

Математические, информационные и интеллектуальные технологии в энергетике

УДК 620.9

DOI:10.25729/ESI.2025.39.3.007

Оптимизация тарифной политики в энергетике на основе предиктивного моделирования тепловых нагрузок с использованием нейронных сетей

Зорина Татьяна Геннадьевна¹, Юркевич Ольга Ивановна², Кабанов Павел Алексеевич²

¹Институт энергетики Национальной академии наук Беларуси, Республика Беларусь, Минск, *tanyazorina@tut.by*

²Витебскэнерго, Республика Беларусь, Витебск

Аннотация. В статье представлено комплексное исследование проблемы оптимизации тарифной политики в энергетике Республики Беларусь с предложением внедрения инновационных методов предиктивного моделирования тепловых нагрузок с использованием нейронных сетей. Авторы проводят детальный анализ текущего состояния тарифной политики в Беларуси, выявляя ключевую проблему – высокий уровень перекрестного субсидирования, при котором тарифы на электроэнергию для промышленности значительно превышают тарифы для населения, что существенно влияет на конкурентоспособность предприятий. В статье отмечено, что основную долю перекрестного субсидирования в тарифе на электрическую энергию для юридических лиц составляет недоплата потребителей до уровня обоснованных затрат по тепловой энергии. Исследование раскрывает несовершенство существующих методов прогнозирования тепловых нагрузок, основанных преимущественно на статистических данных и не учитывающих множество динамических факторов. В качестве решения предлагается инновационная технология нейросетевого прогнозирования, использующая гибридную архитектуру глубоких нейронных сетей, сочетающую преимущества рекуррентных нейронных сетей с долгой краткосрочной памятью и сверточных нейронных сетей. Новизна исследования заключается в разработке комплексного подхода к оптимизации тарифной политики через повышение точности прогнозирования тепловых нагрузок, что позволяет оптимизировать режимы работы теплогенерирующего оборудования, минимизировать потери при транспортировке и сократить эксплуатационные расходы. Авторы отмечают, что внедрение предложенной технологии способно снизить удельный расход топлива на 8-12% и сократить эксплуатационные затраты на 15-20%, создавая существенный резерв для снижения тарифов без ущерба для финансовой устойчивости энергетических предприятий. Результаты исследования имеют практическую значимость для реформирования тарифной политики в энергетике стран СНГ и повышения конкурентоспособности национальных экономик.

Ключевые слова: энергетика Беларуси, теплоснабжение, теплоэнергетика, прогнозирование тепловых нагрузок, предиктивное моделирование тепловых нагрузок, нейросетевое прогнозирование тепловых нагрузок, тарифная политика в энергетике, тарифы на энергию

Цитирование: Зорина Т.Г. Оптимизация тарифной политики в энергетике на основе предиктивного моделирования тепловых нагрузок с использованием нейронных сетей / Т.Г. Зорина, О.И. Юркевич, П.А. Кабанов // Информационные и математические технологии в науке и управлении, 2025. – № 3(39). – С. 72-87. – DOI:10.25729/ESI.2025.39.3.007.

Введение. Энергетика является основой для экономического развития, производства и обеспечения жизненно важных потребностей населения. От степени ее развития и состояния топливно-энергетического комплекса напрямую зависит эффективное развитие страны, производственные возможности, перспективы экономики и ее конкурентоспособность, обеспечение надежного функционирования жилищно-коммунального комплекса и комфортных условий для жизни населения. Для обеспечения социально-экономического развития требуется формирование оптимальной тарифной политики на энергоресурсы, обеспечивающей баланс интересов потребителей, энергетических предприятий и государства. Для стран СНГ, и, в частности, для Республики Беларусь, характерен высокий уровень тарифов на энергию, что обуславливает необходимость постоянного поиска механизмов совершенствования тарифной политики и резервов для снижения себестоимости энергии.

1. Анализ текущего состояния тарифной политики в Республике Беларусь. Тарифы на электрическую энергию для промышленных предприятий в Республике Беларусь находятся на уровне значительно выше стран Евразийского союза и Европы, что изначально ставит энергоемкие предприятия республики (нефтехимия, нефтепереработка, металлургия, машиностроение и т.п.) в не конкурентоспособное положение [1]. Тарифы для населения в большинстве стран Европы в 1,5-3 раза выше тарифов для промышленности, в то время как в Республике Беларусь они почти на 40% ниже промышленных тарифов (рис. 1).



Рис. 1. Сравнительный уровень тарифов на электроэнергию для бытовых абонентов и промышленности в странах ЕАЭС, цент. США (по данным [2])

Такой высокий уровень тарифов на электрическую энергию объясняется перекрёстным субсидированием – механизмом формирования тарифов, при котором тарифы на энергию для отдельных групп потребителей установлены на уровне ниже базовых тарифов и компенсируются за счет установления более высокого уровня тарифов на энергию для других групп потребителей. Здесь также важно отметить наличие перекрестного субсидирования и в других странах ЕАЭС. Разница между тарифами для промышленности и населения в некоторых странах очень значительна, однако одним из самых высоких на постсоветском пространстве уровень перекрестного субсидирования остается в Беларуси и Кыргызстане, в России ситуация варьируется по регионам, однако общий объем перекрестного субсидирования также остается значительным.

Мнения экспертов о влиянии перекрестного субсидирования на экономику различно. Некоторые из них (Хуберт Ф. [3]) полагают, что при общем низком уровне тарифов такие меры могут быть оправданы, однако большинство (Н.А. Назарова, Н.Т. Минеханова [4], И.А. Королев и Л.Д.Хабачев [5]; Селляхова О., Фатева Е. [6]; И.Ю. Золотова [7]; Е.Г. Гладких, Е.А. Базанова [8]) сходятся во мнении, что данный механизм ценообразования неэффективен и

оказывает негативное влияние как на экономику страны в целом, так и на развитие энергетической отрасли.

В Республике Беларусь в настоящее время население возмещает 93% затрат на производство электрической энергии и всего 22-23% затрат на производство тепловой энергии (рис. 2) [9].



Рис. 2. Возмещение тарифами для населения затрат на производство электрической и тепловой энергии в Республике Беларусь, %

Если более детально рассматривать уровень покрытия затрат тарифом по электрической энергии, то при себестоимости 1 кВтч 6,7 центов США среднеотпускной тариф для всех категорий потребителей составляет 9,3 цента США, однако по населению среднеотпускной тариф ниже более чем на треть и составляет 6,3 цента США (рис. 3).

