



ПОЛИТЕХ
Санкт-Петербургский
политехнический университет
Петра Великого

На правах рукописи

Руссков Олег Владимирович

**Методы прогнозирования неравномерных нестационарных
временных рядов на примере задачи планирования
электропотребления промышленного предприятия**

2.3.1.

Системный анализ, управление и обработка информации, статистика

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

**Санкт-Петербург
2023**

Работа выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого»

Научный руководитель: доцент, кандидат технических наук Сараджишвили Сергей Эрикович

Официальные оппоненты:

профессор, доктор технических наук Миронов Андрей Николаевич, начальник отдела проблем эксплуатации ракетно-космической техники и объектов инфраструктуры, профессор кафедры Конструкции ракет-носителей (и ракетных двигателей) Военно-космической Академии имени А.Ф. Можайского,

доцент, кандидат технических наук Курьянов Василий Николаевич, генеральный директор ООО «Техприспро».

Ведущая организация: федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Пермский национальный исследовательский политехнический университет».

Защита состоится 4 октября 2023 года в 16:00
на заседании диссертационного совета У.2.3.1.29
федерального государственного автономного образовательного учреждения
высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический
университет Петра Великого»
(195251, г. Санкт-Петербург, Гражданский проспект 28а, ИМОП «Ресурсный центр»
СПбПУ, аудитория 217).

С диссертацией можно ознакомиться в Фундаментальной библиотеке
и на сайте <https://www.spbstu.ru/science/the-department-of-doctoral-studies/defences-calendar/the-degree-of-candidate-of-sciences/>
федерального государственного автономного образовательного учреждения
высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический
университет Петра Великого».

Автореферат разослан 27.06.2023
дата

Ученый секретарь диссертационного совета



кандидат технических наук, доцент Сараджишвили Сергей Эрикович

Актуальность темы исследования. В настоящее время для решения задачи прогнозирования временных рядов хорошо зарекомендовали себя авторегрессионные модели, модели на нейронных сетях, модели экспоненциального сглаживания, на цепях Маркова, на базе классификационно-регрессивных деревьев CART. К их достоинствам можно отнести высокую точность прогнозирования, гибкость и широкую область применения. Однако, к известным недостаткам вышеприведённых моделей относится значительное снижение точности прогноза при возрастании неравномерности временного ряда. Примером задач, в которых применение вышеприведённых моделей неэффективно, могут служить задачи прогнозирования потребления ресурсов промышленного предприятия - газа, нефти, тепла, воды, электрической энергии, временные ряды которых являются неравномерными. Ярким примером является временной ряд электропотребления промышленного предприятия (Рисунок 1).

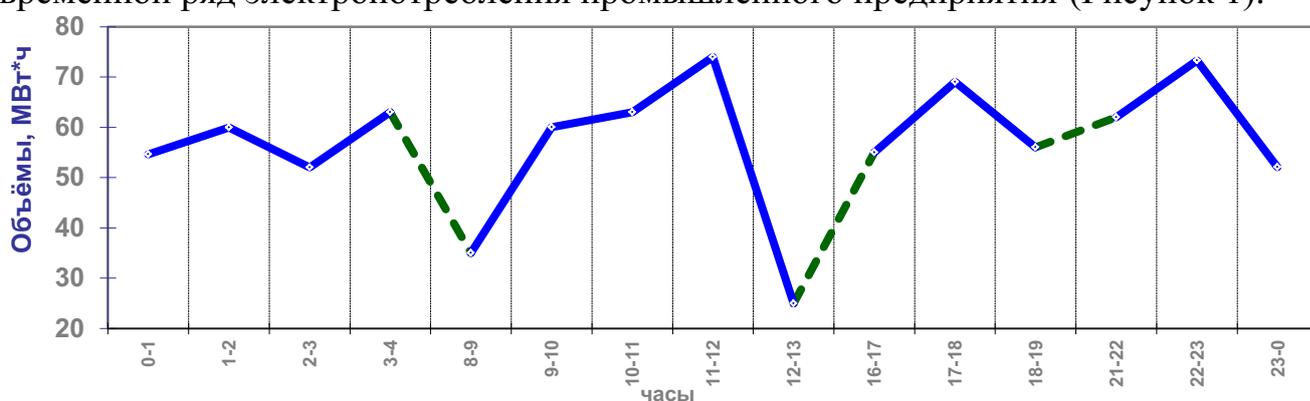


Рисунок 1 – Неравномерный временной ряд электропотребления

Следствием неравномерности, когда энергопотребляющий агрегат работает непостоянно, является нестационарность временного ряда при нанесении на оси абсцисс всех часов суток. Задача прогнозирования неравномерного временного ряда электропотребления потребовала сформулировать некоторые новые общие информационные требования к прогнозированию неравномерных рядов в целом, выделив общий класс задач, которые не решались в полной мере с помощью известных подходов. Определённые шаги в разработке подходов к решению данной проблемы были предприняты при создании моделей на базе параметров рыночной среды, тем не менее, они пока не привели к созданию эффективного прогнозного инструмента. Таким образом, прогнозирование неравномерного нестационарного электропотребления промышленного предприятия вносит значительные ограничения на использование существующих методов и требует разработки новых подходов к решению задачи прогнозирования неравномерных временных рядов. В соответствии с этим заявленная тема диссертационной работы является актуальной.

Степень разработанности темы исследования. Методы и модели, успешно применяемые для прогнозирования временных рядов в настоящее время, относят к статистическим (регрессионные, авторегрессионные ARIMAX, экспоненциального сглаживания) и структурным (модели на нейронных сетях, на цепях Маркова, на базе CART). Наиболее популярными являются нейросетевые модели, предложенные С. Хайкиным и развитые зарубежными и российскими

учёными М. Шахидепуром, Х. Ямином, С. Кунгом, П.В. Валь, Ю.П. Поповым, И.В. Вороновым. Не менее популярным инструментом являются модели семейства ARIMAX, предложенные Н. Дрейпером и Г. Смитом и развитые Х. Альфаресом, А. Харви, С. Петерсом, С. Халимом, Дж. Дурбином, С.С. Новиковым, О.В. Перцовским, И.А. Чучуевой. Проблема снижения точности прогноза при возрастании неравномерности временного ряда изучена в исследованиях Б.И. Макоклюева, В.Ф. Ёч, А.П. Дзюбы, В.Ш. Трофимовой, А.В. Липатникова, С. Бейдена, которые искали подходы к её решению. Однако, до настоящего времени решения данной проблемы не найдено.

Цели и задачи диссертационного исследования. Целью данной работы является разработка методов и моделей прогнозирования временных рядов в условиях их неравномерности и нестационарности.

В рамках достижения указанной цели поставлены следующие задачи:

1. Разработать новые методы и модели прогнозирования неравномерных нестационарных временных рядов.
2. Добиться уменьшения ошибки прогнозирования разработанных методов и моделей по сравнению с существующими на основе данных крупного промышленного предприятия.
3. Создать и в установленном порядке зарегистрировать модуль программы для ЭВМ, позволяющий осуществлять прогнозирование неравномерного нестационарного временного ряда.

Объект исследования. Прогнозирование неравномерных нестационарных временных рядов в задачах планирования потребления электроэнергии крупными промышленными предприятиями.

Предмет исследования. Методы и модели прогнозирования неравномерного нестационарного временного ряда.

