

ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ И ПРИКЛАДНАЯ ЭЛЕКТРОТЕХНИКА/THEORETICAL AND APPLIED ELECTRICAL ENGINEERING

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.172.16> EDN: ETDHES

ОПТИМИЗАЦИЯ МОЩНОСТИ ТРАНСФОРМАТОРОВ И НАКОПИТЕЛЕЙ ЭНЕРГИИ ЗАРЯДНЫХ СТАНЦИЙ ЭЛЕКТРОМОБИЛЕЙ

Научная статья

Чжан К.^{1,*}, Коровкин Н.В.², Тан М.³, Поляков Д.К.⁴¹ORCID : 0000-0001-7235-6282;²ORCID : 0000-0002-1173-8727;⁴ORCID : 0009-0003-9632-5319;^{1, 2, 4} Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Российская Федерация³ Ланьчжоуский университет Цзяотун, Ланьчжоу, Китай

* Корреспондирующий автор (zhangkaiyue2024[at]gmail.com)

Предложена: 02.08.2026; Принята: 01.10.2026; Опубликовано: 16.10.2026

Аннотация

Рассмотрена задача максимизации недельной чистой прибыли зарядной станции электромобилей за счёт совместной оптимизации установленной мощности трансформатора и ёмкости накопителя энергии с учётом потерь от недообслуженных пользователей. Разработана модель станции с варьируемыми параметрами мощности трансформатора и ёмкости накопителя, учитывающая функцию упущенной выгоды и характеристики зарядной нагрузки электрозаправочной станции (ЭЗС). Выполнено сравнение недельной чистой прибыли ЭЗС для различных сочетаний мощности трансформатора и ёмкости накопителя энергии, а также для варианта без накопителя. Результаты показывают, что рациональная конфигурация системы накопления энергии позволяет существенно снизить требуемую мощность трансформатора и потери энергии. Для характерной недельной нагрузки города Ланьчжоу (Китай) определено оптимальное соотношение мощности трансформатора и ёмкости накопителя, снижающее инвестиционные затраты и максимизирующее прибыль станции. Полученные результаты обеспечивают теоретическую основу для оптимизации состава оборудования зарядных станций и практическое руководство при разработке проектов.

Ключевые слова: электромобиль, зарядная станция, электрозаправочная станция, прибыль зарядной станции, оптимизация мощности трансформатора, оптимизация ёмкости накопителя энергии, характеристики нагрузки, потери мощности при зарядке.

OPTIMISING THE POWER OF TRANSFORMERS AND ENERGY STORAGE SYSTEMS IN ELECTROMOBILE CHARGING STATIONS

Research article

Zhang K.^{1,*}, Korovkin N.V.², Tan M.³, Polyakov D.K.⁴¹ORCID : 0000-0001-7235-6282;²ORCID : 0000-0002-1173-8727;⁴ORCID : 0009-0003-9632-5319;^{1, 2, 4} Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Saint-Petersburg, Russian Federation³ Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou, China

* Corresponding author (zhangkaiyue2024[at]gmail.com)

Suggested: 02.08.2026; Accepted: 01.10.2026; Published: 16.10.2026

Abstract

The problem of maximising the weekly net profit of an electromobile charging station through the joint optimisation of the transformer's installed power and the energy storage capacity is examined, taking into account losses from unserved users. A model of the station has been developed with variable parameters for transformer power and energy storage capacity, considering the lost revenue function and the characteristics of the charging load at the electromobile charging station (ECS). A comparison was carried out of the weekly net profit of the ECS for various combinations of transformer capacity and energy storage capacity, as well as for a variant without a storage system. The results show that a rational configuration of the energy storage system allows for a significant reduction in the required transformer capacity and energy losses. For a typical weekly load in the city of Lanzhou (China), the optimal ratio of transformer capacity to energy storage capacity has been determined, which reduces investment costs and maximises the station's profit. The results provide a theoretical basis for optimising the equipment configuration of charging stations and serve as a practical guide for project development.

Keywords: electromobile, charging station, electric charging station, charging station revenue, transformer power optimisation, energy storage capacity optimisation, load characteristics, power losses during charging.

Введение

Параллельно с быстрым развитием индустрии электромобилей идёт столь же активное строительство зарядных станций. Дополнительная нагрузка, лежащая на распределительные сети, ещё больше увеличивает разницу между

пиковым и минимальным потреблением. Снижение нагрузки на местные электросети, характеризующиеся большим перепадом между пиками и минимумами, стало важной задачей, от решения которой зависит развитие отрасли электромобилей. Поскольку строительство зарядных станций требует значительных капиталовложений, повышение коэффициента использования оборудования и снижение эксплуатационных расходов становится ключевым фактором развития сети электрозаправочных станций (ЭЗС).

Характеристики зарядной нагрузки лежат в основе конфигурации мощности, а также проектирования и строительства зарядных станций [1]. Способы зарядки электромобилей делятся на медленную и быструю: в Китае мощность медленной зарядки обычно составляет 7–8 кВт, а быстрой — 60, 80, 100 или 120 кВт. Медленная зарядка создаёт относительно стабильную нагрузку на сеть, тогда как быстрая порождает значительные колебания мощности. Зарядные станции для большинства видов транспорта (автобусов, каршеринга, такси и личных автомобилей) в основном используют быструю зарядку.

Планирование зарядных станций ориентировано на конкретные группы пользователей: параметры зарядной нагрузки различаются в зависимости от типа пользователей и напрямую влияют на конфигурацию станции, что требует анализа и моделирования. В работе [2] пользователи классифицированы, и для каждого типа смоделированы недельные графики нагрузки станции. В [3] кластерный анализ применён для классификации данных о нагрузке зарядных станций и изучения её характеристик.

Задачи перспективного проектирования и развития ЭЭС актуальны для всех национальных энергетик мира. Эти задачи также требуют обоснованных прогнозов по изменению структуры нагрузки, вызванной быстрым ростом числа электромобилей. В [4], [5] нами предложена и обоснована модель развития энергосистем, нуждающаяся в обоснованных прогнозах на потребление и установленную трансформаторную мощность. В [6] рассмотрен эффективный метод планирования энергоснабжения (на сутки вперед) для микросети, также требующее корректных представлений о планируемом энергопотреблении.

