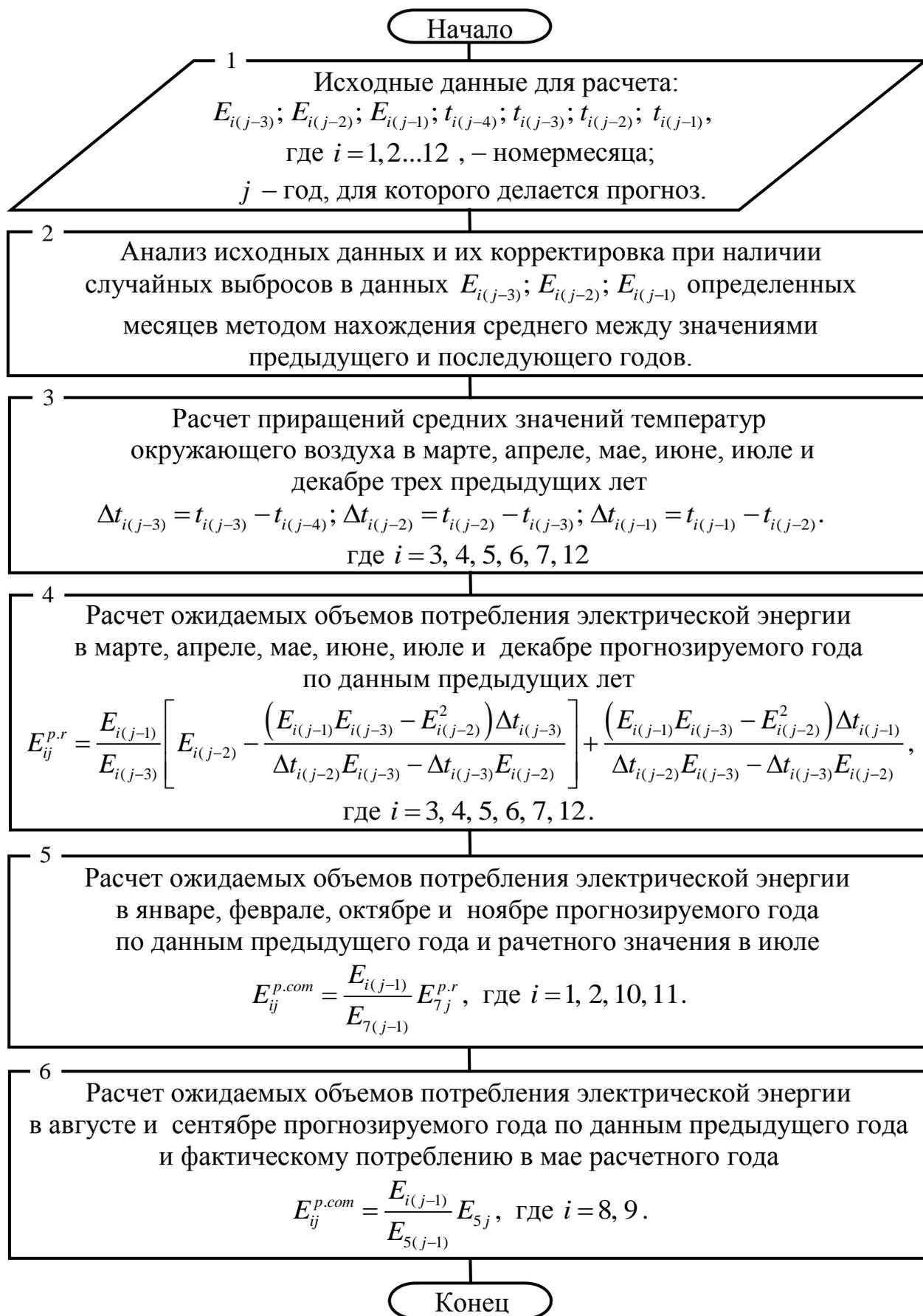


Рисунок 4 – Алгоритм расчета ожидаемых объемов потребления электроэнергии

Приведен пример расчета прогноза потребления электрической энергии абонентами Ульяновской городской электросети на 2017 год.

