УДК 004.9:656.13

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ЦИФРОВИЗАЦИИ И ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОГО УПРАВЛЕНИЯ ЗАРЯДНОЙ ИНФРАСТРУКТУРОЙ ЭЛЕКТРОТРАНСПОРТА

М.А. СКОРОХОДОВ, А.В. ШТУКИНА
(Представлено: Е.А. КОСТЮЧЕНКО)

В статье рассмотрены основы цифровизации зарядной инфраструктуры электротранспорта. Уточнено понятие интеллектуального управления, предложена пятиуровневая архитектура цифровой системы управления, классифицированы методы интеллектуального управления и обоснована модель цифровой зрелости, пригодная для оценки национальных зарядных сетей.

Ключевые слова: *цифровизация, интеллектуальное управление, электромобильный транспорт, зарядная инфраструктура.*

Развитие электротранспорта качественно меняет требования к зарядной инфраструктуре. По данным Международного энергетического агентства (МЭА), в 2025 г. число публичных зарядных точек в мире превысило 7 млн, на каждую из них приходилось около 11 электромобилей, а в качестве самостоятельного показателя обеспеченности МЭА использует доступную зарядную мощность в расчете на один электромобиль (в среднем 4,5 кВт). В Республике Беларусь на 1 сентября 2026 г. эксплуатировалось более 70 тыс. электромобилей и около 2,7 тыс. электрозарядных станций (ЭЗС), а к 2030 г., по оценке Министерства энергетики, потребуется около 16 тыс. станций [1]. Почти шестикратное расширение сети в условиях ограниченной пропускной способности электрических сетей невозможно обеспечить только экстенсивно: ключевым фактором становится цифровое и интеллектуальное управление.

Если цифровизация означает перевод объектов и процессов в цифровую форму, позволяющий учитывать их и управлять ими на основе данных, то цифровая трансформация экономики понимается учеными как смена экономического уклада, изменение рынков, социальных отношений и государственного управления, связанное с проникновением в них цифровых технологий, и формирование более эффективных экономических процессов на основе цифровых инфраструктур [2, с. 102]. Зарядную инфраструктуру электротранспорта целесообразно рассматривать как киберфизическую систему, объединяющую технический контур (ЭЗС, электромобили, накопители энергии, распределительные сети), информационный контур (каналы связи, программные платформы, данные) и экономический контур (тарифы, расчеты, договорные отношения). Ее участники – пользователь, оператор ЭЗС (charge point operator, CPO), провайдер услуг электромобильности (e-mobility service provider, eMSP), энергоснабжающая организация и регулятор. Элементы такого подхода закреплены в Программе создания государственной зарядной сети: государственная сеть функционирует на базе единого программного обеспечения государственного оператора, а оптимальным принято соотношение не менее 2 кВт мощности зарядной инфраструктуры на один электромобиль [3].

Цифровизация и внедрение интеллектуальных систем управления зарядной инфраструктурой для электромобилей представляют собой набор технологических решений и подходов. Под интеллектуальным управлением зарядной инфраструктурой в статье понимается управление размещением, режимами работы, мощностью, ценой и обслуживанием ЭЗС, при котором решения принимаются полностью или частично автоматически на основе непрерывно собираемых данных, прогнозных моделей и алгоритмов оптимизации с учетом интересов пользователей, оператора и энергосистемы. Объектами управления выступают зарядная сессия (микроуровень), локация или кластер станций (мезоуровень) и сеть в целом во взаимодействии с энергосистемой (макроуровень).

Обобщение отраслевых стандартов и исследований [5–9] позволяет выделить пять уровней архитектуры (рис. 1). Физический уровень образуют ЭЗС переменного и постоянного тока, электромобили с системой управления батареей (battery management system, BMS), накопители энергии, возобновляемые источники энергии (ВИЭ) и распределительные сети. Коммуникационный уровень обеспечивает обмен данными: между электромобилем и станцией – по IEC 61851 и ISO 15118 (включая автоматическую авторизацию Plug & Charge и двунаправленную передачу энергии в ISO 15118-20), между станцией и платформой – по открытому протоколу OCPP (Open Charge Point Protocol). Версия OCPP 2.1 (январь 2025 г.) поддерживает ISO 15118-20, двунаправленную зарядку и управление распределенными энергоресурсами и опубликована как международный стандарт IEC 63584-210:2025 [9]. Платформенный уровень – система управления станциями – аккумулирует данные о состоянии оборудования, сессиях и платежах; аналитико-интеллектуальный уровень реализует прогнозирование и оптимизацию; сервисный предоставляет пользователю приложения, платежи, роуминг, открытые данные и программные интерфейсы (application programming interface, API).



