

Краткосрочное прогнозирование объемов электропотребления для энергосбытовых компаний на основе интеграции технологий аналитических, имитационных и экспертных систем

А.К. Мектепкалиева¹, А.А. Ханова¹ ✉, Л.Б. Аминул¹

¹ Астраханский государственный технический университет
ул. Татищева, д. 16, г. Астрахань 414056, Российская Федерация

✉ e-mail: akhanova@mail.ru

Резюме

Цель исследования. Совершенствование программной поддержки и выявление закономерностей процессов краткосрочного прогнозирования объемов электропотребления энергосбытовых компаний на основе взаимодополняющей интеграции моделей интеллектуального анализа данных, системной динамики и экспертных систем.

Методы. Приведены принципы построения прогностических моделей электропотребления. Проведен системный анализ и построена онтологическая модель предметной области с учетом технологической и рыночной среды. Рассмотрена классификация методов прогнозирования. Описаны особенности информационной базы для проведения краткосрочного прогнозирования, включающей данные о фактическом электропотреблении и метеоданные. Сформулированы требования к программному обеспечению для выполнения прогнозов. Построена структурная схема системы прогнозирования электропотребления рынка на сутки вперед на основе взаимодополняющей интеграции программного обеспечения анализа данных и моделирования.

Результаты. Разработаны сценарии обработки данных в Loginot с использованием обработчиков Arimax и Нейросеть (Регрессия) для построения прогнозов на основе фактического потребления электроэнергии и с учетом метеофакторов. В Anylogic разработана имитационная модель системной динамики, позволяющая исследовать влияние метеофакторов (температура, давление, осадки) на объем электропотребления. С помощью миварного конструктора экспертных систем Wi!Mi проведена параметризация задачи, заданы показатели, отношения, правила, получен логический вывод решения.

Заключение. Построена структурная схема системы прогнозирования электропотребления рынка на сутки вперед, основанная на анализе ретроспективной информации о фактическом электропотреблении и метеофакторах с использованием методов интеллектуального анализа данных, системной динамики и экспертных систем и российских программных средств Loginot, Anylogic и Wi!Mi.

Ключевые слова: методы прогнозирования; интеллектуальный анализ данных; системная динамика; экспертная модель; оптовый рынок энергии и мощности; рынок на сутки вперед; онтология.

Конфликт интересов: Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

Для цитирования: Мектепкалиева А.К., Ханова А.А., Аминул Л.Б. Краткосрочное прогнозирование объемов электропотребления для энергосбытовых компаний на основе интеграции технологий аналитических, имитационных и экспертных систем // Известия Юго-Западного государственного университета. 2022; 26(2): 53-71. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2022-26-2-53-71>.

Поступила в редакцию 18.05.2022

Подписана в печать 02.06.2022

Опубликована 29.07.2022

Short-Term Forecasting of Power Consumption of Power Supply Companies Based on the Integration of Technologies of Analytical, Simulation and Expert Systems

Amina K Mektepkaliyeva ¹, Anna A. Khanova ¹ ✉, Lyubov B. Aminul ¹

¹ Astrakhan State Technical University
16, Tatishcheva str., Astrakhan 414056, Russian Federation

✉ e-mail: akhanova@mail.ru

Резюме

Purpose of research is to improve software support and identify regularities in the processes of short-term forecasting of power consumption of power supply companies based on complementary integration of data mining models, system dynamics and expert systems.

Methods. The principles of constructing predictive models of power consumption are given. A system analysis has been carried out and an ontological model of the subject area has been built, taking into account the technological and market environment. The classification of forecasting methods has been considered. The features of the information base for short-term forecasting, including data on actual power consumption and weather data, have been described. The requirements for software for making forecasts have been formulated. A block diagram of the system for forecasting power consumption of the market for the day ahead is built based on the complementary integration of data analysis and modeling software.

Results. Scenarios for data processing in Loginom have been developed using the Arimax and Neural Network (Regression) processors to build forecasts based on actual power consumption and taking into account meteorological factors. A system dynamics simulation model that allows exploring the influence of meteorological factors (temperature, pressure, precipitation) on power consumption has been developed in Anylogic. Using Wi!Mi mivar constructor of expert systems, the task has been parametrized; indicators, relationships, rules have been set; a logical conclusion of the solution has been obtained.

Conclusion. A block diagram of a system for forecasting the market's power consumption for the day ahead has been built. It is based on the analysis of retrospective information on actual power consumption and meteorological factors using data mining methods, system dynamics and expert systems applying Russian Loginom, Anylogic and Wi!Mi software tools.

Keywords: forecasting methods; data mining; system dynamics; expert model; wholesale energy and capacity market; day-ahead market; ontology.

Conflict of interest. The authors declare the absence of obvious and potential conflicts of interest related to the publication of this article.

For citation: Mektepkaliyeva A. K., Khanova A. A., Aminul L. B. Short-Term Forecasting of Power Consumption of Power Supply Companies Based on the Integration of Technologies of Analytical, Simulation and Expert Systems. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*. 2022; 26(2): 53-71 (In Russ.). [https://doi.org/ 10.21869/2223-1560-2022-26-2-53-71](https://doi.org/10.21869/2223-1560-2022-26-2-53-71).

Received 18.05.2022

Accepted 02.06.2022

Published 29.07.2022

Введение

Оптовый рынок электрической энергии и мощности (ОРЭМ) функционирует в рамках Единой энергетической системы (ЕЭС) России. На ОРЭМ осуществляется обращение особых товаров - электрической энергии (э/э) и мощности. В 2020 году оборот ОРЭМ составил 3,6 трлн. руб и включал 377 участников [1]. Через ОРЭМ осуществляется взаимодействие генераторов э/э (ГЭС, ТЭЦ, ГРЭС, АЭС) с покупателями (потребителями) э/э в лице гарантирующих по-

ставщиков, энергосбытовых компаний, крупных промышленных потребителей [2]. Физические лица оплачивают расходы за электроэнергию по региональным тарифам, которые устанавливаются государством ежегодно и в течение года не меняются. Часть юридических лиц покупают ее по нерегулируемым ценам на ОРЭМ, которые могут меняться фактически ежедневно. ОРЭМ осуществляет свою деятельность во влияющих на него средах: технологической и рыночной (рис. 1) [2, 3].

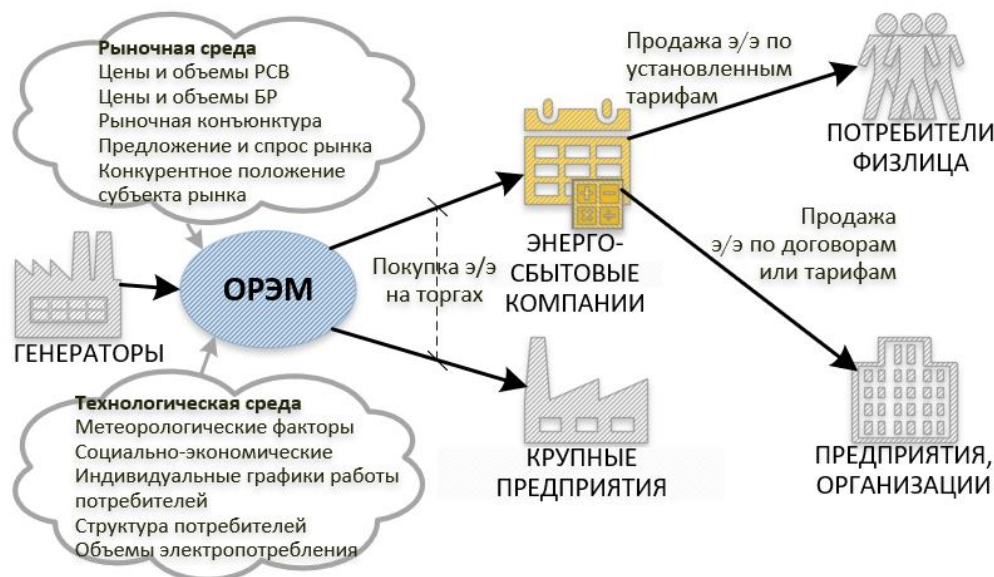


Рис. 1. Структура оптового рынка электрической энергии и мощности

Fig. 1. Structure of the wholesale electricity and capacity market

ОРЭМ состоит из трех секторов торговли электроэнергией: рынка двусторонних договоров, рынка на сутки вперед (РСВ) и балансирующего рынка

