



ОЦЕНКА ХАРАКТЕРИСТИК ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЗАРЯДНЫХ СТАНЦИЙ ПОСТОЯННОГО ТОКА В ПРОЦЕССЕ ЭКСПЛУАТАЦИИ

Сидоров К.М., Мубитанг А., Фам Х.Ш.

Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет
(МАДИ), г. Москва, Россия
k.sidorov@madi.ru

Резюме: АКТУАЛЬНОСТЬ. Развитие зарядной инфраструктуры, как в количественном, так и качественном отношении, является неотъемлемым условием дальнейшего распространения и увеличения доли перспективных транспортных средств с низким углеродным следом в структуре автотранспортного комплекса. В этой связи актуализируются вопросы проектирования систем электроснабжения с учетом характеристик и режимов работы быстрых электрических зарядных станций (ЭЗС), энергетической эффективности и технической эксплуатации последних. ЦЕЛЬ. Экспериментальная оценка характеристик производимых в России ЭЗС постоянного тока в условиях реальной эксплуатации. Реализация зарядных сессий распространенных в РФ легковых электромобилей и подключаемых гибридных автомобилей с измерением и регистрацией входных и выходных показателей работы ЭЗС. Экспериментальная оценка энергетической эффективности ЭЗС и ее взаимосвязи с характеристиками заряжаемых электромобилей. МЕТОДЫ. Решение поставленных задач осуществлялось посредством организации опытной эксплуатации распространенных в РФ многопортовых ЭЗС четырех различных производителей и использовании десяти популярных моделей электромобилей. В ходе опытной эксплуатации производились штатные процедуры заряда тяговых аккумуляторных батарей (ТАБ) с измерением входных характеристик ЭЗС на стороне переменного тока и выходных характеристик в цепи постоянного тока. Фиксация показателей работы ЭЗС осуществлялась на протяжении всей зарядной сессии с использованием как внешних средств измерений, так и встроенных возможностей самих ЭЗС. РЕЗУЛЬТАТЫ. Для различных ЭЗС в условиях заряда ТАБ легковых транспортных средств от минимальной степени заряженности до максимальной получены временные зависимости: входной и выходной мощности ЭЗС, зарядного тока и напряжения, степени заряженности и реализованной энергии. Результаты измерений позволили количественно оценить энергетическую эффективность ЭЗС на протяжении всей зарядной сессии, установить и наглядно продемонстрировать взаимосвязь КПД станции с зарядной мощностью и начальной степенью заряженности ТАБ. Для популярных в России серийных электромобилей и подключаемых гибридных автомобилей получены зарядные профили, отражающие особенности и характер изменения зарядной мощности в процессе восполнения энергии. ЗАКЛЮЧЕНИЕ. Представленные в настоящей статье результаты представляют практический интерес для анализа режимов работы и характеристик зарядных станций, могут быть полезны при моделировании и проектировании объектов зарядной инфраструктуры, прогнозировании и управлении потреблением электроэнергии.

Ключевые слова: электрическая зарядная станция; электромобиль; опытная эксплуатация; зарядная сессия; энергоэффективность; зарядные характеристики.

Для цитирования: Сидоров К.М., Мубитанг А., Фам Х.Ш. Оценка характеристик электрических зарядных станций постоянного тока в процессе эксплуатации // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2026. Т. 28. № 2. С. 86-100. doi: 10.30724/1998-9903-2026-28-2-86-100.

EVALUATION OF THE EV FAST CHARGING STATIONS PERFORMANCE DURING OPERATION

Sidorov K.M., Moubitang A., Pham H.S.

Moscow Automobile and Road Construction State Technical University (MADI)
Moscow, Russia
k.sidorov@madi.ru

Abstract: *RELEVANCE.* The development of charging infrastructure, both quantitatively and qualitatively, is an essential condition for the further expansion of promising low-carbon vehicles. In this regard, the design of power supply system's taking into account the characteristics and operating modes of fast charging stations (CS), their energy efficiency and technical operation are becoming increasingly important. *THE PURPOSE* - to experimentally evaluate the characteristics of manufactured in Russia CS under real-life operating. To implement charging sessions of passenger electric vehicles (EV) and plug-in hybrid electric vehicles (PHEV) common in the Russian Federation via the measurement and recording of the CS input and output parameters. To experimentally evaluate the CS energy efficiency its relationship with of the charged EV characteristics. *METHODS.* The objectives were achieved through the organization of four Russian manufactured multi-port CS trial operation and using ten popular EV models. During the trial operation, standard charge procedures were performed, the input AC and output DC characteristics of the CS are measured. Charging station performance was recorded throughout the entire charging session using both external measuring instruments and the built-in capabilities of the CS themselves. *RESULTS.* Time dependences of the CS input and output power, charging current and voltage, state of charge, and energy were obtained while charging EV battery from minimum to maximum state of charge (SOC). The measurement results allowed us to quantify the CS energy efficiency and establish the relationship between CS efficiency, charging power, and the initial battery SOC. Charging profiles reflecting the characteristics and nature of charging power changes during the energy replenishment process were obtained for popular mass-produced EV and PHEV in Russia. *CONCLUSION.* The results presented in this article are of practical interest for charging stations operating modes and characteristics analysis and can be useful in modeling and designing charging infrastructure facilities, forecasting and managing electricity consumption.

Keywords: fast charging station; electric vehicle; experimental operation; charging session; energy efficiency; charging characteristics.

For citation: Sidorov K.M., Moubitang A., Pham H.S. Evaluation of the ev fast charging stations performance during operation. *Power engineering: research, equipment, technology.* 2026; 28 (2): 86-100. doi: 10.30724/1998-9903-2026-28-2-86-100.

Введение (Introduction)

В последние годы наблюдается значительный рост спроса на электрический автономный транспорт, в том числе общественный для внутригородских пассажирских перевозок [1, 2]. Согласно данным Международного энергетического агентства (IEA) в 2024 году объем продаж электромобилей (ЭМ) и подключаемых гибридных автомобилей (ПГА) на мировом рынке превысил 18 млн. единиц [3]. Диаграмма, отражающая глобальный фактический спрос на транспортные средства с электрическими и гибридными (типа Plug-In) силовыми установками, включая легковые, грузовые и автобусы, в период с 2016 по 2024 гг. представлена на рисунке 1 [3].

В условиях увеличения числа электромобилей в структуре автотранспортного комплекса и развития территорий крупных городов [4, 5] совершенствуется и экосистема решений для заряда тяговых аккумуляторных батарей, которая охватывает широкий спектр технических средств и технологий [6] – от бытовых приложений [7] и мобильных устройств [8] до стационарных объектов общественно доступной зарядной инфраструктуры [3]. В сегменте малой мощности активно используются портативные и стационарные бытовые зарядные устройства, главным образом, благодаря их простой конструкции, низкой стоимости и возможности интеграции в электрические установки жилых и общественных зданий [9]. Системы заряда переменного тока остаются стандартным вариантом в жилом секторе, однако определяют длительные режимы заряда, обусловленные относительно

небольшой максимальной выходной мощностью бортовых зарядных устройств электромобилей, которая, в большинстве случаев, не превышает значения 7 кВт [10].