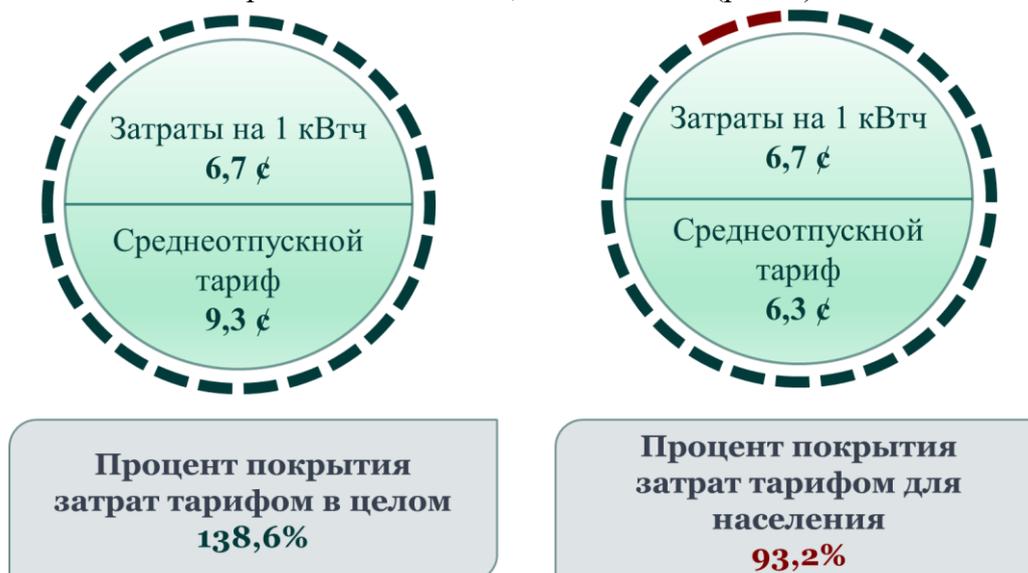


Рис. 3. Уровень покрытия затрат тарифом на электрическую энергию в Республике Беларусь за 2024 год

Если рассмотреть уровень покрытия затрат тарифом по тепловой энергии, то при себестоимости 1 Гкал почти 41,5 долл. США среднеотпускной тариф для всех категорий потребителей составляет всего 22,3 долл. США, а по населению среднеотпускной тариф почти в 2,5 раза ниже и составляет всего 9,3 долл. США (рис. 4).

Из представленных рис. 3, 4 становится понятно, что в Республике Беларусь перекрестное субсидирование имеет свою особенность: тарифом на электрическую энергию для промышленности субсидируется не только недоплата населением до уровня экономически обоснованного тарифа по электрической энергии, но также и недоплата по тепловой энергии. Так, в тарифе на электрическую энергию для промышленных потребителей обоснованные расходы на энергию составляют 74%, чуть менее 1,5% – это недоплата населением по электрической энергии и 24% – недоплата по тепловой энергии.



Рис. 4. Уровень покрытия затрат тарифом на тепловую энергию в Республике Беларусь за 2024 год

Важно отметить, что, несмотря на более дешевые тарифы на оплату энергии в составе ЖКУ, население в конечном итоге всё равно оплачивает полную стоимость энергии через покупку отечественных товаров и услуг, включающих расходы производителей на энергию. Таким образом, установление экономически обоснованных тарифов для категорий потребителей должно производиться с учетом комплексной оценки роста расходов населения на оплату энергии не только по платежам за жилищно-коммунальные услуги, но и в составе отечественных товаров и услуг.

Расчёт средних расходов населения на энергию в составе отечественных товаров, работ, услуг, рассчитанный на основе структуры потребительских расходов населения Республики Беларусь и систем статистических таблиц «Затраты-выпуск», в сравнении с расходами населения на энергию в составе жилищно-коммунальных услуг (далее – ЖКУ), показал, что более 70% от совокупных расходов населения на энергию составляют расходы на энергию в приобретаемых товарах и услугах (рис. 5).

Таким образом, несмотря на более низкие тарифы на энергию в рамках ЖКУ, население всё равно несёт полные расходы на энергию через цены на отечественные товары и услуги. Анализ совокупных расходов населения на энергию подчеркивает важность комплексного подхода к оценке расходов на энергию: установление экономически обоснованных тарифов для потребителей должно учитывать не только прямые платежи за ЖКУ, но и влияние на общие расходы населения, включая затраты на энергию, заложенные в стоимость товаров и

услуг. Ключевым шагом в установлении более прозрачной и справедливой системы ценообразования является сокращение практики перекрестного субсидирования и установление тарифов, отражающих реальные затраты на производство и распределение энергии [10].

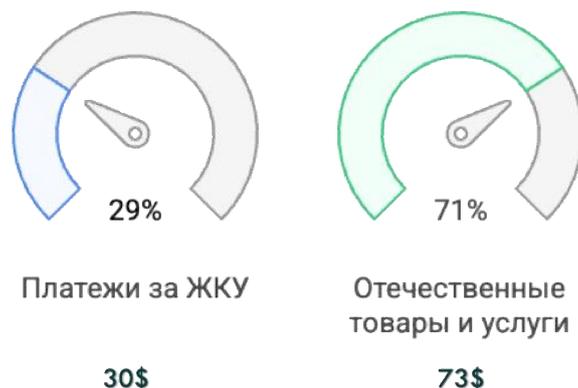


Рис. 5. Совокупные расходы населения на энергию

Комплекс мер по ликвидации перекрестного субсидирования должен включать в себя в обязательном порядке работу по оптимизации затрат энергоснабжающих организаций за счет реализации эксплуатационно-технических мероприятий, мероприятий по энергосбережению, снижению непроизводственных и прочих расходов, включаемых в затраты на производство и реализацию энергии. В условиях необходимости обеспечения эффективного управления энергетическими ресурсами и высокой себестоимости тепловой энергии, характерной для стран СНГ и, в частности, для Республики Беларусь, где централизованные сети обслуживают более 60% потребителей, одним из направлений оптимизации затрат должно стать внедрение более эффективных методов прогнозирования тепловых нагрузок.

2. Существующая система прогнозирования тепловых нагрузок. Современная ситуация в теплофикации Беларуси характеризуется высокой степенью концентрации и серьезным старением основных фондов. Несмотря на планомерную модернизацию тепловых сетей и внедрение современных приборов учета, существующие методы прогнозирования нагрузки основаны в основном на статистических данных и не учитывают множество динамических факторов, влияющих на потребление тепловой энергии.

Фундаментальная проблема заключается в том, что традиционные методы прогнозирования тепловых нагрузок, основанные на статистических данных и детерминированных моделях, не способны адекватно отражать сложную динамику современного энергопотребления. Высокая волатильность тепловых нагрузок, обусловленная климатическими изменениями, трансформацией структуры потребления и модернизацией систем теплоснабжения, создает условия, при которых существующие подходы к планированию демонстрируют критически низкую точность прогнозирования.