При строительстве зарядных станций необходимо учитывать не только потребности пользователей, но и экономику эксплуатации. Помимо капитальных затрат, значительную часть расходов составляет стоимость электроэнергии. В Китае тариф на электроэнергию для промышленных и коммерческих потребителей складывается из двух составляющих: платы за заявленную мощность трансформатора и платы за фактически потреблённую электроэнергию. Недостаточная мощность трансформатора не позволяет обеспечить зарядку крупногабаритных электромобилей, а её избыток приводит к неоправданным затратам. В [7] анализируются затраты, связанные с мощностью трансформатора ЭЗС, и её выбор осуществляется с учётом суммарных затрат и режимов работы при перегрузке. В работах [8], [9], [10] мощность трансформатора используется как ограничение оптимизационной модели ЭЗС, однако влияние собственных характеристик зарядной нагрузки на её выбор не учитывается. Оптимизация зарядных станций может преследовать разные цели: в [11] минимизируются затраты пользователей на оплату зарядки, в [12] — инвестиционные затраты, но ни в одной из этих работ чистая прибыль зарядной станции не выступает целевой функцией.

Развитие технологий накопителей энергии открывает новые возможности для стабилизации нагрузки зарядных станций и оптимизации мощности трансформатора. Энергия накапливается в периоды низкого спроса, а в часы пиковой нагрузки электромобили заряжаются одновременно от сети и от накопителя, который играет роль буфера, сглаживающего пики и выравнивающего нагрузку. В [13] предложен метод экономической оценки крупномасштабных накопителей энергии на стороне потребления, основанный на сглаживании пиков и выравнивании нагрузки. В [14] методом линейного программирования построена модель зарядной станции и определена оптимальная конфигурация накопителя энергии для различных целевых функций: его рациональный объём позволяет снизить пиковые нагрузки и требуемую мощность трансформаторов, а также сократить эксплуатационные расходы станции. В [15] предложена модель ёмкости накопителя энергии, минимизирующая суммарное время заряда, хранения и разряда, однако без учёта затрат на мощность трансформатора станции.

Применение накопителей энергии на электрозаправочных станциях пока находится на начальной стадии развития [16], при этом конфигурация систем накопления имеет большое значение как для строительства зарядных станций, так и для устойчивой работы распределительной сети [17]. На основе модельных данных о различных группах пользователей электромобилей в статье анализируются характеристики нагрузки зарядных станций. Для повышения экономической эффективности ЭЗС требуется оптимизация чистой прибыли с учётом кратковременности пиковых периодов нагрузки, что достигается введением функции упущенной выгоды, отражающей потери от недообслуженных пользователей, и последующей оптимизацией мощности трансформатора, ёмкости накопителя энергии и мощности преобразователя зарядной станции.

Цель работы - максимизация недельной чистой прибыли станции зарядки электромобилей за счёт совместной оптимизации мощности трансформатора, ёмкости накопителя энергии и мощности преобразователя с учётом функции упущенной выгоды. Для достижения поставленной цели решаются следующие задачи:

- 1) анализ характеристик зарядной нагрузки для различных групп пользователей электромобилей на примере города Ланьчжоу;
- 2) разработка модели упущенной выгоды и модели затрат зарядной станции, включающей стоимость трансформатора, зарядных свай и системы накопления энергии;
- 3) построение оптимизационной модели, максимизирующей недельную чистую прибыль станции по параметрам мощности трансформатора и ёмкости накопителя;
- 4) сравнительный анализ конфигураций станции с накопителем энергии и без него на характерном примере нагрузки города Ланьчжоу.

Методы и принципы исследования

2.1. Анализ характеристик нагрузки зарядных станций электромобилей

Зарядные станции электромобилей регистрируют данные о потребляемой автомобилями нагрузке, как правило, с интервалом 15 минут. Ниже представлены статистические данные о расходе электроэнергии электромобилями различных групп пользователей за неделю.

2.1.1. Характеристики нагрузки электромобилей

На основе результатов, полученных ранее и представленных в [2], составлены типовые суточные графики зарядной нагрузки для различных групп пользователей города Ланьчжоу (рис. 1).

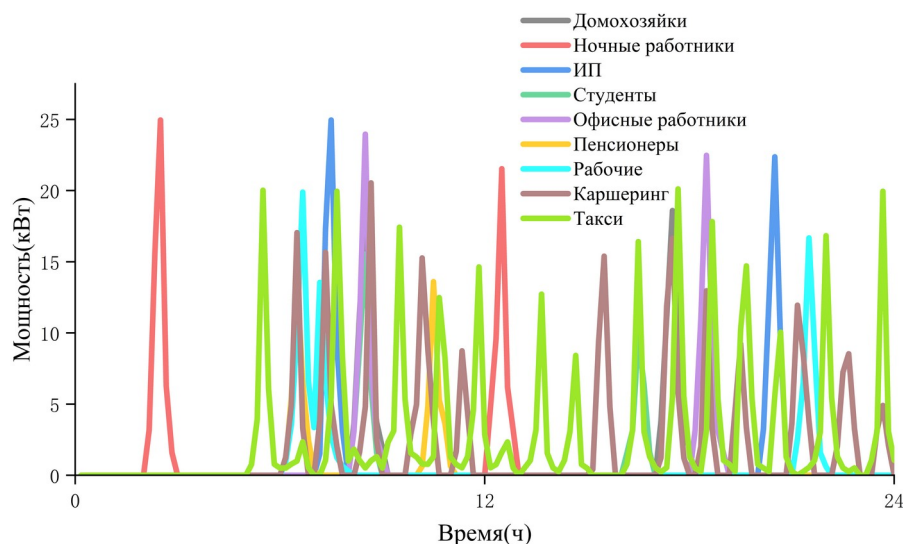


Рисунок 1 - Типовые графики расходования заряда аккумулятора различными типами владельцев электромобилей
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.172.16.1>

Из рисунка 1 видно, что зарядные профили различных групп пользователей существенно различаются, но для всех характерны значительные колебания нагрузки и кратковременные пики.

2.1.2. Характеристики нагрузки зарядной станции

В качестве примера рассмотрим общественные станции быстрой зарядки постоянного тока. На основе статистики парка электромобилей города Ланьчжоу недельные графики расхода заряда девяти групп пользователей объединены в суммарный профиль недельной нагрузки зарядной станции (рис. 2).