Методология и методы исследования. Методологической основой исследования являются научные работы российских и зарубежных авторов. Использовался математический аппарат теории вероятностей, теории игр, анализа временных рядов.

Соответствие содержания диссертации заявленной специальности. Работа выполнена в соответствии с направлениями исследований паспорта ВАК 2.3.1. Системный анализ, управление и обработка информации, статистика:

4. Разработка методов и алгоритмов решения задач системного анализа, оптимизации, управления, принятия решений, обработки информации и искусственного интеллекта.

17. Прикладные статистические исследования, направленные на выявление, измерение, анализ, прогнозирование, моделирование складывающейся конъюнктуры и разработки перспективных вариантов развития сложных систем.

В соответствии с направлениями исследований специальности 2.3.1. осуществлены прикладные статистические исследования временных рядов для измерения, анализа и прогнозирования, моделирование перспективных вариантов развития сложной системы, разработка методов и алгоритмов решения задач принятия решений, обработки информации, а также проведена разработка специального алгоритмического обеспечения на их основе.

Научная новизна:

1. Предложен метод прогнозирования, основанный на анализе вероятностей установления соотношений смежных временных рядов и отличающийся от известных методов снижением ошибки прогнозирования неравномерных нестационарных временных рядов, а также обладающий свойством автокоррекции ошибки прогноза.

2. Разработана модель прогнозирования неравномерных нестационарных временных рядов на базе предложенного метода прогнозирования на основе теории вероятностей.

3. Предложен метод прогнозирования, основанный на расчёте прогнозной величины в условиях неопределённости с применением теории игр и отличающийся от известных методов значительным снижением ошибки прогнозирования неравномерных нестационарных временных рядов, также обладающий свойством автокоррекции ошибки прогноза.

4. Разработана модель прогнозирования неравномерных нестационарных временных рядов на базе предложенного метода прогнозирования на основе теории игр.

Положения, выносимые на защиту:

1. Метод прогнозирования неравномерных нестационарных временных рядов, основанный на анализе вероятностей установления соотношений смежных временных рядов.

2. Модель прогнозирования на базе предложенного метода на основе теории вероятностей в виде алгоритма программного модуля.

3. Метод прогнозирования неравномерных нестационарных временных рядов, основанный на расчёте прогнозной величины в условиях неопределённости с применением теории игр.

4. Модель прогнозирования на базе предложенного метода на основе теории игр в виде алгоритма программного модуля.

Теоретическая и практическая значимость работы. Разработанные методы, модели и алгоритмы доведены до реализации в виде стандартного программного обеспечения, которое испытано и внедрено в промышленную эксплуатацию на металлургическом предприятии. Эффективность разработанных методов подтверждена утверждённым на предприятии расчётом экономического эффекта. Разработанный модуль программы для ЭВМ может быть рекомендован для коммерческого использования на других металлургических предприятиях России. Кроме того, предложенные методы после небольшой доработки могут быть использованы для создания стороннего программного обеспечения для прогнозирования неравномерных временных рядов, в частности, потребления энергоресурсов (газа, нефти, пара), а также временных рядов электропотребления любой природы и ценовых рядов фондовых рынков.

Степень достоверности и апробация результатов. Достоверность полученных автором результатов экспериментов обеспечивается сравнением с результатами прогнозирования, полученными на моделях других авторов, а также с результатами моделей, ранее используемых на предприятии. Результаты диссертационной работы освещались на международных и всероссийских

конференциях. Программный модуль на языке программирования С++ принят в промышленную эксплуатацию на АО «Волжский трубный завод» 15.10.2015 (модель на основе теории вероятностей), 15.12.2016 (модель на основе теории игр) и официально зарегистрирован в установленном порядке. Разработанный программный модуль ежедневно используется персоналом промышленного предприятия для прогнозирования неравномерного ряда электропотребления.

Публикации. Основные результаты диссертационной работы опубликованы в 3 статьях в научных журналах из перечня ВАК, в 4 статьях в зарубежных научных изданиях с индексацией в Scopus и Web Of Science, в 4 сборниках всероссийских и в 3 сборниках международных конференций (итого 14 публикаций). Кроме того, получены 2 свидетельства о внедрении рационализаторских предложений, осуществлена защита проекта улучшений методологии «Лин 6 Сигм» в АО «Волжский трубный завод».

Личный вклад соискателя. Все исследования, разработка методов и алгоритмов, программирование, настройка, испытания и внедрение в рамках данной диссертационной работы проведены лично автором.

Основные результаты и выводы.

- Выявлены и классифицированы возможные типы взаимных соотношений исследуемого и смежных временных рядов.
- Предложен метод прогнозирования неравномерного нестационарного временного ряда на основе анализе вероятностей установления соотношений смежных временных рядов.
- Разработана модель на базе предложенного метода прогнозирования на основе теории вероятностей.
- Предложен метод прогнозирования неравномерного временного ряда на основе на расчёте прогнозной величины в условиях неопределённости с применением теории игр.
- Разработана модель на базе предложенного метода прогнозирования на основе теории игр.
- Разработанные модели характеризуются снижением ошибки прогнозирования неравномерного временного ряда.
- Разработаны программные алгоритмы предложенных моделей, реализованные в виде программного модуля. Получено свидетельство о государственной регистрации разработанных алгоритмов программ для ЭВМ. Проведены успешные испытания и внедрение моделей в условиях металлургического предприятия АО «Волжский трубный завод».
- Оценена эффективность разработанных методов и моделей по сравнению с лучшими из существующих на основе данных промышленного предприятия.
- Разработанные модели могут быть использованы в создании новой высокотехнологичной цифровой промышленности, в частности, они позволяют предприятиям выступать в авангарде развивающегося рынка «Энерджинет».
- Прогнозирование неравномерного временного ряда, проводимое в соответствии с разработанными алгоритмами, дополнительно приводит к экономии невозобновляемых природных ресурсов (уголь, мазут, газ) за счёт снижения загрузки неэффективных генераторов в масштабах страны.

• Предложенные методы и модели могут быть применены на других предприятиях России. Кроме того, после некоторой доработки они могут использоваться для прогнозирования неравномерных рядов потребления любых энергоресурсов и ценовых рядов фондовых рынков.

Содержание работы

Во введении обоснована актуальность исследуемой темы, описаны цель, задачи, методология и методы исследования, научная новизна, теоретическая и практическая значимость работы, сформулированы положения, выносимые на защиту, кратко изложено содержание диссертации.

В первой главе осуществлена общая постановка задачи исследования, произведён обзор существующих методов прогнозирования временных рядов, рассмотрены их достоинства и недостатки. Определено, что класс методов прогнозирования в настоящее время устоялся, при этом самыми популярными прогнозными моделями являются нейросетевые ANN и авторегрессионные ARIMA. Показано, что ошибка прогнозирования большинства временных рядов существующими моделями полностью устраивает исследователя и практика. Однако, при увеличении неравномерности временного ряда ошибка прогноза значительно возрастает, что связано с опорой моделей на статистические данные прошлых периодов. Указаны основные неравномерные нестационарные временные ряды. Учитывая, что основным по значимости в народном хозяйстве неравномерным временным рядом является ряд потребления электроэнергии промышленным предприятием, детализирована задача исследования – прогнозирование временного ряда на примере ряда неравномерного электропотребления металлургического предприятия. Классифицированы существующие методы и модели прогнозирования временных рядов электропотребления промышленных предприятий (Таблица 1). Кратко рассмотрены разрабатываемые современными исследователями подходы к прогнозированию неравномерного нестационарного электропотребления. Сделан вывод о том, что возникшая задача повлекла за собой появление нового класса методов прогнозирования неравномерных временных рядов на основе обработки данных рядов смежных, вследствие чего тема диссертации является актуальной.

