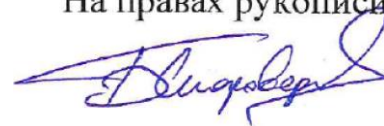


На правах рукописи



СТАРОВЕРОВ Борислав Алексеевич

**Теоретическое обоснование и практическая реализация систем
прогнозирования электропотребления на основе ансамблей нейронных сетей
в масштабе региональной сетевой компании**

Специальность 2.3.1. – Системный анализ, управление и обработка информации,
статистика

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Омск 2023

Работа выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Омский государственный технический университет».

Научный руководитель **Хамитов Рустам Нуриманович**
доктор технических наук, профессор

Официальные оппоненты **Хомутов Станислав Олегович**
доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Электроснабжение промышленных предприятий» федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова» (г. Барнаул)

Матренин Павел Викторович
кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник кафедры электротехники Уральского энергетического института федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Уральский федеральный университет имени первого президента России Б.Н. Ельцина» (г. Екатеринбург)

Ведущая организация Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина» (г. Иваново)

Защита состоится «21» декабря 2023 г. в 14:00 на заседании диссертационного совета 24.2.350.07, созданного на базе ОмГТУ, по адресу: 644050, Омск, пр. Мира, 11, Главный корпус, ауд. П-202.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ОмГТУ и на сайте www.omgtu.ru.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью учреждения, просьба направлять по адресу: 644050, г. Омск, пр. Мира, 11, ученому секретарю диссертационного совета 24.2.350.07. Тел.: (3812) 65-24-79, e-mail: dissov_omgtu@omgtu.ru.

Автореферат разослан

« ____ » _____ 2023 г.

Ученый секретарь диссертационного совета 24.2.350.07 канд. техн. наук, доцент



____ А.С. Грицай

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования и степень ее разработанности.

Одними из основных направлений развития систем управления на современном этапе являются «цифровизация» и «интеллектуализация», т.е. применение методов искусственного интеллекта. Это относится также к такой важной области хозяйственно-экономической деятельности как энергетика. С каждым годом растет роль распределенной генерации, развиваются «смарт» технологии, такие как «умные сети», «умный город». В таких условиях для эффективного управления процессами электроснабжения необходимо не только оперативно реагировать на изменения нагрузки в сети, но и с максимальной возможной точностью их прогнозировать и действовать на упреждение.

Повышение эффективности выполнения функций технологического и диспетчерского управления на границах ответственности региональной сетевой компании и на отдельных ее участках также связано с необходимостью использования не только ретроспективной и текущей информации об электропотреблении, но и прогнозных данных. Сюда относятся задачи по расчету режимов нагрузки сетей, расчету потерь электроэнергии, формированию планов отключения и подключения потребителей, определению графиков ремонтных работ и т.д. В техническом плане с точки зрения автоматизации процессов управления режимами работы электрических сетей включение подсистем прогнозирования электропотребления в информационно-измерительные системы учета электроэнергии значительно расширяет их функциональные возможности и повышает эффективность.

Многоплановость технико-экономических задач функционирования региональных электросетевых компаний и работающих с ними в тесном взаимодействии электросбытовых компаний также требует применять прогнозирование электропотребления на различную перспективу. Для операций по покупке и продаже электроэнергии на федеральном оптовом рынке электроэнергии и мощности (ФОРЭМ) необходимы системы краткосрочного прогнозирования. Для оптимизации распределения нагрузки между производителями и потребителями электроэнергии требуются системы среднесрочного прогнозирования. Расчет тарифов, перспективное планирование и управление развитием энергетических компаний базируется на системах долгосрочного прогнозирования.

В связи с важностью прогнозирования электропотребления для хозяйственно-экономической деятельности за последние десятилетия появилось большое количество исследований на эту тему, в результате которых был разработан ряд оригинальных методов и практических решений. Список авторов работ включает десятки имен: Б.И. Макоклоев, Т.А. Филиппова, И.И. Надтока, А.В. Гофман, А.С. Ведерников, И.Ю. Алексеева, К.Л. Соломахо, И.А. Чучуева и т.д. Такое количество и разнообразие работ по исследуемой проблеме обусловлены рядом причин: различные условия и факторы, определяющие

потребление электроэнергии, различные виды прогнозов, разнообразные методы и средства получения прогнозов.

В то же время применение этих решений ограничено рядом причин. Во-первых, это уникальность моделей и методик, выражающаяся в том, что они хорошо работают для определенных условий и масштабов электропотребления и видов потребителей, а при других условиях требуется заново проводить процедуру адаптации. Во-вторых, необходима, как правило, ручная корректировка получаемых прогнозов. Поэтому на данный момент для прогнозирования потребления электроэнергии используются в основном инженерно-аналитические команды специалистов и даже специализированные центры. Такая технология имеет широкое распространение, но она не отвечает современному уровню как с экономической точки зрения – высокая цена прогнозирования, так и с содержательной – возможность субъективных ошибок в процессе анализа.

Развитие компьютерных технологий, значительное повышение вычислительных мощностей, наличие высокоскоростных каналов связи, появление цифровых подстанций, развитие теории систем искусственного интеллекта позволяют вывести решение задач прогнозирования потребления электроэнергии на новый уровень, расширить область применения систем прогнозирования в масштабах региональной сетевой компании для управления экономической эффективностью закупки и распределения электрической энергии для совершенствования принятия решений в системах технологического и диспетчерского управления электросетями.

Таким образом, создание высокоточных систем прогнозирования электропотребления, применимых к различным графикам нагрузки и видам прогнозов остается актуальной проблемой.

Объектом исследования являются системы краткосрочного, среднесрочного и долгосрочного прогнозирования электропотребления в масштабах региональной сетевой компании на основании данных, получаемых от средств технического и коммерческого учета электроэнергии.

Предметом исследования являются методы, модели и алгоритмы прогнозирования, и их практической реализации в составе систем управления электропотреблением.

Область исследования. Работа выполнена в соответствии с пунктами Паспорта научной специальности 05.13.01 – «Системный анализ, управление и обработка информации» (в соответствии с новой номенклатурой научных специальностей 2.3.1 – Системный анализ, управление и обработка информации, статистика), пунктом 4 – «Разработка методов и алгоритмов решения задач системного анализа, оптимизации, управления, принятия решений и обработки информации» и пунктом 10 – «Методы и алгоритмы интеллектуальной поддержки при принятии управленческих решений в технических системах» и пунктом 11 – «Методы и алгоритмы прогнозирования и оценки эффективности, качества и надежности сложных систем».

Целью диссертационной работы является разработка методов и средств повышения универсальности и точности прогнозирования электропотребления, применимых к различным типам графиков нагрузки и видам прогнозов в масштабах региональной электросетевой компании для систем предиктивного (прогнозного) диспетчерского управления и технико-экономического планирования.