Особую остроту проблеме придает недостаточная интеграция различных источников данных в единую информационную систему. Несмотря на внедрение автоматизированных систем коммерческого учета энергии на крупных объектах, на уровне конечных потребителей степень автоматизации существенно различается. Это создает информационные разрывы, препятствующие формированию целостной картины энергопотребления и, как следствие, точности прогнозирования тепловых нагрузок.

Временные задержки в получении и обработке данных усугубляют ситуацию, в связи с чем существующие алгоритмы прогнозирования демонстрируют неспособность адекватно реагировать на нестандартные ситуации, включая резкие изменения погодных условий или аварийные ситуации в системе теплоснабжения.

Качество доступных данных для построения прогнозных моделей характеризуется критической неоднородностью как по временному охвату, так и по детализации измерений. Структура накопленных исторических данных о потреблении тепловой энергии не оптимизирована для применения современных методов анализа, что ограничивает возможности разработки точных прогностических моделей.

Неспособность существующих методов учитывать сложные нелинейные зависимости между множественными факторами, влияющими на формирование тепловых нагрузок, приводит к систематическим ошибкам в планировании объема производства тепловой энергии. Это, в свою очередь, создает условия для неоптимального использования генерирующих мощностей, повышенного расхода топлива и увеличения эксплуатационных затрат, что неизбежно отражается на себестоимости и в последующем на тарифах на энергию.

3. Анализ существующих методов прогнозирования тепловых нагрузок. Современная практика прогнозирования тепловых нагрузок базируется на широком спектре методологических подходов, каждый из которых обладает специфическими характеристиками применимости (табл. 1). Эволюция методов прогнозирования отражает постепенный переход от детерминированных подходов к вероятностным моделям и далее к методам искусственного интеллекта.

Таблица 1. Сравнение методов прогнозирования тепловых нагрузок

| Группа | Метод | Краткое описание | Основные недостатки |
|------------------------------------|--|--|---|
| Традиционные статистические методы | Метод скользящих средних | Сглаживание краткосрочных флуктуаций потребления на основе анализа исторических данных | Ограниченная способность учета сезонных закономерностей и долгосрочных трендов |
| | Экспоненциальное сглаживание (включая Хольта-Винтерса) | Учет трендов и сезонности в временных рядах теплотребления | Принципиальная ограниченность в отношении нелинейных зависимостей |
| | ARIMA-модели | Анализ автокорреляционной структуры данных временных рядов теплотребления | Неспособность адекватно обрабатывать многофакторные зависимости и нелинейные взаимосвязи |
| | Множественная регрессия | Установление количественных зависимостей между потреблением тепловой энергии и влияющими факторами (температура, ветер, характеристики потребителей) | Предположение о линейности связей ограничивает применимость для описания сложной динамики энергетических систем |
| Детерминированные физические | Модели теплового баланса зданий | Физическое моделирование на основе законов термодинамики с учетом теплофизических свойств конструкций и климатических воздействий | Вычислительная сложность для городских систем; чувствительность к точности исходных данных |

| Группа | Метод | Краткое описание | Основные недостатки |
|---|--------------------------------------|--|---|
| | Гидравлические модели тепловых сетей | Учет особенностей транспортировки теплоносителя и потерь тепловой энергии при распределении | Необходимость детального описания всех элементов системы и сложность масштабирования |
| | Интегрированные физические модели | Комплексное моделирование системы теплоснабжения путем интеграции моделей потребителей и тепловых сетей | Сложность учета стохастических факторов, поведенческих аспектов потребителей и климатических аномалий |
| Гибридные статистико-физические подходы | Калиброванные физические модели | Корректировка теоретических расчетов физических моделей, на основе измеренных данных в реальных условиях эксплуатации | Требование значительной экспертной поддержки; сложность автоматизации калибровки |
| | Адаптивные гибридные модели | Использование физических закономерностей, как базовой структуры с последующей статистической корректировкой параметров | Необходимость априорного задания структуры модели; ограниченная доступность данных о физических характеристиках |
| | Рекурсивная идентификация параметров | Автоматическая адаптация моделей к изменяющимся условиям функционирования системы теплоснабжения | Сохранение принципиальных ограничений гибридных методов; сложность реализации |

Составлено авторами на основании [11-16].

Анализ применимости традиционных методов прогнозирования в контексте современных требований к точности и оперативности управления энергетическими системами выявляет ряд принципиальных ограничений: неспособность адекватно учитывать нелинейные взаимосвязи между множественными факторами, особенно в условиях нестандартных режимов работы; отсутствие необходимой адаптивности к изменяющимся условиям функционирования энергетических систем (включая модернизацию оборудования, изменение структуры потребления и климатические изменения); ограниченная способность к обработке больших объемов разнородных данных и интеграции данных различной природы и временного разрешения; высокие требования к экспертной поддержке и ручной настройке параметров моделей; отсутствие механизмов автоматической адаптации к новым условиям функционирования системы и др. Указанные ограничения снижают практическую ценность традиционных методов и создают барьеры для их широкого практического применения, что подчеркивает необходимость разработки более точных и эффективных методов прогнозирования.

4. Технология предиктивного моделирования тепловых нагрузок с использованием нейронных сетей. Для решения задачи повышения точности прогнозирования тепловых нагрузок, позволяющего повысить эффективность управления энергетическими ресурсами и

создать резерв для снижения себестоимости тепловой энергии, предлагается использовать комплексную систему интеллектуального анализа данных, основанную на применении глубоких нейронных сетей. Нейросетевое прогнозирование, в отличие от традиционных методов прогнозирования, обладает рядом преимуществ (рис. 6), при этом архитектура системы интегрирует современные достижения в области машинного обучения со специфическими требованиями энергетической отрасли [17].

