

**Шведчикова І. О.**, Доктор технічних наук, професор. E-mail: shvedchykova.io@knutd.edu.ua. ORCID: 0000-0003-3005-7385

**Магалашвілі Н. Д.**, Аспірант PhD. Тел. (+38) 073 07 08 773. E-mail: ivaniuk.nd@knutd.edu.ua. ORCID: 0009-0002-9584-0039

*Київський національний університет технологій та дизайну. Вул. Мала Шияновська, 2, м. Київ, Україна, 01011*

## **РОЗШИРЕННЯ МОЖЛИВОСТЕЙ ВИКОРИСТАННЯ СИСТЕМ АКУМУЛЮВАННЯ ТА ГЕНЕРАЦІЇ ЕНЕРГІЇ З ВІДНОВЛЮВАНИМИ ДЖЕРЕЛАМИ ДЛЯ ЕНЕРГОЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ІНФРАСТРУКТУРНИХ ОБ'ЄКТІВ ЗАЛІЗНИЦІ**

**Анотація.** У статті проаналізовано варіанти впровадження систем відновлюваних джерел та накопичення енергії на залізничній інфраструктурі та рухомому складі. Зазначено, що енергетичний сектор залізничної інфраструктури України, як і деяких європейських країн, не диверсифікований за джерелами енергії, а використання відновлюваних джерел енергії (ВДЕ) обмежене. Розглянуто можливість використання гібридних систем з фотоелектричними батареями та вітрогенератором для забезпечення потреб в електроенергії інфраструктурного об'єкту залізниці. Запропонована концепція регульованого залізничного переїзду, що працює на відновлюваних джерелах енергії (ВДЕ), у поєднанні з електричними транспортними засобами (електричний велосипед та електродрезина), що дозволить забезпечити балансування гібридної системи електроживлення, зберігання надлишкової енергії ВДЕ та виробництво додаткової енергії по мірі необхідності. У відповідності до запропонованої концепції визначено можливі сценарії функціонування навантаження залізничного переїзду. Проведено оцінку споживання електроенергії та визначено типовий графік навантаження залізничного переїзду.

**Ключові слова:** *нерегульований залізничний переїзд, відновлювальні джерела енергії, фотоелектрична батарея, вітрогенератор, акумуляторний накопичувач, електричний транспортний засіб.*

**Shvedchikova I. O.**, Doctor of Technical Sciences, Professor. E-mail: shvedchykova.io@knutd.edu.ua. ORCID: 0000-0003-3005-7385

**Magalashvili N. D.**, Postgraduate student PhD. Tel. (+38) 073 07 08 773. E-mail: ivaniuk.nd@knutd.edu.ua. ORCID: 0009-0002-9584-0039

*Kyiv National University of Technology and Design. Mala Shyianovska str. 2, Kyiv, Ukraine, 01011*

## **EXPANDING THE POSSIBILITIES OF USING ENERGY STORAGE AND GENERATION SYSTEMS WITH RENEWABLE SOURCES FOR ENERGY SUPPLY OF RAILWAY INFRASTRUCTURE FACILITIES**

**Abstract.** *The article analyzes the options for implementing renewable energy systems and energy storage on railway infrastructure and rolling stock. It is noted that the energy sector of the railway infrastructure of Ukraine, as well as some European countries, is not diversified by energy sources, and the use of renewable energy sources (RES) is limited. The possibility of using hybrid systems with photovoltaic batteries and a wind generator to meet the electricity needs of the railway infrastructure facility is considered. The concept of a regulated railway crossing operating on renewable energy sources (RES) in combination with electric vehicles (electric bicycle and electric tire) is proposed, which will ensure the balancing of the hybrid*

*power supply system, storage of excess RES energy and generation of additional energy as needed. In accordance with the proposed concept, possible scenarios for the functioning of the railway crossing load were identified. The electricity consumption is estimated and a typical load schedule for a railway crossing is determined.*

**Keywords:** *unregulated railway crossing, renewable energy sources, photovoltaic battery, wind generator, battery storage, electric vehicle.*

**Постановка проблеми.** Інфраструктурою залізниці України споживається значна кількість електроенергії. З подальшим розвитком інфраструктури (будівництво нових станцій, депо, паркувань, залізничних логістичних центрів, будівель різного призначення, зарядних станцій, залізничних переїздів, зупинкових пунктів тощо) витрати на споживання електроенергії прогнозовано зростатимуть.