Задачи исследования:

1. Оценить существующие методы и средства прогнозирования потребления электроэнергии с позиции применимости для систем с расширенными возможностями по получению различных видов прогнозов.
2. Обосновать концепцию интеграции аппроксимирующих возможностей нейронных сетей путем их объединения в ансамбль как способ повышения точности и универсальности систем прогнозирования электропотребления.
3. Провести анализ и синтез наиболее эффективных нейронных сетей, т.е. имеющих минимально возможные погрешности аппроксимации, как основы для построения ансамблей.
4. Разработать методику синтеза и алгоритмы формирования ансамблей из эффективных нейронных сетей.
5. Осуществить практическую реализацию систем прогнозирования электропотребления и применение их для решения задач технико-экономического и диспетчерского управления в масштабах региональной электросетевой компании.

Методы исследования. Для решения поставленных задач были использованы следующие методы: теория систем и системный анализ, теория вероятности, регрессионный и корреляционный анализ, теория систем искусственного интеллекта, теория автоматического управления. Для реализации систем прогнозирования использован язык C#, для работы с нейронными сетями – библиотека Fast Artificial Neural Network (FANN).

Научная новизна заключается в разработке теоретической основы построения систем прогнозирования электропотребления в виде ансамбля искусственных нейронных сетей, а именно:

1. Разработана оригинальная концепция построения ансамбля, имеющего иерархическую структуру и отличающаяся тем, что ансамбль формируется из эффективных нейронных сетей, выходные сигналы нижнего уровня (метаданные) которых используются для обучения нейросетей следующего уровня, которые, в свою очередь, реализуют мета алгоритм, компенсирующий погрешности прогнозов отдельных нейросетей. Благодаря этому осуществляется управляемое глубокое обучение на ограниченном множестве ретроспективных данных, что обеспечивает повышение точности прогнозирования и универсальности по отношению к видам прогнозов электропотребления.
2. Обоснована методика синтеза эффективных нейронных сетей, отличающаяся тем, что:

– оценка аппроксимирующих возможностей нейронных сетей осуществляется с помощью полученных выражений функциональной связи между входными и выходными переменными сети, благодаря чему определено, что необходимо, как минимум, применение трехслойной структуры нейросетевых моделей с нелинейными функциями активации;

– определение состава динамических переменных входных векторов для краткосрочного, среднесрочного и долгосрочного прогнозирования осуществляется методом авторегрессионной аппроксимацией ретроспективных данных, получаемых от средств технического учета электроэнергии, что позволяет формировать минимальные по размерности входные векторы;

– синтез структур эффективных нейронных сетей производится путем определения соотношения между объемом обучающей выборки и числом настраиваемых коэффициентов, которые отличаются тем, что в результате избыточного числа нейронов в скрытых слоях обеспечивается применимость их к графикам потребления электроэнергии различной конфигурации.

3. Разработана методика синтеза ансамблей в соответствии с предложенной концепцией из эффективных нейронных сетей в виде иерархической структуры типа стэкинга, отличающаяся тем, что нейронные сети для ансамбля отбираются на основе попарного сравнения по двум критериям: по критерию, определяющему минимальную корреляцию графиков прогнозирования отдельных нейросетей и по критерию максимально возможной компенсации взаимной погрешности этих прогнозов.

Практическая значимость работы состоит в следующем:

1. Получена структура системы технического и коммерческого учета электроэнергии с расширенными функциональными возможностями «предсказания» загрузки электросетей и реализации упреждающего управления, которые обеспечиваются подсистемой прогнозирования.

2. Определен состав входных векторов, типы, структуры и технология обучения наиболее эффективных нейронных сетей, имеющих минимально возможные погрешности аппроксимации, как для самостоятельного использования, так и в составе ансамблей.

3. Сформированы ансамбли нейронных сетей для систем краткосрочного и среднесрочного прогнозирования электропотребления, обеспечивающих уменьшение величин погрешностей прогнозирования на 20-80% по сравнению с одиночными нейронными сетями.

4. Разработаны алгоритмы отбора эффективных нейронных сетей и формирования ансамблей на их основе, а также программное обеспечение, реализующее эти алгоритмы, с использованием библиотеки искусственных нейронных сетей Fast Artificial Neural Network (FANN), имеющие необходимый набор нейронных сетей и сервисных функций, которые позволяют автоматизировать процессы синтеза системы для различных видов прогнозирования электропотребления.

5. Разработан алгоритм принятия решений на основе использования систем прогнозирования при покупке и продаже электроэнергии на ФОРЭМ.

6. Установлены взаимосвязи между иерархическими уровнями АИИС КУЭ и функциями системы поддержки принятия управленческих решений на основе прогнозирования электропотребления, что позволяет строить интеллектуальные информационно-измерительные системы необходимого масштаба и интегрировать их с другими подсистемами АСУ электросетей.

Достоверность научных результатов и положений определяется применением широко используемых и апробированных методов решения научных задач, корректностью применения математического анализа и математических выводов, методов теории машинного обучения и моделирования, а также обоснованной методикой постановки экспериментов, отбора и обработки экспериментальных данных, сходимостью теоретических выводов и экспериментальных результатов.

Положения, выносимые на защиту:

1. Концепция формирования и методика синтеза ансамбля в виде многоуровневой иерархической структуры, формируемой из эффективных нейронных сетей для повышения универсальности и точности систем прогнозирования.

2. Методики синтеза эффективных нейронных сетей, применимых к различным видам прогнозов и графикам потребления электроэнергии, и формирования из них ансамблей для уменьшения погрешностей прогнозирования.

3. Алгоритмы автоматизации процессов синтеза эффективных нейронных сетей и ансамблей на их основе, а также программное обеспечение, реализующее эти алгоритмы.

4. Структура взаимосвязей между иерархическими уровнями АИИС УЭ и системами поддержки принятия управленческих решений с использованием прогнозов электропотребления.

Практическое использование результатов работы.

Системы прогнозирования были испытаны и внедрены в производственные процессы в Костромской энергосбытовой компании, в Филиале МРСК центра – Костромаэнерго (удостоверение на рационализаторское предложение №2016-10-004), в ООО «Старк», г. Москва, инновационный центр «Сколково», в ООО «РСМ-системы», г. Москва. Полученные результаты показали высокую эффективность применения в диспетчерском управлении и расчетах тарифов на электроэнергию, что подтверждено актами внедрения результатов диссертационной работы.

Теоретические и экспериментальные результаты используются также в учебных курсах магистерской и аспирантской подготовки.

Совокупность полученных результатов исследования является решением актуальной научной проблемы, направленной на совершенствование систем прогнозирования для технико-экономического планирования развития региональной сетевой компании и для диспетчерского управления распределительными электросетями.

