

ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА



УДК 621.316.1:656.13:004.021

DOI:10.30724/1998-9903-2025-27-6-85-98

МЕТОДОЛОГИЧЕСКИЙ ПОДХОД К РАЗМЕЩЕНИЮ ЗАРЯДНОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ ЭЛЕКТРОМОБИЛЕЙ В ГОРОДЕ

Казак П.Р., Павлюченко Д.А.

Новосибирский государственный технический университет, г. Новосибирск, Россия
kazak-p@inbox.ru

Резюме: АКТУАЛЬНОСТЬ. Рост парка электромобилей в России и мире опережает развитие зарядной инфраструктуры, что приводит к неравномерному размещению электрозарядных станций (ЭЗС) и снижает эффективность их эксплуатации. Необходима методика, учитывающая технические, градостроительные и поведенческие факторы. ЦЕЛЬ. Разработать и апробировать многофакторную модель оценки пригодности городской территории для размещения ЭЗС на основе метода анализа иерархий (МАИ), учитывающую результаты опросов экспертов и пользователей, а также корректирующие коэффициенты по типу городской зоны и плотности существующих станций. МЕТОДЫ. Сформирован перечень факторов на основе анкетирования двух целевых групп (эксперты в электроэнергетике и владельцы электромобилей). Проведено попарное сравнение факторов по девятивалльной шкале Т. Саати, рассчитаны весовые коэффициенты и проверена согласованность суждений. Разработана интегральная формула для расчета показателя пригодности участка с поправками на функциональную зону и насыщенность инфраструктурой. РЕЗУЛЬТАТЫ. Модель апробирована на пяти участках с различным функциональным зонированием в Новосибирске и Москве. Выявлены участки с высокой и низкой степенью пригодности, показана чувствительность модели к структуре факторов и поправочным коэффициентам. Подтверждена способность методики выявлять зоны с избыточной инфраструктурой и предотвращать дублирование. ЗАКЛЮЧЕНИЕ. Предложенная модель может использоваться органами городского планирования, инвесторами и проектировщиками для обоснованного выбора мест установки ЭЗС, а также масштабироваться для других городов. Методика повышает эффективность инфраструктурного планирования и снижает риски нерационального использования ресурсов.

Ключевые слова: электрозарядная станция; электромобили; метод анализа иерархий; городская инфраструктура; моделирование; апробация модели.

Для цитирования: Казак П.Р., Павлюченко Д.А. Методологический подход к размещению зарядной инфраструктуры электромобилей в городе // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2025. Т. 27. № 6. С. 85-98. doi: 10.30724/1998-9903-2025-27-6-85-98.

A METHODOLOGICAL APPROACH TO THE DEPLOYMENT OF ELECTRIC VEHICLE CHARGING INFRASTRUCTURE IN URBAN AREAS

Kazak P.R., Pavluchenko D.A.

Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russia
kazak-p@inbox.ru

Abstract: RELEVANCE. The rapid growth of electric vehicle (EV) fleets worldwide and in Russia outpaces the deployment of charging infrastructure, causing uneven distribution of charging stations (EVCS) and reducing operational efficiency. A comprehensive methodology is required to account for technical, urban planning, and behavioral factors influencing EVCS siting decisions. THE PURPOSE. To develop and test a multifactor model for assessing the suitability of urban sites for EVCS deployment using the Analytic Hierarchy Process (AHP). The model integrates

expert and user survey results and applies correction coefficients for urban zone type and existing EVCS density. METHODS. A set of factors was identified from a survey of two target groups: power engineering experts and EV owners. Pairwise comparisons of factors were performed using T. Saaty's nine-point scale to determine weight coefficients, followed by a consistency check. The resulting weights were incorporated into an integral suitability formula adjusted for functional zoning and infrastructure saturation. The model was tested on five sites in Novosibirsk and Moscow with different functional zoning types (business, residential, transit, industrial, and high-density EVCS areas). RESULTS. The model identified sites with high and low suitability scores, demonstrating sensitivity to both factor structure and correction coefficients. High-scoring sites showed balanced factor contributions, while low-scoring sites revealed critical constraints such as low traffic, poor connectivity, or over-saturation with charging infrastructure. The model successfully detected zones with excessive infrastructure, thus preventing resource duplication. CONCLUSIONS. The proposed methodology provides a practical decision-support tool for urban planners, investors, and developers to optimize EVCS siting. It enables early-stage planning, reduces risks of inefficient investment, and is adaptable to other cities and contexts. The integration of technical, spatial, and behavioral parameters improves infrastructure efficiency and supports sustainable urban mobility strategies.

Keywords: electric charging station; electric vehicles; analytical hierarchy process; urban infrastructure; modeling; model testing.

For citation: Kazak P.R., Pavluchenko D.A. A methodological approach to the deployment of electric vehicle charging infrastructure in urban areas. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2025; 27 (6): 85-98. doi: 10.30724/1998-9903-2025-27-6-85-98.

Введение (Introduction)

Рост парка электромобилей является устойчивым мировым трендом, оказывающим существенное влияние на развитие транспортной и энергетической инфраструктуры. По данным Международного энергетического агентства, к 2023 году количество электромобилей в эксплуатации превысило 26 миллионов единиц, что в три раза больше показателя 2020 года [1]. В России, несмотря на сравнительно небольшой текущий парк, темпы прироста составляют 30-40% ежегодно, особенно в крупнейших городах и агломерациях, таких как Москва, Санкт-Петербург и Новосибирск [2].

Развитие зарядной инфраструктуры в стране отстает от темпов роста парка электромобилей, что приводит к точечному размещению электрозарядных станций (ЭЗС) без учета прогнозного спроса и технических возможностей электросетей. В ряде случаев это вызывает эксплуатационные проблемы: станции устанавливаются в местах с низким трафиком или в зонах дефицита мощности, что снижает рентабельность проектов и увеличивает риск перегрузки сети [3].

Актуальность комплексного подхода к выбору мест установки ЭЗС подтверждается исследованиями, в которых выявлены как технические ограничения (например, стохастическая нагрузка от зарядки электромобилей на распределительные сети [4]), так и организационно-экономические проблемы (развитие инфраструктуры в условиях ограниченного спроса и отсутствия комплексного планирования [8]). При этом работы по развитию зарядной сети в российских регионах показывают значительные различия в сценариях и эффективности решений в зависимости от структуры города и особенностей энергосистемы [9].

Зарубежный опыт демонстрирует, что эффективность интеграции электрозарядных станций в городскую среду напрямую зависит от использования многофакторных методик, учитывающих одновременно технические, пространственные и поведенческие параметры. В исследовании Karolemeas и др. [5] применен метод анализа иерархий (Analytic Hierarchy Process, АНР) в сочетании с тематическим анализом для определения оптимальных локаций ЭЗС в Греции, что позволило учесть как экспертные оценки, так и мнение конечных пользователей. Работа Guler и Yomraliooglu [6] показала, что объединение МАИ и нечеткого МАИ с геоинформационными системами (ГИС) обеспечивает более точное выявление приоритетных точек для размещения станций быстрой зарядки.

