



МЕТОДИКА ПРОГНОЗИРОВАНИЯ НАГРУЗКИ В ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ: АЛГОРИТМ ЭФФЕКТИВНОГО УПРАВЛЕНИЯ

Борисов Д.А., Максимов В.В., Воркунов О.В., Куракина О.Е.

Казанский государственный энергетический университет, г. Казань, Россия
borisovdaniel49@gmail.com

Резюме: АКТУАЛЬНОСТЬ исследования заключается в оперативном прогнозировании электрических нагрузок как для технических, так и для экономических аспектов работы энергосистемы. Своевременный анализ предстоящих нагрузок позволяет определить наиболее эффективный режим функционирования системы, что напрямую влияет на показатели всего электротехнического комплекса при работе на энергетическом рынке. ЦЕЛЬ. Повысить точность прогнозирования потребления электроэнергии в электротехническом комплексе сетевой компании, обеспечивающий меньшую погрешность по сравнению с действующими методами. МЕТОДЫ. Для достижения цели был применён итерационный метод: в среде Microsoft Excel организован последовательный перебор и проверка существующих способов прогнозирования. РЕЗУЛЬТАТЫ. Разработана методология прогнозирования энергопотребления электрохозяйством энергетической организации. Предельная ошибка предложенной методологии составила всего 2,53%. Был разработан пошаговый алгоритм вычисления планируемого объема электропотребления клиентами, обеспечивающий последовательное выполнение операций для формирования комплексного прогноза. ЗАКЛЮЧЕНИЕ. Важным элементом работы стал алгоритм расчета предполагаемого объема потребления электроэнергии абонентами. Данный алгоритм представляет собой детально проработанную последовательность действий, необходимых для реализации комбинированного метода прогнозирования, а также обеспечивает системный подход к оценке будущего потребления электроэнергии, достигая высокой степени детализации, что позволяет осуществлять расчеты без использования специализированного программного обеспечения, применяя только базовые инженерные методы вычислений.

Ключевые слова: прогноз потребления электроэнергии; статистический анализ; относительная погрешность; экспоненциальное сглаживание; комбинированный подход.

Для цитирования: Борисов Д.А., Максимов В.В., Воркунов О.В., Куракина О.Е. Методика прогнозирования нагрузки в электроэнергетических системах: алгоритм эффективного управления // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2025. Т. 27. № 6. С. 99-111. doi: 10.30724/1998-9903-2025-27-6-99-111.

THE METHODOLOGY OF LOAD FORECASTING IN ELECTRIC POWER SYSTEMS: EFFECTIVE MANAGEMENT ALGORITHM

Borisov D.A., Maximov V.V., Vorkunov O.V., Kurakina O.E.

Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia
borisovdaniel49@gmail.com

Abstract: RELEVANCE. The research consists in the operational forecasting of electrical loads for both technical and economic aspects of the operation of the power system. Timely analysis of the upcoming loads allows us to determine the most efficient system operation mode, which directly affects the performance of the entire electrical complex when operating in the energy market. THE PURPOSE. To increase the accuracy of forecasting electricity consumption in the electrical complex of the grid company, providing a lower margin of error compared to current methods. METHODS. To achieve this goal, an iterative method was applied: in the Microsoft Excel environment, a sequential search and verification of existing forecasting methods was organized. RESULTS. A methodology for forecasting energy consumption by an electric utility

of an energy organization has been developed. The marginal error of the proposed methodology was only 2.53%. A step-by-step algorithm for calculating the planned amount of electricity consumption by customers has been developed, ensuring consistent execution of operations to generate a comprehensive forecast. CONCLUSION. An important element of the work was the algorithm for calculating the estimated volume of electricity consumption by subscribers. This algorithm is a detailed sequence of actions necessary to implement a combined forecasting method, and also provides a systematic approach to estimating future electricity consumption, achieving a high degree of detail, which allows calculations to be performed without using specialized software, using only basic engineering calculation methods.

Keywords: electricity consumption forecast; statistical analysis; relative error; exponential smoothing; combined approach.

For citation: Borisov D.A., Maximov V.V., Vorkunov O.V., Kurakina O.E. The methodology of load forecasting in electric power systems: effective management algorithm. *Power engineering: research, equipment, technology.* 2025; 27 (6): 99-111. doi: 10.30724/1998-9903-2025-27-6-99-111.

Введение (Introduction)

Работа электроэнергетики критически важна для всех отраслей экономики России и существенно влияет на формирование основных государственных финансово-экономических показателей. Наличие значительных запасов топливно-энергетических ресурсов, компетентных специалистов и развитой научной базы составляет ценнейшее достояние нации. Грамотное распоряжение этим потенциалом способствует экономическому росту и повышению благосостояния граждан.

Анализ динамики производства электроэнергии демонстрирует положительную тенденцию развития отрасли. Если сравнивать показатели 2020 года с данными 2010 года, то наблюдается рост выработки более чем на 20% (до 1087,8 млрд. кВт·ч) [1]. Прогнозируемый рост к 2030 году предполагает увеличение этого показателя до 1740 млрд. кВт·ч. Параллельно с наращиванием производства активно реализуются комплексные программы энергосбережения [2, 3].

В современных условиях функционирования российского электроэнергетического рынка наблюдается тенденция к ужесточению требований к объемам закупаемой и реализуемой электроэнергии. В связи с этим особое значение приобретает прогнозирование электропотребления, которое является основополагающим элементом финансового планирования всех участников рынка. Процесс прогнозирования электропотребления характеризуется высокой сложностью из-за необходимости учета множества взаимосвязанных факторов, определяющих динамику энергопотребления, а точность прогноза напрямую влияет на эффективность функционирования электроэнергетической системы и экономическую результативность предприятий.

