УДК 519.8:[62-83:629.33 DOI: 10.31673/2412-4338.2024.038693

Бондарчук Андрій Петрович
Державний університет інформаційно-комунікаційних технологій, м. Київ
ORCID 0000-0001-5124-5102

Складанний Павло Миколайович
Київський столичний університет імені Бориса Грінченко, Київ
ORCID 0000-0002-7775-6039

Жебка Вікторія Вікторівна
Державний університет інформаційно-комунікаційних технологій, м. Київ
ORCID 0000-0003-4051-1190

Стражніков Андрій Анатолійович
Державний університет інформаційно-комунікаційних технологій, м. Київ
ORCID 0009-0000-3492-2968

ОПТИМІЗАЦІЯ СИСТЕМИ ЗАРЯДКИ ЕЛЕКТРОМОБІЛІВ НА ОСНОВІ МЕТОДІВ ДОСЛІДЖЕННЯ ОПЕРАЦІЙ

Анотація. *В умовах глобальної урбанізації та зростання популярності електромобілів виникає необхідність розробки ефективних систем зарядної інфраструктури для забезпечення сталого розвитку міських і віддалених регіонів. У статті досліджуються методи оптимізації систем зарядки електромобілів на основі дослідження операцій, що дозволяють забезпечити ефективне управління ресурсами, мінімізацію витрат та підвищення продуктивності зарядних станцій. Особлива увага приділяється розробці математичних моделей для оптимального розміщення зарядних станцій та управління процесами зарядки з урахуванням таких факторів, як попит на електроенергію, пікові навантаження та інтеграція відновлювальних джерел енергії.*

У статті проводиться аналіз сучасних наукових досліджень у галузі, які включають математичне програмування, стохастичне моделювання та алгоритми швидкої зарядки, що дозволяють мінімізувати час очікування водіїв. Представлені підходи спрямовані на поліпшення ефективності роботи зарядних станцій у міських умовах та оптимізацію використання інфраструктури в реальному часі. Окрім того, розглядаються питання прогнозування попиту на зарядні станції, що є важливим для уникнення перевантаження електромереж у пікові періоди. Результати дослідження демонструють, що інтеграція відновлювальних джерел енергії та застосування методів машинного навчання для адаптивного управління можуть значно покращити стабільність енергетичних мереж та зменшити залежність від традиційних джерел енергії.

Метою статті є розробка нових підходів до планування та управління зарядною інфраструктурою, що сприятиме екологічному транспорту, розвитку сталого міського середовища, а також ефективнішому використанню ресурсів в умовах зростаючого попиту на електромобілі.

Ключові слова: *оптимізація, електромобілі, зарядна інфраструктура, дослідження операцій, відновлювальні джерела енергії, математичне моделювання, управління енергоспоживанням, машинне навчання, міська інфраструктура, сталий розвиток.*

Bondarchuk Andrii
State University of Information and Communication Technologies, Kyiv
ORCID 0000-0001-5124-5102

Skladannyi Pavlo
Borys Grinchenko Kyiv Metropolitan University, Kyiv, Ukraine
ORCID 0000-0002-7775-6039

© Бондарчук А.П., Складанний П.М., Жебка В.В., Стражніков А.А. 2024

Zhebka Viktoriia
State University of Information and Communication Technologies, Kyiv, Ukraine
ORCID 0000-0003-4051-1190

Strazhnikov Andrii Anatoliiovych
postgraduate student
State University of Information and Communication Technologies, Kyiv
ORCID 0009-0000-3492-2968

OPTIMIZATION OF THE ELECTRIC VEHICLE CHARGING SYSTEM BASED ON OPERATIONS RESEARCH METHODS

Abstract. *In the context of global urbanization and the growing popularity of electric vehicles, there is a need to develop effective charging infrastructure systems to ensure sustainable development of urban and remote regions. The article investigates methods for optimizing electric vehicle charging systems based on operations research to ensure efficient resource management, minimize costs, and increase the productivity of charging stations. Particular attention is paid to the development of mathematical models for the optimal placement of charging stations and management of charging processes, taking into account factors such as electricity demand, peak loads, and the integration of renewable energy sources.*

The article analyzes current scientific research in the field, including mathematical programming, stochastic modeling, and fast charging algorithms that minimize driver waiting time. The presented approaches are aimed at improving the efficiency of charging stations in urban areas and optimizing the use of infrastructure in real time. In addition, the paper considers the issues of forecasting the demand for charging stations, which is important to avoid overloading the power grid during peak periods. The results of the study demonstrate that the integration of renewable energy sources and the use of machine learning methods for adaptive control can significantly improve the stability of power grids and reduce dependence on traditional energy sources.