Становлення ринку електричної енергії в Україні супроводжується зростанням тарифів на електричну енергію. Будівництво нових інфраструктурних об'єктів передбачає їхню географічну прив'язку до існуючих розподільних мереж або прокладання нових ліній електропередачі, що пов'язано зі значними капітальними витратами. Слід також враховувати зношеність існуючих розподільчих мереж. В Україні, за різними оцінками, критична зношеність електричних мереж становить близько 50% [1, 2]. Енергетичний сектор залізничної інфраструктури України, як і деяких європейських країн [3], не диверсифікований за джерелами енергії; використання відновлюваних джерел енергії (ВДЕ) обмежене [1]. Певні об'єкти залізничної інфраструктури України зазнали руйнувань під час війни. Все це свідчить про необхідність впровадження коротко- та довгострокових енергозберігаючих заходів як для підвищення надійності електропостачання об'єктів залізничної інфраструктури, так й для зменшення витрат на утримання станцій, депо, залізничних переїздів, а також на ремонт рухомого складу. Одним з таких заходів в інфраструктурі залізниці має стати збільшення частки використання систем акумулювання енергії та ВДЕ.

Згідно з Законом України «Про критичну інфраструктуру» № 1882-IX від 16.11.2021 р. [4] транспортна галузь відноситься до об'єктів критичної

інфраструктури. У зв'язку з цим на рівні уряду України планується впровадження низки спільних з європейськими країнами проєктів по використанню ВДЕ на об'єктах критичної інфраструктури та розвитку децентралізованих систем електропостачання, коли споживачі зможуть самостійно виробляти, використовувати, ділитися, зберігати та контролювати енергію без посередників [5].

Таким чином, в сучасних умовах використання систем накопичення енергії та ВДЕ в інфраструктурі залізничного транспорту стає важливим трендом та новим напрямом розвитку відновлювальної енергетики.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** В більшості публікацій питання використання ВДЕ та систем акумуляування енергії розглядаються для рухомого складу (вантажного та пасажирського) залізниць. В роботі [6] запропонована інтеграція системи тягового електропостачання з фотоелектричною системою (ФЕС), яка розглядається з точки зору більш ефективного використання фотоелектричної енергії з одночасною компенсацією надлишкової потужності. В [7] досліджено систему накопичення енергії для її використання під час рекуперативного гальмування та підвищення якості електроенергії в системах електропостачання залізниць змінного струму. Перехід на електричні транспортні засоби в значній ступені стимулюється розвитком технологій літійонних акумуляторів у напрямку зменшення загальної маси та автономності [8]. Це особливо актуально для важких транспортних засобів, зокрема для тягового складу залізниць, де до сих пір використовують достатньо важкі акумуляторні системи [9].

В [10] показані можливості використання фотоелектричних систем на станціях як об'єктах обслуговування залізничної системи. Станції, як правило, займають велику та концентровану територію, що є дуже сприятливим для будівництва централізованих сонячних фотоелектричних станцій. Електроенергія, вироблена станцією, використовується за

принципом «для власного використання з доступом надлишкової електроенергії до мережі». Також пропонується встановлювати фотоелектричні модулі в захисних зонах з обох сторін залізничних ліній. В [11,12] наведені результати досліджень щодо використання фотоелектричних систем на покрівлях будівель та на вітрових та дощових навісах залізничних вокзалів Китаю з загальним обсягом виробленої електроенергії від десятків до сотень МВт·год на рік.

Аналіз джерел [10-12] свідчить, що фотоелектричні системи на об'єктах залізничної інфраструктури для покриття власних потреб з можливістю генерації надлишків електроенергії до мережі використовують переважно в країнах з високим надходженням сонячної радіації (Індія, південні райони Китаю, Лівія). Останнім часом сонячні електростанції починають активно використовувати на інфраструктурних об'єктах європейських залізниць [13,14].

В [15] запропонована система, ключовим елементом якої є використання маси повітря, що витісняється під час руху поїзда по залізничній колії, для виробництва електричної енергії за допомогою міні-вітрогенераторів з вертикальною віссю обертання. Особливості експлуатації вітроенергетичних станцій з акумуляторними накопичувачами як допоміжним постачальником електричної енергії для нетягових споживачів залізничних електромереж розглянуто в [16].

Доцільність використання на об'єктах залізничної інфраструктури гібридних сонячно-вітрових систем обґрунтовано в огляді [17]. Можливе використання гібридних систем з фотоелектричними батареями (ФБ) та вітрогенератором (ВГ) для підвищення потужності локального об'єкту (ЛО) за наявності ліміту потужності споживання з мережі розглянуто в роботі [18]. Таке рішення є доцільним, коли можливості підвищення потужності для існуючих мереж та обладнання обмежені через віддаленість від трансформаторних підстанцій.

