

Література

1. Ezugbe E. O., Rathilal S. Membrane technologies in wastewater treatment: A review // *Membranes*. – 2020. – Vol. 10(5). – 89. DOI: <https://doi.org/10.3390/membranes10050089>

2. Padaki M., Surya Murali R., Abdullah M. S., Misdan N., Moslehyani A., Kassim M. A., Hilal N., Ismail A. F. Membrane technology enhancement in oil–water separation. A review // *Desalination*. – 2015. – Vol. 357. – P. 197–207. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.desal.2014.11.023>

УДК 629.064

ІНТЕГРАЦІЯ ФОТОЕЛЕКТРИЧНИХ СИСТЕМ У ЗАРЯДНУ ІНФРАСТРУКТУРУ ЕЛЕКТРОМОБІЛІВ НА ПАРКУВАЛЬНИХ МАЙДАНЧИКАХ

А.В. Гнатов, К.Є. Чаплигін,

*Харківський національний автомобільно-дорожній університет
kalifus76@gmail.com*

Вступ

Стрімке зростання кількості електромобілів у світі формує потребу не лише у розширенні зарядної інфраструктури, а й у підвищенні її енергетичної ефективності та екологічності. За даними IEA, у 2024 році світові продажі електромобілів перевищили 17 млн, а у 2025 році очікувалося перевищення 20 млн, тобто понад чверть усіх проданих автомобілів у світі. Це означає, що навантаження на електричні мережі з боку зарядних станцій буде постійно зростати, особливо у містах та на об'єктах із концентрованим попитом на заряджання [1].

Одним із найбільш перспективних напрямів вирішення цієї проблеми є інтеграція фотоелектричних систем у зарядну інфраструктуру електромобілів, зокрема на паркувальних майданчиках. Саме паркінги мають значний потенціал для розміщення сонячних навісів або дахових PV-систем, що дозволяє поєднати функції паркування, локального виробництва електроенергії та заряджання транспортних засобів. Європейська Комісія окремо наголошує, що автомобілі простоюють у середньому близько 23 годин на добу, а до 60–85% усіх заряджань до 2030 року очікувано відбуватиметься на приватних або напівприватних точках заряджання, зокрема біля будівель і на робочих місцях. Це робить паркувальні майданчики ключовими вузлами майбутньої енергомобільної інфраструктури [2]

Інтеграція PV-систем у зарядні комплекси на паркінгах має низку переваг: зменшення пікового навантаження на мережу, підвищення частки локального споживання відновлюваної енергії, зниження експлуатаційних

витрат, скорочення викидів CO₂ та підвищення енергетичної автономності об'єкта. Водночас така інтеграція супроводжується технічними й організаційними викликами: невідповідністю між профілем сонячної генерації та попитом на заряджання, необхідністю оптимального вибору потужності PV-системи і зарядного обладнання, потребою у системах накопичення енергії та алгоритмах керування зарядкою. Сучасні дослідження прямо показують, що без інтелектуального керування навіть високий потенціал сонячної генерації не гарантує ефективного покриття навантаження електромобілів [3].

Отже, тема інтеграції фотоелектричних систем у зарядну інфраструктуру електромобілів на паркувальних майданчиках є актуальною як з наукової, так і з практичної точки зору. Вона лежить на перетині електротранспорту, розподіленої генерації, енергоменеджменту та міської інфраструктури й відповідає сучасним вимогам декарбонізації транспорту та розвитку енергоефективних технологій [4].

Огляд літератури

У науковій літературі останніх років сформувалося кілька основних напрямів досліджень, пов'язаних з фотоелектричною підтримкою зарядної інфраструктури електромобілів.

Перший напрям охоплює оглядові та концептуальні праці, у яких розглядаються загальні переваги й обмеження поєднання PV-систем, електромобілів і систем накопичення енергії. У роботі [5] проаналізовано концепцію сонячних паркінгів як інтегрованої платформи для заряджання EV, локального виробництва електроенергії та резервної підтримки навантаження. Новіші огляди 2024–2025 років також підтверджують, що PV-powered EV charging stations розглядаються як один із ключових інструментів декарбонізації транспорту, але їхня ефективність суттєво залежить від режиму експлуатації, архітектури системи та методів керування енергопотоками.