Для компаний электроэнергетического сектора первостепенной задачей является точное определение нагрузки, оказываемой на электросети и генерирующее оборудование. Данный показатель формируется под воздействием ряда факторов, включая метеорологические условия, географическое расположение, сезонность и время суток [4].

В электроэнергетике критически важно максимально эффективно использовать имеющиеся данные для составления точных прогнозов энергопотребления, поскольку это позволяет минимизировать риски при принятии управленческих решений [5].

Динамика общего энергопотребления региона формируется под влиянием двух основных компонентов: изменений в промышленном секторе и колебаний потребления в секторе бытовых потребителей. Все эти колебания становятся предметом ответственности сбытовых организаций, которые обязаны обеспечить полное удовлетворение потребностей в электроэнергии всех категорий потребителей [6]. При этом необходимо учитывать, что любое изменение в потреблении может существенно повлиять на энергобаланс всего региона [7].

Прогнозирование уровня потребления электрической энергии является многоэтапным процессом, включающим ряд последовательно выполняемых шагов. Первый шаг заключается в предварительной обработке данных, где детально изучается вся доступная информация с помощью статистических данных, в том числе основанных на визуальном анализе. Это помогает определить ключевые тенденции и специфику изменения потребления электроэнергии потребителями. Затем выполняется анализ, привязанный ко

времени выполнения для выявления сезонных факторов, тенденций и цикличности изменений в потреблении. Данный этап способствует лучшему пониманию механизмов, лежащих в основе колебания спроса на электроэнергию. Следующим шагом становится разработка модели прогнозирования, включающая подбор наиболее адекватных методик и создание подходящей прогностической модели. При этом учитывается влияние множества переменных и особенностей конкретной ситуации, обеспечивая максимальную адаптивность и эффективность используемого подхода. Заключительным этапом выступает верификация прогноза, где оцениваются полученные данные и проверяется качество созданной модели. Если возникает необходимость, проводятся дополнительные настройки, после чего формируется итоговый прогноз. Такой последовательный подход обеспечивает наиболее высокую достоверность результатов и повышает эффективность планирования электропотребления.

Следует подчеркнуть, что этапы процедуры прогнозирования взаимозависимы и образуют целостную методологическую систему. Точность прогноза зависит именно от последовательного прохождения всех стадий и тщательного выполнения каждой отдельной операции.

Качество прогноза энергопотребления напрямую связано с применяемыми методами и математическими моделями. Однако из всего многообразия существующих подходов активно используются лишь 15-20 [8, 9]. Ключевое различие заключается в методологии: для краткосрочного и долгосрочного планирования применяются разные инструменты, адаптированные под конкретные задачи и источники информации [10].

В современной практике выделяют следующие основные группы методов прогнозирования (табл. 1): экспертный подход предполагает использование знаний и опыта профессионалов отрасли [11]; экстраполяционный подход заключается в проектировании актуальных трендов на последующие временные отрезки [12]; регрессионный анализ представляет собой статистический метод, позволяющий исследовать взаимосвязи между переменным; технология нейронных сетей – на основе применения алгоритмов машинного обучения для предсказательной аналитики [13, 14].

Таблица **Ошибки! Текст указанного стиля в документе отсутствует.**

Table 1

Общие параметры методов прогнозирования

General parameters of forecasting methods

Методы	Характеристика	Разновидности
Экспертные оценки	Экспертное прогнозирование опирается на профессиональную интуицию и субъективные компетенции специалиста, обеспечивая возможность предсказаний разной длительности.	Субъективные и консолидированные экспертные суждения.
Экстраполяция	Принцип работы основан на исследовании статистических рядов определенного показателя и выявлении трендов его развития, целесообразно применять при низкой волатильности, предполагает разработку индивидуального прогноза для каждого элемента.	Метод скользящего среднего. Метод экспоненциального сглаживания.
Регрессионный анализ	В основе лежит исследование статистических зависимостей между различными показателями, что делает его оптимальным инструментом для среднесрочного прогнозирования.	–
Нейронные сети	Система построена на принципах нейросетевого моделирования, где элементы могут обучаться на основе получаемой информации об окружении, чаще всего применяется для предсказаний на ближайший период.	–

*Источник: Составлено авторами. Source: compiled by the author.

Эмпирические данные подтверждают, что ни один из существующих методов не может абсолютно точно предсказать все влияющие факторы и характеристики изменения спроса на электроэнергию. Важно найти разумный баланс между требуемой точностью, скоростью обработки данных и способностью модели адаптироваться к меняющимся условиям, что позволит создать эффективную систему прогнозирования электропотребления [15].

Цель исследования заключается в разработке и внедрение усовершенствованной методики прогнозирования электропотребления, которая обеспечит существенное повышение точности по сравнению с применяемыми на практике методами за счет комплексного учета статистических закономерностей и влияния внешних факторов.

Научная значимость. Разработан инновационный подход к прогнозированию энергопотребления, основанный на комплексном использовании статистических методов, включая регрессионный и корреляционный анализ.

Практическая значимость. Повышение точности прогнозирования электропотребления позволяет оптимизировать планирование режимов работы энергосистемы, улучшить баланс электроэнергии и снизить риски перегрузок.

Материалы и методы (Materials and methods)

Эмпирическую базу исследования составила статистика МУП «Альметьевские электрические сети» за четырёхлетний период (2020-2023 гг.). В модель прогнозирования были включены метеорологические переменные. Наибольшую прогностическую значимость, подтвержденную расчетами корреляции, продемонстрировали температура и влажность воздуха, которые оказывают существенное влияние на формирование как сезонных, так и случайных отклонений в графиках электропотребления [16, 17]. Исследование проводилось на основании ежемесячной статистики энергопотребления (кВт·ч) за четырехлетний интервал, а также средних месячных температур (°C) и относительной влажности воздуха (%), предоставленных Альметьевским центром по гидрометеорологии.

