

ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ



УДК 621.311

DOI:10.30724/1998-9903-2025-27-3-23-37

КЛАССИФИКАЦИЯ И ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ ЭЛЕКТРОПОТРЕБЛЕНИЯ ЧАСТНОЙ ЖИЛОЙ ЗАСТРОЙКИ НА ОСНОВЕ МЕТОДОВ СТАТИСТИЧЕСКОГО АНАЛИЗА

Капанский А.А., Павлов В.В., Зализный Д.И., Веремеева Д.И.

Гомельский государственный технический университет им. П.О. Сухого (Беларусь),
г. Гомель, Республика Беларусь
kapanski@mail.ru

Резюме: *АКТУАЛЬНОСТЬ.* Рост электропотребления в частном жилом секторе, связанный с увеличением энергоиспользования в том числе на обогрев зданий, приводит к возрастанию нагрузок на линии электропередачи 0,4 кВ. Традиционные типовые графики нагрузок не всегда отражают современные условия и особенности потребления, что создаёт риски неверной оценки пропускной способности электрической сети и требует более точного моделирования режимов работы электросетей. *ЦЕЛЬ.* Разработать подходы к классификации потребителей и выявить статистически обоснованные закономерности электропотребления в частной жилой застройке для последующего расчёта режимов работы в электрических сетях. *МЕТОДЫ.* Для анализа использовались данные получасового электропотребления 42 частных домов, собранные из АСКУЭ. Проведена очистка от пропусков и выбросов методом трёх сигм, а также формирование тепловых карт для выявления нерепрезентативных потребителей. Статистическая значимость различий установлена посредством дисперсионного анализа (ANOVA) и теста Тьюки. На основе медианных значений потребления сформированы группы с низким и высоким уровнем энергоиспользования. При визуализации и обработке данных применялись MS Excel, Python (библиотеки Pandas, NumPy, SciPy), а также пакет Statistica. *РЕЗУЛЬТАТЫ.* Анализ подтвердил наличие статистически значимых различий в электропотреблении между большинством домов ($F=2065,4$, $p<0,001$). Тест Тьюки показал, что внутри каждой группы дома характеризуются относительно стабильными значениями энергопотребления, однако в межгрупповом сравнении расход электроэнергии существенно варьируется. По результатам исследования выделены две группы: с «низким» и «высоким» уровнем потребления. Для группы с высоким уровнем выявлены ярко выраженные вечерние пики (18:00–22:00), тогда как в группе с низким потреблением профиль нагрузки более равномерен. *ЗАКЛЮЧЕНИЕ.* Применение методов статистического анализа электропотребления позволило упростить классификацию домов до двух основных групп и сформировать типовые профили потребления. Эти результаты интегрированы в программное обеспечение LineCapacity, что облегчает расчёт режимов работы электросетей и способствует снижению неверной оценки запаса передаваемой мощности. Планируется перспективное направление исследований, сосредоточенное на расширении набора данных по электропотреблению жилых домов. Это позволит учитывать влияние сезонных факторов, а также разработать механизмы имитационного моделирования энергоиспользования различных групп потребителей.

Ключевые слова: электропотребление; дисперсионный анализ (ANOVA); статистический анализ; классификация потребителей; частный жилой фонд; структурные различия потребителей; статистическое моделирование; методы анализа энергопотребления; идентификация групп потребителей.

Для цитирования: Капанский А.А., Павлов В.В., Зализный Д.И., Веремеева Д.И. Классификация и исследование закономерностей электропотребления частной жилой застройки на основе методов статистического анализа // Известия высших учебных

CLASSIFICATION OF CONSUMERS AND ANALYSIS OF ELECTRICITY CONSUMPTION PATTERNS BASED ON VARIANCE ANALYSIS METHODS

Kapansky A.A., Pavlov V.V., Zalizny D.I., Veremeeva D.I.

Gomel State Technical University named after P.O. Sukhoi, Gomel, Republic of Belarus
kapanski@mail.ru

Abstract: *RELEVANCE.* The increasing electricity consumption in the private residential sector, driven in part by the growing use of electric heating, is leading to higher loads on 0.4 kV power transmission lines. Traditional standardized load profiles do not always reflect modern consumption patterns and conditions, which creates risks of inaccurate assessments of the electrical grid's capacity and necessitates more precise modeling of grid operating conditions. *PURPOSE.* To develop approaches for classifying consumers and identifying statistically significant patterns in electricity consumption in private residential areas for subsequent calculation of grid operating conditions. *METHODS.* The analysis was based on half-hourly electricity consumption data from 42 private houses, collected via an Automated Meter Reading and Management System (AMRMS). The data was cleaned using the three-sigma rule to remove gaps and outliers, and heat maps were used to identify non-representative consumers. The statistical significance of differences was determined using analysis of variance (ANOVA) and Tukey's test. Based on median consumption values, consumer groups were formed (low and high electricity consumption). Data processing and visualization were performed using MS Excel, Python (Pandas, NumPy, SciPy libraries), and the Statistica software package. *RESULTS.* The analysis confirmed statistically significant differences in electricity consumption between most of the houses ($F = 2065.4$, $p < 0.001$). Tukey's test showed that within each group, homes exhibited relatively stable energy consumption values, while intergroup comparisons revealed substantial variations in electricity usage. As a result of the study, two consumer types were identified: "low" and "high" consumption groups. The high-consumption group exhibited distinct evening peaks (18:00–22:00), whereas the low-consumption group had a more evenly distributed load profile. *CONCLUSION.* The application of statistical analysis methods to electricity consumption data enabled the simplification of household classification into two main groups and the development of typical consumption profiles. These results were integrated into the LineCapacity software, facilitating grid operation calculations and reducing the risk of misjudging the available power transmission capacity. A promising research direction is planned, focusing on expanding the dataset on residential electricity consumption. This will allow for the consideration of seasonal factors and the development of simulation modeling mechanisms for various consumer groups.

Keywords: *electricity consumption; analysis of variance (ANOVA); statistical analysis; consumer classification; private housing stock; structural differences in consumers; statistical modeling; methods of energy consumption analysis; identification of consumer groups.*

For citation: Kapansky A.A., Pavlov V.V., Zalizny D.I., Veremeeva D.I. Classification of consumers and analysis of electricity consumption patterns based on variance analysis methods. *Power engineering: research, equipment, technology.* 2025; 27 (3): 23-37. doi: 10.30724/1998-9903-2025-27-3-23-37.

Введение (Introduction)

Одним из ключевых аспектов эффективного управления энергоснабжением жилых районов является прогнозирование пропускной способности электрических сетей, что приобретает особую актуальность в контексте непрерывного развития электрификации энергосистем России и Беларуси [1]. Для последней это особенно важно в условиях, когда энергетический сектор претерпевает значительные изменения, связанные со строительством атомной электростанции. Это приводит к увеличению электрогенерирующих мощностей в системе и требует наращивания потребления электроэнергии в различных отраслях экономики, в том числе и в частном жилом секторе.

Однако такая стратегия развития энергетики из-за увеличения нагрузки на низковольтную инфраструктуру электроснабжения сопровождается определенными ограничениями. Линии электропередач часто спроектированы и построены в соответствии со стандартами и потребностями, существовавшими на момент их создания. Это означает, что пропускная способность ЛЭП может не соответствовать новым требованиям, вытекающим из увеличения общей нагрузки и изменения характера потребления, к примеру, связанного с установкой индивидуальной системы электрообогрева. Кроме того, важно учитывать физический износ и устаревание инфраструктуры, что также может влиять на пропускную способность электрической сети.