Таблица 1. Классификация моделей прогнозирования электропотребления предприятий

Тип промышленного предприятия	Характер ряда	Наиболее часто применяемая модель	Учитываемые внешние факторы
1. Сетевая компания 2. Энергосбытовая компания	Относительно равномерный	1. ANN 2. ARIMA	1. Метеорологические 2. Тип нагрузки
3. Сельскохозяйственное 4. Многономенклатурное 5. Мелкое предприятие	Относительно равномерный	1. Комбинированная на базе ANN	1. Метеорологические 2. График производства
6. Крупное предприятие с основным цехом с частыми сменами режима работы, с возможностью оперативного регулирования нагрузки	Равномерный регулируемый	1. ANN 2. ARIMA 3. Оперативное управление нагрузкой	1. График производства 2. Метеорологические факторы
7. Предприятие с превалированием требований технологии	Неравномерный	Эффективных моделей не предложено	1. Технология 2. Человеческий фактор

Во второй главе описан методический подход к прогнозированию неравномерного нестационарного временного ряда (Рисунок 2).

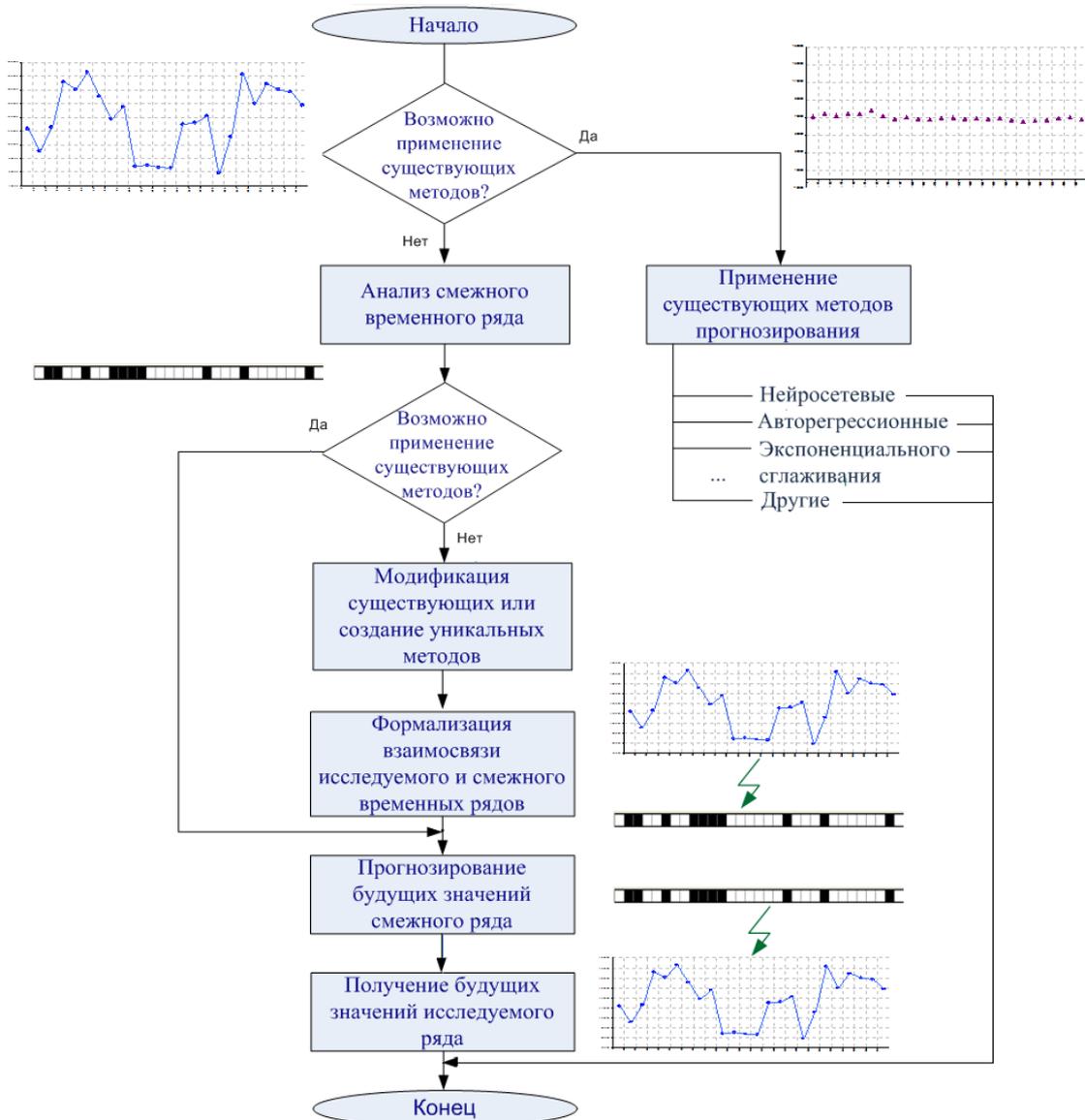


Рисунок 2 – Обобщённый алгоритм прогнозирования неравномерного временного ряда

Если смежный временной ряд более равномерный или характеризуется категориальными значениями простой природы возникновения, то следует осуществить прогноз значений смежного ряда, после чего с помощью найденной зависимости вычислить искомые значения исследуемого ряда. Область смежного процесса может отличаться от области основного процесса. Примером смежных рядов являются цены на энергоносители (область экономики) и объёмы их потребления (область энергетики). Методы, описываемые в Главах 2 и 3, укладываются в рамки этой методологии. В соответствии с методическим подходом и поставленной задачей предложен метод прогнозирования неравномерного электропотребления на основе прогнозирования смежного ряда часовых цен, осуществляемого на базе постулатов теории вероятностей. При этом выделены принципы создания предлагаемого метода прогнозирования:

- прогноз соотношений смежных временных рядов как замена прогнозу исследуемого временного ряда;

- прогнозирование исследуемого временного ряда на основе формализованной зависимости от прогнозных значений смежных рядов;
- опора на теорию вероятностей.

Формализованная зависимость между исследуемым и смежными временными рядами определяется на основе следующего выражения:

$$S_i = C_{PCB}^i \cdot V_n^i + \begin{cases} (V_\phi^i - V_n^i) \cdot C_{BP+}^i, & \text{если } (V_\phi^i > V_n^i) \\ (V_\phi^i - V_n^i) \cdot C_{BP-}^i, & \text{если } (V_\phi^i < V_n^i) \end{cases}, \quad (1)$$

где i – час суток, V_ϕ^i – фактическое, V_n^i – плановое электропотребление; C_{PCB}^i – цена рынка на сутки вперёд (PCB); C_{BP+}^i – цена покупки балансирующего рынка (БР); C_{BP-}^i – цена продажи БР. Определена целевая функция метода прогнозирования:

$$\begin{cases} \sum_{i=1, j=1}^{31, 24} S_{ij}^{PCB+BP} \rightarrow \min \\ \sum_{i=1, j=1}^{31, 24} |V_{ij}^{корр}| \leq \sum_{i=1, j=1}^{31, 24} |V_{ij}^{некорр}|, \end{cases} \quad (2)$$

где i – число дней в месяце, j – число часов в сутках, S_{ij}^{PCB+BP} – суммарный финансовый результат сделок на PCB и БР (формула 1); $V_{ij}^{корр}$ – объём часового отклонения скорректированного планового потребления от фактического; $V_{ij}^{некорр}$ – объём отклонения планового потребления от фактического до корректировки.