Данные таблицы 2 и рисунка 1 свидетельствуют о выраженной сезонной динамике энергопотребления. Одновременно фиксируется общая тенденция к его снижению в 2020-2023 гг., обнаруживающая частичную корреляцию с повышением температурных показателей.

Периоды начала и завершения отопительного сезона (март-апрель, сентябрь-октябрь) характеризуются заметным ростом энергопотребления. Данная закономерность объясняется активным использованием дополнительных электронагревательных устройств, создающих дополнительную нагрузку.

Таблица 2
Table 2

Ежемесячный мониторинг электропотребления Альметьевских электрических сетей за 2020-2023 гг.

Monthly monitoring of electricity consumption of Almeteyevsk electric grids for 2020-2023

Месяц	2020 год, кВт·ч	2021 год, кВт·ч	2022 год, кВт·ч	2023 год, кВт·ч
Январь	134856470	114086452	124283287	122941998
Февраль	106210956	102439084	117004646	111491532
Март	117371640	123294917	103818245	102170187
Апрель	104515828	100105939	91412219	94190462
Май	92029744	83733901	97666664	103483310
Июнь	91071390	82691707	87210581	82166921
Июль	92231130	82917942	93433054	87550700
Август	100521003	87586273	92368801	84785832
Сентябрь	105612315	99152010	96759268	95988638
Октябрь	105143635	117294811	115271029	103182655
Ноябрь	118613190	106942162	104194625	104642196
Декабрь	119959113	130459098	111168526	125779768
Среднее	107344701,2	102558691,3	102882578,8	101531183,3
Суммарное	1288136414	1230704296	1234590945	1218374199

*Источник: Составлено авторами. Source: compiled by the author.

В таблицах 3 и 4 и на рисунках 2 и 3 представлены температурные данные и показатели влажности города Альметьевск за период 2020-2023 годов, необходимые для оценки воздействия метеорологических факторов на потребление электроэнергии.

Согласно рисункам 2 и 3, уровень энергопотребления демонстрирует корреляцию с влажностью воздуха и обратную зависимость от температуры. Для влажности характерна сезонная динамика: снижение летом и рост зимой. При этом её колебания значительно более нестабильны по сравнению с изменениями электропотребления и температуры [18].

Статистический анализ показывает, что коэффициент корреляции между электропотреблением и температурой составляет 0,878. Такое высокое значение (близкое к 1) указывает на наличие сильной обратной связи между этими параметрами [19].

Второй показатель коэффициента корреляции, отражающий зависимость между объемом потребления электроэнергии и уровнем влажности воздуха, составляет 0,7074. Данное значение подтверждает наличие значимой прямой связи между этими параметрами, характеризующейся выраженным влиянием влажности на объем потребляемой электроэнергии.

Процесс разработки должен включать тщательное тестирование различных комбинаций известных методов и формирование на их основе четкого, структурированного алгоритма действий. Такой подход позволит создать эффективную методику прогнозирования, учитывающую все особенности электропотребления в регионе и обеспечивающую необходимую точность результатов.

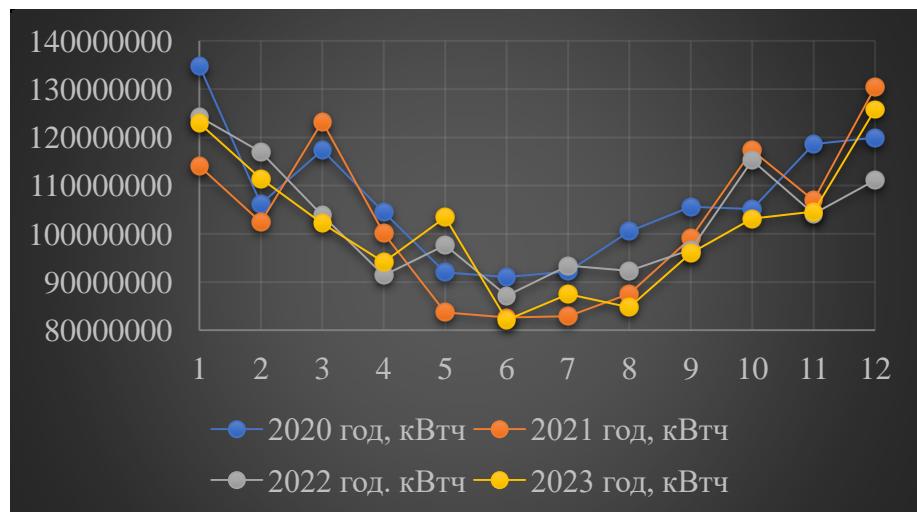


Рис. 1. Временная динамика энергопотребления за четырехлетний период Fig. 1. Time dynamics of energy consumption over a four-year period

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Таблица 3
Table 3

Среднегодовая динамика температур в городе Алматьевск за 2020-2023 годы
Average annual temperature dynamics in the city of Almeteyevsk for 2020-2023 years

Месяц	2020 год, °C	2021 год, °C	2022 год, °C	2023 год, °C
Январь	-13,1	-9,4	-10,7	-15,9
Февраль	-9,5	-6,3	-9,2	-3,4
Март	-7,7	-1,4	-6	-0,9
Апрель	8,4	11,3	5,6	11
Май	18,2	21,5	19,4	14,8
Июнь	23,7	26,8	24,2	25,2
Июль	26,2	29	20,8	27,2
Август	24,8	30,4	19,4	26,6
Сентябрь	13,8	21,5	15,6	17,4
Октябрь	5,9	10,3	4,3	8,5
Ноябрь	3,3	3,8	-0,4	2,4
Декабрь	-5,9	4,1	-3,9	-12,8
Среднее	7,3	11,8	6,6	8,3

*Источник: Составлено авторами. Source: compiled by the author.

