DOI: 10.24892/RIJIE/20260302

Стратегические подходы к формированию и развитию зарядной инфраструктуры электротранспорта в транспортно-технологических системах*

Комяков А.А., Заренкова Ю.В.
Омский государственный университет путей сообщения
г. Омск, Российская Федерация
tskom@mail.ru, zarenkovaulia1@gmail.com

Аннотация. **В статье представлено комплексное исследование развития и организации зарядной инфраструктуры электромобильного транспорта как ключевого компонента транспортных и транспортно-технологических систем страны, регионов и городских агломераций. Показано, что ускоренная электрификация транспорта требует перехода от фрагментарных инженерных решений к системно интегрированным моделям планирования, учитывающим транспортный спрос, пропускную способность электрических сетей, ограничения городской застройки и параметры цифровой среды. Проведён анализ международных и отечественных нормативов, регламентирующих архитектуру зарядных станций, стандарты интерфейсов, протоколы обмена данными и требования к эксплуатационной совместимости. Представлена многомерная классификационная модель зарядной инфраструктуры, включающая типизацию по функциональной роли в транспортной системе, уровню мощности, типу подключения, архитектуре управления, источнику энергоснабжения и степени автоматизации. Рассмотрены современные методологические подходы к выбору мест размещения зарядных станций: нормативно-планировочные методы, экспертно-аналитические оценки, многокритериальные модели (AHP, TOPSIS, VIKOR), геоинформационные технологии (GIS), оптимизационные математические модели (MILP, MCLP), алгоритмы машинного обучения, методы кластерного анализа и имитационного моделирования. Показано, что наибольшую эффективность обеспечивает интеграция кластерного анализа и имитационного моделирования, позволяющая учитывать пространственно-временную структуру спроса и динамические параметры функционирования инфраструктуры. Результаты исследования формируют научно-методическую основу для разработки региональных стратегий электромобилизации, оптимизации размещения зарядных станций и повышения устойчивости транспортных систем в условиях роста парка электротранспорта.**

Ключевые слова**: электромобильный транспорт, зарядная инфраструктура, транспортно-технологические системы, кластерный анализ, имитационное моделирование, методы размещения зарядных станций, устойчивые транспортные системы**

Введение

Современный этап развития транспортных систем характеризуется интенсивным внедрением экологически ориентированных и энергоэффективных технологий, среди которых электрификация автомобильного транспорта занимает ключевое место. Стремительный рост парка электромобилей трансформирует структуру городской и региональной мобильности, предъявляя качественно новые требования к транспортной, энергетической и цифровой инфраструктуре. В этих условиях зарядная инфраструктура становится не просто вспомогательным технологическим объектом, а критически значимым элементом транспортно-технологической системы, определяющим параметры транспортной доступности, устойчивость перевозочного процесса и функционирование городской среды.

Глобальные тенденции подтверждают масштабность происходящих изменений. Согласно данным отчёта International Energy Agency – Global EV Outlook 2025, за последние два года мировая сеть публичных зарядных устройств продемонстрировала экспоненциальный рост: общее количество зарядных точек увеличилось более чем вдвое и превысило 5 млн единиц к концу 2024 года [1]. Подобная динамика отражает комплексное наращивание инфраструктурного потенциала, направленное на поддержку ускоренного увеличения парка электромобилей и формирование устойчивых транспортных систем в городах и регионах. Это также указывает на необходимость системного подхода к планированию зарядной инфраструктуры, учитывающего пространственные, энергетические и эксплуатационные ограничения. Важным показателем является то, что темпы внедрения зарядных устройств в Китае и Европейском союзе остались сопоставимыми с темпами роста количества электромобилей. В этих регионах политика в области электромобилей сочетается с программами развития транспортной инфраструктуры, что обеспечивает сбалансированное развертывание зарядных станций по мере увеличения числа электромобилей на дорогах.

В Российской Федерации аналогичный вектор развития закреплён в стратегических документах. В соответствии с Концепцией развития производства и использования электрического автомобильного транспорта до 2030 года предусмотрено масштабное расширение зарядной сети: плановый показатель превышает 72 тыс. зарядных станций, из которых не менее 28 тыс. составят объекты быстрой и высокомощной зарядки, интегрируемые в транспортно-технологическую инфраструктуру страны [2]. Параллельно

* Статья публикуется по рекомендации программного комитета Всероссийской научно-технической конференции "Пром-Инжиниринг", https://icie-rus.org

прогнозируется рост парка электромобилей до уровня около 1,4 млн единиц к 2030 году. Такое сочетание факторов существенно усиливает нагрузку на существующие системы транспортного планирования и подчёркивает необходимость разработки научно обоснованных методологических решений.

В последние годы российский рынок электротранспорта демонстрирует ускоренное расширение парка электромобилей, что оказывает прямое влияние на потребность в развитии общественной зарядной инфраструктуры как ключевого элемента транспортно-технологической системы страны. По данным аналитического агентства «Автостат», на середину 2024 года на территории Российской Федерации функционировало более 7 410 общедоступных зарядных станций, включая как быстрые (DC), так и стандартные (AC) точки зарядки [3]. Увеличение числа станций за последние годы превышает 60 %, что свидетельствует о синхронизации темпов развертывания инфраструктуры с ростом количества электромобилей.