Другий напрям стосується техніко-економічного аналізу та оцінки потенціалу сонячних паркінгів. У таких дослідженнях оцінюється, наскільки площа паркувального майданчика, конфігурація навісів, встановлена потужність PV та профілі заряджання дозволяють покривати потреби електромобілів. Дослідження для великих роздрібних парковок показали суттєвий потенціал сонячних навісів для забезпечення локального заряджання EV. Більш нові прикладні роботи також демонструють, що за сприятливих умов сонячна генерація може покривати значну частку попиту на заряджання, але результат критично залежить від часової синхронізації між прибуттям автомобілів, тривалістю стоянки та профілем інсоляції[6]

Третій напрям пов'язаний із оптимальним проектуванням і розмірністю систем. У таких роботах вирішуються задачі вибору потужності фотоелектричної установки, кількості й типу зарядних точок, ємності

батареїних накопичувачів та інколи навіть місця розташування зарядних станцій. Сучасні моделі, як правило, мають багатокритеріальний характер і мінімізують витрати, втрати потужності, мережеві перевантаження та викиди, одночасно забезпечуючи вимоги користувачів до стану заряду на момент від'їзду. Цей напрям особливо важливий для паркувальних майданчиків, де просторові, електричні та фінансові обмеження взаємопов'язані [7].

Четвертий напрям охоплює алгоритми енергоменеджменту та керованого заряджання. У цій групі досліджень увага приділяється координації зарядного навантаження з урахуванням генерації PV, тарифів, обмежень мережі, використання накопичувачів і, в окремих випадках, режимів V2G/V2B. У 2024–2025 роках з'являється все більше робіт, у яких розглядаються саме паркувальні майданчики як локальні енергетичні вузли. Наприклад, запропоновані EMS- та smart-charging-підходи дозволяють знижувати витрати оператора, підвищувати частку самоспоживання сонячної енергії та більш гнучко узгоджувати процес заряджання з реальною динамікою прибуття й від'їзду автомобілів[8].

Окремо варто виділити роботи, присвячені інтеграції PV, EV та BESS. Саме наявність систем накопичення в багатьох випадках розглядається як засіб компенсувати нестабільність сонячної генерації та згладжувати пікові навантаження на мережу. У звіті IEA PVPS та в сучасних наукових статтях підкреслюється, що поєднання PV, smart charging і BESS є одним із найбільш ефективних підходів для паркінгів, однак оптимальні параметри такої інтеграції сильно залежать від локальних тарифів, кліматичних умов, типу користувачів і режиму роботи майданчика [9].

Разом з тим аналіз літератури показує, що попри значну кількість публікацій, існує кілька невирішених питань. По-перше, багато робіт мають або суто оглядовий, або суто модельний характер і не враховують реальних особливостей експлуатації паркінгів. По-друге, часто окремо аналізуються або PV-генерація, або зарядна інфраструктура, або BESS, тоді як комплексна оцінка системи «паркінг – фотоелектрична установка – зарядні пристрої – накопичувач – мережа» зустрічається рідше. По-третє, недостатньо уваги приділено адаптації таких рішень до конкретних міських умов, локальних профілів паркування та обмежень розподільчих мереж. Саме тому подальші дослідження у цьому напрямі залишаються необхідними [10 - 14].

На основі проведеного аналізу можна зробити висновок, що інтеграція фотоелектричних систем у зарядну інфраструктуру електромобілів на паркувальних майданчиках є перспективним напрямом розвитку енергоефективної міської інфраструктури, однак потребує подальшого дослідження з позицій системного проєктування, оптимального підбору параметрів та узгодження режимів генерації і споживання енергії.

Розбудова СЗС для автомобільного паркінгу

Для проектування сонячної зарядної станції для автомобільного паркінгу в місті Харків за базовий варіант доцільно прийняти сонячну електростанцію на фотоелектричних модулях встановленою потужністю 100 кВт [15]. Орієнтовна площа розміщення фотоелектричних модулів такої станції становить близько 500 м², що відповідає параметрам невеликого автомобільного паркінгу, наприклад, біля супермаркету, офісної будівлі, університету або торговельно-розважального центру. За даними компаній, які здійснюють монтаж подібних сонячних електростанцій, гарантований строк їх експлуатації сягає 25 років, а орієнтовний період окупності становить від 2 до 4 років.

Склад основного обладнання та перелік робіт, необхідних для встановлення сонячної зарядної станції, наведено в таблиці 1. У цій же таблиці подано орієнтовну вартість обладнання і робіт станом на січень 2026 р.