В отчете Международного совета по чистому транспорту (ICCT) [7] проведена количественная оценка дефицита зарядной инфраструктуры на ключевых рынках США с учетом прогнозов продаж электромобилей и динамики строительства ЭЗС. Результаты подчеркивают важность синхронизации темпов установки станций с ростом автопарка. В

исследовании Евдокимова и Пономарева [8] рассмотрены сценарии развития зарядной сети в российских регионах и показано, что недостаток системного планирования приводит к дисбалансу между плотностью сети и реальной потребностью.

В работе Солуянова и соавт. [9] предложена методика актуализации удельных электрических нагрузок для общественных помещений в жилых зданиях, что может быть использовано при расчете энергопотребления ЭЗС в городских условиях. Эти исследования формируют основу для разработки более комплексных и адаптированных к местным условиям методик.

Несмотря на наличие разработанных подходов, большинство существующих методик имеет ограничения, препятствующие их прямому применению в российских городах. Высокая плотность застройки и ограниченные возможности подключения к электросетям нередко исключают потенциально выгодные с точки зрения трафика локации [10]. Отсутствие обязательной интеграции ЭЗС в схемы территориального планирования и градостроительные регламенты создает условия для фрагментарного размещения инфраструктуры [11].

Важно подчеркнуть, что разработка методики размещения ЭЗС должна осуществляться в рамках действующих градостроительных регламентов и нормативных требований к планировке территории. Предлагаемый подход не предполагает утопических сценариев неограниченного насыщения городской территории станциями зарядки, а направлен на обеспечение баланса между потребностями владельцев электромобилей и ограничениями, связанными с функциональным зонированием, плотностью застройки и транспортной доступностью в соответствии с СП 42.13330.2016 «Градостроительство» и СНиП 2.07.01-89*.

Метод анализа иерархий (МАИ), предложенный Т. Саати [10, 11], зарекомендовал себя как эффективный инструмент многокритериального выбора в условиях ограниченности статистических данных и необходимости сопоставления разнородных факторов. Примеры его применения включают задачи планирования транспортной инфраструктуры [12, 13], оптимизации размещения объектов на основе комплексных критериев [14, 15], а также проектирования устойчивых транспортных систем [16]. В исследовании Камольцевой и Писарева [17] показана применимость подхода к определению параметров сети зарядных станций, однако отсутствует детализированная процедура интеграции факторов градостроительного, технического и поведенческого характера в единую модель.

Суммируя результаты анализа, можно сделать вывод, что для обеспечения рационального развития зарядной инфраструктуры необходим подход, позволяющий:

- учитывать одновременно технические, пространственные и поведенческие факторы;
- формализовать экспертные и пользовательские оценки;
- корректировать интегральную оценку пригодности участка с учетом функционального зонирования и текущей плотности ЭЗС.

Цель исследования заключается в разработке и апробации многофакторной модели оценки пригодности городской территории для размещения электрозарядных станций на основе метода анализа иерархий, включающей корректирующие коэффициенты по типу зоны и насыщенности инфраструктурой.

Научная значимость исследования состоит в формализации системы разнотипных факторов (технических, градостроительных, поведенческих) и обосновании их весов с применением МАИ, что обеспечивает объективность оценки и воспроизводимость результатов в условиях дефицита статистики.

Практическая значимость исследования заключается в создании прикладного инструмента для органов городского планирования, инвесторов и проектных организаций, позволяющего на раннем этапе обосновывать выбор мест установки ЭЗС, предотвращать дублирование инфраструктуры, минимизировать риски неэффективного распределения ресурсов и адаптировать методику под специфику различных городов.

Материалы и методы (Materials and methods)

Одной из ключевых проблем при выборе места размещения зарядной станции для электромобиля является необходимость учета множества факторов разной природы. Некоторые из них имеют физический или экономический характер (например, наличие подключения к сетям, стоимость земли), другие – поведенческий (например, удобство подъезда, социальное восприятие), третьи выражаются в форме экспертных суждений. Для сопоставления таких параметров в рамках единой модели необходим метод,

обеспечивающий нормализацию разнотипных факторов и расчет их относительной значимости.

В качестве основы для построения модели оценки пригодности участков использован метод анализа иерархий, предложенный Т. Саати [10]. Метод широко применяется в задачах многокритериального выбора, где требуется формализовать субъективные оценки, провести ранжирование факторов и определить их вклад в итоговый результат [12-16]. В отличие от математических методов с высокой зависимостью от входной статистики, МАИ устойчив к ограниченности исходных данных и позволяет использовать результаты анкетирования или экспертных опросов в структурированном виде.

Практика применения МАИ доказала его эффективность в энергетике [5], в логистике [6], при территориальном планировании [12] и при размещении объектов распределенной инфраструктуры, включая ЭЗС [13]. Метод позволяет не только определить веса факторов, но и провести проверку согласованности суждений, исключив случайные или логически несогласованные оценки.

В рамках настоящего исследования метод применяется следующим образом:

- формируется итоговый перечень факторов, объединяющий оценки двух целевых групп – экспертов в области электроэнергетики и владельцев электромобилей. Выборка построена по результатам анкетирования, включавшего открытые и закрытые вопросы. Все предложенные респондентами показатели были агрегированы, частотный анализ позволил исключить малозначимые и дублирующие параметры;
- проводится попарное сравнение факторов с применением девятибалльной шкалы Т. Саати. Экспертам предлагается оценить, насколько один фактор важнее другого с точки зрения влияния на выбор локации для ЭЗС;
- составляется матрица попарных сравнений, на основе которой рассчитываются весовые коэффициенты;
- производится расчет индекса согласованности (CI) и отношения согласованности (CR) с целью проверки логичности экспертных суждений. Если CR превышает 0,1, матрица подлежит уточнению или исключению.

На рисунке 1 представлена логика применения в контексте построения модели: от формирования системы факторов до использования весов в расчетах.



Рис. 1. Применение метода МАИ в модели Fig. 1. Application of the AHP method in the site оценки пригодности участка под установку ЭЗС suitability assessment model for EVCS deployment

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

Применение метода позволяет перейти от качественных описаний факторов к количественной оценке их влияния, что особенно важно в условиях отсутствия единой нормативной системы размещения ЭЗС [17]. Впоследствии рассчитанные веса используются в составе интегральной формулы пригодности участка, позволяя сравнивать между собой разные по структуре территории.