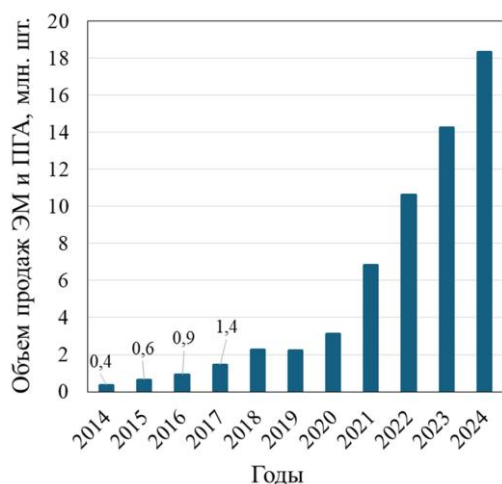


Рис. 1. Объем продаж ЭМ и ПГА на мировом рынке

Fig. 1. Global electric car sales

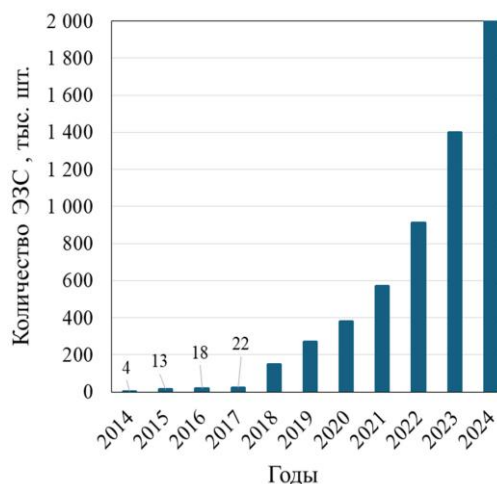


Рис. 2. Количество находящихся в эксплуатации ЭЭС постоянного тока в мире

Fig. 2. Global stock of public fast charging points

*Источник: IEA Source: IEA.

*Источник: IEA Source: IEA.

Следует отметить, что в настоящий момент наблюдается устойчивая тенденция к увеличению энергоемкости тяговых аккумуляторных батарей (ТАБ), которая для современных электромобилей уже достигает значений 100 кВт·ч и более. Данный факт приближает запас хода ЭМ к аналогичному показателю автомобиля с тепловым двигателем, но определяет необходимость повышения зарядной мощности с целью сокращения времени восполнения энергии.

Указанные тенденции развития транспортных средств с низким углеродным следом способствуют повсеместному внедрению и распространению сетей электрических зарядных станций постоянного тока (ЭЭС) [11], повышающих удобство эксплуатации электромобилей на дальних расстояниях. Часто называемые «быстрыми», такие ЭЭС являются наиболее востребованными в дневные часы эксплуатации ЭМ [12] и, в то же время, технически сложными в сравнении со станциями переменного тока. Количество находящихся в эксплуатации ЭЭС постоянного тока, отражающее всеобщий тренд, приведено на рис. 2 [3].

На фоне роста продаж ЭМ, тенденций к увеличению запаса энергии ТАБ, повсеместной доступности и востребованности мощных зарядных комплексов, актуализируются задачи создания эффективной зарядной инфраструктуры [13], включающие как вопросы определения электрических нагрузок [9, 14] при проектировании систем электроснабжения и капитальном строительстве, так и вопросы ее оптимальной эксплуатации и влияния на внешнюю сеть [15].

Для решения указанных задач необходимы данные о режимах работы и характеристиках зарядных станций в эксплуатации. В связи с этим информация об основных показателях работы системы «зарядная станция - электромобиль» имеет практический интерес, определяемый зависимостями мощности, напряжения и тока в процессе заряда тяговых аккумуляторных батарей, как со стороны сети, так и выходной цепи ЭЭС.

Практический смысл определения входной мощности ЭЭС в процессе зарядной сессии состоит в получении данных, которые могут быть использованы при моделировании работы сетей зарядных станций и загрузки питающей сети переменного тока, рациональной организации управления зарядной инфраструктурой, определении типовых закономерностей изменения потребляемой мощности ЭЭС в процессе заряда в условиях многообразия модельного ряда современных электромобилей и подключаемых гибридных автомобилей.

Таким образом, целью настоящего исследования является экспериментальная оценка характеристик производимых в России ЭЭС постоянного тока в условиях реальной эксплуатации. Для чего в рамках настоящей работы произведены типовые процедуры заряда распространенных в РФ легковых электромобилей и подключаемых гибридных

автомобилей с измерением и регистрацией входных и выходных показателей работы ЭЭС, определена энергетическая эффективность ЭЭС на протяжении зарядной сессии и установлена ее взаимосвязь с характеристиками заряжаемых электромобилей.

Материалы и методы (Materials and methods)

Описание решений по оценке характеристик системы «ЭЭС - ЭМ». Зарядная сессия (ЗС) ЭМ представляет собой совокупность взаимосвязанных процессов, направленных на успешное восполнение запаса электроэнергии ТАБ. ЗС условно можно разделить на следующие этапы:

1. Подготовительный этап. Он связан с проведением предварительных процедур, нацеленных на установление корректной взаимосвязи в системе «ЭЭС-ЭМ», как в отношении силовой части, так и сигнальных цепей канала информационного обмена. К отдельным процедурам подготовительного этапа можно отнести: электрическое подключение ЭМ к ЭЭС, инициализация, установка информационного соединения, проверка целостности установленного силового и сигнального подключения, проверка сопротивления изоляции в системе «ЭЭС-ЭМ».

2. Этап заряда тяговой аккумуляторной батареи ЭМ. Основной процесс зарядной сессии, в течение которого осуществляется изменение выходного постоянного тока и напряжения ЭЭС с учетом запроса мощности со стороны ЭМ, текущего состояния ТАБ (в том числе степени заряженности (СЗ), температуры), а также доступной мощности со стороны ЭЭС.

3. Этап окончания заряда и завершения ЗС. Может быть инициирован пользователем, ЭМ или ЭЭС в зависимости от установленного критерия необходимости завершения процесса заряда.

Основными показателями, характеризующими зарядную сессию, являются: зарядная мощность, реализованная энергия, напряжение и ток заряда, фактическое значение степени заряженности ТАБ. Информация о значениях указанных показателей доступна от ЭЭС, в которых информационная связь с внешними системами организована согласно протоколу OCPP (Open Charge Point Protocol). Данные, доступные от ЭЭС посредством OCPP позволяют в реальном времени контролировать состояние ЭЭС, получать и регистрировать основные показатели ЗС, а также осуществлять первичное диагностирование ЭЭС в случае неисправностей. Тем не менее эти данные отличаются низкой детализацией и не позволяют оценить качество выходного напряжения и тока ЭЭС, выполнять анализ переходных процессов в силовой цепи. Этот недостаток может быть компенсирован расширением номенклатуры используемых средств измерений.

Измерение и регистрация основных показателей зарядных сессий в рамках настоящего исследования осуществлялись с помощью:

1. Специализированного измерительного комплекса, включающего средства измерений во входной цепи переменного тока (ИК-АС) и выходной цепи постоянного тока (ИК-ДС) с блоками измерения и контроля (БИК), программного модуля сбора и анализа данных, а также рабочей станции (РС) на основе персонального компьютера. Указанный комплекс осуществляет измерение и регистрацию входных (фазного тока и фазного напряжения) и выходных (постоянный ток и напряжение) характеристик ЭЭС, в том числе с возможностью оценки формы тока и напряжения в силовых цепях. Измерительный комплекс включает средства измерений на основе датчиков тока и напряжения типа LEM NAT и LV25, предусматривает возможность оперативного подключения токоизмерительных клещей с беспроводным каналом связи типа Testo 770-3.