Таблица 4
Table 4

Показатели относительной влажности в Альметьевске: средние значения за 2020-2023 годы
Relative humidity indicators in Almeteyevsk: average values for 2020-2023 years

Месяц	2020 год, %	2021 год, %	2022 год, %	2023 год, %
Январь	80	83	79	81
Февраль	75	70	67	77
Март	69	77	58	60
Апрель	65	51	67	58
Май	51	53	58	57
Июнь	46	68	49	51
Июль	45	52	71	58
Август	59	71	58	54
Сентябрь	60	75	67	63
Октябрь	58	72	60	60
Ноябрь	64	84	62	82
Декабрь	75	80	74	76
Среднее	62	70	64	65

*Источник: Составлено авторами. Source: compiled by the author.

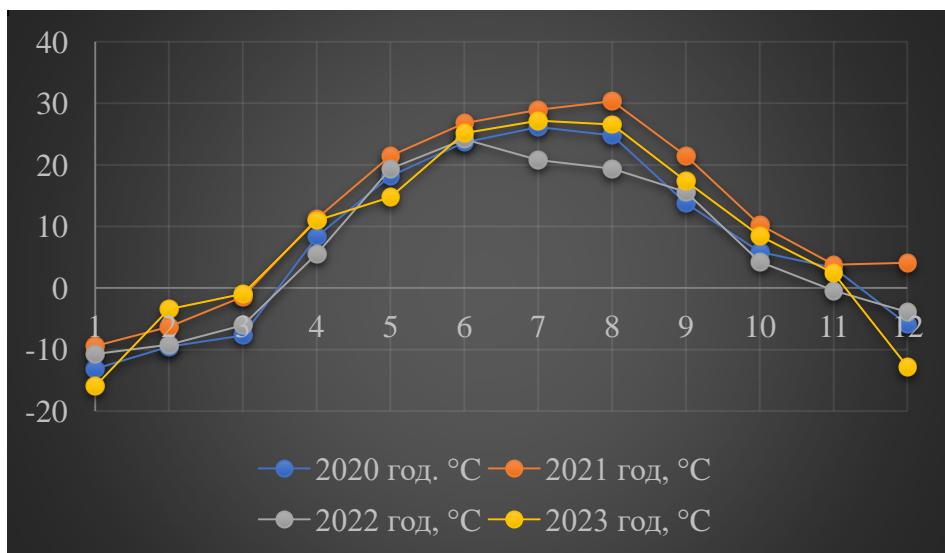


Рис. 2. Климатические графики температур воздуха за четырехлетний период Fig. 2. Climatic charts of air temperatures over a four-year period

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

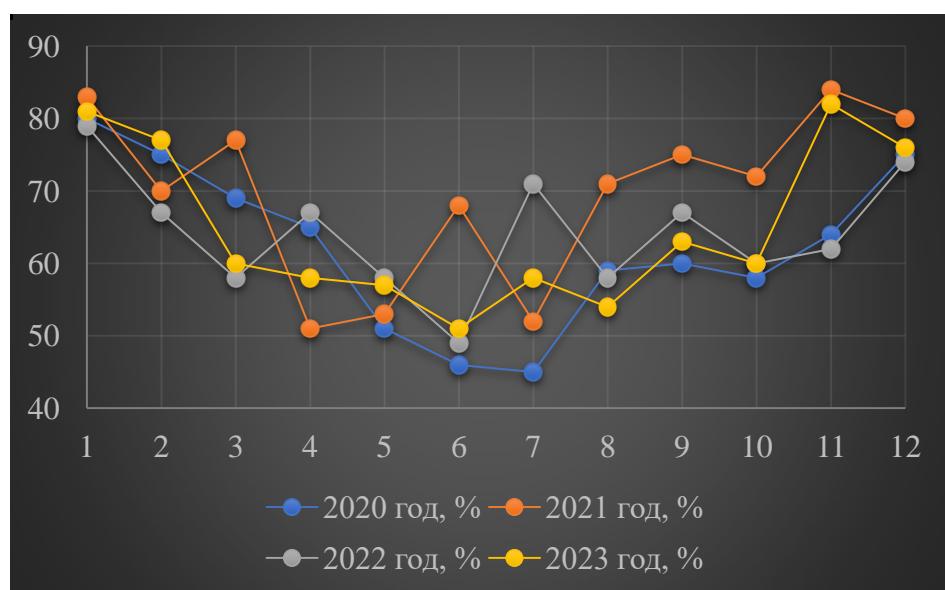


Рис. 3. Многолетний график изменения уровня влажности воздуха Fig. 3. Multi-year graph of changes in air humidity levels

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Для определения предполагаемого месячного потребления электроэнергии целесообразно разработать систематизированную методологию прогнозирования, основанную на комплексном подходе. Важно отметить, что одним из ключевых требований к данной работе является исключение использования дорогостоящих коммерческих программных продуктов, требующих приобретения лицензий. При этом разработанная методика должна быть самодостаточной и не зависеть от платного программного обеспечения, что обеспечит её доступность и возможность широкого практического применения.