Таблиця 1 – Склад основного обладнання та перелік робіт

Обладнання, кількість	Ціна за шт.	Сума
Фотоелектричні модулі		
Longi Solar LR7-72HGD-605M (Bifical, Tier1, Half-Cell, 605 Вт) - 172 шт.	93 \$	15 996 \$
Інвертор		
Huawei SUN2000-100KTL-M2 (4 MPPT, система захисту, 100 кВт) - 1 шт.	5 900 \$	5 900 \$
Кабель		
Кабель соларний кабель "Top cable" 6 мм - 800 м	1,2 \$	960 \$
Система захисту		
ОПН по змінному струму, плавкі запобіжники, автоматичний вимикач, електрощиток	500 \$	500 \$
Конектори, 1 комплект	130 \$	130 \$
Система кріплень на дах		
Система кріплень для монтажу сонячних панелей на дах - 172 шт.	30 \$	5 160 \$
Комплекс робіт по монтуванню та налаштуванню		
Монтаж системи, налаштування, перевірка, інструктаж - 1 комплект	5 100 \$	5 100 \$
Смарт-метр Huawei DTU666-H - 1 шт.	300\$	300 \$
ЗАГАЛЬНА СУМА:		34 046 \$

Особливу увагу в структурі запропонованої системи слід приділити блоку накопичення енергії та технічним характеристикам акумуляторних батарей, що входять до його складу. Для реалізації цієї функції обрано високовольтну систему зберігання енергії, спеціально розроблену для роботи в енергетичних комплексах такого типу, номінальною ємністю 61,44 кВт·год. Як технічне рішення прийнято використання чотирьох комплектів, кожен з яких містить 12 акумуляторних модулів Deye BOS-G60-61,44kW 614V 100Ah [16].

Станом на січень 2026 року вартість одного комплекту становить 472000 грн, що еквівалентно приблизно 11300 дол. США. Відповідно, сумарна вартість чотирьох комплектів із загальною ємністю 245,76 кВт·год становить 45200 дол. США.

Отже, загальна вартість запропонованої сонячної зарядної станції для автомобільного паркінгу, включаючи блок накопичення енергії, становить 79166 дол. США.

Як основу для побудови системи доцільно обрати гібридну схему сонячної електростанції, яка наведена на рисунку 1.

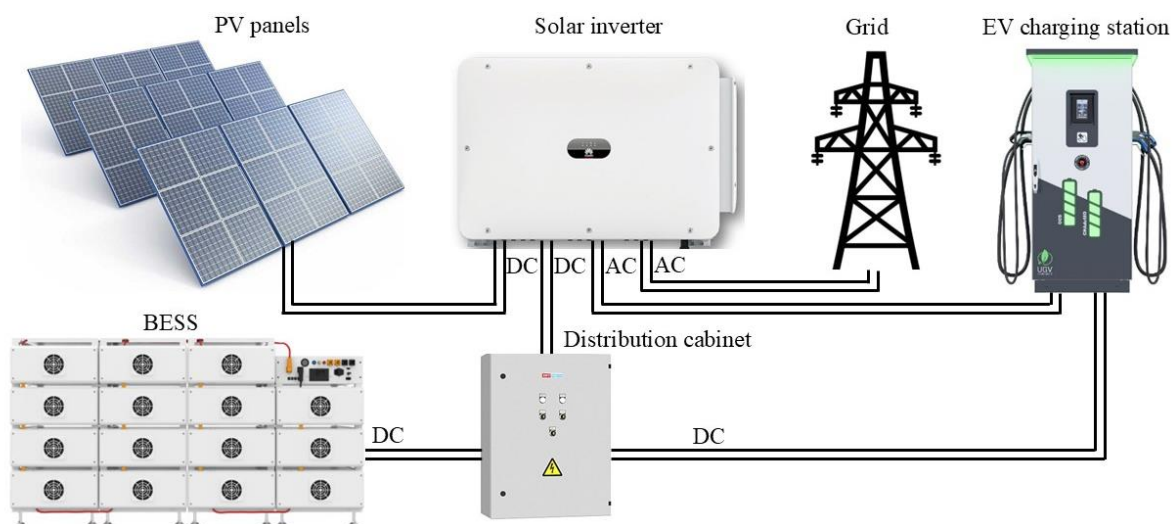


Рис. 1. Схема СЗС для автомобільного паркінгу

Як зарядну станцію для електромобілів, що буде встановлено на автомобільному паркінгу пропонується станція швидкої зарядки українського виробника UGV Chargers A189CG (160 кВт) [17].