2. Аппаратных и программных возможностей электрической зарядной станции, обеспечивающих возможность получения, регистрации и последующей обработки транслируемых ЭЭС данных с использованием системы управления зарядом «Hyper Charge Management System» [16], в том числе: выходных значений тока и напряжения, выходной мощности, степени заряженности ТАБ и реализованной энергии.

Схема организации измерений и регистрации показателей работы системы «ЭЭС-ЭМ» приведена на рисунке 3.

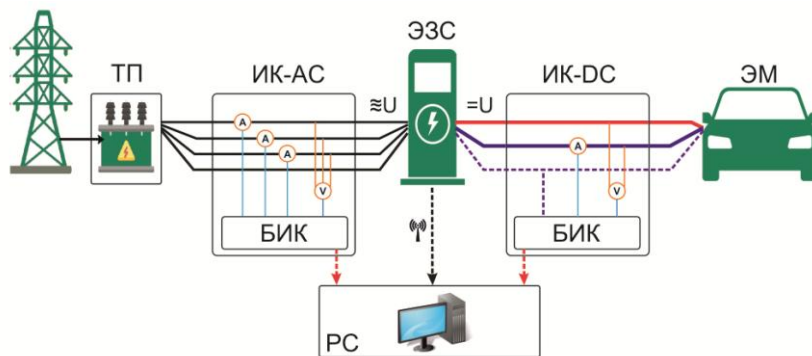


Рис. 3. Схема организации измерений и регистрации показателей работы системы «ЭЭС-ЭМ» Fig. 3. Diagram of the charging process parameters measurement and recording

*Источник: Составлено авторами Source: created by the authors.

Описание объектов опытной эксплуатации. Представленные выше решения использовались в процессе исследовательских испытаний и опытной эксплуатации быстрых электрических зарядных станций различных производителей на базе лаборатории кафедры «Электротехника и электрооборудование» МАДИ. В числе исследуемых ЭЭС многопортовые зарядные станции с максимальной выходной мощностью 150 кВт и зарядными коннекторами наиболее распространённых типов. Фотоиллюстрации установленных на территории МАДИ ЭЭС представлены на рис. 4, краткие технические характеристики – в таблице 1.

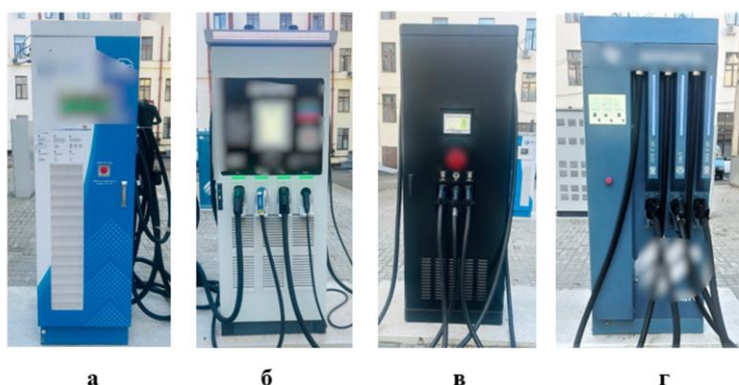


Рис. 4. Электрические зарядные станции в опытной эксплуатации в МАДИ: а – ЭЭС №1, б – ЭЭС №2, в – ЭЭС №3, г – ЭЭС №4 Fig. 4. Electric vehicle charging stations (EVCS) under pilot operation at MADI: а – EVCS № 1, б – EVCS № 2, с – EVCS № 3, d – EVCS № 4

*Источник: Составлено авторами Source: created by the authors.

Таблица 1
Table 1

Характеристики находящихся в опытной эксплуатации ЭЭС
Characteristics of EHS in trial operation

ЭЭС	Максимальная выходная мощность, кВт	Максимальный выходной ток заряда, А	Максимальное выходное напряжение, В	Тип зарядных коннекторов
ЭЭС №1	150	250	1000	GB/T, CCS2, CHAdeMO
ЭЭС №2	150	200	800	GB/T, CCS2, CHAdeMO, Type 2
ЭЭС №3	150	250	1000	GB/T, CCS2
ЭЭС №4	150	250	1000	GB/T, CCS2

*Источник: Составлено авторами Source: created by the authors.

В рамках опытной эксплуатации указанных ЭЭС проведены зарядные сессии различных моделей электромобилей. Характеристики последних представлены в таблице 2.

Таблица 2

Table 2

Характеристики используемых в ходе опытной эксплуатации ЭЭС электромобилей и подключаемых гибридных автомобилей

Characteristics of electric vehicles and plug-in hybrid vehicles used during the trial operation of EHS

Модель транспортного средства	Страна производства	Тип ЛИА в составе ТАБ	Тип зарядного коннектора	Запас энергии ТАБ, кВт·ч	Максимальное напряжение ТАБ, В
Avatr 11	Китай	NMC	GB/T	116,8	675
Zeekr 001	Китай	NMC	GB/T	100	796
Zeekr 007	Китай	NMC	GB/T	100	796
Xiaomi SU7	Китай	NMC	GB/T	93,7	805
Tesla Model Y	США	NMC	CCS-2	75	395
Москвич 3е	Россия	NCA	CCS-2	65,7	425
Nissan Leaf ze1	Япония	NMC	CHAdeMO	40	403
Wey 80	Китай	NMC	GB/T	53	450
Lixiang L9	Китай	NMC	GB/T	52,3	437
Voyah Free	Китай	NMC	GB/T	39	389

*Источник: Составлено авторами Source: created by the authors.

Результаты и обсуждение (Results and Discussions)

Основной целью опытной эксплуатации является практическая оценка работы ЭЭС, включающая измерение, регистрацию и последующий анализ основных характеристик ЭЭС, выявление и анализ причин некорректной работы системы «ЭМ-ЭЭС», а также формирование статистических данных о работе ЭЭС. Сводные результаты для некоторых произведенных в период опытной эксплуатации зарядных сессий представлены в таблице 3.

Таблица 3

Table 3

Сводные результаты зарядных сессий

Summary results of charging sessions

Время заряда, мин	Модель ЭМ	ЭЭС	Начальная/конечная степень заряженности ТАБ, %	Реализованная максимальная выходная мощность ЭЭС, кВт	Реализованная энергия, кВт·ч
48	Avatr 11	ЭЭС № 1	25/57	54	42,1
63	Tesla Model Y	ЭЭС № 4	26/99	78,9	56,8
76	Voyah Free	ЭЭС № 1	18/100	40,5	35,2
87	Москвич 3е	ЭЭС № 4	19/99	61	54,2
58	Wey 80	ЭЭС № 2	19/99	64	38,9
54	Lixiang L9	ЭЭС № 3	25/100	62	31,0
61	Zeekr 001	ЭЭС № 4	7/99	115	94,0
36	Zeekr 007	ЭЭС № 4	32/79	118	50,0
51	Xiaomi SU7	ЭЭС № 4	10/100	149	89,7
93	Nissan Leaf ze1	ЭЭС № 2	25/93	45	27,0

*Источник: Составлено авторами Source: created by the authors.

