

ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИКА, ЕЛЕКТРОТЕХНІКА ТА ЕЛЕКТРОМЕХАНІКА

УДК 629.341

DOI: 10.30977/BUL.2219-5548.2024.104.0.130

ДОСЛІДЖЕННЯ АВТОНОМНОГО ДЖЕРЕЛА ЖИВЛЕННЯ ДЛЯ ЕЛЕКТРОМОБІЛІВ ТА ЇХНЬОЇ ЗАРЯДНОЇ ІНФРАСТРУКТУРИ

Гнатів А. В., Аргун Щ. В., Сохін П. А., Ульянець О. А.
Харківський національний автомобільно-дорожній університет

Анотація. У Статті досліджено автономні джерела живлення для електромобілів та їхня зарядна інфраструктура, використання гібридних інверторів і системи керування батареями. Проаналізовано різноманітні конструкції автономних джерел живлення, їхня ефективність та практичне застосування. Метою дослідження є визначення оптимальних параметрів автономних джерел живлення, які б забезпечували високий рівень ефективності та надійності в процесі зарядження електромобілів. Розроблено автономне джерело живлення для електромобілів та їхньої зарядної інфраструктури. Це розроблення базується на використанні гібридних інверторів, які застосовують для розбудови гібридних або автономних сонячних електростанцій.

Ключові слова: автономні джерела живлення, електромобілі, гібридні інвертори, керування акумуляторними батареями, поновлювані джерела енергії.

Вступ

Дослідження автономних джерел живлення (АДЖ) для електромобілів (EV) та їхньої зарядної інфраструктури є надзвичайно актуальними завданнями в сучасному світі, де виникає необхідність в ефективних та стійких рішеннях у сфері транспорту та енергетики. З поширенням EV та розвитком громадянської свідомості щодо впливу викидів вуглецю на навколишнє середовище потреба у створенні та оптимізації зарядної інфраструктури стає дедалі важливішою. АДЖ для EV є ключовим елементом цієї інфраструктури, оскільки вони забезпечують незалежність від мережі електропостачання та надають доступ до систем зарядження під час часткової або повної відсутності електропостачання від централізованих мереж живлення [1–4].

Питання розроблення АДЖ для EV має декілька аспектів, зокрема використання таких джерел енергії, як сонячні панелі, вітро- та геотермальна енергетика або технології зберігання та накопичення енергії. Важливим процесом також є розроблення ефективних й економічно вигідних систем зберігання та конвертації енергії, які дозволять ефективно використовувати вироблену енергію для зарядження EV [5].

Дослідження в галузі АДЖ також містять в собі аналіз впливу на довкілля, визначення оптимальних місць розташування, а також вивчення потенційних технічних та економічних переваг різноманітних технологій [6].

Для вирішення цих завдань ключовим чинником є співпраця між науковцями, бізнесом, місцевою владою та урядовими установами. Тільки спільними зусиллями можна досягти значного прогресу в розробленні та впровадженні ефективних та стійких АДЖ для EV і їхньої зарядної інфраструктури.

Аналіз публікацій

Здійснюючи аналіз публікацій щодо дослідження АДЖ для EV та їхньої зарядної інфраструктури, можна визначити поточний стан і майбутні напрями цієї галузі [2, 5, 7–15]. Так, у роботі [7] аналізується функція відкритих даних та енергетичної аналітики в плануванні, проектуванні та експлуатації енергетичних систем, що має вирішальне значення для інтеграції EV у мережу електроживлення. Аналітика даних про енергоспоживання має допомогти оптимізувати інфраструктуру процесу зарядження та збільшити ефективність використання енергії для живлення електромобілів.

У дослідженні [8] розглядаються проблеми та методології оптимального розміщення зарядної інфраструктури для спільного використання автономних EV із можливістю зв'язку від автомобіля до мережі (система V2G). У цій публікації досліджені питання розроблення інтелектуальних рішень щодо АДЖ для EV в умовах обмеженого пробігу електромобіля на одній зарядці та не розвинутої мережі зарядної інфраструктури. Це визначає потребу в дослідженнях, які вирі-

шать проблему відокремленості між вимогами до мобільності та потужністю зарядної електромережі, що є важливим фактором для АДЖ та розбудови ефективної інфраструктури для їхнього зарядження.

У статті [9] здійснюється аналіз передових топологій перетворювачів і методологій процесу зарядження для акумуляторів EV, зокрема корегування коефіцієнта потужності та технологій заряджання. У цій публікації розглядаються технічні аспекти зарядження EV, зокрема інноваційні методи зарядження, які можуть бути автономними або напівавтономними за своєю структурою. Результати цих досліджень визначають майбутні напрями процесу розроблення відновлюваних джерел енергії для живлення зарядних станцій EV для досягнення мети скорочення кількості викидів забруднювальних речовин та розвитку зарядної інфраструктури.

У роботі [10] автори досліджують необхідність інтеграції речовин у навколишнє середовище і підтримки широкомасштабного впровадження EV. У статті визначено функцію відновлюваних джерел енергії в живленні зарядної інфраструктури EV. Проаналізовано політичні та інвестиційні тенденції, запропоновано системний перехід до більш чистих АДЖ для заряджання EV.

У статті [11] розглянуто потенційний вплив процесу заряджання EV на системи електроживлення, визначено проблеми та переваги їх використання, а також досліджено контрольоване зарядження та розрядження, передача енергії від EV до мережі з метою усунення негативних наслідків. Дослідження питань контрольованого зарядження актуальне для процесу розроблення автономних рішень для живлення EV, які можуть адаптуватися до мережі електроживлення.