При этом зарядная инфраструктура представляет собой сложную многокомпонентную систему, в которой пересекаются интересы транспортной отрасли, электроэнергетики, градостроительства и цифрового управления. Разнообразие моделей зарядных станций, вариативность технических параметров, пространственная неоднородность спроса и динамика эксплуатационных режимов требуют применения комплексных исследовательских подходов. Традиционные нормативно-планировочные методы в условиях стремительных технологических изменений оказываются недостаточными, поскольку не отражают реальных пространственно-временных характеристик функционирования инфраструктуры.

В этой связи особую актуальность приобретает применение интегрированных аналитических инструментов – кластерного анализа, геоинформационных методов, оптимизационных моделей и имитационного моделирования, позволяющих выявлять закономерности распределения спроса, оценивать динамику загрузки зарядных станций и формировать адаптивные решения по их размещению. Разработка методологически обоснованных подходов к планированию зарядной инфраструктуры является важным условием повышения устойчивости транспортных и транспортно-технологических систем, повышения транспортной и энергетической безопасности, а также реализации долгосрочных стратегий развития городской мобильности.

Международные подходы к типизации зарядных станций электромобильного транспорта

Международная практика демонстрирует, что классификация зарядной инфраструктуры формируется на основе совокупности технических, функциональных и эксплуатационных критериев. Одним из базовых направлений типизации является стандартизация разъёмов и протоколов зарядки, обеспечивающих совместимость оборудования и электромобилей в рамках глобального рынка. Наиболее распространённые интерфейсы объединены в комплексную систему стандартов IEC, ISO и SAE, определяющих параметры электропитания, режимы зарядки и область применения. В странах с высоким уровнем электромобильности (Норвегия, Нидерланды, Германия, Китай, США) применяются комплексные подходы к размещению зарядных станций [4].

С целью унификации подходов к проектированию инфраструктуры зарядные разъёмы рассматриваются не только как электротехнические элементы, но как технологические интерфейсы, влияющие на длительность зарядного цикла, пропускную способность станций и общую эффективность функционирования транспортно-техноло-гических систем.

Ниже представлена систематизированная международная классификация разъёмов, адаптированная под эксплуатационные и нормативные характеристики табл. 1.

Таблица 1

Международная классификация разъёмов зарядной инфраструктуры электромобилей

Тип разъёма	Электротехнические параметры	Стандарты	Регион применения и тип зарядки
Type 1 (SAE J1772)	AC, 1-фаза, 120–240 В, до 7,4 кВт	SAE J1772, IEC 62196-2	Северная Америка, Япония; медленная/средняя
Type 2 (Mennekes)	AC, 1–3 фазы, 230–400 В, до 43 кВт	IEC 62196-2	Европа; медленная/средняя
Type 3	AC, 1–3 фазы, до 22 кВт	IEC 62196-2	Франция; медленная/средняя
SAE J3068	AC, 3 фазы, 480 В, 19–80 кВт	SAE J3068	Северная Америка; средняя
CCS Combo 1 (CCS1)	AC/DC, AC до 7,4 кВт; DC до 350 кВт	IEC 62196-3, SAE	США; быстрая DC
CCS Combo 2 (CCS2)	AC/DC, AC до 43 кВт; DC до 350 кВт	IEC 62196-3	Европа; быстрая DC
CHAdeMO	DC, до 500 В, до 400 кВт	CHAdeMO	Япония, частично США/ЕС; быстрая DC
GB/T DC	DC, 200–1000 В, до 900 кВт	GB/T 20234	Китай; высокомощная DC
NACS (SAE J3400)	AC 19–22 кВт; DC до 250 кВт	SAE J3400	Северная Америка; AC/DC

Таким образом, стандарты разъёмов выполняют роль системообразующего фактора, определяющего технологическую совместимость оборудования, параметры электропитания, требования к кабельной инфраструктуре и архитектуре зарядных площадок [5, 6].

Однако международная классификация не ограничивается только технической типологией. Существенное значение имеет функциональный сценарий использования зарядной станции, поскольку он формирует требования к мощности, доступности, интенсивности эксплуатации и пространственной интеграции объекта в транспортную сеть.

Особенности типизации и организации зарядной инфраструктуры электромобилей в транспортно-технологических системах Российской Федерации

Развитие зарядной инфраструктуры в Российской Федерации происходит в контексте гармонизации международных стандартов и отечественных нормативных документов, что обусловливает необходимость формирования унифици-

рованных подходов к типизации объектов зарядки. В российских транспортно-технологических системах используется комплексная модель многоуровневой зарядной сети, учитывающая неоднородность городской и межрегиональной мобильности, особенности территориального планирования, пропускную способность энергетических сетей и институциональные условия эксплуатации.