На рисунках 5–8 изображены результаты измерений и регистрации основных показателей ЭЭС в процессе зарядной сессии на примере электромобиля Tesla Model Y, в том числе: входная мощность (активная, реактивная и полная), выходная активная мощность, ток заряда, напряжение ТАБ, степень заряженности ТАБ и реализованная энергия.

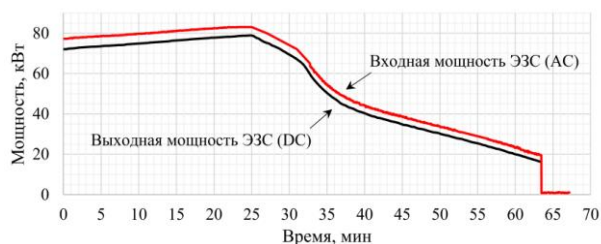


Рис. 5. Зависимость активной входной и выходной мощности ЭЭС от времени в процессе заряда ЭМ Tesla Model Y Fig. 5. Dependence of the EVCS active input and output power on time during Tesla Model Y charging process

*Источник: Составлено авторами Source: created by the authors.

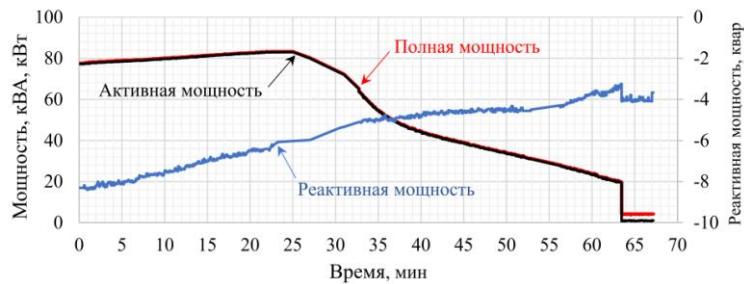


Рис. 6. Зависимость входной мощности ЭЭС от времени в процессе заряда ЭМ Tesla Model Y *Fig. 6. Dependence of the EVCS input power on time during Tesla Model Y charging process*

*Источник: Составлено авторами Source: created by the authors.

Синхронизированные измерение и регистрация входной мощности ЭЭС на стороне переменного тока и выходной (полезной) мощности постоянного тока (см. рис. 5 и 6) дают представление об энергетических характеристиках ЭЭС, являются основой для количественной оценки эффективности преобразования напряжения и использования сети переменного тока на протяжении всей зарядной сессии. Так, результаты комплексной оценки мощности переменного тока, отраженные на рис. 6, свидетельствуют о наличии в ЭЭС и должном функционировании корректора коэффициента мощности, обеспечивающего значение последнего близкого к единице.

При анализе работы ЭЭС с тем или иным транспортным средством обязательным условием является фиксация и учет начальной степени заряженности ТАБ и ее изменение в процессе зарядной сессии. Это демонстрирует рис. 7, на котором дополнительно представлена фактическая энергия, полученная тяговой аккумуляторной батареей в процессе заряда. Информация о изменении СЗ позволяет установить взаимосвязь основных показателей ЭЭС с фактической нагрузкой в виде ТАБ, корректно сопоставить работу ЭЭС при использовании различных транспортных средств, а также определить время восполнения энергии ТАБ.

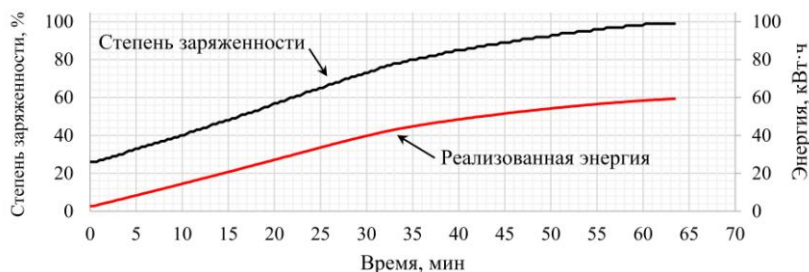


Рис. 7. Зависимость степени заряженности ТАБ и реализованной энергии от времени в процессе заряда ЭМ Tesla Model Y *Fig. 7. Dependence of the traction battery state of charge (SOC) and delivered energy on time during Tesla Model Y charging process*

*Источник: Составлено авторами Source: created by the authors.

Следует отметить, что полная картина процесса заряда может быть получена только при условии подключения к ЭЭС электромобиля, тяговая аккумуляторная батарея которого к моменту начала зарядной сессии имеет минимально возможную степень заряженности, допустимую для данного ЭМ. Однако в процессе эксплуатации начальное значение СЗ подключаемого к ЭЭС электромобиля носит случайный характер и добиться минимальных значений одновременно для целого ряда ЭМ сложно, когда речь не идет о целенаправленной подготовке электромобиля к такому эталонному заряду. Таким образом в настоящей работе отражены результаты зарядных сессий, которые были отобраны из числа всех произведенных ЭЭС для одного и того же электромобиля по критерию минимальной степени заряженности, зафиксированной в ходе эксплуатации, но, в большинстве своем, не являющейся минимально допустимой для данного электромобиля.

Результат взаимодействия ЭЭС и ЭМ на уровне систем управления, в котором, наряду с техническими характеристиками аккумуляторов в составе батареи, учитываются многие факторы, в том числе степень заряженности и температура ТАБ – это фактически реализуемые ток заряда и выходное напряжение ЭЭС. Эти показатели обусловлены в системе «ЭЭС-ЭМ»:

1) запросом со стороны электромобиля в части необходимых значений зарядного тока (напряжения), представляющим собой заложенный производителем электромобиля алгоритм заряда;

2) возможными ограничениями со стороны ЭЗС (например, аппаратными, выраженными в виде максимальных допустимых значений выходного тока и мощности).

То есть в системе «ЭЗС-ЭМ» стороной, иницирующей необходимый зарядный ток (напряжение) является электромобиль, тогда как ЭЗС реализует это задание исходя из своих доступных возможностей.

Пример зафиксированных во времени тока и напряжения в процессе зарядной сессии ЭМ Tesla Model Y приведен на рис. 8. Следует отметить, что применительно к данному случаю достигнуты значения максимальной мощности 78,9 кВт, а тока заряда 198 А, тогда как ЭЗС способна обеспечить 150 кВт и 250 А соответственно.

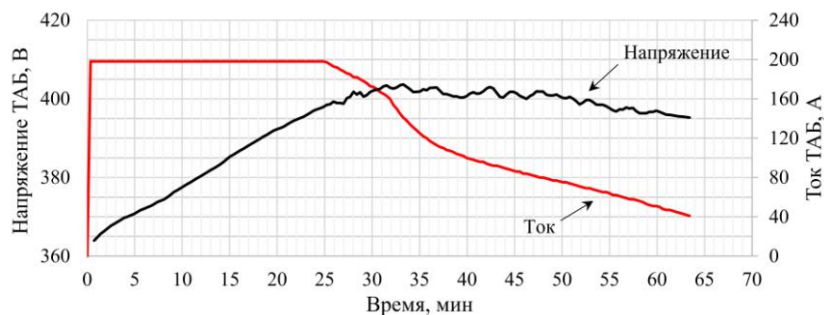


Рис. 8. Зависимость выходного постоянного напряжения и тока ЭЗС от времени в процессе заряда ЭМ Tesla Model Y

Fig. 8. Dependence of the EVCS output DC voltage and current on time during Tesla Model Y charging process

*Источник: Составлено авторами Source: created by the authors.