The purpose of the article is to develop new approaches to the planning and management of charging infrastructure, which will contribute to environmentally friendly transportation, the development of a sustainable urban environment, and more efficient use of resources in the face of growing demand for electric vehicles.

Keywords: *optimization, electric vehicles, charging infrastructure, operations research, renewable energy sources, mathematical modeling, energy management, machine learning, urban infrastructure, sustainable development.*

1. Вступ.

З огляду на глобальні екологічні ініціативи та перехід до відновлювальних джерел енергії, ефективне управління зарядними мережами є критично важливим для запобігання навантаженням на електромережі та забезпечення безперебійної роботи інфраструктури.

Методи дослідження операцій дозволяють розробляти моделі для оптимізації використання ресурсів, мінімізації витрат і збільшення продуктивності системи. Вони можуть враховувати різні фактори, як от час зарядки, енергетичне споживання, розподіл потужностей, прогнозування попиту, а також вплив на енергетичні мережі. Це особливо важливо в умовах урбанізації та необхідності оптимізації існуючої інфраструктури для зниження витрат на електроенергію та забезпечення сталого розвитку міст.

2. Аналіз останніх досліджень і публікацій.

Аналіз наукових досліджень в галузі оптимізації системи зарядки електромобілів демонструє широке різноманіття підходів та методів. У роботі Гонзалеса-Феліпе та Мартінеса [1] досліджується оптимальне розташування зарядних станцій у міських умовах з використанням математичних методів програмування. Вони пропонують модель, яка враховує такі фактори, як щільність населення, транспортні потоки та попит на електромобілі, що дозволяє мінімізувати витрати на інфраструктуру та час на доступ до станцій. Дослідження

Саез-де-ла-Рубії [2] фокусується на управлінні процесом зарядки в реальному часі. Стохастичне програмування використовується для оптимізації зарядних процесів, враховуючи пікові навантаження на електромережу та попит на електроенергію, що сприяє стабільності роботи системи та запобігає перевантаженням.

Цзян Джі та Хуанг Лі [3] досліджують алгоритми швидкої зарядки та управління чергами, які мінімізують час очікування водіїв, підвищуючи ефективність зарядних станцій, що особливо важливо в умовах зростаючого попиту на швидку зарядку. Підгорний [4] досліджує особливості України щодо оптимального розміщення зарядних станцій, зокрема через використання відновлюваних джерел енергії для забезпечення стабільної роботи системи. У роботі Ковальчука [5] представлено моделі прогнозування впливу електромобілів на електромережі України, пропонуються рішення для запобігання перевантаженням шляхом оптимізації зарядки, що є важливим для розвитку національної інфраструктури.

Дослідження Хасанової та Петрова [6] зосереджується на інтеграції відновлюваних джерел енергії у системи зарядки електромобілів, що підвищує енергоефективність і зменшує залежність від традиційних джерел. Сміт та Вілсон [7] пропонують методи оптимізації енергоспоживання на станціях зарядки через комбінаторні алгоритми розподілу навантажень. Шевченко [8] проводить аналіз прогнозування попиту на зарядні станції в українських містах, що дозволяє більш точно планувати їхню кількість та розміщення. Михайленко та Корнієнко [9] досліджують динамічні моделі для оптимізації швидкої зарядки, а Драган [10] пропонує рішення для інтеграції станцій з "розумними" енергетичними мережами, що підвищує загальну стабільність та ефективність зарядної інфраструктури.

Хоча в наукових дослідженнях з оптимізації системи зарядки електромобілів досягнуто значних успіхів, існує ряд невирішених проблем, що вказує на необхідність подальших досліджень. Більшість існуючих робіт зосереджені на оптимізації розташування зарядних станцій, зменшенні часу зарядки або управлінні енергоспоживанням під час пікових навантажень. Однак, значна частина цих досліджень не враховує комплексний підхід до інтеграції відновлюваних джерел енергії в системи зарядки. Також існує недостатньо досліджень щодо використання сучасних методів машинного навчання для адаптивного управління зарядними станціями в реальному часі, що дозволило б передбачати зміни попиту та оперативно реагувати на них.