Результаты расчета отражены на диаграмме (рисунок 5). На рисунке 5 для сравнения приведено также фактическое потребление электрической энергии. Максимальное расхождение результатов прогноза с фактическим потреблением составляет 2,81 %.

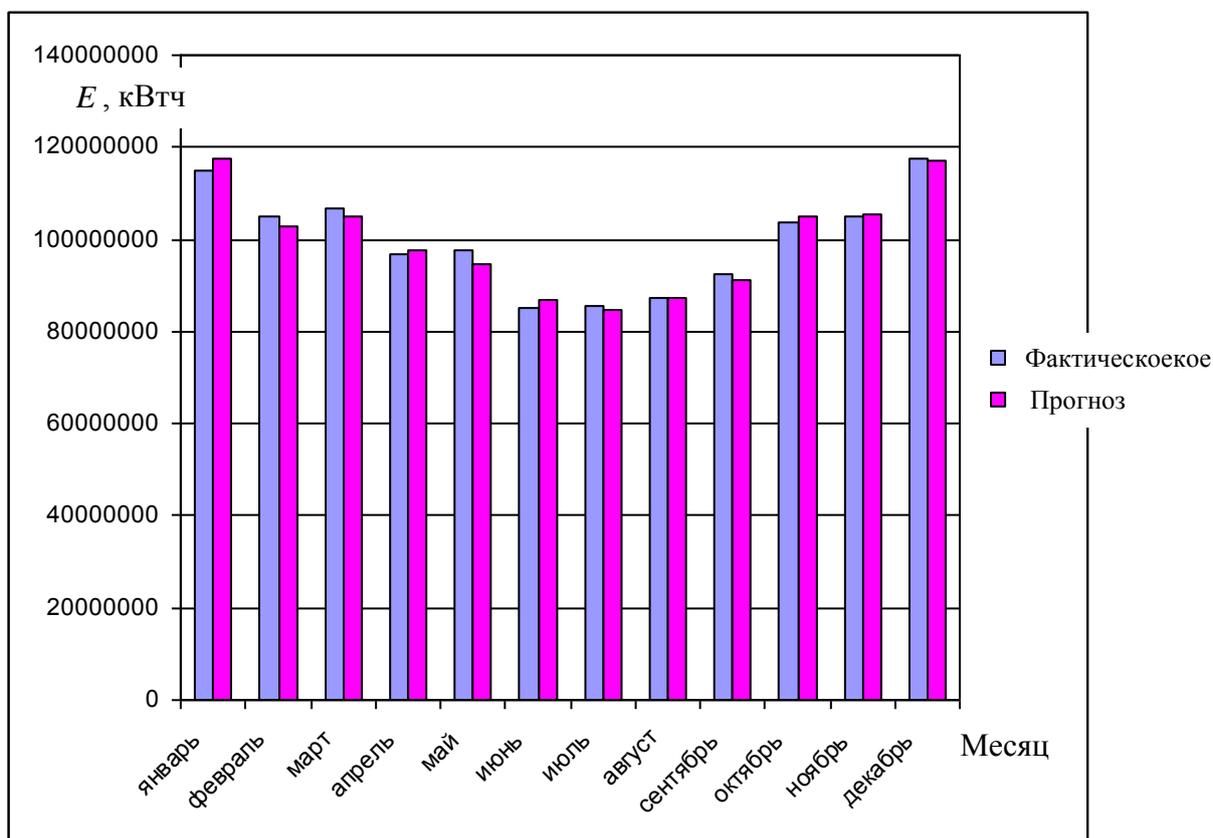


Рисунок 5 – Сравнительная диаграмма фактического и прогнозируемого потребления электрической энергии электротехническим комплексом сетевой компании «Ульяновская городская электросеть» в 2017 году

**В заключении** сформулированы основные выводы и результаты диссертационной работы.

## **ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ**

В ходе выполнения диссертационной работы получены следующие результаты:

1. Произведен анализ исходной информации по потреблению электрической энергии сетевой компании «Ульяновская городская электросеть» и метеоусловиям, и показано, что преобразование этой информации (переход к модулям разности) приближает ее к нормальному закону распределения.