Для возможности сравнительной оценки показателей зарядных сессий на рис. 9–11 приводятся аналогичные данные для той же ЭЗС, но при заряде другого электромобиля – Москвич 3е. Характерным отличием алгоритма заряда ТАБ этого электромобиля является ступенчатый характер изменения тока заряда, при котором выход на максимальную зарядную мощность осуществляется в диапазоне СЗ от 20 до 50% поэтапно.

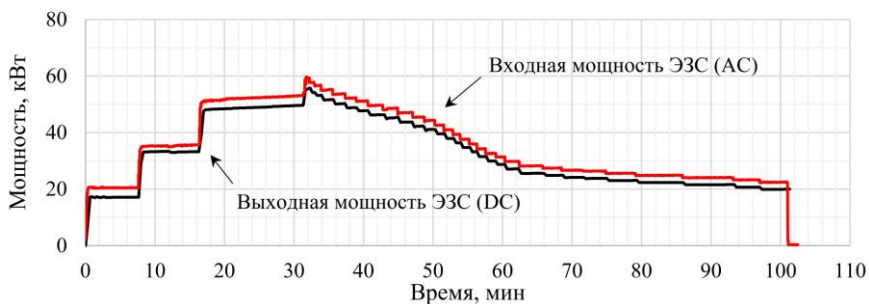


Рис. 9. Зависимость активной входной и выходной мощности ЭЗС от времени в процессе заряда ЭМ Москвич 3е

Fig. 9. Dependence of the EVCS active input and output power on time during Moskvich 3e charging process

*Источник: Составлено авторами Source: created by the authors.

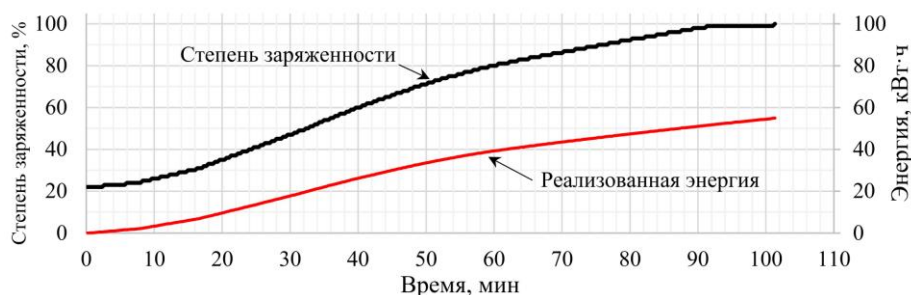


Рис. 10. Зависимость степени заряженности ТАБ и реализованной энергии от времени в процессе заряда ЭМ Москвич 3е

Fig. 10. Dependence of the traction battery SOC and delivered energy on time during Moskvich 3e charging process

*Источник: Составлено авторами Source: created by the authors.

Сравнение характера изменения зарядного тока в процессе зарядной сессии различных электромобилей (в том числе на примере рис. 8 и 11) подтверждает индивидуальность технической системы каждого из рассмотренных ЭМ в части реализуемого алгоритма заряда, который принципиально остается неизменным при использовании различных ЭЭС, в некоторых электромобилях отчасти допускает задание режимов самим пользователем, но во всех случаях может дополнительно корректироваться самой станцией с учетом ее доступных возможностей.

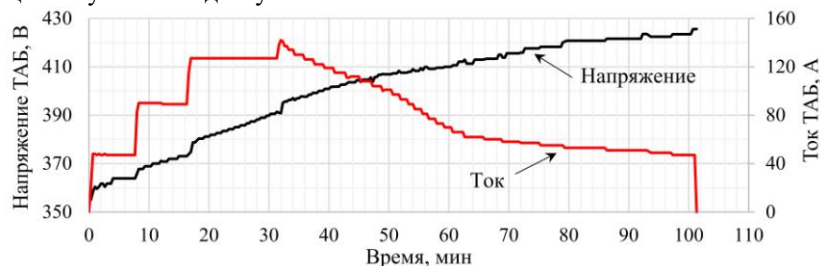


Рис. 11. Зависимость выходного постоянного напряжения и тока ЭЭС от времени в процессе заряда ЭМ Москвич 3е

Fig. 11. Dependence of the EVCS output DC voltage and current on time during Moskvich 3e charging process

*Источник: Составлено авторами Source: created by the authors.

Однако не всегда возможности ЭЭС остаются востребованы, учитывая различия в технических характеристиках подключаемых электромобилей, запасах энергии ТАБ и начальной степени заряженности. В связи с этим интерес представляет коэффициент полезного действия ЭЭС при различных режимах нагрузки. В рамках настоящей работы осуществлялась оценка энергетической эффективности ЭЭС как отношение выходной мощности ЭЭС к входной мощности, потребляемой от сети. Изменение коэффициента полезного действия одной из исследуемых ЭЭС от времени представлено на рис. 12.

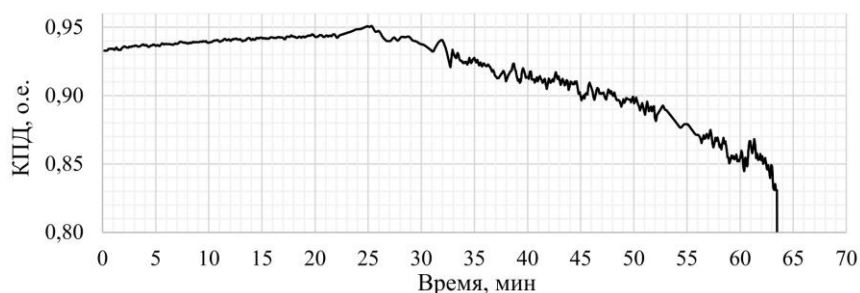


Рис. 12. Зависимость коэффициента полезного действия ЭЭС №4 от времени (заряд ЭМ Tesla Model Y)

Fig. 12. Dependence of the EVCS No. 4 efficiency on time during Tesla Model Y charging process

*Источник: Составлено авторами Source: created by the authors.

Анализируя данные, представленные на рис. 5 и 12 можно сделать заключение о нелинейности КПД на протяжении зарядной сессии, его зависимости от выходной мощности и достижении максимальных значений указанного показателя в диапазоне нагрузок, близких к максимальным. При этом интегральное значение эффективности зарядной сессии, определяемое как отношение реализованной энергии (энергии заряда ТАБ, см. рис.7) к потребляемой от сети, для рассматриваемого выше примера составляет 92,8 %, среднее значение мощности заряда ТАБ в этом случае – 54,4 кВт.

На рис. 13 представлен аналогичный показатель, соответствующий той же ЭЭС при заряде электромобиля Москвич 3е в диапазоне степени заряженности от 22 % до 100 %. Интегральный КПД ЭЭС в этом случае составил 91,8 %, средняя мощность заряда – 32,7 кВт.