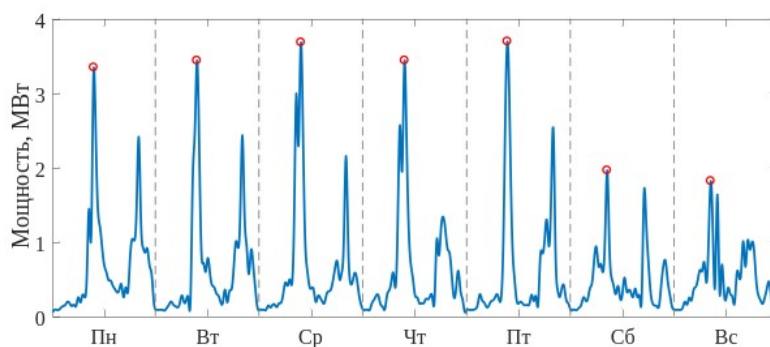


Рисунок 2 - Диаграмма недельной нагрузки электрозаправочной станции
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.172.16.2>

Из рисунка 2 следует, что недельный график нагрузки ЭЗС характеризуется значительными колебаниями по дням недели, большой амплитудой между пиковыми и минимальными значениями, кратковременностью пиков и продолжительными периодами низкой нагрузки.

2.1.3. Ограничения

Работа зарядной станции должна удовлетворять следующим ограничениям:

1 Ограничение по балансу мощности (мгновенный баланс между сетью, накопителем и нагрузкой):

$$P_{net}(t) + P_{dis}(t) = P_{load}(t) + P_{ch}(t)$$

где — $P_{net}(t)$ мощность, потребляемая из сети в момент t ; $P_{dis}(t)$ и $P_{ch}(t)$ — соответственно мощность разряда и заряда накопителя; $P_{load}(t)$ — зарядная нагрузка.

$$0 \leq P_{net}(e) \leq P_{trans}$$

где P_{trans} — номинальная мощность трансформатора (фактический предел активной мощности составляет $0,9S_N$).

3 Ограничения по мощности заряда/разряда накопителя и условие взаимного исключения:

$$0 \leq P_{ch}(t) \leq u(t) \cdot P_{conv}$$

$$0 \leq P_{dis}(t) \leq (1 - u(t)) \cdot P_{conv}$$

где $u(t) \in \{0, 1\}$ — индикатор состояния заряда/разряда.

4 Ограничение по последовательному изменению состояния заряда (SOC):

$$SOC(t) = SOC(t - 1) + \eta_{ch} P_{ch} \Delta t - \frac{P_{dis}(t)}{\eta_{dis}}$$

где $\eta_{ch} = \eta_{dis} = 0,95$, $\Delta t = 0,25$ часа (15 минут).

5 Ограничение по допустимому диапазону SOC:

$$SOC_{min} \leq SOC(t) \leq SOC_{max}$$

В данной работе приняты $SOC_{min} = 0,1$ и $SOC_{max} = 0,9$, что имитирует защиту от перезаряда и глубокого разряда, реализуемую системой управления батареями.

В настоящей работе для фокусировки на макроскопической взаимосвязи между конфигурацией ёмкости и экономическими показателями временно не учитываются температурная зависимость и долгосрочная циклическая деградация ёмкости аккумуляторных батарей. В качестве инженерного приближения введено ограничение $SOC_{min} = 0,1$ для ограничения глубины разряда, а также используется фиксированный срок службы 5 лет для пересчёта еженедельных затрат, что в определённой степени отражает консервативные ожидания по деградации. Более детальная электрохимическая модель деградации является предметом дальнейших исследований.

2.1.4. Функция упущенной выгоды

Функция упущенной выгоды L отражает потери зарядной станции из-за недостаточной мощности в периоды пиковых нагрузок, приводящей к оттоку пользователей. При отсутствии накопителей энергии общим методом оптимизации мощности зарядных станций является построение модели очередей и рациональная настройка зарядного оборудования [18]. В настоящей работе при конфигурировании систем накопления энергии зарядной станции в качестве функции упущенной выгоды принимается объём электроэнергии, который станция не может предоставить пользователям электромобилей из-за недостаточной мощности электроснабжения:

$$L = \sum_{m=1}^M e_{serve} (P_n - (P_{net} + P_{conv}))$$

где M — время, в течение которого зарядная нагрузка превышает мощность электрозаправки; e_{serve} — цена услуги зарядки, Юань/(МВт·ч).

Величина функции упущенной выгоды служит индикатором адекватности выбранной конфигурации мощности трансформатора и накопителя энергии станции. Если упущенная выгода слишком велика, требуется скорректировать мощность трансформатора или ёмкость накопителя энергии, оптимизируя конфигурацию по критерию максимума чистого дохода.

2.2. Оптимизация мощности трансформатора и накопителя энергии

Анализ характеристик нагрузки показывает, что нагрузка зарядной станции сильно колеблется во времени, а продолжительность пиков невелика. Установка трансформатора избыточной мощности приводит к низкому коэффициенту его использования; вместе с тем маломощный трансформатор ограничивает скорость зарядки, что особенно критично для пользователей в часы пик и снижает привлекательность станции. Это обуславливает необходимость оптимизации параметров мощности станции. Применение систем накопления энергии позволяет снизить требуемую мощность трансформатора, повысить эффективность работы станции и, как следствие, увеличить её чистую прибыль.

Доход зарядной станции формируется от продажи электроэнергии потребителям, тогда как, помимо капитальных вложений, основные текущие затраты ЭЗС связаны с закупкой электроэнергии из энергосистемы. Стоимость закупки складывается из фиксированной платы за заявленную мощность трансформатора и платы за фактическое потребление по счётчику.

На основе теории затрат и выгод в работе предлагается определить функцию упущенной выгоды и учесть её в модели оптимизации. Модель представлена уравнением:

$$F = \max\{I - C - L - E\}$$

здесь I — недельный доход зарядной станции; C — недельные эксплуатационные расходы; L — функция упущенной выгоды; E — стоимость системы накопителя энергии, то есть инвестиции в силовое электронное оборудование (накопитель и преобразователь мощности), пропорциональные ёмкости накопителя.

2.2.1. Недельный доход зарядной станции

В Китае принят метод расчёта платы за услугу зарядки за единицу электроэнергии. Еженедельный доход I станции формируется главным образом от продажи электроэнергии пользователям электромобилей и рассчитывается как произведение объёма потребления на тариф зарядки:

$$I = \sum_{n=1}^N P_{load}(n) \cdot (e_{sell_day} + e_{serve}) + \sum_{n=1}^N P_{load}(n) \cdot (e_{sell_night} + e_{serve})$$

В формуле: N — число еженедельных выборок; $P_{load}(n)$ — мощность нагрузки зарядной станции в n -й момент выборки, МВт; e_{sell_day} — цена электроэнергии на станции в течение дня, Юань/(МВт·ч); e_{sell_night} — цена электроэнергии в течение ночи, Юань/(МВт·ч).