Разработан программный продукт для отбора нейронных сетей для формирования ансамбля прогнозирования электропотребления (свидетельство о регистрации №25191).

Разработан программный продукт для прогнозирования энергопотребления «Смартэнергопрогноз» в среде C# (свидетельство о регистрации № 25192).

Связь работы с научными программами, планами, темами, грантами.

Исследование выполнено в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования РФ (тема: «Предиктивное управление потоками энергии электрогенерирующих комплексов Арктики и Крайнего Севера, при стохастических характерах потребления и генерации электрической энергии: теория, синтез, эксперимент», код темы: FENG-2023-0001).

Апробация работы и публикации.

Основные результаты диссертационного исследования докладывались и обсуждались на XXVIII Международной научной интернет-конференции «Математические методы в технике и технологиях» (г. Ярославль), XVIII Всероссийской научно-технической конференции «Нейроинформатика-2016» (г. Москва), научно-технических конкурсах «Энергопрорыв-2016» и «Энергопрорыв-2017» (г. Москва), треке «Power and Energy» акселератора «Generation-S» 2016 (г. Иркутск), Всероссийской научно-практической конференции с международным участием "Актуальные вопросы энергетики" 2023г. (г. Омск).

По теме диссертации опубликовано 12 работ, в том числе 6 в изданиях, рекомендованных ВАК России для публикации результатов кандидатских диссертаций и 1 статья в зарубежном издании, индексируемом в SCOPUS.

Соискатель Староверов Б.А. переименовал фамилию Гнатюк Борислав Алексеевич и стал Староверовым Бориславом Алексеевичем (Свидетельство о переименовании имени И-ФО № 506174 от 17.09.2017 г.).

Структура и объем диссертации.

Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка используемых источников, включающего 119 наименований, двух приложений. Работа изложена на 157 страницах машинописного текста, содержит 39 рисунков и 19 таблиц.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В введении обоснована актуальность темы диссертации, раскрыты цели и задачи работы, сформулированы основные положения научной новизны и практической значимости.

В первой главе проведен анализ существующих методов и средств прогнозирования потребления электроэнергии, исходя из которого определены задачи исследования.

Технической основой для прогнозирования потребления электроэнергии является автоматизированная информационно-измерительная система учета электроэнергии (АИИС УЭ). Предложена структура системы технического и коммерческого учета электроэнергии, заключающаяся в объединении подсистемы

измерения и подсистемы прогнозирования (Рис.1). За счет этого у АИИС УЭ появляются новые возможности: «предсказания» загрузки электросетей и реализация упреждающего управления.

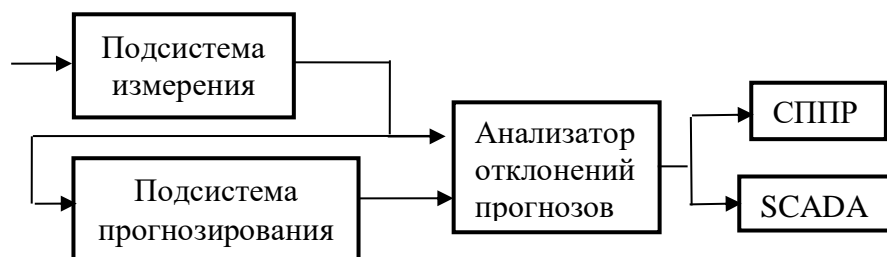


Рис.1. Структура АИИС УЭ с подсистемой прогнозирования

Определены условия, влияющие на выбор способов прогнозирования: масштаб охвата и вид потребителей; область применения и назначение прогнозов; временные интервалы, на которые распространяются прогнозы; модели и методы прогнозирования.

По временным интервалам прогнозов принята следующая классификация: оперативное, краткосрочное, среднесрочное и долгосрочное прогнозирование. Оперативные и краткосрочные прогнозы являются основой диспетчерских графиков, формируемых на период от часа до суток вперед; среднесрочные прогнозы требуются для расчета стоимости потребляемой электроэнергии и формирования режимов работы распределительных сетей; сводные долгосрочные прогнозы необходимы для составления общих ежегодных балансов.

Осуществлена классификация моделей и методов прогнозирования потребления электроэнергии по укрупненным группам, а именно: экспертный (интуитивный), сценарный, экстраполяционный. Наиболее распространенными и перспективными являются экстраполяционные методы, использующие регрессионные и нейросетевые модели прогнозирования.

Проведенные исследования показали, что регрессионные модели, базирующиеся на рекурсивных или рекуррентных методах наименьших квадратов, а также модели, использующие методы максимального подобия, и линейные нейронные сети, обучаемые методом обратного распространения по минимуму наименьших квадратов, имеют общую теоретическую основу. При этом нейросетевые модели обладают значительными преимуществами благодаря возможности учета множества факторов, влияющих на потребление электроэнергии.

Модели на основе одиночных нейронных сетей, несмотря на адаптивность и масштабируемость, не обладают необходимой универсальностью по отношению к видам прогнозов и особенностям графиков потребления электроэнергии. В связи с этим выдвинута гипотеза, что лишь объединение различных типов нейронных сетей в ансамбли или комитеты позволит решить задачи обеспечения требуемой точности и универсальности.

Как правило, ансамбли нейронных сетей применяется в тех случаях, когда требуется решить задачи классификации и регрессии для больших объемов

данных. Определено, что в связи с ограниченным объемом обучающих выборок прогнозы отдельных нейросетей могут быть в значительной степени коррелированы. Это существенно снижает эффективность применения ансамблей. В связи с этим разработана оригинальная концепция построения ансамбля, который способен обеспечить уменьшение результирующей погрешности. Установлено, что ансамбль должен иметь иерархическую структуру, формируемую из эффективных нейронных сетей, отобранных таким образом, чтобы выходные сигналы нейросетей нижнего уровня (метаданных) имели минимальную корреляцию и обеспечивали максимально возможную взаимную компенсацию погрешности отдельных прогнозов. Компенсация осуществляется с помощью нейронной сети следующего уровня, обученной в качестве мета алгоритма на выборке выходных сигналов предыдущего уровня.

Вторая глава посвящена синтезу эффективных нейросетевых моделей как основы построения ансамблей для систем прогнозирования электропотребления.

Проведено исследование аппроксимирующих свойств многослойных нейронных сетей. Такая сеть с вектором входных переменных, размерностью n , и с одним выходным сигналом с учетом переменной инициализации $x_0 = 1$ описывается уравнением:

$$y(\mathbf{x}) = f(x_1, x_2, \dots, x_n) = f^b \left(\sum_{j=1}^p v_j f^a \left(\sum_{i=0}^n w_{ij} x_i \right) + v_{01} x_0 \right)$$

где f_j – функции активации нейронов скрытого слоя; f_s – функции активации нейронов выходного слоя; $w_{i,j}$ и v_j – весовые коэффициенты синаптических связей между нейронами. На основе теоремы Стоуна-Вейерштрасса установлено, что применение трехслойной структуры нейросетевых моделей и нелинейных функций активации является достаточным для решения рассматриваемых задач прогнозирования.