Применяемая в России система типизации была сформирована на основе анализа ключевых международных стандартов (IEC 62196, ISO 15118, SAE J1772, SAE J3400, CHAdeMO, GB/T) и действующих нормативных требований РФ к инженерному подключению, электробезопасности и архитектуре объектов энергоснабжения [7-9]. В России доминирует использование разъёма Type 2 для зарядки переменным током, который является стандартом по умолчанию для большинства публичных зарядных станций. При реализации постоянного тока активно применяется стандарт CCS2, который в последние годы стал основным для быстроразвивающихся сетей высокомощной зарядки. Итогом стало выделение пяти уровней зарядной инфраструктуры, различающихся по функциональному назначению, мощности, режимам работы и роли в транспортно-технологической системе.

Синтез международных и российских подходов позволил структурировать национальную сеть зарядных станций как многоуровневую систему, объединяющую локальные, городские, магистральные и специализированные высокомощные объекты. Для наглядного представления результирующая классификация была визуализирована в виде схемы, отражающей иерархическую структуру уровней и их соответствие международным и российским стандартам, типам разъёмов и диапазонам мощностей рис. 1.

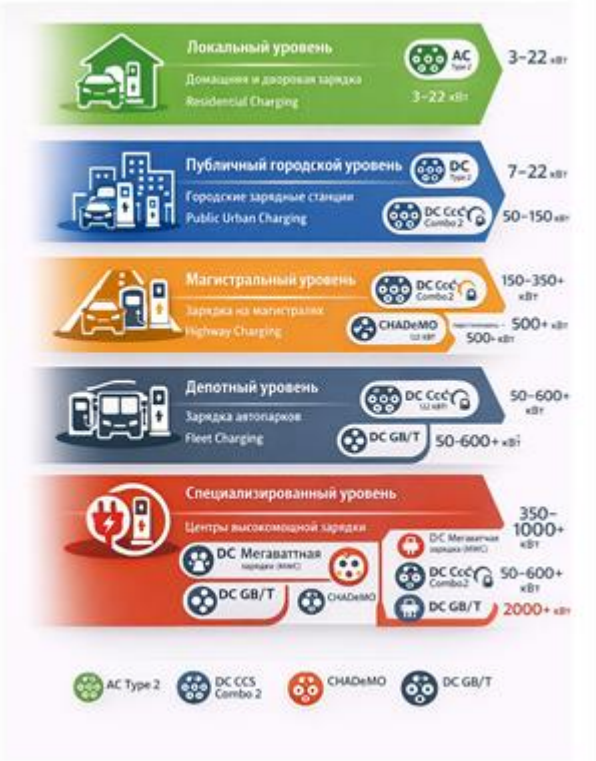

Рис. 1. Схема многоуровневой зарядной инфраструктуры в России

Представленная многоуровневая система позволяет обеспечить функциональную целостность зарядной инфраструктуры, гибко адаптировать её к структуре транспортных потоков, учитывать пространственные различия регионов и планировать развитие сети в соответствии с приоритетами государственной политики в сфере электромобилизации. Систематизация инфраструктуры по уровням создаёт основу для последующей разработки методик оптимального размещения зарядных станций, оценки их пропускной способности и интеграции в интеллектуальные транспортные системы [10-13].

Функционально-технологическая классификация зарядных станций электромобилей

В развитие результатов, представленных в предыдущих разделах, где были рассмотрены международные подходы к типизации инфраструктуры и особенности её организации в транспортно-технологических системах Российской Федерации, целесообразно сформировать классификационный аппарат, позволяющий системно описывать зарядные станции с учётом их функциональной роли, энергетических характеристик и эксплуатационной специфики.

Анализ международных и российских нормативно-технических документов, регулирующих развитие зарядной инфраструктуры для электромобильного транспорта, показывает, что существующие классификационные подходы в большинстве случаев ориентированы преимущественно на электротехнические параметры оборудования – тип разъёма, режим электропитания, уровни мощности, стандарты безопасности и протоколы взаимодействия. Такой подход обеспечивает необходимую техническую унификацию, однако приводит к тому, что функционально-пространственные характеристики инфраструктуры, особенности её интеграции в транспортную систему, организационные модели эксплуатации и требования к устойчивому функционированию оказываются представленными неполно и зачастую носят фрагментарный характер. В результате отсутствует комплексная методика, позволяющая рассматривать зарядные станции не как отдельные технические устройства, а как элементы многокомпонентной транспортно-технологической системы, взаимодействующей с транспортными потоками, энергетическими сетями, городской средой и цифровыми сервисами [14-15].

С учётом выявленных ограничений для целей настоящего исследования была разработана интегральная функционально-технологическая классификация зарядных станций, ориентированная на системное представление инфраструктуры и основанная на принципах системного анализа транспортных и транспортно-технологических систем. Предложенная классификация объединяет технические, функциональные, организационные, энергетические и экологические параметры объектов инфраструктуры в единую структурированную модель, позволяющую формализовать свойства зарядных станций на уровне множеств признаков и обеспечивающую дальнейшее применение методов количественного анализа. Визуализированная структура классификационной модели представлена на рис.2, где отражена иерархия признаков и их взаимосвязи в контексте функционирования инфраструктуры электромобильного транспорта.