Рисунок 1. – Архитектура цифровой системы управления зарядной инфраструктурой

Источник: составлено авторами на основе [5–10].

Принципиальное значение имеет открытость интерфейсов. Открытые протоколы – OCPP между станцией и платформой и OCPI (Open Charge Point Interface) между операторами – исключают зависимость от одного поставщика оборудования и позволяют заряжаться в сетях разных операторов через одно приложение, тогда как закрытая «платформенная» интеграция упрощает контроль, но ограничивает совместимость и конкуренцию. Регламент Европейского союза 2023/1804 (Alternative Fuels Infrastructure Regulation, AFIR) переводит эти принципы в обязательные нормы: разовая оплата банковской картой без регистрации на станциях мощностью от 50 кВт, прозрачность цены за кВт·ч, цифровое подключение и готовность новых станций к управляемой зарядке, предоставление статических и динамических данных через национальные точки доступа [10, ст. 5, 20].

Цифровая архитектура создает условия для применения методов, систематизированных в таблице 1. Их общий экономический смысл – переход от наращивания мощности присоединения к ее рациональному использованию во времени и пространстве.

Таблица 1. – Методы интеллектуального управления зарядной инфраструктурой

Метод	Содержание	Цифровые предпосылки	Экономический эффект
Распределение мощности (статическое и динамическое)	распределение ограниченной мощности присоединения между коннекторами в реальном времени	учет энергии, профили мощности OCPP	снижение затрат на присоединение, рост пропускной способности локации
Управляемая зарядка (V1G)	смещение и модуляция заряда по сигналам энергосистемы и цены с учетом времени отъезда	зонные тарифы, обмен данными по ISO 15118 и OCPP	снижение пиковой нагрузки, использование ночного провала потребления
Двунаправленная зарядка (V2G, V2H)	отдача энергии аккумулятора электромобиля в сеть или здание	ISO 15118-20, OCPP 2.1, двунаправленные ЭЗС, правила рынка	услуги гибкости для энергосистемы, доход владельца электромобиля
Ценовое управление	зонные и динамические тарифы, плата за простой и бронирование	цифровой биллинг, прозрачность цены	выравнивание спроса, рост оборачиваемости коннекторов
Прогнозная аналитика	прогноз спроса, нагрузки и отказов, выбор мест размещения ЭЗС	история зарядных сессий, данные о трафике и погоде	обоснованность инвестиций, рост доступности станций
Цифровой двойник сети	имитационная модель зарядной сети во взаимодействии с энергосистемой	интегрированные данные и модели всех уровней	оценка сценариев развития до их реализации

Источник: составлено авторами на основании [1; 5–8].

Наиболее распространены методы распределения мощности и управляемой зарядки с однонаправленным потоком энергии (V1G), позволяющие сместить заряд на периоды низкой нагрузки; как показано в обзоре [5, p. 717], по мере роста парка электромобилей интеллектуальная система управления зарядом становится необходимой, чтобы избежать крупных затрат на усиление распределительных сетей. Концепция двунаправленного обмена энергией между электромобилем и сетью (vehicle-to-grid, V2G) или зданием (vehicle-to-home, V2H), обоснованная в работе [6, p. 268], рассматривает парк электромобилей как распределенный накопитель, способный оказывать энергосистеме услуги гибкости; методы оптимизации таких режимов обобщены в [7, p. 720]. По оценке МЭА, управляемая зарядка и V2G снижают пиковую нагрузку и повышают гибкость энергосистемы [1]. Отдельную группу образуют методы прогнозной аналитики: прогнозирование спроса, кластеризация пользователей и планирование графиков заряда [8, p. 128353], а также предиктивное техническое обслуживание (ТО) оборудования и цифровые двойники сети. Для Беларуси значение управляемой зарядки усиливается тем, что Программа создания государственной зарядной сети прямо связывает развитие электротранспорта с использованием электроэнергии Белорусской АЭС [4].