(БР) [4]. Наиболее весомым сегментом рынка ОРЭМ является РСВ. К настоящему времени доля продаж на РСВ достигла 73.2 % в I ценовой зоне и 63 %

во II ценовой зоне России, включая 1.2 млн ценовых заявок [1].

В связи с географическими особенностями, определяющими структуру электросети, потерями при транспортировке, полноценную конкуренцию на ОРЭМ в России создать не удалось [4]. Для организаций, регулирующих энергосистему, энергосбытовых компаний, а также крупных предприятий затраты на оплату счетов за электрическую энергию составляют значительную статью бюджета. Мониторинг и анализ факторов, влияющих на цены на электроэнергию, их количественная оценка и прогнозирование являются необходимой и достаточно рутинной задачей, обеспечивающей при этом существенную экономию для организаций [5].

Большое количество научных работ задачи по краткосрочному прогнозированию объемов электропотребления на основе искусственных нейронных сетей [6-7], методов анализа временных рядов, статистических моделей [8-9] и комбинированных методов [10] на предприятиях различных отраслей. Однако предложенные методы по отдельности не смогут обеспечить всесторонний анализ и прогнозирование объемов электропотребления на энергосбытовом предприятии, в связи с некоторыми ограничениями, к которым относятся: невозможность использования большого числа факторов, использование субъективных оценок, необходимость использования статистических выборок за большой период времени, требования

ми к техническим и программным инструментам. Анализ публикаций показал, что вопросы исследования алгоритмов и программной реализации процессов прогнозирования потребления электроэнергии, представляющие собой сложный многоэтапный и многоуровневый процесс, актуальны, но представлены фрагментарно и требует дальнейшей проработки. Цель работы – совершенствование программной поддержки и выявление закономерностей на основе взаимодополняющей интеграции моделей прогнозирования объемов энергопотребления для энергосбытовых компаний.

Материалы и методы

В основе создания системы прогнозирования параметров электропотребления лежат следующие принципы: 1) наличие информационной базы показателей технологической и рыночной сред; 2) сочетание классических и современных математических и экспертных методов; 3) применение для одного и того же объекта ансамбля прогнозных моделей; 4) использование соответствующего программного обеспечения.

По горизонту прогнозирования нагрузки на ОРЭМ в целом можно разделить следующие виды: оперативное, краткосрочное, среднесрочное и долгосрочное (рис. 2, а). Прогнозирование осуществляется на основе анализа фактической информации о динамике электропотребления за прошедшие периоды и действующих на него факторов.

К факторам рыночной среды можно отнести цены РСВ и БР, рыночные объемы спроса и предложения, рыночную конъюнктура и пр. (рис. 1) [3]. Социально-экономические факторы отражают зависимость динамики электропотребления от типов дней (рабочие, выходные и праздничные), продолжительности рабочих смен, производственных программ предприятий, особенностей графиков электропотребления отдельных объектов, экономической активности хозяйствующих субъектов (рис. 1) [3]. Ситуация на ОРЭМ в долгосрочной перспективе в значительной степени определяется социально-экономическими и рыночными факторами.

Влияние технологической среды определяется социально-экономическими и метеорологическими факторами. В среднесрочной перспективе зависит не только от социально-экономических и рыночных факторов, но и от производственных факторов, а также метеорологических условий. Метеофакторы отражают зависимость динамики электропотребления от погодных явлений, связанных с изменением долготы светового дня, временем захода и восхода солнца, температуры воздуха, а также возникновения атмосферных явлений и осадков [3]. При этом метеорологические факторы оказывают решающее влияние на краткосрочное (РСВ) и оперативное прогнозирование объемов электропотребления [11]. Онтология влияния внешних факторов на построение прогнозов на ОРЭМ представлена на рис. 2, б, в.

В настоящее время существует множество методов прогнозирования объемов электропотребления (рис. 3) [12, 13]. Соответствующий метод выбирается на основе характера имеющихся данных и желаемого характера и уровня детализации прогнозов.

Если недостаточно ретроспективных данных необходимо применять методы экспертной оценки. Если ретроспективной информации достаточно и не требуется высокая точность прогнозной модели, то для построения быстрых прогнозов, не требующих дополнительной предобработки данных, можно применять простые в реализации и не требовательные к машинному времени статистические методы прогнозирования. Методы машинного обучения отличаются высокой точностью, специальными требованиями к качеству входных данных и более сложной реализацией [14]. Зачастую предобработка данных, построение обучающей выборки требуют больше внимания по сравнению с непосредственной реализацией модели машинного обучения. Комбинированные методы включают методы с информационной базой разного типа, в которой наряду с качественной и количественной информацией используются экспертные оценки. Комбинация таких методов обеспечивает самую высокую точность прогноза. В задачах построения моделей по краткосрочному прогнозированию объемов электропотребления возможно использование методов всех представленных групп [12].

