

Кульбашна Н. І., Лукашова Н. П., Далека В. Х., Скуріхін В. І.

Харківський національний університет міського господарства імені О. М. Бекетова

ШЛЯХИ ПІДВИЩЕННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ ЕЛЕКТРОБУСІВ ЗА РАХУНОК СУЧАСНИХ ФОТОЕЛЕКТРИЧНИХ ТЕХНОЛОГІЙ

У статті на підставі сучасного розвитку фотоелектричних технологій та результатів наукових досліджень розглянуто питання підвищення енергоефективності електробусів за рахунок фотоелектричних систем. Запропоновано класифікацію, яка демонструє шляхи збільшення кількості енергії від фотоелектричних панелей. Оцінені показники ресурсозбереження для електробусів вітчизняного виробництва залежно від коефіцієнта корисної дії фотоелектричних модулів і можливості використання корисної площі даху.

Ключові слова: електробус, фотоелектрична панель, класифікація, коефіцієнт корисної дії, енергоефективність, ресурсозбереження, енергозаощадження.

Постановка проблеми

Сталий розвиток міського транспорту відіграє ключову роль у зменшенні негативного впливу на довкілля та підвищенні рівня енергозбереження у функціонуванні міст. Транспортний сектор є одним із найбільших споживачів енергії та джерелом значних викидів парникових газів. У зв'язку з цим перехід на електричний транспорт стає важливим напрямом розвитку, що забезпечує скорочення залежності від викопних палив, зменшення забруднення атмосфери та покращення загальної екологічної ситуації. Однак зростання вартості електроенергії, викликане як економічними, так і геополітичними чинниками, потребує впровадження додаткових заходів для оптимізації енергоспоживання електротранспорту.

Більшість країн світу активно розвивають «зелену енергетику», впроваджуючи альтернативні джерела енергії. Уряди держав розробляють стратегії, програми і концепції для подальшого розвитку у цій сфері. В нашій країні намічена Концепція «Зеленого» енергетичного переходу України до 2050 року [1], в якій поставлене завдання розвивати екологічний транспорт у містах і запроваджувати енергозбереження на всьому ланцюгу технологічного процесу перевезень.

Одним із перспективних рішень є використання фотоелектричних панелей, встановлених безпосередньо на електротранспортних засобах. Це дає змогу генерувати частину необхідної енергії з відновлюваного джерела, що зменшує навантаження на енергомережу та знижує експлуатаційні витрати, підвищувати автономність електротранспорту, особливо в умовах нестабільного енергопостачання.

Крім того застосування фотоелектричних панелей на громадському транспорті підвищує його

ефективність, забезпечуючи живлення допоміжних систем або навіть частково компенсуючи витрати енергії на тягу [2]. Проте для повноцінного впровадження цієї технології необхідно вирішити низку технічних і економічних питань, таких як оптимізація конструкції транспортних засобів, вдосконалення систем накопичування енергії та підвищення коефіцієнта корисної дії (ККД) фотоелектричних модулів.

У світі вже існують проекти з використання сонячних панелей на громадському транспорті. Наприклад, в Кореї старі автобуси переобладнали сонячними батареями для підживлення електромотора, а в Брісбені тестують електробуси, що працюють на 100 % сонячній енергії. Компанія FlixBus використовує сонячні панелі для живлення бортових систем автобусів, а Sono Motors розробила Solar Bus Kit для дизельних автобусів, що зменшує витрати палива. У цій статті розглядаються потенціальні можливості використання фотоелектричних панелей для підвищення енергоефективності роботи транспортних підприємств, які експлуатують електробуси.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Застосування фотоелектричних модулів на електробусах і інших видах громадського транспорту викликає значну зацікавленість в дослідженнях вчених. Використання сонячної енергії, як додаткового джерела живлення, є альтернативним шляхом енергопостачання для зарядження в парку. Наприклад у роботі [3] розглядається автономна сонячна електростанція для всього автобусного парку, яка за площею розміщення фотоелектричних модулів займає значне місце, що впливає на

землекористування. Тому застосування фотоелектричних модулів на електробусах частково вирішує таку проблему.

Зменшення залежності заряджання електробусів у парку і організації їх живлення від енергії сонця протягом часу роботи на маршруті є провідним питанням урядів і транспортних підприємств багатьох країн.

У роботі [4] розглядається концепція технічної, конструктивної і економічної доцільності фотоелектричної технології на громадських автобусах Індії, в якій сонячна енергія має значну кількість. У роботі досліджується модель електробусу, який споживає 60 кВт·год енергії, і порівнюється споживання сонячного електробусу і звичайного, причому враховані такі параметри, як вартість, вага акумулятора, так як впровадження фотоелектричних модулів зменшує масу акумуляторної батареї, що позитивно впливає на її вартість і вартість самого електробусу. Однак в цій роботі відсутня інформація про джерела отримання до 90,8 кВт·год електроенергії.