Важливою проблемою є недостатня увага до побудови масштабованих систем, які б ефективно функціонували не лише в міських умовах, а й у віддалених регіонах з обмеженим доступом до інфраструктури.

Таким чином, актуальність нашого дослідження полягає в розробці комплексних рішень для планування побудови систем зарядки електромобілів. Це дозволить забезпечити більш ефективне, безпечне та стійке функціонування інфраструктури електромобілів у майбутньому.

3. Мета і задачі дослідження.

Метою статті є розробка та аналіз методів оптимізації побудови системи зарядки електромобілів на основі дослідження операцій для підвищення ефективності використання зарядної інфраструктури. Стаття направлена на ефективні рішення для оптимального розташування зарядних станцій та управління процесом зарядки.

Завдання статті:

1. Провести огляд існуючих наукових підходів і методів оптимізації систем зарядки електромобілів, використовуючи методи дослідження операцій.
2. Розробити математичну модель для оптимізації розташування зарядних станцій з урахуванням попиту та особливостей міської інфраструктури.
3. Запропонувати методи управління процесом зарядки, що дозволяють мінімізувати час зарядки та енергетичні витрати, враховуючи пікові та непікові навантаження на електромережу.

Виконання цих завдань дозволить забезпечити більш ефективну та стійку до навантажень систему зарядки електромобілів, що сприятиме розвитку екологічного транспорту та зменшенню викидів в атмосферу.

4. Результати дослідження.

Зі стрімким зростанням популярності електромобілів, їх зарядна інфраструктура стає важливим елементом майбутньої транспортної екосистеми. Забезпечення належної кількості зарядних станцій та їх оптимальне розміщення є ключовими для підтримання розвитку електромобільного транспорту. Для ефективного планування інфраструктури необхідно враховувати різні фактори, включаючи поточне використання, прогнози щодо збільшення кількості електромобілів та можливі обмеження електромережі. Важливою метою є мінімізація витрат на інфраструктуру при максимізації зручності для користувачів.

Планування зарядних станцій у міських районах є пріоритетним завданням, оскільки саме тут зосереджена найбільша кількість електромобілів. У таких умовах зарядні станції повинні бути доступними в місцях великого скупчення людей, таких як офісні комплекси, торгові центри та житлові райони. Зарядні станції можуть бути різних рівнів – повільні, для тривалого заряджання, встановлені в паркінгах, та швидкі зарядні станції для короткочасної підзарядки, розміщені на автомагістралях та біля великих транспортних вузлів. Для підтримки стабільної роботи електромереж необхідно розробити моделі, які б враховували попит на електроенергію та забезпечували рівномірне навантаження на мережу.

Поза міськими районами, на сільській місцевості та вздовж автомагістралей, планування зарядних станцій має свої особливості. У таких зонах щільність електромобілів зазвичай менша, тому кількість зарядних станцій повинна відповідати попиту, але також враховувати майбутнє зростання кількості автомобілів. Важливим аспектом є інтеграція зарядних станцій з високовольтними лініями електропередач, оскільки це дозволяє забезпечити стабільне живлення навіть у віддалених районах. У таких умовах можливе використання відновлюваних джерел енергії, зокрема сонячних панелей або вітрових турбін, що зменшить навантаження на традиційну енергосистему.

Однією з основних проблем є прогнозування темпів поширення електромобілів, оскільки різні ринкові умови, стимули та податкові пільги можуть значно впливати на це. В одних сценаріях ріст відбуватиметься повільно, тоді як в інших країнах, де є підтримка держави та сприятливі ринкові умови, темпи поширення електромобілів можуть бути дуже швидкими. Це ускладнює планування та потребує гнучких моделей розвитку інфраструктури, які враховують невизначеності майбутнього ринку електромобілів.

Зважаючи на ці виклики, дослідження в галузі оптимізації системи зарядки електромобілів є актуальними. Розробка інтелектуальних моделей, які б поєднували стохастичні підходи до планування зарядних станцій із прогнозуванням розвитку ринку, є важливим кроком до створення надійної та ефективної інфраструктури. Інтеграція таких моделей із смарт-грид системами дозволить не лише оптимізувати розташування та використання зарядних станцій, а й забезпечить надійність електромереж при зростанні навантаження від електромобілів.