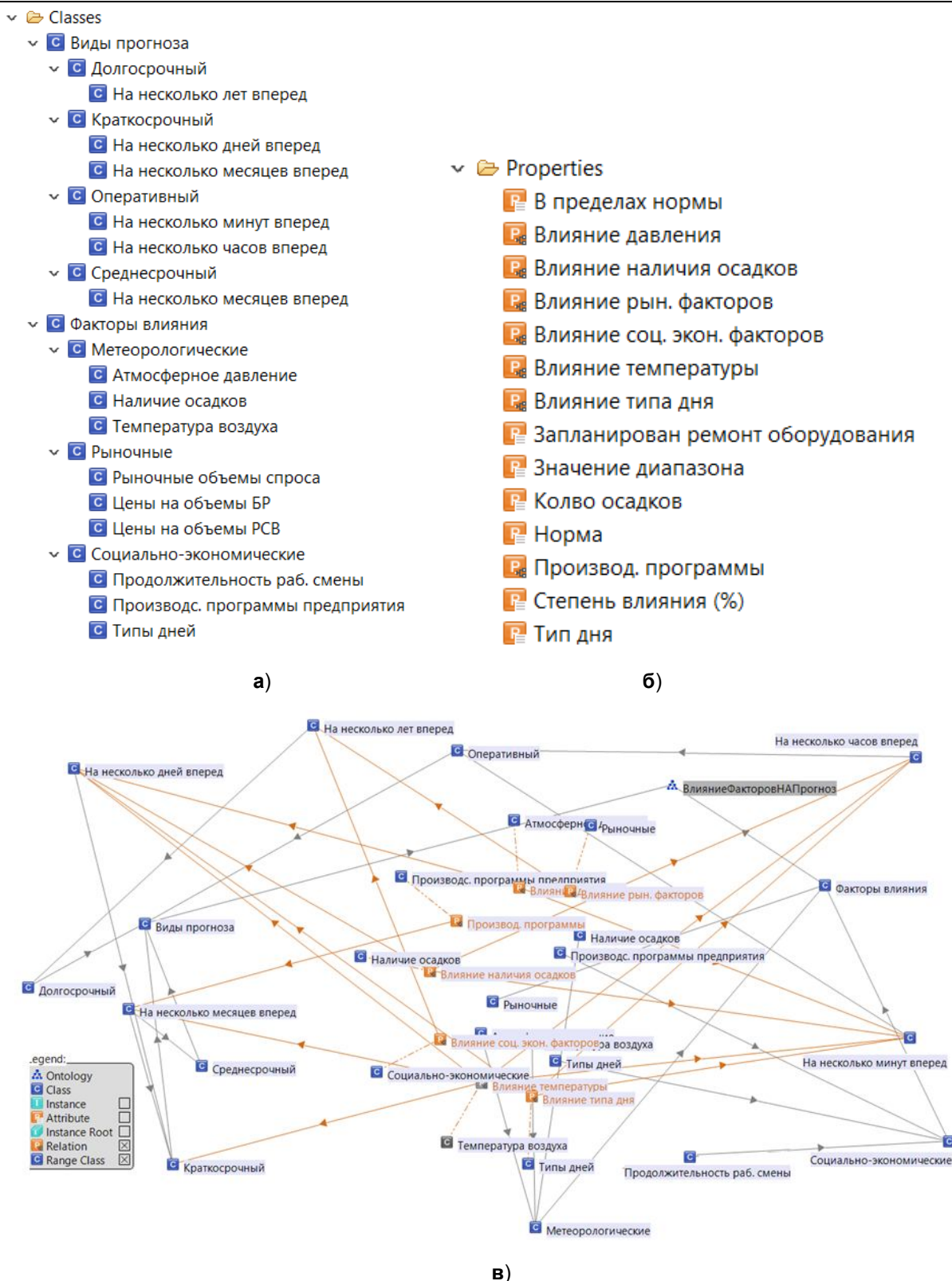


Рис. 2. Онтология факторов влияния и видов прогнозирования электропотребления: **а** – дерево классов онтологии; **б** – пример отображения сущности; **в** – визуализация онтологии

Fig. 2. Ontology of influence factors and types of power consumption forecasting: **a** – ontology classes tree; **b** - an example of displaying an entity; **v** – ontology visualization



Рис. 3. Классификация методов прогнозирования электропотребления

Fig. 3. Classification of methods for power consumption forecasting

Для построения прогноза РСВ необходимо иметь данные из различных источников. Информационной базой для анализа могут быть данные Метеоцентра (по температуре, наличию осадков, атмосферному давлению), а также ретроспективные данные фактических объемов электропотребления за предыдущие периоды, хранящиеся в базе данных корпоративной системы энергосбытовой компании. Энергосбытовые компании используют различные корпоративные решения для организации работы с ОРЭМ, хранения ретроспективных фактических объемов потребления [15]. Например, энергосбытовые компании, работающие в системе 1С, хранят информацию о фактическом потреблении в документах с заголовочной частью, включающей информацию о группе точек поставки, периодах и табличной, хранящей информацию о часах потребления, объеме. На основе рассмотренных принципов построения прогно-

зов электропотребления разработана структурная схема системы прогнозирования электропотребления на сутки вперед, включающая модели интеллектуального, системной динамики и экспертные (рис. 4).

В литературе описано использование различных программных сред для поддержки процесса прогнозирования электропотребления, включая такие настольные системы, как Excel и Matlab [16]. Однако математические пакеты не обладают полным набором средств для реализации комбинированных моделей, механизмами для консолидации данных, а также присутствуют ограничения на размер обрабатываемых массивов информации. Современные языки программирования, например Python, достаточно просты, но требуют кодирования, знания библиотек и фреймворков, что может быть более актуально для решения более уникальных задач.

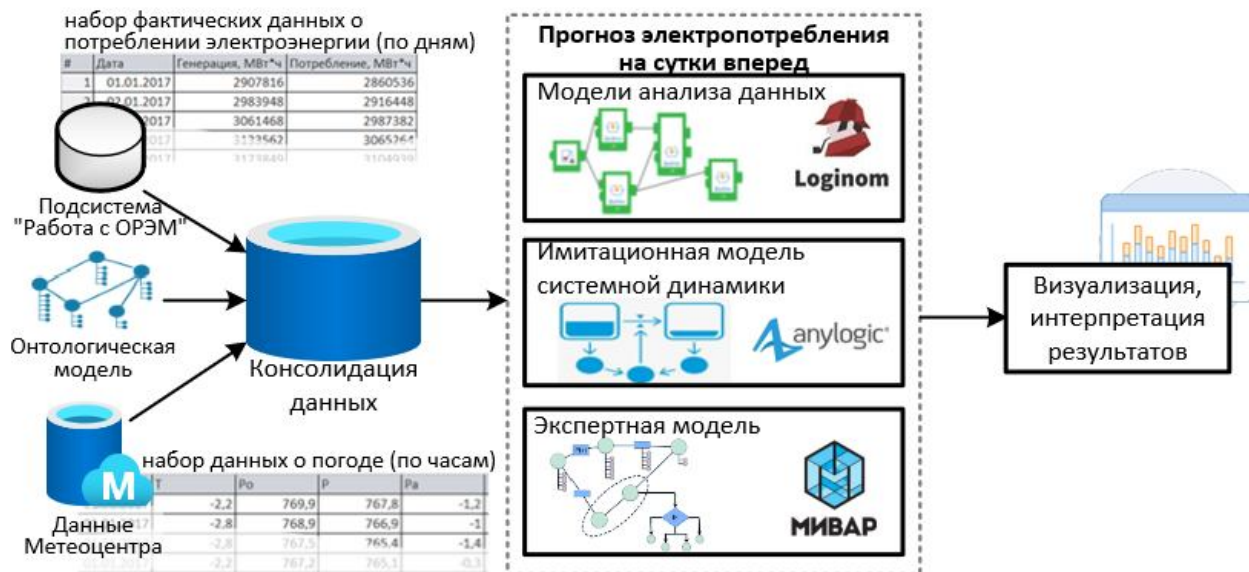


Рис. 4. Структура системы прогнозирования электропотребления

Fig. 4. The structure of the power consumption forecasting system

В настоящее время существуют риски использования иностранного программного обеспечения: отключение сервисов, непродление подписки, прекращение продаж и технической поддержки. Поэтому в качестве программного обеспечения для реализации процесса краткосрочного прогнозирования электропотребления в виде взаимодополняющей интеграции выбрано российское программное обеспечение в составе: аналитической low-code платформы Loginom [17], пакета имитационного моделирования Anylogic [18] и миварного конструктора экспертных систем Wi!Mi [19].

Результаты и их обсуждение

Наборы данных в систему интеллектуального анализа данных Loginom поступают из электронных таблиц, которые были выгружены с сайта Метеоцентра, содержащие информацию о по-

годе на конкретный день (или почасовые изменения, для построения почасового прогноза) и текстовых файлов, выгруженных из подсистемы «1С: Работа с ОРЭМ», содержащих данные о потреблении за прошлые периоды.

Модели прогнозирования электропотребления на основе Loginom. Сценарий формирования прогноза электропотребления в low-code системе Loginom содержит 2 основные подмодели: «Прогноз на сутки вперед-1» и «Прогноз на основе температуры» (рис. 5).