2.2.2. Недельные эксплуатационные расходы зарядной станции

Недельные эксплуатационные расходы зарядной станции включают: C_1 — затраты на покупку электроэнергии из сети; C_2 — недельную амортизацию зарядных свай; C_3 — недельную амортизацию трансформатора; C_4 — плату за заявленную мощность трансформатора за неделю:

$$C_1 = \sum_{n=1}^N P_{net}(n) \cdot e_{buy}(n) \cdot \Delta t$$

$$C_2 = C_{pole} \times n_{pole} / T_{pole}, \quad C_3 = C_{trans} / T_{trans}, \quad C_4 = C_{trans} \times A.$$

где $P_{net}(n)$ — фактическая мощность, потребляемая из сети в n -й момент; $e_{buy}(n)$ — тариф на покупку электроэнергии (дневной 1200 юань/(МВт·ч), ночной 400 юань/(МВт·ч)); $\Delta t = 0,25$ часа; C_{pole} — стоимость одной зарядной сваи; n_{pole} — их количество; T_{pole} — срок службы зарядной сваи; C_{trans} — стоимость трансформатора; T_{trans} — срок службы трансформатора; A — недельная ставка платы за заявленную мощность трансформатора (5,75 Юаня/кВА).

2.2.3. Стоимость системы накопителя энергии

Система накопителя энергии включает электронные компоненты - устройство накопления и преобразователь мощности:

$$E = E_1 + E_2$$

Недельная стоимость накопителя энергии:

$$E_1 = W \times C_{capacity} / T_w$$

Недельная стоимость преобразователя мощности:

$$E_2 = P_{conv} \times C_p / T_{P_{conv}}$$

здесь W_{max} — ёмкость накопителя энергии; $C_{capacity}$ — цена единицы ёмкости накопителя, Юань/(МВт·ч); T_w — срок службы накопителя; P_{conv} — мощность преобразователя; C_p — цена преобразователя мощности, Юань/МВт; $T_{P_{conv}}$ — срок службы преобразователя.

Величина недельного дохода станции определяется главным образом суммарным объёмом зарядки за неделю, недельными потерями и максимальной потребляемой мощностью, обусловленной выбором мощности трансформатора и ёмкости накопителя. Увеличение мощности трансформатора и ёмкости накопителя снижает отток пользователей, но одновременно повышает инвестиционные затраты, поэтому заявленную мощность необходимо оптимизировать с учётом характеристик пользовательского спроса станции.

Представленная оптимизационная модель относится к классу задач линейного программирования (ЛП) и решается с использованием решателя *linprog* (метод внутренней точки) в среде MATLAB R2022b. Переменные решения включают $P_{net}(t)$, $P_{ch}(t)$, $P_{dis}(t)$ и состояние заряда/разряда $u(t)$ для $N = 672$ временных точек (шаг 15 минут), что составляет 2688 переменных. Размерность матрицы ограничений — около 2016 строк. Допустимая погрешность решения задана равной 10^{-6} , максимальное число итераций — 10^4 . Время однократного решения оптимизационной задачи составляет приблизительно 0,3 секунды.

Основные результаты

Уровень использования мощности ЭЗС, как правило, низок. Оснащение зарядных станций системами накопления энергии позволяет снизить требуемую мощность трансформатора, повысить коэффициент использования мощности и сократить затраты на электроэнергию. В качестве примера рассмотрена станция с недельной потребностью в энергии 100 МВт·ч, оснащённая 30 зарядными сваями номинальной мощностью 120 кВт каждая.



Рисунок 3 - Потребляемая мощность электромобилями за неделю
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.172.16.3>

Типичный недельный график нагрузки рассматриваемой ЭЗС соответствует представленному на рисунке 2: пиковая мощность зарядной нагрузки за неделю достигает 3,6997 МВт, нагрузка сильно колеблется, а минимальные значения сохраняются в течение продолжительного времени. Обработка данных о потребляемой мощности станции даёт изменение нагрузки в течение недели, показанное на рисунке 3.

Цена быстрой зарядки на станции составляет $C_{Day} = 1700$ юаней/(МВт·ч) днём и $C_{Night} = 900$ юаней/(МВт·ч) ночью, плата за услугу зарядки - $C_{Serve} = 500$ Юаней/(МВт·ч). Параметры зарядной станции и системы накопителя энергии приведены в таблице 1.

Таблица 1 - Параметры зарядной станции и системы накопителя энергии

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.172.16.4>

Наименование	Цена	Срок службы, лет
Зарядная свая	50 000 Юаней/шт.	10
Устройство накопителя энергии	672 000 Юаней/(МВт·ч)	2
Преобразователь мощности	110 000 Юаней/МВт	10
Трансформатор, 1000 кВА	60 000 Юаней	20
Трансформатор, 1250 кВА	90 000 Юаней	20
Трансформатор, 1600 кВА	120 000 Юаней	20
Трансформатор, 2000 кВА	150 000 Юаней	20
Трансформатор, 2500 кВА	180 000 Юаней	20
Трансформатор, 3450 кВА	200 000 Юаней	20
Трансформатор, 4000 кВА	250 000 Юаней	20
Плата за заявленную мощность трансформатора	5,75 Юаня/кВА в неделю	-

3.1. Станция без накопителя энергии

Класс мощности трансформатора стандартизирован; максимальная недельная нагрузка зарядной станции составляет 3,6997 МВт.