Основной переменной, определяющей выбор метода прогнозирования, является фактическое электропотребление V_ϕ^i , рождающееся по условиям задачи в неопределённости. Неравномерно работающий крупный агрегат порождает неравномерный нестационарный ряд. Таким образом, целевая функция является нелинейной, что вкуче с нелинейностью её ограничений (отсутствие возможности оперативного управления загрузкой производства и наличием дискретных соотношений смежных рядов C_{PCB} , C_{BP+} , C_{BP-}) не позволяет использовать, например, линейное программирование, а требует применить аппарат теорий, рассматривающих неопределённость. В каждый час возможно установление одного из 2 типов соотношений смежных рядов, представляемых в двоичном коде (Рисунок 3): 0 – C_{PCB} совпадает с C_{BP+} ; 1 – C_{PCB} совпадает с C_{BP-} .

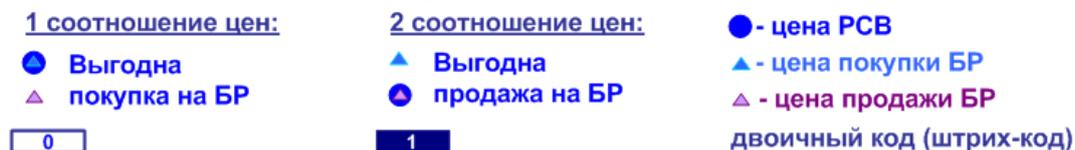


Рисунок 3 – Типы соотношений смежных временных рядов

Алгоритм метода на основе теории вероятностей приведен на Рисунке 4. Предварительный прогноз – среднечасовая ровная линия – рассчитывается исходя из суточной программы производства предприятия. Прогноз соотношений смежных рядов определяется для каждого из 24 часов суток путём анализа интервала, равного 31 суткам, что соответствует расчётному периоду оптового рынка электроэнергии. Всего за сутки анализируется выборка размером 744 значения для каждого временного ряда. Подробное обоснование такого размера выборки дано в 5 Главе.

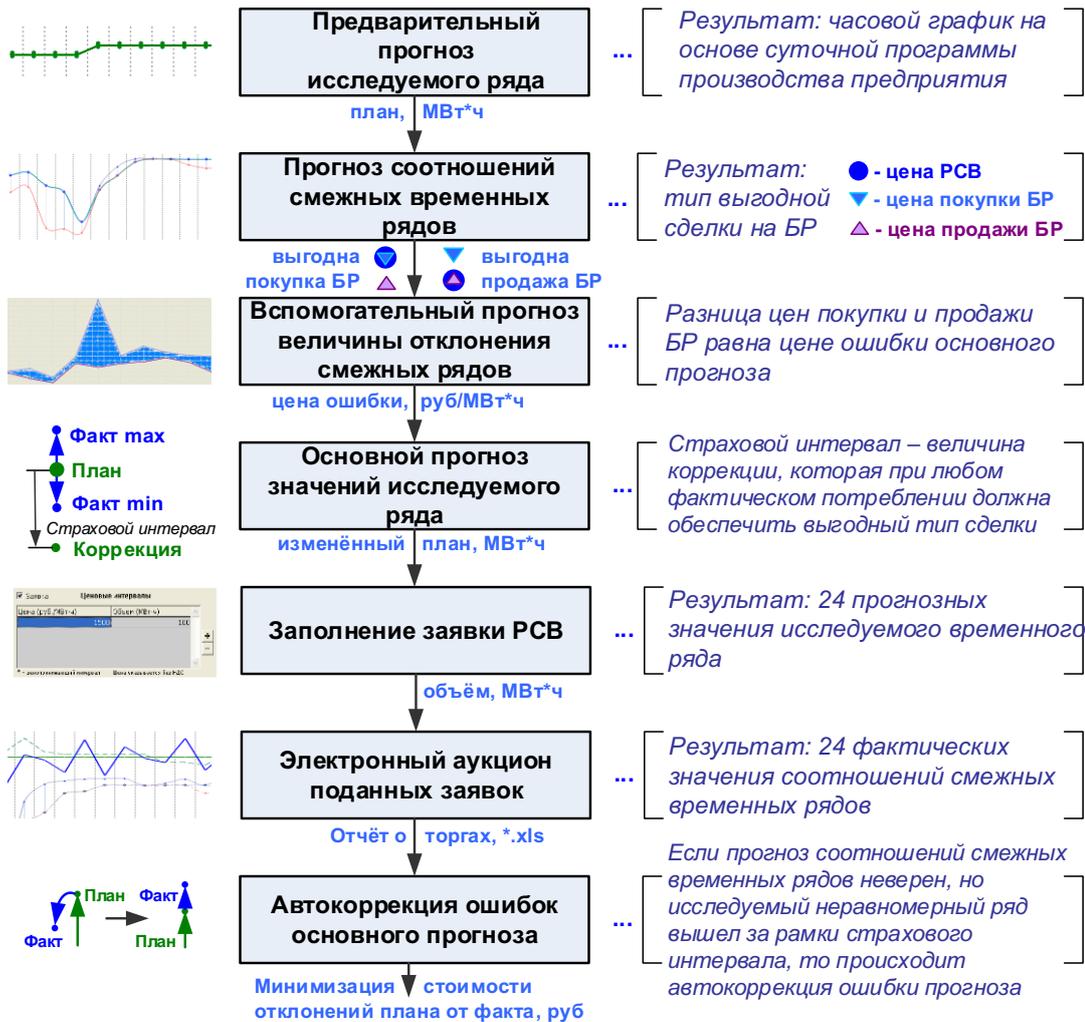


Рисунок 4 – Алгоритм метода прогнозирования на основе теории вероятностей

Величина страхового интервала для основного прогнозирования исследуемого неравномерного ряда зависит от прогноза соотношений и ожидаемой величины отклонения смежных рядов (Рисунок 5).



Рисунок 5 – Страховой интервал основного прогноза неравномерного временного ряда

Также рассмотрены факторы, влияющие на установление соотношений и величины отклонений смежных неравномерному временных рядов. Таким образом, в главе описан метод прогнозирования неравномерного нестационарного временного ряда на примере задачи планирования электропотребления промышленного предприятия, развивающий класс методов прогнозирования неравномерных временных рядов на основе анализа рядов смежных.

В третьей главе описан метод прогнозирования неравномерного нестационарного временного ряда на основе теории игр. Апробация метода на основе теории вероятностей выявила точки роста методов прогнозирования неравномерных временных рядов. В частности, была выявлена необходимость

анализа совместных часовых соотношений значений исследуемого и смежных временных рядов. В связи с этим сформулированы дополнительные принципы:

- анализ соотношений плановых и фактических значений неравномерного временного ряда в дополнение к анализу соотношений смежных рядов;
- отдельный учёт величин разницы значений смежных временных рядов в зависимости от типа их соотношений;
- опора на теорию игр.