Разработка модели оценки пригодности участков под размещение электrozарядных станций требует четкого определения факторов, оказывающих влияние на выбор локации. Для формирования обоснованного перечня факторов было проведено анкетирование двух целевых групп:

- эксперты в области электроэнергетики и градостроительства, обладающие профессиональным опытом в проектировании, подключении и эксплуатации объектов инфраструктуры;
- владельцы электромобилей, как непосредственные потребители услуг ЭЗС в городской среде.

В исследовании приняли участие 49 респондентов: 12 экспертов в области электроэнергетики, проектирования и градостроительства, а также 37 владельцев электромобилей с практическим опытом эксплуатации ЭЗС. В рамках опроса респонденты указывали наиболее значимые, по их мнению, факторы, влияющие на выбор места размещения ЭЗС. Полученные формулировки были далее обработаны и агрегированы.

На рисунке 2 представлена сводная диаграмма частотности упоминаний факторов двумя целевыми группами.

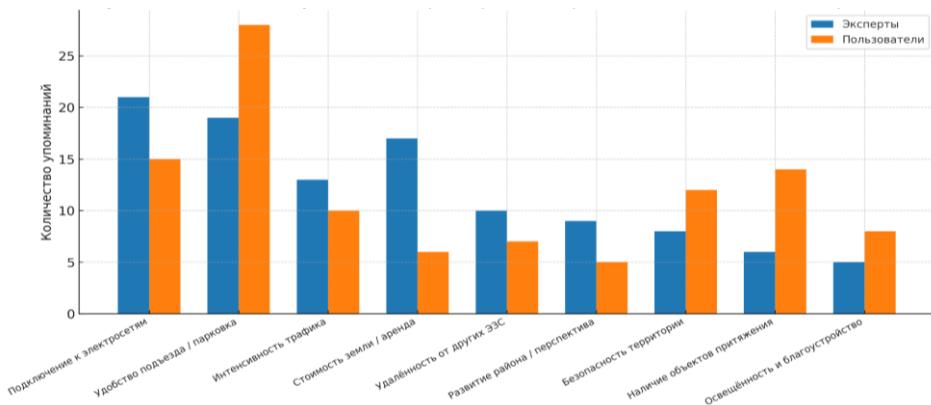


Рис. 2. Сравнение частотности факторов по данным опроса двух групп
Fig. 2. Comparison of factor frequency according to the survey of two groups

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

Применение МАИ для решения задач территориального планирования обосновывается его способностью структурировать сложные многокритериальные задачи и обеспечивать количественную оценку качественных факторов. Согласно рекомендациям Т. Саати, для получения достоверных результатов в рамках МАИ достаточно привлечение 8-12 экспертов при условии обеспечения согласованности экспертных оценок ($CR < 0,15$) [10]. В настоящем исследовании обеспечение репрезентативности экспертной группы достигается за счет диверсификации состава участников: наряду с профильными экспертами (инженеры-энергетики, проектировщики, специалисты градостроительной сферы) в опросе участвовали владельцы электромобилей как представители целевой группы пользователей инфраструктуры.

В таблице 1 представлены частотные данные по упоминаемости факторов, предложенных респондентами в ходе опроса. Один участник мог указать несколько факторов, поэтому общее число упоминаний превышает число опрошенных. Отдельно учтены мнения экспертов и владельцев электромобилей, что позволяет выявить различия в приоритетах целевых групп.

Таблица 1
Table 1
Сравнение факторов, предложенных экспертами и владельцами электромобилей
Comparison of factors proposed by experts and electric vehicle owners

Формулировка респондента	Частота упоминаний (эксперты)	Частота упоминаний (владельцы)	Комментарий
Удобство подъезда / парковка	19	28	Особенно значим у владельцев электромобилей
Подключение к электросетям	21	15	Особенно значим у экспертов
Интенсивность трафика	13	10	Близкий по значимости в обеих группах
Удаленность от других ЭЗС	10	7	Уточняет насыщенность сети
Стоимость земли / аренда	17	6	Экономический барьер реализации
Перспективы развития района / перспектива	9	5	Связан с потенциалом локации
Безопасность территории	8	12	Важнее для пользователей
Наличие объектов притяжения	6	14	Явный пользовательский приоритет
Освещенность и благоустройство	5	8	Поведенческий и комфортный фактор

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

Данные опроса подтвердили, что ключевые ожидания экспертов связаны с технической реализуемостью и стоимостными ограничениями, тогда как пользователи чаще упоминают доступность, безопасность и удобство повседневного использования [12].

Несмотря на различия в формулировках, значительная часть факторов пересекается по смыслу, что позволило перейти к их укрупненной группировке.

Для обеспечения компактности и применимости модели все исходные формулировки были агрегированы по тематике. В процессе объединения учитывались:

- семантическая близость (например, «наличие парковки» и «удобство подъезда»);
- логическая совместимость (например, «близость к другим ЭЗС» и «насыщенность района инфраструктурой»);
- нормативная интерпретируемость (возможность формализованной оценки).

В результате агрегирования сформированы шесть укрупненных факторов, охватывающих все ключевые направления:

1. интенсивность трафика – отражает потенциальный спрос, доступность и проходимость участка;
2. наличие свободных площадей и парковки – объединяет доступность территории и возможность размещения оборудования;
3. возможность подключения к электросетям – охватывает как физическое, так и техническое подключение;
4. стоимость земельного участка – включает арендную ставку, кадастровую или рыночную стоимость;
5. расстояние до ближайшей зарядной станции – регулирует плотность сети и предотвращает дублирование;
6. перспективы развития района – учитывает градостроительные планы, застройку, рост населения.

Эти шесть факторов легли в основу дальнейшего расчета весов методом анализа иерархий и последующего построения модели оценки пригодности участка [5, 6, 17].

Для сопоставления факторов, вошедших в модель, и определения их относительной значимости использован метод анализа иерархий, разработанный Т. Саати [10]. Метод позволяет формализовать экспертные суждения путем попарного сравнения факторов, переведенных в числовую шкалу предпочтений. Это особенно актуально при наличии разнотипных факторов – как количественных, так и качественных – с невозможностью их непосредственного сопоставления по абсолютной шкале.

В соответствии с классической процедурой МАИ, экспертам была предложена матрица, в которой каждый фактор сравнивался с каждым по степени важности относительно цели – определения пригодности участка под размещение ЭЗС. Сравнение проводилось по девятивалльной шкале Саати: от 1 (равнозначны) до 9 (один фактор крайне значительно важнее другого). Для повышения надежности результатов использовалась средняя агрегированная матрица.

На основе собранной матрицы был рассчитан вектор весов факторов по методу среднегеометрических значений. Результаты приведены в таблице 2.