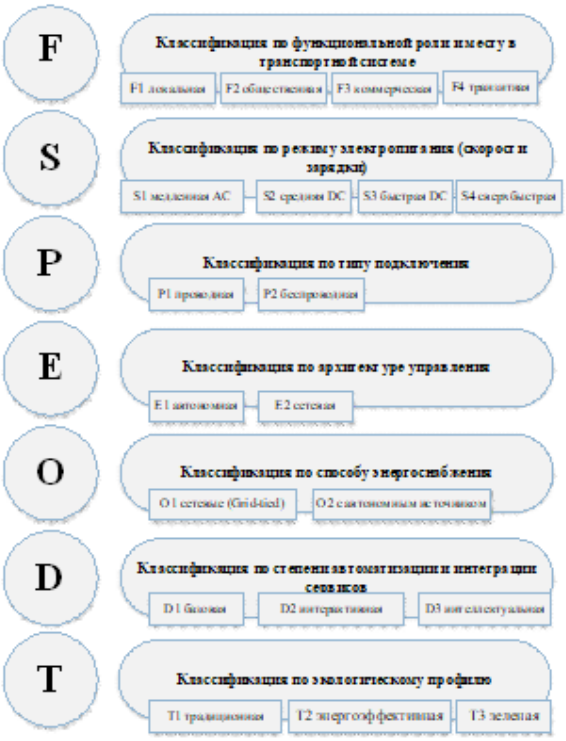

Рис. 2. Классификация зарядных станций для электромобилей

Методологические подходы к системному анализу зарядной инфраструктуры электромобильного транспорта

Системный анализ зарядной инфраструктуры электромобильного транспорта требует комплексного методологического подхода, позволяющего оценивать не только технические параметры зарядных станций, но и их функциональную, пространственную и энергетическую интеграцию в транспортно-технологические системы городов и регионов. Развитие электромобильности сопровождается усложнением инфраструктурных взаимодействий, что делает необходимым использование инструментов многомерного анализа. Учитывая результаты классификации, представленные в параграфах выше, научное описание инфраструктуры должно опираться на сочетание аналитико-структурных, пространственно-временных, энергетико-сетевых и цифровых методов, обеспечивающих целостное представление о функционировании зарядных станций в динамичной среде транспортной мобильности.

Применение структурных методов позволяет выявлять взаимосвязи между объектами инфраструктуры, определять пропускные возможности зарядных узлов и анализировать их роль в транспортной системе. Пространственно-временной анализ, основанный на ГИС-моделировании, обеспечивает оценку пространственной доступности зарядных станций и выявление зон транспортной напряжённости, что позволяет прогнозировать потребность в расширении инфраструктуры. Энергетико-сетевой анализ необходим для оценки нагрузочных режимов и определения влияния быстрых и сверхбыстрых станций на параметры электроэнергетических сетей. Математические методы моделирования, включая имитационные подходы и оптимизационные модели, позволяют формировать количественные решения по развитию инфраструктуры и обеспечивать её устойчивое функционирование при росте транспортных потоков. Дополнительно применение цифровой аналитики и интеллектуальных систем управления (smart charging) обеспечивает возможность адаптивного распределения нагрузки и интеграции зарядных станций в интеллектуальные транспортные системы.

Сравнительная характеристика ключевых методологических подходов представлена в табл. 2. Данная таблица составлена на основе научных исследований [16-25].

Таким образом, совокупность перечисленных методов формирует целостный научный инструментарий для анализа, оценки и прогнозирования параметров зарядной инфраструктуры. Их интегрированное применение обеспечивает возможность перехода от описательного характера исследования к построению устойчивых, количественно обоснованных моделей развития инфраструктуры электромобильного транспорта.

Таблица 2

Сравнительная характеристика методов системного анализа зарядной инфраструктуры

Методологический подход	Основные задачи анализа	Тип данных	Результаты применения
Аналитико-структурный	Оценка структуры инфраструктуры, пропускной способности, взаимодействий между объектами	Технические параметры, топология сети	Выявление узких мест, определение структуры потоков
Пространственно-временной (ГИС)	Оценка доступности, пространственной концентрации спроса	Геоданные, транспортные потоки	Оптимизация размещения станций, картирование зон дефицита
Энергетико-сетевой	Оценка нагрузок и устойчивости электросетей	Параметры электросетей, профили потребления	Прогноз нагрузок, выявление критических узлов
Имитационное моделирование	Моделирование поведения пользователей и динамики зарядки	Статистические и поведенческие данные	Прогнозирование функционирования системы при различных сценариях
Оптимизационные методы	Минимизация затрат, повышение доступности	Ограничения, параметры инфраструктуры	Расчёт оптимального размещения и конфигурации сети
Цифровая аналитика и ИТС	Управление в реальном времени, адаптивные режимы	Big Data, телеметрия, IoT-данные	Реализация smart charging, повышение энергоэффективности