У порівнянні з іншими методами, запропоновані підходи в цій роботі мають кілька значних переваг. По-перше, запропоновано модель гнучкого планування, яка враховує невизначеність рівня поширення електромобілів. Для оцінки цих невизначеностей застосовано метод Монте-Карло, що дозволяє отримати більш точні прогнози щодо проникнення електромобілів. Додатково, використання довірчих інтервалів підвищує ефективність аналізу, зменшуючи ризики неправильного планування інфраструктури. Це дозволяє більш точно визначити потреби в кількості та розташуванні зарядних станцій, що критично важливо для забезпечення стабільної роботи мережі.

По-друге, у роботі інтегровано модель динамічного призначення трафіку з моделлю розташування, що відображає рух транспортних потоків, дозволяючи оцінити захоплений

трафік на основі оптимальних результатів планування. Ця комбінація дозволяє більш точно моделювати поведінку електромобілів в умовах міста, враховуючи час очікування на станціях та використовуючи теорію масового обслуговування. Результати моделювання дають змогу визначити оптимальну схему планування, яка не лише має високі економічні переваги, але й забезпечує соціальну ефективність та зручність користувачів.

Крім того, стаття пропонує багатоцільову модель оптимізації, де транспортні потоки використовуються для оцінки зручності зарядки та ринкового потенціалу інфраструктури. Враховано також сукупну вартість, включаючи капітальні та операційні витрати, а також втрати в розподільній мережі. Для вирішення цієї моделі застосовано алгоритм багатоцільової еволюції на основі декомпозиції, який дозволяє отримати оптимальні рішення, представлені через границю Парето. Це забезпечує гнучкість у виборі остаточного рішення, враховуючи різні пріоритети, як-от мінімізація витрат або максимізація зручності для користувачів.

Окрім цього, система зарядки, що розглядається у дослідженні, орієнтована на міську місцевість з великою щільністю електромобілів і високим рівнем використання інфраструктури. Розділення зарядних станцій на рівні 1 і 2, що використовуються на паркінгах та в житлових і комерційних районах, є ключовим компонентом. Для швидкої зарядки використовується інфраструктура рівня 3, яка забезпечує термінове підключення для автомобілів під час тривалих подорожей. Важливим доповненням є алгоритм Дейкстри, який допомагає визначати найкоротші шляхи між зарядними станціями та автомобілями, що значно підвищує ефективність використання інфраструктури в міських умовах.

Алгоритм Дейкстри:

1. $l^*(v_s)=0,\ \forall v_j \neq v_s\ \ l(v_j)=\infty.$

2. $G(v_i)=\{v_j : \exists(v_i,v_j)\};$

$\forall v_j \in G(v_i)\quad l(v_j)=\min\{l(v_j), l(v_i)+d(v_i,v_j)\},$

$l^*(v_j)=\min\limits_{v_j}\{l(v_j)\}.$

$\forall v_j \in V\ l^*(v_j)=d(v_s,v_j).$

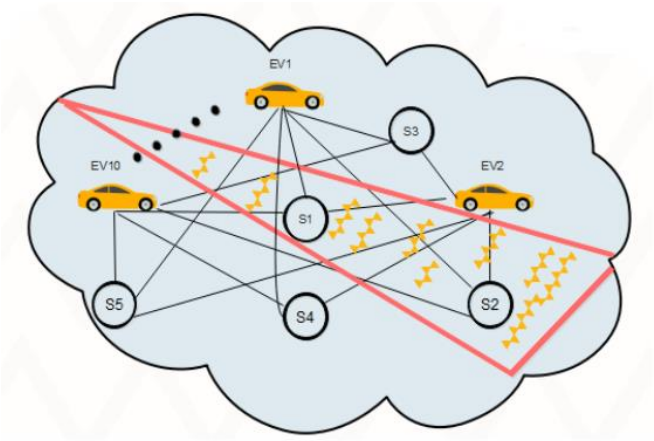

Рис. 1. Географічне представлення зарядних станцій та електромобілів

На першому етапі роботи алгоритму кожен вузол позначається міткою: стартовий вузол отримує постійну мітку, що дорівнює нулю, а всі інші вузли отримують тимчасові мітки, значення яких позначається як нескінченність. Далі на наступному кроці (що є циклічним) для всіх вузлів із тимчасовими мітками, до яких входять ребра від вузла з постійною міткою, оновлюються ці тимчасові мітки. Нове значення мітки визначається як мінімум між

попередньою міткою та сумою постійної мітки вузла, з якого виходить ребро, і відстані між цими двома вузлами. Після цього серед вузлів із тимчасовими мітками вибирається вузол із найменшою міткою, і його мітка стає постійною.