У роботі [5] енергоспоживання електробуса, підключеного до фотоелектричних систем, вивчається на дослідницькій ходовій лабораторії, що рухається експериментальним маршрутом з регулярним підзарядженням під час 1,5-годинної перерви. За реєстратором даних визначалися різні параметри: стан заряду батареї, оцінка енергії рекуперативного гальмування, споживання двигуна і швидкість. Дослідження показало, що встановлені фотоелектричні системи в змозі виробляти більше 100 МВт·год протягом одного року, а електробус має високе енергоспоживання, отримуючи понад 45 МВт·год з мережі за 37,5 тис. км. Однак отримані дані ставлять під сумнів результати споживання електробусу у 75 % загального виробництва фотоелектричної енергії і забезпечення повного живлення від сонячної енергії.

У роботі [6] вивчаються можливості бортової фотоелектричної системи, яка покриває дах та бокові борта приміського каліфорнійського електробуса, на запас його ходу та термін служби акумуляторної батареї. Було встановлено, що разом фотоелектричні панелі збільшують запас ходу щорічно 8,9 % (8881 кВт·год енергії на рік), з них панелі на даху виробляють 4,7 % (4560 кВт·год енергії на рік). До того ж вони подовжують термін служби акумуляторної батареї до 19 %: термін окупності фотомодулів на даху був оцінений в 6 років, а з боків – 13 років і три місяці. Однак у роботі зазначений загальновідомий недолік сонячних панелей – це надійність виробітку енергії у разі змінювання погодних умов, тобто зменшення кількості сонячного випромінювання.

Робота [7] націлена на порівняння з позицій техніко-економічного аналізу технологій відновлюваної енергії: сонячних модулів, вітрових турбін та п'єзоелектричних матеріалів у разі застосування на електробусах Лондона. Сонячні модулі, розміщені на даху та з боків автобуса, виробляють 15,9 кВт·год, а вітрова турбіна в передньому бампері автобуса виробляє 8,3 кВт·год – що разом становить 24,2 кВт·год на день, надає запас ходу 16,3 км на день і зменшує заряджання на станціях до 19,4 хвилин.

Робота [8] досліджує різноманітні застосування сонячної енергії для розширення парку електромобілів. Результати роботи базуються на проєктуванні та моделюванні різних компонентів сонячних електромобілів. Зазначено, що фотоелектричний елемент має забезпечувати оптимальну ефективність у певному положенні, щоб створювати максимальну потужність, яку визначають точкою максимальної потужності (ТМП). Для відстеження ТМП застосовується адаптивне нечітке керування сонячної системи.

Керування вихідною потужністю фотоелектричних модулів відіграє вирішальне значення для ефективного вилучення енергії від цих елементів. Алгоритм керування на підставі стратегії відстеження ТМП надає максимально можливу енергію в певних робочих умовах температури та сонячного випромінювання.

У роботі [9] розроблений новий аналітичний підхід для знаходження ТМП сонячного електробусу під час тимчасового затінення від будівель і дерев уздовж проїжджої частини, що і призводить до невідповідності характеристик фотоелектричного елемента. Запропонований простий алгоритм на базі однодіодної моделі з використанням характеристик сонячного елемента – співвідношення напруги, струму і максимальної потужності та прогнозуванні струму короткого замикання сонячних елементів, що уможливило досягти максимальної потужності.

Дослідження показують позитивні результати в напрямку ресурсозбереження транспортних підприємств, які будуть впроваджувати фотоелектричні панелі на даху.

У роботі [10] вказується, що функціонування електробусів залежить від стаціонарних зарядних станцій. Через обмежені площі для організації зарядних станцій і недостатнє електропостачання порушується стабільна робота електробусів. Тому інтеграція сонячних панелей, як бортового фотоелектричного обладнання для забезпечення електропостачання електричних автобусів на маршруті, стала потенційно можливим рішенням для полегшення такої проблеми і підвищення рівня обслуговування електробусів без збільшення системних витрат організаторів перевезень.

У роботі [11] звернена увага на те, що сонячна енергія зменшує енергетичну вразливість та коливання напруги мережі для систем електробусів, що впливає на організацію мережі електричних автобусів з боку економії кількості зарядних станцій. Досліджено, що сонячні панелі на даху є додатковим джерелом живлення, завдяки яким можна подовжити щоденний час роботи на 4,2 – 7,8 %, а також зекономити щонайбільше 5,7 % розміру парку на день, зменшити кількість зарядних пристроїв у депо, до того ж фотоелектричні установки на даху зменшують хвилювання щодо переривання перевізного процесу і дальності руху електробусів. Дослідження показали, що з підвищенням ефективності перетворення енергії на 10 % можна зменшити щоденний розмір автопарку на 1,2 % і кількість зарядних пристроїв на 7,5 %; кожні 50 кВт·год збільшення ємності батареї призведе до збільшення вартості системи на 1,8 %. Зазначено, що збільшення площі встановлення сонячних панелей може допомогти зменшити ємність акумулятора та знизити вартість системи.

Формулювання мети і завдання

Отже, аналіз наукових досліджень показав, що застосування фотоелектричних панелей є заощаджуваним способом для живлення електричних автобусів. Різноманітний спектр

сучасних фотоелектричних технологій надає потенціал пошуку подальшої економії і ефективного застосування цих пристроїв, що є актуальним напрямом в сьогоденні. Розробка класифікації щодо шляхів ефективного застосування фотоелектричних панелей уможливить краще розуміння і прийняття раціонального рішення щодо вибору і впровадження технологій на транспортних підприємствах.