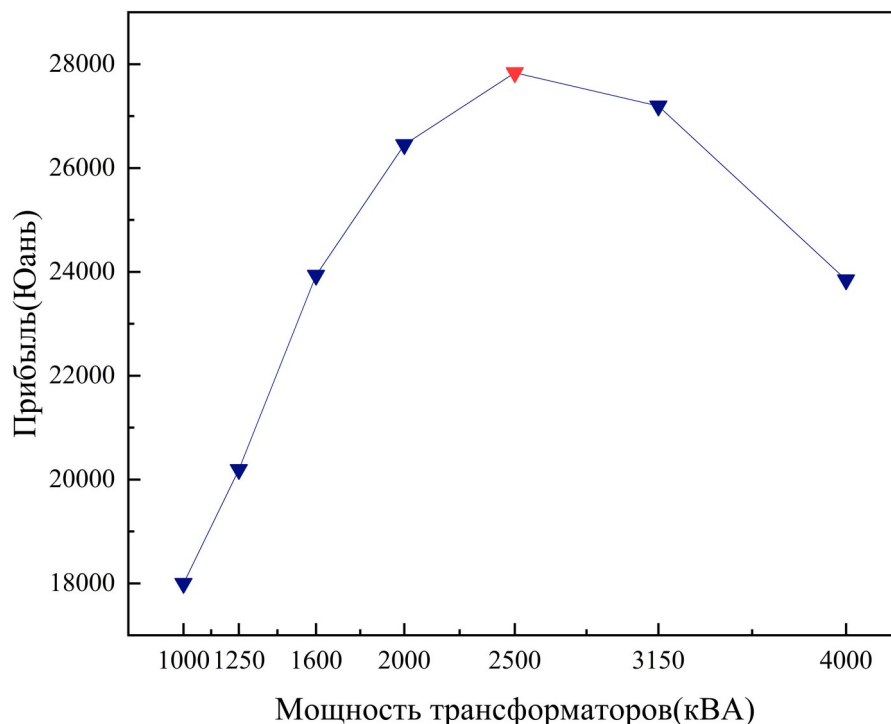


Рисунок 4 - Диаграмма зависимости мощности трансформатора от прибыли
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.172.16.5>

Примечание: без накопителя энергии

Рассмотрен выбор трансформаторов следующих номинальных мощностей из ряда, принятого в китайских национальных стандартах: $S = 1000; 1250; 1600; 2000; 2500; 3150; 4000$ кВА. Согласно правилам электроэнергетики Китая, номинальный коэффициент мощности трансформатора принят равным 0,9. Результаты расчётов показаны на рисунке 4: оптимальная мощность трансформатора зарядной станции составляет 2500 кВА, а наибольшая чистая прибыль — 27 835,63 Юаня.

3.2. Станция с накопителем энергии

Рациональный выбор ёмкости накопителя энергии позволяет не только снизить требуемую заявленную мощность трансформатора, но и увеличить максимальную зарядную мощность станции, компенсируя упущенную выгоду. Рассмотрены те же уровни мощности трансформаторов, что и для станции без накопителя. Результаты оптимизации показаны на рисунке 5.

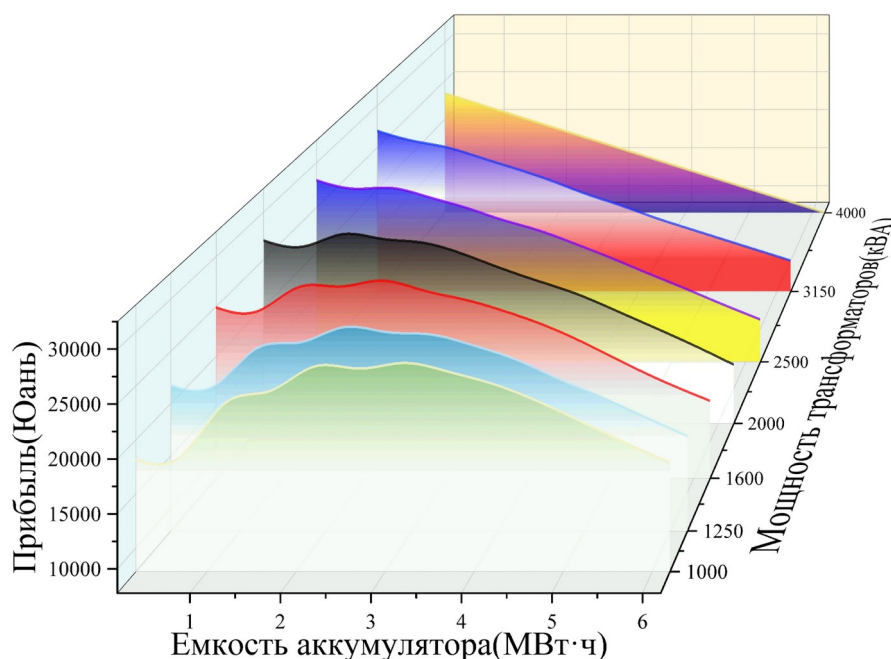


Рисунок 5 - Диаграмма зависимости мощности трансформатора, ёмкости накопителя и прибыли
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.172.16.6>

Примечание: с накопителем энергии

Из рисунка 5 видно, что чистая прибыль станции изменяется в зависимости от сочетания мощности трансформатора и ёмкости накопителя энергии. При мощности трансформатора менее 3150 кВА прибыль станции по мере роста ёмкости накопителя сначала увеличивается, а затем снижается, причём каждому классу мощности трансформатора соответствует своя точка максимума. При мощности трансформатора свыше 3150 кВА рост ёмкости накопителя приводит к монотонному снижению прибыли, то есть при достаточно большой мощности трансформатора установка накопителя энергии становится экономически нецелесообразной.

3.3. Обсуждение робастности результатов

Приведённая выше оптимизация основана на детерминированном типовом недельном профиле нагрузки. Для учёта случайных колебаний спроса в работе выполнен анализ чувствительности с использованием коэффициента масштабирования нагрузки $k \in \{0,85; 0,90; 1,10; 1,15\}$. Результаты показывают, что при отклонении нагрузки в пределах $\pm 15\%$ оптимальный класс мощности трансформатора (2000 кВА) остаётся неизменным. Лишь при увеличении нагрузки более чем на 12% рекомендуется увеличить оптимальную ёмкость накопителя с 1,2 МВт·ч до 1,5 МВт·ч. Таким образом, полученная оптимальная конфигурация демонстрирует хорошую устойчивость в диапазоне разумных отклонений нагрузки.

Обсуждение

На рисунке 6 показана максимальная прибыль, соответствующая различным мощностям трансформатора.