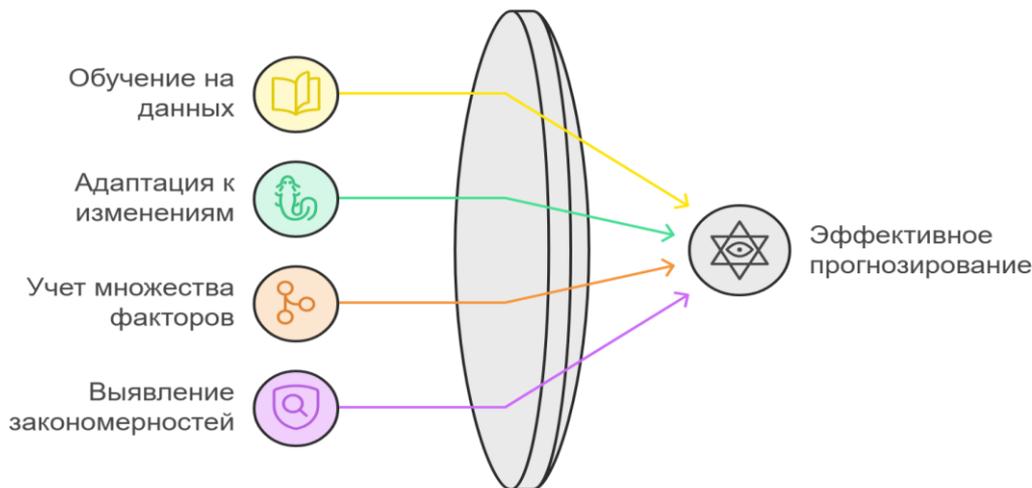


Рис. 6. Преимущество нейросетевого прогнозирования тепловых нагрузок

Архитектура нейронной сети. Основу технологии составляет гибридная архитектура глубокой нейронной сети, сочетающая преимущества рекуррентных нейронных сетей с долгой краткосрочной памятью (LSTM) и сверточных нейронных сетей (CNN) для обработки временных рядов различной природы. Рекуррентные слои LSTM обеспечивают эффективную обработку последовательностей данных о потреблении тепловой энергии, сохраняя информацию о долгосрочных зависимостях и сезонных закономерностях в структуре энергопотребления.

Сверточные слои предназначены для выявления локальных паттернов в многомерных данных, включающих метеорологические параметры, характеристики потребителей и технические параметры системы теплоснабжения. Применение одномерных сверточных операций позволяет эффективно извлекать признаки из временных рядов различной частоты дискретизации, обеспечивая автоматическое выявление скрытых закономерностей в данных.

Механизм внимания (attention mechanism) интегрирован в архитектуру для динамического взвешивания важности различных входных параметров в зависимости от прогнозируемого горизонта и текущих условий функционирования системы. Данный подход обеспечивает адаптивную фокусировку модели на наиболее релевантных факторах для каждого конкретного случая прогнозирования.

Выходной слой сети реализует многозадачное обучение, одновременно прогнозируя точечные значения тепловых нагрузок и доверительные интервалы прогноза. Использование функции потерь, учитывающей как точность прогноза, так и качество оценки неопределенности, обеспечивает получение не только точных прогнозов, но и надежных оценок их достоверности.

Система предобработки данных. Технология включает комплексную систему предобработки и нормализации входных данных, адаптированную к специфике энергетических временных рядов. Модуль обнаружения и коррекции аномалий использует комбинацию статистических методов и автоэнкодеров для выявления и исправления ошибок измерений, технических сбоев и нетипичных режимов потребления.

Алгоритмы заполнения пропущенных значений основываются на методах матричной факторизации и интерполяции с учетом сезонных закономерностей и корреляционных связей между различными параметрами системы. Специализированные процедуры обработки обеспечивают сохранение статистических свойств временных рядов при восстановлении отсутствующих данных.

Система масштабирования данных применяет адаптивную нормализацию, учитывающую нестационарность энергетических временных рядов и различия в масштабах измерения различных параметров. Робастные методы нормализации обеспечивают устойчивость к выбросам и сохранение информативности признаков.

Модуль конструирования признаков автоматически генерирует дополнительные информативные характеристики на основе исходных данных, включая скользящие статистики, лаговые переменные, частотные характеристики и индикаторы сезонности. Применение методов автоматического отбора признаков позволяет оптимизировать размерность входного пространства и повысить обобщающую способность модели.

Алгоритм обучения и оптимизации. Процесс обучения нейронной сети реализован с использованием адаптивных алгоритмов оптимизации, специально настроенных для работы с энергетическими данными. Предполагается применение модифицированного алгоритма Adam с адаптивным изменением скорости обучения, учитывающим специфику сходимости на энергетических временных рядах.

Стратегия регуляризации включает dropout-слои с адаптивными коэффициентами, batch normalization для стабилизации процесса обучения и L2-регуляризацию для предотвращения переобучения. Применение техники early stopping с мониторингом качества прогнозирования на валидационной выборке обеспечивает оптимальную остановку процесса обучения.

Система кросс-валидации адаптирована к временной структуре данных, используя схему временного разбиения для корректной оценки обобщающей способности модели. Применение техники walk-forward validation обеспечивает реалистичную оценку качества прогнозирования в условиях, максимально приближенных к практическому применению.

Гиперпараметры модели оптимизируются с использованием байесовской оптимизации, что позволяет эффективно исследовать пространство параметров и находить оптимальную конфигурацию сети для конкретных характеристик системы теплоснабжения.

Система адаптации и обновления модели. Технология включает механизмы непрерывного обучения, позволяющие модели адаптироваться к изменяющимся условиям функционирования системы теплоснабжения без полного переобучения. Применение техники transfer learning обеспечивает эффективное использование предварительно обученных компонентов модели при адаптации к новым условиям.

Система мониторинга качества прогнозов в реальном времени отслеживает отклонения фактических значений от прогнозируемых и автоматически инициирует процедуры корректировки модели при обнаружении систематических ошибок. Адаптивные алгоритмы позволяют модели самостоятельно настраиваться на изменения в структуре потребления или характеристиках системы теплоснабжения.

Модульная архитектура системы обеспечивает возможность селективного обновления отдельных компонентов модели без нарушения работы всей системы. Применение ансамблевых методов позволяет комбинировать прогнозы нескольких специализированных моделей для повышения общей точности и надежности прогнозирования.

Интеграция с информационными системами. Технология предусматривает глубокую интеграцию с существующими информационными системами предприятий теплоснабжения через стандартизированные API и протоколы обмена данными. Модуль интеграции

обеспечивает автоматическое получение данных из систем SCADA, коммерческого учета энергии и метеорологических служб.

Система управления данными включает специализированное хранилище временных рядов, оптимизированное для быстрого доступа к историческим данным и эффективного хранения больших объемов информации. Применение технологий сжатия данных и индексирования обеспечивает высокую производительность системы при работе с многолетними архивами данных.

Система предполагает наличие модуля визуализации и отчетности с интерактивными дашбордами, позволяющими специалистам энергетических предприятий оперативно анализировать прогнозы и принимать обоснованные решения по управлению системой теплоснабжения.

Обеспечение надежности и безопасности. Архитектура системы включает многоуровневые механизмы обеспечения надежности, включая резервирование критических компонентов и автоматическое переключение на резервные режимы работы при обнаружении сбоев. Система мониторинга состояния непрерывно отслеживает работоспособность всех компонентов и обеспечивает своевременное уведомление о потенциальных проблемах.