У публікаціях [2, 5, 12–15] досліджено інженерні та технічні рішення у сфері енергозберігальних та енергоефективних технологій на транспорті з метою визначення конкретних способів їх реалізації. Одним із найбільш можливих і очевидних рішень є об'єднання всіх запропонованих авторами цих досліджень рішень в єдину енергоефективну систему міського транспорту. Також дослідниками запропоновано використання пристрою для вироблення електроенергії, який можна застосовувати як альтернативне та автономне джерело електроенергії у місцях щільного трафіка автомобільного транспорту.

У дослідженні [16] автори вивчають вплив впровадження EV на річне споживання електроенергії, прогнозуючи значне збільшення до 2035 року. У ньому моделюються різноманітні сценарії зарядної інфраструктури та їхні наслідки для стабільності мережі, визначена важливість застосування розумних стратегій заряджання для усунення негативних наслідків. Автором статті [17] розглядаються технологічні досягнення та майбутні напрями дослідження способів зарядження EV, зокрема такі інноваційні підходи, як ємнісне заряджання на основі електричного поля. Це визначає потенціал для зниження витрат на зарядну інфраструктуру та підвищення ефективності заряджання EV, що має важливе значення для АДЖ для EV.

У роботі [18] на основі досліджено 724 публікацій визначено ключові проблеми та методології щодо інтеграцією EV в інтелектуальну мережу. Наведено структуру для інтеграції розумних мереж і EV, проаналізовано способи їхнього зарядження, керування попитом на електроенергію, роботу мікромереж, розподіленої генерації електроенергії. Цей комплексний аналіз є основою для визначення системних проблем і можливостей створенні рішень АДЖ для EV.

Під час дослідження вищезазначених публікацій було проаналізовано роботу АДЖ для EV та їхньої зарядної інфраструктури. Було визначено актуальні технічні, інженерні, політичні та екологічні проблеми застосування автономних джерел живлення для електромобілів, для вирішення яких необхідне використання інтегрованих підходів, які враховують як технологічні досягнення в системах зарядження EV, так і в енергетичній екосистемі, зокрема функцію відновлюваних джерел енергії та технологій розумних мереж. Все це сприяє розбудові та впровадженню сучасних технологій та пошуку надійних і стійких рішень щодо процесу зарядження EV.

Мета та постановка завдання

Мета роботи: визначення оптимальних параметрів автономних джерел живлення, які б забезпечували високий рівень ефективності та надійності під час процесі заряджання електромобілів.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

– розробити автономне джерело живлення для електромобілів та їхньої зарядної інфраструктури;

– побудувати математичну модель, що враховує різні режими роботи автономного джерела живлення для електромобілів та їхньої зарядної інфраструктури;

– розробити та запропонувати різноманітні конструкції автономного джерела живлення для електромобілів та їхньої зарядної інфраструктури;

– розрахувати генерації електроенергії фотоелектричними модулями, що заряджають АКБ автономного джерела живлення для електромобілів та їхньої зарядної інфраструктури.

Виклад основного матеріалу

Запропонований проект АДЖ для EV та їхньої зарядної інфраструктури базується на використанні гібридного інвертора, що застосовують для розбудови гібридних сонячних електростанцій [19].

Перевагою гібридних інверторів є те, що вони, на відміну від мережевих, можуть працювати в автономному режимі, коли мережа електроживлення відключена. Це дозволяє уникнути проблем з електропостачанням, а також повного розрядження АКБ під час відсутності сонячної енергії, оскільки енергію для їхнього зарядження можна отримати з електромережі. Залежно від моделі, гібридні інвертори можна автоматично вмикати за допомогою бензинових або дизельних генераторів, якщо АКБ розряджені і не мають доступу до енергії з електромережі.

Існує декілька джерел електроенергії: сонячна енергія, енергія, збережена в АКБ, енергія з мережі та енергія від бензинового або дизельного генераторів. Більшість гібридних інверторів дозволяють налаштувати пріоритет джерела електроенергії. Наприклад, енергію від сонячних фотоелектричних панелей можна використовувати протягом дня, а ввечері – енергію з електромережі, не використовуючи АКБ, тим самим продовжуючи їхній ресурс і використовуючи їх лише в аварійних випадках. Зарядження АКБ від фотоелектричних панелей здійснюється за допомогою контролера заряду, який може бути вбудованим у гібридний інвертор або окремим блоком. Система з окремими контролерами заряду не може жити електроспоживачів безпосередньо від фотоелектричних панелей. У цьому випадку спочатку заряджаються АКБ, а потім енергія з них подається до гібридного інвертора, який перетворює постійний струм на змінний, тобто необхідний для електроживлення споживачів.

АДЖ для EV та їхньої зарядної інфраструктури призначена для забезпечення електроенергією електромобілів та їхніх об'єктів зарядної інфраструктури, у яких немає можливості (тимчасово або постійно) отримувати електроживлення від централізованої електромережі. АДЖ для EV та їхньої зарядної інфраструктури мають накопичувачі електроенергії – АКБ. Енергія що генерується, наприклад від фотоелектричних панелей вздовж проводів, подається на контролер заряду, який керує режимами заряду АКБ і вимикає перезаряд комірок АКБ. Важливо отримуватися режимів зарядження та розрядження для комірок АКБ, оскільки від цього залежить їхній термін експлуатації. У контролері заряду (або у BMS – Battery Management System, якщо така передбачена в схемі) ці режими налаштовуються під певний тип акумуляторів автоматично або за допомогою оператора. Струм від фотоелектричних панелей, який заряджає АКБ, є постійним. Для того, щоб його перетворити на змінний, необхідний для роботи більшості електроприладів та зарядження EV від звичайної мережі змінного струму, потрібен інвертор (автономний або гібридний) з потужністю, якої має вистачити для постійної роботи зарядного пристрою EV (наприклад, 3,5 кВт, 5,5 кВт або 7 кВт).