Значения исследуемого и смежного временных рядов формируются как результаты двух недетерминированных экспериментов с двумя исходами, из которых произойти может только один (Рисунок 6).



Рисунок 6 – Недетерминированные эксперименты

Принцип электронного аукциона оптового рынка электроэнергии порождает конфликт интересов игроков, подающих прогнозные заявки, поскольку цели участников противоположны: генераторы хотят продать электроэнергию по максимальной цене, а потребители – купить по минимальной (Рисунок 7).

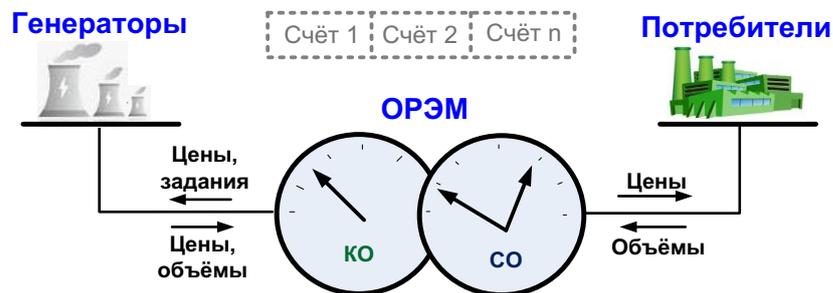


Рисунок 7 – Игра генераторов и потребителей

Инструментарий теории игр в данном случае применим, поскольку:

- формирование неравномерного электропотребления V_{ϕ}^i (формула 1) происходит в условиях неопределённости;
- все участники обладают одинаковым пониманием правил игры;
- каждому участнику рынка ясна структура формирования выгоды или убытка (формула 1);
- ситуация принятия решений участниками не меняется, поскольку в течение отчётного месяца не меняется ни состав участников, ни правила игры.

Таким образом, игра участников рынка является последовательной некооперативной игрой с ненулевой суммой и неполной информацией. Учитывая, что объёмы отклонений электроэнергии можно выразить в их стоимости на основе цен месячной корректировки небаланса рынка, задачу принятия решения о выборе планового значения часового электропотребления можно привести к однокритериальной, модифицировав формулу 2:

$$\left\{ \sum_{i=1}^N (S_{PCB+BP}^i + C_{откл} \cdot |V_i|) < \sum_{i=1}^N (S_{PCB+BP}^{*i} + C_{откл} \cdot |V_i^*|) \right\}. \quad (3)$$

Выявлены 12 возможных вариантов взаимных соотношений значений исследуемого и смежных временных рядов – по 6 для каждого из 2 возможных типов корректировки прогнозного значения неравномерного ряда (Рисунок 8).

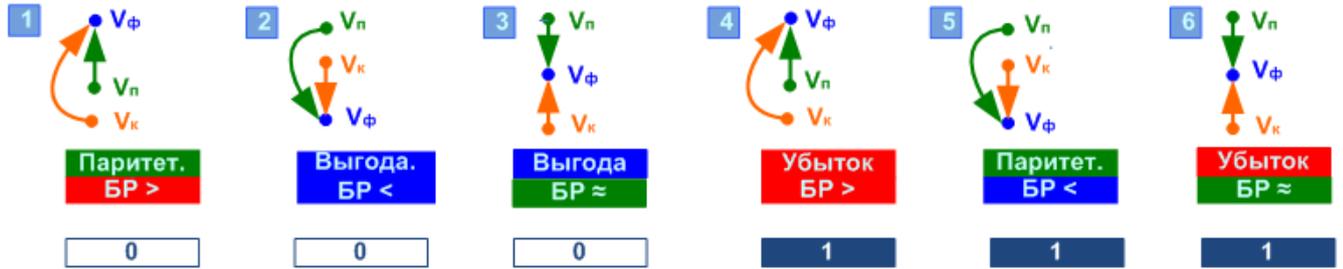


Рисунок 8 – Варианты соотношений цен и объёмов при отрицательной корректировке

В результате суммирования возможного результата гипотез каждого из 6 представленных вариантов в соответствии с формулой полной вероятности и упрощения полученного выражения получена функция прибыли отрицательной корректировки неравномерного временного ряда:

$$F_1 = V \cdot (P_1 \cdot \Delta_0 - P_2 \cdot \Delta_1 + P_1 \cdot P_2 \cdot (\Delta_1 - \Delta_0) - 2 \cdot P_2 \cdot C_{кор} + C_{кор}). \quad (4)$$

Функция прибыли для положительной корректировки равна функции прибыли для отрицательной корректировки F_1 , и противоположна ей по знаку:

$$F_2 = V \cdot (P_2 \cdot \Delta_1 - P_1 \cdot \Delta_0 + P_1 \cdot P_2 \cdot (\Delta_0 - \Delta_1) + 2 \cdot P_2 \cdot C_{откл} - C_{откл}) = -F_1. \quad (5)$$

Для каждого из 24 часов в результате анализа 31 значений рядов предыдущих суток вычисляется 2 функции прибыли. Значение и знак итоговой корректировки прогнозируемого неравномерного временного ряда выбираются на основе соотношений положительной (выгода) и отрицательной (убыток) частей той функции прибыли, которая больше нуля:

$$\left\{ \begin{array}{l} F_1 > 0 : \left\{ \begin{array}{l} F_{1+} / F_{1-} \leq 1,5 : V_c = V_p; \\ 1,5 < F_{1+} / F_{1-} \leq 2 : V_c = V_p - 1; \\ 2 < F_{1+} / F_{1-} \leq 3 : V_c = V_p - 3; \\ 3 < F_{1+} / F_{1-} \leq 4 : V_c = V_p - 5; \\ F_{1+} / F_{1-} > 4 : V_c = V_p - 7; \end{array} \right. \\ \\ F_2 > 0 : \left\{ \begin{array}{l} F_{2+} / F_{2-} \leq 1,5 : V_c = V_p; \\ 1,5 < F_{2+} / F_{2-} \leq 2 : V_c = V_p + 1; \\ 2 < F_{2+} / F_{2-} \leq 3 : V_c = V_p + 3; \\ 3 < F_{2+} / F_{2-} \leq 4 : V_c = V_p + 5; \\ F_{2+} / F_{2-} > 4 : V_c = V_p + 7; \end{array} \right. \\ \\ F_1 = F_2 = 0 : V_c = V_p. \end{array} \right. \quad (6)$$

Таким образом, разработанный метод позволяет решить поставленную задачу прогнозирования неравномерного временного ряда на основе теории игр, теории вероятностей и теории принятия решений, путём обработки информации, представленной 31 значениями неравномерного и смежных временных рядов на анализируемом интервале для каждого часа прогнозируемых суток. Апробация метода на металлургическом предприятии показала его более высокую эффективность по сравнению с методом на основе теории вероятностей.

В целом следует отметить, что разработанные и описанные в Главах 2,3 методы обладают важным свойством повышения эффективности при увеличении неравномерности и роста дисперсии временного ряда, что выгодно отличает их от существующих методов прогнозирования.

В четвёртой главе рассмотрена программная реализация алгоритмов моделей, построенных на основе предложенных методов прогнозирования. Алгоритмы реализованы в виде отдельного модуля программного комплекса на языке C++ (4075 строк исходного кода), исполняемого на IBM PC-совместимом компьютере с операционной системой Windows XP и выше. На программный модуль получено свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ. Для доступа к базе, содержащей цены и объёмы электроэнергии предприятия, используется библиотека Direct Oracle Access 6.0. Общая схема алгоритмов разработанных моделей прогнозирования приведена на Рисунке 9.