Модуль обеспечения информационной безопасности реализует современные стандарты защиты данных, включая шифрование информации, аутентификацию пользователей и контроль доступа к различным функциям системы. Применение технологий блокчейн для обеспечения целостности данных создает дополнительные гарантии достоверности информации, используемой для прогнозирования.

Система аудита ведет детальный журнал всех операций с данными и результатами прогнозирования, что обеспечивает полную прослеживаемость процессов принятия решений и соответствие требованиям регулирующих органов в области энергетики.

Таким образом, предлагаемое решение обеспечит высокую точность прогнозирования тепловых нагрузок при сохранении адаптивности к изменяющимся условиям функционирования системы теплоснабжения.

Для эффективного функционирования системы прогнозирования необходимо обеспечить соответствующую вычислительную инфраструктуру (рис. 6) [18].

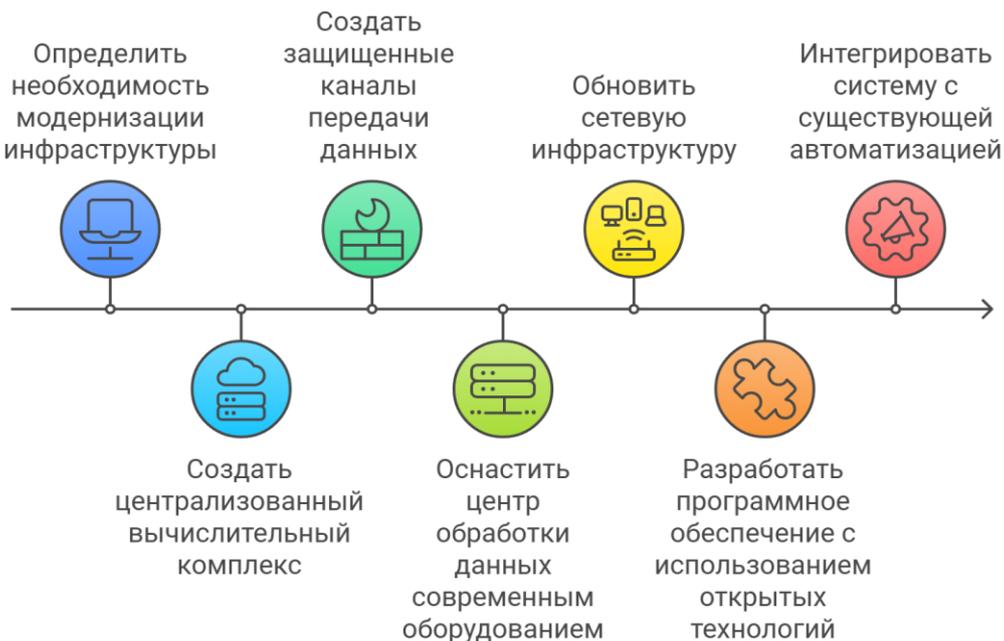


Рис. 6. Этапы модернизации инфраструктуры

Внедрение системы прогнозирования предполагает создание централизованного вычислительного комплекса с распределенной системой сбора данных, который может быть интегрирован с существующими системами диспетчеризации энергосистем стран СНГ.

5. Потенциал оптимизации тарифной политики в энергетике на основе предиктивного моделирования тепловых нагрузок. Внедрение технологий предиктивного моделирования тепловых нагрузок с использованием нейронных сетей создает фундаментальные предпосылки для оптимизации тарифной политики в направлении снижения экономической нагрузки на потребителей при сохранении финансовой устойчивости энергетических предприятий.

Механизм снижения тарифов основывается на снижении себестоимости производства тепловой энергии, достигаемой за счет комплексного повышения эффективности всех звеньев системы теплоснабжения через повышение качества прогнозирования и оптимальное планирование режимов работы.

Снижение удельного расхода топлива достигается путем оптимизации режимов работы теплогенерирующего оборудования: повышение точности прогнозирования тепловых нагрузок обеспечивает возможность оптимального планирования загрузки оборудования с учетом его технических характеристик и экономических показателей [19]. Нейросетевые модели позволяют определить оптимальную последовательность включения и распределения нагрузки между различными источниками тепловой энергии, что позволяет достичь наиболее экономичных режимов работы оборудования. Предиктивное моделирование позволяет минимизировать периоды работы оборудования в неоптимальных режимах, характеризующихся повышенным расходом топлива на единицу произведенной тепловой энергии. Более точное прогнозирование пиковых нагрузок обеспечивает возможность заблаговременной подготовки резервного оборудования, что исключает необходимость экстренного запуска менее эффективных источников тепла. Интеграция прогнозирования с системами автоматического управления позволяет реализовать стратегии упреждающего регулирования, учитывающие инерционность тепловых процессов и характеристики тепловых сетей.

Сокращение эксплуатационных затрат достигается за счет возможности перехода от реактивного к проактивному управлению системой теплоснабжения через предиктивное моделирование. Повышение качества прогнозов тепловых нагрузок позволяет оптимизировать графики технического обслуживания оборудования, планируя профилактические работы в периоды минимального потребления тепловой энергии. Снижение количества внеплановых остановок оборудования и аварийных ситуаций достигается за счет возможности заблаговременного выявления потенциальных проблем через анализ отклонений фактического потребления от прогнозируемых значений. Помимо этого, оптимизация режимов циркуляции теплоносителя в тепловых сетях на основе точных прогнозов потребления позволяет снизить затраты электроэнергии на работу сетевых насосов. Адаптивное управление гидравлическими режимами с учетом прогнозируемого распределения нагрузок по районам города обеспечивает поддержание необходимых параметров теплоносителя при минимальных энергетических затратах на транспортировку.

Сокращение потерь тепловой энергии в сетях достигается через оптимизацию температурных графиков на основе повышения точности прогнозирования потребления [20]. Предиктивные модели позволяют определить минимально необходимые параметры теплоносителя для обеспечения требуемого уровня теплоснабжения, что снижает тепловые потери при транспортировке.

Таким образом, экономический эффект от применения предиктивного моделирования тепловых нагрузок с использованием нейронных сетей достигается за счет оптимизации

режимов работы теплогенерирующего оборудования, минимизации потерь при транспортировке и сокращения эксплуатационных расходов, что особенно актуально для энергосистем стран СНГ с высоким уровнем износа инфраструктуры. Дополнительно важно отметить улучшение качественных показателей теплоснабжения, включая стабильность температурных режимов и сокращение количества аварийных ситуаций. Достижимый за счёт этих факторов эффект создает резерв для снижения тарифов на энергию без ущерба для финансовой устойчивости энергетических предприятий.