Пропонується проект АДЖ для EV та їхньої зарядної інфраструктури, який створено на основі гібридного інвертора (рис. 1). Як накопичувачі енергії використовуються комірки тягових АКБ електромобілів.

Фотоелектричні панелі під'єднують до гібридного інвертора (DC). Мережа змінного струму (для зарядження АКБ) за відсутності фотоелектричних панелей або в разі неможливості заряджатися від них (несприятливі погодні умови або темна пора доби) під'єднується до гібридного інвертора (AC), як і АКБ (рис. 1). Вихід гібридного інвертора має автоматичний вимикач (AC) і забезпечує електроживленням споживачів змінного струму або зарядження змінним струмом електромобілів.

Застосування АДЖ з гібридним інвертором для EV та їхньої зарядної інфраструктури має такі переваги: здатність працювати за відсутності напруги в мережі змінного струму, а також в умовах нестабільної мережі; доступність декількох режимів роботи, які можуть гнучко налаштовуватися за технічними потребами і відповідно до пори доби та року.

Розглянемо основні режими роботи АДЖ для EV.

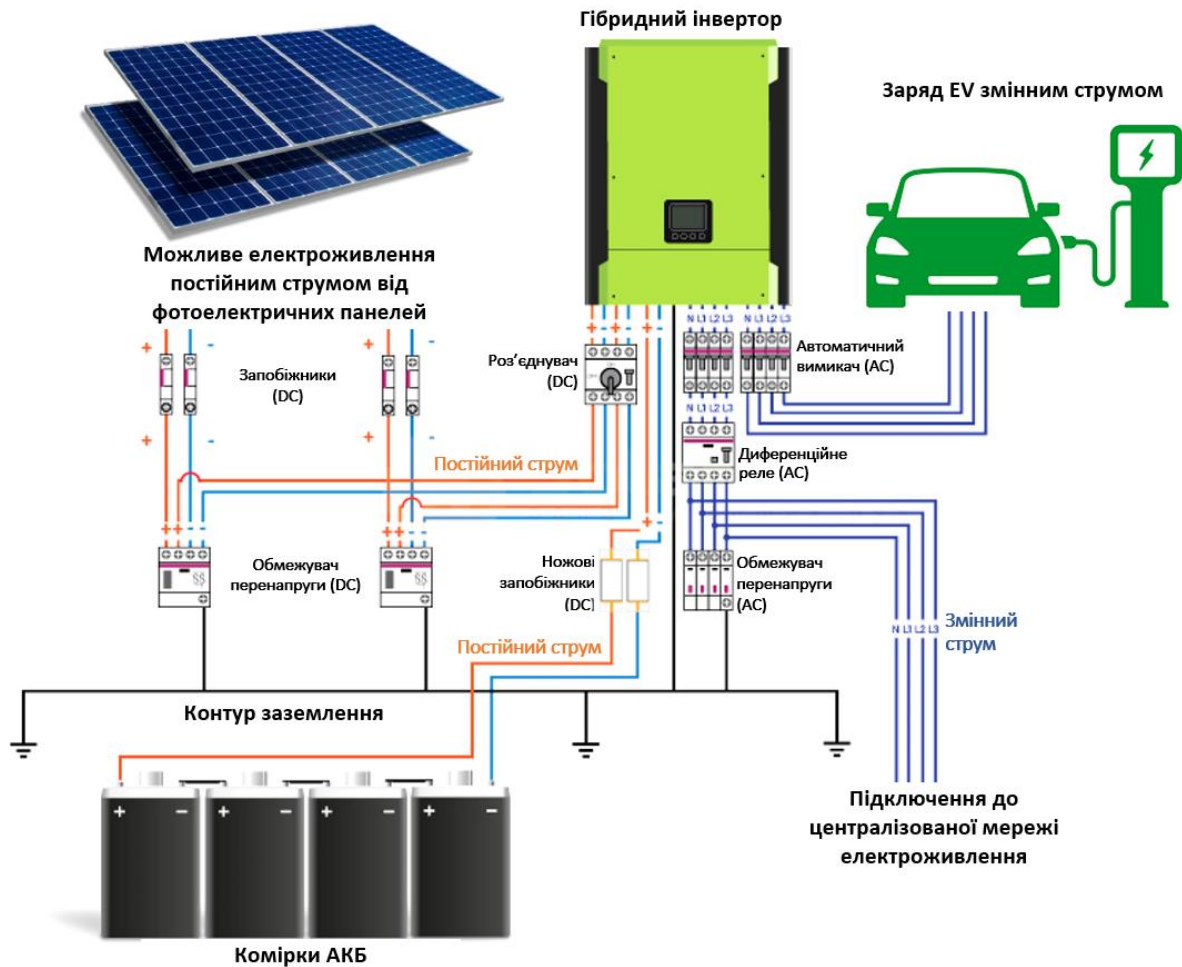


Рис. 1. Електрична схема компонування АДЖ з гібридним інвертором для EV та їхньої зарядної інфраструктури

Режим 1. Автономна робота. Згенерована електроенергія, наприклад від фотоелектричних панелей, накопичується в акумуляторах, гібридний інвертор заряджає АКБ та подає змінну напругу до зарядної станції EV. У вечірній і нічний часи електроживлення забезпечується гібридним інвертором від АКБ. У цьому режимі роботи енергія від АДЖ визначається за формулою

$$W_{\text{ДЖ}} = W_{\text{ФП}} - \Delta W_{\text{I}} + W_{\text{АКБ}}, \quad (1)$$

де $W_{\text{ДЖ}}$ – енергія, що надходить від АДЖ, Дж; $W_{\text{ФП}}$ – енергія, що надходить від фотоелектричних модулів, Дж; ΔW_{I} – енергія, що втрачається під час роботи інвертора, Дж; $W_{\text{АКБ}}$ – енергія, що надходить від АКБ, Дж:

$$\Delta W_{\text{I}} = I_{\text{I}}^2 \cdot R_{\text{I}} \cdot t_{\text{I}}, \quad (2)$$

де I_{I} – загальний еквівалентний струм в електричних колах інвертора, А; R_{I} – загальний еквівалентний опір в електричних колах ін-

вертора, Ом; t_{I} – час роботи інвертора, с.