Таблица 2
Table 2

Расчет весов факторов метод МАИ
Calculation of factor weights using the AHP method

№	Фактор	Весовой коэффициент
1	Интенсивность трафика	0,2348
2	Перспективы развития района	0,1920
3	Наличие свободных площадей и парковки	0,1527
4	Расстояние до ближайшей ЭЗС	0,1476
5	Возможность подключения к электросетям	0,1454
6	Стоимость земельного участка	0,1275

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

Для оценки согласованности суждений был рассчитан индекс согласованности CI и отношение согласованности CR. Значение CR составило 0,124, что ниже допустимого порога 0,15, рекомендованного Т. Саати. Это подтверждает внутреннюю логичность экспертных оценок и обоснованность полученного ранжирования.

Полученные весовые коэффициенты были использованы в интегральной модели оценки пригодности участка, позволяя осуществлять сравнительный анализ различных территорий с учетом различной природы факторов. Рисунок 3 наглядно демонстрирует приоритетность факторов по результатам метода МАИ: наибольший вклад приходится на интенсивность трафика и перспективы развития района.

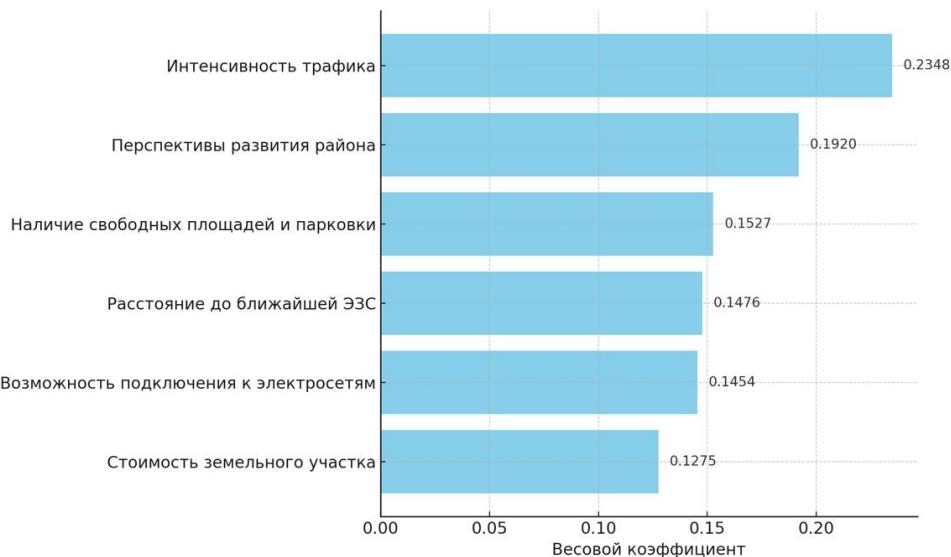


Рис. 3. Диаграмма приоритетов факторов, полученных по методу анализа иерархий *Fig. 3. Priority diagram of factors obtained using the AHP method*

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

Полученные весовые коэффициенты позволяют перейти к построению количественной модели, предназначеннной для сравнительной оценки различных участков городской территории с точки зрения их пригодности под размещение электроподзарядной станции.

Модель основана на интегральной формуле (1), в которую входят нормированные значения по каждому из шести факторов, умноженные на соответствующие весовые коэффициенты. Расчетная формула имеет вид:

$$S = K_1 \cdot K_2 \cdot \sum_{i=1}^6 \omega_i \cdot x_i, \quad (1)$$

где:

S – интегральная оценка пригодности участка под установку ЭЗС,

ω_i – весовой коэффициент i -го фактора, полученный методом анализа иерархий,

x_i – балльная оценка показателя по дискретной шкале от 1 до 9, отражающая уровень соответствия участка данному фактору,

K_1 – поправочный коэффициент, учитывающий функциональный тип городской зоны:

- $K_1 = 1,00$ – жилая зона (базовый уровень),
- $K_1 = 0,95$ – смешанная зона,
- $K_1 = 0,85$ – деловая зона,
- $K_1 = 0,75$ – транзитная зона,
- $K_1 = 0,70$ – промышленная зона.

K_2 – поправочный коэффициент, отражающий уровень насыщенности района существующими ЭЗС.

- $K_2 = 1,00$, если в радиусе 200 м присутствуют ЭЗС,

- $K_2 = 1,05$, если ЭЗС поблизости отсутствуют.

Корректировка по типу зоны (K_1) вводится для учета сценариев эксплуатации: она отражает не только формальное зонирование, но и поведенческую вероятность возникновения потребности в зарядке [12]. Например, в жилых зонах наблюдаются устойчивыеочные сценарии зарядки, а в деловых и транзитных – короткие стоянки, менее подходящие для полной зарядки, особенно при медленных ЭЗС.

Поправка по плотности (K_2) позволяет снижать итоговую оценку в районах, где уже присутствует достаточное число зарядных точек, чтобы избежать дублирования и неэффективного распределения [17].

Таким образом, итоговое значение S позволяет ранжировать участки по степени их пригодности с учетом как внутренних характеристик, так и пространственного контекста.

Для проверки работоспособности модели проведена апробация на четырех реальных участках в г. Новосибирск и одном в г. Москва. Участки подбирались таким образом, чтобы отразить основные типы функционального зонирования, встречающиеся в городской среде: деловая, жилая, транзитная, условно нейтральная зона, а также зона с высокой плотностью существующих ЭЗС. Это обеспечило репрезентативность и позволило проверить чувствительность модели к различным условиям.

Оценка производилась по шести факторам, описанным ранее, с применением весов, рассчитанных методом анализа иерархий. Нормированные значения факторов получены по данным открытых картографических источников 2ГИС и OpenStreetMap, градостроительной документации, а также данным сетевых компаний и публичных кадастровых карт. Поправочные коэффициенты были определены на основе классификации городских зон [5, 6, 13, 17].

- участок А – ул. Гоголя, 13, на территории торгово-развлекательного центра «Галерея Новосибирск». Район характеризуется высоким уровнем транспортной активности, насыщенной пешеходной и коммерческой инфраструктурой, а также возможностью подключения к городской ТП. Преобладает кратковременное пребывание пользователей, что делает приоритетной быструю зарядку;

- участок Б – ул. Дуси Ковальчук, 248, территория жилого комплекса «Созвездие». Зона плотной жилой застройки, высокая стоимость земли, ограниченные свободные площадки. Преобладает ночной или длительное пребывание транспортных средств. ЭЗС здесь ориентированы на продолжительную зарядку с минимальным трафиком;

- участок В – Бердское шоссе, 277, у юго-западного въезда в город. Вблизи расположены автозаправочная станция, придорожные кафе, парковочные площадки. Характеризуется высоким транзитным потоком и низкой плотностью существующих ЭЗС. Имеет потенциал для установки станции экспресс-зарядки;

- участок Г – ул. Сухарная, 96/1, промышленная территория с элементами деловой застройки. Умеренный уровень трафика, высокая обеспеченность энергомощностями, наличие свободных площадей. Используется как нейтральная контрольная точка сравнения в структуре модели;

- участок Д – в г. Москва, в районе станции метро «Фрунзенская». В радиусе 400 метров зафиксировано не менее шести действующих зарядных станций различных операторов, включая точки на ул. Савельева, ул. Ефремова, ул. Усачева и др. Район характеризуется высокой транспортной доступностью, плотной деловой застройкой и устойчивым пешеходным трафиком.