Виходячи з цього, *метою* роботи є дослідження енергозберігаючих фотоелектричних технологій на електробусах.

Відповідно до мети визначені завдання:

1. Розглянути шляхи підвищення ефективності фотоелектричних модулів.
2. Розробити класифікацію шляхів збільшення кількості енергії від фотоелектричних модулів у разі використання на електробусах.
3. Оцінити енергозаощадження різновидів електробусів від фотоелектричних панелей з різними коефіцієнтами корисної дії.

Викладення загального матеріалу

Підвищення енергоефективності фотоелектричних модулів на електробусах шляхом використання різних хімічних поглинаючих матеріалів, змінювання архітектури модулів і механічних та електричних впливів є традиційними у фотоелектричній індустрії. Запропонована класифікація представлена на рис. 1.



Рис. 1 Класифікація шляхів підвищення кількості енергії від фотоелектричних модулів у разі використання на електробусах

Застосування різних хімічних поглинаючих матеріалів для фотоелектричних модулів стало одним із шляхів підвищення енергоефективності фотоелектричних модулів після появи на ринку

кремнієвих елементів, які поділяють на монокристалічні або полікристалічні. Вони домінують на ринку завдяки високій ефективності та довговічності. Монокристалічні панелі мають вищий

ККД, ніж полікристалічні. Полікристалічні панелі, хоч і менш ефективні, є дешевшими у виробництві та простіші у виготовленні. Поява тонкоплівкових технологій з аморфного кремнію, телуриду кадмію та перовскітів викликано нижчою собівартістю виробництва та потреби для застосування в гнучких і легких конструкціях. Однак вони менш ефективні, ніж кремнієві. Перовскіти демонструють перспективні результати в лабораторних умовах, адже їхній ККД швидко зростає завдяки вдосконаленню технологій виробництва. Телурид кадмію є популярним серед тонкоплівкових технологій завдяки доступності та високій поглинальній здатності. Новітні технології з органічних, полімерних сонячних елементів сьогодні перебувають на етапі досліджень і вдосконалення. Органічні фотоелементи мають потенціал у сфері дешевих, легких та гнучких рішень, однак їхній ККД поки що значно нижчий, ніж у традиційних кремнієвих панелей. Полімерні фотоелементи також перебувають на стадії розвитку, забезпечуючи високу прозорість і гнучкість [12].

Перспективними є технології, що складаються в змінюванні *архітектури модулів*, будуючи їх з різних сполук хімічних елементів. Гібридні технології, які поєднують різні матеріали (наприклад, перовскіти та кремній), демонструють можливість значного підвищення ефективності порівняно з традиційними методами. Перовскітні сонячні елементи, що складаються з кількох елементів на підкладах, мають потенціал замінити кремнієві через ККД, який досягає 24,2 %. Однак нестабільність і недовговічність, обумовлені схильністю до деградації під впливом вологи та високих температур поки обмежує їх застосування. ТанDEMні комірки – це технологія, яка комбінує різні матеріали для збільшення ефективності до 46 %. Вони використовують кілька шарів з різною здатністю поглинати сонячне випромінювання, що дає змогу ефективніше використовувати енергію сонця. Проте їхнє виробництво залишається коштовним через складність технологічного процесу. Технологія пасивованого діелектричного шару підвищує ефективність фотоелементів завдяки зменшенню рекомбінації електронів та покращенню поглинання світла і уможливорює досягнення ККД у 23 %, що є значним покращенням у порівнянні зі стандартними кремнієвими панелями. Гетероструктурні комірки поєднують шари монокристалічного кремнію з аморфним кремнієм, що дає ККД у 26,5 %. Такі панелі мають високу стабільність та покращене теплове керування, однак потребують вдосконалення технологій виробництва для зниження собівартості. Двосторонні фотоелементи генерують електроенергію як з фронтального, так і зі зворотного боку панелі, що збільшує ефективність – до 27 %.

Вони можуть використовувати розсіяне світло та світловідбивні поверхні для додаткового виробництва енергії, що робить їх особливо ефективними у великих сонячних станціях [12].

До технологій *різних впливів* на виготовленні комірки належать: розрізання навпіл сучасними лазерами (технологія половинчастих фотоелементів); створення гетероструктурної комірки з додаванням до кристалічного кремнію тонкого шару з аморфного кремнію, що створює гетеропереход [12], сонячний елемент із гетеропереходом і тильним контактом з ефективністю перетворення енергії 27,3 % в умовах звичайного освітлення, отриманий завдяки трьох-крокового лазерного формування малюнка без пошкодження комірок [13].

Стосовно вибору фотоелектричних панелей для електробусів, то кожний розробник і виробник має використовувати певний їхній тип, виходячи з потреб забезпечення експлуатаційної надійності, умов роботи і вартості самого електробусу, які диктуються вимогами пасажироперевізників.

Для підвищення кількості виробленої енергії для живлення допоміжних систем і додаткового живлення двигуна електробуса використовують способи *збільшення корисної площі* фотоелектричних панелей. Цього можливо досягти завдяки розташуванню панелей не тільки на даху, а і з боків транспортного засобу, наприклад, як застосування цього способу досліджено у роботі [6]. Сучасні технології дають змогу інтегрувати сонячні елементи в капот, двері та навіть вікна транспортних засобів. Використання гнучких і прозорих панелей уможливорює максимально ефективно використовувати доступну площу, що сприяє збільшенню загальної генерації електроенергії.