Режим 2. Змішане електропостачання.

У цьому випадку допускається незначний розряд АКБ або повний, після чого електроживлення буде надходити від мережі змінного струму. Гібридний інвертор продовжує заряджати АКБ та забезпечує подачу змінної напруги до зарядної станції EV.

У цьому режимі роботи енергія, що надходить від АДЖ, визначається за формулою

$$W_{\text{ДЖ}} = W_{\text{МЖ}} + W_{\text{ФП}} - \Delta W_{\text{I}} + W_{\text{АКБ}}, \quad (3)$$

де $W_{\text{МЖ}}$ – енергія, що надходить від мережі живлення, Дж.

Режим 3. Резервне електропостачання. У цьому випадку схема налаштована так, що АКБ задіяні тільки за відсутності електричної мережі (аварія, планове відключення, виялові відключення тощо). Гібридний інвертор подає енергію від АКБ до зарядної станції EV. У цьому режимі роботи енергія що

надходить від АДЖ, визначається за формулою

$$W_{\text{ДЖ}} = W_{\text{АКБ}} - \Delta W_1. \quad (4)$$

Розрахування кількості енергії, яку можна отримати від АДЖ, здійснюють з огляду на ККД її складових елементів. Так, ККД літій-іонних АКБ залежить від терміну їхньої роботи і кількості циклів заряд-розряд і визначається за формулою

$$\eta_w = \frac{W_p}{W_3}, \quad (5)$$

де η_w – ККД акумулятора; W_3 – енергія, що надходить до акумулятора в процесі зарядження, Дж; W_p – енергія, отримана від акумулятора під час розрядження, Дж.

$$W_p = I_p \cdot U_p \cdot t_p, \quad (6)$$

де I_p – розрядний струм акумулятора, А; U_p – напруга на затискачах акумулятора під час розрядження, В; t_p – час розрядження акумулятора, с.

$$W_3 = I_3 \cdot U_3 \cdot t_3, \quad (7)$$

де I_3 – зарядний струм акумулятора, А; U_3 – напруга на затискачах акумулятора під час зарядження, В; t_3 – час зарядження акумулятора, с.

У нашому випадку енергія, що надходить від АКБ ($W_{\text{АКБ}}$), буде дорівнювати енергії, отриманої з акумулятора, а енергія, що надходить від мережі живлення, використовується для зарядження АКБ автономного джерела живлення і буде дорівнювати W_3 . Варто зазначити, що коли АДЖ під'єднано до централізованої мережі живлення, то залежно від функціонала його гібридного інвертора під час підключення EV на зарядження (або іншого електричного навантаження до АДЖ) можна отримувати енергію (EV чи іншому навантаженню) як від АКБ автономного джерела живлення, так і від централізованої мережі живлення. Отже:

$$W_p = W_{\text{АКБ}}, \quad (8)$$

$$W_{\text{МЖ}} = U_{\text{МЖ}} \cdot I_{\text{МЖ}} \cdot t, \quad (9)$$

де $U_{\text{МЖ}}$ – напруга мережі живлення, В; $I_{\text{МЖ}}$ – струм мережі живлення, А; t – час ро-

боти АДЖ від централізованої мережі живлення, с.

Кількість енергії, що генерують фотоелектричні панелі $W_{\text{ФП}}$, залежить від їхнього типу, тобто від номінальної потужності та від їх кількості. Отримаємо рівняння для визначення енергії, яку генерують фотоелектричні панелі, Дж:

$$W_{\text{ФП}} = \frac{3600 \cdot a \cdot J \cdot K_0 \cdot P_{\text{ном}} \cdot K_{\text{втр}}}{1000}, \quad (10)$$

де a – кількість фотоелектричних панелей; J – кількість сонячної енергії, що потрапляє на фотоелектричні панелі, кВт·год/м² (таблична величина); K_0 – корегувальний коефіцієнт кількості сонячної енергії, що потрапляє на фотоелектричні панелі. Він залежить від кута нахилу фотоелектричних панелей і кута її відхилення від південного напрямку (таблична величина); $P_{\text{ном}}$ – номінальна потужність однієї фотоелектричної панелі, Вт; $K_{\text{втр}}$ – коефіцієнт, який визначає, скільки електроенергії втрачається у всій системі електропостачання (втрати в проводах, в інверторі, втрати через збільшення температури фотоелектричного модуля, втрати в процесі роботи фотоелектричних панелей в період низького рівня сонячного випромінювання, втрати через затінювання та забруднення фотоелектричних панелей, втрати шунтувальних діодів).

У загальному випадку математичну модель роботи АДЖ для EV та їхньої зарядної інфраструктури має такий вид:

$$W_{\text{ДЖ}} = (U_{\text{МЖ}} I_{\text{МЖ}} t) + \left(\frac{3600 a J K_0 P_{\text{ном}} K_{\text{втр}}}{1000} \right) - (I_1^2 \cdot R_1 \cdot t_1) + (I_p \cdot U_p \cdot t_p). \quad (11)$$

Подібні АДЖ для EV та їхньої зарядної інфраструктури знижують залежність від загальної електромережі або за можливості отримувати електроенергію від децентралізованих джерел енергії (сонячні панелі, вітрогенератори, дизель-генератори тощо) дозволяють відмовитися від неї.