Основные результаты работы предложенных моделей, выводимые на экран:

- *вероятность формирования прогнозируемых соотношений смежных временных рядов для лица, принимающего решение об итоговом прогнозе неравномерного временного ряда;*
- *итоговый финансовый результат прогнозирования неравномерного ряда за период планирования электропотребления промышленного предприятия;*
- *разница суммарных отклонений прогнозных и фактических значений неравномерного ряда за период прогнозирования;*
- *визуализация значений неравномерного и смежных временных рядов;*
- *визуализация результатов в виде типов соотношений временных рядов;*
- *процентное отношение фактического экономического эффекта к идеальному, который соответствует прогнозированию, при котором в любой час отчётного периода плановое значение ряда равно фактическому.*

Тестовые испытания программных алгоритмов разработанных моделей проводились в режиме ретроспективного прогнозирования на металлургическом предприятии, начиная с сентября 2014 года. Модель прогнозирования на основе теории вероятностей внедрена в опытную эксплуатацию на предприятии с 15 октября 2015 года, модель на основе теории игр внедрена в промышленную эксплуатацию с 15 апреля 2016 года. Модели непрерывно совершенствуются.

Таким образом, разработаны модель прогнозирования неравномерного временного ряда на основе теории вероятностей и модель на основе теории игр. Осуществлено программирование, испытания и сдача в эксплуатацию программного модуля по алгоритмам разработанных моделей. Дополнительно разработан и запрограммирован алгоритм ретроспективного прогнозирования,

позволяющий упрощать отладку версий алгоритмов моделей. Получены 2 свидетельства о регистрации и внедрении рационализаторских предложений.

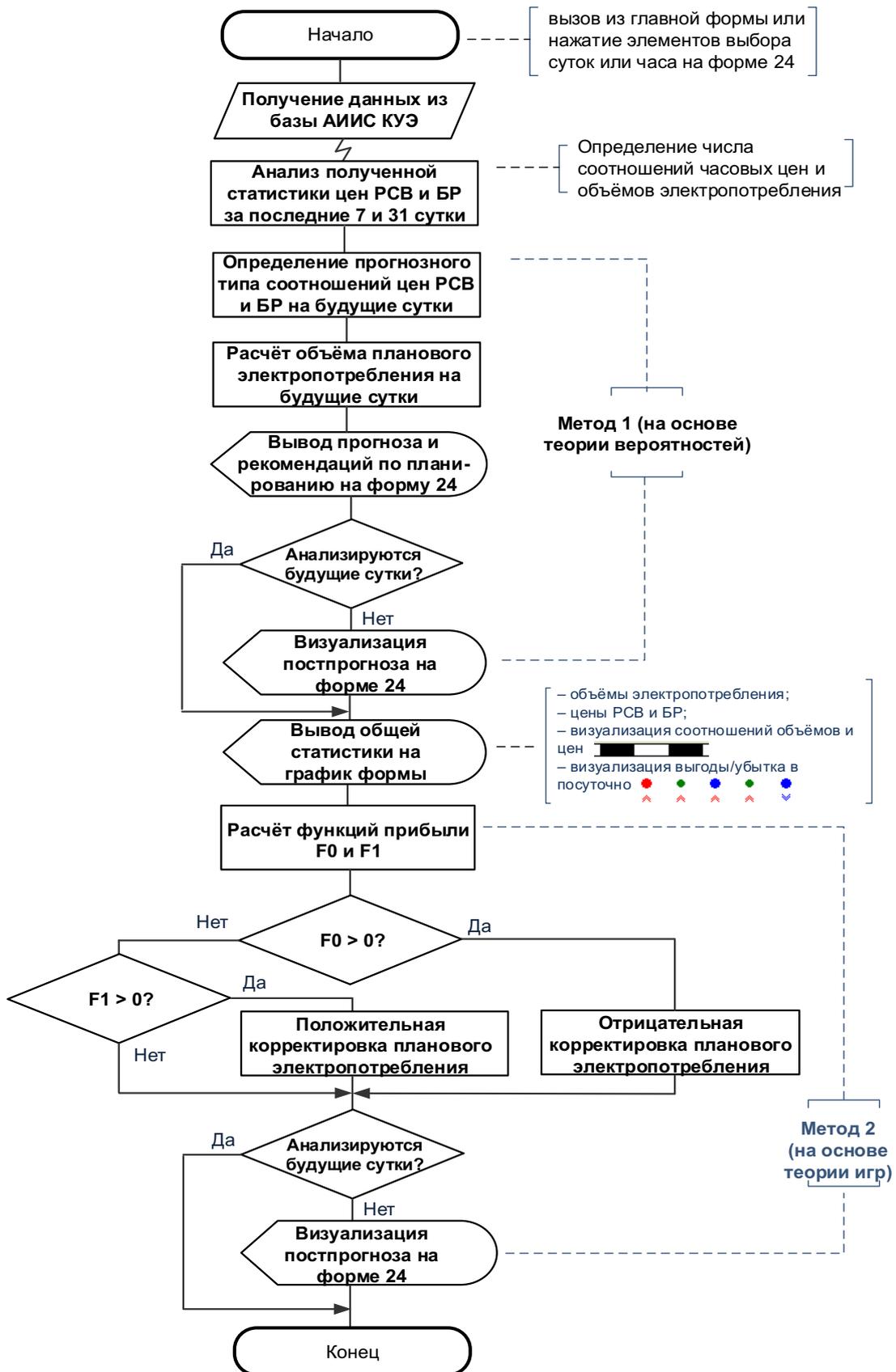


Рисунок 9 – Общая схема алгоритма планирования электропотребления предприятия

В пятой главе приведены результаты испытаний моделей прогнозирования неравномерного нестационарного временного ряда на примере ряда

неравномерного электропотребления промышленного предприятия. В качестве периода оценки результатов был выбран 1 типовой месяц (30 дней по 24 часа, всего 720 экспериментальных значений). Согласно работам Новицкого П.В. при доверительной вероятности $P_d \leq 0.99$ число экспериментов n должно составлять 400, при этом нижняя граница P_d не определена. Конкретный же объём выборки зависит от вида распределения, однако, для любого вида достаточно 750 наблюдений при относительной среднеквадратичной погрешности 0,05. Для уточнения n и P_d целесообразно воспользоваться статистическим методом определения объёма простой случайной бесповторной выборки:

$$n = \frac{N \cdot t^2 \cdot \sigma^2}{N \cdot \Delta_{\bar{x}}^2 + t^2 \cdot S^2}, \text{ где} \quad (7)$$

N – объём генеральной совокупности, t – параметр надёжности, σ^2 – дисперсия генеральной совокупности, $\Delta_{\bar{x}}$ – средняя предельная ошибка, S^2 – дисперсия выборки. Распределения генеральной совокупности и предполагаемой выборки приведены на Рисунке 10 (расчёт проведён программой Minitab 18). Таким образом, параметры неравномерного временного ряда для формулы 7: $N = 43824$ (количество часов за 5 лет с 1 днём високосного года); $t = 1,96$ для $P_d = 0.95$; $\sigma^2 = 17,353$; $S^2 = 21,222$; предельная ошибка выборки $\Delta_x = 2$ МВт*ч. При этих данных минимальный размер выборки равен 447,4.

