

О. С. Атрашенко, Д. В. Степанченко

**АНАЛИЗ НАГРУЗКИ НА ЭНЕРГОСИСТЕМЫ
ПРИ МАССОВОМ ВНЕДРЕНИИ ЭЛЕКТРОМОБИЛЕЙ:
ВРЕМЕННЫЕ И ТЕРРИТОРИАЛЬНЫЕ АСПЕКТЫ**

**Камышинский технологический институт (филиал)
Волгоградского государственного технического университета**

olgapasmenko@ yandex.ru, stepanchenko-dv@kti.ru

Автор, ответственный за переписку:

Атрашенко Ольга Сергеевна, *olgapasmenko@ yandex.ru*

Статья исследует актуальные проблемы развития электротранспорта и сопутствующей зарядной инфраструктуры. Проанализировано влияние массового внедрения электромобилей на энергосистемы, включая значительный рост нагрузки (особенно в регионах с высокой концентрацией EV), ухудшение параметров качества электроэнергии и необходимость масштабной модернизации распределительных сетей. В работе предложен комплексный подход к решению выявленных проблем, предполагающий развитие интеллектуальных систем управления зарядными процессами, активную интеграцию возобновляемых источников энергии, модернизацию сетевого хозяйства и стандартизацию коммуникационных протоколов (OSPP, OSPI).

Ключевые слова: электроразрядная станция, электромобиль, модернизация, инфраструктура

O. S. Atrashenko, D. V. Stepanchenko

ANALYSIS OF THE LOAD ON POWER SYSTEMS DURING MASSIVE INTRODUCTION OF ELECTRIC VEHICLES: TEMPORAL AND TERRITORIAL ASPECTS

**Kamyshin Institute of Technology (branch)
Volgograd State Technical University**

The article examines the current problems of electric transport development and the accompanying charging infrastructure. The impact of mass introduction of electric vehicles on power systems is analyzed, including a significant increase in load (especially in regions with a high concentration of EVs), deterioration of power quality parameters and the need for large-scale modernization of distribution networks. The paper proposes a comprehensive approach to solving the identified problems, which involves the development of intelligent charging process management systems, active integration of renewable energy sources, modernization of the grid economy and standardization of communication protocols (OCPP, OCPI).

Keywords: electric charging station, electric vehicle, modernization, infrastructure

Введение

На начальном этапе развития автомобилестроения в конце XIX века доминирующее положение заняли транспортные средства с двигателями внутреннего сгорания (ДВС). Однако параллельно с этим технологическим трендом предпринимались попытки альтернативного использования электрической тяги. Первые практические реализации электромобилей были осуществлены в конце 1890-х годов, преимущественно силами частных изобретателей и небольших мастерских, что демонстрирует ранний этап диверсификации силовых установок в автомобильной отрасли [1].

Внедрение электромобилей (EV) остается актуальной задачей современного транспорта. С 2015 года наблюдается устойчивый рост их мирового спроса. Эксплуатация EV в городских условиях обладает значительными преимуществами, включая высокий КПД, улучшенную динамику, низкий уровень шума и отсутствие вредных выбросов. Однако электротранспорт имеет существенные ограничения: недостаточную энергоемкость аккумуляторов, неразвитую зарядную инфраструктуру, высокую стоимость производства и сложности утилизации батарей. Эти факторы сдерживают массовое распространение EV, несмотря на их эксплуатационные преимущества [2].

Активное внедрение транспортных средств на электрической тяге (EV) обусловило необходимость создания специализированной зарядной инфраструктуры. В отличие от традиционной топливной системы, формировавшейся более столетия вокруг двигателей внутреннего сгорания (ДВС) и достигшей высокой эффективности и экономической целесообразности, инфраструктура для EV сталкивается с принципиальными технологическими ограничениями. Ключевой проблемой остается значи-

тельно меньший запас хода электромобилей по сравнению с транспортными средствами на ДВС, усугубляемый длительным временем подзарядки. Современные системы быстрой зарядки, несмотря на технический прогресс, существенно уступают по временным показателям традиционной заправке: если заполнение топливного бака занимает 4–5 минут, то даже наиболее совершенные зарядные станции требуют около 40 минут для достижения 80 % емкости аккумулятора.