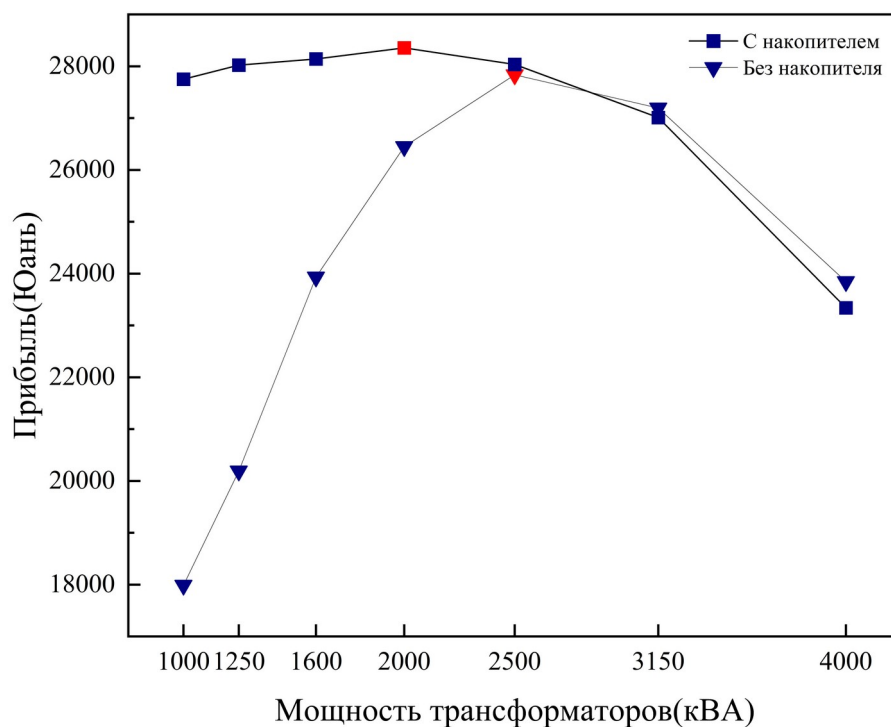


Рисунок 6 - Сравнение мощности трансформатора и прибыли

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.172.16.7>

Из рисунка 6 видно, что чистая прибыль станции с накопителем энергии значительно превышает прибыль станции без него. По мере увеличения мощности трансформатора прибыль станции возрастает, однако при превышении мощности 2000 кВА она начинает снижаться, что подтверждает существование оптимального сочетания мощности трансформатора и ёмкости накопителя, обеспечивающего максимальную выгоду.

Для оценки влияния изменений ключевых параметров на результаты оптимизации выполнен однофакторный анализ чувствительности по двум параметрам: удельной стоимости накопителя энергии и соотношению пикового и ночного тарифов. Цена накопителя варьировалась на уровнях 70%, 100% и 130% от базового значения (снижение на 30%, базовый уровень, повышение на 30%); соотношение пикового и ночного тарифов варьировалось на уровнях 80%, 100% и 120% от базового значения (уменьшение разницы на 20%, базовый уровень, увеличение разницы на 20%). Результаты анализа представлены в таблице 2.

Таблица 2 - Результаты анализа чувствительности к ключевым параметрам

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.172.16.8>

Параметр	Диапазон изменения	S (кВА)	W (МВт·ч)	F (юань)
Базовый	—	2000	1,2	28 354
Цена накопителя – 30%	Снижение на 30%	2000	1,5	29 126
Цена накопителя +30%	Повышение на 30%	2000	0,8	27 452
Соотношение пик/ночь +20%	Увеличение разницы на 20%	2000	1,4	29 887
Соотношение пик/ночь –20%	Уменьшение разницы на 20%	2000	0,6	26 331

Из таблицы 2 видно, что во всех рассмотренных сценариях оптимальная мощность трансформатора остаётся неизменной — 2000 кВА. Это подтверждает, что выбор трансформатора преимущественно определяется пиковой нагрузкой (3,6997 МВт) и обладает высокой инженерной робастностью к колебаниям экономических параметров. Оптимальная ёмкость накопителя, напротив, существенно изменяется в зависимости от параметров: при снижении цены накопителя на 30% оптимальная ёмкость увеличивается с 1,2 до 1,5 МВт·ч, а недельная прибыль возрастает на 2,7%; при повышении цены накопителя на 30% оптимальная ёмкость снижается до 0,8 МВт·ч, а прибыль уменьшается на 3,2%. При увеличении соотношения пикового и ночного тарифов на 20% оптимальная ёмкость возрастает до 1,4 МВт·ч, а прибыль увеличивается на 5,4%; при уменьшении соотношения на 20% ёмкость снижается до 0,6 МВт·ч, а прибыль падает на 7,1%. Полученные результаты показывают, что в условиях продолжающегося снижения стоимости систем накопления энергии и постепенного увеличения разницы между пиковыми и ночными тарифами рациональная установка накопителя большей ёмкости позволяет значительно повысить экономическую эффективность зарядной станции.

Таким образом, правильно настроенная система накопителя энергии способна дополнить мощность зарядной станции, сокращая потери пользователей из-за нехватки мощности и значительно увеличивая прибыль. Проведённый анализ показывает, что оптимальная мощность трансформатора в рассмотренном примере составляет 2000 кВА, что меньше значения, полученного без учёта накопителя энергии. Оптимальная ёмкость накопителя составляет 1,2 МВт·ч, а мощность преобразователя выбрана равной 0,6 МВт. Максимальная недельная прибыль станции, соответствующая наилучшей комбинации, составляет 28 353,54 Юаня.

Следует отметить, что использованные в расчётном примере тарифы на электроэнергию, удельные стоимости оборудования и ставки платы за заявленную мощность трансформатора соответствуют действующим условиям города Ланьжоу (Китай). Несмотря на региональные различия в конкретных числовых значениях, предложенная экономико-математическая модель является полностью универсальной. Для других стран и регионов достаточно подставить местные значения пиковых и ночных тарифов, ставок за трансформаторную мощность и стоимости оборудования, чтобы непосредственно получить оптимальную конфигурацию, адаптированную к местным рыночным условиям. Таким образом, предлагаемый подход может служить методологической основой для инвестиционных решений при проектировании зарядных станций в различных институциональных условиях.

Заключение

В работе проанализированы характеристики нагрузки зарядных станций для различных групп пользователей; в качестве критерия оптимизации принята недельная чистая прибыль ЭЗС, для чего разработана модель оптимизации мощности с учётом функции упущенной выгоды. Определена оптимальная конфигурация мощности станции как без накопителя энергии, так и с его применением. Результаты примера расчёта показывают, что зарядные станции разных масштабов требуют разной ёмкости накопителя. Только за счёт рациональной оптимизации ёмкости накопителя энергии можно повысить экономичность эксплуатации ЭЗС при одновременном выравнивании колебаний нагрузки.

Финансирование

Исследование выполнено при финансовой поддержке Китайского государственного совета по стипендиальному фонду.

Конфликт интересов

Не указан.

Рецензия

Все статьи проходят рецензирование. Но рецензент или автор статьи предпочли не публиковать рецензию к этой статье в открытом доступе. Рецензия может быть предоставлена компетентным органам по запросу.

Funding

This research was financially supported by the China Scholarship Council (CSC).

Conflict of Interest

None declared.

Review

All articles are peer-reviewed. But the reviewer or the author of the article chose not to publish a review of this article in the public domain. The review can be provided to the competent authorities upon request.