С учетом требований к системам управления электропотреблением для оценки погрешности прогнозирования наряду с общепринятыми показателями (среднее и среднеквадратичное отклонение), предложено применять по аналогии с плотностью вероятности такой показатель, как интервальная плотность распределения погрешностей прогнозирования.

Второй по важности является задача определения состава входного вектора или набора факторов, по которым осуществляется прогнозирование электропотребления. На основе системного подхода множество возможных значимых факторов декомпозировано в виде системы трех подмножеств:

$$V = \langle C \ X \ U \rangle,$$

где C – подмножество статических переменных, которые несут информацию о моменте времени, для которого осуществляется прогнозирование;

X – динамические переменные, представляющие ретроспективные данные потребления;

U – уточняющие факторы: длительность светового дня, средняя температура и другие погодные условия, графики работы наиболее значимых потребителей.

Установлено, что подмножество статических переменных должно формироваться в зависимости от вида прогноза: для краткосрочного оно должно состоять из идентификаторов часа T , дня недели D и месяца M ; для среднесрочного и долгосрочного – из идентификаторов дня недели, дня месяца и месяца. Выявлено, что для краткосрочного прогнозирования дополнительным усовершенствованием входного вектора является дублирование идентификаторов часа в соответствии с количеством ретроспективных данных о почасовом потреблении электроэнергии.

С помощью метода авторегрессионной аппроксимации определено, что для формирования динамических переменных для краткосрочного прогнозирования достаточно использовать ретроспективные данные почасового потребления не более чем на пять суток; для среднесрочного прогнозирования на неделю вперед – данные посуточного потребления электроэнергии со сдвигом на пять недель; для среднесрочного прогнозирования на месяц вперед – данные посуточного потребления электроэнергии с ретроспективой на месяц. Для долгосрочного прогнозирования на год вперед необходимы данные помесечного или посуточного потребления при объеме обучающих выборок за пять лет.

Доказано с помощью корреляционных зависимостей между температурными графиками и графиками электропотребления, что возможно прогнозирование потребления электроэнергии с необходимой точностью без использования таких ненадежных факторов, как прогнозные данные по метеоусловиям. Наиболее значимым из уточняющих факторов U для рассматриваемого типа потребителей является тип дня; рабочий выходной или праздничный и предпраздничный.

В результате сформированы минимальные входные векторы, для которых используются динамические данные только систем учета электропотребления. Для краткосрочного получен 13 размерный вектор при использовании 9 переменных:

$$\text{Imp} = \{X_{N-1}; T; X_{N-2}; T; X_{N-3}; T; X_{N-4}; T; X_{N-5}; T; D; M; U\}.$$

Для среднесрочного прогноз на неделю получен 7 размерный вектор:

$$\text{Imp} = \{X_{N-35}; X_{N-28}; X_{N-21}; X_{N-14}; X_{N-7}; D; M\};$$

для долгосрочного прогнозирования – 4 размерный: $\text{Imp} = \{X_{N-31}; D; Z; M\}$.

Определены типы наиболее эффективных нейронных сетей, т.е. имеющих минимально возможные погрешности аппроксимации: с прямым распространением, с задержкой по времени, сети каскадных корреляций (распределения), рекуррентные сети и, в частности, нейронные сети Элмана. Нейронные сети должны иметь, как минимум, трех- и четырехслойную структуру. При этом установлено необходимое число нейронов в скрытых слоях по критерию способности нейронной сети к обобщению с помощью меры Вапника-Червоненкиса при объемах данных электропотребления за два года, которые являются наиболее значимыми. В результате структуры полученных нейронных сетей отличаются тем, что число нейронов в скрытых слоях должно в несколько раз превышать количество нейронов во входном слое, что позволяет

аппроксимировать сложные графики потребления электроэнергии и применять синтезированные нейросети в различных системах прогнозирования.

Основываясь на проведенном исследовании аппроксимирующих свойств нейронных сетей и экспериментальных результатах, синтезировано 12 видов наиболее эффективных нейронных сетей, часть из которых представлена в Таблице:

Эффективные нейронные сети

Искусственная нейронная сеть (ИНС)	Кол-во нейронов скрытых	Плотность распределения погрешностей (количество и проценты)				СО СКО (%)
		0-3%	3-5%	5-10%	>10%	
Трехслойная ИНС с каскадным распределением	75	557	128	31	4	2,03
		77.4%	17.8%	4.3%	0.5%	2,66
Трехслойная ИНС Элмана	75	585	95	39	1	1,85
		81.3%	13.2%	5.4%	0.1%	2,43
Четырехслойная ИНС с прямым распределением и задержкой по времени	40-35	606	82	32	0	1,74
		84.2%	11.4%	4.4%	0 %	2,27

В качестве примера на Рис. 2 приведены графики почасового потребления реального и спрогнозированного электропотребления для наиболее сложного периода – первых 24 январских дней.

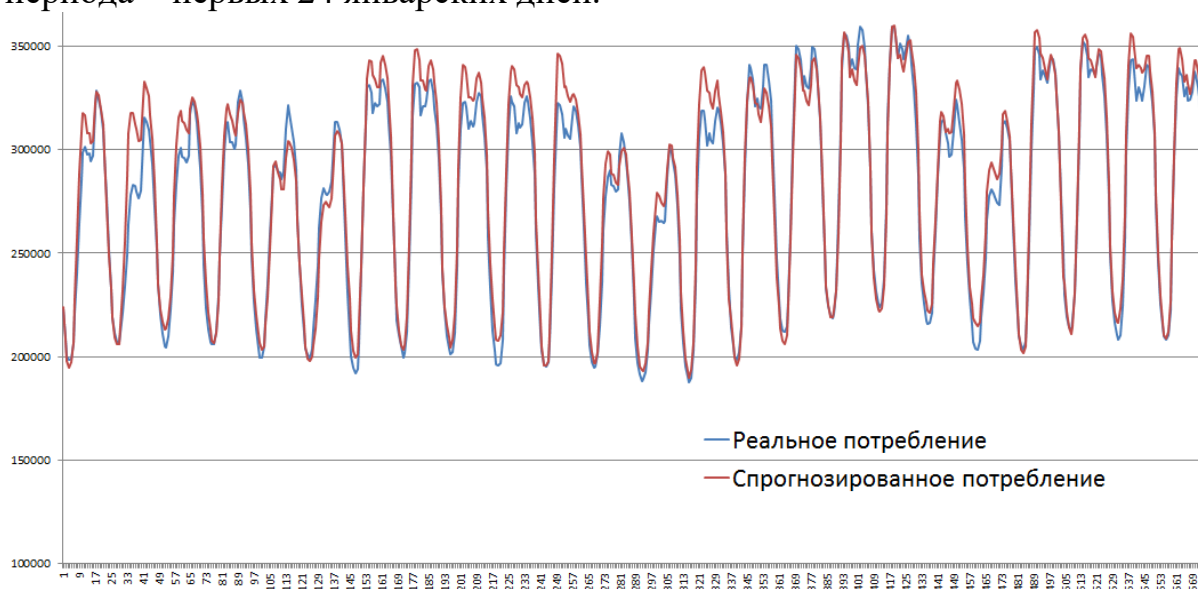


Рис. 2. Графики реального и спрогнозированного электропотребления за январь месяц (нейросеть с прямым распределением и задержкой по времени: СО=1,89%, СКО=2,36%)