Усереднені значення генерації електроенергії СЗС потужністю 100 кВт для м. Харкова приведені на рис 2.

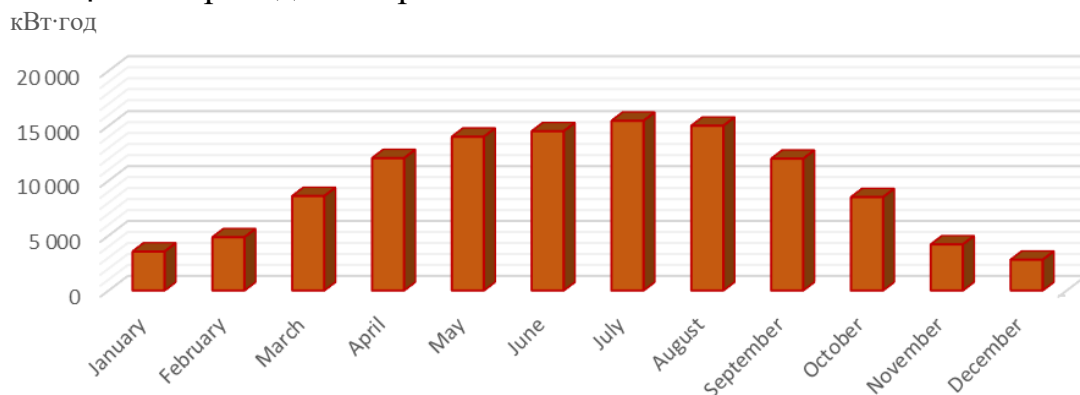


Рис. 2. Графік генерації електроенергії сонячною зарядною станцією по місяцям

Техніко-економічний розрахунок

Основні параметри роботи СЗС потужністю 100 кВт для проведення техніко-економічного розрахунку приведені в таблиці 2.

Таблиця 2 – Параметри роботи СЗС для техніко-економічного розрахунку

Параметр/характеристика	Величина	Розмірність
Власне споживання на місяць (освітлення)	80	кВт·год/міс.
Тариф на електроенергію за 1 кВт·год для споживачів в Україні (станом на 2025 р.)	4,32	грн
Кількість електроенергії на заряд «AC charging» електромобілів в місяць	50	%
Кількість електроенергії на заряд «DC charging» електромобілів в місяць	50	%
Тариф зарядки електромобіля за 1 кВт·год через порти Type 1, Type 2 (AC charging)	29,99	грн
Тариф зарядки електромобіля за 1 кВт·год через порти GBT, CCS2 (DC charging)	29,99	грн

Для прорахунку техніко-економічних показників СЗС для автомобільного паркінгу візьмемо тарифи на заряд електромобілів, станом на січень 2026 р., що діють у м. Харкові [18-21].

Припустимо, що тариф на зарядку електромобілів, у середньому, буде зростати на 2,0 грн у рік. З урахуванням зміни вартості тарифу на заряд електромобілів, проведемо розрахунок фінансових показників СЗС для автомобільного паркінгу по рокам її роботи, з визначенням терміну її окупності, рисунок 3.