Для каждого участка определялись значения по шести факторам. Также были учтены поправочные коэффициенты K_1 и K_2 . Расчеты представлены в таблицах 3 и 4.

Таблица 3
Table 3

Результаты апробации модели для участков А – Г
Results of the model pilot for sites A – G

Участок	Функциональная зона	Наличие ЭЗС	S	Комментарий
А (ул. Гоголя, 13)	Деловая	Да	5,73	Центр города, высокая инфраструктурная насыщенность
Б (ул. Дуси Ковальчук, 248)	Жилая	Да	7,35	Высокая плотность, отсутствие ЭЗС поблизости, развитая среда
В (Бердское шоссе, 277)	Транзитная	Да	5,5	Сложные условия подключения
Г (ул. Сухарная, 96/1)	Промышленная	Нет	2,96	Удаленность, отсутствие перспектив, низкий трафик

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

Таблица 4
Table 4

Результаты апробации модели для участка Д
Results of the model pilot for site D

№	ЭЗС	K ₁	K ₂	S
1	Electro.cars (ул. Савельева, 5)	1,00	1,00	5,05
2	Electro.cars (ул. 3-я Фрунзенская, 9)	1,00	1,00	4,65
3	Энергия Москвы (ул. Ефремова, 10)	0,85	1,00	5,07
4	Green Drive (ул. Усачева, 26)	1,00	1,00	5,32
5	Заряди авто (ул. Большая Пироговская, 27)	0,85	1,00	3,95

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

На рисунке 4 показаны итоговые оценки пригодности участков А – Г, полученные на основе модели. Видно, что участки с разной функциональной принадлежностью демонстрируют заметную разницу в значениях интегрального показателя S.

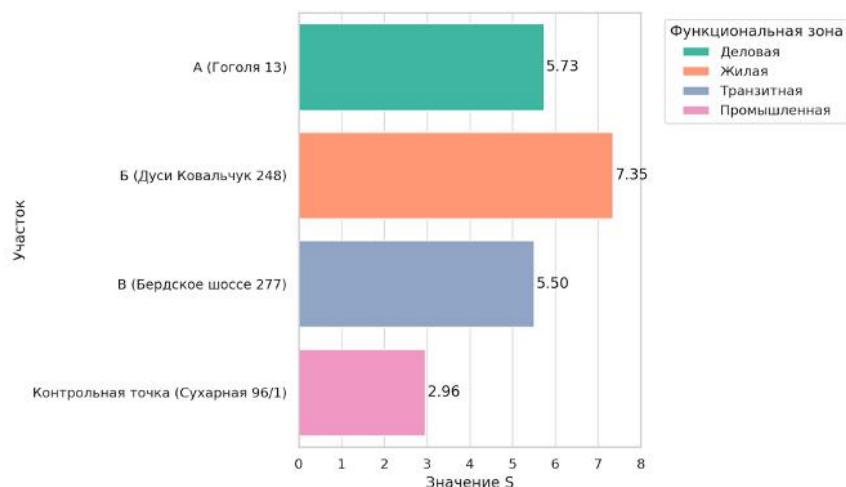


Рис. 4. Сравнительная диаграмма итоговых оценок пригодности участков в Новосибирске
Fig. 4. Comparative chart of final suitability scores for sites in Novosibirsk
*Источник: Составлено авторами *Source: compiled by the author.*

Рисунок 5 иллюстрирует структуру вкладов каждого из шести факторов в итоговую оценку. Диаграмма показывает, за счет каких характеристик формируется высокий или низкий балл у того или иного участка.

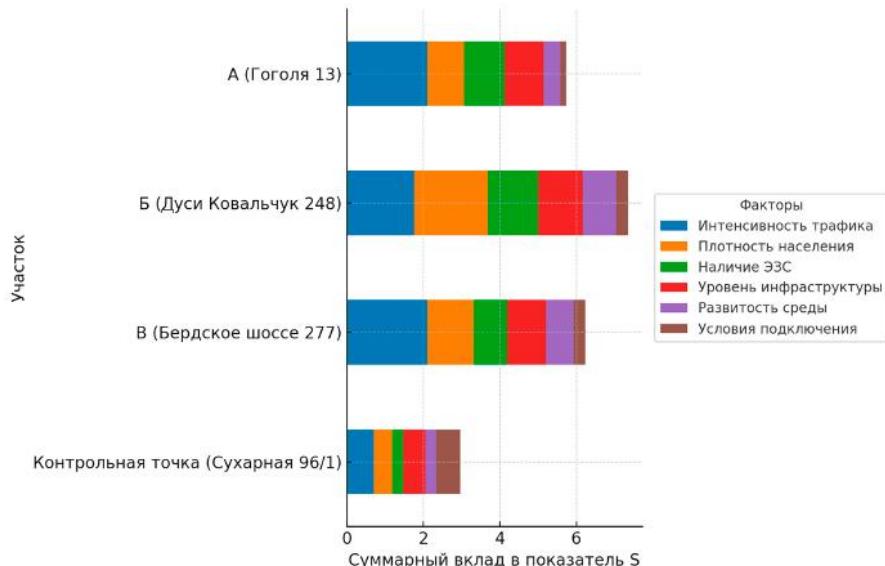


Рис. 5. Структура вкладов факторов в значение интегральной оценки S
Fig. 5. Structure of factor contributions to the integral score S
*Источник: Составлено авторами *Source: compiled by the author.*

Анализ диаграммы позволяет выявить несколько типовых сценариев. На участках с высокой интегральной оценкой, таких как Б (7,35 балла), наблюдается сбалансированный вклад всех факторов без выраженных провалов. Это указывает на комплексную пригодность территории и подтверждает соответствие модели многофакторному подходу. Напротив, на участках с низкой оценкой (например, участок Г – 2,96 балла) явно проявляются критические ограничения по ряду ключевых параметров – трафику, перспективам развития, условиям подключения, – что системно снижает общую оценку, несмотря на формальную доступность площадки.

Характерную структуру демонстрируют участки А и В. В деловой зоне (участок А) зафиксированы высокие значения по трафику, электросетевой доступности и уровню развития, однако итоговая оценка снижается под влиянием высокой стоимости земли и корректирующего коэффициента зоны ($K_1 = 0,85$). Участок В, напротив, опирается на факторы доступности и слабую насыщенность района ЭЗС, но ограничен по условиям подключения, что отражается в узкой полосе соответствующего вклада на диаграмме.