Прогнозирование с учетом влияния температуры начинается с предварительной обработки данных в подмодели «Обработка исходных данных по погоде» с использованием обработчиков «Дата и время», «Группировка» и «Сортировка» и состоит в формировании средних значений по метеоанализам для дальнейшего слияния с набором данных фактического электропотребления.

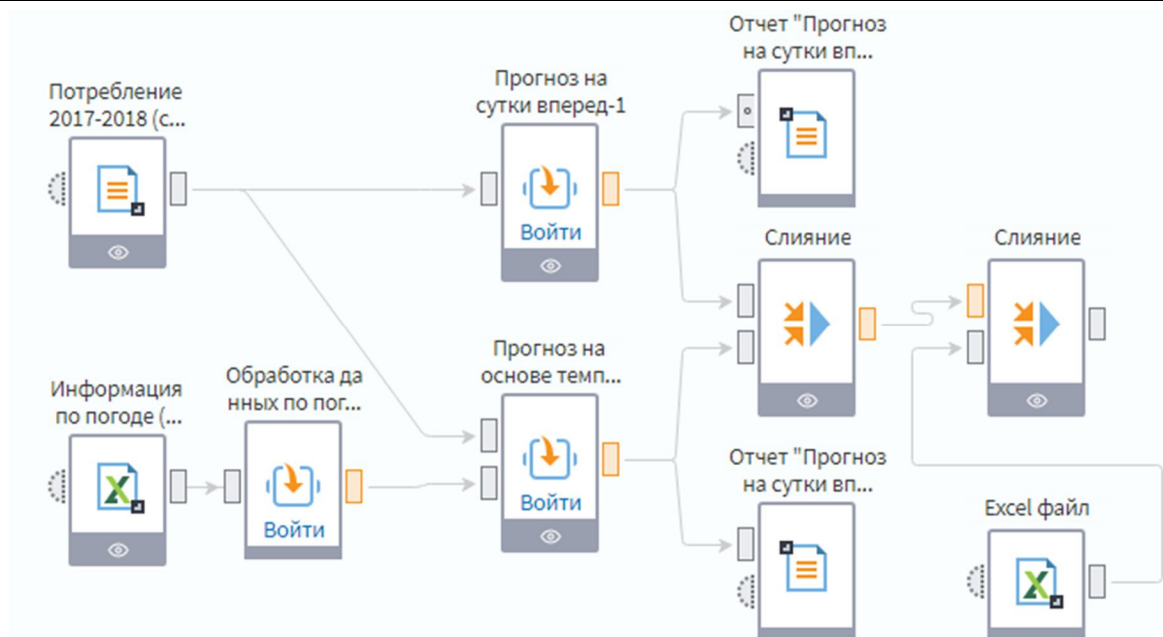


Рис. 5. Базовый сценарий прогнозирования электропотребления в Loginom

Fig. 5. Loginom Basic Power Consumption Forecasting Scenario

Консолидация наборов метеоданных и фактического потребления электроэнергии происходит непосредственно в подмодели «Прогноз на основе температуры» (рис. 6). Далее осуществляется предобработка данных в виде: проверки на наличие пропусков, корректировки выбросов и экстремальных значений, а также применяется метод скользящего окна, который необходим в случаях, когда на вход анализатора (например, нейронной сети) требуется подавать значения нескольких смежных отсчетов исходного набора данных. В результате получается набор данных, содержащий в одном из полей значение, соответствующее текущему отсчету, а в соседних (слева и справа) полях значения, смещенные от текущего отсчета в прошлое и в будущее соответственно (см. рис. 6).

Для непосредственной реализации прогностических моделей были исполь-

зованы обработчики Loginom Нейросеть (регрессия) и ARIMAX (см. рис. 6). В обработчике Нейросеть (регрессия) формируется прогнозируемое значение переменной, зависящее от множества входных параметров. Перед прогнозированием внутренний алгоритм обработчика Нейросеть (регрессия) обучается на тренировочном наборе данных. Данные для тестового и обучающего множеств формируются из всего объема входных данных в случайном порядке в пропорции 30/70.

Параллельно используется обработчик ARIMAX, с помощью которого будут получены прогнозные значения объемов потребления (см. рис. 6). ARIMAX математическая модель для анализа временных рядов, объединяющая в себе интегрированную авторегрессию, скользящее среднее и возможность учета дополнительных внешних факторов. После

получения прогнозных данных происходит слияние таблиц для сравнения полученных данных. Результирующее множество сравнено с данными фактического потребления и увидеть, при этом ре-

зультат прогнозирования на основе алгоритма ARIMAX оказался более приближен к реальному (рис. 7). По подобному алгоритму строится прогноз без учета метеофакторов.