Дієвим способом є *використання розсувних панелей*, як показано у роботі [4]. Однак застосування такого підходу має певні зауваження. Впровадження потребує застосування не тонких гнучких панелей, а панелей, які мають громіздку конструкцію і значну вагу, що буде впливати на збільшення ваги самого електробуса і, як наслідок, підвищення ним енергоспоживання. Для розсування таких панелей потрібен привод, який в свою чергу потребуватиме додаткової енергії для живлення. Розсувні панелі збільшують габарити електробусу, що у разі руху може негативно впливати на безпеку. Тому кращим варіантом є розсування панелей під час зупинки, а саме на кінцевих станціях, коли призначені технічні стоянки і обідні перерви.

Ще одним із способів для підвищення кількості виробленої енергії фотоелектричними модулями є забезпечення оптимальної ефективності у певному положенні фотоелектричних панелей для створення максимальної потужності, тобто застосовувати активні панелі, керовані трекерами,

відповідно *оптимальній орієнтації і нахилу до променів сонця*, як показано у роботі [8]. Звісно, що таку технологію широко застосовують на практиці для стаціонарних фотоелектричних станцій, але є питання, як будуть працювати такі системи на даху електробусів, саме траєкторія яких може бути, залежно від траси маршруту, достатньо динамічною і швидко змінюваною.

Фотоелектричні панелі можна також розміщувати *на причепах*, які призначені для розміщення додаткових акумуляторних батарей для електробусів і інших транспортних засобів, з метою ефективного використання місткості та корегування довжини їхнього автономного руху у різних умовах експлуатації.

З метою збільшення продуктивності бортової фотоелектричної електростанції без додавання сонячних панелей на практиці і експериментальних дослідженнях застосовують *контролери і інші електромеханічні пристрої*. Поширеними є контролери зі стеженням за точкою максимальної потужності сонячної батареї. Вони прийшли на додаток до ШІМ-контролерів, які запобігають перегріву, підвищують здатності прийому заряду та регулюють його витрачання. Зараз на ринку з'являються ТМП-контролери з покращеною схематехнікою, надійними електронними компонентами та мікропроцесорним керуванням. ТМП-контролер відстежує струм та напругу на фотоелектричній панелі, перемножує їхнє значення та визначає найкраще поєднання значень струму та напруги, за якими потужність панелі буде максимальною [14].

У науковій літературі пропонуються різні методи отримання максимальної потужності. Так у роботі [14] представлено дві стратегії керування фотоелектричною потужністю на підставі гістерезисних контролерів. Структура запропонованого пристрою побудована на базі двотактного та понижувального перетворювача. У роботі зазначено, що продуктивність перетворювача також залежить від алгоритму керування, прийнятого для генерації керуючого сигналу, а саме застосування динамічних та статичних методів, а також сімейства інтелектуальних методів, таких як генетичний алгоритм, нейронна мережа та нечітка логіка.

На сьогодні керування за допомогою нейронних мереж у різних сферах застосування значно розширюється. У роботі [15] запропоновано новий алгоритм відстеження точки максимальної потужності фотоелектричної панелі з використанням компенсатора нейронної мережі.

У роботі [16] розглядається варіант посилення низьких напруг, які виробляють сонячні батареї у разі слабкого сонячного світла. У дослідженні

використовується пристрій, що складається з генератора Даффінга, який підсилює та автоматично регулює вхід низької напруги, інвертора, який змінює негативну напругу одного з виходів генератора, і пристрою підсумовування для додавання напруги двох генераторів.

В роботі [17] недолік низької вихідної напруги фотоелектричної системи для гібридного електромобіля вирішується шляхом використання перетворювача з високим коефіцієнтом посилення і пропорційно-інтегрального контролера, який керує роботою двонаправленого перетворювача акумулятора.

У патенті [18] запропонована конструкція зарядного блоку фотоелектричної панелі для забезпечення її високої потужності для електробусів та важких електричних транспортних засобів. Запропонована конструкція доповнена МОП-транзистором, який виконує функції посилення електронних сигналів. Крім цього зарядний пристрій має перший датчик струму для виявлення вхідного струму, за яким регулюється коефіцієнт заповнення польового МОП-транзистора, а також підключений до блоку керування другий датчик вихідного струму, який оцінює ефективність зарядження фотоелектричної панелі.

Крім вирішення питання підвищення фотоелектричної віддачі у разі вибору і застосування фотоелектричних панелей для електробусів перед службою експлуатації транспортного підприємства будуть повставати питання вартості комірок, терміну служби, проблеми технічного обслуговування, умов експлуатації і забезпечення надійності.

Головним аспектом, пов'язаною з цією дослідницькою роботою, є вивчення доцільності впровадження фотоелектричних панелей у громадському транспорті. Розглянемо можливість застосування фотоелектричних панелей на вітчизняних електробусах: Електроні Е19101 Львівського виробництва, Чернігівському електробусі Еталон А08611 «Мальва Електро», ЗЕТ 8-120 Луцького заводу електротранспорту і найбільш затребуваного в Україні китайського електробусу Skywell NJL6859BEV.