Для обеспечения функционирования парка электромобилей (EV) требуется создание специализированных зарядных станций (ЭЗС), которые подразделяются на два основных типа по характеристикам процесса заряда. Быстрые ЭЗС обеспечивают ускоренный заряд за счет применения повышенного напряжения и значительных токовых нагрузок. В отличие от них медленные ЭЗС работают при пониженном напряжении, осуществляя интеллектуальное взаимодействие с бортовыми системами управления зарядом, что обеспечивает более щадящий режим для аккумуляторных батарей [3]. Широкомасштабное внедрение электромобилей создает существенные технологические вызовы для энергосистем. Основные проблемы связаны с резким увеличением нагрузки на распределительные сети, потенциальным ухудшением качества электроэнергии и снижением надежности энергоснабжения. Особую остроту эти вопросы приобретают в зонах с высокой концентрацией электромобилей, где может потребоваться значительная модернизация сетевой инфраструктуры.

Данные обстоятельства обуславливают необходимость разработки комплексных решений, включающих как технические усовершенствования, так и организационные меры по адаптации энергосистем к новым условиям эксплуатации [4].

Влияние роста парка электромобилей на суточную нагрузку энергосистем

Современные энергосистемы характеризуются ярко выраженной суточной неравномерностью энергопотребления, с двумя отчетливыми пиковыми периодами: утренним (07:00–10:00) и вечерним (18:00–22:00) [5]. В указанные временные интервалы наблюдается значительное увеличение нагрузки на электрические сети, обусловленное совокупностью антропогенных и технологических факторов.

Масштабное внедрение электромобилей (EV) создает новые вызовы для энергосистем. Согласно проведенным исследованиям, рост количества EV не вызывает резких скачков энергопотребления, однако приводит к устойчи-

вому увеличению нагрузки, преимущественно в вечерний пиковый период [6]. Данная закономерность объясняется особенностями эксплуатации персонального электротранспорта, когда основная масса владельцев осуществляет подзарядку в вечернее время после завершения рабочих поездок.

На момент 2019 года эксперты сходились во мнении о том, что потребление электроэнергии, в связи с увеличением количества EV, к 2030 году вырастет на 5 ГВт – около 1 %, а к 2050 году – на 20 ГВт – 5 %. Но на конец 2024 года данные немножко поменялись в сторону увеличения. Эксперты уже прогнозируют к 2030 году повышение потребления электроэнергии на 4,1 ТВт (рис. 1).

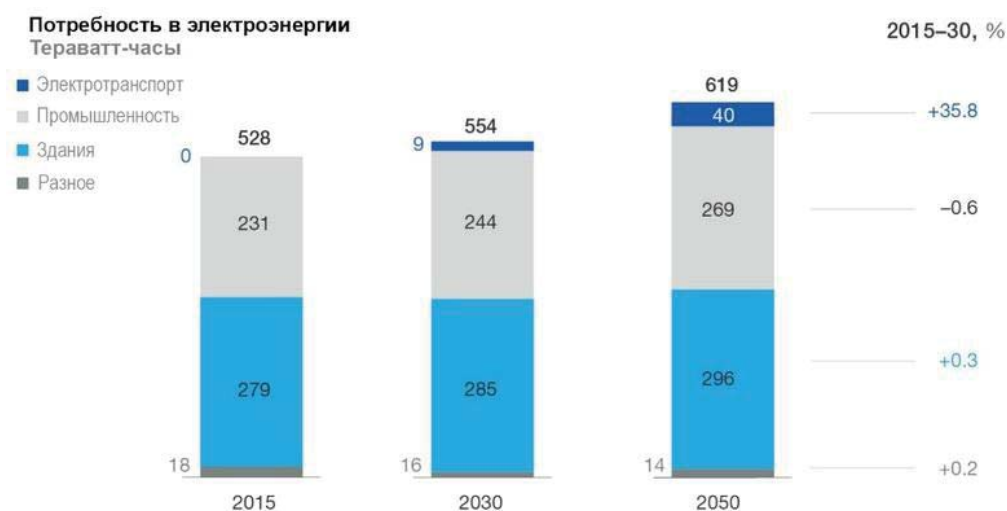


Рис. 1. Потребность в электроэнергии с 2015 года

Несмотря на столь внушительные цифры в разрезе страны прирост не столь критичен, как может показаться на первый взгляд. Гораздо хуже дела могут обстоять в локальных областях. Если обратить внимание на распределение EV по территории страны, можно заметить неравномерность. Основная масса электрокаров приходится на Москву, Краснодарский край и Приморье. В этих регионах можно будет наблюдать повышение нагрузки и изменение кривизны графиков [7].