Предварительные количественные оценки показывают возможность достижения снижения удельного расхода топлива на 8-12% и сокращения эксплуатационных затрат на 15-20% [21]. Затраты на топливо являются основной статьёй затрат на производство энергии и составляют порядка 53% общих затрат, затраты на эксплуатационно-ремонтное обслуживание – 8,5% от общих затрат, таким образом, применение предиктивного моделирования тепловых нагрузок позволит снизить себестоимость тепловой энергии на 5-8%, или на 2,5-3,5 долл. США.

В свою очередь, снижение себестоимости тепловой энергии позволит на 2,5-3% снизить тарифы на электрическую энергию для промышленных потребителей (рис. 7), которые на сегодняшний день практически на четверть включают в себя недоплату потребителей до уровня затрат на производство тепловой энергии.



Рис. 7. Влияние предиктивного моделирования тепловых нагрузок с использованием нейронных сетей на тарифную политику в энергетике

Таким образом, предиктивное моделирование тепловых нагрузок с использованием нейронных сетей позволит не только повысить качественные характеристики функционирования системы теплоснабжения, но также и оптимизировать тарифную политику в энергетическом секторе, снижая долю перекрестного субсидирования, связанного с недоплатой до себестоимости тепловой энергии.

Заключение. Проведенное исследование демонстрирует, что внедрение технологий предиктивного моделирования тепловых нагрузок с использованием нейронных сетей представляет собой перспективное направление оптимизации тарифной политики в энергетическом секторе Республики Беларусь и других стран СНГ. Комплексный анализ существующей ситуации выявил критические недостатки действующей системы тарифообразования, в частности, высокий уровень перекрестного субсидирования, в том

числе между видами энергии, который негативно влияет на конкурентоспособность промышленных предприятий и экономику в целом.

Предложенная технология нейросетевого моделирования, основанная на гибридной архитектуре глубоких нейронных сетей, позволяет преодолеть ограничения традиционных методов прогнозирования и обеспечить высокую точность прогнозирования тепловых нагрузок с учетом множества динамических факторов. Экономический эффект от внедрения данной технологии достигается за счет оптимизации режимов работы теплогенерирующего оборудования, минимизации потерь при транспортировке и сокращения эксплуатационных расходов, что создает значительный потенциал для снижения себестоимости производства тепловой энергии. Эти резервы позволят сформировать экономическую базу для постепенного снижения тарифов на энергию, что, в свою очередь, будет способствовать уменьшению практики перекрестного субсидирования.

Помимо экономических преимуществ, внедрение предлагаемой технологии обеспечивает повышение надежности теплоснабжения, сокращение количества аварийных ситуаций и улучшение качественных показателей энергоснабжения. В долгосрочной перспективе развитие технологий предиктивного моделирования создает основу для перехода к интеллектуальным энергетическим системам, способным эффективно адаптироваться к изменяющимся условиям функционирования.

Таким образом, оптимизация тарифной политики на основе предиктивного моделирования тепловых нагрузок с использованием нейронных сетей представляет собой комплексное решение, направленное на повышение эффективности энергетического сектора, укрепление конкурентоспособности национальной экономики и обеспечение устойчивого развития энергетических систем стран СНГ в условиях современных технологических и экономических вызовов.

Список источников

1. Зорина Т.Г. Анализ электроемкости ВВП Республики Беларусь при прогнозировании электропотребления / Т.Г. Зорина, О.И. Юркевич // Информационные и математические технологии в науке и управлении, 2023. – №1 (29). – С. 86-98.
2. Рейтинг стран Европы по доступности электроэнергии для населения. URL: <https://riarating.ru>.
3. Хуберт Ф. Перекрестное субсидирование тарифов в электроэнергетической промышленности России не так плохо, как его репутация / Ф. Хуберт // Экономический журнал высшей школы экономики, 2002. – № Т. 6. – № 3. – С. 343-353.
4. Назарова Н.А. Перекрестное субсидирование: за и против / Н.А. Назарова, Н.Т. Минеханова // Энергетика Татарстана, 2009. – №4. – С. 68–74.
5. Королев И.А. О направлениях и принципах ликвидации системы перекрестного субсидирования в электроэнергетике / И.А. Королев, Л.Д. Хабачев // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Экономические науки, 2013. – № 6-1 (185). – С. 54-64.
6. Селляхова О. Перекрестное субсидирование и социальная норма электропотребления // О. Селляхова, Е. Фатеева // Стратегические решения и риск-менеджмент, 2012. – №6 (75). – С. 32-49.
7. Золотова И.В. Перекрестное субсидирование в электроэнергетике: эмпирический анализ, оценка эффективности собственной генерации / И.В. Золотова // Стратегические решения и риск-менеджмент, 2017. – №3. – С. 70-77.
8. Гладких Е.Г. Перекрестное субсидирование в электроэнергетике Российской Федерации как неэффективный институт / Е.Г. Гладких, Е.А. Базанова // Экономика и предпринимательство, 2016. – №11-1 (76-1). – С. 572-577.
9. Зорина Т.Г. Тарифная политика в электроэнергетике республики Беларусь: состояние, направления совершенствования, социальные и экономические аспекты реализации / Т.Г. Зорина, О.И. Юркевич // Белорусский экономический журнал, 2024. – №4. – С. 56-72.
10. Yurkevich O. Socio-economic consequences of changes in the tariff policy of the electric power industry. E3S Web of Conferences. IVth International Conference “Energy systems research” (ESR-2023), Irkutsk, Russia, vol. 470, DOI:10.1051/e3sconf/202347001042