Інфраструктурним об'єктом залізниці з підвищеним рівнем небезпеки є залізничні переїзди, електроживлення світлової та звукової сигналізації яких є критично важливим для безпеки руху. Як зазначено в [19], залізничні переїзди часто розташовані в районах, віддалених від населених пунктів, з відсутністю доступу до розподільної мережі. Це потребує необхідності прокладання ліній електропередачі довжиною в декілька кілометрів для забезпечення електроенергією тільки одного об'єкта. Тому для живлення таких об'єктів доцільним виглядає використання ВДЕ. Концепцію автоматичних залізничних переїздів, що працюють на ВДЕ, на прикладі Бангладеш запропоновано в [20]. Система автоматичного переїзду працює за рахунок енергії, що виробляється ФБ, ВГ, дизель-генератором, акумуляторами, та доповнена інфрачервоними сенсорами для управління рухом шлагбаумів.

Таким чином, проведений огляд інформаційних джерел показав, що аналіз електроспоживання в залізничній інфраструктурі зосереджений здебільшого на рейкових транспортних засобах. Останнім часом на рухомому складі та на інфраструктурних об'єктах залізниці поширюється використання сучасних систем акумулювання енергії та генеруючих систем на основі фотоелектричних або вітрових станцій, а також гібридних систем на основі комбінування декількох джерел енергії (переважно джерел сонячної та вітрової енергії). У той самий час в більшості досліджень розглядається лише можливість використання гібридних систем з ВДЕ та систем зберігання енергії без акцентування уваги на особливостях управління джерелами енергії для забезпечення безперервного електроживлення об'єктів при максимальному використанні енергії ВДЕ.

Відсутні рішення для об'єктів інфраструктури залізниці, які передбачають інтеграцію електромобільних технологій з існуючими системами акумулювання та генерації енергії з ВДЕ.

**Метою статті** є розширення можливостей використання системи акумулювання та генерації енергії з відновлюваними джерелами шляхом її

інтеграції з електромобільними транспортними засобами стосовно такого об'єкту інфраструктури залізниці як переїзд. Для її досягнення мають бути вирішені наступні задачі:

- здійснити аналіз електроспоживання та визначити типовий графік навантаження залізничного переїзду;
- розробити концепцію залізничного переїзду, що працює на ВДЕ у поєднанні з електромобільними транспортними засобами, та визначити можливі сценарії його функціонування.

**Виклад основного матеріалу.** Особливості функціонування та електрозабезпечення залізничних переїздів регулюються «Інструкцією з улаштування та експлуатації залізничних переїздів», затвердженою наказом Міністерства транспорту України від 12 липня 2002 р. № 469 [21]. Згідно з цим документом «залізничний переїзд – це перехрещення дороги із залізничними коліями в одному рівні, обладнується необхідними пристроями, які забезпечують безпеку руху, поліпшують умови пропускання поїздів і транспортних засобів, проходження пішоходів, а також прогону худоби та є об'єктом підвищеної небезпеки». Тому енергозабезпечення переїздів є критично важливим для безпеки руху.

Залізничні переїзди підрозділяються на регульовані й нерегульовані [21]. «До регульованих належать переїзди, обладнані пристроями переїздної сигналізації, яка сповіщає водіїв транспортних засобів про підхід поїзда до переїзду, або ті, що обслуговуються черговим працівником. Переїзди, які не обладнані пристроями переїздної сигналізації й не обслуговуються черговим працівником, належать до нерегульованих». На сьогодні в Україні нараховується 5422 залізничних переїзди, з яких 77% обладнані автоматичною проїзною сигналізацією, а 25% функціонують з черговим працівником [22]. Робочим місцем чергового розташовано на посту, яким є спеціальна будівля біля залізничного переїзду.

Переїзди, які обслуговуються черговим працівником, повинні мати радіозв'язок з машиністами поїзних локомотивів, моторвагонного рухомого

складу і спеціального самохідного рухомого складу, прямий телефонний або зв'язок з найближчою станцією чи постом, а на ділянках, обладнаних диспетчерською централізацією, – з поїзним диспетчером [23].

В залежності від інтенсивності руху поїздів та транспортних засобів залізничні переїзди поділяються на чотири категорії [21]. Переїзди з найбільш інтенсивним рухом залізничного та автомобільного транспорту належать до I категорії.

На залізничних переїздах в залежності від пріоритетності електропостачання розрізняють два типи електрообладнання [19,21]: обладнання, доступ до електропостачання якого є критично важливим, наприклад автоматична світлофорна та сповіщальна сигналізація; інше обладнання, яке використовується переважно для власних потреб чергового.

Електрообладнання залізничного переїзду за видами можна поділити на п'ять характерних груп:

- сигналізація (світлофорна, загороджувальна, сповіщальна);
- електроосвітлення переїзду, у тому числі прожектори;
- електропривод пристроїв механічного перекриття проїжджої частини (шлагбауми, загороджувальні бар'єри, підйомні плити);
- пристрої зв'язку та управління;
- обладнання для власних потреб чергового (опалення, кондиціонування, внутрішнє освітлення, мала побутова техніка, наприклад, електрична плита, чайник тощо).