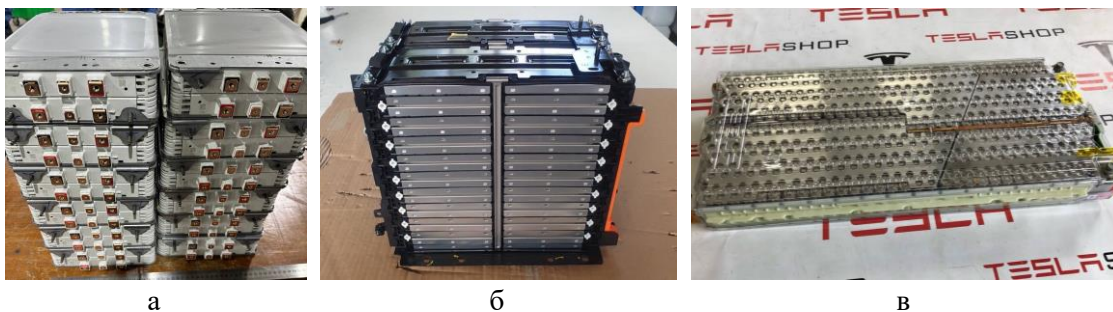
Конструкція автономних джерел живлення для електромобілів та їхньої зарядної інфраструктури

АКБ у запропонованому АДЖ пропонується набирати з комірок тягових АКБ елект-

ромобілів. Ці комірки збираються в модулі на загальну напругу 12 В, 24 В, 48 В (рис. 2). Номінальне значення напруги зібраного АКБ залежить від значення вхідної напруги постійного струму на гібридному або автономному інверторі, який буде використовуватися в цьому автономному джерелі живлення.

Для реалізації керування процесом зарядження-розрядження зібраного блока накопичення енергії застосовується система BMS

(Battery Management System) – це підсистеми, за допомогою яких здійснюється керування, моніторинг та безпечна експлуатація АКБ. Використання системи BMS значно підвищує ефективність самого АДЖ та збільшує його термін експлуатації, оскільки постійно відслідковує номінальні показники кожної комірки та здійснює їх балансування під час зарядження-розрядження літій-іонних АКБ.



а

б

в

Рис. 2. Блоки накопичення енергії з комірок АКБ електромобілів: а – Nissan Leaf; б – Hyundai Ioniq; в – Tesla Model S

АДЖ для EV та їхньої зарядної інфраструктури виготовлено на пересувній платформі, що обладнана поворотними колесами.

АДЖ для EV та їхньої зарядної інфраструктури наведено на рис. 3.



а

б

в

Рис. 3. Автономні пересувні джерела живлення: а – потужність гібридного інвертора – 5,5 кВт, ємність блока накопичення – 20 кВт·год; б – потужність гібридного інвертора – 5 кВт, ємність блока накопичення – 15 кВт·год; в – потужність гібридного інвертора – 3 кВт, ємність блока накопичення – 10 кВт·год

Особливість конструкції розроблених АДЖ полягає в тому, що їх можна застосовувати на будь-якому об'єкті, де є потреба в електроживленні за відсутності централізованого електропостачання під аварійних ситуацій, несприятливих погодних умов, військових дій тощо). Так, для військових пот-

реб було розроблено автономні пересувні джерела живлення в спеціальному герметичному корпусі підвищеної міцності.

Запропоноване пересувне АДЖ можна використовувати в домашніх умовах як резервне джерело живлення квартири чи будинку під час відключення централізованого елект-

ропостачання, наприклад під час блекаутів, віялових чи аварійних відключень.

Проведені дослідження дозволяють розробити та виготовити АДЖ для EV та їхньої зарядної інфраструктури з такими параметрами та характеристиками:

- потужність гібридного інвертора від 3 кВт до 10 кВт з вихідною напругою чистої синусоїди;

- ємність АКБ (з комірок літій-іонних батарей) від 5 кВт·год до 50 кВт·год;

- стабілізована напруга 50 Гц (під час роботи від АКБ);

- максимальна потужність з короткостроковими навантаженнями до 3,5 кВт, 6 кВт або 11 кВт (залежно від характеристик інвертора);

- постійне керування, моніторинг та калібрування комірок АКБ (здійснюється BMS, що реалізує спосіб активного балансування

під час зарядження-розрядження літій-іонних АКБ);

мобільність та зручність у пересуванні (обладнано поворотними колесами).

Далі проаналізуємо генерації електроенергії фотоелектричними модулями загальною потужністю 3 кВт, що заряджають АКБ АДЖ для EV та їхньої зарядної інфраструктури [20]. Оскільки територія України поділяється на декілька зон за інтенсивністю сонячного випромінювання, то виберемо декілька найбільших міст України, які належать до різних зон: це Київ/Харків, Дніпро, Одеса [21].

За результатами проведеного аналізу побудовано гістограму (рисунок 4) генерації електроенергії фотоелектричними модулями загальною потужністю 3 кВт у Києві/Харкові, Дніпрі та Одесі.