Список литературы / References

1. Acharige S.S.G. Review of Electric Vehicle Charging Technologies, Configurations, and Architectures / S.S.G. Acharige, M.E. Acharige, M.T. Arif. // 2022 IEEE International Conference on Power Systems Technology (POWERCON); — Kuala Lumpur: IEEE, 2022. — P. 1–6. doi: 10.1109/ACCESS.2023.3267164
2. Чжан К. Анализ спроса на зарядку электромобилей в Ланьчжоу (Китай) / К. Чжан, Н.В. Коровкин, М. Тан // Электричество. — 2024. — № 9. — С. 52–59. — DOI: 10.24160/0013-5380-2024-9-52-59
3. Ali A. Latest energy storage trends in multi-energy standalone electric vehicle charging stations: A comprehensive study / A. Ali, R. Shakoar, A. Raheem // Energies. — 2022. — № 13. — P. 4727. — DOI: 10.3390/en15134727
4. Беляев Н.А. Математическое описание влияния управляемых сетевых устройств на режим электроэнергетических систем / Н.А. Беляев, Н.В. Коровкин, В.С. Чудный // Электричество. — 2014. — № 2. — С. 18–24.
5. Беляев Н.А. Многокритериальная оптимизация при планировании развития энергосистем / Н.А. Беляев, Н.В. Коровкин, В.С. Чудный // Энергетика. — 2021. — № 2. — С. 3–11.
6. Elgamal M. Day-ahead complex power scheduling in a reconfigurable hybrid-energy islanded microgrid with responsive demand considering uncertainty and different load models / M. Elgamal, A. Elmitwally, N. Korovkin et al. // Applied Energy. — 2022. — № 309. — P. 118416. — DOI: 10.1016/j.apenergy.2022.118416
7. 葛文捷.电动汽车充电站经济运行分析 / 葛文捷, 黄梅, 张维戈 // 电工技术学报. — 2013. — 第 28 卷. — 第 2 期. — 第 15–21 页. — DOI: 10.3969/j.issn.1000-6753.2013.02.002.
8. 张良.采用两阶段优化模型的电动汽车充电站内有序充电策略 / 张良, 严正, 冯冬涵, 许少伦, 李乃湖, 景雷 // 电网技术. — 2014. — 第 38 卷. — 第 4 期. — 第 967–973 页. — DOI: 10.13335/j.1000-3673.pst.2014.04.022.
9. 陈静鹏.基于改进贪心算法的大规模电动汽车充电行为优化 / 陈静鹏, 朴龙健, 艾芊 // 电力自动化设备. — 2016. — 第 36 卷. — 第 10 期. — 第 38–44 页. — DOI: 10.16081/j.issn.1006-6047.2016.10.006.
10. Masoum M.S. Hybrid optimal online-overnight charging coordination of plug-in electric vehicles in smart grid / M.S. Masoum, S. Nabavi // Journal of Power Sources. — 2016. — № 330. — P. 7–17. — DOI: 10.1016/j.jpowsour.2016.08.124
11. 吴甲武.基于改进鸡群算法的电动汽车有序充电策略研究 / 吴甲武, 邱晓燕, 潘胤吉, 肖建康 // 电测与仪表. — 2019. — 第 56 卷. — 第 9 期. — 第 97–103 页. — DOI: 10.19753/j.issn1001-1390.2019.09.017.
12. 孙宇乐.考虑充电电池组循环利用的集中充电站容量配置 / 孙宇乐, 刘继春, 刘红超, 张珂, 褚正超, 刘俊勇 // 电测与仪表. — 2016. — 第 53 卷. — 第 10 期. — 第 80–86 页. — DOI: 10.3969/j.issn1001-1390.2016.10.014.
13. 熊雄.电力需求侧大规模储能系统经济性评估 / 熊雄, 杨仁刚, 叶林, 李建林 // 电工技术学报. — 2013. — 第 28 卷. — 第 9 期. — 第 224–230 页. — DOI: 10.3969/j.issn.1000-6753.2013.09.027.
14. Hussain A. Optimal sizing of battery energy storage system in a fast EV charging station considering power outages / A. Hussain, V. Bui, H. Kim // IEEE Transactions on Transportation Electrification. — 2020. — № 2. — P. 453–463. — DOI: 10.1109/TTE.2020.2972716
15. 吕跃春.电动汽车充储放电站储能系统容量配置方法 / 吕跃春, 汪会财, 李志勇, 刘永相 // 电力系统及其自动化学报. — 2017. — 第 29 卷. — 第 11 期. — 第 133–137 页. — DOI: 10.3969/j.issn.1003-8930.2017.11.022.
16. Hannan M.A. A review of lithium-ion battery state of charge estimation and management system in electric vehicle applications: Challenges and recommendations / M.A. Hannan, M.S.H. Lipu, A. Hussain // Renewable and Sustainable Energy Reviews. — 2017. — № 78. — P. 834–854. — DOI: 10.1016/j.rser.2017.04.062
17. 方超明.基于排队理论的储能式快充站容量优化配置 / 方超明, 张宇, 王育飞, 刘耀辉 // 现代电力. — 2017. — 第 34 卷. — 第 2 期. — 第 62–66 页. — DOI: 10.3969/j.issn.1007-2322.2017.02.010.
18. 杨校辉.一种基于综合能源优化调配的充电站运营管理系统研究 / 杨校辉, 邱俊宏, 张娟, 尹新涛, 王艳 // 电力系统保护与控制. — 2021. — 第 49 卷. — 第 5 期. — 第 173–179 页. — DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.200509.