Отдельно следует отметить зарядные сессии, в которых электромобиль имеет относительно высокие значения начальной степени заряженности. В этом случае процесс заряда сопровождается меньшими значениями средней зарядной мощности и меньшим значением интегрального КПД. Так, например, при заряде электромобиля Москвич 3е в диапазоне степени заряженности от 58 % до 100 % интегральный КПД ЭЭС принимает значение 87,3 % при средней мощности заряда 29 кВт.

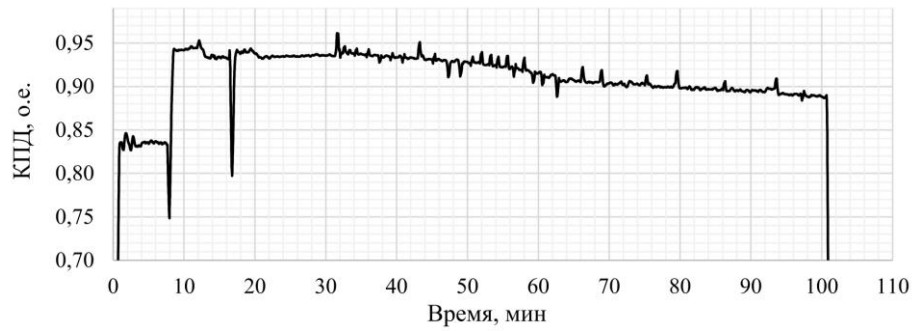


Рис. 13. Зависимость коэффициента полезного действия ЭЭС №4 от времени (заряд ЭМ Москвич 3е) *Fig. 13. Dependence of the EVCS No. 4 efficiency on time during Moskvich 3e charging process*

*Источник: Составлено авторами *Source: created by the authors.*

Аналогично представленным выше примерам для ЭМ Tesla Model Y и Москвич 3е были получены показатели зарядных сессий для остальных транспортных средств из числа приведенных в табл. 2. Всего в ходе опытной эксплуатации было проведено 250 успешных зарядных сессий. На основании этих данных были построены характеристики, представляющие особый практический интерес – это зависимости зарядной мощности, тока, напряжения и степени заряженности от времени зарядной сессии (профили заряда) различных электромобилей (Москвич 3е, Tesla Model Y, Avatr 11, Zeekr 001, Zeekr 007, Xiaomi SU7, Nissan Leaf) и подключаемых гибридных автомобилей (Voyah Free, Wey 80, Lixiang L9). Графические зависимости представлены на рис. 14–18.

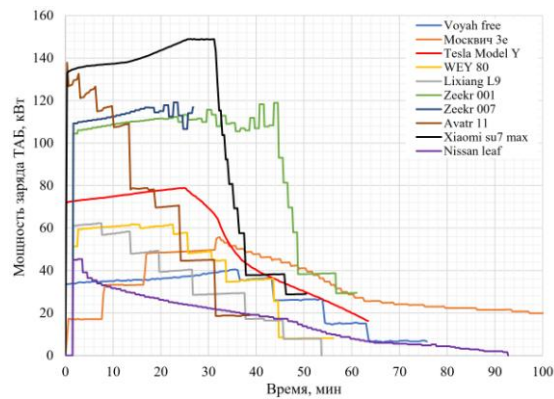


Рис. 14. Зависимость зарядной мощности от времени в процессе зарядных сессий различных ЭМ и ПГА *Fig. 14. Dependence of the charging power on time during of various battery electric vehicles (BEV) and plug-in hybrid electric vehicles (PHEV) charging sessions*

*Источник: Составлено авторами *Source: created by the authors.*

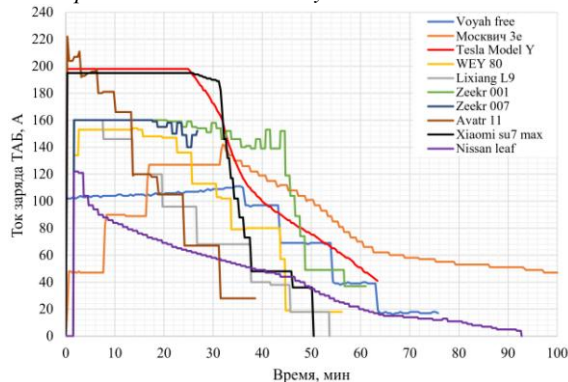


Рис. 15. Зависимость тока заряда ТАБ от времени в процессе зарядных сессий различных ЭМ и ПГА *Fig. 15. Dependence of the traction battery charging current on time during of various BEVs and PHEVs charging sessions*

*Источник: Составлено авторами *Source: created by the authors.*

Представленные на рисунках 14 и 15 зависимости зарядной мощности и тока от времени указывают на свойственный каждому электромобилю алгоритм заряда ТАБ, в

котором условно можно выделить следующие стадии:

- выход на режим максимального зарядного тока;
- поддержание зарядного тока на максимальном уровне;
- снижение зарядного тока.

Рассмотренные электромобили при начальной степени заряженности согласно табл. 3 и рис. 16 имеют динамический (в одноминутном масштабе времени) характер выхода на режим максимального зарядного тока. Исключение – электромобиль Москвич 3е, увеличение зарядного тока ТАБ которого происходит ступенчато в течение 32 минут. Длительные режимы заряда при постоянном токе зафиксированы у ЭМ Tesla Model Y, Xiaomi SU7, Zeekr, Voyah Free, Wey 80. При этом только у одного электромобиля зарядная мощность была ограничена максимальным допустимым значением со стороны ЭЭС – это ЭМ Xiaomi SU7, имеющий характерное плато на графике мощности в диапазоне времени заряда 26...32 мин (см. рис. 14).

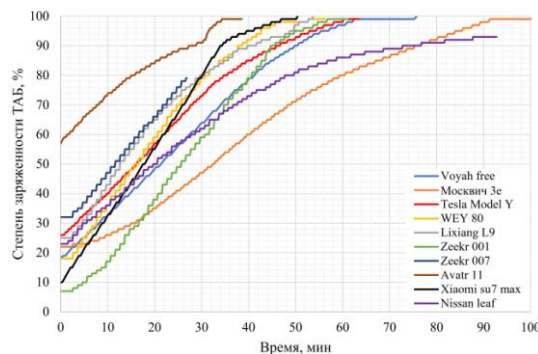


Рис. 16. Зависимость степени заряженности ТАБ от времени в процессе зарядных сессий различных ЭМ и ПГА *Fig. 16. Dependence of the traction battery SOC on time during of various BEVs and PHEVs charging sessions*

*Источник: Составлено авторами *Source: created by the authors.*

Во всех случаях, по мере увеличения степени заряженности в процессе зарядной сессии, закономерно происходит снижение зарядного тока и мощности (см. рис. 14 и 15):

- ступенчато для большинства ЭМ с поддержанием фиксированных значений в течение различных по длительности интервалов времени (от 2 до 20 мин);
- плавно (Tesla Model Y, Nissan Leaf).