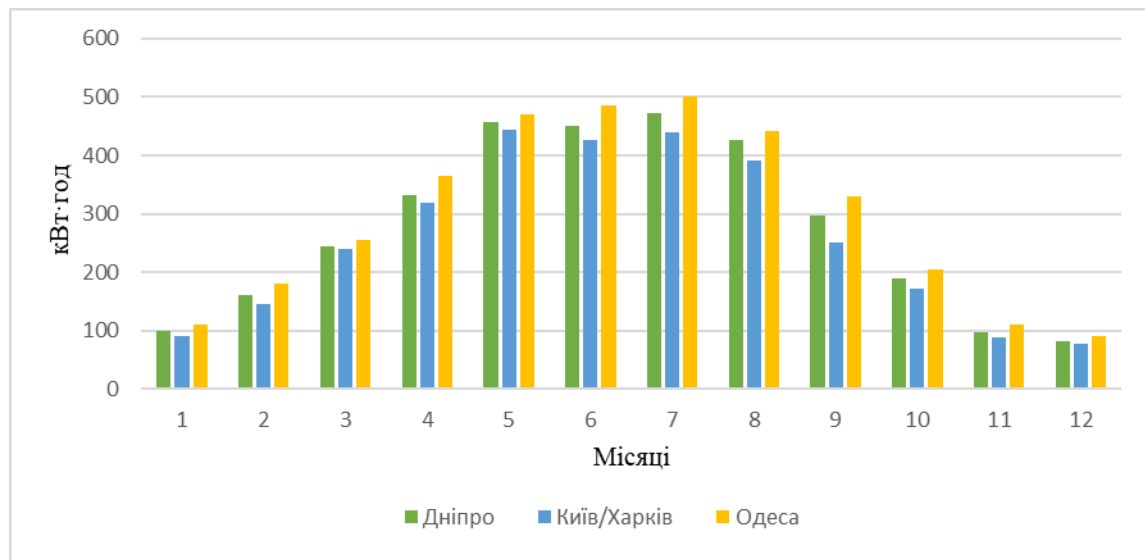


Рис. 4. Гістограма генерації електроенергії фотоелектричними модулями загальною потужністю 3 кВт у вибраних містах України

Під час розрахування генерації електроенергії фотоелектричними модулями загальною потужністю 3 кВт, що заряджають АКБ АДЖ для EV та їхньої зарядної інфраструктури було визначено, що, використовуючи лише це поновлювальне джерело живлення, за рік його роботи буде згенерована електроенергія для найбільших міст різних регіонів України та зон сонячної інсоляції (рис. 4):

- Київ/Харків – 3085 кВт·год;

- Дніпро – 3315 кВт·год;

- Одеса – 3547 кВт·год.

Це забезпечить пробіг електромобіля від 19,2 тис. км до 22,2 тис. км (за його середніх

витрат 160 Вт на 1 км) на енергії, що буде отримана від фотоелектричних модулів.

Висновки

Під час дослідження АДЖ для EV та їхньої зарядної інфраструктури було здійснено такі етапи:

- розроблено АДЖ для EV та їхньої зарядної інфраструктури. Це розроблення базується на використанні гібридних інверторів, які застосовують під час будівництва гібридних або автономних сонячних електростанцій. Запропоновано модель реалізації АДЖ з гібридними інверторами. Наведена схемна реалізація запропонованої моделі;

– побудовано математичну модель, що описує та враховує різні режими роботи АДЖ для EV та їхньої зарядної інфраструктури;

– розроблено та запропоновано різні конструкції АДЖ для EV та їхньої зарядної інфраструктури. Розроблені автономні джерела живлення розраховані на максимальну потужність з короткостроковими навантаженнями до 3,5 кВт, 6 кВт або 11 кВт (залежно від параметрів інвертора) та мають ємність АКБ (з комірок літій-іонних батарей) від 5 кВт·год до 50 кВт·год. Керування, моніторинг та калібрування комірок АКБ здійснюється BMS, що реалізує спосіб активного балансування під час зарядження-розрядження літій-іонних АКБ;

– здійснено розрахування генерації електроенергії фотоелектричними модулями загальною потужністю 3 кВт, що здійснюють зарядження АКБ АДЖ для EV та їхньої зарядної інфраструктури. Під час розрахування було визначено, що, використовуючи лише це поновлювальне джерело живлення, за рік його роботи буде згенерована електроенергія для найбільших міст різних регіонів України та зон сонячної інсоляції: Київ/Харків – 3085 кВт·год; Дніпро – 3315 кВт·год; Одеса – 3547 кВт·год. Це забезпечить пробіг електромобіля від 19,2 тис. км до 22,2 тис. км (за його середніх витрат 160 Вт на 1 км) лише на енергії, що отримана від фотоелектричних модулів.