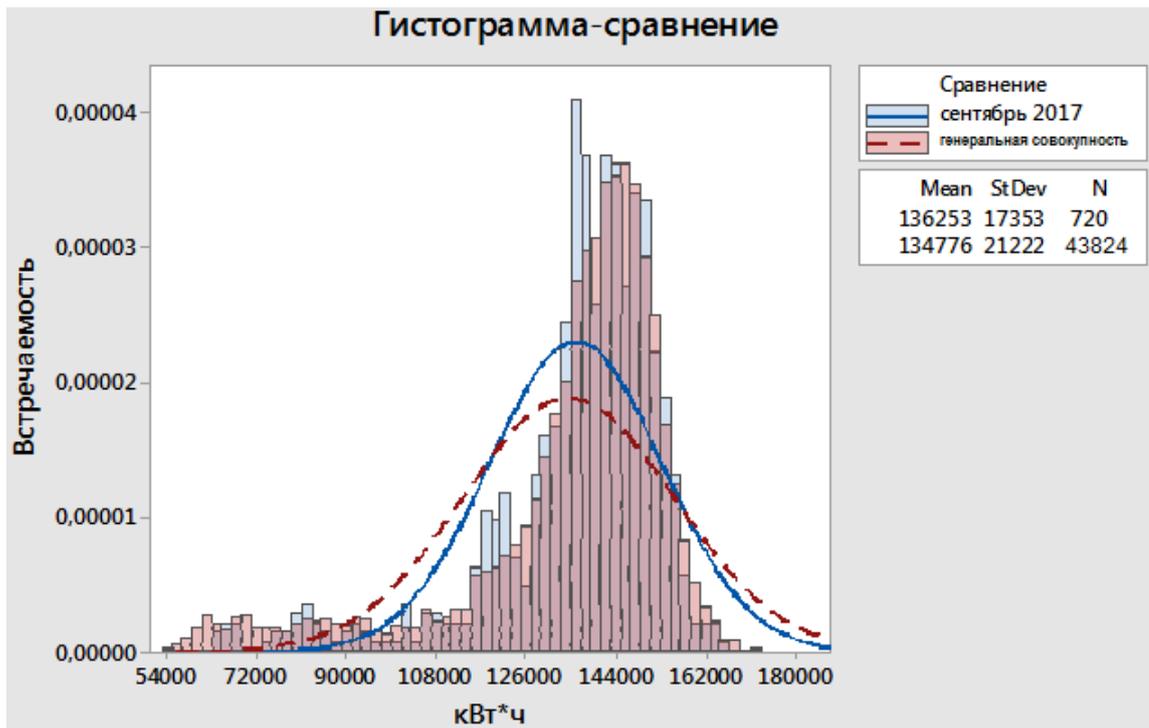


Рисунок 10 – Вариативность данных генеральной совокупности и выборки

Таким образом, минимальный объём выборки в 720 экспериментов (30 дней по 24 часа), является достаточным для доверительной вероятности 0,95. В соответствии с этим в качестве периода для испытаний моделей на ретроспективных данных выбран сентябрь 2017 года. Электропотребление в нём является типичным, без капитальных ремонтов основного электропотребляющего агрегата предприятия. Сравнивались результаты работы разработанных моделей прогнозирования и самых популярных из существующих на сегодняшний день

моделей – авторегрессионной ARIMA и нейросетевой ANN. Результаты испытаний моделей прогнозирования на основе теории вероятности и на основе теории игр получены автоматически с помощью разработанного в рамках диссертации программного модуля. Лучший результат показала модель на основе теории игр (Рисунок 11): на 1,165 млн. руб. в месяц (0,89% от месячных затрат предприятия) превзошла лучшую модификацию ARIMA (1,1,0 0,1,2 12s 7c) и на 207,9 тыс. руб. в месяц (0,16%) - модель ANN.

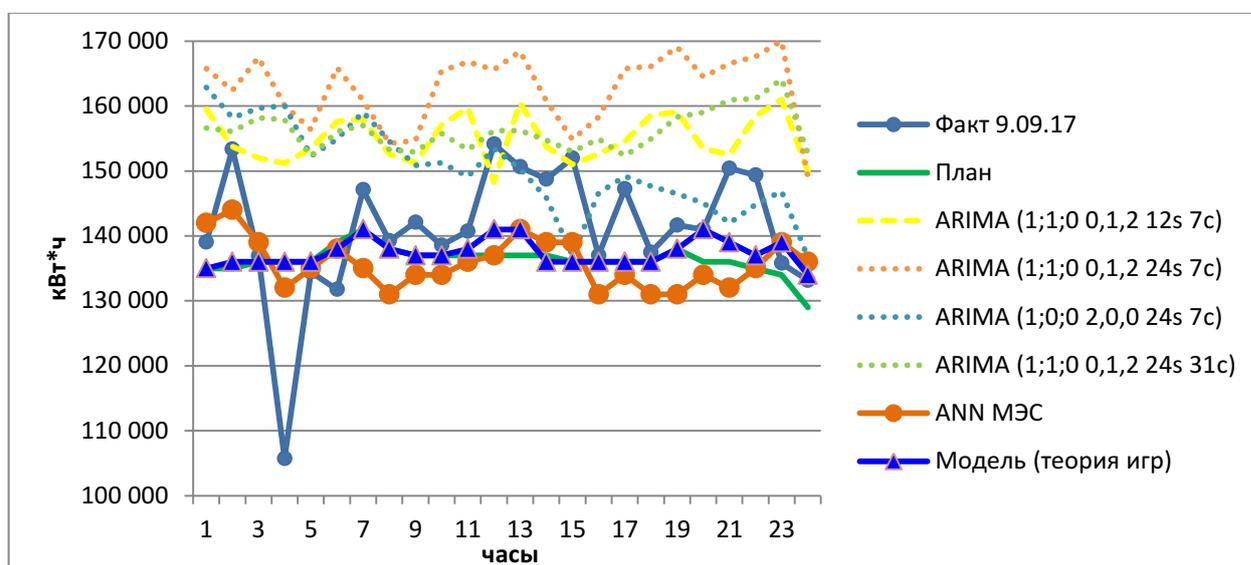


Рисунок 11 – Лучший результат модели на основе теории игр за 9.09.2017

Второе место заняла экспертная модель (комбинированная модель – эксперт отдела главного энергетика предприятия плюс модель на основе теории игр). В Таблице 2 приведены сравнительные результаты тестирования моделей по сравнению с наивной моделью «прогноз ровным графиком без корректировок».

Таблица 2 - Относительные результаты тестирования моделей

Сравнение	Экспертная модель	Модель-1 (теория вероятностей)	Модель-2 (теория игр)	ARIMA (1;1;0 0,1,2 12s 7c)	ARIMA (1;1;0 0,1,2 24s 7c)	ARIMA (1;0;0 2,0,0 24s 7c)	ARIMA (1;1;0 0,1,2 24s 31c)	ANN МЭС
Целевая функция, руб.	39 603	-82 126	107 459	-1 057 141	-1 623 023	-1 652 350	-1 082 148	-100 504
MAE, kWh	11 563	12 066	11 276	15 415	17 130	17 544	15 105	11 986
Место	2	3	1	5	7	8	6	4

Модель на основе теории вероятностей заняла третье место, также опередив существующие модели: на 975 тыс. руб. в месяц (0,75% от месячных затрат предприятия) относительно лучшей модификации модели ARIMA (1,1,0 0,1,2 12s 7c) и на 18,4 тыс. руб. в месяц (0,014% от месячных затрат предприятия) относительно модели ANN. Достигнутое уменьшение средней абсолютной ошибки прогнозирования с применением модели на основе теории игр составило 5,9 % относительно модели ANN. Таким образом, сравнение предлагаемых автором моделей с лучшими из существующих показывает, что разработанные модели действительно позволяют эффективно прогнозировать неравномерный временной ряд на основе обработки и анализа значений смежных рядов.