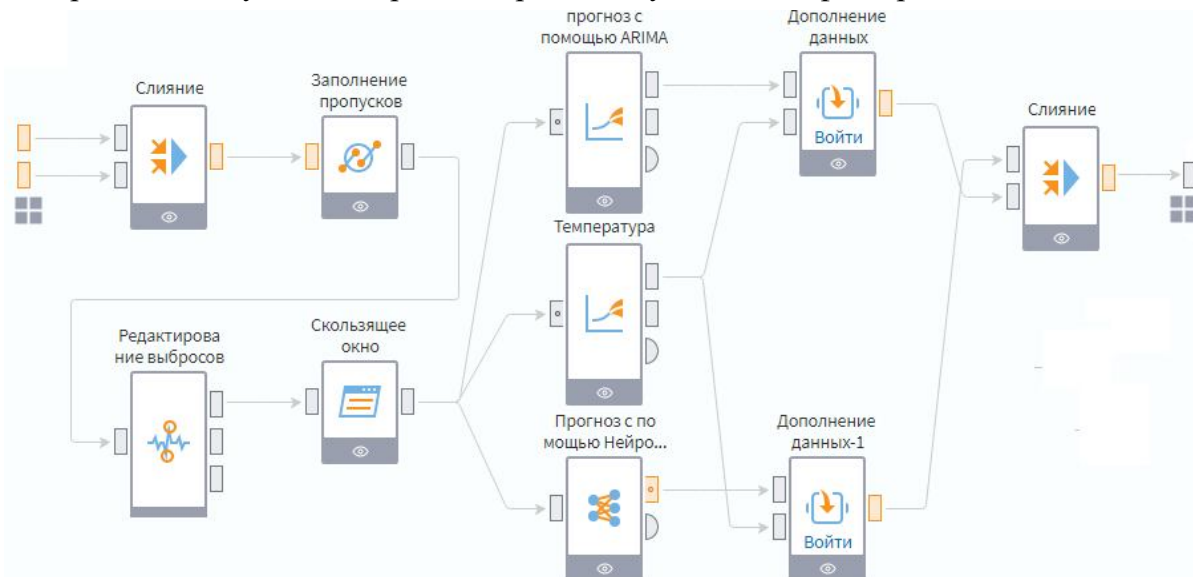


Рис. 6. Сценарий подмодели «Прогноз на основе температуры» в Loginom

Fig. 6. Loginom Temperature Prediction Submodel Scenario

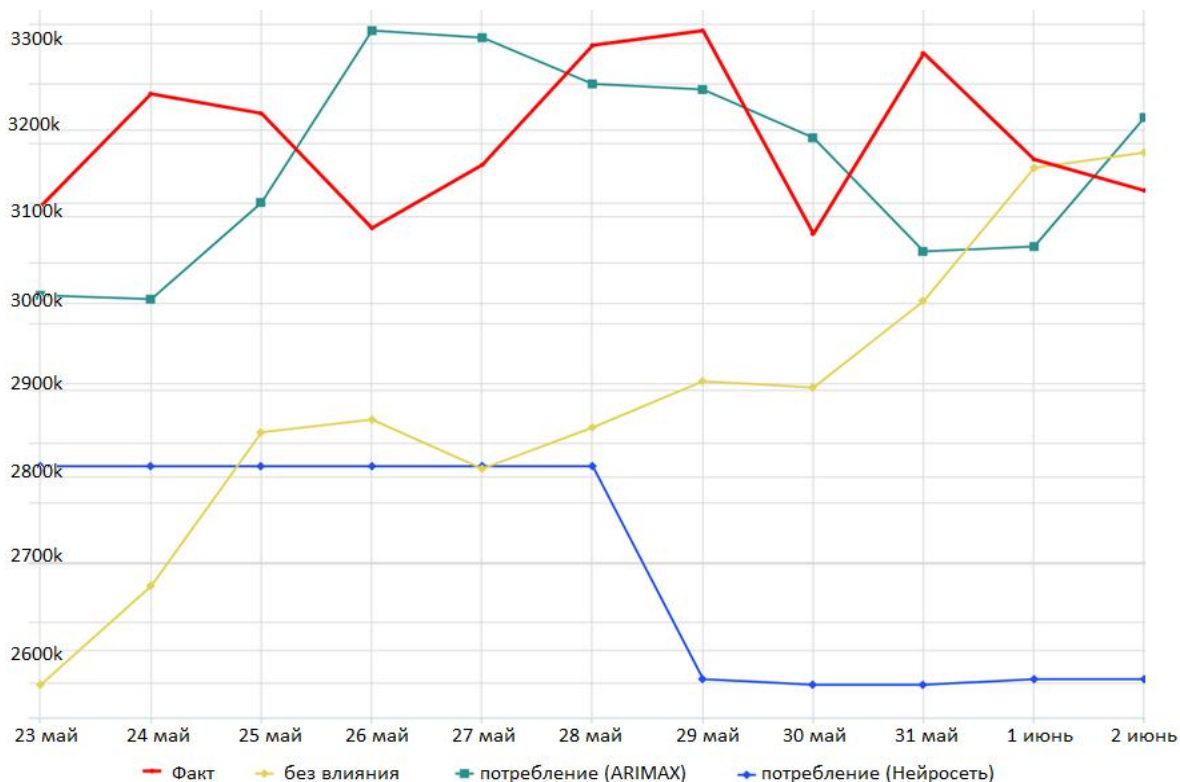


Рис. 7. Визуализация результатов прогнозирования в Loginom

Fig. 7. Loginom forecasting results visualization

Имитационная модель системной динамики прогнозирования электропотребления в Anylogic. В имитационной модели системной динамики были ис-

пользованы следующие объекты: параметры, динамические переменные, накопители, бегунки для изменения показателей (табл. 1-3).

Таблица 1. Параметры модели

Table 1. Model parameters

Свойства / Properties	Значение / Value
Имя Связан с Max значение Min значение	Температура параметр T +40 -30
Имя Связан с Max значение Min значение	Давление параметр P 764 750
Имя Связан с Max значение Min значение	Осадки параметр O 100 0,01
Имя Связан с Max значение Min значение	Пр_Объем параметр V_{last} 1 570 000 400 000

Таблица 2. Динамические переменные

Table 2. Dynamic variables

Свойства / Properties	Значение / Value
Имя Формула	$F3$ $(P == 761 \parallel P < 755) ? +1 : -1$
Имя Формула	$F2$ $(O > 60) ? +1 : -1$
Имя Формула	$F1$ $(T < 0 \parallel T > 30) ? +1 : -1$

Таблица 3. Свойства накопителя

Table 3. Drive properties

Свойства / Properties	Значение / Value
Имя Тип Формула Начальное значение	V Накопитель $(V > (V_{last} - 100000) \&\& V < (V_{last} + 100000)) ? \exp(F3+F2+F1) : \text{triangular}(V_{last}-100000, V_{last}, V_{last}+100000)$

Входными данными для модели системной динамики являются показатели температуры, давления, количества осадков, а также потребленный объем электрической энергии за прошлый период (от нескольких дней/месяцев до прогнозируемой даты). В процессе моделирования показатели можно изменять, тем самым изменяя результат [20]. В ходе за-

пуска модели были выставлены такие характеристики, которые могли бы повлиять на рост значения. Например, температура воздуха достаточно высокая, что и будет влиять на рост объема потребления, также при уменьшении температуры воздуха в нормальное состояние привело значение к минимальному отклонению от текущего (рис. 8).

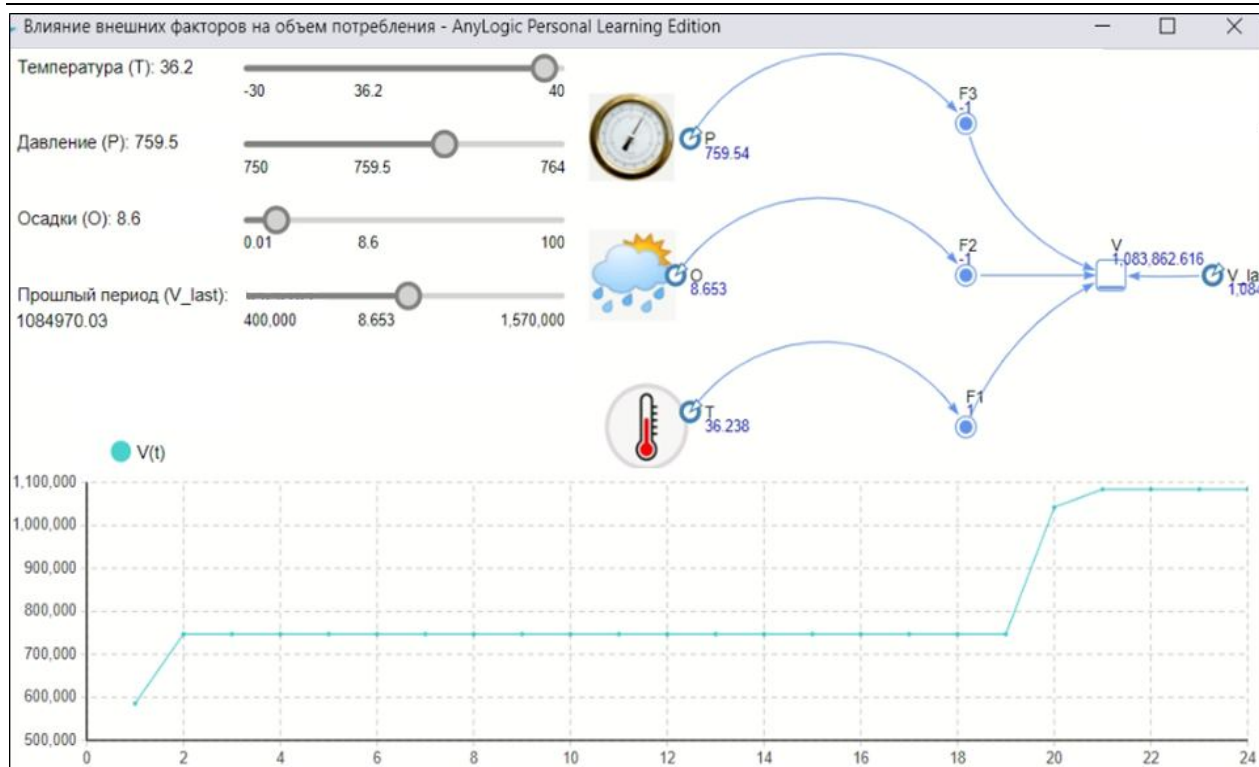


Рис. 8. Модель системной динамики влияния метеофакторов на объем элетропотребления в Anylogic

Fig. 8. Anylogic system dynamics model of the influence of meteorological factors on power consumption

Экспертные модели прогнозирования электропотребления в Wi!Mi. Ми-варный конструктор экспертных систем Wi!Mi позволяет создавать объекты предметной области (параметры и классы), отношения и правила, а также выполнять структурный анализ, вывод полученного алгоритма логического вывода разрешения ситуации, расчет необходимых значений. Данные параметры выделены в ходе онтологического анализа предметной области (см. рис. 2). В качестве конечных показателей определены показатели метеофакторов (рис. 9, а). Для описания логики расчета конечных показателей на основании входных па-

раметров использованы продукционные отношения вида «если..., то... иначе...», содержащие математические выражения и правила, привязывающие отношения к конкретным объектам (рис. 9, б, табл. 4).