2. Показано, что применение классических методов экспоненциального сглаживания и регрессионного анализа дает большую погрешность прогноза.

3. Определены коэффициенты корреляции Пирсона, значения которых позволили выявить устойчивую статистическую связь между объемами потребления электроэнергии в определенные месяцы.

4. Найдены уравнения регрессии и функциональной связи между потреблением электроэнергии в разные месяцы, которые позволяет получить в целом погрешность прогноза меньше 3 %.

5. Разработана методика прогнозирования потребления электрической энергии электротехническим комплексом сетевой компании, максимальная погрешность которой составляет 2,81 %.

6. Разработан алгоритм расчета ожидаемого объема потребления электроэнергии абонентами сетевой компании, представляющий собой четкую последовательность действий при осуществлении комбинированного прогноза.

7. Предлагаемая методика прогнозирования электрической энергии абонентами сетевой компании доведена до такого уровня детализации, что не требует применения специализированного программного обеспечения и может производиться с помощью простейшего калькулятора или электронных таблиц.

## **Рекомендации**

1. Разработанную методику и алгоритм расчета ожидаемого объема потребления электроэнергии абонентами следует применять в сетевой компании «Ульяновская городская электросеть».

2. Результаты исследования могут быть использованы и другими предприятиями, в которых среднесрочное и долгосрочное прогнозирование потребления электрической энергии является актуальной задачей.

## **Перспективы дальнейшей разработки темы**

Дальнейшая разработка темы может быть направлена на углубленное исследование электротехнического комплекса «сетевая компания – абоненты» с целью разработки более точного прогноза и изучения возможностей негативного влияния потребителей на параметры сети и разработки электротехнических устройств для решения этой задачи.

Также актуальным является поиск более эффективной комбинации методов и соответствующих аналитических выражений, позволяющих без привлечения дорогостоящего программного обеспечения уменьшить погрешность прогноза потребления электрической энергии сетевыми компаниями.

## **ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ**

Основное содержание диссертации опубликовано в следующих работах.

### **Публикации в изданиях, входящих в перечень ВАК.**

1.Билалова, А.И. Анализ прогнозирования энергопотребления с различными информационными базами/ А.И.Билалова, В.И.Доманов// Известия Самарского научного центра Российской академии наук: темат.сб.науч.тр. – Самара. – 2014. – Том 16. - №4(3). – С.535-537

2.Доманов, В.И. Прогнозирование объемов энергопотребления в зависимости от исходной базы / В.И.Доманов, В.И.Клячкин, А.И.Билалова // Промышленные АСУ и контроллеры. – 2016. - №2. – С.42-46.

3.Доманов, В.И. Прогнозирование объемов энергопотребления в зависимости от исходной информации/ А.И.Билалова, В.И.Доманов // Вестник ЮурГУ. Серия «Энергетика». – 2016. – Том 16. - №2. – С. 59-65.

4.Доманов, В.И. Усовершенствованная методика прогнозирования электропотребления в зависимости от исходной базы данных/ В.И.Доманов, А.И.Билалова// Промышленные АСУ и контроллеры. – 2017. - №12. – С.5-9.

5. Билалова, А.И. Анализ уточняющего прогноза потребления электроэнергии в г.Ульяновске/ А.И.Билалова, В.И.Доманов// Промышленная энергетика. -2018.-№1. – С.49-52.

### **в иных изданиях:**

6. Билалова, А.И. Анализ потребления электроэнергии в г.Ульяновске/А.И.Билалова//Энергетика: сборник научных трудов. –Ульяновск: УлГТУ, 2014. – С.63-66.