Виконаємо розрахунок енергозощадження від фотоелектричних панелей на прикладі електробуса Електрон Е19101, який має розміри за довжиною 12 м і за шириною – 2,5 м. З урахуванням розміщення блоків електрообладнання (в окремих варіантах) на даху електробуса для монтажу панелей за корисну площу беремо площадку довжиною 10,5 м і шириною 2,4 м, тобто площею 25,2 м².

З урахуванням того, що напруга на фотоелектричних панелях має дорівнювати напрузі бортового живлення, тобто 24 В, розрахуємо максимальну потужність фотоелектричних панелей площею 25,2 м².

На сьогодні ринок пропонує значний вибір сонячних панелей. Виходячи з розмірів даху електробусу Електрон Е19101 10,5 × 2,4 м, для розрахунку застосовуємо характеристики фотоелектричних модулів типу Daranener SP200 (табл. 1) [14]:

Таблиця 1

Характеристики фотоелектричних модулів

Характеристики	Daranener SP200	ANKER PS200
Тип модулів	Монокристалічні	Монокристалічні
Потужність, Вт	200	200
Ефективність перетворення енергії, %	22	23
Номинальний струм, А	5	4,17
Номинальна напруга, В	40	48
Розміри, мм	2220×568×25	2130×602×60
Маса, кг	6,2	9,23
Вартість, грн.	9 500	21 500

Отже, уздовж кузова є можливість розмістити по 5 фотоелектричних модулів (2 220×5 = 11 100 мм), а поперек – чотири ряди (568×4 = 2272 мм), які займуть площу 11,1×2,24 = 24,86 м². Ця площа менше на 0,34 м² ніж 25,2 м² визначених і її можна використати для монтажу елементів кріплення панелей.

Оскільки один фотоелектричний модуль має потужність 200 Вт, то для кількості 20 штук, які необхідно розмістити на даху, загальна потужність усієї панелі буде становити 200×20 = 4 000 Вт за номінальною напругою $V_{\text{нр}} = 40$ В та номінальним струмом $I_{\text{нр}}$. У разі паралельного з'єднання модулів буде забезпечуватися струм 5×20 = 100 А.

На сучасних автобусах та електробусах бортові низьковольтні системи живлення практично мають однакову структуру, де головними споживачами електроенергії є акумуляторні батареї (в режимі заряду), системи світлової сигналізації, електроприводи гідронасосу і відкривання дверей, склоочисники, системи керування та освітлення. Потужність електромашинних (електродвигун – генератор) та електронних перетворювачів напруги, що на сьогодні використовують на рухомому складі, має діапазон 2,2...5,0 кВт.

Отже, можна стверджувати, що фотоелектричні панелі Daranener SP200 в кількості 20 штук, які розміщені на даху і надають потужність 4 кВт, частково забезпечують функціонування усіх

низьковольтних систем електробуса Електрон Е19101.

Враховуючи, що зазначене вище низьковольтне електрообладнання не вмикається одночасно, то електроенергію фотоелектричних панелей можливо накопичувати в тягових акумуляторних батареях і суперконденсаторах, а коли буде відсутнє сонячне випромінювання, використовувати збережену енергію в режимах пуску для загального зменшення споживання електроенергії.

Отже, розміщення фотоелектричних панелей на даху електробусу Електрон Е19101 дає змогу отримувати додаткове джерело електроенергії потужністю до 4 кВт, що у разі 10-годинної їзди на маршруті протягом доби буде становити 4×10 = 40 кВт·год економії електроенергії.

Приймаючи кількість електробусів 20 і коефіцієнт їхнього використання 0,8 за рік, економію електроенергії можна встановити за такою формулою:

$$A_p = N \cdot A_l \cdot T_p \cdot K_k \cdot K_e, \quad (1)$$

де A_p – річний обсяг електроенергії, виробленої фотоелектричними панелями; N – кількість електробусів, що взяті для розрахунку; A_l – виробок електроенергії за добу, ($A_l = 40$ кВт·год); T_p – кількість днів роботи електробусу протягом року; $K_k = 0,6$ – коефіцієнт, що враховує кліматичні умови місцевості; $K_e = 0,8$ – коефіцієнт використання рухомого складу.

Розрахунок економії електроенергії надає результат:

$$A_p = 20 \times 40 \times 365 \times 0,6 \times 0,8 = 140\,160 \text{ кВт} \cdot \text{год},$$

що є досить значною величиною для вирішення питань енергозбереження.

Для розрахунку енергозаощадження шляхом застосування панелей Daranener SP200 на електробусі Електрон Е19101 приймаємо маршрут № 59 м. Харкова з оборотним рейсом довжиною 44,16 км. Згідно графіку руху в середньому рухома одиниця проїжджає 375 км за добу.

Тобто споживана електроенергія електробусом за день буде становити:

$$P_{\text{спож. доб.}} = P_{\text{пит}} \cdot L_m = 1,1 \times 375 = 412,5 \text{ кВт} \cdot \text{год},$$

де $P_{\text{пит}} = 1,1$ кВт·год питома витрата електроенергії на 1 км маршруту для електробуса Електрон Е19101; L_m – добовий пробіг електробусу на маршруті, км.