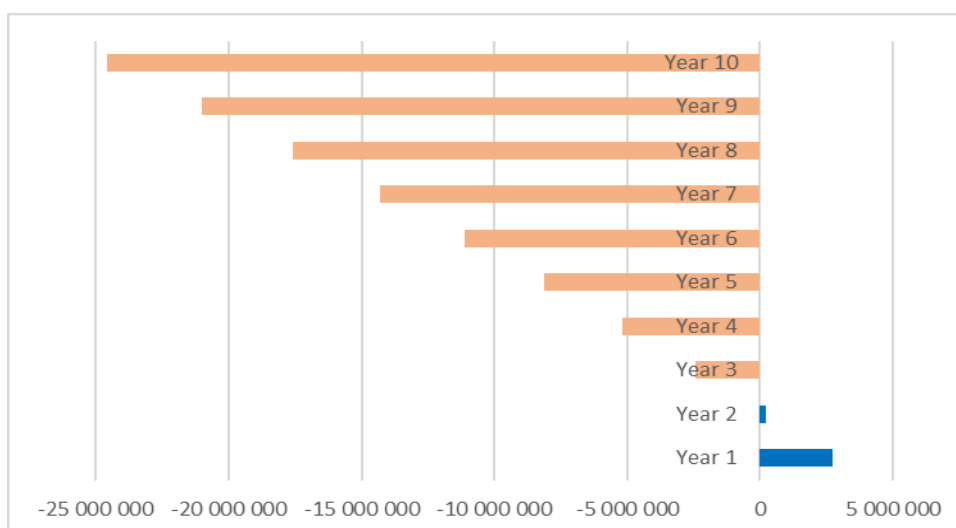


Рис. 3. Термін окупності СЗС

Варто зазначити, що це був прорахунок СЗС для автомобільного паркінгу, який враховував виключно нові її комплектуючі. Розрахунок показує, що вже на другому році експлуатації СЗС для автомобільного

паркінгу потужністю 100 кВт настає її термін окупності. При цьому, якщо як накопичувач енергії використовується Deye BOS-GM5.1 61.44kW 614.4 V 100 Ah LiFePO₄, то окупність настає через ~2,1 роки.

Висновки

У роботі розглянуто питання інтеграції фотоелектричних систем у зарядну інфраструктуру електромобілів на паркувальних майданчиках та обґрунтовано доцільність використання сонячних електростанцій у поєднанні з блоками накопичення енергії.

Проведений аналіз показав, що паркувальні майданчики є ефективними об'єктами для розміщення фотоелектричних установок, оскільки дозволяють поєднати функції паркування транспортних засобів, генерації електроенергії та заряджання електромобілів. Встановлено, що використання PV-систем сприяє зниженню навантаження на електричні мережі, підвищенню частки використання відновлюваних джерел енергії та зменшенню експлуатаційних витрат зарядної інфраструктури.

У роботі запропоновано технічне рішення сонячної зарядної станції потужністю 100 кВт для автомобільного паркінгу, що включає фотоелектричну установку, зарядне обладнання та систему накопичення енергії. Обґрунтовано вибір гібридної схеми системи, яка забезпечує більш гнучке управління енергопотоками та підвищує ефективність використання сонячної генерації.

За результатами техніко-економічного аналізу встановлено, що загальна вартість запропонованої системи становить 79166 дол. США, а термін її окупності за поточних тарифів на електроенергію та заряд електромобілів становить близько 2–2,1 року. Це свідчить про високу економічну доцільність впровадження таких рішень навіть при використанні нових комплектуючих.

Доведено, що застосування систем накопичення енергії є ключовим фактором підвищення ефективності роботи сонячних зарядних станцій, оскільки дозволяє компенсувати нерівномірність генерації сонячної енергії та забезпечити більш стабільне покриття навантаження електромобілів.

Таким чином, інтеграція фотоелектричних систем у зарядну інфраструктуру електромобілів на паркувальних майданчиках є технічно обґрунтованим та економічно ефективним рішенням, що відповідає сучасним вимогам розвитку енергоефективного та екологічно сталого транспорту.

Подальші дослідження доцільно спрямувати на розробку алгоритмів інтелектуального керування зарядкою електромобілів, оптимізацію параметрів системи «PV–EV–BESS», а також адаптацію таких рішень до реальних умов експлуатації міської інфраструктури.