7. Доманов, В.И. Анализ зависимости прогноза потребления электроэнергии от исходной информации / В.И.Доманов, А.И.Билалова// Автоматизация в электроэнергетике и электротехнике: материалы I международной научно-технической конференции. – Пермь, 2015. – С.19-25.

8. Билалова, А.И. Статистический анализ энергопотребления в г.Ульяновске/ В.И.Доманов, А.И.Билалова// Приборостроение и автоматизированный электропривод в топливно-энергетическом комплексе и жилищно-коммунальном хозяйстве: материалы докладов I Поволжской научно-практической конференции. – Казань, 2015. – С.80-85.

9. Доманов, В.И. Анализ прогноза потребления электроэнергии с различными информационными базами/ В.И.Доманов, А.И.Билалова// Энергетические и электротехнические системы: международный сборник научных трудов. – Магнитогорск, 2015. – С.168-172.

10. Билалова, А.И. Анализ энергопотребления в г.Ульяновск/ А.И.Билалова// Энергетика и энергосбережение: теория и практика. Материалы II Всероссийской научно-практической конференции. – Кемерово, 2015.

11. Билалова, А.И. Прогноз энергопотребления в г.Ульяновск/ А.И.Билалова// Электроэнергетика// одиннадцатая международная научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Энергия – 2016»: материалы конференции.–Иваново: ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И.Ленина», 2016. –С.4-6

12. Доманов, В.И. Исследование различных математических моделей прогнозов потребления электрической энергии/ В.И.Доманов, А.И.Билалова//математические методы в технике и технологиях – ММТТ-29[текст]: сб. трудов XXIX международной научной конференции. - Санкт-Петербург, 2016. – С.152-154.

13. Билалова, А.И. Исследование математических моделей потребления электроэнергии/А.И.Билалова // актуальные проблемы энергетики АПК: материалы VII международной научно-практической конференции. - Саратов, 2016. – С.14-16.

14. Доманов, В.И. Анализ моделей прогнозирования потребления электроэнергии в зависимости от базы данных/В.И.Доманов, А.И.Билалова, В.А.Горшков//приборостроение и автоматизированный электропривод в топливно-энергетическом комплексе и жилищно-коммунальном хозяйстве: материалы докладов II Поволжской научно-практической конференции. – Казань, 2016. – С.142-146.

15. Билалова А.И. Исследование математических моделей прогнозирования энергопотребления на оптовом рынке электроэнергии/ А.И.Билалова/ материалы докладов

XII международной молодежной конференции «Гинчуринские чтения». – Казань, 2017. – С.174-175.

16. Билалова А.И. Исследование математических моделей прогнозирования электроэнергии/А.И.Билалова, В.И.Доманов/ XV международная научная конференция «Инновации в науке, образовании и предпринимательстве -2017».-Калининград, 2017.-С.135-138.

**Свидетельство о регистрации программ для ЭВМ:**

17.Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2018614643 Российская Федерация. Прогнозирование объемов электропотребления методом переноса/ А.И.Билалова, В.И.Доманов, правообладатель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Ульяновский государственный технический университет».- №2018611942; заявл.28.02.2018, опубл.13.04.2018.

18. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2019613911 Российская Федерация. Прогнозирование электропотребления разностным методом/ А.И.Билалова, В.И.Доманов, правообладатель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Ульяновский государственный технический университет».- №2019612648; заявл.14.03.2019, опубл.26.03.2019.

19. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2019613912 Российская Федерация. Прогнозирование электропотребления с уточнением по тренду/ А.И.Билалова, В.И.Доманов, правообладатель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Ульяновский государственный технический университет».- №2019612649; заявл.14.03.2019, опубл.26.03.2019.

Автореферат отпечатан с разрешения диссертационного совета Д212.217.04

ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет»

(протокол №6 от 01 октября 2019 г.)

Заказ № \_\_\_\_\_ Тираж 100 экз.

Отпечатано на ризографе.

ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет»

Отдел типографии и оперативной полиграфии

443100, г.Самара, ул.Молодогвардейская, 244