Понимание особенностей электропотребления в частной жилой застройке позволяет выделить ключевые характеристики для классификации потребителей и использовать эти данные при планировании режимов работы электрических сетей, снижая тем самым риски перегрузок и аварий. Этому способствуют современные методы статистического анализа, в том числе имитационное моделирование электрических нагрузок, которое не только помогает оценить текущую загрузку сети, но и предсказать будущие изменения. Комплексное изучение закономерностей электропотребления позволяет выявить общие тенденции и сгруппировать потребителей на основе схожих статистических свойств. Это, в свою очередь, позволяет уменьшить количество разнообразных форм типовых графиков электропотребления и использовать в анализе усреднённые групповые свойства, что значительно упрощает моделирование энергетических процессов. В этой связи *цель исследования* заключается в разработке подходов к классификации потребителей частной жилой застройки и выявлению закономерностей электропотребления на основе статистического анализа данных для расчета режимов работы и оценки пропускной способности электрических сетей в условиях наращивания электропотребления.

Данное исследование выполнено в рамках НИР «Разработка методики оценки пропускной способности электрических сетей 0,4 кВ в условиях роста электропотребления бытовых потребителей частного жилого фонда». *Практическая значимость* исследования заключается в интеграции результатов в программное обеспечение LineCapacity, разработанное в ходе выполнения научно-исследовательской работы. Это позволило упростить классификацию потребителей до двух уровней: с комплексным использованием электроэнергии (КИЭ) и без КИЭ. Такой подход значительно сократил время на создание схемы электрической сети, улучшив эффективность обработки исходных данных потребителей на основе типовых свойств. *Научная значимость* исследования состоит в разработке методов сравнения схожести динамики электропотребления жилых домов и оценки их статистических различий. Основой работы являются методы корреляционного и дисперсионного анализа, критерий Тьюки и другие статистические инструменты. Полученные результаты демонстрируют возможности объединения данных по целевым группам, что упрощает анализ и способствует более точному расчету режимов работы электрических сетей в частном жилом фонде.

Литературный обзор (Literature Review)

В последние годы, с появлением больших объёмов данных, наблюдается рост исследований, связанных с изучением закономерностей электропотребления в различных отраслях экономики. Научные публикации также охватывают бытовую сферу, где оптимизация электропотребления становится всё более актуальной, особенно в условиях роста использования систем электрообогрева и кондиционирования воздуха, что ведёт к изменению структуры нагрузки жилого фонда. Важность таких исследований научным сообществом очевидна и в общем случае направлена на разработку механизмов планирования развития электрических сетей, что напрямую влияет на эффективность энергоснабжения. Далее рассматриваются основные направления в научной литературе, которые послужили отправной точкой для разработки методов статистического анализа электропотребления в частной жилой застройке в рамках данной публикации.

Одним из ключевых направлений является использование статистических методов для моделирования и прогнозирования графиков нагрузки. В работе [2] (*Trunova I. et al.*) предложены методы для расчёта дневных и вечерних максимумов нагрузки на основе алгоритма, который суммирует типовые графики с учетом вероятностных свойств электропотребления. Такое суммирование, по мнению авторов, позволяет улучшить точность прогноза пиков мощности по сравнению с традиционными методами расчета. Эти результаты важны для планирования и анализа предельных нагрузок в жилых и промышленных зонах. Подобные методы будут адаптированы в рамках нашего

исследования для улучшения предсказания нагрузки на линии электропередачи 0,4 кВ при выделении типовых профилей электропотребления.

Дополнительно исследование [3] (*Доброго К. В.*) делает акцент на более детализированном подходе к моделированию нагрузки, используя метод Монте-Карло и различные математические модели, которые позволяют учитывать не только временные, но и структурные изменения в потреблении электроэнергии. Методика, предложенная в [3], может быть полезной для более точного распределения нагрузки среди различных типов потребителей, таких как многоквартирные застройки или частные жилые дома, с учётом их индивидуальных особенностей потребления. Предложенный автором метод можно эффективно адаптировать для моделирования изменений нагрузки при росте электропотребления в частной застройке, учитывая актуальные особенности энергопотребления.

Стоит отметить, что приводимые в справочной литературе типовые графики нагрузок, основанные на исторических данных и стандартах, часто не соответствуют актуальному состоянию электропотребления, что подтверждается исследованиями, такими как [4] (*Демиденко А. С., Шведов Г. В.*), [5] (*Солуянов Ю. И. и др.*) и [6] (*Надтока И. И. и др.*). В статье [4] указывают на существенное несоответствие старых графиков с современным электропотреблением в многоквартирных домах, что обусловлено ростом числа электроприборов и изменениями в образе жизни потребителей. В свою очередь, в [5] при проведении анализа фактических электрических нагрузок многоквартирных домов г. Москвы были получены результаты, что нормативные значения удельных электрических нагрузок, указанные в стандарте, завышены более, чем в 2 раза. С целью корректировки удельных электрических нагрузок квартир в нормативных документах, было проведено исследование [6] электропотребления многоквартирных домов с электроплитами в Московском регионе за период с 2012 по 2021 г. Результаты анализа показали относительную устойчивость средних и максимальных удельных нагрузок на квартиру и коэффициентов, характеризующих форму графиков нагрузки. Приведенные обзоры играют ключевую роль в исследовании, так как они подчёркивают важность анализа существующих закономерностей электрических нагрузок на актуальных данных. Это, в свою очередь, способствует разработке более точных и адаптированных подходов к классификации электропотребления в частной жилой застройке.

На электропотребление влияет множество факторов, один из таких – климатический. Так в статье [7] (*Капанский А. А.*) была проверена гипотеза, согласно которой изменение температуры воздуха и осадки оказывают воздействие на водопотребление и, следовательно, на энергозатраты. Полученные результаты свидетельствуют о том, что есть зависимость между ростом энергопотребления в связи с увеличением спроса на воду и повышением температуры наружного воздуха. При отрицательных температурах явной связи не наблюдалось, зато была выявлена корреляция между температурой и расходом электроэнергии, это объясняется дополнительными затратами на поддержание системы водоснабжения в условиях холодного климата.

Другими важными факторами является учёт социально-экономических характеристик и поведение потребителей. В работе [8] (*McLoughlin F. et al.*) рассматривается влияние характеристик жилья и жильцов Ирландии на поведение потребления электроэнергии путем анализа большого объема данных (более 3941 жилых домов), собранных в ходе энергетического обследования после подключения интеллектуальных счетчиков. В исследовании авторы использовали модель множественной линейной регрессии, где в качестве факторов рассматривался тип жилья, количество спален, возраст потребителей, состав домохозяйства, социальный класс, тип нагрева воды и приготовления пищи. Как показали результаты исследования все эти характеристики оказали существенное влияние на общее потребление электроэнергии в доме.

Аналогичные исследования отражены и в статье [9] (*Laicane I. et al.*), где приводятся результаты пилотного проекта JSC «Latvenergo», в котором 500 домохозяйств были оснащены умными электросчётчиками (целевая группа), а ещё 500 остались без такого оснащения (контрольная группа). В рамках исследования проверялась гипотеза о том, что основной фактор, влияющий на потребление, – это тип отопления домохозяйства, что стало основанием для классификации по следующим категориям: центральное отопление, отопление природным газом, котел на твердом топливе, электрическое отопление, тепловой насос и др. Для оценки факторов использовался метод множественной линейной регрессии. По результатам исследования было установлено, что

ключевыми факторами потребления электроэнергии являются общее количество электроприборов в домохозяйстве и общая площадь жилого дома.