11. Ковалев Д.В. Методы прогнозирования потребления тепловой энергии / Д.В. Ковалев, А.С. Алексеев // Энергосбережение и водоподготовка, 2020. – № 4 (126). – С. 15-20.
12. Затонский А.В. Выбор модели прогнозирования отпуска тепловой энергии / А.В. Затонский, Л.Г. Тугашова // Теплоэнергетика, 2021. – № 3. – С. 89-98.
13. Кузнецов Г.В. Численное моделирование процессов теплопереноса в системах теплоснабжения / Г.В. Кузнецов, В.Ю. Половников // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов, 2018. – Т. 329. – № 8. – С. 95-105.
14. Затонский А.В. Выбор модели прогнозирования отпуска тепловой энергии / А.В. Затонский, Л.Г. Тугашова // Теплоэнергетика, 2021. – № 3. – С. 89-98.
15. Манусов В.З. Методы прогнозирования электрической нагрузки в распределительных сетях / В.З. Манусов, Д.А. Павлюченко // Электро. Электротехника, электроэнергетика, электротехническая промышленность, 2019. – № 1. – С. 25-29.
16. Петров В.В. Прогнозирование электрической нагрузки энергосистемы на следующие сутки с использованием метода искусственных нейронных сетей / В.В. Петров // Энергетика и автоматика, 2021. – №2. – С. 45-52.
17. Zoryna T., Yurkevich O., Kabanov P. Key drivers and barriers to digital transformation of the electric power industry in cis countries. In: Taratukhin, V., Levchenko, A., Kim, S. (eds) Cultural perspectives of human-centered and technological innovations. СРНСАТИ 2024. Communications in computer and information science, 2025, vol 2233, DOI:10.1007/978-3-031-77012-8_16
18. Кабанов П.А. Технология прогнозирования тепловых нагрузок на основе нейронных сетей: перспективы и опыт внедрения в Беларуси / П.А. Кабанов // Энергетическая стратегия, 2025. – №1 (103). – С. 32-37.
19. Зорина Т.Г. Развитие методов прогнозирования оптимальной структуры энергопроизводства Республики Беларусь с использованием методов нечеткого математического программирования / Т.Г. Зорина, И.В. Кашникова, И.Т. Богдан // Информационные и математические технологии в науке и управлении, 2019. – №3 (15). – С. 111-120. – DOI:10.25729/2413-0133-2019-3-102.
20. Соколов Е.Я. Теплофикация и тепловые сети: учебник для вузов / Е.Я. Соколов. – Москва: Издательство МЭИ, 2019. – 472 с.
21. Mokhov V.G., Demyanenko T.S., Ostanin I.P. Modeling of energy consumption using direct propagation neural networks on the example of the Unified Energy System of Russia. Journal of computational and engineering mathematics, 2016, vol. 3, no. 4, pp. 73-78.

Зорина Татьяна Геннадьевна. Доктор экономических наук, профессор. Заведующая лабораторией "Устойчивое энергетическое развитие" Института энергетики Национальной академии наук Беларуси. AuthorID:84240, SPIN:1455-9834, ORCID:0000-0001-9665-2756, tanyazorina@tut.by.

Юркевич Ольга Ивановна. Начальник сектора бизнес-планирования деятельности предприятия планово-экономического управления РУП «Витебскэнерго». AuthorID:1305673, SPIN:3990-8608, ORCID:0009-0005-8987-4533. oi.yurkevich@yandex.by.

Кабанов Павел Алексеевич. Аспирант Белорусского национального технического университета Директор филиала «Учебный центр» РУП «Витебскэнерго». ORCID:0009-0005-5803-7695, pkanov@gmail.com.

UDC 620.9

DOI:10.25729/ESI.2025.39.3.007

Optimization of tariff policy in the energy sector based on predictive modeling of heat loads using neural networks

Tatsiana G. Zoryna¹, Olga I. Yurkevich², Pavel A. Kabanov²

¹Institute of power engineering of NAS of Belarus, Belarus, Minsk, tanyazorina@tut.by

²Vitebskenergo RUE, Republic of Belarus, Vitebsk

Abstract. The paper presents a comprehensive study of the problem of tariff policy optimization in the energy sector of the Republic of Belarus with a proposal to introduce innovative methods of predictive modeling of heat

loads using neural networks. The authors conduct a detailed analysis of the current state of tariff policy in Belarus, identifying the key problem – a high level of cross-subsidization, with electricity tariffs for industry significantly exceeding those for households, which significantly affects the competitiveness of enterprises. The article notes that the main share of cross-subsidization in electricity tariffs for legal entities is the underpayment of consumers to the level of reasonable costs for heat energy. The study reveals the imperfection of the existing methods of heat load forecasting, which are based mainly on statistical data and do not take into account many dynamic factors. As a solution, we propose an innovative neural network forecasting technology that uses a hybrid architecture of deep neural networks combining the advantages of recurrent neural networks with long short-term memory and convolutional neural networks. The novelty of the study lies in the development of a comprehensive approach to the optimization of tariff policy through improving the accuracy of heat load forecasting, which allows to optimize the operation modes of heat generating equipment, minimize transportation losses and reduce operating costs. The authors note that the introduction of the proposed technology can reduce specific fuel consumption by 8-12% and reduce operating costs by 15-20%, creating a significant reserve for reducing tariffs without affecting the financial stability of energy companies. The results of the study have practical significance for reforming the tariff policy in the energy sector of the CIS countries and improving the competitiveness of national economies.

Keywords: energy sector of Belarus, heat supply, heat power engineering, heat load forecasting, predictive modeling of heat loads, neural network forecasting of heat loads, tariff policy in the energy sector, energy tariffs