Математическая основа прогнозирования строится на классической формуле экспоненциального сглаживания, которая для рассматриваемой задачи имеет следующий вид:

$$E_{ij}^{p.esa} = \alpha \cdot E_{i(j-1)} + (1 - \alpha) \cdot E_{i(j-1)}^{p.esa} \quad (1)$$

где $E_{ij}^{p.esa}$ – ожидаемый уровень потребления электроэнергии в i -м месяце j -го года;

$E_{i(j-1)}$ – зафиксированное потребление электроэнергии в соответствующем месяце предыдущего года; $E_{i(j-1)}^{p.esa}$ – прогнозируемое значение объема потребления электроэнергии

в i -ом месяце ($j-1$)-го года (предыдущего года); α – подбираемый для прогноза коэффициент. Из первого уравнения системы (1) выразим коэффициент α_{1j} :

$$\alpha_{1i} = \frac{E_{i(j-2)} - \alpha_{2i} \cdot \Delta t_{i(j-3)}}{E_{i(j-3)}} \quad (2)$$

Для реализации комплексного метода при прогнозировании потребления электроэнергии необходимо правильно задать начальные условия. В нашем случае, используя данные за 2020-2023 годы, начальное прогнозное значение для каждого месяца рассчитывается как среднее арифметическое потребления электроэнергии за эти три года:

$$E_{1.20}^{p.esa} = \frac{E_{1.20} + E_{1.21} + E_{1.23}}{3} \quad (3)$$

Заменяя выражение (2) в уравнении (3) и проводя элементарные преобразования, мы получаем формулу для определения коэффициента α_{1j} :

$$\alpha_{2i} = \frac{E_{i(j-1)} \cdot E_{i(j-3)} - E_{i(j-2)}^2}{\Delta t_{i(j-2)} \cdot E_{i(j-3)} - \Delta t_{i(j-3)} \cdot E_{i(j-2)}} \quad (4)$$

Этот коэффициент входит в выражение (2), поэтому после соответствующей подстановки формула для расчета коэффициента α_{1j} примет вид:

$$\alpha_{1i} = \frac{E_{i(j-2)} - \frac{(E_{i(j-1)} \cdot E_{i(j-3)} - E_{i(j-2)}^2) \cdot \Delta t_{i(j-3)}}{\Delta t_{i(j-2)} \cdot E_{i(j-3)} - \Delta t_{i(j-3)} \cdot E_{i(j-2)}}}{E_{i(j-3)}} \quad (5)$$

В результате подстановки формул (4) и (5) в уравнение (3) получается итоговая формула, позволяющая рассчитать прогнозируемое потребление электроэнергии абонентами Альметьевской городской электросети. Данная формула применима для следующих месяцев: марта, апреля, июля и сентября.

$$E_{ij}^{p.r} = \frac{E_{i(j-1)}}{E_{i(j-3)}} \cdot \left[E_{i(j-2)} - \frac{(E_{i(j-1)} \cdot E_{i(j-3)} - E_{i(j-2)}^2) \cdot \Delta t_{i(j-3)}}{\Delta t_{i(j-2)} \cdot E_{i(j-3)} - \Delta t_{i(j-3)} \cdot E_{i(j-2)}} \right] + \frac{(E_{i(j-1)} \cdot E_{i(j-3)} - E_{i(j-2)}^2) \cdot \Delta t_{i(j-1)}}{\Delta t_{i(j-2)} \cdot E_{i(j-3)} - \Delta t_{i(j-3)} \cdot E_{i(j-2)}} \quad (6)$$

Формула, позволяющая рассчитать ожидаемое изменение потребления электроэнергии в январе относительно показателей прошлого года, описывается следующей формулой:

$$E_{1.23}^{p.esd} = \alpha \cdot \Delta E_{1.22} + \alpha \cdot (1 - \alpha) \cdot \Delta E_{1.21} + \frac{(1 + \alpha)^2 \cdot (\Delta E_{1.22} + \Delta E_{1.21})}{2} \quad (7)$$

Прогнозируемое потребление электроэнергии (по абсолютной величине) составит:

$$E_{1.23}^{p.esd} = E_{1.22} + \Delta E_{1.23}^{p.esd} \quad (8)$$

Обобщая формулы, можно записать общее выражение для прогноза потребления электроэнергии в i -ом месяце j -го года:

$$E_{ij}^{p.esd} = E_{i(j-1)} + \alpha \cdot \Delta E_{i(j-1)} + \alpha \cdot (1 - \alpha) \cdot \Delta E_{i(j-2)} + \frac{(1 - \alpha)^2 \cdot (\Delta E_{i(j-1)} + \Delta E_{i(j-2)})}{2} \quad (9)$$

где: $\Delta E_{i(j-2)} = E_{i(j-2)} - E_{i(j-3)}$; $\Delta E_{i(j-1)} = E_{i(j-1)} - E_{i(j-2)}$.

В соответствии с (8) и (9) расчет объемов потребления в январе, феврале, октябре и ноябре должен производиться по формуле:

$$E_{ij}^{p.com} = \frac{E_{i(j-1)}}{E_{7(j-1)}} \cdot E_{7j}^{p.r} \quad (10)$$

Для составления прогноза на июнь и ноябрь целесообразно применять следующую формулу:

$$E_{ij}^{p.com} = \frac{E_{i(j-1)}}{E_{5(j-1)}} \cdot E_{5j}^{p.r} \quad (11)$$

Проведённый анализ показал, что среднее квадратичное отклонение прогноза потребления электроэнергии за 2024 год составило величину равную 1.813. Важно отметить, что при выполнении расчетов был выбран коэффициент сглаживания $\alpha = 0,3$ на основе таблицы 5. Такой выбор параметра позволил достичь сопоставимого уровня относительной погрешности прогноза обеспечив тем самым стабильность оценок в указанный период.