Существенное значение для дальнейшего исследования имеет кластерный анализ, поскольку он позволяет выявлять однородные по характеристикам зоны спроса на зарядную инфраструктуру, что является ключевым для последующей оптимизации размещения зарядных станций. Кластеризация группирует территории на основе интенсивности транспортных потоков, плотности электромобилей, характеристик мобильности населения и социально-экономических показателей. Наиболее распространёнными алгоритмами, применяемыми в научной литературе, являются k-means, DBSCAN, иерархическая кластеризация, SOM и GMM – они различаются способами выделения групп, устойчивостью к выбросам и требованиями к структуре данных [26-29]. Выбор кластерного анализа как базового метода дальнейшего исследования обусловлен его способностью формировать объективную пространственную структуру спроса без необходимости задания весовых коэффициентов или экспертных допущений.

При этом применение одного лишь кластерного анализа недостаточно для обоснования параметров функционирования сети зарядных станций. Полученные кластерные зоны не позволяют определить эксплуатационные характеристики объектов – загрузку, очереди, время ожидания, влияние режимов зарядки на электросеть и доступность инфраструктуры при различных сценариях транспортной активности. Поэтому в дальнейшем исследовании кластеризация дополняется методами имитационного моделирования, которые позволяют анализировать поведение пользователей, работу зарядных станций и динамику транспортных потоков во времени.

Имитационное моделирование, включая дискретно-событийные и агент-ориентированные методы, создаёт возможность воспроизвести эксплуатационные процессы в условиях реальных ограничений и поведения пользователей. Такие модели учитывают формирование очередей, закономерности выбора станций, длительность зарядных сессий, распределение нагрузки по времени суток и взаимодействие зарядных объектов с сетью электроснабжения. Ключевым преимуществом имитационных моделей является возможность оценки эффективности проектных решений, полученных по результатам кластерного анализа, ещё до их практической реализации. Это обеспечивает проверку устойчивости выбранной конфигурации инфраструктуры, тестирование альтернативных сценариев развития и обоснование оптимальных решений по размещению зарядных станций.

Таким образом, сочетание методов кластерного анализа и имитационного моделирования формирует комплексную методологическую основу для последующих этапов исследования, связанных с оптимизацией размещения и функционирования зарядной инфраструктуры электромобильного транспорта. Кластеризация обеспечивает выявление объективной пространственной структуры спроса, позволяя выделять территориально однородные зоны с устойчивыми характеристиками транспортной активности, плотности электромобилей, социально-экономических условий и особенностей городской морфологии. Полученные кластеры отражают естественные закономерности формирования потребности в зарядных услугах и служат базой для установления рациональных границ обслуживания зарядных станций и определения потенциальных локаций их размещения.

В свою очередь, имитационное моделирование предоставляет возможность оценивать эксплуатационные параметры функционирования будущей инфраструктуры в условиях реальной или прогнозируемой транспортной нагрузки. Использование дискретно-событийных и агент-ориентированных моделей позволяет воспроизводить поведение пользователей, динамику очередей, степень загрузки станций, влияние режимов работы на электросеть, временные пики спроса и другие важные эксплуатационные характеристики. Такое моделирование позволяет заранее тестировать различные сценарии функционирования зарядной сети, выявлять потенциальные узкие места, оценивать устойчивость инфраструктуры к росту числа электромобилей и определять параметры, требующие корректировки ещё на этапе проектирования.

Интеграция результатов кластерного анализа и имитационного моделирования образует научно обоснованный и методологически последовательный подход к оптимизации размещения объектов зарядной инфраструктуры. Кластеризация задаёт структурное основание для пространственных решений, а имитационные модели обеспечивают их проверку и уточнение с точки зрения эксплуатационной эффективности. Такое сочетание методов позволяет принимать инженерно-планировочные решения, основанные на объективных данных, учитывать региональную специфику и динамику транспортного спроса, а также повышать устойчивость и надёжность функционирования зарядной сети. В итоге данный комбинированный подход является ключевым инструментом для обоснования проектных решений и формирования научно доказательной методики развития зарядной инфраструктуры.

Заключение (Выводы)

Проведённое исследование позволило сформировать целостное научное представление о современном состоянии, направлениях развития и методологических основах анализа зарядной инфраструктуры электромобильного транспорта. Систематизация международных и российских нормативных документов, технических требований, подходов к типизации зарядных станций и практик инфраструктурного проектирования выявила существенную неоднородность как в технологической, так и в функциональной сфере. Несмотря на широкое распространение унифицированных электротехнических стандартов, существующие классификационные схемы преимущественно ориентированы на параметры оборудования, в то время как пространственно-функциональное назначение объектов, особенности их интеграции в транспортную и энергетическую систему города, а также организационно-экономические аспекты эксплуатации остаются недостаточно формализованными. Это приводит к отсутствию универсального инструментария, позволяющего научно обосновывать инфраструктурные решения и оценивать последствия дальнейшего роста парка электромобилей.