Заключение. В рамках исследования получены следующие результаты:

Разработан методический подход к прогнозированию неравномерного ряда.

Предложен метод прогнозирования неравномерного нестационарного временного ряда, основанный на анализе вероятностей установления соотношений смежных временных рядов. Разработана прогнозная модель на базе предложенного метода на основе теории вероятностей.

Предложен метод прогнозирования неравномерного нестационарного временного ряда основанный на расчёте прогнозной величины в условиях неопределённости с применением теории игр. Разработана модель на базе предложенного метода.

Разработанные методы и модели характеризуются свойством автокоррекции ошибки прогноза категориальных данных смежного временного ряда.

Создан программный модуль, реализующий разработанные алгоритмы в реальном времени, позволяющий персоналу промышленного предприятия использовать его при планировании электропотребления. На созданный модуль получено свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ.

Проведены успешные испытания разработанных методов и алгоритмов в условиях промышленного предприятия с неравномерным электропотреблением. Разработанные модели позволяют снизить ошибку прогнозирования неравномерного нестационарного временного ряда по сравнению с лучшими существующими моделям временных рядов. Достигнутое уменьшение средней абсолютной ошибки прогнозирования модели на основе теории игр составило 5,9% с доверительной вероятностью 0,95 относительно нейросетевой модели, лучшей среди протестированных существующих моделей.

Результаты прогнозирования модели на основе теории игр оказались лучшими среди результатов восьми лучших существующих временных рядов, позволив снизить затраты предприятия на покупку электроэнергии на 1,165 млн. руб. в месяц (0,89% от месячных затрат предприятия) относительно лучшей модификации модели ARIMA (1,1,0 0,1,2 12s 7c), на 207,9 тыс. руб. в месяц (0,16%) относительно нейросетевой модели ANN МЭС и на 107,5 тыс. руб. (0,08%) в месяц (1,29 млн. руб. в год) относительно экспертной модели, использовавшейся ранее на предприятии. Модель на основе теории вероятностей показала третий результат.

Применение разработанных методов и моделей позволяет снижать углеродный след производимой в России продукции и способствует устойчивому развитию промышленных предприятий.

В соответствии с направлениями исследований специальности 2.3.1. осуществлены прикладные статистические исследования временных рядов для измерения, анализа и прогнозирования, моделирование перспективных вариантов развития сложной системы, разработка методов и алгоритмов решения задач принятия решений, обработки информации, а также проведена разработка специального алгоритмического обеспечения на их основе.

Поскольку временной ряд электропотребления предприятия является частным случаем неравномерного нестационарного ряда, можно утверждать, что

цель диссертационного исследования достигнута, поставленные задачи выполнены в полном объёме.

Публикации по теме диссертации

Публикации в журналах из перечня ВАК:

1. Руссков, О.В. Планирование неравномерного потребления субъекта оптового рынка электроэнергии на основе прогноза соотношений часовых цен / О.В. Руссков, С.Э. Сараджишвили // Наука и образование. – 2015. – № 2. – с. 115-135.
2. Руссков, О.В. Прогнозирование цен и объёмов электропотребления / О.В. Руссков, С.Э. Сараджишвили // Главный энергетик. – 2015. – № 11-12, с. 30-37.
3. Руссков, О.В. Методический подход к прогнозированию неравномерного временного ряда / О.В. Руссков, И.А. Воронков, С.Э. Сараджишвили // Современная наука: актуальные проблемы теории и практики. Серия: Естественные и Технические Науки. – 2021. – № 04. – с. 142-147.

Конференции (РИНЦ):

4. Руссков, О.В. Ограничения математических моделей в прогнозировании неравномерных временных рядов и пути их преодоления / О.В. Руссков, С.Э. Сараджишвили // Национальная ассоциация учёных. – 2014. – № 4. – с. 55-59.
5. Руссков, О.В. Прогноз неравномерного нерегулируемого потребления на оптовом рынке электроэнергии / О.В. Руссков, С.Э. Сараджишвили // Евразийский союз учёных. – 2014. – № 9. – с. 28-33.
6. Руссков, О.В. Применение теории игр для моделирования неравномерного электропотребления с целью оптимизации процесса работы промышленного предприятия на оптовом рынке / О.В. Руссков, С.Э. Сараджишвили // Труды национальной научно-технической конференции «Компьютерное Моделирование (КОМОД-2016)». – 2016. – с. 171-185.
7. Руссков, О.В. Обзор методов снижения стоимости неравномерного электропотребления предприятия на оптовом рынке / О.В. Руссков, С.Э. Сараджишвили // Новая наука: от идеи к результату. – 2016. – № 120 ч.3. – с. 148-153.
8. Руссков, О.В. Цифровая модель неравномерного электропотребления промышленного предприятия / О.В. Руссков, С.Э. Сараджишвили // Сборник трудов международной научной конференции ММТТ-32. – 2019. – Т. 10. – с. 138-144.
9. Руссков, О.В. Методы и модели прогнозирования неравномерного электропотребления и мощности промышленного предприятия на оптовом рынке России как инструмент перехода к цифровой энергетике Энерджинет / О.В. Руссков // Сборник работ лауреатов международного конкурса научных, научно-технических и инновационных разработок Минэнерго. – 2021. – с. 110-115.

10. Russkov, O.V. Digital model for forecasting the maximum power consumption of energy region / O.V. Russkov, S.E. Saradgishvili // 2nd International Conference Cyber-Physical Systems and Control CPS&C'2021. – 2021. – с. 35-39.

Публикации в зарубежных журналах (индексация Scopus):

11. Russkov, O. The Electricity Market Prices Forecast as Energy Efficient Procedure for an Industrial Monotown Enterprise / O. Russkov, S. Saradgishvili // Procedia Engineering. – 2015. – V. 117. – p. 309-316.

12. Russkov, O.V. IT-Method for uneven energy consumption planning / O.V. Russkov, S.E. Saradgishvili // IEEE 2017 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM). – 2017. – p. 1-4.

13. Russkov, O.V. The method of planning the energy consumption for electricity market / O.V. Russkov, S.E. Saradgishvili // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science 90 (1) 012068_ – 2017. – p. 1-10.

Публикации в зарубежных журналах (индексация WebOfScience):

14. Russkov, O.V. A digital method for correcting planned electric energy consumption as a step to the Energynet market / O.V. Russkov, S.E. Saradgishvili // SHS Web of Conf. – 2018. – Volume 44 (00073). – p. 1-10.

Свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ:

15. Руссков, О.В. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2017615423 «Программный модуль для планирования неравномерного электропотребления предприятия на оптовом рынке с использованием метода на основе теории вероятностей и метода на основе теории игр» / О.В. Руссков. – М. : Федеральная служба по интеллектуальной собственности. – 2017. – 1 с.