Таблица 5
Table 5

Прогноз энергопотребления 2024 года, выполненный методом экспоненциального сглаживания с применением комбинированного анализа

2024 energy consumption forecast based on exponential smoothing and difference analysis

Месяц	Прогноз потребления электроэнергии, кВтч	Фактическое потребление электроэнергии, кВтч	Относительная погрешность прогноза δE_{ij}^{esd} , %
Январь	126159179	123446706	2,15
Февраль	103448799	105199071	-1,69
Март	104963307	102361499	2,48
Апрель	98774998	97909089	0,88
Май	95792268	96702581	-0,95
Июнь	89367805	88613567	0,84
Июль	84290129	85950360	-1,97
Август	83808515	85929641	-2,53
Сентябрь	88726167	90365373	-1,85
Октябрь	110938909	108024646	2,43
Ноябрь	108039277	106587164	1,34
Декабрь	120162536	121377826	-1,01

*Источник: Составлено авторами. Source: compiled by the author.

Результаты и обсуждение (Results and discussions)

На основе проведенного исследования становится возможным создание систематизированной методики прогнозирования потребления электроэнергии абонентами сетевой компании «Альметьевские электрические сети». Разработанная методология может быть представлена в форме четкого последовательного алгоритма вычислений, который наглядно продемонстрирован на рисунке 4.

Алгоритм позволяет структурировать процесс прогнозирования и сделать его максимально прозрачным и воспроизводимым для практического применения специалистами компании и обеспечивает последовательное выполнение всех необходимых расчетов с учетом специфики электротехнического комплекса.

Исходными данными для расчета являются реальные объемы потребления электрической энергии за три предыдущие года $E_{i(j-3)}; E_{i(j-2)}; E_{i(j-1)}$, а также среднемесячные температуры окружающего воздуха за четыре предыдущие года $t_{i(j-4)}; t_{i(j-3)}; t_{i(j-2)}; t_{i(j-1)}$. Данная методика и алгоритм предполагают проведение анализа исходных данных $E_{i(j-3)}; E_{i(j-2)}; E_{i(j-1)}$ поквартально и, в случаях обнаружения случайных аномалий (отклонений от линейных зависимостей, необъяснимых обычными факторами), предусматривают процедуру сглаживания путем усреднения показателей. Финальный этап расчета включает составление прогноза потребления электроэнергии на август и сентябрь согласно формуле (11). Для корректного выполнения прогноза необходимо дождаться поступления реальных данных об объеме потребления E_{5j} за май текущего года.

Особого внимания заслуживает тот факт, что разработанная методика прогнозирования потребления электроэнергии абонентами сетевой компании характеризуется высокой степенью детализации и не требует использования дорогостоящих специализированных программ. Все необходимые расчеты можно выполнить с помощью обычного калькулятора. При этом процесс прогнозирования легко автоматизируется посредством электронных таблиц, таких как Excel, входящих в пакет Microsoft Office и предустановленных на большинстве персональных компьютеров.

Результаты сравнительного анализа погрешностей различных моделей прогнозирования наглядно представлены в таблице 6, что позволяет объективно оценить преимущества каждого метода.

Анализ данных таблицы показывает значительное преимущество комбинированного метода прогнозирования: его применение позволяет уменьшить погрешность более чем в 2 раза по сравнению с традиционными методами.

Таблица 6
Table 6

Сравнение относительных погрешностей прогнозирования разными методами на 2024 год

Comparison of relative forecasting errors using different methods for 2024 year

	Минимальная относительная погрешность прогноза $\delta E_{ij}^Y, \%$	Средняя относительная погрешность прогноза $\delta E_{ij}^Y, \%$	Максимальная относительная погрешность прогноза $\delta E_{ij}^Y, \%$
Классический метод прогнозирования (экспоненциальное сглаживание)	0,047	2,098	4,869
Классический метод прогнозирования (регрессионный анализ)	0,403	3,209	9,264
Метод прогнозирования, применяемый на предприятиях	0,043	1,959	6,490
Предлагаемый метод прогнозирования	0,84	1,676	2,53

*Источник: Составлено авторами. Source: compiled by the author.

Важно отметить прямую зависимость между затратами предприятия и точностью прогнозирования: чем меньше погрешность, тем ниже издержки. Следовательно, переход на комбинированный метод прогнозирования обеспечит сокращение затрат, связанных с ошибками в прогнозах, минимум в 2 раза.

Выводы (Conclusions)

1. На основе исходных данных об энергопотреблении «Альметьевских электрических сетей» и метеорологических факторов был выполнен комплексный анализ. Его результатом стало выявление устойчивой статистической взаимосвязи между объемами потребления в разные месяцы, что подтверждено расчетами коэффициентов корреляции.
2. На основе выявленных функциональных связей между месячными объемами энергопотребления построены регрессионные уравнения. Применение данной модели обеспечивает прогнозирование с общей погрешностью, не превышающей 3%.
3. Предложена методика прогноза энергопотребления для электротехнического комплекса компании, обеспечивающая точность с максимальной погрешностью 2,53%.
4. Разработан структурированный алгоритм, устанавливающий строгую последовательность действий для вычисления прогнозируемых объемов потребления электроэнергии пользователями комплексным способом.
5. Высокий уровень детализированности предложенной методики позволяет производить необходимые расчёты с использованием стандартных инженерных подходов, избавляя от потребности в специальном программном обеспечении.

Полученные результаты представляют собой целостный научный подход к прогнозированию потребления электроэнергии, отличающийся высокой точностью и практичностью применения.