Приблизний розподіл електроспоживання залізничних переїздів II та III категорій за видами споживачів електричної енергії показаний на рис. 1.

Розглянемо профілі (графіки) навантаження залізничних переїздів. За основу візьмемо дані, наведені в [19] для Польщі. Ці дані отримані експериментальним шляхом за дворічний період спостережень та можуть бути використані для аналізу електроспоживання в Україні, враховуючі ідентичність умов функціонування значної кількості залізничних переїздів в обох країнах з точки зору впливу погодних факторів, пасажиропотоку тощо.

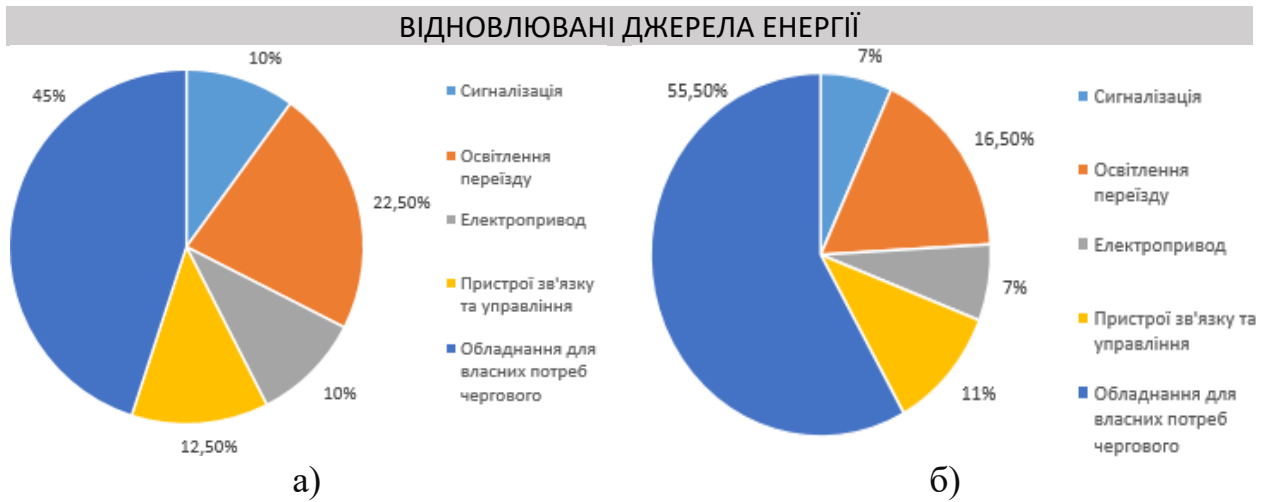


Рис. 1. Розподіл енергоспоживання на залізничних переїздах:

а) II категорії; б) III категорії

Аналізуючи дані, представлені в [19], можна зробити наступні висновки щодо особливостей енергоспоживання залізничних переїздів коливається в широких межах в залежності від типу обладнання, технологій та особливостей функціонування. Середньодобове споживання може складати від 2 кВт·год до 200 кВт·год;

- залізничний переїзд можна розглядати як об'єкт з переважно фіксованим навантаженням. Характер добового профілю навантаження в якісному відношенні залишається майже незмінним на протязі року з піковим навантаженням в нічні години, коли до роботи основного обладнання, яке працює 24 години на добу, додається нічне освітлення переїзду;

- в окремі періоди часу профіль навантаження може змінюватися в результаті запланованих (планова заміна джерела живлення) або незапланованих дій (ремонтні роботи), включаючи військові дії та стихійні природні явища, приймаючи стохастичний характер.

Типовий графік залізничного переїзду з фіксованим навантаженням наведений на рис. 2, з якого можна бачити, що навантаження у нічні години може збільшуватися майже в два рази у порівнянні з денним навантаженням.

Важливим питанням є енергозабезпечення інфраструктури залізничного переїзду, який відноситься до першої категорії за надійністю



електропостачання, яке може бути організовано наступними способами: від контактної мережі, розподільної мережі або від альтернативних джерел. В якості альтернативних джерел використовують акумуляторні батареї (АКБ) або дизель-генератори. Генератор використовують, головним чином, в умовах надзвичайних ситуацій, в зимовий період або в похмурі дні.