Подобный подход был использован в работе [10] (*Sütterlin B. et al.*), где предложена сегментация потребителей на основе не только их поведенческих характеристик, но и отношения к энергосбережению. Важно, что такие исследования показывают, что поведение потребителей не всегда можно предсказать только с учётом технических характеристик обустройства дома, и многие факторы, такие как мотивация и социальная осведомлённость, могут оказать решающее влияние на потребление электроэнергии, что отражается в работе [11] (*L. Poznaka et al.*). Эти результаты исследований становятся особенно актуальным в задачах оптимизации электроэнергии при учёте потребителей, оснащённых современными энергоэффективными технологиями или системой умного дома.

В последние годы вопросу оптимизации электропотребления отводится особое внимание [12, 13, 14, 15, 16]. В работах [17] (*Усова А. С., Хмелевой С. В.*), [18] (*Yahia Z., Pradhan A.*) и [19] (*Chen S. et al.*) рассматриваются подходы к оптимизации использования бытовых приборов за счет изменения тарифов оплаты за электроэнергию. В [17] применяют вид генетического алгоритма для оптимизации потребления электроэнергии многоквартирного дома с учётом ограничений по максимальному пиковому энергопотреблению. В [18] задача планирования нагрузки решается с учетом стимулов и неудобств потребителя. Метод планирования нагрузки в жилых помещениях в режиме реального времени предлагается и в [19], в этой работе разрабатывается персонализированная оптимальная стратегия эксплуатации бытовой техники. Эти исследования показывают, что управление нагрузкой может быть осуществлено не только за счёт трансформации поведенческих свойств электроиспользования, но и с помощью интеграции динамических тарифов, что способствует снижению пиковых нагрузок в энергетической системе в целом. Данные результаты имеют ключевое значение для планирования развития электрических сетей, так как позволяют разрабатывать стратегии управления пиковыми нагрузками. Однако эффективность таких методов напрямую зависит от точности классификации потребителей, что делает важным применение статистических методов анализа для выявления целевых групп с различными характеристиками потребления.

Таким образом, классификация электропотребления жилого фонда является важным аспектом современных научных исследований, направленных на повышение энергоэффективности и оптимизацию электрических сетей. В работах [20] (*Rafiq H. et al.*) и [21] (*Ramnath G. S. et al.*) предложены методы кластеризации потребителей на основе анализа их профилей нагрузки. Эти методы позволяют эффективно разделять потребителей на группы с похожими характеристиками потребления и применить к ним различные модели анализа данных. В [20] используя данные о системе кондиционирования, тип жилья, занятости жильцов методом k -средних сгруппировали потребителей. Использование метода самоорганизующихся карт Кохонена (нейронная сеть с обучением без учителя) и метода k -средних в [21] оказалось весьма успешным для кластеризации 225 домохозяйств. В результате авторами предложена классификация по уровню потребления: низкое, среднее, высокое и сверхвысокое, как показало исследование эта классификация четко зависит от социального класса, договорной мощности, количества комнат, числа жителей и типа тарифа за электроэнергию. В исследовании [22] (*C. Chen et al.*) была проведена классификация методом анкетирования по критериям количества поколений, живущих вместе, что характерно для сельской провинции в Китае, и их времени нахождения дома. Затем был проведен анализ влияния факторов на энергопотребление, таких как естественная освещенность, соотношение площади окна к площади стены, тип отопления и др. Результаты исследования показали, что не все факторы имеют значительное влияние и для разных классификационных моделей влияющими факторами были не одни и те же.

Совокупность рассмотренных исследований демонстрирует высокий уровень актуальности и значительный интерес к изучению свойств электропотребления жилого сектора. Однако вопросы, связанные с анализом электропотребления в частной жилой застройке, остаются недостаточно раскрытыми, особенно на территориях Беларуси и России. Дефицит системных исследований в этом направлении подчёркивает необходимость дополнительного изучения, что делает проводимое исследование особенно актуальным. На основе проведенного обзора литературы и выявленных особенностей электропотребления сформулированы следующие задачи исследования:

1. Анализ данных электропотребления частных жилых домов для выявления

характерных особенностей потребления.

2. Определение ключевых метрик, включая минимальные, максимальные и средние нагрузки жилого дома, а также среднеквадратическое отклонение потребления.

3. Выявление различий в электропотреблении для классификации потребителей и улучшения управления нагрузками.

Материалы и методы (Materials and methods)

Обработка и подготовка статистических данных

Объектом изучения выбрана типовая деревня Жлобинского района Гомельской области Республики Беларусь. В исследовании использованы данные получасового электропотребления 42 частных домов за период с августа по октябрь 2023 года. Эти данные были предоставлены энергоснабжающей организацией и собраны с автоматизированной системы АСКУЭ, что обеспечивало их высокую точность и достоверность. В общей сложности массив данных включал более 107 725 записей и создал значительную информационную базу для выявления закономерностей электропотребления в жилом секторе.

Вместе с тем, несмотря на высокую точность данных в ходе формирования статистики наблюдались пропуски значений, а также дома, имеющие периоды с отсутствующим электропотреблением. Для выделения таких потребителей получасовые данные приводились к суточному уровню агрегации и представлялись в виде тепловой карты, где электропотребление визуализировалось по периодам и домам в виде цветового градиента: от красного (низкое потребление) до зеленого (высокие значения потребления). Этот подход позволил быстро выявить нерепрезентативных потребителей, представляющих искажение общей картины электропотребления, и убрать их из дальнейшего анализа. В соответствии с заданными ограничениями из исходной статистики исключилось 12 жилых домов, где электропотребление преимущественно отсутствовало. Фрагмент информационной базы статистических данных электропотребления в широком формате представления представлен в таблице 1.

Таблица 1

Table 1

Фрагмент широкого формата временного статистического ряда электропотребления

A fragment of a wide format of a time statistical series of power consumption

Дата-время	дом 15	...	дом 98
14-08-2023- 00:30:00	0,07	...	0,03
14-08-2023- 01:00:00	0,14	...	0,04
...	...	...	...
07-10-2023- 23:00:00	0,12	...	0,04
07-10-2023- 23:30:00	0,06	...	0,07

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

После очистки нулевых статистических данных оставалось решить проблему наличия пропусков получасовых значений в оставшихся домах. Эти пропуски могли исказить результаты анализа, поэтому перед переходом к дальнейшим этапам исследования реализована операция по заполнению отсутствующих значений. Для этой цели использован метод подстановки, основанный на замене отсутствующих элементов в массиве данными из схожих временных периодов, где они присутствуют. Этот метод предполагает, что потребление электроэнергии в аналогичные часы разных дней для одного и того же дома остается относительно стабильным, и поэтому данные одного временного среза могут служить заменой для другого. Такой подход позволил сохранить структурную целостность данных и подготовить их к последующему этапу исследования, минимизируя искажения, которые могут возникнуть из-за неполноты значений.

Далее была проведена очистка временных рядов электропотребления от нетипичных данных. Удаление выбросов, способных существенно исказить результаты исследования, являлось важной частью обеспечения точности и надежности статистического анализа. В качестве метода цензурирования данных использовалось правило трёх сигм, которое применяется при анализе данных, соответствующих нормальному распределению [23]. Наши исследования подтвердили, что электропотребление жилого фонда преимущественно подчиняется этому распределению, что делает данный метод обоснованным. Применение данного подхода позволило минимизировать влияние экстремальных значений и повысить достоверность результатов. На рисунке 1 демонстрируется пример наблюдавшихся выбросов в данных для дома №15.