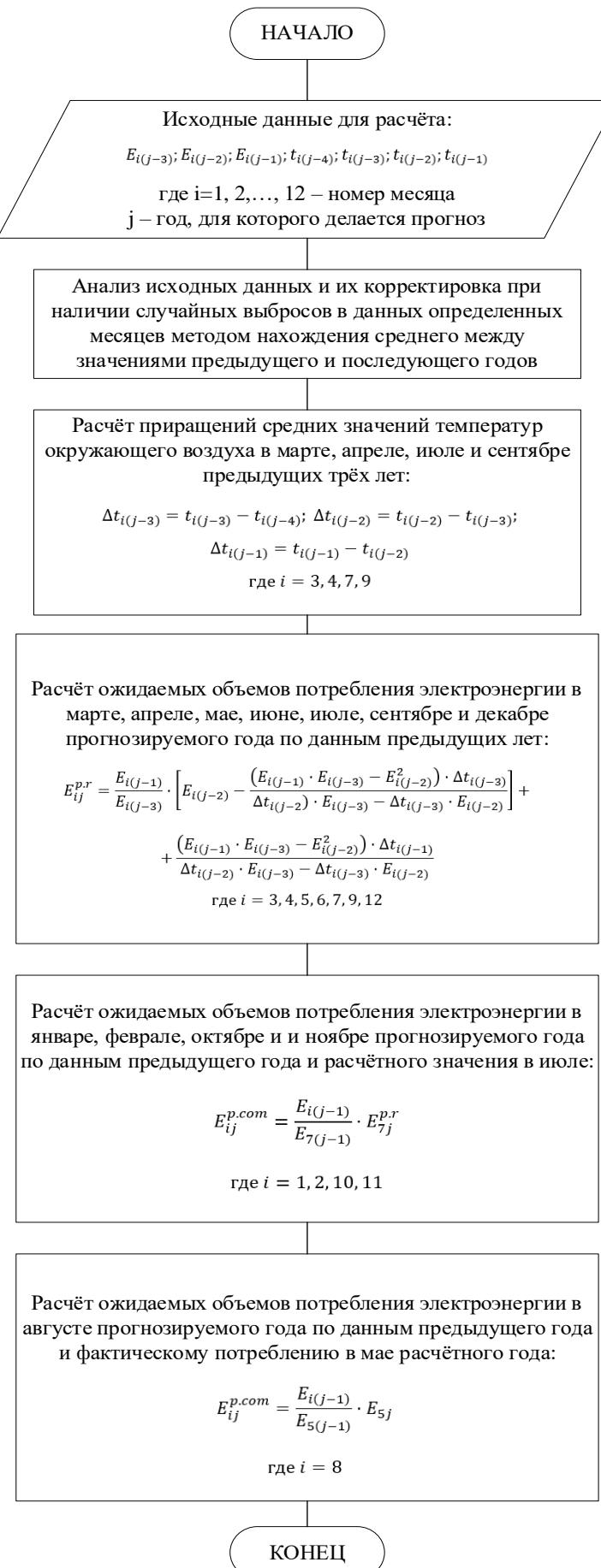


Рис. 4. Алгоритм вычисления прогнозируемых объемов потребления электрической энергии Fig. 4. The algorithm for calculating the projected volumes of electric energy consumption

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Литература

1. Бончук И.А., Ерохин П.М. Оперативное прогнозирование потребления мощности в изолированных энергосистемах // Электричество. 2022. №. 1. С. 24-34.
2. Моттаева А.Б. Актуальные тренды и перспективы развития энергетики в России // Вестник Сургутского государственного университета. 2024. Т. 12. №. 4. С. 77-91.
3. Полуянович Н.К., Дубяго М.Н. Оценка воздействующих факторов и прогнозирование электропотребления в региональной энергосистеме с учетом режима ее эксплуатации // Известия Южного федерального университета. Технические науки. 2022. №. 2 (226). С. 31-46.
4. Солуянов Ю.И., Федотов А.И., Ахметшин А.Р. и др. Определение расчетных электрических нагрузок зарядной инфраструктуры для электромобилей, интегрированной в электрические установки жилых и общественных зданий // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2024. Т. 26. № 6. С. 94-107.
5. Kapp S., Choi J.K., Hong T. Predicting industrial building energy consumption with statistical and machine-learning models informed by physical system parameters // Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2023. Т. 172. pp. 113.
6. Федотов А.И., Ахметшин А.Р., Федотов Е.А. и др. Суммирование электрических нагрузок жилых и общественных зданий жилого комплекса // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2025. Т. 27, № 2. С. 76-89.
7. Булатов Ю.Н. Крюков А.В., Суслов К.В. Исследование режимов работы изолированной системы электроснабжения с управляемыми установками распределенной генерации, накопителями электроэнергии и двигательной нагрузкой // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2021. Т. 23, № 5. С. 184-194.
8. Peng L., Wang L., Xia D., et al. Effective energy consumption forecasting using empirical wavelet transform and long short-term memory // Energy. 2022. Т. 238. pp. 121.
9. Ghazal T.M. Energy demand forecasting using fused machine learning approaches // Intelligent Automation & Soft Computing. 2022. Т. 31. №. 1. pp. 539-553.
10. Mounir N., Ouadi H., Jrhilifa I. Short-term electric load forecasting using an EMD-BI-LSTM approach for smart grid energy management system // Energy and Buildings. 2023. Т. 288. pp. 113-122.
11. Кокшаров В.А. Концептуальный подход к реализации стратегии эффективного использования энергетических ресурсов на промышленном предприятии // Инновации и инвестиции. 2021. №. 7. С. 60-64.
12. Ванин А.С., Иванов Т.Ю. Исследование задачи краткосрочного прогнозирования графика нагрузки электроэнергетической системы // Актуальные проблемы науки и техники. 2022. С. 353-354.
13. Гужов С.В. О прогнозировании спроса на электроэнергию энергосистемами регионов Российской Федерации с применением искусственных нейронных сетей // Известия Транссиба. 2020. №. 1 (41). С. 133-140.
14. Хомутов С.О., Серебряков Н.А. Создание нейросетевой математической модели краткосрочного прогнозирования электропотребления электротехнического комплекса участка районных электрических сетей 6-35 кВ // Инновационные транспортные системы и технологии. 2020. Т. 6. №. 1. С. 80-91.
15. Brito T.C., Brito M.A. Forecasting of energy consumption: Artificial intelligence methods // 2022 17th Iberian Conference on Information Systems and Technologies (CISTI). IEEE, 2022. pp. 1-4.
16. Батуева Д.Е. Прогноз энергопотребления в условиях изменяющегося климата // Нефтяная столица. 2020. С. 236-239.
17. Kim D.Y., Kim Y.H., Kim B.S. Changes in wind turbine power characteristics and annual energy production due to atmospheric stability, turbulence intensity, and wind shear // Energy. 2021. Т. 214. pp. 119.
18. Блохин А.В. Влияние временных и климатических факторов на потребление электроэнергии // Информационные технологии в науке и производстве. 2022. С. 42-50.
19. Русина А.Г. Прогнозирование суточного графика электропотребления рабочих дней с учетом метеофакторов для центральной энергосистемы Монголии // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2022. Т. 24. №. 2. С. 98-107.