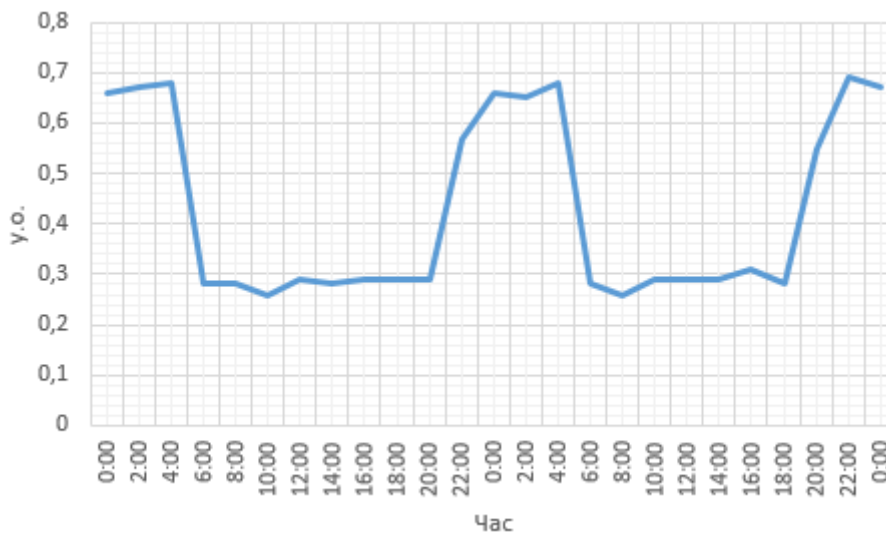


Рис. 2. Типовий графік залізничного переїзду з фіксованим навантаженням.

Електрообладнання переїзду живиться як мінімум від двох незалежних джерел, наприклад, від лінії змінного струму та дизель-генератору. Комп'ютерні системи можуть мати власні джерела безперебійного живлення. Для пристроїв автоматики, пов'язаних з управлінням рухом поїздів, передбачається акумуляторний резерв з тривалістю безперервної роботи не менше восьми годин за умови, що електроживлення не вимикалося в попередні 36 годин [21]. Для пристроїв сигналізації, централізації і блокування (СЦБ) на залізницях в Україні застосовуються залізничні АКБ тривалого розряду типу АБН-72 або АБН-80 (виробник Владар, Харків) [24].

В роботі пропонується концепція залізничного переїзду (рис. 3), що працює від підключеної до розподільної мережі гібридної сонячно-вітрової системи з АКБ.

Для живлення системи управління переїздом використовуються АКБ, які можуть підзаряджатися від ВДЕ. ФБ генерує енергію вдень, в певні місяці

року за ясної погоди можуть спостерігатися навіть надлишки енергії від сонця. Враховуючи, що енергоспоживання переїзду збільшується у нічний період, то доцільним виглядає додавання ВГ до гібридної системи для генерування енергії вночі. За наявності ВГ збільшується вірогідність генерування надлишків енергії вдень, особливо у вітряні та похмурі дні. Тому до гібридної системи для її балансування, зберігання надлишкової енергії ВДЕ або виробництва додаткової енергії по мірі необхідності пропонується додати електричні акумуляторні транспортні засоби:

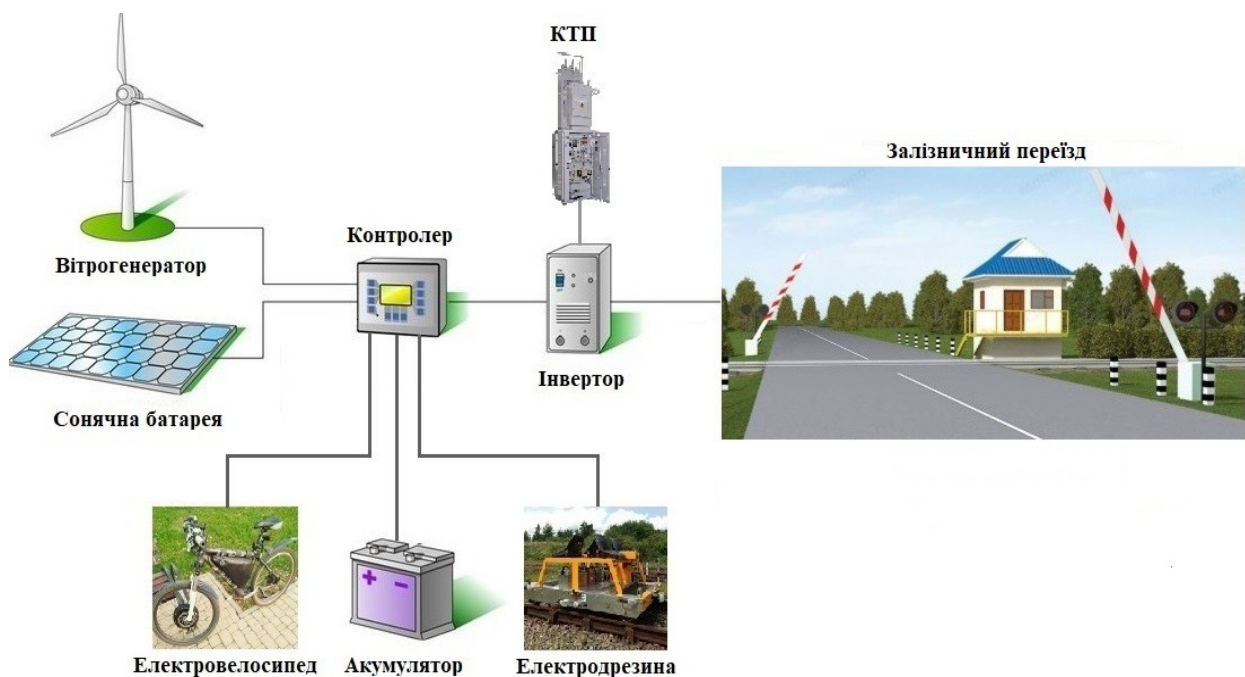


Рис. 3. Узагальнена схема залізничного переїзду з ВДЕ

- електричний двоколісний транспортний засіб як додаткове навантаження для поїздок чергового по переїзду до робочого місця, що відповідає сучасним тенденціям збільшення кількості поїздок на роботу або навчання з використанням електричних велосипедів в європейських країнах [25];

- акумуляторну електричну дрезину для транспортування персоналу до регульованих залізничних переїздів з метою їх технічного обслуговування [26].

Слід зазначити, що електричні транспортні засоби мають такі переваги, як компактність, простота обслуговування, мобільність, екологічність [26].

Як базові для подальших досліджень можна прийняти електричний велосипед типу крос-кантрі (рис.4, а) та електродрезину типу МЕС-4 (рис. 4, б), яка виготовляється компанією Donfas & Consillia (Великобританія) [27].



а)



б)

Рис. 4. Електричні акумуляторні транспортні засоби: а) електричний велосипед типу крос-кантрі; б) електродрезина типу МЕС-4.

Електричний двоколісний засіб має Li-NMC акумуляторну батарею ємністю 15,9 А·год, що складається з елементів живлення типу 18650 напругою 3,7 В кожен, напругою живлення 48 В та контролер 48-60 В, 30 А, що знаходяться в спеціальній вологозахисній сумці в трикутнику рами велосипеда. Тягова акумуляторна батарея в свою чергу захищена платою контролю заряду (BMS) від перезаряду та перерозряду, які негативно впливають на ресурс тягової літій-іонної акумуляторної батареї, та можуть привести до підвищення тиску в комірках батареї та загорання або вибуху з наступним виділенням великої кількості  $O_2$ . Двигун прямопривідний безредукторний з постійними магнітами потужністю 500 Вт, що дозволяє розвивати швидкість до 65 км/год. Дана модель двигуна за умов руху накатом генерує трифазний змінний струм, що випрямляється контролером і може бути використаний для заряджання АКБ або для роботи фари, наприклад. За умов руху з середньою швидкістю 30 км/год даний

двоколійний транспортний засіб здатен подолати відстань в 40 км за температури навколишнього середовища 20 °С.

Електродрезина (рис. 4, б) має можливість рухатися в обох напрямках, використовуючи основну та додаткову панелі управління; живлення від акумулятора з додатковими акумуляторними блоками для тривалого використання; максимальна швидкість руху до 16 км/год та загальною масою разом з людьми 440 кг, з яких 100 кг складають 4 літій-іонні АКБ ємністю 100 А·год кожна; буксирувана здатність – 2000 кг; транспортування до 4 осіб, включаючи інструменти [27].

Функціонування залізничного переїзду з гібридною системою електроживлення та електричними транспортними засобами може відбуватися за різними сценаріями, зокрема:

- за фіксованим навантаженням електрообладнання інфраструктури залізничного переїзду з врахуванням споживання електричного велосипеда чергового працівника;

- за фіксованим навантаженням електрообладнання інфраструктури залізничного переїзду з врахуванням обміну енергією з електричною дрезиною, яка здійснює заплановані (регулярні) поїздки до залізничного переїзду;

- за змінним навантаженням електрообладнання інфраструктури залізничного переїзду з врахуванням обміну енергією з електричною дрезиною, яка здійснює незаплановані (нерегулярні) поїздки до залізничного переїзду;

- за змінним навантаженням електрообладнання інфраструктури залізничного переїзду, де врахований сумарний вплив на характер навантаження обох електричних транспортних засобів: електричної дрезини та електричного велосипеда чергового працівника.