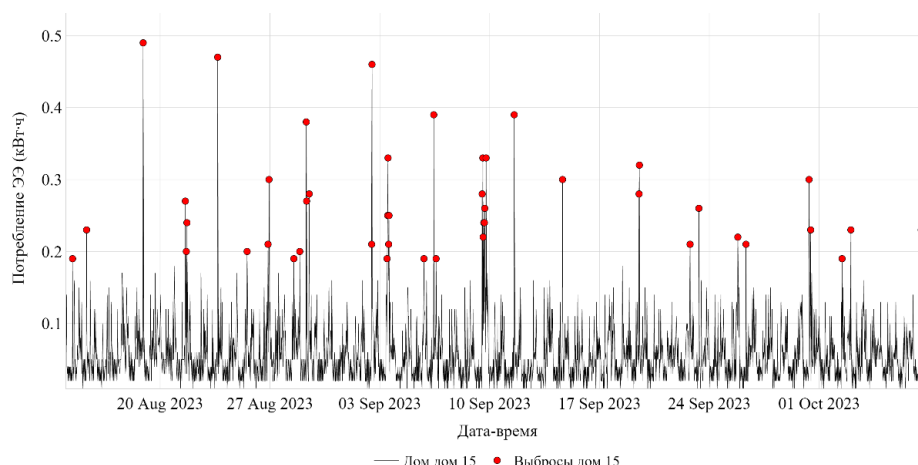


Рис. 1. Исключение выбросов методом трех сигм для дома №15 *Fig. 1. Elimination of emissions using the three sigma method for house No. 15*

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

Инструменты и методы анализа данных

В ходе исследования применялся широкий спектр статистических инструментов, обеспечивающих комплексную обработку и анализ данных электропотребления. Для формирования массива данных, предварительной обработки и построения тепловых карт электропотребления использовались электронные таблицы MS Excel. Первичная оценка схожести электропотребления между домами также проводилась с помощью встроенных инструментов анализа данных Microsoft Excel. Здесь же осуществлялось и графическое представление временных рядов и диаграмм. Для построения более сложных визуализаций применялись библиотеки Matplotlib и Plotly на языке Python.

Проверка статистической значимости различий электропотребления между домами осуществлялась в программном обеспечении Statsoft Statistica с применением встроенных инструментов для построения графиков средних значений по группам потребителей. Более сложные диаграммы и статистические тесты выполнялись в среде Jupyter Notebook. Статистические тесты дисперсионного анализа преимущественно выполнялись с использованием библиотеки SciPy. Дополнительно для оценки различий между отдельными домами применялся тест Тьюки (Tukey's HSD) из библиотеки Statsmodels. Помимо дисперсионного анализа, в исследовании использовались методы корреляционного анализа, реализованные в среде Python. Основными библиотеками для обработки данных стали Pandas и NumPy, с помощью которых выполнялись задачи по загрузке, очистке, агрегации и исходных статистических данных.

Для проведения теста ANOVA требовалась предварительная обработка данных с преобразованием их из широкого формата (таблица 1) в длинный (таблица 2). В исходном формате данные были организованы в виде отдельных векторов для каждого дома, где значения электропотребления располагались вдоль временной шкалы. В процессе преобразования каждая запись была приведена к форме, в которой каждая строка представляла собой уникальное наблюдение, включающее идентификатор дома, временную метку и соответствующее значение потребления электроэнергии.

Таблица 2
Table 2

Фрагмент перехода от широкого к длинному формату данных
A fragment of the transition from a wide to a long data format

Дата-время	Номер дома	Потребление электроэнергии, кВт·ч
14-08-2023- 00:30:00	дом 15	0,07
14-08-2023- 01:00:00	дом 15	0,14
	...	...
07-10-2023- 23:00:00	дом 98	0,04
07-10-2023- 23:30:00	дом 98	0,07

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

Результаты и обсуждение (Results and discussions)**Оценка статистических отличий электропотребления между домами**

Однофакторный дисперсионный анализ являлся ключевым инструментом для оценки статистически значимых различий в средних значениях электропотребления между жилыми домами. Суть проводимого исследования заключалась в проверке нулевой и альтернативной гипотез, которые формулировались следующим образом:

1) *Нулевая гипотеза (H0)*: предполагала, что нет никакой статистически значимой разницы в среднем электропотреблении между домами исследуемой деревни. Это означает, что любые наблюдаемые различия в данных могут быть результатом случайных изменений или ошибок измерения, а не системных различий.

2) *Альтернативная гипотеза (H1)*: предполагала обратное, то есть наличие статистически значимых различий в среднем потреблении электроэнергии хотя бы между некоторыми из исследуемых домов.

Для визуальной оценки распределения данных получасового электропотребления между домами построена диаграмма размаха (рисунок 2). Это позволило увидеть распределение данных по каждому дому, дополнительно методом межквартильного размаха выявить потенциальные выбросы и получить общее представление о вариативности потребления электроэнергии.

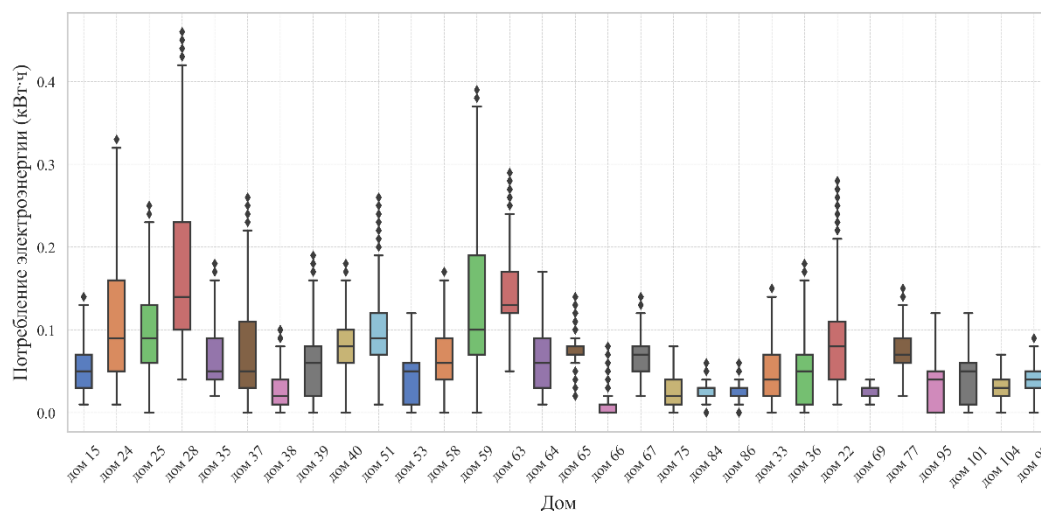


Рис. 2. Диаграмма размаха электропотребления жилых домов

Fig. 2. Diagram of the range of electricity consumption of residential buildings

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

Предварительное построение диаграммы размаха позволяет увидеть различия в уровнях потребления электроэнергии между жилыми домами и выявить диапазон их колебаний. В таблице 3 приведены статистические показатели получасового электропотребления для отдельных жилых домов. В таблице приведены следующие обозначения: mean – среднее значение, std – стандартное отклонение, min и max – минимальное и максимальные значения, 25%, 50% (медиана) и 75% – квартильные значения.