Для каждого отношения прописывались правила, их входные и выходные параметры (табл. 4).

После создания структуры экспертной модели произведен расчет искомых параметров с пошаговым логическим выводом с указанием входных параметров, использованных правил путем нахождения алгоритмов вычисления и построена модель в виде графа решения, отображающая логику вычисления показателей (рис. 10).

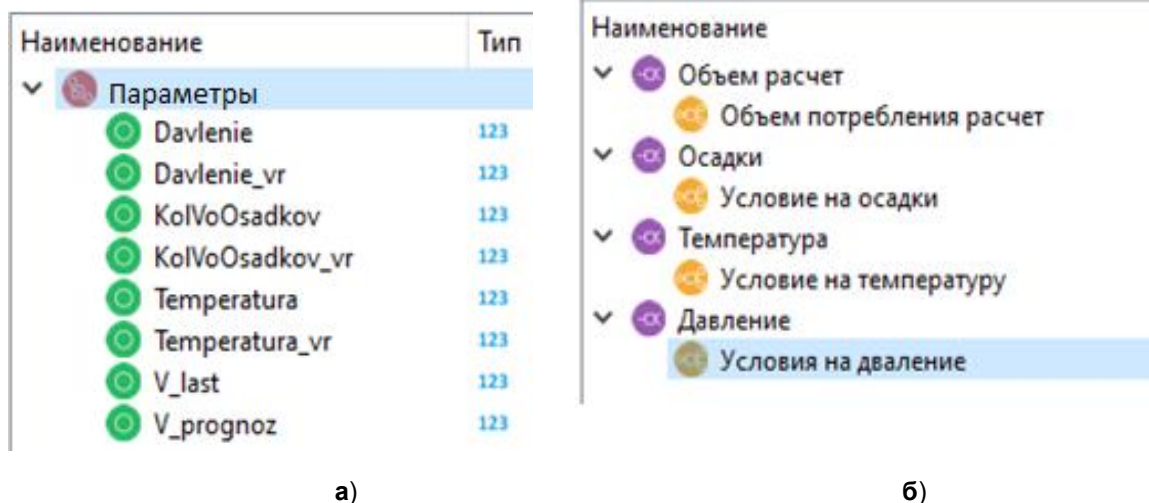


Рис. 9. Конечные показатели, правила и отношения экспертной модели в Wi!Mi:
а – конечные показатели; **б** – правила и отношения

Fig. 9. Final indicators, rules and relationships of the Wi!Mi expert model: **a** – final indicators;
b – rules and relationships

Таблица 4. Отношения экспертной модели

Table 4. Expert Model Relationships

Наименование / Name	Тип отношения / Relationship type	Тело отношения / Relationship body
Объем расчет	Условное отношение	if (V_last<400000 V_last>1500000) {V_pr=V_last* Math.sqrt(osadki+davlenie+temperatura);} else {V_pr=V_last*Math.exp(osadki+davlenie+temperatura);}
Осадки	Условное отношение	if (KolvoOsadkov>60) {KolvoOsadkov_vr = KolvoOsadkov_vr+1;} else {KolvoOsadkov_vr = KolvoOsadkov_vr-1;}
Температура	Условное отношение	if (Температура< 0 Температура >30) {Темпера- тура_vr=Температура_vr+1;} else {Темпера- тура_vr=Температура_vr-1;}
Давление	Условное отношение	if (Davlenie> 760 Davlenie<755) {Davlenie_vr = Davlenie_vr+1;} else {Davlenie_vr = Davlenie_vr-1;}

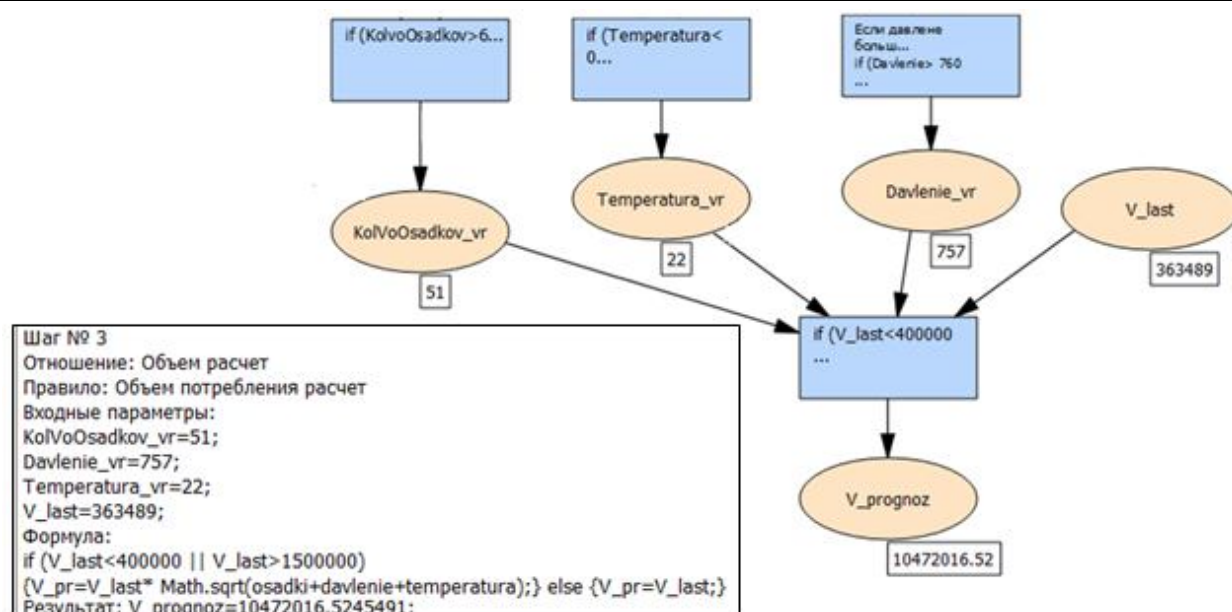


Рис. 10. Визуализация и результаты тестирования экспертной системы Wi!Mi

Fig. 10. Visualization and testing results of the Wi!Mi expert system

Выводы

В работе обоснована актуальность использования комбинированных моделей и различного типа прикладных программных средств для краткосрочного прогнозирования электропотребления. Разработана онтологическая модель влияния внешних факторов и видов прогнозирования электропотребления, систематизированы термины, выделены классы и сформирован тезаурус рассматриваемой предметной области. Предложена структурная схема на основе взаимодополняющей интеграции

моделей и программных средств интеллектуального анализа данных, имитационного моделирования и экспертных систем. Детально описаны реализованные сценарии прогнозирования электропотребления в low-code системе Loginom, диаграммы потоков влияния внешних факторов модели системной динамики в пакете имитационного моделирования Anylogic, а также граф решения в миварном конструкторе экспертных систем Wi!Mi. Построена визуализация каждой модели.