Модели зрелости описывают последовательность уровней, через которые проходит объект в развитии определенных способностей, и используются для диагностики и выбора приоритетов развития [11, p. 213]. Для зарядной инфраструктуры предлагается адаптировать индекс зрелости «Индустрии 4.0», выделяющий этапы компьютеризации, подключенности, видимости, прозрачности, прогнозируемости и адаптивности [12, p. 15], и модель зрелости интеллектуальных электросетей (Smart Grid Maturity Model, SGMM) с восемью доменами и шестью уровнями [13, p. 3–7]. Предлагаемая модель включает пять уровней (рис. 2) и восемь измерений оценки: стратегия и регулирование; подключенность и мониторинг; данные и интероперабельность; клиентские цифровые сервисы; тарифы и платежи; интеграция с энергосистемой; аналитика и искусственный интеллект; надежность и киберустойчивость.

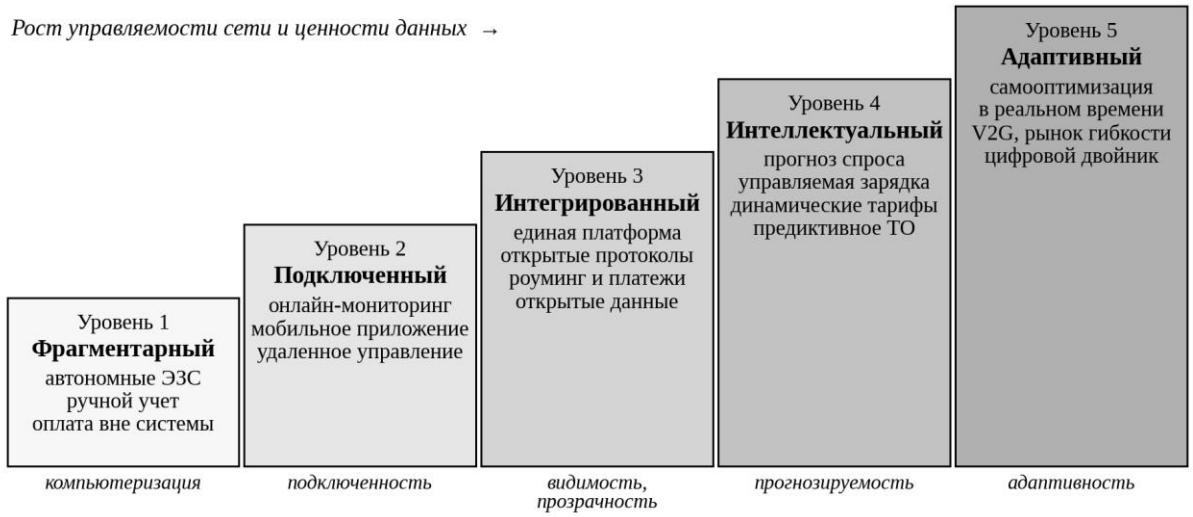

Рисунок 2. – Уровни цифровой зрелости зарядной инфраструктуры

Источник: составлено авторами на основании [11–13].

Оценка выполняется экспертно по шкале от 1 до 5 по каждому измерению на основе документально подтвержденных признаков; интегральный индекс рассчитывается как среднее значение, а профиль зрелости в виде лепестковой диаграммы позволяет выявить «узкие места». Цифровые требования AFIR [10, ст. 5] могут служить внешним ориентиром для уровней 3 и 4.

Таким образом, зарядная инфраструктура является киберфизической системой, эффективность которой определяется не только числом станций, но и качеством управления данными и мощностью; поэтому наряду с показателем «электромобилей на одну ЭЗС» целесообразно использовать показатели доступной мощности на электромобиль, загрузки и доступности сети. Систематизированы методы интеллектуального управления – распределение мощности, управляемая и двунаправленная зарядка, ценовое управление, прогнозная аналитика и цифровые двойники, – различающиеся цифровыми предпосылками и экономическим эффектом. Предложенная модель цифровой зрелости позволяет оценивать национальные зарядные сети и обосновывать приоритеты их цифровизации; ее апробация на примере Республики Беларусь является предметом дальнейшего исследования.