**Висновки.** Аналіз електроспоживання залізничного переїзду показав, що переїзд є об'єктом з переважно фіксованим навантаженням, яке в певні періоди часу може приймати стохастичний характер під впливом як запланованих, так й незапланованих дій. Встановлений типовий графік навантаження залізничного переїзду з піковим навантаженням у нічні години.

Запропонована концепція регульованого залізничного переїзду, що працює на ВДЕ у поєднанні з електричними транспортними засобами (електричний велосипед та електродрезина), що дозволить забезпечити балансування гібридної системи електроживлення, зберігання надлишкової енергії ВДЕ або виробництво додаткової енергії по мірі необхідності. У відповідності до запропонованої концепції визначено можливі сценарії функціонування навантаження залізничного переїзду.

Напрямок подальших досліджень є визначення параметрів гібридної вітро-сонячної системи та їх узгодження з навантаженням залізничного переїзду за різними сценаріями його роботи.

### БІБЛОГРАФІЧНИЙ СПИСОК:

1. Іванюк Н. Д., Шведчикова І. О. Застосування відновлюваних джерел енергії на об'єктах залізничної інфраструктури. *Технічні науки в Україні: сучасні тенденції розвитку: Матеріали III Всеукраїнської науково-технічної інтернет-конференції м. Ізмаїл-Київ*, 18–19 листопада 2021 р. Ізмаїл: вид-во Дунайського інституту водного транспорту Державного університету інфраструктури та технологій, реєстр. УкрІНТЕІ №871 22.10.2021, 2021. С.107-108.
2. В Україні 50% електромереж потребують негайного капремонту. URL: <https://ua-energy.org/uk/posts/v-ukraini-50-elektromerezh-potrebuiut-nehainoho-kapremontu>.
3. Vaičiūnas G., Gintautas Bureika G., Lionginas Liudvinavičius L. Expedience of Applying Solar and Wind Hybrid Power-Plants in Railway Infrastructure Objects. *Procedia Engineering*. 2016. 134. P. 9–13. doi: 10.1016/j.proeng.2016.01.030.
4. Закон України «Про критичну інфраструктуру» № 1882-IX від 16.11.2021 р. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1882-20#Text>.
5. Україна та Німеччина запускають спільний проєкт з оснащення об'єктів критичної інфраструктури відновлюваними джерелами енергії. URL: <https://www.kmu.gov.ua/news/ukraina-ta-nimechchyna-zapuskaiut-spilnyi-proekt-z-osnashchennia-obiektiv-krytychnoi-infrastruktury-vidnovliuvanymy-dzherelamy-enerhii>.
6. Mingliang W., Weiyang W., Wenli D., Huabo C., Chaohua D. and Weirong C. Back-to-back PV generation system for electrified railway and its control strategy. *2017 IEEE Transportation Electrification Conference and Expo, Asia-Pacific (ITEC Asia-Pacific)*, Harbin, China, 2017. P. 1-6. doi: 10.1109/ITEC-AP.2017.8080799.
7. Deng W., Dai C. A multifunctional energy storage system with fault-tolerance and its hierarchical optimization control in AC-fed railways. *IEEE Trans. Power Del.* 2022. 37. P. 2440–2452. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9536433>.
8. Badea I., Șerban B., Anasiei I., Mitrică D., Olaru M. T., Rabin A., Ciurdaș M. The Energy Storage Technology Revolution to Achieve Climate Neutrality. *Energies*. 2023. 17(1). P. 140. URL: <https://doi.org/10.3390/en17010140>.
9. Bobba S., Mathieux F., Ardente F., Blengini G. A., Cusenza M. A., Podias A., Pfrang A. Life cycle assessment of repurposed electric vehicle batteries: An adapted method based on modelling energy flows. *J. Energy Storage*. 2018, 19. P. 213–225. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352152X18300677?via%3Dihub>.