Список литературы на английском языке / References in English

1. Acharige S.S.G. Review of Electric Vehicle Charging Technologies, Configurations, and Architectures / S.S.G. Acharige, M.E. Acharige, M.T. Arif. // 2022 IEEE International Conference on Power Systems Technology (POWERCON); — Kuala Lumpur: IEEE, 2022. — P. 1–6. doi: 10.1109/ACCESS.2023.3267164
2. Chzhan K. Analiz sprosa na zaryadku e'lektromobilej v Lan'chzhou (Kitaj) [Analysis of EV charging demand in Lanzhou (China)] / K. Chzhan, N.V. Korovkin, M. Tan // Electricity. — 2024. — № 9. — P. 52–59. — DOI: 10.24160/0013-5380-2024-9-52-59 [in Russian]
3. Ali A. Latest energy storage trends in multi-energy standalone electric vehicle charging stations: A comprehensive study / A. Ali, R. Shakoar, A. Raheem // Energies. — 2022. — № 13. — P. 4727. — DOI: 10.3390/en15134727
4. Belyaev N.A. Matematicheskoe opisaniye vliyaniya upravlyaemy'x setevy'x ustrojstv na rezhim e'lektroe'nergeticheskix sistem [Mathematical description of the influence of controlled grid devices on power system modes] / N.A. Belyaev, N.V. Korovkin, V.S. Chudny'j // Electricity. — 2014. — № 2. — P. 18–24. [in Russian]
5. Belyaev N.A. Mnogokriterial'naya optimizatsiya pri planirovanii razvitiya e'nergosistem [Multi-criteria optimization for power system development planning] / N.A. Belyaev, N.V. Korovkin, V.S. Chudny'j // Energetics. — 2021. — № 2. — P. 3–11. [in Russian]



6. Elgamal M. Day-ahead complex power scheduling in a reconfigurable hybrid-energy islanded microgrid with responsive demand considering uncertainty and different load models / M. Elgamal, A. Elmitwally, N. Korovkin et al. // *Applied Energy*. — 2022. — № 309. — P. 118416. — DOI: 10.1016/j.apenergy.2022.118416
7. Ge Wenjie. Diandong qiche chongdianzhan jingji yunxing fenxi [Economic operation analysis of electric vehicle charging stations] / Ge Wenjie, Huang Mei, Zhang Weige // *Diandong Jishu Xuebao* [Transactions of China Electrotechnical Society]. — 2013. — Vol. 28. — № 2. — P. 15–21. — DOI: 10.3969/j.issn.1000-6753.2013.02.002. [in Chinese]
8. Zhang Liang. Caiyong liang jieduan youhua moxing de diandong qiche chongdianzhan nei youxu chongdian celüe [Two-Stage Optimization Model Based Coordinated Charging for EV Charging Station] / Zhang Liang, Yan Zheng, Feng Donghan [et al.] // *Dianwang Jishu* [Power System Technology]. — 2014. — Vol. 38. — № 4. — P. 967–973. — DOI: 10.13335/j.1000-3673.pst.2014.04.022. [in Chinese]
9. Chen Jingpeng. Jiyu gaijin tanxin suanfa de daguimo diandong qiche chongdian xingwei youhua [Optimization of large-scale EV charging behavior based on improved greedy algorithm] / Chen Jingpeng, Piao Longjian, Ai Qian // *Dianli Zidonghua Shebei* [Electric Power Automation Equipment]. — 2016. — Vol. 36. — № 10. — P. 38–44. — DOI: 10.16081/j.issn.1006-6047.2016.10.006. [in Chinese]
10. Masoum M.S. Hybrid optimal online-overnight charging coordination of plug-in electric vehicles in smart grid / M.S. Masoum, S. Nabavi // *Journal of Power Sources*. — 2016. — № 330. — P. 7–17. — DOI: 10.1016/j.jpowsour.2016.08.124
11. Wu Jiawu. Jiyu gaijin jiqun suanfa de diandong qiche youxu chongdian celüe yanjiu [Research on EV ordered charging strategy based on improved chicken swarm algorithm] / Wu Jiawu, Qiu Xiaoyan, Pan Yinji [et al.] // *Diance Yu Yibiao* [Electrical Measurement & Instrumentation]. — 2019. — Vol. 56. — № 9. — P. 97–103. — DOI: 10.19753/j.issn1001-1390.2019.09.017. [in Chinese]
12. Sun Yulele. Kaolü chongdian dianchizu xunhuan liyong de jizhong chongdianzhan rongliang peizhi [Capacity configuration of centralized charging stations considering secondary battery utilization] / Sun Yulele, Liu Jichun, Liu Hongchao [et al.] // *Diance Yu Yibiao* [Electrical Measurement & Instrumentation]. — 2016. — Vol. 53. — № 10. — P. 80–86. — DOI: 10.3969/j.issn1001-1390.2016.10.014. [in Chinese]
13. Xiong Xiong. Dianli xuqiu ce daguimo chuxu xitong jingjixing pinggu [Economic evaluation of large-scale demand-side energy storage systems] / Xiong Xiong, Yang Rengang, Ye Lin [et al.] // *Diandong Jishu Xuebao* [Transactions of China Electrotechnical Society]. — 2013. — Vol. 28. — № 9. — P. 224–230. — DOI: 10.3969/j.issn.1000-6753.2013.09.027. [in Chinese]
14. Hussain A. Optimal sizing of battery energy storage system in a fast EV charging station considering power outages / A. Hussain, V. Bui, H. Kim // *IEEE Transactions on Transportation Electrification*. — 2020. — № 2. — P. 453–463. — DOI: 10.1109/TTE.2020.2972716
15. Lyu Yuechun. Diandong qiche chong-chu-fang dianzhan chuxu xitong rongliang peizhi fangfa [Capacity configuration method of energy storage system for charging station with EV batteries] / Lyu Yuechun, Wang Huicai, Li Zhiyong [et al.] // *Dianli Xitong Ji Qi Zidonghua Xuebao* [Power System and Clean Energy]. — 2017. — Vol. 29. — № 11. — P. 133–137. — DOI: 10.3969/j.issn.1003-8930.2017.11.022. [in Chinese]
16. Hannan M.A. A review of lithium-ion battery state of charge estimation and management system in electric vehicle applications: Challenges and recommendations / M.A. Hannan, M.S.H. Lipu, A. Hussain // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. — 2017. — № 78. — P. 834–854. — DOI: 10.1016/j.rser.2017.04.062
17. Fang Chaoming. Jiyu paidui lilun de chuxushi kuai chongzhan rongliang youhua peizhi [Optimal capacity configuration of fast charging stations with energy storage based on queuing theory] / Fang Chaoming, Zhang Yu, Wang Yufei [et al.] // *Xiandai Dianli* [Modern Electric Power]. — 2017. — Vol. 34. — № 2. — P. 62–66. — DOI: 10.3969/j.issn.1007-2322.2017.02.010. [in Chinese]
18. Yang Xiaohui. Yi zhong jiyu zonghe nengyuan youhua tiaopei de chongdianzhan yunying guanli xitong yanjiu [Research on charging station operation management system based on integrated energy distribution optimization] / Yang Xiaohui, Qiu Junhong, Zhang Juan [et al.] // *Dianli Xitong Baohu Yu Kongzhi* [Power System Protection and Control]. — 2021. — Vol. 49. — № 5. — P. 173–179. — DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.200509. [in Chinese]