Як тільки всі вузли отримують постійні мітки, робота алгоритму завершується. Таким чином, результатом є мінімальні відстані від стартового вузла до всіх інших вузлів графа. Якщо залишаються вузли з тимчасовими мітками, кроки продовжуються, поки всі мітки не стануть постійними. Спочатку відбувається ініціалізація (перший крок), після чого виконується другий крок до моменту, коли більше не залишиться тимчасових міток.

У статті запропоновано інформаційну технологію, яка забезпечує оптимальний розподіл зарядних станцій для електромобілів. Використовуючи методи машинного навчання, система прогнозує кількість електромобілів у певній місцевості (рис. 2) та на основі цих даних, а також технічних характеристик електромобілів, визначає оптимальне розташування та кількість зарядних станцій на території України (рис. 3).

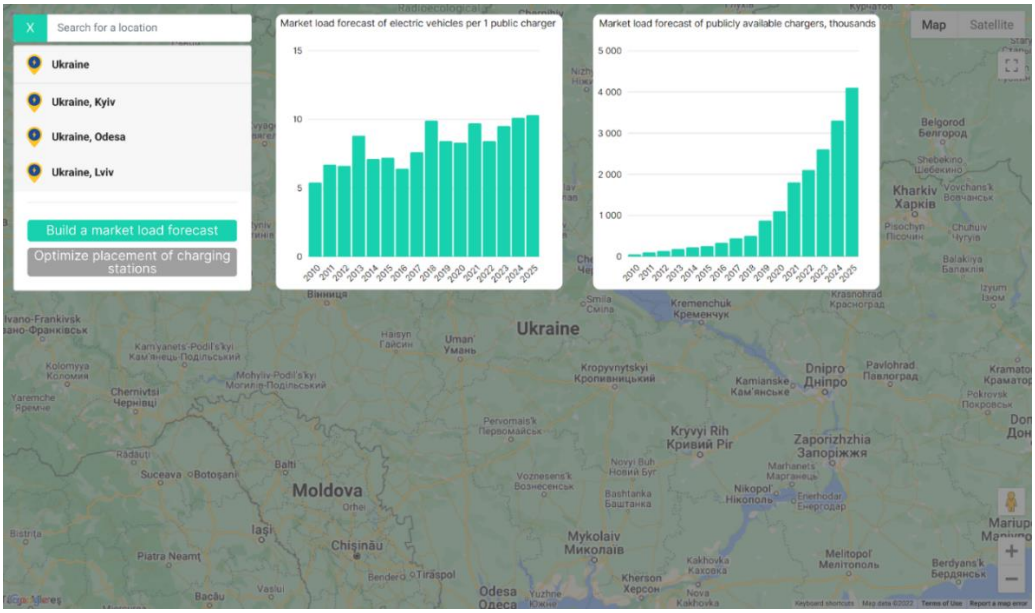

Рис. 2. Прогноз кількості електромобілів

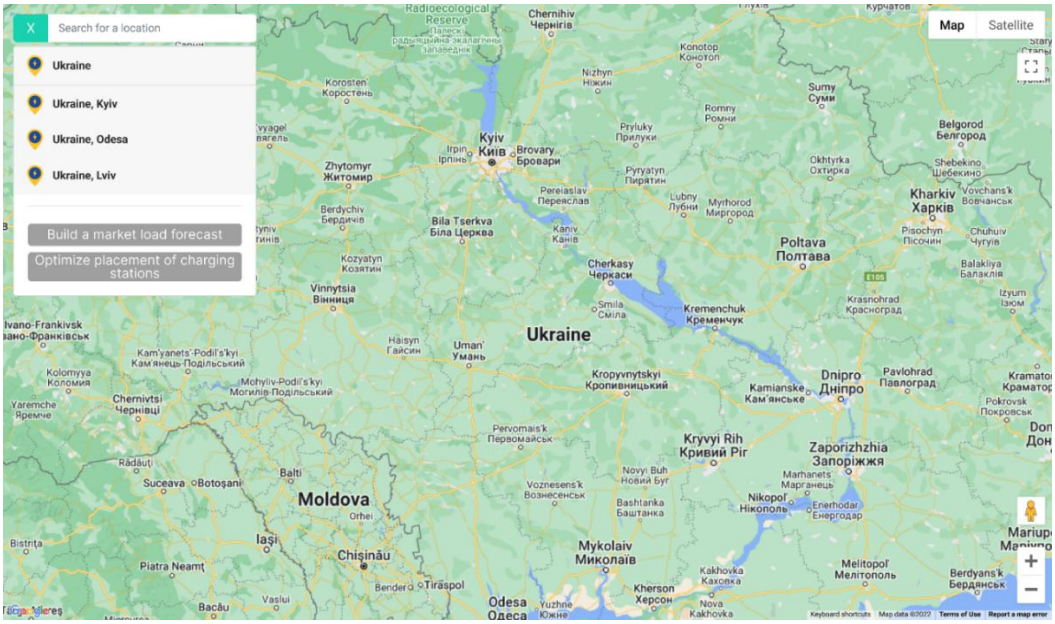

Рис. 3. Загальний вигляд програмного забезпечення

Було розроблено програмне забезпечення та веб-додаток, які сприяють оптимізації процесу як для власників зарядних станцій, так і для водіїв електромобілів. Ці інструменти допомагають водіям легко знаходити найближчі зарядні станції, що зменшує занепокоєння щодо рівня заряду та дозволяє швидко вибрати оптимальне місце для підзарядки.

Для користування цим програмним забезпеченням необхідно активувати функцію геолокації та натиснути кнопку "Заправка". Програма автоматично відобразить всі найближчі зарядні станції, включаючи маршрути до них і орієнтовний час прибуття. Водій може вибрати бажану станцію зі списку, після чого програма запропонує оптимальний маршрут для поїздки до обраної зарядної станції.

Для власників зарядних станцій програмне забезпечення пропонує функцію, яка допомагає визначити оптимальний розподіл станцій, враховуючи прогнозовану кількість електромобілів та існуючу інфраструктуру на території України. Це дозволяє ефективно розширювати мережу, вибираючи найбільш вигідні та зручні для водіїв місця для нових зарядних станцій, що також сприяє підвищенню економічної рентабельності для власників цих станцій.