Література

- Jedia D. N., Thakur P., Singh A., Kumar N., Sahw P. Securing Electric Mobility: an IoT-Enabled Authentication System for Autonomous and Hybrid Electric Vehicle Charging Stations. 2023. 3rd International Conference on Advancement in Electronics & Communication Engineering (AECE), GHAZIABAD, India, 2023. Pp. 231–236.
- Hnatov A. V., Arhun S. V., Hnatova H. A., Sokhin P. A. Technical and economic calculation of a solar-powered charging station for electric vehicles. *Автомобільний транспорт*. 2021. Вип. 49. С. 71–78.
- Сонячна зарядна електростанція – комплекс для проведення лабораторних та практичних занять / Гнатів А. В., Аргун Ш. В., Гнатова Г. А., Тарасов, К. С. *Автомобіль і електроніка. Сучасні технології*. 2020. № 17. С. 19–26.
- Hnatov A., Arhun S., Dziubenko O., Poni-karovska, S. (2018). Choice of Electric Engines Connection Circuits in Electric Machine Unit of Electric Power Generation Device. *Majlesi Journal of Electrical Engineering*. 12(4). 87–95.
- Hnatov A., Arhun, S. (2017). Energy saving technologies for urban bus transport. *International journal of automotive and mechanical engineering*. 14(4). 4649–4664.
- Munkhammar J., Shepero M. (2017, September). Autonomous electric vehicle fleet charging in cities: optimal utility estimates and Monte Carlo simulations. In 2017 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Conference Europe (ISGT-Europe). Pp. 1–6. IEEE.
- Manfren M., Nastasi B., Groppi D., Garcia D. A. (2020). Open data and energy analytics-An analysis of essential information for energy system planning, design and operation. *Energy*. 213. 118803.
- Van den bergh O., Weekx S., De Cauwer C., Vanhaverbeke L. (2023). Locating Charging Infrastructure for Shared Autonomous Electric Vehicles and for Vehicle-to-Grid Strategy: a Systematic Review and Research Agenda from an Energy and Mobility Perspective. *World Electric Vehicle Journal*. 14(3). 56.
- Khalid M., Ahmad F., Panigrahi B. K., Al-Fagih L. (2022). A comprehensive review on advanced charging topologies and methodologies for electric vehicle battery. *Journal of Energy Storage*. 53. 105084.
- The Importance of Renewables for Electric Vehicle Charging. (2022). URL: <https://www.morganlewis.com/pubs/2022/06/the-importance-of-renewables-for-electric-vehicle-charging>. (дата звернення: 24.02.2024).
- Nour M., Chaves-Ávila J. P., Magdy G., Sánchez-Miralles Á. (2020). Review of positive and negative impacts of electric vehicles charging on electric power systems. *Energies*. 13(18). 4675.
- Borodenko Y. M., Hnatov A. V., Arhun S. V., Sokhin P. A. (2023). Energy aspects of automobile transport development. *Automobile Transport*. (53). P. 37–50. DOI: 10.30977/AT.2219-8342.2023.53.0.05
- 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.
- Arhun S., Hnatov A., Mygal V., Khodyriev S., Popova A., Hnatova H. (2020, April). An Integrated System of Alternative Sources of Electricity Generation for Charging Urban Electric Buses. In 2020 IEEE 40th International Conference on Electronics and Nanotechnology (ELNANO). Pp. 619–624. IEEE.
- Patlins A., Hnatov A., Arhun S., Kunicina N., Hnatova H., Ulianets O., Romanovs A. (2020, September). Development of a unified energy-efficient system for urban transport. In 2020 6th IEEE International Energy Conference (ENERGYCon). Pp. 248–253. IEEE.
- Powell S., Cezar G. V., Min L., Azevedo I. M., Rajagopal R. (2022). Charging infrastructure ac-

- cess and operation to reduce the grid impacts of deep electric vehicle adoption. *Nature Energy*. 7(10). Pp. 932–945.
17. Afridi K. (2022). The future of electric vehicle charging infrastructure. *Nature Electronics*. 5(2). Pp. 62–64.
 18. Sultan V., Aryal A., Chang H., Kral J. (2022). Integration of EVs into the smart grid: a systematic literature review. *Energy Informatics*. 5(1). Pp. 1–28.
 19. Сонячна електростанція 3 кВт (2024). URL:https://ecoforce.com.ua/uk/photoelectrics/se_s3/ (дата звернення: 24.02.2024).
 20. Національний атлас України / Руденко Л. Г. та ін. Київ: ДНВП «Картографія», 200.
- ### References
1. Jedia, D. H., Thakur, P., Singh, A., Kumar, H., Sahw, P. Securing Electric Mobility: an IoT-Enabled Authentication System for Autonomous and Hybrid Electric Vehicle Charging Stations. 2023. 3rd International Conference on Advancement in Electronics & Communication Engineering (AECE), GHAZIABAD, India, 2023. Pp. 231–236.
 2. Hnatov, A. V., Arhun, S. V., Hnatova, H. A., Sokhin, P. A. (2021). Technical and economic calculation of a solar-powered charging station for electric vehicles. *Автомобільний транспорт*. Вип. 49. С. 71–78.
 3. Hnatov, A. V., Arhun, Shch. V., Hnatova, H. A., Tarasov, K. S. (2020). Soniachna zariadna elektrostantsiia–kompleks dlia provedennia laboratornykh ta praktychnykh zaniat. [The solar charging power station is a complex for conducting laboratory and practical classes] *Автомобіль і електроніка. Suchasni tekhnolohii*. (17). 19–26. [in Ukrainian].
 4. Hnatov, A., Arhun, S., Dziubenko, O., Poni-karowska, S. (2018). Choice of Electric Engines Connection Circuits in Electric Machine Unit of Electric Power Generation Device. *Majlesi Journal of Electrical Engineering*. 12(4). 87–95.
 5. Hnatov, A., Arhun, S. (2017). Energy saving technologies for urban bus transport. *International journal of automotive and mechanical engineering*. 14(4). 4649–4664.
 6. Munkhammar, J., Shepero, M. (2017, September). Autonomous electric vehicle fleet charging in cities: optimal utility estimates and Monte Carlo simulations. In 2017 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Conference Europe (ISGT-Europe). Pp. 1–6. IEEE.
 7. Manfren, M., Nastasi, B., Groppi, D., Garcia, D. A. (2020). Open data and energy analytics-An analysis of essential information for energy system planning, design and operation. *Energy*. 213. 118803.
 8. Van den bergh, O., Weekx, S., De Cauwer, C., Vanhaverbeke, L. (2023). Locating Charging Infrastructure for Shared Autonomous Electric Vehicles and for Vehicle-to-Grid Strategy: a Systematic Review and Research Agenda from an Energy and Mobility Perspective. *World Electric Vehicle Journal*. 14(3). 56.
 9. Khalid, M., Ahmad, F., Panigrahi B. K., Al-Fagih, L. (2022). A comprehensive review on advanced charging topologies and methodologies for electric vehicle battery. *Journal of Energy Storage*. 53. 105084.
 10. The Importance of Renewables for Electric Vehicle Charging. (2022). URL: <https://www.morganlewis.com/pubs/2022/06/the-importance-of-renewables-for-electric-vehicle-charging>. (дата звернення: 24.02.2024).
 11. Nour, M., Chaves-Ávila, J. P., Magdy, G., Sánchez-Miralles, Á. (2020). Review of positive and negative impacts of electric vehicles charging on electric power systems. *Energies*. 13(18). 4675.
 12. Borodenko, Y. M., Hnatov, A. V., Arhun, S. V., Sokhin, P. A. (2023). Energy aspects of automobile transport development. *Automobile Transport*. (53). P. 37–50. DOI: 10.30977/AT.2219-8342.2023.53.0.05
 13. 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.
 14. Arhun, S., Hnatov, A., Mygal, V., Khodyriev, S., Popova, A., Hnatova, H. (2020, April). An Integrated System of Alternative Sources of Electricity Generation for Charging Urban Electric Buses. In 2020 IEEE 40th International Conference on Electronics and Nanotechnology (ELNANO). Pp. 619–624. IEEE.
 15. Patlins, A., Hnatov, 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.
 16. Powell, S., Cezar, G. V., Min, L., Azevedo, I. M., Rajagopal, R. (2022). Charging infrastructure access and operation to reduce the grid impacts of deep electric vehicle adoption. *Nature Energy*. 7(10). Pp. 932–945.
 17. Afridi, K. (2022). The future of electric vehicle charging infrastructure. *Nature Electronics*. 5(2). Pp. 62–64.
 18. Sultan, V., Aryal, A., Chang, H., Kral, J. (2022). Integration of EVs into the smart grid: a systematic literature review. *Energy Informatics*. 5(1). Pp. 1–28.
 19. Soniachna elektrostantsiia 3 kVt [Solar power plant 3 kW] (2024). Retrieved from:https://ecoforce.com.ua/uk/photoelectrics/se_s3/ (accessed: 24.02.2024).