Список литературы

1. Оптовый рынок электрической энергии и мощности // Ассоциация «НП Совет рынка». URL: <https://www.np-sr.ru/ru/market/wholesale/index.htm> (дата обращения: 14.04.2022)
2. По кривой – к балансу. Как складывается цена электроэнергии // ООО «Сибирская генерирующая компания». <https://sibgenco.online/news/element/on-a-curve-to-balance-what-is-the-price-of-electricity/> (дата обращения: 14.04.2022)

3. Соловьева И.А., Дзюба А.П. Прогнозирование электропотребления с учетом факторов технологической и рыночной среды // Научный диалог. 2013. № 7 (19). С. 97-113.
4. Смирнова Е.О., Филатов А.Ю. Прогнозирование рынка электроэнергии "на сутки вперед": пример второй ценовой зоны // Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Экономика и управление. 2018. № 4. С. 149-159.
5. Мохов В.Г., Демьяненко Т.С. Прогнозирование потребления электрической энергии на оптовом рынке электроэнергии и мощности // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Экономика и менеджмент. 2014. Т. 8. № 2. С. 86-92.
6. Воронов И.В., Политов Е.А., Ефременко В.М. Использование нейронной сети для краткосрочного прогнозирования электропотребления промышленного предприятия // Вестник КузГТУ. 2006. № 6. С. 71-73.
7. Серебряков Н.А. Выбор оптимальной архитектуры и конфигурации нейросети в задачах краткосрочного прогнозирования электропотребления гарантирующего поставщика электроэнергии // Вести высших учебных заведений Черноземья. 2021. № 2 (64). С. 26-42.
8. Карпенко С.М., Карпенко Н.В., Безгинов Г.Ю. Прогнозирование электропотребления на горнопромышленных предприятиях с использованием статистических методов // Горная промышленность. 2022. № 1. С. 82-88.
9. Использование статистических моделей при краткосрочном прогнозировании электропотребления и графиков нагрузки ЭЭС / Т.А. Филиппова, А.Г. Русина, Ю.В. Дронова, Р.В. Зимин, Р.С. Калюжный // Электрические станции. 2008. №5. С. 32-36.
10. Прогнозирование электропотребления энергосбытовых компаний / Б.И. Макоклюев, А.С. Полижаров, А.А. Ломейко, В.В. Мишина // Энергоэксперт. 2018. № 1 (65). С. 34-38.
11. Бершадский И.А., Джуря С.Г., Чурсинова А.А. Использование искусственного интеллекта для прогнозирования электропотребления энергосбытовой компании // Научный вестник Новосибирского государственного технического университета. 2020. № 4 (80). С. 7-16.
12. Методы краткосрочного прогнозирования выработки электрической энергии солнечными электростанциями и их классификация / Д.А. Тюньков, А.А. Сапилова, А.С. Грицай, Д.А. Алексеенко, Р.Н. Хамитов // Электротехнические системы и комплексы. 2020. № 3 (48). С. 4-10.
13. Методы прогнозирования электропотребления в распределительных сетях (обзор) / А.М. Абдурахманов, М.В. Володин, Е.Ю. Зыбин, В.Н. Рябченко // Электротехника: сетевой электронный научный журнал. 2016. Т. 3. № 1. С. 3-23.

14. Хальясмаа А.И., Матренин П.В., Ерошенко С.А. Анализ ошибок применения алгоритмов машинного обучения в задачах электроэнергетики // Электроэнергия. Передача и распределение. 2021. № 3 (66). С. 46-53.
15. Бубновская Т.В., Демонова Т.И. Совершенствование системы информационного обеспечения процессов управления в энергосбытовой компании // Азимут научных исследований: экономика и управление. 2018. Т. 7. № 4 (25). С. 89-92
16. Кретов Д.А., Рузанов Р.В. Прогнозирование электропотребления энергосбытовой компании с использованием искусственной нейронной сети // Инженерный вестник Дона. 2015. № 2-1 (35). С. 20.
17. Паклин Н.Б., Ильин И.В., Широкова С.В. Малокодовые платформы в подготовке аналитиков данных // Фундаментальные и прикладные исследования в области управления, экономики и торговли: сборник трудов Всероссийской научно-практической и учебно-методической конференции. СПб., 2021. С. 218-221.
18. Борщев А.В., Махдави А. Имитационные модели как виртуальная среда для обучения и тестирования искусственного интеллекта для бизнес-приложений // Девятая всероссийская научно-практическая конференция по имитационному моделированию и его применению в науке и промышленности: труды конференции. Екатеринбург, 2019. С. 20-29.
19. Назаров К.В., Варламов О.О. Разработка методики создания верифицируемых моделей для миварных экспертных систем // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2017. Т. 11. № 4. С. 64-71.
20. Ганюков В.Ю., Ханова А.А., Сульдина Н.В. Интеллектуальная система управления цепями поставок логистического предприятия на основе дискретно-событийной, агентной и системно-динамической имитационных моделей // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Управление, вычислительная техника и информатика. 2012. № 2. С. 143-149.

References

1. Optovyy rynek jelektricheskoy jenergii i moshhnosti [Wholesale market of electric energy and capacity]. *Associacija «NP Sovet rynka»* [Association "NP Market Council"]. Available at: www.np-sr.ru/ru/market/wholesale/index.htm (accessed date: 14.04.2022).
2. Po krivoj – k balansu. Kak skladyvaetsja cena jelektrojenergii [By curve - to the balance sheet. How is the price of electricity]. *ООО «Sibirskaja generirujushhaja kompanija»* [Sibirskaya Generating Company LLC]. Available at: www.sibgenco.online/news/element/on-a-curve-to-balance-what-is-the-price-of-electricity/ (accessed date: 14.04.2022).
3. Solovyova I.A., Dziuba A.P. Prognozirovanie jelektropotreblenija s uchetom faktorov tehnologicheskoy i rynochnoj sredy [Forecasting of power consumption taking into account

the factors of the technological and market environment]. *Nauchnyj dialog = Scientific Dialogue*. 2013, no 7 (19), pp. 97-113.

4. Smirnova E.O., Filatov A.Yu. Prognozirovanie rynka jelektroenergii "na sutki vpered": primer vtoroj cenovoj zony [Forecasting the electricity market "for the day ahead": an example of the second price zone]. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Serija: Jekonomika i upravlenie = Bulletin of Voronezh State University. Series: Economics and Governance*, 2018, no. 4, pp. 149-159.

5. Mokhov V.G., Demyanenko T.S. Prognozirovanie potreblenija jelektricheskoy jenerгии na optovom rynke jelektroenergii i moshhnosti [Forecasting of electric energy consumption in the wholesale electricity and capacity market]. *Vestnik Juzhno-Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta. Serija: Jekonomika i menedzhment = Bulletin of South Ural State University. Series: Economics and Management*, 2014, vol. 8, no. 2, pp. 86-92.

6. Voronov I.V., Politov E.A., Efremenko V.M. Ispol'zovanie nejronnoj seti dlja kratkosrochnogo prognozirovaniya jelektropotreblenija promyshlennogo predpriyatija [Using a neural network for short-term forecasting of the power consumption of an industrial enterprise]. *Vestnik KuzGTU = Bulletin of KuzGTU*, 2006, no. 6, pp. 71-73.