Висновок

У статті представлено розробку та аналіз методів оптимізації системи зарядки електромобілів на основі дослідження операцій. Запропоновані математичні моделі та алгоритми оптимізації дозволяють ефективно вирішувати ключові завдання, пов'язані з розміщенням зарядних станцій, управлінням попитом на електроенергію та мінімізацією навантаження на електромережу. Використання методів оптимізації дозволяє підвищити енергоефективність, скоротити час очікування зарядки та оптимізувати використання відновлюваних джерел енергії в інфраструктурі зарядки електромобілів.

Запропоновані підходи можуть бути використані для покращення функціонування зарядних станцій у міських умовах, забезпечення стабільної роботи електромережі та мінімізації витрат як для користувачів електромобілів, так і для операторів зарядних мереж. Це має велике значення для зростаючого ринку електротранспорту, де важливо забезпечити баланс між попитом на зарядку та доступними ресурсами електроенергії.

Подальші дослідження можуть бути спрямовані на більш глибоке вивчення питань інтеграції систем зарядки електромобілів у "розумні" енергетичні мережі (smart grids) з використанням штучного інтелекту та машинного навчання для прогнозування попиту та автоматизації процесів управління. Крім того, перспективним напрямом є розробка систем швидкої зарядки з мінімальними втратами енергії та дослідження можливостей використання технології V2G (Vehicle-to-Grid), яка дозволяє електромобілям передавати енергію назад до мережі, що сприяє стабілізації електроспоживання.

Також важливо дослідити питання кібербезпеки та захисту даних у системах зарядки, особливо в умовах інтеграції з відновлюваними джерелами енергії та технологіями Інтернету речей (IoT). Усі ці напрямки можуть значно покращити ефективність і надійність інфраструктури зарядки електромобілів в умовах масового впровадження електротранспорту.