Более сложной задачей является среднесрочное и долгосрочное прогнозирование потребления электроэнергии. Для обеспечения универсальности систем прогнозирования данные виды прогнозов формируются как сумма прогнозов посуточного потребления электроэнергии за соответствующий период.

Благодаря этому применение разработанных моделей позволило уменьшить среднюю погрешность для среднесрочных прогнозов на неделю вперед до $CO = 2,71\%$, для прогнозов на месяц вперед – до $CO = 1,85\%$, для долгосрочного (годового) прогнозирования в результате усреднения – $CO = 0,04\%$. (Рис. 3).

Синтезированные нейросети могут использоваться для прогнозирования как самостоятельно, так и для формирования ансамблей с целью повышения точности и обеспечения универсальности систем прогнозирования потребления электроэнергии.

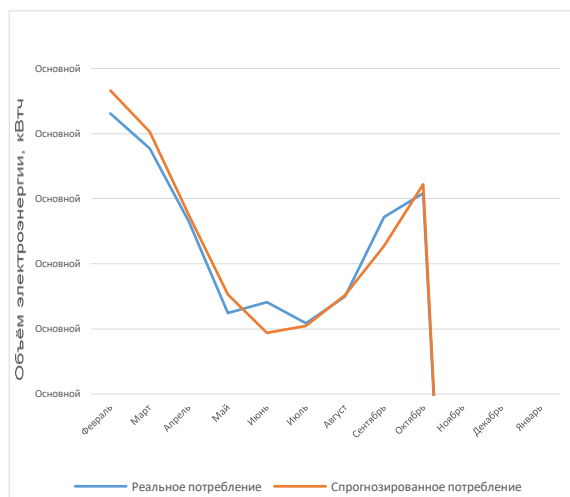


Рис.3. Графики реального и прогнозного годового электропотребления

Третья глава посвящена методике формирования ансамблей нейронных сетей для систем прогнозирования

Сформулированы общие положения формирования ансамбля нейронных сетей. Определено, что для объединения нейронных сетей в ансамбль целесообразно использовать стэкинг, реализуемый в виде иерархической структуры,

осуществляющей прогнозирование поэтапным итерационным методом. В векторной форме уравнение, описывающее

работу такого ансамбля, будет иметь следующий вид:

$$y_3(x) = f_3^b \left(v_3^T f_3^a \left(w_3 F_2^b \left(v_2^T F_2^a \left(w_2 F_1^b \left(v_1^T F_1^a (w_1 x) \right) \right) \right) \right) \right),$$

где $F_1^a = [f_{11}^a f_{12}^a \dots f_{1m}^a]^T$ и $F_2^a = [f_{21}^a f_{22}^a \dots f_{2g}^a]^T$ – векторы функции активации внутренних слоев соответственно нейросетей первого и второго уровней; $F_1^b = [f_{11}^b f_{12}^b \dots f_{1k}^b]^T$ и $F_2^b = [f_{21}^b f_{22}^b \dots f_{2l}^b]^T$ – векторы функции активации выходных слоев соответственно нейросетей первого и второго уровней; f_3^a – функции активации внутреннего слоя нейросети третьего уровня; f_3^b – функция активации выходного нейрона нейросети третьего уровня; W, V – матрицы синоптических коэффициентов внутренних и выходных слоев нейронных сетей. Прогнозируемая величина формируется поэтапно как функция от метаданных, что обеспечивает итерационный процесс уменьшения дисперсии ошибки.

Определено, что механическое объединение нейронных сетей в ансамбль не приводит к уменьшению погрешностей прогнозирования. Необходимо проводить выбор нейронных сетей в два этапа (Рис.4): по точности (эффективности) прогнозирования и по взаимной компенсации погрешностей аппроксимации.

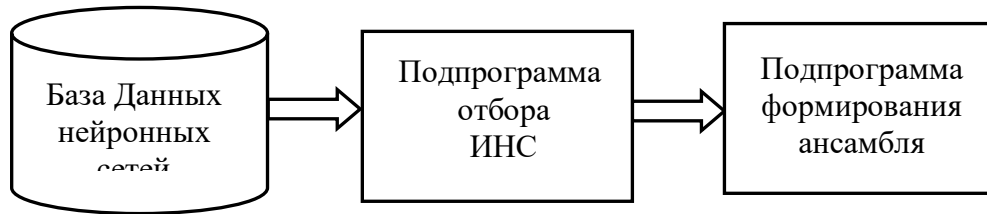


Рис.4. Увеличенная блок-схема процесса формирования ансамблей

Алгоритм формирования ансамбля по взаимной компенсации погрешностей аппроксимации (Рис.5) включает попарный отбор нейронных сетей по двум критериям: по максимуму критерия $J_p = \sum_{k=1}^N \delta_{ijk} \%$, где $\delta_{ijk} = |\varepsilon_{ik} - \varepsilon_{jk}|$ – разность погрешностей сравниваемых нейронных сетей, для момента отсчета k , N – число отсчетов; и по минимуму критерия $J_c = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N \mu_{ijk} \%$. где $\mu_{ijk} = |\varepsilon_{ik} + \varepsilon_{jk}|$ – суммарное значение погрешностей сравниваемых нейронных сетей для момента отсчета k .

По первому критерию определяется максимум несовпадения графиков прогнозов, а, значит, минимум их корреляции. По второму критерию определяется минимум некомпенсированности погрешностей.

Для краткосрочного прогнозирования синтезированы двух- и трехуровневые ансамбли с минимальным числом искусственных нейронных сетей.

Установлено, что для среднесрочного прогнозирования наибольшая точность достигается при использовании двухуровневого ансамбля, для долгосрочного – при использовании одиночной нейронной сети.

Применение ансамблей приводит к уменьшению погрешностей на 20-80 %.