Література

1. International Energy Agency. (2025). Trends in electric car markets. In *Global EV Outlook 2025*. IEA.
2. European Commission, Directorate-General for Energy. (n.d.). Sustainable mobility and buildings. European Commission.
3. Albaba, M., Pierce, M., & Yeşilata, B. (2025). A real-world case study of solar PV integration for EV charging and residential energy demand in Ireland. *Sustainability*, 17(21), Article 9447. <https://doi.org/10.3390/su17219447>
4. International Energy Agency. (2025). *Global EV Outlook 2025*. IEA.
5. Osório, G. J., Gough, M., Lotfi, M., Santos, S. F., Espassandim, H. M. D., Shafie-khah, M., & Catalão, J. P. S. (2021). Rooftop photovoltaic parking lots to support electric vehicles charging: A comprehensive survey. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 133, 107274. <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2021.107274>
6. Deshmukh, S. S., & Pearce, J. M. (2021). Electric vehicle charging potential from retail parking lot solar photovoltaic awnings. *Renewable Energy*, 169, 608–617. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2021.01.068>
7. Borhani, A., & Ouardi, H. (2026). Multi-objective optimal sizing of EV charging stations and PV systems in residential buildings. *Energy Storage and Saving*. Advance online publication. <https://doi.org/10.1016/j.enss.2025.07.002>
8. Chandra, I., Singh, N. K., Samuel, P., Bajaj, M., & Zaitsev, I. (2024). Coordinated charging of EV fleets in community parking lots to maximize benefits using a three-stage energy management system. *Scientific Reports*, 14, Article 32026. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-83579-x>
9. IEA Photovoltaic Power Systems Programme. (2025). PV-powered electric vehicle charging stations: Requirements, barriers, solutions and social acceptance (Report IEA-PVPS T17-04:2025). IEA PVPS.
10. Aarabi, M. S., Khanahmadi, M., & Awasthi, A. (2025). A literature review on strategic, tactical, and operational perspectives in EV charging station planning and scheduling. *World Electric Vehicle Journal*, 16(7), Article 404. <https://doi.org/10.3390/wevj16070404>
11. Patlins, A., Hnatov, A., Arhun, S., Hnatova, H., & Saraiev, O. (2022, May). Features of converting a car with an internal combustion engine into an electric car. In 2022 IEEE 7th international energy conference (ENERGYCON) (pp. 1-6). IEEE.
12. Patlins, A., Hnatov, A., Kunicina, N., Arhun, S., Zabasta, A., & Ribickis, L. (2018, July). Sustainable pavement enable to produce electricity for road lighting using green energy. In 2018 Energy and Sustainability for Small Developing Economies (ES2DE) (pp. 1-2). IEEE.
13. Hnatov, A., Patlins, A., Arhun, S., Kunicina, N., Hnatova, H., Ulianets, O., & Romanovs, A. (2020, September). Development of an unified

energy-efficient system for urban transport. In 2020 6th IEEE International Energy Conference (ENERGYCon) (pp. 248-253). IEEE.

14. Hnatov, A., Arhun, S., & Ponikarovska, S. (2017). Energy saving technologies for urban bus transport. *International journal of automotive and mechanical engineering*, 14, 4649-4664.

15. Minh, P. V., Le Quang, S., & Pham, M. H. (2021). Technical economic analysis of photovoltaic-powered electric vehicle charging stations under different solar irradiation conditions in Vietnam. *Sustainability*, 13(6), 3528. <https://doi.org/10.3390/su13063528>

16. Nunes, P., Figueiredo, R., & Brito, M. C. (2016). The use of parking lots to solar-charge electric vehicles. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 66, 679-693. DOI: 10.1016/j.rser.2016.08.015

17. Bushur, A., Ward, K., Flahaven, T., Kelly, T., Jo, J. H., & Aldeman, M. (2019). Techno-economic evaluation of installing EV and PV combined infrastructure on Academic Institution's Parking Garages in Illinois, USA. *AIMS Energy*, 7(1). doi: 10.3934/energy.2019.1.31

18. Bogajevskiy, A., Arhun, S., Hnatov, A., Dvadnenko, V., Kunicina, N., & Patlins, A. (2019, October). Selection of methods for modernizing the regulator of the rotation frequency of locomotive diesels. In 2019 IEEE 60th international scientific conference on power and electrical engineering of Riga technical university (RTUCON) (pp. 1-6). IEEE. DOI: 10.1109/RTUCON48111.2019.8982347

19. Arhun, S., Migal, V., Hnatov, A., Ponikarovska, S., Hnatova, H., & Novichonok, S. (2020). Determining the Quality of Electric Motors by Vibro-Diagnostic Characteristics. *EAI Endorsed Trans. Energy Web*, 7(29), e6.

20. Zabasta, A., Peuteman, J., Kunicina, N., Kazymyr, V., Hvesenya, S., Hnatov, A., ... & Ribickis, L. (2020). Research on cross-domain study curricula in cyber-physical systems: A case study of Belarusian and Ukrainian Universities. *Education Sciences*, 10(10), 282.

21. Аргун, Щ. В., Гнатов, А. В., & Ульянец, О. А. (2016). Екологічний та енергоефективний атомобільний транспорт та його інфраструктура. *Вісник ЖДТУ. Серія" Технічні науки"*, (2 (77)), 18-27.

22. Leontiev D., Klymenko V., Frolov A.; Regarding the efficiency of using solar panels of low power to obtain maximum charging current for batteries vehicle. *AIP Conf. Proc.* 5 June 2025; 3238 (1): 050009. <https://doi.org/10.1063/5.0248928>