Таблица 3

Table 3

Фрагмент перехода от длинного широкого формата данных к длинному

A fragment of the transition from a long wide data format to a long one

Номер дома	mean	std	min	25%	50%	75%	max
дом 101	0,040	0,028	0	0,01	0,05	0,06	0,12
дом 104	0,027	0,017	0	0,02	0,03	0,04	0,07
дом 15	0,051	0,030	0,01	0,03	0,05	0,07	0,14
дом 22	0,091	0,064	0,01	0,04	0,08	0,11	0,28
дом 24	0,110	0,074	0,01	0,05	0,09	0,16	0,33
дом 25	0,097	0,052	0	0,06	0,09	0,13	0,25
дом 28	0,174	0,096	0,04	0,1	0,14	0,23	0,46
дом 33	0,049	0,035	0	0,02	0,04	0,07	0,15

Окончание таблицы 3

Номер дома	mean	std	min	25%	50%	75%	max
дом 35	0,068	0,038	0,02	0,04	0,05	0,09	0,18
дом 36	0,052	0,044	0	0,01	0,05	0,07	0,18
дом 37	0,076	0,061	0	0,03	0,05	0,11	0,26
дом 38	0,028	0,025	0	0,01	0,02	0,04	0,1
дом 39	0,060	0,043	0	0,02	0,06	0,08	0,19
дом 40	0,082	0,034	0	0,06	0,08	0,1	0,18
дом 51	0,102	0,053	0,01	0,07	0,09	0,12	0,26
дом 53	0,042	0,029	0	0,01	0,05	0,06	0,12
дом 58	0,065	0,036	0	0,04	0,06	0,09	0,17
дом 59	0,133	0,088	0	0,07	0,1	0,19	0,39
дом 63	0,149	0,047	0,05	0,12	0,13	0,17	0,29
дом 64	0,065	0,036	0,01	0,03	0,06	0,09	0,17
дом 65	0,082	0,022	0,02	0,07	0,07	0,08	0,14
дом 66	0,010	0,018	0	0	0	0,01	0,08
дом 67	0,068	0,025	0,02	0,05	0,07	0,08	0,14
дом 69	0,024	0,007	0,01	0,02	0,03	0,03	0,04
дом 75	0,025	0,019	0	0,01	0,02	0,04	0,08
дом 77	0,077	0,025	0,02	0,06	0,07	0,09	0,15
дом 84	0,029	0,011	0	0,02	0,03	0,03	0,06
дом 86	0,025	0,012	0	0,02	0,02	0,03	0,06
дом 95	0,035	0,031	0	0	0,04	0,05	0,12
дом 98	0,045	0,015	0	0,03	0,04	0,05	0,09

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

Исходя из проведенного предварительного анализа описательной статистики можно сделать выводы о том, что наблюдаются значительные различия в потреблении электроэнергии между разными домами. Такое поведение может быть обусловлено множеством факторов, включая объем дома, количество жильцов, используемое оборудование и др. Некоторые дома, такие как дом 28, 59 и 63, имеют как высокое среднее потребление, так и большую вариабельность потребления. Для домов с низким стандартным отклонением и узким межквартильным размахом, как дом 66 и дом 69, характерно более предсказуемое и стабильное изменения получасового электропотребления. Несмотря на это, большинство домов имеют средние показатели потребления в промежутке от 0,04 до 0,08 кВт·ч, что может отражать общие бытовые потребности типового домохозяйства и может быть использовано при формировании среднего профиля получасовой мощности. Результаты дисперсионного анализа (ANOVA) предоставлены в таблице 4, где разложены компоненты вариации: межгрупповая (между домами) и внутригрупповая (внутри каждого дома) дисперсия.

Таблица 4

Table 4

Фрагмент перехода от длинного широкого формата данных к длинному

A fragment of the transition from a long wide data format to a long one

Параметры	Степени - свободы	Потребление ЭЭ, кВт·ч - SS	Потребление ЭЭ, кВт·ч - MS	Потребление ЭЭ, кВт·ч - F	Потребление ЭЭ, кВт·ч - p-значение
Св. член	1	323,6	323,6	152501,3	0,001
Фактор: Дом	29	105,2	4,4	2065,4	0,001
Ошибка	65510	139,0	0,002	—	—
Всего	65534	244,2	—	—	—

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

Проведение дисперсионного анализа показало, что расход электроэнергии существенно различается между потребителями. То есть жилой дом как фактор оценки оказывает значимое влияние на электропотребление, о чем свидетельствуют высокая F -статистика (2065,4) и практически нулевое p -значение, подтверждающие статистическую значимость этих различий. Внутригрупповая изменчивость невелика ($MS = 0,002$), что

указывает на стабильность потребления внутри каждого дома. Это приводит к выводу о том, что различия в энергопотреблении обусловлены именно характеристиками домов, а не случайными факторами. Стоит отметить, что дисперсионный анализ лишь показывает наличие статистически значимых различий в целом, но не указывает, между какими именно домами эти различия наиболее выражены. Таким образом, множественные сравнения средних являлось следующим логическим шагом в анализе после применение метода ANOVA. С этой целью использован Тьюки. В таблице 5 приводятся результаты тестов, где: 1 – обозначает статистически значимые различия между группами домов; 0 – указывает на отсутствие статистически значимых различий.

Таблица 5

Table 5

Матрица результатов теста Тьюки о статистических различиях электропотребления между исследуемыми домами частной жилой застройки

The matrix of the Tukey test results on statistical differences in power consumption between the studied houses of private residential development

Номер дома	101	104	15	22	24	25	28	33	35	36	37	38	39	40	51	53	58	59	63	64	65	66	67	69	75	77	84	86	95	98
101		1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
104	1		1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	1	0	0	1	1
15	1	1		1	1	1	1	0	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
22	1	1	1		1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
24	1	1	1	1		1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
25	1	1	1	1	1		1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
28	1	1	1	1	1	1		1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
33	1	1	0	1	1	1	1		1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
35	1	1	1	1	1	1	1	1		1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	0	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1
36	1	1	0	1	1	1	1	0	1		1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
37	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1		1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1
38	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1		1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	1	0	0	1	1
39	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1		1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
40	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1		1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1
51	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1		1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
53	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1		1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0
58	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1		1	1	0	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1
59	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1		1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
63	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1		1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
64	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1		1	1	0	1	1	1	1	1	1	1
65	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1		1	1	1	1	1	1	1	1	1
66	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1		1	1	1	1	1	1	1	1
67	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	0	1	1		1	1	1	1	1	1	1
69	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1		0	1	1	0	1	1
75	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0		1	0	0	1	1
77	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1		1	1	1	1
84	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1		0	1
86	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	1	0			1
95	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1		1
98	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	

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

Результаты теста Тьюки подтвердили наличие статистически значимых различий в получасовом электропотреблении между большинством исследуемых домов, что согласуется с выводами дисперсионного анализа. Матрица множественных сравнений демонстрирует сложную картину взаимосвязей: многие пары домов имеют достоверные различия в потреблении, при этом отдельные группы (например, дома 101 и 53, 104 и 38, 35 и 58 и др.) не показали значимой разницы. Отсутствие явных кластеров с однородным потреблением и преобладание единиц в матрице указывают на сложности в формировании отдельных классов домов со схожими характеристиками энергопотребления. Это позволяет предположить, что распределение домов по уровням потребления, например, относительно медианного значения или квартилей, может стать более практичным решением для классификации потребителей.