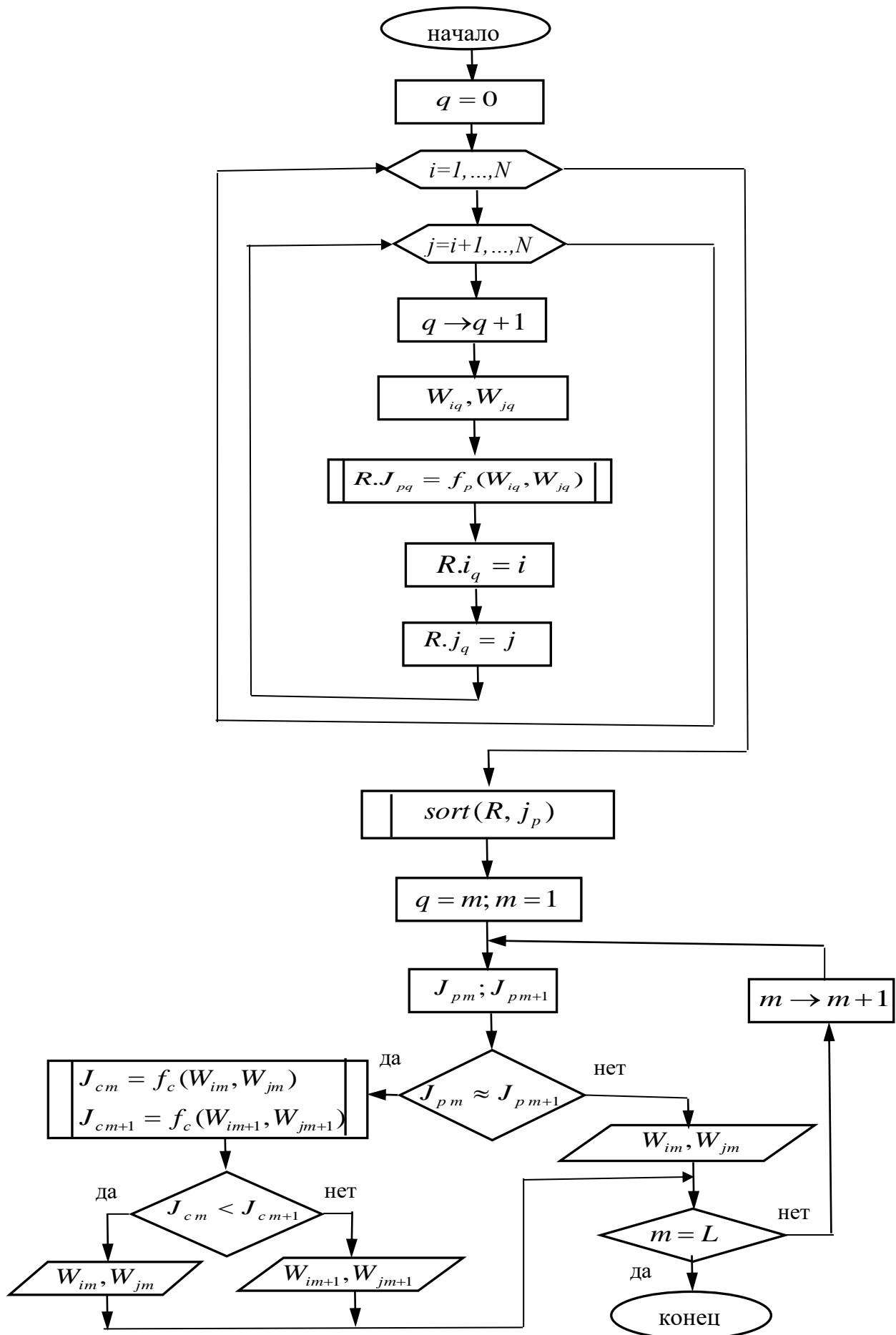


Рис.5. Формирование ансамбля ИНС. Схема алгоритма

Четвертая глава посвящена применению разработанных методов и средств прогнозирования для повышения эффективности управления в сбытовых и электросетевых компаниях.

На основе анализа функционирования оптового рынка электроэнергии и мощности, а также входящих в него субрынков, разработан алгоритм для системы поддержки принятия управленческих решений.

Определены задачи, решаемые с помощью систем прогнозирования: краткосрочное прогнозирование – для операций по покупке и продаже электроэнергии; среднесрочное прогнозирование – для оптимизации распределения нагрузки между производителями электроэнергии; долгосрочное прогнозирование – для перспективного планирования и управления развитием энергетических компаний и отрасли в целом.

На первом этапе необходимо получить достоверный прогноз почасового потребления электроэнергии на сутки вперед с точностью 2-5%, который является основой принятия эффективного решения. На втором этапе проводится анализ графиков цен на электроэнергию на рынке «на сутки вперед» и балансирующем рынке с целью определить знак и величину отклонения прогнозного значения потребления электрической энергии от фактического. Соответственно, в состав общей информационной системы входят, как показано на Рис.6, отдельные специализированные системы прогнозирования.

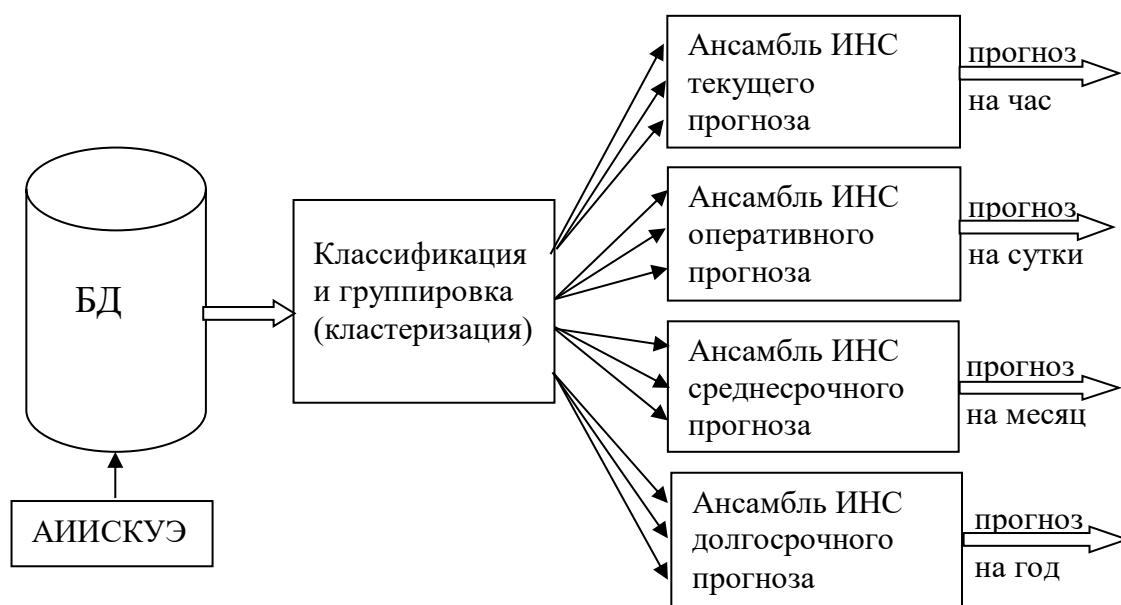


Рис.6. Структура общей информационной системы прогнозирования

Определена структура взаимосвязей между иерархическими уровнями автоматизированной информационно-измерительной системы учета электроэнергии АИИС УЭ и функциями системы поддержки принятия управленческих решений на основе прогнозирования электропотребления. На Рис.7 представлена структура взаимосвязей между иерархическими уровнями АИИС УЭ и системой поддержки принятия управленческих решений на основе прогнозирования электропотребления.