7. Serebryakov N.A. Vybor optimal'noj arhitektury i konfiguracii nejroseti v zadachah kratkosrochnogo prognozirovaniya jelektropotreblenija garantirujushhego postavshhika jelektroenergii [Choosing the optimal architecture and configuration of the neural network in the tasks of short-term forecasting of the power consumption of the guaranteeing electricity supplier]. *Vesti vysshih uchebnyh zavedenij Chernozem'ja = News of Higher Educational Institutions of the Chernozem Region*, 2021, no. 2 (64), pp. 26-42.

8. Karpenko S.M., Karpenko N.V., Bezginov G.Yu. Prognozirovanie jelektropotreblenija na gornopromyshlennyh predpriyatijah s ispol'zovaniem statisticheskikh metodov [Forecasting of power consumption at mining enterprises using statistical methods]. *Gornaja promyshlennost' = Mining Industry*, 2022, no. 1, pp. 82-88.

9. Filippova T.A., Rusina A.G., Dronova Yu.V., Zimin R.V., Kalyuzhny R.S. Ispol'zovanie statisticheskikh modelej pri kratkosrochnom prognozirovanii jelektropotreblenija i grafikov nagruzki JeJeS [Use of statistical models in short-term forecasting of power consumption and EES load plots]. *Jelektricheskie stancii = Electrical Stations*, 2008, no. 5, pp. 32-36.

10. Makoklyuev B.I., Polizharov A.S., Lomeiko A.A., Mishina V.V. Prognozirovanie jelektropotreblenija jenergosbytovyh kompani [Forecasting the power consumption of energy sales companies]. *Jenergojeksper = Energoexpert*, 2018, no. 1(65), pp. 34-38.

11. Bershadsky I.A., Dzhura S.G., Chursinova A.A. Ispol'zovanie iskusstvennogo intelekta dlja prognozirovaniya jelektropotreblenija jenergosbytovoj kompanii [The use of artificial intelligence to predict the power consumption of an energy sales company]. *Nauchnyj*

vestnik Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Scientific Bulletin of Novosibirsk State Technical University, 2020, no. 4(80), pp. 7-16.

12. Tyunkov D.A., Sapilova A.A., Gritsa.i A.S., Alekseenko D.A., Khamitov R.N. Metody kratkosrochnogo prognozirovaniya vyrabotki jelektricheskoy jenerгии solnechnymi jelektrostancijami i ih klassifikacija [Methods of short-term forecasting of electric power generation by solar power plants and their classification]. *Jelektrotehnicheskie sistemy i komplekсы = Electrical Systems and Complexes*, 2020, no. 3(48), pp. 4-10.

13. Abdurakhmanov A.M., Volodin M.V., Zybin E.Yu., Ryabchenko V.N. Metody prognozirovaniya jelektropotrebleniya v raspredelitel'nyh setjah (obzor) [Methods for predicting power consumption in distribution networks (overview)]. *Jelektrotehnika: setevoy jelektronnyj nauchnyj zhurnal = Electrical Engineering: Network Electronic Scientific Journal*, 2016, vol. 3, no. 1, pp. 3-23.

14. Halyasmaa A.I., Matrenin P.V., Eroshenko S.A. Analiz oshibok primeneniya algoritmov mashinnogo obucheniya v zadachah jelektrojenergetiki [Analysis of errors in the application of machine learning algorithms in the problems of the electric power industry]. *Jelektrojenergiya. Peredacha i raspredelenie = Electricity. Transmission and Distribution*. 2021, no. 3(66), pp. 46-53.

15. Bubnovskaya T.V., Demonova T.I. Sovershenstvovanie sistemy informacionnogo obespecheniya processov upravleniya v jenergosbytovoj kompanii [Improving the information support system for management processes in the energy sales company]. *Azimut nauchnyh issledovaniy: jekonomika i upravlenie = Azimut of Scientific Research: Economics and Management*. 2018, vol. 7, no. 4(25), pp. 89-92.

16. Kretov D.A., Ruzanov R.V. Prognozirovanie jelektropotrebleniya jenergosbytovoj kompanii s ispol'zovaniem iskusstvennoj nejronnoj seti [Forecasting the power consumption of an energy sales company using an artificial neural network]. *Inzhenernyj vestnik Dona = Engineering Bulletin of the Don*, 2015, no 2-1(35), pp. 20.

17. Paklin N.B., Ilyin I.V., Shirokova S.V. Malokodovye platformy v podgotovke analitikov dannyh [Small-code platforms in the preparation of data analysts]. *Fundamental'nye i prikladnye issledovaniya v oblasti upravleniya, jekonomiki i tovgovli. Sbornik trudov Vserossijskoj nauchno-prakticheskoy i uchebno-metodicheskoy konferencii* [Fundamental and applied research in the field of management, economics and trade. Collection of works of the All-Russian scientific-practical and educational-methodological conference]. St. Petersburg, 2021, pp. 218-221.

18. Borshchev A.V., Makhdavi A. Imitacionnye modeli kak virtual'naja sreda dlja obucheniya i testirovaniya iskusstvennogo intellekta dlja biznes-prilozhenij [Imitation models as a virtual environment for training and testing artificial intelligence for business applications]. *Devjataja vserossijskaja nauchno-prakticheskaja konferencija po imitacionnomu modelirovaniyu i ego primeneniju v nauke i promyshlennosti. Trudy konferencii* [Ninth All-

Russian scientific and practical conference on imitation modeling and its application in science and industry. Proceedings of the conference]. Ekaterinburg, 2019, pp. 20-29.

19. Nazarov K.V., Varlamov O.O. Razrabotka metodiki sozdanija verifitsiruemykh modelej dlja mivarnyh jekspertnyh system [Development of methodology for creation of verifiable models for mivar expert systems]. *T-Comm: Telekommunikacii i transport = T-Comm: Telecommunications and Transport*, 2017, vol. 11, no. 4, pp. 64-71.

20. Ganyukov V.Yu., Khanova A.A., Suldina N.V. Intellektual'naya sistema upravleniya cepyami postavok logisticheskogo predpriyatiya na osnove diskretno-sobytijnoj, agentnoj i sistemno-dinamicheskoy imitacionnyh modelej [Intelligent supply chain management system of a logistics enterprise based on discrete-event, agent and system-dynamic simulation models]. *Vestnik Astrakhanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Upravlenie, vychislitel'naya tekhnika i informatika = Bulletin of the Astrakhan State Technical University. Series: Management, Computer Engineering and Informatics*, 2012, no. 2, pp. 143-149.

Информация об авторах / Information about the Authors

Мекпеткалиева Амина Канатовна, магистрант, Астраханский государственный технический университет, г. Астрахань, Российская Федерация, e-mail: amina.mectepckalieva@yandex.ru

Amina K. Mekpetkalieva, Master's Student, Astrakhan State Technical University, Astrakhan, Russian Federation, e-mail: amina.mectepckalieva@yandex.ru

Ханова Анна Алексеевна, доктор технических наук, профессор, Астраханский государственный технический университет, г. Астрахань, Российская Федерация, e-mail: akhanova@mail.ru, ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-2693-8876>

Anna A. Khanova, Dr. of Sci. (Engineering), Professor, Astrakhan State Technical University, e-mail: akhanova@mail.ru, ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-2693-8876>

Аминул Любовь Борисовна, кандидат педагогических наук, доцент, Астраханский государственный технический университет, г. Астрахань, Российская Федерация, e-mail: aminul.25@mail.ru

Lyubov B. Aminul, Cand of Sci. (Pedagogical), Associate Professor, Astrakhan State Technical University, Astrakhan, Russian Federation, e-mail: amil.25@mail.ru