Объединение статистических данных по целевым группам

На данном этапе исследования основное внимание было уделено группировке жилых домов по уровню потребления электроэнергии – выше или ниже медианного значения. Ожидалось, что такое разделение позволит более четко выявить различия между группами потребителей и провести детальный анализ электропотребления. Это, в свою очередь, поможет выявить ключевые факторы, влияющие на различия в потреблении, и разработать обоснованные подходы к формированию типовых профилей мощности для каждой группы в дальнейших исследованиях. Для анализа были объединены все данные получасового электропотребления на уровне отдельных домов. Распределение полученных значений визуализировано с помощью гистограммы рисунка 3.

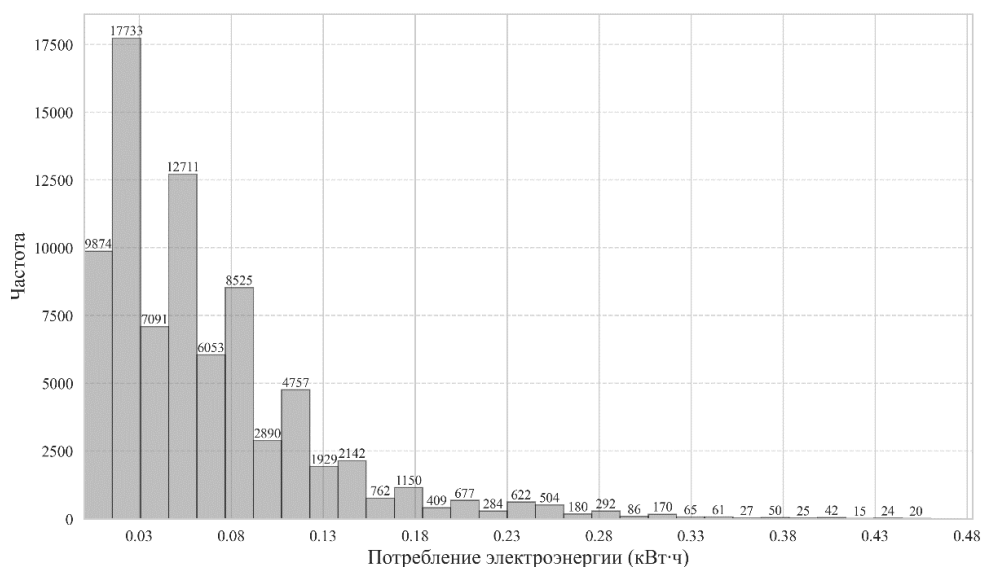


Рис. 3. Гистограмма получасового потребления электроэнергии по всем домам Fig. 3. Histogram of half-hourly electricity consumption for all houses

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

Гистограмма показывает, что распределение потребления электроэнергии в получасовом интервале для большинства домов сосредоточено в низких диапазонах. Среднее потребление составило 0,07 кВт·ч, а медианное значение – 0,05 кВт·ч, что свидетельствует о наличии асимметрии с преобладанием домов с меньшим энергопотреблением. Для дальнейшего анализа дома были разделены на две группы: с потреблением ниже и выше медианного значения. Медиана 0,05 кВт·ч соответствует уровню средней получасовой мощности 100 Вт, что стало пороговым критерием для классификации домов (таблица 6).

Таблица 6

Table 6

Распределения жилых домов по уровню потребления на основе медианного сравнения

Distribution of residential buildings by consumption level based on median comparison

Группа	Номера домов	Примечание
1	104, 33, 38, 66, 69, 75, 84, 86, 95, 98	Низкое медианное потребление (<100 Вт): меньшая площадь, экономное использование электроэнергии.
2	101, 15, 22, 24, 25, 28, 35, 36, 37, 39, 40, 51, 53, 58, 59, 63, 64, 65, 67, 77	Высокое медианное потребление (≥100 Вт): большая площадь, интенсивное использование электрооборудования.

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

Приведённая классификация жилых домов по уровням медианного потребления электроэнергии позволяет выделить типовые профили мощности для каждой из групп. Это достигается за счёт усреднения данных внутри групп по часам суток, что помогает сгладить индивидуальные особенности и получить обобщённое представление о закономерностях энергопотребления. На рисунке 4 приведены результаты сравнения средних профилей получасовой активной мощности групп низкого и высокого

потребления жилых домов. Здесь отчётливо прослеживается характерная особенность: для домов с высоким уровнем потребления (группа 2) наблюдаются выраженные пики мощности в вечерние часы, что связано с увеличением активности жильцов. Это может быть вызвано использованием бытовой техники, освещения, кухонного оборудования и других энергоёмких устройств в период с 18:00 до 22:00. В то же время дома с низким уровнем потребления (группа 1) демонстрируют более стабильные значения мощности в течение суток, с меньшей амплитудой изменений и менее выраженными пиковыми значениями.

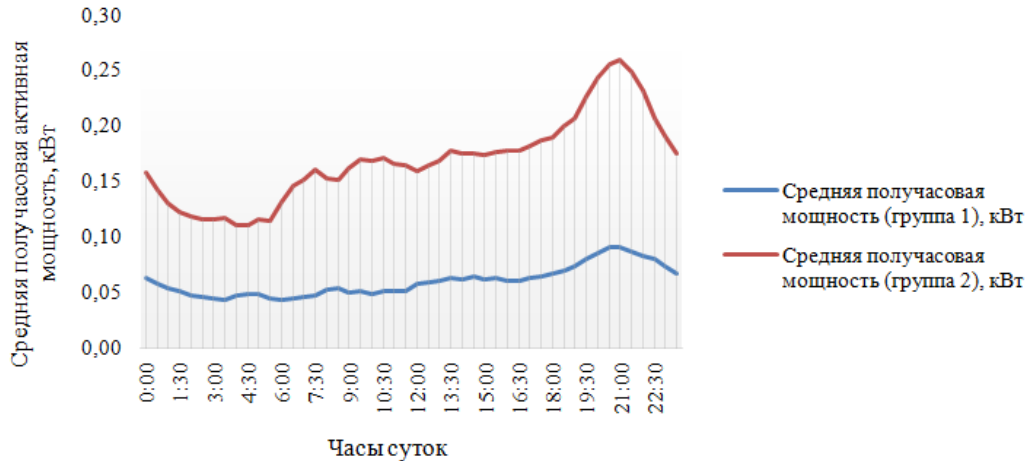


Рис. 4. Сравнение средних профилей получасовой активной мощности групп низкого и высокого потребления жилых домов

Fig. 4. Comparison of average half-hour active power profiles of low and high consumption groups of residential buildings

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

Выявленная вечерняя динамика в группе с высоким потреблением подчёркивает важность учёта временных факторов и поведенческих привычек жильцов при анализе энергопотребления и моделирования режимов в электрических сетях. Данные профили могут служить основой для дальнейшего изучения факторов, влияющих на характер нагрузки потребителей жилого сектора.

Выводы (Conclusions)

Проведенное исследование позволило выявить существенную неоднородность получасового электропотребления в частной жилой застройке, обусловленную различиями в технических характеристиках домов, поведенческих привычек жильцов и используемом электрооборудовании. Результаты дисперсионного анализа (ANOVA) подтвердили статистическую значимость различий между домами ($F = 2065.4$, $p < 0,001$), при этом внутригрупповая изменчивость оказалась минимальной ($MS = 0,002$), что свидетельствует о стабильности потребления внутри отдельных домохозяйств. Тест Тьюки выявил сложную структуру потребления: большинство пар домов демонстрируют значимые различия, что исключает возможность формирования отдельных кластеров на основе схожести профилей. Это подчеркивает необходимость применения упрощенных подходов к классификации, таких как разделение по уровням потребления относительно медианы.