Отже обсяг споживаної електроенергії електробусом за рік визначатиметься за формулою:

$$P_{\text{спож. річн.}} = N \cdot P_{\text{спож. доб.}} \cdot T_p \cdot K, \quad (2)$$

що в розрахунку становитиме:

$$P_{\text{спож. річн.}} = 20 \times 412,5 \times 365 \times 0,8 = 2\,409\,000 \text{ кВт} \cdot \text{год}.$$

У разі споживаної електроенергії електробусом Електрон Е19101 – 2 409 000 кВт·год економія електроенергії від встановлених фотоелектричних панелей Daranener SP200 буде дорівнювати 5,81 %.

Для порівняння енергозаощадження з використанням панелей з вищим ККД для подальшого розрахунку застосовані параметри сонячних панелей ANKER PS200 з більшою ефективністю перетворення 23 %, (табл. 1) [14]. Аналогічно у разі застосування фотоелектричних

панелей ANKER PS200, які можна розмістити, згідно габаритних розмірів, на даху електробуса Електрон Е19101, надає підвищення енергозаощадження у 5,83 % (табл. 2). В табл. 2. також наведені розрахунки стосовно інших різновидів електробусів.

Таблиця 2

Результати розрахунків можливої економії електроенергії для електробусів з використанням фотоелектричних модулів Daranener SP200 / ANKER PS200

Параметри	Електрон Е19101	Еталон А08611 «Мальва Електро»	ЗЕТ 8-120	Skywell NJL6859BEV
Питома витрата електроенергії на 1 км маршруту, кВт·год	1,1	0,9	0,8	0,95
Довжина, ширина електробуса, м	12,0×2,55	9,5×2,4	8,0×2,4	8,5×2,46
Загальна площа даху, м ²	30,6	22,8	19,2	20,9
Корисна площа даху для розміщення ФЕП, м ²	25,5 / 25,6	20,2 / 20,5	15,1 / 15,3	15,1 / 15,3
Кількість фотоелектричних модулів, шт.	20	16	12	12
Виробіток електроенергії ФЕП за добу, кВт·год	40,0 / 40,03	32,0 / 32,03	24,0 / 24,02	24,0 / 24,02
Обсяг електроенергії, виробленої ФЕП за рік, кВт·год	140160 / 140272	112128 / 112218	84096 / 84166	84096/84166
Обсяг споживаної електроенергії електробусами на маршруті за рік, кВт·год	2 409 000	1 971 000	1 747 328	2 080 500
Енергозаощадження панелей, %	5,81 / 5,83	5,68 / 5,69	4,8 / 4,82	4,04 / 4,05

Отже, виходячи з аналізу електротехнічних параметрів фотоелектричних панелей у разі горизонтального їх розміщення на даху електробусів можна зробити висновок, що для енергозабезпечення низьковольтного обладнання є сенс використовувати саме Daranener SP200, оскільки вони в два рази дешевші ніж ANKER PS200 з майже однаковим енергозаощадженням.

Висновки

У статті проведено аналіз останніх досліджень щодо використання фотоелектричних панелей на електробусах, які доводять, що фотоелектричні системи можуть забезпечувати частину енергоспоживання електробусів, зменшуючи живлення від мережі, знижувати навантаження на електромережу, подовжувати термін служби акумуляторних батарей.

Показано, що фотоелектричні панелі розміщені на даху серійних електробусів можуть забезпечити живлення електрообладнання низьковольтних кіл транспортних засобів, зокрема, підзаряд акумуляторних батарей в буферному режимі, систем

автоматичного керування, електроприводів насосів гідропідсилювачів рульового керування, систем освітлення, світлової сигналізації, фар тощо.

Запропоновано класифікацію, яка показує шляхи збільшення кількості енергії від фотоелектричних панелей під час використання на електробусах. До класифікації входять традиційні підходи, що притаманні фотоелектричній галузі, а саме використання різних хімічних сполук і поглинаючих матеріалів, змінювання архітектури модулів та механічні і електричні впливи. Класифікація також враховує методи отримання максимальної потужності завдяки керуванню фотоелектричною системою із застосуванням контролерів і інших електромеханічних пристроїв, а також відомі способи розширення корисної площі панелей: розсувні, з різних боків і на причепі.

Оцінені показники ресурсозбереження для електробусів вітчизняного виробництва і тих, що затребувані в Україні, залежно від коефіцієнта корисної дії фотоелектричних модулів і можливого використання корисної площі даху. Розрахунки показують, що впровадження енергоефективних

технологій фотоелектричні модулі в умовах клімату України в змозі забезпечити, принаймні частково, живлення допоміжних систем.

Ураховуючи, що на вибір фотоелектричних модулів для електробусів будуть впливати ціна, витрати на експлуатацію, термін служби і інші фактори, то метою подальших досліджень є складання повнопараметричної функції оцінювання ресурсозбереження.