Зависимость мощности заряда от степени заряженности ТАБ различных ЭМ приведена на рис. 17. Полученные результаты свидетельствуют о том, что для большинства рассмотренных ЭМ мощность в процессе зарядной сессии достигает максимальных значений в диапазоне 45...85 % СЗ, после чего начинает активно снижаться. Последнее обусловлено стремлением к увеличению срока службы аккумуляторов в составе ТАБ, снижению продолжительности неполного заряда (в среднем до 85 % СЗ), а также изменением температуры батареи в процессе восполнения энергии.

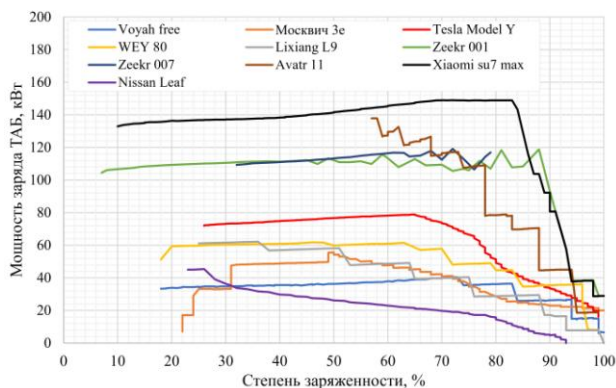


Рис. 17. Зависимость зарядной мощности от степени заряженности ТАБ различных ЭМ и ПГА *Fig. 17. Dependence of the charging power on SOC of various BEVs and PHEVs*

*Источник: Составлено авторами *Source: created by the authors.*

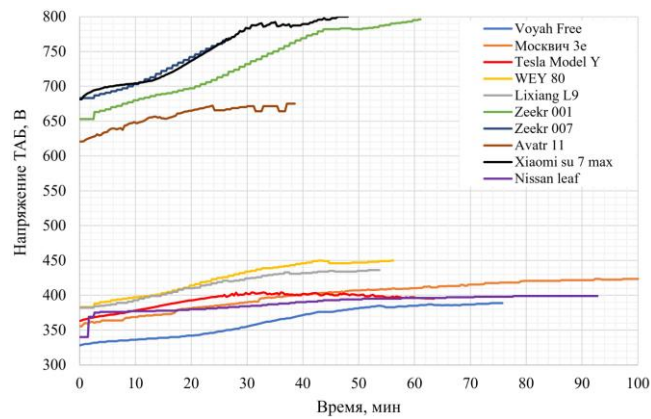


Рис. 18. Зависимость напряжения ТАБ от времени в процессе зарядных сессий различных ЭМ и ПГА *Fig. 18. Dependence of the traction battery voltage on time during of various BEVs and PHEVs charging sessions*

*Источник: Составлено авторами *Source: created by the authors.*

Иллюстрация, показывающая изменение напряжения ТАБ в процессе заряда и отражающая различную архитектуру высоковольтной системы тягового электрооборудования (в том числе 400 В и 800 В) рассмотренных ЭМ, приведена на рис. 18. Анализируя представленные выше показатели, можно сделать вывод о лучших соотношениях времени восполнения энергии, запаса энергии и реализуемых зарядных токах для тех электромобилей, максимальные значения рабочих напряжений ТАБ которых достигают 800 В.

Заключение (Conclusions)

Представлены результаты экспериментальной оценки характеристик электрических зарядных станций постоянного тока с максимальной выходной мощностью 150 кВт. В исследовании были задействованы серийные ЭЗС четырех различных отечественных производителей, а также десять электромобилей и подключаемых гибридных автомобилей популярных марок.

В ходе опытной эксплуатации ЭЗС с использованием прямых измерений, а также данных, непосредственно получаемых от зарядных станций, осуществлялась регистрация основных показателей зарядных сессий, в том числе: входной мощности переменного тока на стороне электросети, выходной мощности постоянного тока, зарядного тока и напряжения тяговой аккумуляторной батареи электромобиля, степени заряженности ТАБ и реализованной энергии.

Результаты измерений позволили определить зависимости коэффициента полезного действия ЭЗС от времени и выходной мощности на протяжении всей зарядной сессии. Так, максимальные значения КПД ЭЗС достигают значений 95 %, тогда как интегральные значения КПД, определяемые как отношение энергии заряда ТАБ к потребляемой от сети, в отдельных случаях составили 87 %. Показано, что интегральный КПД ЭЗС зависит от начальной степени заряженности подключаемого к ЭЗС электромобиля и, соответственно, средней выходной мощности ЭЗС, которая в случае высоких значений СЗ может составлять 20% от максимальной и менее. Последнее позволяет сделать вывод о лучшей энергетической эффективности зарядной инфраструктуры в случае заряда электромобилей, имеющих начальную степень заряженности в диапазоне 15...25 %, тогда как частичное восполнение энергии ТАБ практически заряженного электромобиля определяет низкую эффективность процесса преобразования энергии электросети.

Представленные в настоящей статье результаты представляют практический интерес для анализа режимов работы и характеристик зарядных станций, могут быть полезны при моделировании и проектировании объектов зарядной инфраструктуры, прогнозировании и управлении потреблением электроэнергии.

Литература

1. Electric Vehicle Outlook 2025: Overview // Bloomberg Finance L.P. London; 2025. Доступно по: <https://about.bnef.com/insights/clean-transport/electric-vehicle-outlook/>. Ссылка активна на 17 ноября 2025.
2. Тимерханов А. В России числится порядка 140 тысяч электрокаров и гибридов // Аналитическое агентство «Автостат». Тольятти; 2025. Доступно по: <https://www.autostat.ru/infographics/60792/>. Ссылка активна на 17 ноября 2025.

3. Global EV Outlook 2025 // International Energy Agency. Paris; 2025. Доступно по: <https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2025>. Ссылка активна на 17 ноября 2025.
4. Валеева Ю.С., Калинина М.В., Зорина Т.Г., и др. Стимулирование развития электротранспорта как инструмент развития территории // Вестник КГЭУ. 2022. №1 (53). С. 156-173.
5. Хайретдинова А.Р., Касаткин И.И., Колбасов А.Ф. Модель развития зарядной инфраструктуры города Москвы // Московский транспорт. Наука и проектирование. 2025. № 1 (1). С. 14-22.
6. Yousuf A.K.M., Wang Z., Paranjape R., et al. An in-depth exploration of electric vehicle charging station infrastructure: a comprehensive review of challenges, mitigation approaches, and optimization strategies // IEEE Access. 2024. Vol. 12. pp. 51570-51589.
7. Panchbhai A.V., Raman R., Thacker C.B., et al. Residential electric vehicle charging station using the internet of things. In: 2023 International Conference on Power Energy, Environment & Intelligent Control (PEEIC); Dec 2023; Greater Noida, India. 2023. pp. 987-991.
8. Сафин А.Р., Басенко В.Р., Низамиев М.Ф., и др. Анализ технического уровня разработок в области мобильных зарядных установок для электротранспорта // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2023. Т. 25, № 3. С. 55-64.
9. Солуянов Ю.И., Федотов А.И., Ахметшин А.Р., и др. Определение расчетных электрических нагрузок зарядной инфраструктуры для электромобилей, интегрированной в электрические установки жилых и общественных зданий // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2024. Т. 26, № 6. С. 94-107.
10. Saraswathi V.N., Ramachandran V.P. A comprehensive review on charger technologies, types, and charging stations models for electric vehicles // Heliyon. 2024. Vol. 10, N20. pp. 1-53.
11. The state of Public EV Charging: China, Europe, and U.S. compared // EVboosters. Rotterdam; 2024. Доступно по: <https://evboosters.com/ev-charging-news/the-state-of-public-ev-charging-china-europe-and-u-s-compared/>. Ссылка активна на 17 ноября 2025.
12. Воронин В.А. Анализ открытых данных об использовании электроразрядных станций постоянного тока для электромобилей // Цифровизация, декарбонизация и децентрализация современной электроэнергетики: Всероссийская школа молодых ученых: сборник научных трудов; 29–30 мая 2024 г., Севастополь. Севастополь: Севастопольский государственный университет, 2024. С. 218-227.
13. Денисов И.В. Зарядная инфраструктура электрического транспорта: методика оценки экономической эффективности эксплуатации зарядных станций // Технико-технологические проблемы сервиса. 2025. № 3(73). С. 34-43.
14. Шамарова Н.А., Шушпанов И.Н., Федосов Д.С., и др. Оценка неопределенности электрических нагрузок, обусловленных зарядом электромобилей // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2025. Т. 27, №3. С. 147-161.
15. Альзаккар А., Местников Н.П., Максимов В.В., и др. Оценка индекса устойчивости напряжения электрических сетей питающих зарядные станции электромобилей с применением многослойного перцептрона // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2022. Т. 24, №2. С. 36-49.
16. Hyper Charge Management System: официальный сайт // ООО «Оператор электродвижения». Москва; 2025. Доступно по: <https://hyperhub.ru/#rec593594165>. Ссылка активна на 17 ноября 2025.