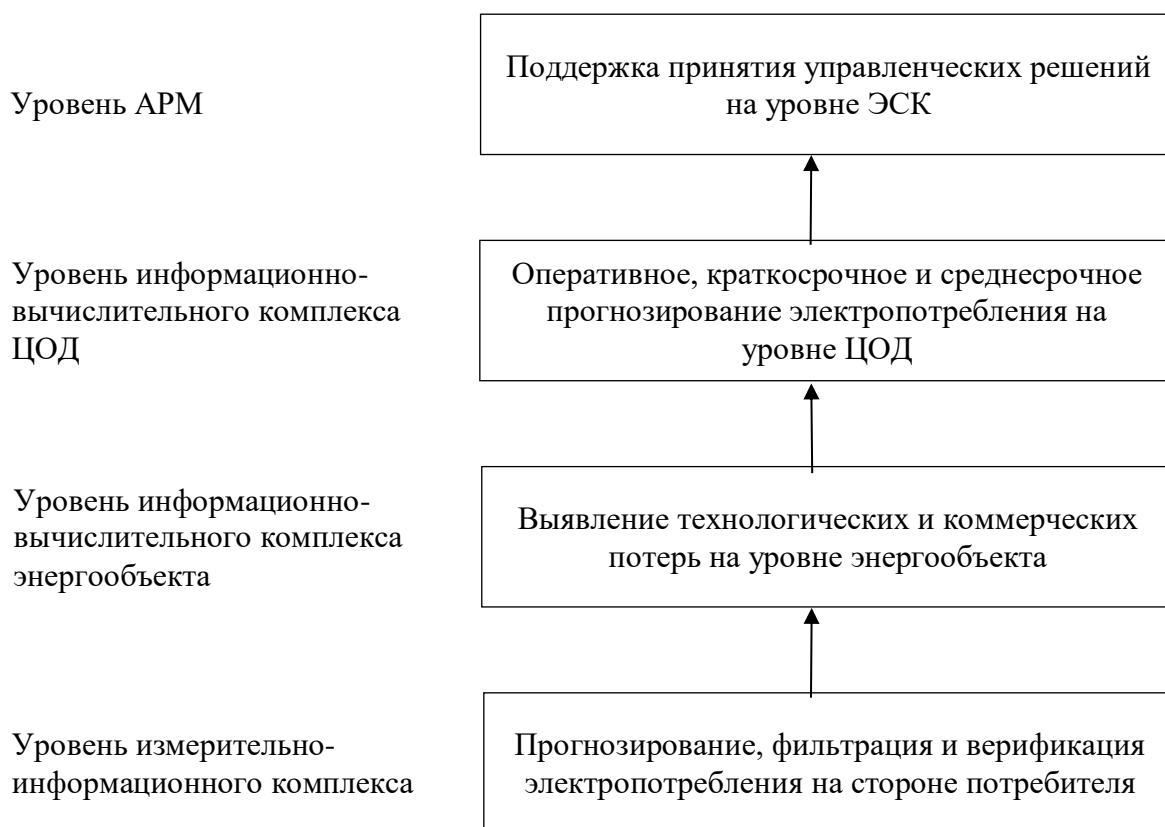


Рис.7 Иерархическая система поддержки принятия управленческих решений на основе подсистем прогнозирования электропотребления

На нижнем уровне первичного измерения электропотребления информационная система обеспечивает «интеллектуальную» фильтрацию и верификацию результатов измерения (заполнение пропущенных измерений, корректировка аномальных данных, получаемых по техническим или субъективным причинам и т.п.).

Данные функции определяются задачами диспетчерского управления: расчет электрических потерь, расчет режимов загрузки сетей, плановые отключения и подключения потребителей, графики ремонтных работ и т.д. Многоуровневая структура позволяет формировать интеллектуальные информационные системы необходимого масштаба и интегрировать их с другими подсистемами АСУ электросетей. Рассмотрены два вида схем организационного построения системы прогнозирования: «система прогнозирования как услуга» и «прогноз как услуга».

Проведен анализ предлагаемых на рынке программных продуктов для прогнозирования электропотребления и установлено, что практически все они являются узкоспециализированными, поэтому необходима разработка программы прогнозирования, функционально ориентированной на решение задач управления в масштабах региональных энергетических компаний.

Разработано программное обеспечение с использованием библиотеки искусственных нейронных сетей Fast Artificial Neural Network (FANN), имеющее необходимый набор нейронных сетей и сервисных функций, которые позволяют осуществлять различные виды прогнозирования электропотребления. Испытания

показали, что данная программа перспективна для применения в электросетевых и сбытовых компаниях.

В приложениях представлено описание работы разработанного программного обеспечения, акты внедрения, а также дипломы, полученные на научно-технических конференциях и удостоверение на рационализаторское предложение.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе изложены научно-технические решения, направленные на совершенствование систем прогнозирования для технико-экономического планирования в масштабе региональной сетевой компании и для диспетчерского управления распределительными электросетями.

1. Предложена структура системы учета электроэнергии, заключающаяся в объединении подсистемы измерения и системы прогнозирования на основе ансамбля нейронных сетей. В результате у информационно-измерительной системы появляется новое свойство – возможность «предсказания» режимов нагрузки электросетей для обеспечения упреждающего управления.

2. Установлено, что наиболее перспективными являются методы прогнозирования электропотребления, основанные на использовании искусственных нейронных сетей, включающие достоинства эмпирических и аналитических методов прогнозирования. Проведенный анализ показал, что одиночные нейронные сети не обладают необходимой универсальностью по отношению к видам прогнозов и особенностям графиков потребления электроэнергии.