Особую проблему представляют населенные пункты регионального значения, получающие электроснабжение от единичных трансформаторных подстанций (ТП). Активное развитие как публичных зарядных станций (ЭЗС), так и увеличение количества частных электромобилей (EV) способно привести к формированию зон критической нагрузки в таких энерго-

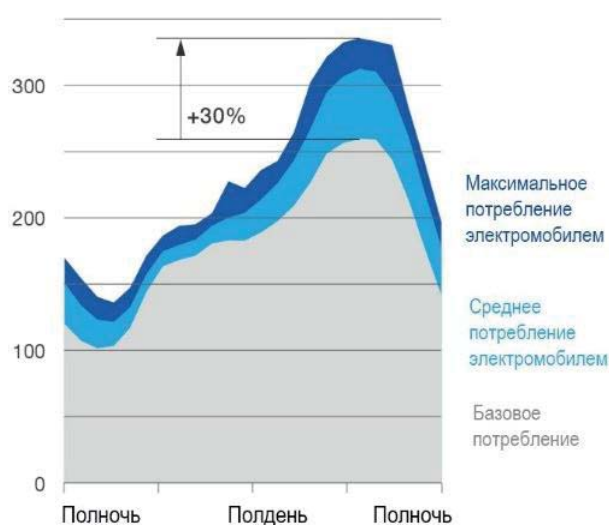


Рис. 2. Нагрузка на электросеть для 150 домов с двумя автомобилями на дом и 25 %-м проникновением электромобилей (кВт)

системах [8]. Особую актуальность эта проблема приобретает при учете необходимости организации зарядных узлов для общественного электротранспорта.

Проведенное исследование электропотребления типового жилого микрорайона, состоящего из 150 частных домохозяйств, при уровне использования электромобилей (EV) в 25 % от общего автопарка, демонстрирует увеличение пиковой нагрузки на распределительную сеть приблизительно на 30 %. Хотя индивидуальное энергопотребление домохозяйства при использовании EV может возрастать практически в два раза (рис. 2).

Важно отметить, что указанные расчетные значения сохраняют свою актуальность даже при отсутствии систем интеллектуального управления зарядкой («умной зарядки»). Данный факт свидетельствует о наличии определен-

ного резерва пропускной способности в существующих распределительных сетях, что подтверждается результатами аналогичных исследований [9]. Однако следует учитывать, что полученные показатели характерны для равномерного распределения нагрузки, в то время как пространственная или временная концентрация процессов зарядки может привести к существенному превышению расчетных параметров.

Наибольшие технологические сложности возникают при организации общественных станций быстрой зарядки (ЭЗС) и зарядных комплексов для коммерческого электротранспорта. Проведенные исследования демонстрируют, что их эксплуатация может приводить к систематическому превышению допустимой нагрузки питающих трансформаторных подстанций (ТП) [6] (рис. 3).