Таким образом, визуальная расшифровка структуры оценки по факторам позволяет уточнить интерпретацию модели и повысить информативность результатов.

Представленный инструмент может быть использован для ранней диагностики проблемных характеристик участков и целевой корректировки проектных решений.

Результаты апробации демонстрируют высокую чувствительность модели к изменению входных данных и корректирующих коэффициентов. Участки А и В получили одинаковые интегральные оценки, но при разных структурных причинах: для А приоритетом стало электросетевое подключение и трафик, для В – наличие площадей и низкая плотность сети. По участку Д видно, что при близких значениях по основным факторам итоговая оценка существенно снижается в участках с перенасыщенной инфраструктурой, чем подтверждается эффективность введения поправки на плотность.

Наивысшее значение интегральной оценки по участку Д зафиксировано у станции Green Drive (ул. Усачева, 26), что обусловлено развитой уличной инфраструктурой и устойчивым пользовательским трафиком. Станции на ул. Савельева и у «Энергии Москвы» также продемонстрировали высокую пригодность к эксплуатации. Вместе с тем, объекты на ул. 3-я Фрунзенская и ул. Большая Пироговская получили граничные либо пониженные значения, что отражает чувствительность модели к плотности размещения и ограничениям городской среды (рис. 6).

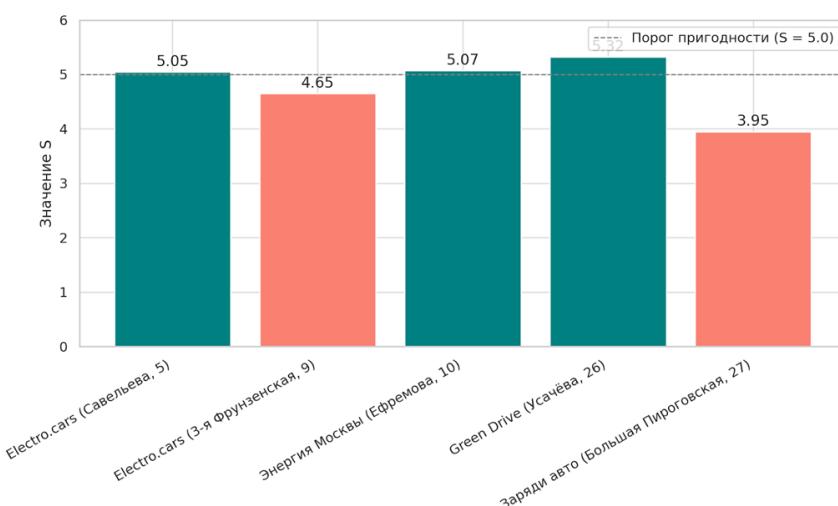


Рис. 6. Сравнительная столбчатая диаграмма значений S по каждой станции в г. Москва

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

Для обобщенного визуального сравнения участков А – Г по всем нормированным факторам построена паучья диаграмма (рис. 7). Она позволяет оценить, какие сильные и слабые стороны имеются у каждого участка по ключевым параметрам модели.

Проведенное исследование подтверждает, что разработанный подход позволяет не только выявлять приоритетные направления для нового строительства, но и эффективно использовать его в целях аудита действующих объектов. Это особенно актуально для зон, где возможна избыточность инфраструктуры или функциональное дублирование.

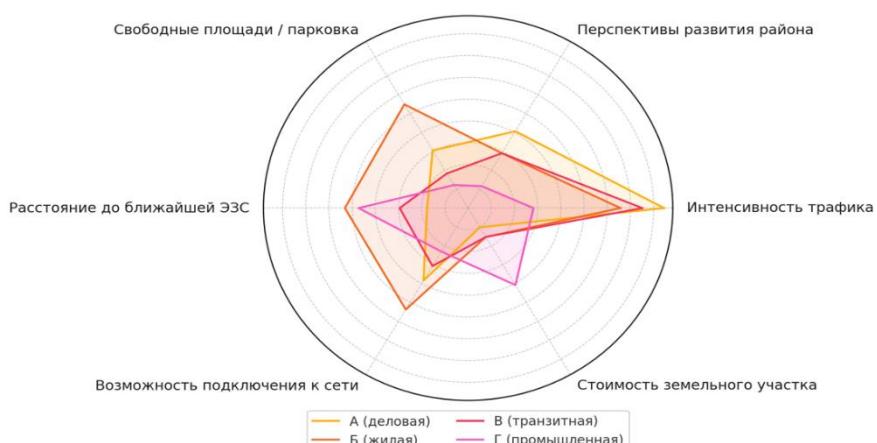


Рис. 7. Сравнение профилей нормированных факторов по всем участкам

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

Таким образом, апробация показала, что модель адекватно отражает как физическую реализуемость установки ЭЗС, так и ее целесообразность с точки зрения распределения инфраструктуры.

В соответствии с разработанной моделью и характеристиками функциональных зон была сформирована рекомендуемая структура распределения типов зарядной инфраструктуры (рис. 8). Эта структура отражает оптимальные пропорции между быстрой и медленной зарядкой с учетом сценариев использования и специфики городской среды.

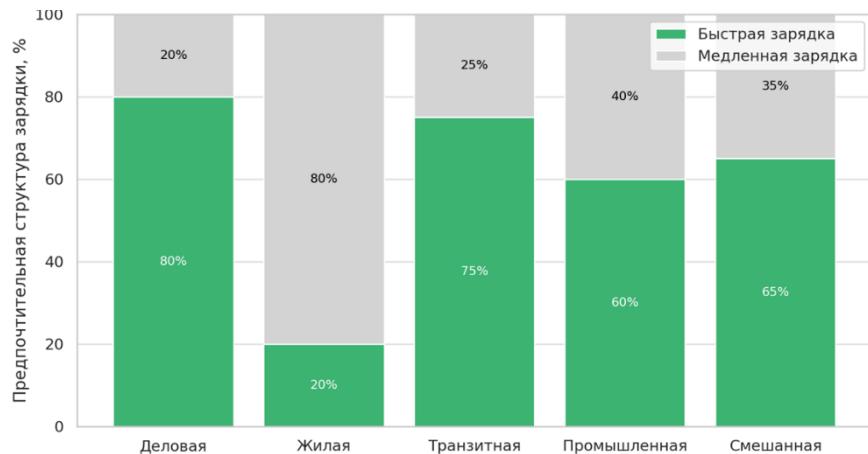


Рис. 8. Рекомендуемая структура типов зарядки по функциональным зонам Fig. 8. Recommended structure of charging types by functional zones

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

Предложенная структура позволяет учитывать не только тип функциональной зоны, но и поведенческие сценарии пользователей, обеспечивая адаптацию инфраструктурных решений к различным условиям городской эксплуатации.