3. Обоснована концепция построения систем прогнозирования электропотребления в виде ансамбля. Ансамбль должен иметь иерархическую структуру, формируемую из эффективных нейронных сетей, обученных таким образом, чтобы выходные сигналы нейросетей нижнего уровня (метаданных) имели минимальную корреляцию и обеспечивали максимально возможную взаимную компенсацию погрешности отдельных прогнозов при использовании нейронной сети следующего уровня в качестве мета алгоритма.

4. Изложена методика синтеза системы прогнозирования в виде трех взаимосвязанных задач: определение входных векторов, формирование наиболее эффективных нейронных сетей, обучение нейронных сетей на ретроспективных данных электропотребления. Исходя из принципа максимального подобия, сформированы входные векторы минимальной размерности для различных видов прогнозов.

5. Основываясь на проведенном исследовании аппроксимирующих свойств нейронных сетей и экспериментальных результатах синтезирован набор эффективных нейронных сетей, имеющих погрешность аппроксимации в пределах 1,74 – 2,19%, которые можно применять для самостоятельного использования, а также для формирования ансамблей с целью дальнейшего повышения точности прогнозирования потребления электроэнергии.

6. Разработан метод формирования ансамблей из эффективных нейронных сетей по двум критериям: по минимуму критерия, определяющего корреляции погрешностей прогнозов нейронных сетей одного уровня и по максимуму критерия, определяющего возможность взаимной компенсации этих погрешностей.

7. Установлено, что при различных структурах ансамблей для краткосрочного прогнозирования наибольшая точность достигается при использовании трехуровневого ансамбля, для среднесрочного – двухуровневого ансамбля, для долгосрочного – одиночной нейронной сети. Применение ансамблей приводит к уменьшению погрешностей прогнозирования на 20 - 80 % по сравнению с одиночными нейронными сетями.

8. На основе анализа функционирования оптового рынка электроэнергии и мощности, а также входящих в него субрынков, определена область применения различных видов прогнозов: краткосрочное прогнозирование – для операций по покупке и продаже электроэнергии; среднесрочное прогнозирование – для оптимизации распределения нагрузки между производителями электроэнергии; долгосрочное прогнозирование – для перспективного планирования и управления развитием энергетических компаний и отрасли в целом.

9. Определена структура взаимосвязей между иерархическими уровнями автоматизированной информационно-измерительной системы и подсистем прогнозирования. Многоуровневая структура позволяет формировать системы прогнозирования необходимого масштаба и интегрировать их с другими подсистемами АСУ электросетей для поддержки принятия управленческих решений.

10. Реализована система прогнозирования в виде программы на языке C# с использованием библиотеки искусственных нейронных сетей, имеющая необходимый набор сервисных функций. Испытания показали, что данная программа перспективна для применения в электросетевых и сбытовых компаниях.

Теоретические и практические результаты работы были апробированы в реальных производственных условиях и представлялись на специализированных конференциях и конкурсах, где получили высокие оценки. В результате можно сделать вывод, что поставленные задачи решены.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ СОИСКАТЕЛЯ ПО ТЕМЕ РАБОТЫ

Соискатель Староверов Б.А. переименовал фамилию Гнатюк Борислав Алексеевич и стал Староверовым Бориславом Алексеевичем (Свидетельство о переименовании имени И-ФО № 506174 от 17.09.2017 г.).

Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК РФ

1. Староверов Б.А. Повышение эффективности системы автоматизированного коммерческого учета электроэнергии за счет введения функций прогнозирования / Б.А. Староверов, Б.А. Гнатюк // Вестник ИГЭУ. – 2013. – № 6. – С. 26-29.

2. Староверов Б.А. Определение наиболее перспективных нейронных сетей и способов их обучения для прогнозирования электропотребления / Б.А. Староверов, **Б.А. Гнатюк** // Вестник ИГЭУ. – 2015. – №6. – С. 59-64.
3. Староверов Б.А. Применение подсистемы нейросетевого прогнозирования в техническом и коммерческом учете электроэнергии для реализации упреждающего управления / **Б.А. Староверов**, Р.Н. Хамитов // Известия тульского государственного университета. – 2023. – № 8. – С.426-431.
4. Староверов Б.А. Алгоритм формирования ансамбля нейронных сетей для информационной системы прогнозирования электропотребления / **Б.А. Староверов** // Информационно-экономические аспекты стандартизации и технического регулирования. – 2019. – № 5(51). – С.37-42.
5. Староверов Б.А. Применение нейросетевых информационных систем прогнозирования для принятия решений по оптовой закупке электроэнергии / **Б.А. Староверов** // Информационно-экономические аспекты стандартизации и технического регулирования. – 2021. – № 4(62). – С.65-70.
6. Староверов Б.А. Реализация глубокого обучения для прогнозирования при помощи ансамбля нейронных сетей / **Б.А. Староверов**, Р.Н. Хамитов // Известия тульского государственного университета. – 2023. – № 4. – С.185-189.

Публикации в изданиях, индексируемых SCOPUS

7. Staroverov B.A. Universal energy consumption forecasting system based on neural network ensemble / B.A. Staroverov, **B.A. Gnatyuk** // Optical Memory and Neural Networks – July 2016 – Issue 3 – pp 198-202.

Публикации в других изданиях

8. Староверов Б.А. Универсальная нейросетевая система краткосрочного прогнозирования потребления электроэнергии / Б.А. Староверов, Е.Н. Переверзева, **Б.А. Гнатюк** // Математические методы в технике и технологиях ММТТ-28, том 1, Саратов. – 2015. – С. 49-51.
9. Беглов Р.Р. Проблемы формирования входного вектора для нейросетевых систем прогнозирования электропотребления / Р.Р. Беглов, К.Н. Воронов, **Б.А. Гнатюк** // Научный вестник Костромского государственного технологического университета, № 2. – 2015. – С. 5-8.
10. Староверов Б.А. Формирование ансамбля нейронных сетей как основы инвариантной системы прогнозирования (на примере электропотребления) / Б.А. Староверов, **Б.А. Гнатюк** // XVIII Всероссийская научно-техническая конференция «Нейроинформатика-2016»: сборник научных трудов. Ч.1 М.: НИЯУ МФТИ. – 2016. – С. 193-203.
11. Беглов Р.Р. Нейросетевая система почасового прогнозирования потребления электроэнергии «на сутки вперед», инвариантная к графикам нагрузки / Р.Р. Беглов, К.Н. Воронов, **Б.А. Гнатюк** // Сборник статей Межд. научно-технической конференции «Проблемы автоматизации и управления в технических системах», Пензенский госуниверситет. – 2015. – С. 8-10.

12. Староверов Б.А. Аналитическое обоснование эффективности системы прогнозирования электропотребления на основе ансамбля нейронных сетей / **Б.А. Староверов** // Материалы всероссийской научно-практической конференции с международным участием "Актуальные вопросы энергетики", Омск: Изд-во ОмГТУ, 2023. – С. 176-179.