ЛИТЕРАТУРА

1. Global EV Outlook 2026 [Electronic resource] / International Energy Agency. – Paris, 2026. – Mode of access: https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2026. – Date of access: 23.09.2026.
2. Головенчик, Г.Г. Цифровая трансформация и экономический рост (на примере белорусской экономики) [Электронный ресурс] / Г.Г. Головенчик, М.М. Ковалев // Журнал Белорусского государственного университета. Экономика. – 2018. – № 1. – С. 102–121. – Режим доступа: https://journals.bsu.by/index.php/economy/article/view/2243. – Дата доступа: 23.09.2026.
3. Об утверждении Программы создания государственной зарядной сети для зарядки электромобилей : постановление Совета Министров Респ. Беларусь, 10 окт. 2018 г., № 731 : в ред. постановления Совета Министров Респ. Беларусь от 05.11.2024 № 816, с изм. от 08.08.2026 № 405 // Национальный правовой Интернет-портал Республики Беларусь [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://pravo.by/document/?guid=3871&p0=C21800731. – Дата доступа: 23.09.2026.
4. Plug-in electric vehicles in electric distribution networks: A review of smart charging approaches [Electronic resource] / J. García-Villalobos [et al.] // Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2014. – Vol. 38. – P. 717–731. – Mode of access: https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.07.040. – Date of access: 23.09.2026.
5. Kempton, W. Vehicle-to-grid power fundamentals: Calculating capacity and net revenue [Electronic resource] / W. Kempton, J. Tomić // Journal of Power Sources. – 2005. – Vol. 144, № 1. – P. 268–279. – Mode of access: https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2004.12.025. – Date of access: 23.09.2026.
6. Tan, K.M. Integration of electric vehicles in smart grid: A review on vehicle to grid technologies and optimization techniques [Electronic resource] / K.M. Tan, V.K. Ramachandaramurthy, J.Y. Yong // Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2016. – Vol. 53. – P. 720–732. – Mode of access: https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.09.012. – Date of access: 24.09.2026.
7. Review on scheduling, clustering, and forecasting strategies for controlling electric vehicle charging: Challenges and recommendations [Electronic resource] / A.S. Al-Ogaili [et al.] // IEEE Access. – 2019. – Vol. 7. – P. 128353–128371. – Mode of access: https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2939595. – Date of access: 24.09.2026.
8. OCPP 2.1 edition 1 is now officially published by IEC as IEC 63584-210:2025 [Electronic resource] // Open Charge Alliance. – 2025. – 9 Dec. – Mode of access: https://openchargealliance.org/ocpp-2-1-edition-1-is-now-officially-published-by-iec-as-iec-63584-210-2025/. – Date of access: 25.09.2026.
9. Regulation (EU) 2023/1804 of the European Parliament and of the Council of 13 September 2023 on the deployment of alternative fuels infrastructure, and repealing Directive 2014/94/EU // Official Journal of the European Union [Electronic resource]. – 2023. – L 234. – P. 1–47. – Mode of access: https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:32023R1804. – Date of access: 25.09.2026.
10. Becker, J. Developing maturity models for IT management – A procedure model and its application [Electronic resource] / J. Becker, R. Knackstedt, J. Pöppelbuß // Business & Information Systems Engineering. – 2009. – Vol. 1, № 3. – P. 213–222. – Mode of access: https://doi.org/10.1007/s12599-009-0044-5. – Date of access: 25.09.2026.
11. Industrie 4.0 Maturity Index. Managing the Digital Transformation of Companies – Update 2020 [Electronic resource] / G. Schuh [et al.]. – Munich : acatech – National Academy of Science and Engineering, 2020. – (acatech STUDY). – Mode of access: https://en.acatech.de/publication/industrie-4-0-maturity-index-update-2020/. – Date of access: 25.09.2026.
12. Smart Grid Maturity Model, Version 1.2: Model Definition [Electronic resource] / SGMM Team. – Pittsburgh : Software Engineering Institute, Carnegie Mellon University, 2011. – (Technical Report CMU/SEI-2011-TR-025). – Mode of access: https://kilthub.cmu.edu/articles/report/Smart_Grid_Maturity_Model_Version_1_2_Model_Definition/6583835/1. – Date of access: 25.09.2026.