Результаты и обсуждение (Results and discussions)

Результаты апробации модели подтвердили ее чувствительность к различным условиям городской среды и способность отражать как технические, так и поведенческие аспекты размещения ЭЗС [12]. Модель продемонстрировала высокую дифференцирующую способность: итоговые оценки участков существенно варьировались даже при близких значениях отдельных факторов, что указывает на корректную работу весов и влияние поправочных коэффициентов.

Особо показательной стала низкая оценка участка Д, несмотря на его высокие показатели по физической доступности и инфраструктурному обеспечению. Это обусловлено поправкой на насыщенность территории существующими зарядными станциями, что позволило модели зафиксировать эффект перенасыщения и избежать рекомендации неэффективного дублирования [8, 13].

Участки А и В, относящиеся к деловой и транзитной зонам, получили высокие оценки, несмотря на различную структуру факторов. В случае участка А приоритет обеспечили высокая интенсивность трафика и доступ к энергомощностям, тогда как участок В продемонстрировал хорошую обеспеченность площадями и низкую плотность ЭЗС. Это демонстрирует, что модель не жестко привязана к одному типу условий, а работает как сбалансированный инструмент сопоставления.

Дополнительным преимуществом модели является ее масштабируемость: она может быть адаптирована под другие города или регионы при наличии базовых входных данных [5, 6, 13]. Методика позволяет включать дополнительные факторы, если они обоснованы нормативно или подтверждены пользователями, а также варьировать поправочные коэффициенты в зависимости от градостроительных приоритетов.

Важно подчеркнуть, что применение МАИ в основе модели позволило:

- количественно сопоставить факторы различной природы [10, 11];
- учесть экспертные оценки в условиях дефицита статистических данных;
- получить согласованную и воспроизводимую структуру весов.

Как следует из рисунка 8, приоритет в установке быстрой зарядки отдан деловым и транзитным зонам. В этих зонах наблюдается высокая оборачиваемость автотранспорта и преобладают кратковременные остановки, что делает минимизацию времени зарядки критически важной. Высокая плотность трафика и интенсивное использование инфраструктуры усиливают значимость быстрой зарядки как базового решения.

В жилых районах, напротив, преобладают сценарии длительного пребывания, особенно в вечернее и ночное время. Здесь целесообразно преимущественное развитие медленной зарядной инфраструктуры, что позволяет оптимизировать сетевую нагрузку и снизить капитальные затраты.

Для промышленных и смешанных территорий предлагается сбалансированное соотношение типов зарядки, с умеренным преобладанием быстрой. Это решение учитывает логистическую специфику, рабочую активность и присутствие транзитных потоков.

Таким образом, предложенная модель может быть использована в качестве инструмента предпроектной оценки и стратегического планирования развития зарядной инфраструктуры в городской среде.

Заключение (Conclusions)

В рамках настоящего исследования разработана и апробирована многофакторная модель оценки пригодности участков городской территории под размещение электrozарядных станций. Модель основана на методе анализа иерархий, что позволило формализовать экспертные и пользовательские представления о значимости факторов и учесть разнотипные параметры городской среды.

На основании анкетирования двух целевых групп – специалистов в области электроэнергетики и владельцев электромобилей – сформирован набор факторов, прошедших этап тематической агрегации и нормализации. Конечный состав модели включает шесть укрупненных факторов: интенсивность трафика, наличие площадей и парковки, возможность подключения к электросетям, стоимость участка, расстояние до ближайшей ЭЗС и перспективы развития района.

Модель позволяет рассчитывать интегральный показатель пригодности с учетом поправок по функциональному типу зоны и плотности существующих ЭЗС. Проведенная апробация на пяти участках в городе Новосибирске продемонстрировала чувствительность модели к изменению параметров, а также ее применимость в условиях ограниченной статистической базы.

Предложенная методика может быть использована органами городского планирования, проектными организациями и частными инвесторами как инструмент обоснованного выбора местоположения ЭЗС на ранних стадиях проектирования.

Литература

1. Global EV Outlook 2023: Catching up with climate ambitions. Paris: International Energy Agency, 2023. 176 с. URL: <https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2023> (дата обращения: 01.06.2025).
2. Национальная технологическая инициатива «Автонет». Электромобили в России: аналитический обзор. М.: Аналитический центр при Правительстве РФ, 2022. 48 с.
3. Ремизова Т. В. Развитие зарядной инфраструктуры в России: стимулы и перспективы применения технологии Vehicle-to-grid // Национальные интересы: приоритеты и безопасность. 2023. № 3 (426). С. 49–65.
4. Антонова Е. И., Морозов Д. В., Акишев И. В. Анализ влияния стохастической нагрузки электромобилей на распределительную сеть // Электроэнергия. Передача и распределение. 2022. № 6. С. 45–51.
5. Karolemeas C., Tsigdinos S., Tzouras P. G., Nikitas A., Bakogiannis E. Determining Electric Vehicle Charging Station Location Suitability: A Qualitative Study of Greek Stakeholders Employing Thematic Analysis and Analytical Hierarchy Process // Sustainability. 2021. Vol. 13, No. 4. Article 2298. DOI: 10.3390/su13042298.
6. Guler D., Yomralioglu T. Suitable location selection for the electric vehicle fast charging station with AHP and fuzzy AHP methods using GIS // Annals of GIS. 2020. Vol. 26, No. 2. P. 169–189. DOI: 10.1080/19475683.2020.1737226.
7. ICCT. Quantifying the electric vehicle charging infrastructure gap across U.S. markets. Washington, DC: International Council on Clean Transportation, 2019. 32 p. URL: <https://theicct.org/publication/quantifying-the-electric-vehicle-charging-infrastructure-gap-across-u-s-markets/> (дата обращения: 01.06.2025).
8. Евдокимов Д. Ю., Пономарев Ю. Ю. Развитие электрозаправочной инфраструктуры в регионах России: сценарный анализ // Экономическое развитие России. 2022. Т. 29, № 11. С. 59–76.
9. Солуянов Ю. И., Ахметшин А. Р., Солуянов В. И. Актуализация удельных электрических нагрузок помещений общественного назначения, встроенных в жилые здания // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2021. Т. 23, № 3. С. 47–57. DOI: 10.30724/1998-9903-2021-23-3-47-57.
10. Saati T. Принятие решений. Метод анализа иерархий. М.: Радио и связь, 1993. 320 с.