Література

1. Концепція «Зеленого» енергетичного переходу України до 2050 року. Режим доступу: <https://menr.gov.ua/news/34424.html> (дата звернення: 15.10.2024).
2. Hnatov A., Arhun Shch., Ponikarovska S. Energy saving technologies for urban bus transport. *International Journal of Automotive and Mechanical Engineering*, 2018. Vol. 14. Is. 4. P. 4649 – 4664.
3. Islam S. M. M., Salema A. A., Lim J. M.-Y. Design and sizing of solar PV plant for an electric bus depot in Malaysia. *E3S Web of Conferences 160. ICRET*, 2020. 02003. P. 1 – 4.
4. Vantagodi N. V., Rao A. R. Case study on PV integrated grid independent electric bus. *Strategic Planning for Energy and the Environment*, 2021. Vol. 39. P. 179 – 198.
5. Mattes P., A.-K.-V. de Oliveira, Rüther R. Performance of an electric bus, powered by solar energy. *VII Congresso Brasileiro de Energia Solar – Gramado*, 2018. P. 1 – 9.
6. Mallon K. R., Assadian F., Fu B. Analysis of on-board photovoltaics for a battery electric bus and their impact on battery lifespan. *Energies*, 2017. 10. P. 943 – 974.
7. Awla S. H., Philbin S. Harvesting Renewable Energy to Supply Power for Electric Buses. *Creative Commons CC BY*, 2023. P. 1 – 29.
8. Sharma S., Swami R. K. Solar powered electric vehicle using maximum power point tracking. *Material Science & Engineering International Journal*, 2022. 6(4). P. 132 – 135.
9. An analytic approach for estimation of maximum power point in solar cars // N. Haghdadi, G. Farivar, H. Iman-Eini, F. Miragha / *Conference: Electrical Engineering*, 2012. P. 1 – 6.
10. Optimal design of electric bus network considering on-board photovoltaic power supply // X. Li, C. Zhang, Y. Li, Y. Zhang, Y. Yuan, / *IEEE International Conference on Industrial Informatics (INDIN)*, 2024. P. 1 – 8.
11. Optimizing the photovoltaic-assisted electric bus network with rooftop energy supply // R. Punyavathi, A. Pandian, A.R. Singh,... M. B. Tuka, V. Blazek / *Scientific Reports*, 2024. 14(1). 5661.
12. Перспективні технології фотоелектричної сонячної енергетики. Режим доступу: <https://razumkov.org.ua/statti/perspektyvni-tekhnologii-fotoelektrychnoi-soniachnoi-energetyky> (дата звернення: 1.10.2024).
13. У Китаї представили сонячні елементи з рекордною ефективністю: допоміг лазер. Режим доступу : https://internetua.com/u-kitayi-predstavili-sonyacsni-elementi-z-rekordnoua-efektivnistua-dopomig-lazer?utm_source=ukrnet_news (дата звернення: 15.11.2024).
14. Brahmi H., Gammoudi R., Dhifaoui R. Real optimisation of a PV system based on hysteresis controllers over sun: design, implementation, and comparative study. *Hindavi Engineering Journal*. Vol. 2021, article 6689121, 16 pages <https://www.hindavi.com>.
15. A novel DSP-based MPPT control design for photovoltaic systems using neural network compensator // M.-F. Tsai, C.-S. Tseng, K.-T. Hung, S.-H. Lin / *Energies*, 2021. 14. 3260.
16. Amplification of very low output voltages of PV panels using a Duffing oscillator // H. F. Emakoua, G. V. Ayissi Eyebe, A. S. Wakata, J. S. Armand Eyebe Fouda, M. Kom / *Heliyon*, 2024. Vol. 10. Is. 20. e38982.
17. Kollati S., Gudey S. K. Multiport bidirectional converter for solar fed hybrid electric vehicle using switched reluctance motor drive. *International Journal of Applied Power Engineering*, 2024. 13(3), P. 571– 582.
18. Patent WO2011079789A1. Solar charger for charging power battery. Publication 2011-07-07.
19. Сонячні панелі – каталог. Режим доступу : https://ek.ua/ua/eklist.php?presets_=48962%2C48955%2C53108&katalog_=125&pf_=1&sc_id_=980&order_=pop&save_podbor_=1 (дата звернення: 2.10.2024).

References

1. The concept of green energy transition of Ukraine by 2050: <https://menr.gov.ua/news/34424.html>.
2. Hnatov A., Arhun S., Ponikarovska S. (2018). Energy saving technologies for urban bus transport. *International Journal of Automotive and Mechanical Engineering*. 14(4). 4649 – 4664.
3. Islam S. M. M., Salema A. A., Lim J. M.-Y. (2020). Design and sizing of solar PV plant for an electric bus depot in Malaysia. *E3S Web of Conferences 160. ICRET*. 02003.1 – 4.
4. Vantagodi N. V., Rao A. R. (2021). Case study on PV integrated grid independent electric bus. *Strategic Planning for Energy and the Environment*. 39. 179 – 198.
5. Mattes P., A.-K.-V. Oliveira, Rüther R. (2018). Performance of an electric bus, powered by solar energy. *VII Congresso Brasileiro de Energia Solar – Gramado*. 1 – 9.
6. Mallon K. R., Assadian F., Fu B. (2017). Analysis of on-board photovoltaics for a battery electric bus and their impact on battery lifespan. *Energies*. 10. 943 – 974.
7. Awla S. H., Philbin S. (2023). Harvesting Renewable Energy to Supply Power for Electric Buses. *Creative Commons CC BY*. 1 – 29.
8. Sharma S., Swami R. K. (2022). Solar powered electric vehicle using maximum power point tracking. *Material Science & Engineering International Journal*. 6(4). 132 – 135.
9. Haghdadi N., Farivar G., Iman-Eini H., Miragha F. (2012). An analytic approach for estimation of maximum power point in solar cars *Conference: Electrical Engineering*. 1 – 6.
10. Li X., Zhang C., Li Y., Zhang Y., Yuan Y. (2024). Optimal design of electric bus network considering on-board photovoltaic power supply. *IEEE International Conference on Industrial Informatics*. 1 – 8.
11. Punyavathi R., Pandian A., Singh A.R....V. Blazek (2024). Optimizing the photovoltaic-assisted electric bus network with rooftop energy supply. *Scientific Reports*. 14(1). 5661.
12. Perspective technologies of photoelectric solar energy : <https://razumkov.org.ua/statti/perspektyvni-tekhnologii-fotoelektrychnoi-soniachnoi-energetyky/>
13. In China presented solar items with record efficiency: Help laser: https://internetua.com/u-kitayi-predstavili-sonyacsni-elementi-z-rekordnoua-efektivnistua-dopomig-lazer?utm_source=ukrnet_news
14. Brahmi H., Gammoudi R., Dhifaoui R. (2021). Real optimisation of a PV system based on hysteresis controllers over sun: design, implementation, and comparative study. *Hindavi Engineering Journal*. 6689121. 16 pag.