Авторы публикации

Борисов Данил Александрович – аспирант Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ), г. Казань, Россия. *borisovdani49@gmail.com*

Максимов Виктор Владимирович – канд. техн. наук, заведующий кафедрой «Электроэнергетические системы и сети» (ЭСиС) Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ), г. Казань, Россия.

Воркунов Олег Владимирович – канд. техн. наук, доцент кафедры «Электроэнергетические системы и сети» (ЭСиС) Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ), г. Казань, Россия.

Куракина Ольга Евгеньевна – канд. техн. наук, доцент кафедры «Электроэнергетические системы и сети» (ЭСиС) Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ), г. Казань, Россия.

References

1. Bonchuk IA, Erokhin PM. Operational forecasting of power consumption in isolated power systems. *Electricity*. 2022; 1:24-34.
2. Mottaeva AB. Current trends and prospects of energy development in Russia. *Bulletin of Surgut State University*. 2024; 4:77-91.
3. Poluyanovich NK, Dubyago MN. Assessment of influencing factors and forecasting of power consumption in the regional energy system, taking into account its operating mode // *Izvestiya Yuzhnogo federalnogo universiteta. Technical sciences*. 2022. No. 2 (226). pp. 31-46.
4. Soluyanov YuI, Fedotov AI, Akhmetshin AR and others. Determination of calculated electrical loads of charging infrastructure for electric vehicles integrated into electrical installations of residential and public buildings. *News of higher educational institutions. Energy problems*. 2024; 6: 94-107.
5. Kapp S, Choi JK, Hong T. Predicting industrial building energy consumption with statistical and machine-learning models informed by physical system parameters. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2023; 172:113.
6. Fedotov AI, Akhmetshin AR, Fedotov EA and others. Summation of electrical loads of residential and public buildings of a residential complex. *News of higher educational institutions. Energy problems*. 2025; 2:76-89.
7. Bulatov YuN Kryukov AV, Suslov KV Investigation of operating modes of an isolated power supply system with controlled distributed generation units, electric power storage and propulsion load. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Energy problems*. 2021; 5:184-194.
8. Peng L, Wang L, Xia D, et al. Effective energy consumption forecasting using empirical wavelet transform and long short-term memory. *Energy*. 2022; 238:121.
9. Ghazal TM. Energy demand forecasting using fused machine learning approaches. *Intelligent Automation & Soft Computing*. 2022; 1:539-553.
10. Mounir N, Ouadi H, Jrhilifa I. Short-term electric load forecasting using an EMD-BI-LSTM approach for smart grid energy management system. *Energy and Buildings*. 2023; 288:113-122.
11. Koksharov VA. A conceptual approach to the implementation of a strategy for the efficient use of energy resources in an industrial enterprise. *Innovations and investments*. 2021; 7:60-64.
12. Vanin AS, Ivanov TY. Investigation of the problem of short-term forecasting of the load schedule of the electric power system. *Actual problems of science and technology*. 2022; 353-354.
13. Guzhov SV. On forecasting electricity demand by the energy systems of the regions of the Russian Federation using artificial neural networks. *Izvestiya Transsib*. 2020; 1(41):133-140.
14. Khomutov SO, Serebryakov NA. Creation of a neural network mathematical model for short-term forecasting of electrical consumption of the electrical complex of the district electrical networks 6-35 kV. *Innovative transport systems and technologies*. 2020; 1:80-91.
15. Brito TC, Brito MA. Forecasting of energy consumption: Artificial intelligence methods. 2022 *17th Iberian Conference on Information Systems and Technologies (CISTI), IEEE*. 2022;1-4.
16. Batueva DE. Forecast of energy consumption in a changing climate. *Oil Capital*. 2020; 236-239.
17. Kim DY, Kim YH, Kim BS. Changes in wind turbine power characteristics and annual energy production due to atmospheric stability, turbulence intensity, and wind shear. *Energy*. 2021;214:119.
18. Blokhin AV. The influence of temporal and climatic factors on electricity consumption. *Information technologies in science and production*. 2022;42-50.
19. Rusina AG. Forecasting the daily schedule of power consumption of working days, taking into account meteorological factors for the central energy system of Mongolia. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Energy problems*. 2022;2:98-107.

Authors of the publication

Danil A. Borisov – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia.
borisovdanil49@gmail.com

Victor V. Maksimov – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia.

© Борисов Д.А., Максимов В.В., Воркунов О.В., Куракина О.Е.

Oleg V. Vorkunov – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia.

Olga E. Kurakina – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia.

Шифр научной специальности: 2.4.3 Электроэнергетика

Получено

20.11.2025 г.

Отредактировано

01.12.2025 г.

Принято

03.12.2025 г.