20. Natsionalnyi atlas Ukrainy [National atlas of Ukraine] (2007) / red. L. H. Rudenko. Kyiv: DNVП «Kartohrafiia [in Ukrainian].

Гнатів Андрій Вікторович, д.т.н., проф., завідувач каф. автомобільної електроніки, тел. +38 06674380887, kalifus76@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0932-8849>

Аргун Щасяна Валіковна, д.т.н., проф. каф. автомобільної електроніки, тел. +38 0993780451, shasyana@gmail.com,

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6098-8661>

Сохін Павло Андрійович, аспірант кафедри автомобільної електроніки, тел. +38 0633473433, info@elektrocar.com.ua

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2823-2239>

Ульянець Ольга Анатоліївна, асистент каф. автомобільної електроніки, тел. +38 0957336312, olga.ulyanets@gmail.com,

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7263-3024>

Харківський національний автомобільно-дорожній університет, вул. Ярослава Мудрого, 25, м. Харків, 61002, Україна.

Research of an autonomous power source for electric vehicles and their charging infrastructure

Abstract. Problem. The article is devoted to the development and research of autonomous power sources for electric vehicles and their charging infrastructure, with an emphasis on the use of hybrid inverters and battery management systems (BMS). The main attention is paid to the analysis of various designs of autonomous power sources, their efficiency and practical application. **Goal.** The purpose of the study is to determine the optimal parameters of autonomous power sources that would ensure a high level of efficiency and reliability when charging electric vehicles. **Methodology.** The methodology is based on an experimental study of different models of inverters and their impact on the overall performance of the system. For this, classical methods of electrophysics are used to determine the energy both generated and consumed by an autonomous power source for electric vehicles and their charging infrastructure. Methods of experimental research were also used, namely observation, comparison, experiment. **Results.** An autonomous power source for

electric vehicles and their charging infrastructure has been developed. This development is based on the use of hybrid inverters, which are widely used in the construction of hybrid or autonomous solar power plants. A model for the implementation of an autonomous power source with hybrid inverters is proposed. The schematic implementation of the proposed model is given. **Originality.** The originality of the work consists in the development of a mathematical model that describes the different modes of operation of autonomous power sources and the analysis of the efficiency of the use of lithium-ion battery cells. **Practical value.** The practical significance of the research is revealed in the possibility of applying the developed solutions in various operating conditions, in particular at home, at military facilities and in the infrastructure of electric vehicles, which contributes to reducing dependence on centralized power supply and increasing environmental safety. The proposed designs of autonomous power sources for electric vehicles and their charging infrastructure make it possible to receive power from renewable energy sources.

Key words: autonomous power sources, electric vehicles, hybrid inverters, battery management, renewable energy sources.

Hnatov Andrii, professor, Doct. of Science, Head of Vehicle Electronics Department,

tel. +38 066-7438-0887, kalifus76@gmail.com,

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0932-8849>

Arhun Shchasyana, professor, Doct. of Science, Vehicle Electronics Department,

tel. +38 0993780451, shasyana@gmail.com,

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6098-8661>

Sokhin Pavlo, postgraduate, Vehicle Electronics Department, tel. +38 0633473433,

info@elektrocar.com.ua,

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2823-2239>

Uliyanets Olha, assistant professor of Vehicle Electronics Department, tel. +38 0957336312,

olga.ulyanets@gmail.com,

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7263-3024>

Kharkiv National Automobile and Highway University Yaroslava Mudrogo str., 25, Kharkiv, Ukraine, 61002.