В этой связи в рамках исследования был разработан интегральный подход к описанию зарядной инфраструктуры, включающий многомерную функционально-технологическую классификацию и систему методологических принципов анализа инфраструктурных объектов как элементов транспортно-технологической системы. Применение системного анализа, пространственно-временных методов,

энергетико-сетевого моделирования и цифровой аналитики позволило представить зарядную сеть как сложную, иерархически организованную подсистему городской мобильности, в которой взаимосвязаны транспортные, энергетические, технологические и поведенческие процессы. Такой подход обеспечивает возможность формирования научно обоснованных решений на основе количественного анализа структурных свойств инфраструктуры, её пространственной распределённости, динамики спроса и эксплуатационных параметров.

Особое внимание в исследовании уделено методам кластерного анализа и имитационного моделирования, которые рассмотрены не как самостоятельные инструменты, а как взаимодополняющие элементы комплексной методики принятия инфраструктурных решений. Кластерный анализ позволяет объективно выделить территориально и функционально однородные зоны, характеризующиеся устойчивыми закономерностями транспортного поведения, плотностью электромобилей, особенностями городской среды и потенциальным спросом на зарядные услуги. Использование алгоритмов k-means, DBSCAN, иерархической кластеризации, SOM и GMM обеспечивает возможность выявления латентных структур в данных, формирование зон обслуживания станций и определение перспективных локаций для размещения инфраструктуры без необходимости экспертного задания критериев.

Однако результаты кластеризации отражают только потенциальное распределение спроса, не учитывая динамику эксплуатации зарядных объектов, временные пики, очередность обслуживания и взаимодействие с электросетью. Эти аспекты становятся критически важными при практическом проектировании инфраструктуры, особенно в условиях централизованных транспортных систем или коммерческих парков электромобилей. Поэтому интеграция кластерного анализа с имитационным моделированием является методологически оправданным шагом, позволяющим дополнить пространственные выводы операционной оценкой функционирования инфраструктуры. Имитационные модели — дискретно-событийные, агент-ориентированные и гибридные — позволяют воспроизводить процессы зарядки, перемещения, ожидания, распределения нагрузки, моделировать пользовательское поведение и анализировать устойчивость инфраструктуры к вариативности транспортных потоков и режимов работы станций.

Сочетание этих двух подходов формирует комплексную методику, обеспечивающую научно обоснованное проектирование инфраструктуры электромобильного транспорта с учётом фактических и прогнозируемых условий эксплуатации. Кластеризация определяет логическую структуру спроса, а имитационное моделирование – проверяет устойчивость инфраструктурных решений, оценивает качество обслуживания, снижает риски перегрузки отдельных станций и позволяет прорабатывать альтернативные сценарии развития. Такой подход отличается универсальностью, поскольку может быть адаптирован к различным типам городских территорий и транспортных систем, включая транзитные коридоры, локальные системы мобильности и коммерческие автопарки.

Полученные результаты исследования формируют основу для важного прикладного направления – разработки имитационной модели функционирования таксопарка на электромобилях с учётом оптимального размещения зарядной инфраструктуры. На следующем этапе планируется создание модели, позволяющей воспроизводить полный цикл работы электромобильного таксопарка: формирование заявок, распределение заказов, движение по городским маршрутам, процессы зарядки, очереди на станциях, простои и влияние выбранной инфраструктурной конфигурации на транспортную доступность. Использование кластеризации обеспечит корректное выделение зон наибольшего спроса на зарядку и таксомоторные услуги, а имитационная модель позволит оценить эксплуатационную эффективность различных сценариев размещения станций, их мощности, количества и режимов работы.

Таким образом, представленное исследование не только развивает теоретическую базу анализа зарядной инфраструктуры электромобильного транспорта, но и формирует методологический фундамент для построения комплексных моделей функционирования электрического таксопарка. Реализация данной модели позволит обосновать параметры инфраструктуры, повысить эффективность городских перевозок, обеспечить устойчивое развитие электромобильности и подготовить научно обоснованные рекомендации для транспортного планирования.

Литература

1. International Energy Agency (IEA). Global EV Outlook 2025: Electric Vehicle Charging. – Paris: IEA, 2025. – URL: https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2025/electric-vehicle-charging (дата обращения: 08.12.2025).

2. Концепция по развитию производства и использования электрического автомобильного транспорта в Российской Федерации на период до 2030 года: утв. распоряжением Правительства РФ от 23.08.2021 № 2290-р. – М., 2021. – URL: https://www.zakonrf.info/rasporiazhenie-pravitelstvo-rf-2290-r-23082021/ (дата обращения: 11.12.2025).

3. International Energy Agency. Global EV Outlook 2024. – URL: https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2024 (дата обращения: 17.03.2025).

4. BloombergNEF. Electric Vehicle Outlook 2024. – New York: Bloomberg Finance L.P., 2024. – URL: https://webstore.iec.ch/en/publication/6007 (дата обращения: 11.12.2025).