Авторы публикации

Сидоров Кирилл Михайлович – канд. техн. наук, доцент, заведующий кафедрой «Электротехника и электрооборудование» Московского автомобильно-дорожного государственного технического университета (МАДИ). ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8625-3065>. k.sidorov@madi.ru.

Мубитанг Альфонс – аспирант Московского автомобильно-дорожного государственного технического университета (МАДИ). ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-2988-698X>. moubitangalphonse@gmail.com.

Фам Хонг Шанг – аспирант Московского автомобильно-дорожного государственного технического университета (МАДИ). ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-5740-5323>. sang18698@mail.ru.

References

1. *Electric Vehicle Outlook 2025: Overview*. London: Bloomberg Finance L.P.; 2025. Available at: <https://about.bnef.com/insights/clean-transport/electric-vehicle-outlook/>. Accessed: 17 Nov 2025.
2. Timerkhanov A. V. Rossiya chislitsya poryadka 140 tysyach elektrokarov i gibridov. *Analiticheskoe agentstvo «AvtoStat»*. Togliatti; 2025. Available at: <https://www.avtoStat.ru/infographics/60792/>. Accessed: 17 Nov 2025. (In Russ.).
3. *Global EV Outlook 2025*. Paris: International Energy Agency; 2025. Available at: <https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2025>. Accessed: 17 Nov 2025.
4. Valeeva JS, Kalinina MV, Zorina TG, et al. Encouraging the development of electric transport as a tool for territorial development. *KAZAN STATE POWER ENGINEERING UNIVERSITY BULLETIN*. 2022; 14;1(53):156-173. (In Russ.).
5. Khayretdinova AR, Kasatkin II, Kolbasov AF. Development model for the charging infrastructure in the city of Moscow. *Moscow Transport. Science and Design*. 2025;(1):14-22. (In Russ.).
6. Yousuf A, Wang Z, Paranjape R, et al. An in-depth exploration of electric vehicle charging station infrastructure: a comprehensive review of challenges, mitigation approaches, and optimization strategies. *IEEE Access*, 2024;12:51570-89. doi: 10.1109/ACCESS.2024.3385731
7. Panchbhai A, Raman R, Thacker C, et al. Residential electric vehicle charging station using the internet of things. In: *2023 International Conference on Power Energy, Environment & Intelligent Control (PEEIC); Dec 2023; Greater Noida, India*. 2023. pp. 987-991. doi: 10.1109/PEEIC59336.2023.10450569
8. Safin AR., Basenko VR., Nizamiev MF., et al. Analysis of the technical level of developments in the field of mobile charging installations for electric transport. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2023;25(3):55-64. (In Russ.). doi: 10.30724/1998-9903-2023-25-3-55-64
9. Soluyanov YuI., Fedotov EA., Fedotov AI., et al. Selection of parameters of an electricity storage system used to cover peak loads of residential and public buildings. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2025;27(5):86-105. (In Russ.). doi: 10.30724/1998-9903-2025-27-5-86-105
10. Saraswathi VN, Ramachandran VP. A comprehensive review on charger technologies, types, and charging stations models for electric vehicles. *Heliyon*. 2024;10(20):1-53. doi 10.1016/j.heliyon.2024.e38945
11. The state of Public EV Charging: China, Europe, and U.S. compared. *EVboosters*. Rotterdam; 2024. Available at: <https://evboosters.com/ev-charging-news/the-state-of-public-ev-charging-china-europe-and-u-s-compared/>. Accessed: 17 Nov 2025.
12. Voronin VA. Analysis of open data on the use of DC electric charging stations for electric vehicles. In: *Tsifrovizatsiya, dekarbonizatsiya i detsentralizatsiya sovremennoi elektroenergetiki: Vserossiiskaya shkola molodykh uchenykh: sbornik nauchnykh trudov; 29-30 May 2024; Sevastopol*. Sevastopol: Sevastopol State University, 2024. pp. 218-227. (In Russ.).
13. Denisov IV. Mechanism for forming control decisions of automatized system of monitoring and management of the technical condition of vehicles in operation. *Tekhniko-tekhnologicheskie problemy servisa*. 2025; 3(73):34-43. (In Russ.).
14. Shamarova NA., Shushpanov IN., Fedosov DS., et al. Estimation of uncertainty in electrical loads due to electric vehicle charging. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2025;27(3):147-161. (In Russ.). doi: 10.30724/1998-9903-2025-27-3-147-161
15. Alzakkar A, Mestnikov NP, Maksimov VV, et al. Assessment of the voltage stability index of electric networks supplying charging stations using a multilayer perceptron. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2022;24(2):36-49. (In Russ.). doi: 10.30724/1998-9903-2022-24-2-36-49
16. Hyper Charge Management System: official site. *OOO «Operator elektrodvizheniya»*. Moscow; 2025. Available at: <https://hyperhub.ru/#rec593594165>. Accessed: 17 Nov 2025. (In Russ.).

Authors of the publication

Kirill M. Sidorov – Moscow Automobile and Road Construction State Technical University (MADI), Moscow, Russia. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8625-3065>. k.sidorov@madi.ru.

© Сидоров К.М., Мубитанг А., Фам Х.Ш.

Alphonse Moubitang – Moscow Automobile and Road Construction State Technical University (MADI), Moscow, Russia. ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-2988-698X>. moubitangalphonse@gmail.com.

Hong S. Pham – Moscow Automobile and Road Construction State Technical University (MADI), Moscow, Russia. ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-5740-5323>. sang18698@mail.ru.

Шифр научной специальности: 2.4.2. Электротехнические комплексы и системы (технические науки)

Получено **09.12.2025 г.**

Отредактировано **17.02.2026 г.**

Принято **17.03.2026 г.**