15. Tsai M.-F., Tseng C.-S., Hung K.-T., Lin S.-H. (2021). A novel DSP-based MPPT control design for photovoltaic systems using neural network compensator. *Energies*. 14. 3260.
16. Emakoua H. F., Ayissi Eyebe G. V., Wakata A. S., Armand Eyebe Fouda J. S., Kom M. (2024). Amplification of very low output voltages of PV panels using a Duffing oscillator. *Heliyon*. 10 (20). e38982.
17. Kollati S., Gudey S. K. (2024). Multiport bidirectional converter for solar fed hybrid electric vehicle using switched reluctance motor drive. *International Journal of Applied Power Engineering*. 13(3). 571– 582.
18. Patent WO2011079789A1 (2011). Solar charger for charging power battery.
19. Solar panels - catalog: https://ek.ua/ua/ek-list.php?presets_=48962%2C48955%2C53108&katalog_=125&pf_=1&sc_id_=980&order_=pop&save_podbor_=1.

Рецензент: д-р техн. наук, проф. Петренко О. М., професор кафедри електричного транспорту Харківського національного університету міського господарства імені О. М. Бекетова, м. Харків.

Автор: КУЛЬБАШНА Надія Іванівна
кандидат технічних наук, доцент,
Харківський національний університет міського господарства імені О.М. Бекетова,

E-mail – kulbakanadia810@gmail.com
ID ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-1551-1500>

Автор: ЛУКАШОВА Наталя Павлівна
кандидат технічних наук, доцент,
Харківський національний університет міського господарства імені О.М. Бекетова,
E-mail – lukaschova.natalya@gmail.com
ID ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5556-241X>

Автор: ДАЛЕКА Василь Хомич
доктор технічних наук., професор
Харківський національний університет міського господарства імені О.М. Бекетова,
E-mail – dalekavf@ukr.net
ID ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3074-5500>

Автор: СКУРІХІН Владислав Ігорович
кандидат технічних наук., доцент
Харківський національний університет міського господарства імені О.М. Бекетова,
E-mail – vladscu@gmail.com
ID ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7415-7105>

WAYS TO IMPROVE THE ENERGY EFFICIENCY OF ELECTRIC BUSES USING MODERN PHOTOVOLTAIC TECHNOLOGIES

N. Kulbashna, N. Lukashova, V. Daleka, V. Skurikhin

O. M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv

This work analyzes the latest research on the applications of photovoltaic panels on electric buses in different countries worldwide. It considers the implementation experience of such systems in Korea, India, the USA, Great Britain, and others. The research analyzed demonstrates that photovoltaic systems can supply the main part of the energy consumption of electric buses. This reduces the dependency on the energy grid, reduces the load on it, and increases the lifespan of batteries. This work also points out key technical and economic factors that will impact the choice of photovoltaic modules, particularly, their price, ongoing maintenance costs, and lifespan. The goal of this article is to research the energy-saving capabilities of photovoltaic technologies for electric buses. This work proposes a classification that demonstrates how to achieve more energy from photovoltaic panels when they are used on electric buses. The classification includes traditional approaches that are commonly used in the photovoltaic industry, in particular, the application of different chemical compounds and absorbing materials, changing modules' architectures as well as mechanical and electric influences. The classification considers methods of obtaining maximum power by controlling photovoltaic systems with controllers and other electromechanical devices. It also considers the known methods of extending a useful panel's surface area such as sliding from different sides and on a trailer. The proposed classification can be useful to transport businesses wanting to implement innovative solutions in the industry of electric city transportation. The article also evaluates the dependence of resource conservation indicators on the efficiency coefficient and utilization of a useful roof surface area for electric buses manufactured domestically. The application of photovoltaic panels in electric buses is a promising direction of development that will contribute towards reducing emissions, more efficient usage of energy resources, and improving ecological safety of city transportation.

Keywords: electric bus, photovoltaic panel, classification, efficiency coefficient, energy efficiency, resource conservation, energy saving.