5. IEC 62196-1:2014. Plugs, socket-outlets, vehicle connectors and vehicle inlets – Part 1: General requirements. — International Electrotechnical Commission. — URL: https://webstore.iec.ch/en/publication/6007 (дата обращения: 11.12.2025).

6. ISO 15118. Road vehicles – Vehicle to grid communication interface. – International Organization for Standardization. – URL: https://www.iso.org/standard/63434.html (дата обращения: 11.12.2025).

7. Приказ Минпромторга России от 29.04.2022 № 1776 (ред. от 05.04.2024) «Об утверждении технических характеристик оборудования стационарной автомобильной зарядной станции публичного доступа, обеспечивающей возможность быстрой зарядки электрического автомобильного транспорта». – Зарегистрировано в Минюсте России 01.06.2022 № 68680.

8. СТО 34.01-8.1-001-2021. Электрозарядные станции для электромобилей. Общие технические требования на электрозарядные станции постоянного тока. – ПАО «Россети», 2021.

9. ГОСТ Р МЭК 61851-1-2013. Электротранспорт дорожный. Система проводного зарядного оборудования. Часть 1. Общие требования. – М.: Стандартинформ, 2014. – Введён в действие приказом Росстандарта от 22.12.2013 № 2149-ст. – URL: https://docs.cntd.ru/document/1200108139 (дата обращения: 11.12.2025).

10. Mishra S. A comprehensive review on developments in electric vehicle charging station infrastructure and present scenario of India / S. Mishra, S. Verma, S. Chowdhury, A. Gaur, S. Mohapatra, G. Dwivedi, P. Verma // Sustainability. – 2021. – Vol. 13. – Art. 2396. – DOI: 10.3390/su13042396.

11. Tejeida-Padilla R. A comprehensive review of electric charging stations with a systemic approach / R. Tejeida-Padilla, E.M. Berdeja-Rocha, I. Badillo-Piña, Z. Pérez-Matamoros, J.E. Amador-Santiago // World Electric Vehicle Journal. – 2024. – Vol. 15. – Art. 571. – DOI: 10.3390/wevj15120571.

12. Saraswathi V.N. A comprehensive review on charger technologies, types, and charging stations models for electric vehicles / V.N. Saraswathi, V.P. Ramachandran // Heliyon. – 2024. – Vol. 10, Iss. 20. – Art. e38945. – DOI: 10.1016/j.heliyon.2024.e38945.

13. Rachid A. Electric vehicle charging systems: comprehensive review / A. Rachid, H. El Fadil, K. Gaouzi, K. Rachid, A. Lassioui, Z. El Idrissi, M. Koundi // Energies. – 2022. – Vol. 16, № 1. – Art. 255. – DOI: 10.3390/en16010255.

14. Aduama P. Electric vehicle charging infrastructure and energy resources: a review / P. Aduama, A.S. Al-Sumaiti, K.H. Al-Hosani // Energies. – 2023. – Vol. 16. – Art. 1965. – DOI: 10.3390/en16041965.

15. Jog P. Electric vehicle charging station infrastructure: a review / P. Jog, S. Shete, R.K. Kumawat, D.K. Palwalia // 6th IEEE International Conference on Recent Advances and Innovations in Engineering (ICRAIE). – Kedah, Malaysia, 2021. – P. 1-7. – DOI: 10.1109/ICRAIE52900.2021.9703969.

16. Karaşan A. Location selection of electric vehicles charging stations by using a fuzzy MCDM method: a case study in Turkey / A. Karaşan, İ. Kaya, M. Erdoğan // Neural Computing & Applications. – 2020. – Vol. 32. – P. 4553-4574. – DOI: 10.1007/s00521-018-3752-2.

17. Guo S. Optimal site selection of electric vehicle charging station by using fuzzy TOPSIS based on sustainability perspective / S. Guo, H. Zhao // Applied Energy. – 2015. – Vol. 158. – P. 390-402. – DOI: 10.1016/j.apenergy.2015.08.082.

18. Erbaş M. Optimal siting of electric vehicle charging stations: a GIS-based fuzzy multi-criteria decision analysis / M. Erbaş, M. Kabak, E. Özceylan, C. Çetinkaya // Energy. – 2018. – Vol. 163. – P. 1017-1031. – DOI: 10.1016/j.energy.2018.08.140.

19. Wang Y. Optimal location of electric vehicle charging stations based on multi-criteria decision-making methods / Y. Wang, J. Wang, Z. Liu // Transportation Research Part D. – 2019. – Vol. 67. – P. 1-15. – DOI: 10.1016/j.trd.2018.11.003.

20. Mall S. A fuzzy analytic hierarchy process and VIKOR framework for evaluation and selection of electric vehicle charging technology for India / S. Mall, R. Anbanandam // Transport in Developing Economies. – 2022. – Vol. 8. – Art. 14. – DOI: 10.1007/s40890-022-00150-x.