Разделение домов на группы с низким (<100 Вт) и высоким (≥ 100 Вт) медианным потреблением получасовой активной мощности позволило выделить типовые профили нагрузки. Для домов с высоким потреблением характерны выраженные вечерние пики (18:00–22:00), связанные с активным использованием энергоёмких бытовых приборов, тогда как группа с низким потреблением демонстрировала более равномерный профиль электрической мощности. Это указывает на важность учета временных свойств при оценке пропускной способности электрических сетей. Практическая значимость исследования заключается в интеграции результатов в программный комплекс LineCapacity, что упростило классификацию потребителей до двух уровней: с комплексным и без комплексного использования электрооборудования. Такой подход сократил время моделирования сетей за счет применения в качестве исходных данных установленных типовых нагрузок.

В части дальнейших исследований планируется расширение базы статистических данных, что позволит получить более репрезентативную выборку для анализа. В рамках этого этапа исследования будут изучены графики нагрузок с учётом сезонных факторов, таких как изменение потребления в зависимости от времени года и температурных

условий. Это обеспечит более глубокое понимание особенностей потребления электроэнергии в жилом секторе. Дополнительно будет исследована структура законов распределения мощности в рамках отдельных получасовых интервалов. Такой подход позволит выявить характерные свойства нагрузки, их вариабельность и закономерности, что станет основой для создания механизма имитационного моделирования энергопотребления.

Литература

1. Прогнозирование и анализ электропотребления и потерь электроэнергии на промышленных объектах / Э. Ю. Абдуллазянов, Е. И. Грачева, А. Альзаккар [и др.] // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. – 2022. – Т. 24, № 6. – С. 3-12. – DOI 10.30724/1998-9903-2022-24-6-3-12. – EDN DYCRPL.
2. Trunova I., Miroshnyk O., Moroz O., et al. The analysis of use of typical load schedules when the design or analysis of power supply systems // 2020 IEEE KhPI Week on Advanced Technology (KhPIWeek). 2020. pp. 61–64.
3. Доброго К.В. Модель электрической нагрузки жилищно-коммунального объекта для исследования систем «генератор-накопитель-потребитель» методом Монте-Карло // Наука и техника. 2017. Т. 16. № 2. С. 160–170.
4. Демиденко А. С., Шведов Г. В. Суточные графики электрических нагрузок многоквартирных домов в системах электроснабжения городов // Энергосбережение теория и практика: труды Десятой Международной школы-семинара молодых ученых и специалистов, Москва, 19–23 октября 2020 года. Курск: Закрытое акционерное общество "Университетская книга", 2020. С. 123–127.
5. Солуянов Ю.И., Чернова Н.В., Федотов А.И., и др. Анализ фактических электрических нагрузок многоквартирных жилых домов Москвы // Промышленная энергетика. 2022. № 9. С. 12–19.
6. Надтока И.И., Звоникова И.А., Васильев Г.П., и др. Анализ основных закономерностей в электропотреблении жилой части многоквартирных домов в Московском регионе // Промышленная энергетика. 2023. № 11. С. 21–27.
7. Капанский А.А. Климатические факторы и их роль в управлении энерго- и водопотреблением городской системы водоснабжения // Наука и техника. 2025. Т. 24. № 1. С. 72–82.
8. McLoughlin F., Duffy A., Conlon M. Characterising Domestic Electricity Consumption Patterns by Dwelling and Occupant Socio-Economic Variables: An Irish Case Study // Energy Buildings. 2012. Vol. 48. pp. 240–248.
9. Laicane I., Blumberga D., Blumberga A., et al. Comparative Multiple Regression Analysis of Household Electricity use in Latvia: Using Smart Meter Data to Examine the Effect of Different Household Characteristics // Energy Procedia. 2015. Vol. 72. pp. 49–56.
10. Sütterlin B., Brunner T.A., Siegrist M. Who puts the most energy into energy conservation? A segmentation of energy consumers based on energy-related behavioral characteristics // Energy Policy. 2011. Vol. 39, N12. pp. 8137–8152.
11. Poznaka L., Laicane I., Blumberga D., et al. Analysis of Electricity User Behavior: Case Study Based on Results from Extended Household Survey // Energy Procedia. 2015. Vol. 72. pp. 79 – 86.
12. Kapanski, A.A.; Klyuev, R.V.; Boltrushевич, A.E.; Sorokova, S.N.; Efremkov, E.A.; Demin, A.Y.; Martyushev, N.V. Geospatial Clustering in Smart City Resource Management: An Initial Step in the Optimisation of Complex Technical Supply Systems. Smart Cities 2025, 8, 14. <https://doi.org/10.3390/smartcities8010014>
13. Грачева Е. И., Сафин А. Р., Садыков Р. Р. Применение аналитического метода расчета надежности элементов систем электроснабжения на основе вероятностных моделей // Надежность и безопасность энергетики. – 2017. – Т. 10. – №. 1. – С. 48-52
14. Fedorov O. V. Expedition forecasting of power consumption // 2017 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM). – IEEE, 2017. – С. 1-4.
15. Грачева, Е. И. Потери электроэнергии и эффективность функционирования оборудования цеховых сетей / Е. И. Грачева, О. В. Наумов. – Москва : Издательство «Русайнс», 2017. – 168 с. – ISBN 978-5-4365-1661-5. – EDNYNMXXT
16. Hruntovich, N. V., Kapanski, A. A., Baczynski, D., Vagapov, G. V., & Fedorov, O. V. (2019). Optimization of a variable frequency drive pump working on a water tower. In E3S Web of Conferences (Vol. 124, p. 05060). EDP Sciences.
17. Усова А.С., Хмелевой С.В. Компьютеризированная система оптимизации потребления электроэнергии жилого дома // Информатика и кибернетика. 2020. № 1(19). С. 27–35.

18. Yahia Z., Pradhan A. Optimal load scheduling of household appliances considering consumer preferences: An experimental analysis // *Energy*. 2018. Vol. 163. pp. 15–26.
19. Chen S., Gao F., Guan X., et al. A residential load scheduling approach based on load behavior analysis: 2014 IEEE International Conference on Automation Science and Engineering (CASE). 2014. pp. 954–959.
20. Rafiq H., Manandhar P., Rodriguez-Ubinas E., et al. Analysis of residential electricity consumption patterns utilizing smart-meter data: Dubai as a case study // *Energy and Buildings*. 2023. Vol. 291.
21. Ramnath G.S., Harikrishnan R., Muyeen S.M., et al. Household Electricity Consumer Classification Using Novel Clustering Approach, Review, and Case Study // *Electronics*. 2022. Vol. 11, N15. 24 p.
22. Chen C., Wang M., Shen C., et al. Sensitivity analysis of factors influencing rural housing energy consumption in different household patterns in the Zhejiang province // *Buildings*. 2023. N13(2). 23 p.
23. Pukelsheim F. The three sigma rule // *The American Statistician*. 1994. Vol. 48, N2. pp. 88–91.

Авторы публикации

Капанский Алексей Александрович – доцент энергетического факультета «Электроснабжение», Гомельский государственный технический университет имени П.О. Сухого. ORCID: 0000-0003-2902-2695. Email: kapanski@mail.ru.