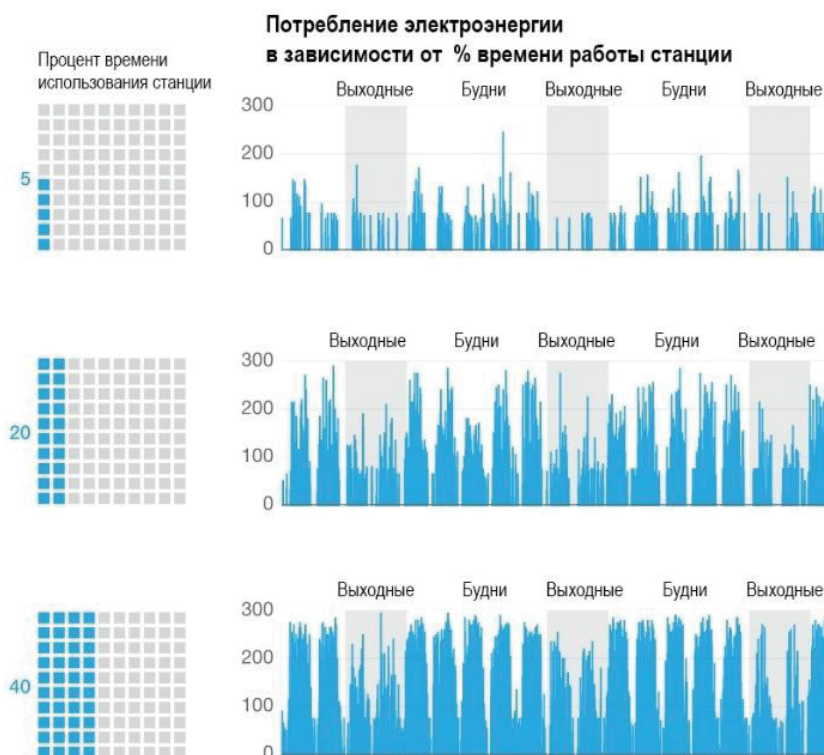


Рис. 3: Нагрузка на ТП по количеству EV

Инфраструктурные вызовы развития электротранспорта

Рост парка электромобилей вызывает не только увеличение нагрузки на энергосистемы, но и требует ускоренной модернизации электросетевой инфраструктуры. Данный процесс будет носить поэтапный характер, первоначально затронув регионы с высокой плотностью EV, где уже наблюдаются проблемы недостаточной мощности сетей.

Модернизационные мероприятия потребуют значительных капиталовложений, направленных на замену трансформаторного оборудования, усиление линий электропередачи, развитие сопутствующей инфраструктуры. Примечательно, что существенная часть затрат (до 40 % по оценкам экспертов [10]) будет связана не с закупкой оборудования, а с проектно-изыскательскими работами и последующим техническим обслуживанием модернизированных сетей.

Перспективы интеграции возобновляемых источников энергии в зарядную инфраструктуру

Интеграция возобновляемых источников энергии (ВИЭ) может частично компенсировать затраты на модернизацию электросетей для электрозарядных станций (ЭЗС). Локальное применение ВИЭ, как показывают исследования, способно не только увеличить пропускную способность зарядных узлов, но и улучшить качество электроэнергии. Теоретически такая интеграция должна снижать пиковые нагрузки на сеть, однако переменный характер генерации ВИЭ существенно ограничивает этот потенциал.

Экономическая целесообразность использования ВИЭ для ЭЗС остается дискуссионным вопросом, поскольку сильно зависит от региональных условий. Отдельные исследования указывают на эффективность возобновляемой энергетики при стоимости сетевого электричества выше 8 руб./кВт·ч, а в некоторых случаях – и по сравнению с традиционной генерацией. Однако для стабильной работы таких систем требуется развертывание значительных мощностей накопителей энергии, что существенно влияет на общую экономику проектов [11].

Согласно проведенным исследованиям [12], внедрение систем накопления электроэнергии (СНЭ) для электрозарядных станций (ЭЗС) становится экономически целесообразным только при условии снижения капитальных затрат на 40–60 %. Кроме того, как отмечалось ранее, рентабельность строительства ЭЗС существенно зависит от плотности парка электромобилей (EV) в обслуживаемой зоне. При недостаточной концентрации EV эксплуатация зарядной инфраструктуры может оказаться нерентабельной.

Многочисленные исследования подтверждают значительное негативное воздействие электрозарядных станций (ЭЗС) на качество электроэнергии в распределительных сетях. Основные проблемы связаны с возникновением дисбаланса напряжения и гармонических искажений тока, вызванных нелинейным характером нагрузки при зарядке электромобилей. Кроме того, наблюдаются повышенные тепловые потери в трансформаторном оборудовании, что приводит к сокращению его эксплуатационного ресурса. Также отмечается негативное влияние гармонических составляющих на работу другого электрооборудования, подключенного к той же сети [13].

Перспективным направлением решения указанных проблем является развитие интеллекту-

альных систем управления зарядной инфраструктурой. Современные технологии позволяют осуществлять динамическую балансировку нагрузки между зарядными портами, что обеспечивает оптимальное распределение мощности без превышения допустимых сетевых параметров. Особое значение имеет применение стандартизированных протоколов (OCPP, OCPI), которые обеспечивают удаленный мониторинг и управление зарядными сессиями, а также создают возможность кросс-сетевого взаимодействия между различными операторами зарядной инфраструктуры [14]. Такие решения способствуют повышению энергоэффективности и снижению нагрузки на распределительные сети.