References

1. Zorina T.G., Yurkevich O.I. Analiz elektroyemkosti VVP Respubliki Belarus' pri prognozirovanii elektropotrebleniya [Analysis of GDP electricity intensity of the Republic of Belarus when forecasting electricity consumption]. *Informatsionnyye i matematicheskiye tekhnologii v nauke i upravlenii* [Information and mathematical technologies in science and management], 2023, no. 1 (29), pp. 86-98.
2. Reyting stran Yevropy po dostupnosti elektroenergii dlya naseleniya [Rating of European countries by electricity affordability for the population]. Available at: <https://riarating.ru>.
3. Hubert F. Perekrestnoye subsidirovaniye tarifov v elektroenergeticheskoy promyshlennosti Rossii ne tak plokhoye, kak yego reputatsiya [Cross-subsidization of tariffs in the Russian electric power industry is not as bad as its reputation]. *Ekonomicheskyy zhurnal vysshey shkoly ekonomiki* [Economic journal of the higher school of economics], 2002, vol. 6, no. 3, pp. 343-353.
4. Nazarova N.A., Minekhanova N.T. Perekrestnoye subsidirovaniye: za i protiv [Cross-subsidization: pros and cons]. *Energetika Tatarstana* [Energy sector of Tatarstan], 2009, no. 4, pp. 68-74.
5. Korolev I.A., Khabachev L.D. O napravleniyakh i printsipakh likvidatsii sistemy perekrestnogo subsidirovaniya v elektroenergetike [On the directions and principles of eliminating the cross-subsidization system in the electric power industry]. *Nauchno-tekhnicheskiye vedomosti SPbGPU. Ekonomicheskkiye nauki* [St. Petersburg State Polytechnical university journal. Economics], 2013, no. 6-1 (185), pp. 54-64.
6. Sellyakhova O., Fateyeva E. Perekrestnoye subsidirovaniye i sotsial'naya norma elektropotrebleniya [Cross-subsidization and the social norm of electricity consumption]. *Strategicheskkiye resheniya i risk-menedzhment* [Strategic decisions and risk management], 2012, no. 6 (75), pp. 32-49.
7. Zolotova I.V. Perekrestnoye subsidirovaniye v elektroenergetike: empiricheskyy analiz, otsenka effektivnosti sobstvennoy generatsii [Cross-subsidization in the electric power industry: empirical analysis, assessment of self-generation efficiency]. *Strategicheskkiye resheniya i risk-menedzhment* [Strategic decisions and risk management], 2017, no. 3, pp. 70-77.
8. Gladkikh E.G., Bazarova E.A. Perekrestnoye subsidirovaniye v elektroenergetike Rossiyskoy Federatsii kak neeffektivnyy institut [Cross-subsidization in the electric power industry of the Russian Federation as an ineffective institution]. *Ekonomika i predprinimatel'stvo* [Economics and entrepreneurship], 2016, no. 11-1 (76-1), pp. 572-577.
9. Zorina T.G., Yurkevich O.I. Tarifnaya politika v elektroenergetike respubliki Belarus': sostoyaniye, napravleniya sovershenstvovaniya, sotsial'nyye i ekonomicheskkiye aspekty realizatsii [Tariff policy in the electric power industry of the Republic of Belarus: state, improvement directions, social and economic aspects of implementation]. *Belorusskiy ekonomicheskyy zhurnal* [Belarusian economic journal], 2024, no. 4, pp. 56-72.
10. Yurkevich O. Socio-economic consequences of changes in the tariff policy of the electric power industry. *E3S Web of Conferences. IVth International Conference "Energy systems research" (ESR-2023), Irkutsk, Russia*, vol. 470. DOI:10.1051/e3sconf/202347001042.
11. Kovalev D.V., Alekseev A.S. Metody prognozirovaniya potrebleniya teplovoy energii [Methods for forecasting heat energy consumption]. *Energoberezhniye i vodopodgotovka* [Energy saving and water treatment], 2020, no. 4 (126), pp. 15-20.

12. Zatonkiy A.V., Tugashova L.G. Vybor modeli prognozirovaniya otpuska teplovoy energii [Choosing a model for forecasting heat energy supply]. *Teploenergetika* [Thermal engineering], 2021, no. 3, pp. 89-98.
13. Kuznetsov G.V., Polovnikov V.Yu. Chislennoye modelirovaniye protsessov teploperenosa v sistemakh teplosnabzheniya [Numerical modeling of heat transfer processes in district heating systems]. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesursov* [Bulletin of the Tomsk polytechnic university. Geo assets engineering], 2018, vol. 329, no. 8, pp. 95-105.
14. Zatonkiy A.V., Tugashova L.G. Vybor modeli prognozirovaniya otpuska teplovoy energii [Choosing a model for forecasting heat energy supply]. *Teploenergetika* [Thermal engineering], 2021, no. 3, pp. 89-98.
15. Manusov V.Z., Pavlyuchenko D.A. Metody prognozirovaniya elektricheskoy nagruzki v raspredelitel'nykh setyakh [Methods for forecasting electrical load in distribution networks]. *Elektro. Elektrotehnika, elektroenergetika, elektrotekhnicheskaya promyshlennost'* [Electro. Electrical engineering, electric power industry, electrical engineering industry], 2019, no. 1, pp. 25-29.
16. Petrov V.V. Prognozirovaniye elektricheskoy nagruzki energosistemy na sleduyushchiye sutki s ispol'zovaniyem metoda iskusstvennykh neironnykh setey [Forecasting the power system load for the next day using the artificial neural networks method]. *Energetika i avtomatika* [Energy and automation], 2021, no. 2, pp. 45-52.
17. Zoryna T., Yurkevich O., Kabanov P. Key drivers and barriers to digital transformation of the electric power industry in cis countries. In: Taratukhin, V., Levchenko, A., Kim, S. (eds) *Cultural perspectives of human-centered and technological innovations. СPHCATI 2024. Communications in computer and information science*, 2025, vol 2233, DOI: 10.1007/978-3-031-77012-8_16
18. Kabanov P.A. Tekhnologiya prognozirovaniya teplovykh nagruzok na osnove neironnykh setey: perspektivy i opyt vnedreniya v Belarusi [Neural network-based heat load forecasting technology: prospects and implementation experience in Belarus]. *Energeticheskaya strategiya* [Energy strategy], 2025, no. 1 (103), pp. 32-37.
19. Zorina T.G., Kashnikova I.V., Bogdan I.T. Razvitiye metodov prognozirovaniya optimal'noy struktury energoproizvodstva Respubliki Belarus' s ispol'zovaniyem metodov nechetkogo matematicheskogo programmirovaniya [Development of methods for forecasting the optimal structure of energy production in the Republic of Belarus using fuzzy mathematical programming methods]. *Informatsionnyye i matematicheskiye tekhnologii v nauke i upravlenii* [Information and mathematical technologies in science and management], 2019, no. 3 (15), pp. 111-120, DOI:10.25729/2413-0133-2019-3-102.
20. Sokolov E.Ya. Teplofikatsiya i teplovyye seti: uchebnik dlya vuzov [District heating and heat networks: a textbook for universities]. Moscow: Izdatel'stvo MEI [Moscow power engineering institute publishing house], 2019, 472 p.
21. Mokhov V.G., Demyanenko T.S., Ostanin I.P. Modeling of energy consumption using direct propagation neural networks on the example of the Unified Energy System of Russia. *Journal of computational and engineering mathematics*, 2016, vol. 3, no. 4, pp. 73-78.

Zoryna Tatsiana Gennadyevna. Doctor of Economics, Professor. Head of the Laboratory "Sustainable Energy Development" of the Institute of Energy of the National Academy of Sciences of Belarus. AuthorID: 84240, SPIN: 1455-9834, ORCID: 0000-0001-9665-2756, tanyazorina@tut.by.

Yurkevich Olga Ivanovna. Head of the Business Planning Sector for the Enterprise Activities of the Planning and Economic Management of RUE "Vitebskenergo". AuthorID:1305673, SPIN:3990-8608, ORCID:0009-0005-8987-4533, oi.yurkevich@yandex.by.

Kabanov Pavel Alekseevich. Postgraduate student of the Belarusian National Technical University Director of the branch "Training Center" of RUE "Vitebskenergo". ORCID:0009-0005-5803-7695. pkabanov@gmail.com.

Статья поступила в редакцию 11.06.2025; одобрена после рецензирования 18.06.2025; принята к публикации 25.06.2025.

The article was submitted 06/11/2025; approved after reviewing 06/18/2025; accepted for publication 06/25/2025.