Павлов Вадим Вячеславович – студент 5 курса кафедры «Электроснабжение», Гомельский государственный технический университет имени П.О. Сухого. Email: mcplov24@gmail.com.

Зализный Дмитрий Иванович – доцент энергетического факультета «Электроснабжение», Гомельский государственный технический университет имени П.О. Сухого. ORCID: 0000-0002-3852-7188. Email: zaldmi@yandex.ru.

Веремеева Дарья Ивановна – студентка 5 курса кафедры «Электроснабжение», Гомельский государственный технический университет имени П.О. Сухого. Email: dasha.kivit@gmail.com.

References

1. Abdullazyanov EY, Gracheva EI, Alzakkar A, et al. Forecasting and analysis of power consumption and energy losses at industrial facilities. *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii. Problemy Energetiki*. 2022; 24(6):3–12. (In Russ.). doi: 10.30724/1998-9903-2022-24-6-3-12
2. Trunova I, Miroshnyk O, Moroz O, et al. The analysis of use of typical load schedules when the design or analysis of power supply systems. 2020 IEEE KhPI Week on Advanced Technology (KhPIWeek). 2020. pp. 61–64.
3. Dobrego KV. Model for electric load of community housing projects to investigate "generator - accumulator - consumer" system while using Monte-Carlo method. *Science and Technology*. 2017; 16(2):160–170. (In Russ.). doi: 10.21122/2227-1031-2017-16-2-160-170
4. Demidenko AS, Shvedov GV. Sutochnye grafiki elektricheskikh nagruzok mnogokvartirnykh domov v sistemakh elektrosnabzheniya gorodov. *Proceedings of the Tenth International School-Seminar for Young Scientists and Specialists Energy Saving - Theory and Practice, Moscow, NRU «MPEI», 19-23 October 2020. Kursk: Publishing house of JSC «University Book»; 2020. pp. 123–127. (In Russ.).*
5. Soluyanov YUI, Chernova NV, Fedotov AI, et al. Analysis of the actual electrical loads of multi-apartment residential buildings in Moscow. *Promyshlennaya energetika*. 2022; 9:12–19. (In Russ.). doi:10.34831/EP.2022.82.36.002
6. Nadtoke II, Zvoznikova IA, Vasilev GP, et al. Analysis of the main regularities in the power consumption of the residential part of apartment buildings in the Moscow region. *Promyshlennaya energetika*. 2023; 11:21–27. (In Russ.). doi: 10.34831/EP.2023.71.11.003
7. Kapanski AA. Climatic factors and their role in energy management and water consumption in the urban water supply system. *Science and Technique*. 2025; 24(1):72–82. (In Russ.). doi: 10.21122/2227-1031-2025-24-1-72-82
8. McLoughlin F, Duffy A, Conlon M. Characterising domestic electricity consumption patterns by dwelling and occupant socio-economic variables: An Irish case study. *Energy Buildings*. 2012; 48:240–248. doi: 10.1016/j.enbuild.2012.01.037
9. Laicane I, Blumberga D, Blumberga A, et al. Comparative multiple regression analysis of household electricity use in Latvia: Using smart meter data to examine the effect of different household characteristics. *Energy Procedia*. 2015; 72:49–56. doi: 10.1016/j.egypro.2015.06.008

10. Sütterlin B, Brunner TA, Siegrist M. Who puts the most energy into energy conservation? A segmentation of energy consumers based on energy-related behavioral characteristics. *Energy Policy*. 2011; 39(12):8137–8152. doi: 10.1016/j.enpol.2011.10.008
11. Poznaka L, Laicane I, Blumberga D, et al. Analysis of electricity user behavior: Case study based on results from extended household survey. *Energy Procedia*. 2015; 72:79–86. doi: 10.1016/j.egypro.2015.06.012
12. Kapanski AA, Klyuev RV, Boltrushevich AE, Sorokova SN, Efremkov EA, Demin AY, Martyushev NV. Geospatial clustering in smart city resource management: An initial step in the optimisation of complex technical supply systems. *Smart Cities*. 2025; 8(1):14. doi: 10.3390/smartcities8010014
13. Gracheva EI, Safin AR, Sadykov RR. Application of an analytical method for calculating the reliability of power supply system elements based on probabilistic models. *Reliability and Safety in Energy*. 2017; 10(1):48–52. (In Russ.)
14. Fedorov OV. Expeditious forecasting of power consumption. 2017 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM). 2017. pp. 1–4. doi: 10.1109/ICIEAM.2017.8076465
15. Gracheva EI, Naumov OV. Energy losses and efficiency of equipment in shop networks. Moscow: Rusains Publishing; 2017. 168 p. (In Russ.). ISBN: 978-5-4365-1661-5
16. Hruntovich NV, Kapanski AA, Baczynski D, Vagapov GV, Fedorov OV. Optimization of a variable frequency drive pump working on a water tower. *E3S Web of Conferences*. 2019; 124:05060. doi: 10.1051/e3sconf/201912405060
17. Usova AS, Khmelevoy SV. Computerised system optimization of electricity consumption of residential buildings. *Informatika i kibernetika*. 2020; 1(19):27–35. (In Russ.)
18. Yahia Z, Pradhan A. Optimal load scheduling of household appliances considering consumer preferences: An experimental analysis. *Energy*. 2018; 163:15–26. doi: 10.1016/j.energy.2018.08.113
19. Chen S, Gao F, Guan X, et al. A residential load scheduling approach based on load behavior analysis. 2014 IEEE International Conference on Automation Science and Engineering (CASE). 2014. pp. 954–959.
20. Rafiq H, Manandhar P, Rodriguez-Ubinas E, et al. Analysis of residential electricity consumption patterns utilizing smart-meter data: Dubai as a case study. *Energy and Buildings*. 2023; 291:113103. doi: 10.1016/j.enbuild.2023.113103
21. Ramnath GS, Harikrishnan R, Muyeen SM, et al. Household electricity consumer classification using novel clustering approach, review, and case study. *Electronics*. 2022; 11(15):24. doi: 10.3390/electronics11152302
22. Chen C, Wang M, Shen C, et al. Sensitivity analysis of factors influencing rural housing energy consumption in different household patterns in the Zhejiang province. *Buildings*. 2023; 13(2):23. doi: 10.3390/buildings13020463
23. Pukelsheim F. The three sigma rule. *The American Statistician*. 1994; 48(2):88–91. doi: 10.2307/2684253

Authors of the publication

Alexey A. Kapanski – Gomel State Technical University named after P.O. Sukhoi, Gomel, Republic of Belarus. ORCID: 0000-0003-2902-2695. Email: kapanski@mail.ru.

Vadim V. Pavlov – Gomel State Technical University named after P.O. Sukhoi, Gomel, Republic of Belarus. Email: mcplov24@gmail.com

Dmitry I. Zalizny – Gomel State Technical University named after P.O. Sukhoi, Gomel, Republic of Belarus. ORCID: 0000-0002-3852-7188. Email: zaldmi@yandex.ru

Daria I. Veremeeva – Gomel State Technical University named after P.O. Sukhoi, Gomel, Republic of Belarus. Email: dasha.kivit@gmail.com.

Шифр научной специальности: 2.4.2. Электротехнические комплексы и системы.

Получено 21.03.2025 г.

Отредактировано 24.03.2025 г.

Принято 25.03.2025 г.