Выводы

Проведенный анализ современных проблем и перспектив развития электротранспорта и сопутствующей инфраструктуры позволяет сделать ряд важных выводов. Во-первых, массовая «электрификация» транспорта создает значительные вызовы для энергосистем, связанные с ростом пиковых нагрузок, ухудшением качества электроэнергии и необходимостью масштабной модернизации сетевого хозяйства. Как показали исследования, наиболее остро эти проблемы проявляются в регионах с высокой концентрацией электромобилей, где локальная нагрузка на распределительные сети может увеличиваться на 30–60 %.

Во-вторых, ключевыми технологическими ограничениями остаются недостаточная энергоемкость аккумуляторных систем и длительное время зарядки по сравнению с традиционным топливом. При этом организация зарядной инфраструктуры, особенно мощных станций быстрой зарядки, требует значительных капиталовложений и может быть экономически нецелесообразной при недостаточной плотности парка электромобилей.

В-третьих, решение указанных проблем видится в комплексном подходе, включающем: развитие интеллектуальных систем управления зарядкой (OCPP, OCPI); внедрение динамической балансировки нагрузок; интеграцию возобновляемых источников энергии; модернизацию сетевой инфраструктуры.

Особое значение имеет стандартизация протоколов взаимодействия и создание кросс-сетевых решений, позволяющих оптимизировать использование существующих энергоресурсов. Перспективным направлением представляется сочетание централизованных и распределенных

систем генерации с развитыми накопителями энергии.

Проведенный анализ подтверждает, что устойчивое развитие электротранспорта требует скоординированных действий по совершенствованию как технологий электромобилей, так и энергетической инфраструктуры. Реализация предложенных мер позволит минимизировать негативное влияние на энергосистемы и обеспечить плавный переход к новой транспортной системе.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Смирнов, А. Е.* Альтернативные концепции автомобилей конца XIX века / А. Е. Смирнов // История техники. – 2020. – № 2. – С. 78–89.
2. Глобальная статистика электротранспорта 2015–2022 / под ред. И. К. Петровой. – М.: НИИ Транспорта, 2022. – 134 с.
3. Сравнительный анализ методов заправки транспортных средств // Транспорт на альтернативном топливе. – 2023. – № 1. – С. 34–42.
4. Локальные нагрузки на распределительные сети / под ред. П. К. Сидорова. – М.: Энергопресс, 2022. – 112 с.
5. *Петров, А. В.* Анализ суточных графиков нагрузки современных энергосистем / А. В. Петров, И. К. Сидоров // Энергетик. – 2021. – № 5. – С. 34–42.
6. *Козлова, Е. Н.* Влияние электромобилей на пара-

метры энергопотребления / Е. Н. Козлова // Электрические станции. – 2022. – № 3. – С. 56–63.

7. Соколов, А. В. Прогнозирование нагрузки энергосистем в условиях массовой электромобилизации / А. В. Соколов, Е. Л. Михайлова // Энергетик. – 2023. – № 4. – С. 34–42.

8. *Карасев, П. Н.* Территориальные аспекты развития зарядной инфраструктуры для электротранспорта / П. Н. Карасев // Региональная экономика. – 2022. – № 3 (58). – С. 89–101.

9. *Петров, А. Н.* Моделирование нагрузок в распределительных сетях / А. Н. Петров // Энергетика. – 2023. – № 4. – С. 45–52.

10. *Петрова, С. К.* Экономика модернизации энергосетей / С. К. Петрова // Энергоэксперт. – 2024. – № 2. – С. 45–51.

11. *Козлова, Е. Н.* Экономика ВИЭ в транспортной инфраструктуре / Е. Н. Козлова // Альтернативная энергетика. – 2024. – № 1. – С. 34–42.

12. *Воронин, В. А.* Использование систем накопления электроэнергии для зарядных станций электромобилей в условиях ограничений на технологическое присоединение / В. А. Воронин, Ф. С. Непша, С. Ю. Анушенко // Электроэнергия. Передача и распределение. – 2024. – № 5 (86). – С. 80–90. – EDN VNEBZM.

13. *Петров, А. Н.* Гармонические искажения в сетях с зарядной инфраструктурой / А. Н. Петров // Электрические станции. – 2023. – № 4. – С. 45–52.

14. *Сидорова, М. К.* Интеллектуальное управление зарядными станциями / М. К. Сидорова // Энергетик. – 2024. – № 1. – С. 33–39.