11. Golden B. L., Wasil E. A., Harker P. T. *The Analytic Hierarchy Process: Applications and Studies*. New York: Springer, 1989. 302 p.
12. Karatzas S., Farmakis P., Chassakos A., Farmakis T., Christoforou Z., Liappi G. Development of a multi-criteria model for assisting EV user charging decisions // *Journal of Sustainable Development of Energy, Water and Environment Systems*. 2023. Vol. 11, Issue 1. Article 1100439.
13. Liu J., Wang X., Wang Y. Location Optimization of EV Charging Stations Based on AHP and GIS: A Case Study in Beijing // *Sustainability*. 2020. Vol. 12, No. 21. Article 8977. DOI: 10.3390/su12218977.
14. Al Harbi K. M. A. Application of the AHP in project management // *International Journal of Project Management*. 2001. Vol. 19, No. 1. P. 19–27. DOI: 10.1016/S0263-7863(99)00038-1.
15. Partovi F. Y. Determining what to benchmark: An analytic hierarchy approach // *International Journal of Operations & Production Management*. 1994. Vol. 14, No. 6. P. 25–39. DOI: 10.1108/01443579410062042.
16. Bottero M., Ferretti V. An analytic network process for the sustainable design of a transport system // *European Journal of Operational Research*. 2011. Vol. 215, No. 3. P. 648–657. DOI: 10.1016/j.ejor.2011.06.006.
17. Камольцева А. В., Писарев Г. А. Подход к определению параметров сети зарядных станций для электромобилей // Транспорт на альтернативном топливе. 2020. № 5 (77). С. 62–69.

Авторы публикации

Казак Павел Романович – аспирант Новосибирского государственного технического университета, г. Новосибирск, Россия. *kazak-p@inbox.ru*

Павлюченко Дмитрий Анатольевич – канд. техн. наук, доцент кафедры «Системы электроснабжения предприятий» Новосибирского государственного технического университета, г. Новосибирск, Россия.

References

1. Global EV Outlook 2023: Catching up with climate ambitions. Paris: International Energy Agency; 2023. 176 p. Available at: <https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2023> (accessed 1 June 2025).
2. Natsional'naya tekhnologicheskaya initsiativa “Avtonet”. Elektromobili v Rossii: analiticheskii obzor [Electric vehicles in Russia: analytical review]. Moscow: Analiticheskii tsentr pri Pravitel'stve RF; 2022. 48 p. (In Russ.).
3. Remizova TV. Razvitiye zaryadnoi infrastruktury v Rossii: stimuly i perspektivy primeneniya tekhnologii Vehicle-to-grid [Development of charging infrastructure in Russia: incentives and prospects for applying Vehicle-to-grid]. Natsional'nye interesy: prioritety i bezopasnost' [National Interests: Priorities and Security]. 2023;3(426):49–65. (In Russ.).
4. Antonova EI, Morozov DV, Akishev IV. Analiz vliyaniya stokhasticheskoi nagruzki elektromobilei na raspredelitel'nyyu set' [Analysis of the impact of stochastic electric-vehicle load on the distribution network]. Elektroenergiya. Peredacha i raspredelenie [Electric Power. Transmission and Distribution]. 2022;6:45–51. (In Russ.).
5. Karolemeas C, Tsigdinos S, Tzouras PG, Nikitas A, Bakogiannis E. Determining Electric Vehicle Charging Station Location Suitability: A Qualitative Study of Greek Stakeholders Employing Thematic Analysis and Analytical Hierarchy Process. Sustainability. 2021;13(4):2298. doi:10.3390/su13042298.
6. Guler D, Yomraliooglu T. Suitable location selection for the electric vehicle fast charging station with AHP and fuzzy AHP methods using GIS. Annals of GIS. 2020;26(2):169–189. doi:10.1080/19475683.2020.1737226.
7. International Council on Clean Transportation (ICCT). Quantifying the electric vehicle charging infrastructure gap across U.S. markets. Washington, DC: ICCT; 2019. 32 p. Available at: <https://theicct.org/publication/quantifying-the-electric-vehicle-charging-infrastructure-gap-across-u-s-markets/> (accessed 1 June 2025).
8. Evdokimov DYu, Ponomarev YuYu. Razvitiye elektrozapravochnoy infrastruktury v regionakh Rossii: stsenarnyi analiz [Development of electric refueling infrastructure in Russian regions: scenario analysis]. Ekonomicheskoe razvitiye Rossii [Economic Development of Russia]. 2022;29(11):59–76. (In Russ.).
9. Soluyanov YuI, Akhmetshin AR, Soluyanov VI. Aktualizatsiya udel'nykh elektricheskikh nagruzok pomeshchenii obshchestvennogo naznacheniya, vstroennykh v zhilye zdaniya [Updating specific electrical loads of public premises embedded in residential buildings]. Proceedings of the higher educational institutions. ENERGY SECTOR PROBLEMS. 2021;23(3):47–57. doi:10.30724/1998-9903-2021-23-3-47-57. (In Russ.).

10. Saaty TL. The Analytic Hierarchy Process. New York: McGraw-Hill; 1980. 287 p.
11. Golden BL, Wasil EA, Harker PT. The Analytic Hierarchy Process: Applications and Studies. New York: Springer; 1989. 302 p.
12. Karatzas S, Farmakis P, Chassiakos A, Farmakis T, Christoforou Z, Liappi G. Development of a multi-criteria model for assisting EV user charging decisions. *Journal of Sustainable Development of Energy, Water and Environment Systems*. 2023;11(1):1100439.
13. Liu J, Wang X, Wang Y. Location Optimization of EV Charging Stations Based on AHP and GIS: A Case Study in Beijing. *Sustainability*. 2020;12(21):8977. doi:10.3390/su12218977.
14. Al Harbi KMA. Application of the AHP in project management. *International Journal of Project Management*. 2001;19(1):19–27. doi:10.1016/S0263-7863(99)00038-1.
15. Partovi FY. Determining what to benchmark: An analytic hierarchy approach. *International Journal of Operations & Production Management*. 1994;14(6):25–39. doi:10.1108/01443579410062042.
16. Bottero M, Ferretti V. An analytic network process for the sustainable design of a transport system. *European Journal of Operational Research*. 2011;215(3):648–657. doi:10.1016/j.ejor.2011.06.006.
17. Kamoltseva AV, Pisarev GA. Podkhod k opredeleniyu parametrov seti zaryadnykh stantsii dlya elektromobilei [Approach to determining parameters of a charging-station network for electric vehicles]. *Transport na al'ternativnom toplive* [Transport on Alternative Fuel]. 2020;5(77):62–69. (In Russ).

Authors of the publication

Pavel R. Kazak – Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russia. *kazak-p@inbox.ru*

Dmitry A. Pavlyuchenko – Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russia.

Шифр научной специальности: 2.4.3 Электроэнергетика

Получено

15.08.2025 г.

Отредактировано

22.10.2025 г.

Принято

26.10.2025 г.