21. Бучацкий П.Ю. Разработка модуля размещения зарядных станций для электротранспорта на основе использования геоинформационных систем / П.Ю. Бучацкий, С.В. Теплоухов, С.В. Онищенко, Т.Ю. Бычков, М.Т. Михальцов, А.Н. Лисова, О.И. Макаренко // Вестник Адыгейского государственного университета. Серия 4. – 2023. – № 3 (326). – URL: https://cyberleninka.ru/article/n/razrabotka-modulya-razmescheniya-zaryadnyh-stantsiy-dlya-elektrotransporta-na-osnove-ispolzovaniya-geoinformatsionnyh-sistem (дата обращения: 16.12.2025).

22. Zhao H. Electric vehicle solar charging station siting study based on GIS / H. Zhao, J. Gao, X. Cheng // Sustainability. – 2023. – Vol. 15. – Art. 10967. – DOI: 10.3390/su151410967.

23. Battaïa O. MILP model for fleet and charging infrastructure decisions for fast-charging city electric bus services / O. Battaïa, A. Dolgui, N. Guschinsky, B. Rozin // Computers & Industrial Engineering. – 2023. – Vol. 182. – Art. 109336. – DOI: 10.1016/j.cie.2023.109336.

24. Iravani H. A multicriteria GIS-based decision-making approach for locating electric vehicle charging stations / H. Iravani // Transportation Engineering. – 2022. – Vol. 9. – Art. 100135. – DOI: 10.1016/j.treng.2022.100135.

25. Brinkel N. A novel forecasting approach to schedule aggregated electric vehicle charging / N. Brinkel, L. Visser, W. Van Sark, T. AlSkaif // Energy and AI. – 2023. – Vol. 14. – Art. 100297. – DOI: 10.1016/j.egyai.2023.100297.

26. Richard R. A spatial-temporal comparison of EV charging station clusters leveraging multiple validity indices / R. Richard, H. Cao, M. Wachowicz // Smart Cities, Green Technologies, and Intelligent Transport Systems. – 2022. – P. 34-57. – DOI: 10.1007/978-3-031-17098-0_3.

27. MacQueen J. Some methods for classification and analysis of multivariate observations // Proceedings of the Fifth Berkeley Symposium on Mathematical Statistics and Probability. – 1967. – Vol. 1. – P. 281-297.

28. Bishop C.M. Pattern recognition and machine learning. – New York: Springer-Verlag, 2006.

29. Ester M. A density-based algorithm for discovering clusters in large spatial databases with noise / M. Ester, H.-P. Kriegel, J. Sander, X. Xu // Proceedings of the Second International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining (KDD-96). – Menlo Park: AAAI Press, 1996. – P. 226-231. – DOI: 10.5555/3001460.3001507.

DOI: 10.24892/RIJIE/20260302

A Systemic Framework for the Development, Classification and Optimal Siting of Electric Vehicle Charging Infrastructure

Komyakov A.A., Zarenkova Yu.V.
Omsk State Transport UniversityOmsk, Russian Federation
tskom@mail.ru, zarenkovaulia1@gmail.com

Abstract. **The paper presents a comprehensive study of the development and organization of electric vehicle charging infrastructure as a key component of national, regional and urban transport and transport-technological systems. It is demonstrated that rapid transport electrification requires a transition from fragmented engineering solutions to system-integrated planning models that incorporate transport demand, electric grid capacity, urban development constraints and parameters of the digital environment. The analysis covers international and domestic standards regulating charging station architecture, interface specifications, data-exchange protocols and requirements for operational interoperability. A multidimensional classification framework for charging infrastructure is proposed, including typology based on functional roles within the transport system, power levels, connection types, control architectures, energy supply sources and degrees of automation. Modern methodological approaches to charging station siting are examined, including regulatory–planning methods, expert analytical assessments, multi-criteria decision-making models (AHP, TOPSIS, VIKOR), Geographic Information Systems (GIS), mathematical optimization techniques (MILP, MCLP), machine learning algorithms, clustering techniques and simulation modeling. It is shown that the integration of clustering analysis with simulation modeling provides the highest efficiency, enabling the consideration of spatiotemporal demand structures and dynamic operational characteristics of charging infrastructure. The results form a scientific and methodological basis for developing regional electrification strategies, optimizing station placement and enhancing the resilience of transport systems under the growing adoption of electric vehicles.**

Keywords: **electric vehicle transport, charging infrastructure, transport and technological systems, cluster analysis, simulation modeling, charging station siting methods, sustainable transport systems**

Библиографическое описание статьи

Комяков А.А. Стратегические подходы к формированию и развитию зарядной инфраструктуры электротранспорта в транспортно-технологических системах статьи / А.А. Комяков, Ю.В. Заренкова // Машиностроение: сетевой электронный научный журнал. – 2026. – Т.13, №3. – С. 8-15. DOI: 10.24892/RIJIE/20260302

Reference to article

Komyakov A.A., Zarenkova Yu.V. A systemic framework for the development, classification and optimal siting of electric vehicle charging infrastructure, Russian Internet Journal of Industrial Engineering, 2026, vol.13, no.3, pp. 8-15. DOI: 10.24892/RIJIE/20260302