Список використаної літератури

1. Гонзалес-Феліпе Л., Мартінес Х. Оптимізація розміщення зарядних станцій для електромобілів у міських умовах // Журнал операційних досліджень. – 2021. – Т. 35, № 4. – С. 98-110.

2. Саез-де-ла-Рубіа Д. Управління процесом зарядки електромобілів на основі стохастичного програмування // Математичні методи управління енергетичними системами. – 2020. – Т. 27, № 2. – С. 45-58.

3. Цзян Джі, Хуанг Лі. Алгоритми швидкої зарядки та управління чергами для електромобілів // Технології «зеленого» транспорту. – 2022. – Т. 19, № 3. – С. 75-87.

4. Підгорний А. Оптимізація інфраструктури зарядки електромобілів в Україні // Науковий вісник КПІ. – 2021. – Т. 67, № 8. – С. 123-135.

5. Ковальчук С. Інтеграція електромобілів в енергетичні системи України: дослідження впливу на електромережі // Праці Інституту електродинаміки НАН України. – 2020. – Т. 32, № 1. – С. 59-72.

6. Хасанова І. М., Петров В. М. Моделювання систем зарядки електромобілів з урахуванням відновлюваних джерел енергії // Вісник енергетики. – 2022. – Т. 49, № 3. – С. 88-97.

7. Сміт Дж. Р., Вілсон А. Л. Використання методів оптимізації для зниження енергоспоживання в системах зарядки електромобілів // Журнал енергетичних досліджень. – 2019. – Т. 28, № 5. – С. 233-246.

8. Шевченко О. В. Прогнозування попиту на зарядні станції для електромобілів у великих містах України // Енергетичний менеджмент: теорія та практика. – 2021. – Т. 36, № 4. – С. 112-124.

9. Михайленко І. П., Корнієнко Д. Л. Оптимізація систем швидкої зарядки електромобілів на основі динамічних моделей // Технічні науки: сучасні підходи. – 2020. – Т. 22, № 1. – С. 97-106.

10. Драган О. А. Використання розумних енергетичних мереж у системах зарядки електромобілів // Вісник НТУ «ХПІ». – 2021. – Т. 47, № 7. – С. 130-141.

References

1. Gonzalez-Felipe L., Martinez H. Optimizing the placement of charging stations for electric vehicles in urban conditions // Journal of operational research. – 2021. – Vol. 35, No. 4. – P. 98-110.

2. Saez de la Rubia D. Management of the charging process of electric vehicles based on stochastic programming // Mathematical methods of managing energy systems. - 2020. - Vol. 27, No. 2. - P. 45-58.

3. Jiang Ji, Huang Li. Algorithms of fast charging and queue management for electric vehicles // Technologies of "green" transport. - 2022. - Vol. 19, No. 3. - P. 75-87.

4. Pidgornyi A. Optimization of the charging infrastructure of electric vehicles in Ukraine // Scientific Bulletin of KPI. - 2021. - Vol. 67, No. 8. - P. 123-135.

5. Kovalchuk S. Integration of electric vehicles in the energy systems of Ukraine: study of the impact on the power grid // Proceedings of the Institute of Electrodynamics of the National Academy of Sciences of Ukraine. – 2020. – Vol. 32, No. 1. – P. 59-72.

6. Khasanova I.M., Petrov V.M. Modeling of charging systems for electric vehicles taking into account renewable energy sources // Energy Bulletin. - 2022. - Vol. 49, No. 3. - P. 88-97.

7. Smith J.R., Wilson A.L. Using optimization methods to reduce energy consumption in electric vehicle charging systems // Journal of Energy Research. - 2019. - Vol. 28, No. 5. - P. 233-246.

8. Shevchenko O. V. Forecasting demand for charging stations for electric cars in large cities of Ukraine // Energy management: theory and practice. – 2021. – Vol. 36, No. 4. – P. 112-124.

9. Mykhaylenko I.P., Kornienko D.L. Optimization of fast charging systems of electric vehicles based on dynamic models // Technical sciences: modern approaches. - 2020. - Vol. 22, No. 1. - P. 97-106.

10. Dragan O. A. Use of smart energy networks in electric vehicle charging systems // Bulletin of NTU "KhPI". - 2021. - Vol. 47, No. 7. - P. 130-141.