10. Ji L., Yu Z., Ma J., Jia L., Ning F. The Potential of Photovoltaics to Power the Railway System in China. *Energies*. 2020. 13(15). P. 3844. URL: <https://doi.org/10.3390/en13153844>.
11. Kim S., Lee Y., Moon H.-R. Siting criteria and feasibility analysis for PV power generation projects using road facilities. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 2018. 81. P. 3061–3069.
12. Vasisht M. S., Vashista G., Srinivasan J., Ramasesha S. K. Rail coaches with rooftop solar photovoltaic systems: A feasibility study. *Energy*. 2017. 118. P. 684–691.
13. World's first solar panel 'carpet' on railway tracks may generate electricity. URL: <https://interestingengineering.com/innovation/solar-panel-carpet-on-railway-tracks> (accessed Aug 11 2023).
14. Jan Fabián, Tomáš Binar, Pavel Šafl. Photovoltaic system design for strategic infrastructure and mobile command center. *Acta Innovations*. 2023. no. 46. P. 81-92. URL: <https://doi.org/10.32933/ActaInnovations.46.6>.
15. Asensio F. J., Martín J. I. S., Zamora I., Oñederra O., Saldaña G. and Eguia P. A system approach to harnessing wind energy in a railway infrastructure. *IECON 2018 - 44th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, Washington, DC, USA. 2018. P. 1646-1651. doi: 10.1109/IECON.2018.8591777.
16. Kachan Yu., Kuznetsov V. Features of operation of wind power stations as an supplementary source of electricity for non-traction consumers of railway electric mains. *Теорія та практика металургії*. 2019. № 3. С. 36-41. URL: <https://doi.org/10.34185/tpm.3.2019.06>.
17. Mitrofanov S. V., Kiryanova N. G., Gorlova A. M. Stationary Hybrid Renewable Energy Systems for Railway Electrification: A Review. *Energies*. 2021. 14. P. 5946. URL: <https://doi.org/10.3390/en14185946>.
18. Shavolkin O., Gerlici J., Shvedchykova I., Kravchenko K. Solar–Wind System for the Remote Objects of Railway Transport Infrastructure. *Energies*. 2022. 15. P. 6546. URL: <https://doi.org/10.3390/en15186546>.
19. Kampik M., Bodzek K., Piaskowy A., Pilśniak A., Fice M. An Analysis of Energy Consumption in Railway Signal Boxes. *Energies*. 2023. 16(24). P. 7985. URL: <https://doi.org/10.3390/en16247985>.
20. Iftekhazzaman I., Ghosh S., Basher M. K., Islam M. A., Das N., Nur-E-Alam M. Design and Concept of Renewable Energy Driven Auto-Detectable Railway Level Crossing Systems in Bangladesh. *Future Transportation*. 2023. 3(1). P. 75-91. URL: <https://doi.org/10.3390/futuretransp3010005>.
21. Про затвердження Змін до Інструкції з улаштування та експлуатації залізничних переїздів : Наказ; Мінінфраструктури від 12.03.2011 № 13. База даних «Законодавство України». Верховна Рада України. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/go/z0439-11> (дата звернення: 15.01.2024).
22. Залізничний переїзд. Wikipedia. URL: Залізничний переїзд — Вікіпедія (wikipedia.org).
23. Наказ Мінтрансу №386 ( z0607-99 ) від 23.07.99. Правила технічної експлуатації залізниць України. Про затвердження Правил технічної експлуатації залізниць України. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/go/z0050-97> (дата звернення: 02.01.2024).
24. Свинцево-кислотні акумуляторні батареї АБН-72 та АБН-80. ТОВ «Владармет. URL: <https://www.vladar.ua/uk/main-2/>.
25. Kohlrantz D., Kuhnimhof T. E-Bike Charging Infrastructure in the Workplace-Should Employers Provide It? *Sustainability*. 2023. 15(13). P. 10540. URL: <https://doi.org/10.3390/su151310540>.
26. Електромехатронна система автономного електровізка. *Механізми розвитку науково-технічного потенціалу: Матеріали 3-ї міжнародної науково-практичної інтернет-конференції*. 23-24 листопада 2023 р., Дніпро, Україна, 195. С. 141-144. URL:

<http://www.wayscience.com/wp-content/uploads/2023/12/Conference-Proceedings-November-23-24-2023-1.pdf>.

27. MEC 4 - Моторизована електрична дрезина. URL: <https://www.donfabsandconsillia.com/railway/Rail-utility-vehicles/Motorised-Electric-Cart-MEC4>

## REFERENCES:

1. Ivaniuk N. D., Shvedchikova I. O. The use of renewable energy sources on railway infrastructure objects. *Technical sciences in Ukraine: modern development trends: Materials of the 3rd All-Ukrainian Scientific and Technical Internet Conference in Izmail-Kyiv*, November 18–19, 2021. Izmail. Danube Institute Publishing House of water transport of the State University of Infrastructure and Technologies, reg. UkrINTEI No. 871 22.10.2021, 2021. P.107-108.
2. In Ukraine, 50% of power grids need immediate overhaul. Available at: <https://ua-energy.org/uk/posts/v-ukraini-50-elektromerezh-potrebuiut-nehainoho-kapremontu>.
3. Vaičiūnas G., Gintautas Bureika G., Lioginas Liudvinavičius L. Expedience of Applying Solar and Wind Hybrid Power-Plants in Railway Infrastructure Objects. *Procedia Engineering*. 2016. 134. P. 9–13. doi: 10.1016/j.proeng.2016.01.030.
4. Law of Ukraine "On Critical Infrastructure" No. 1882-IX dated November 16, 2021. Available at: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1882-20#Text>.
5. Ukraine and Germany are launching a joint project to equip critical infrastructure facilities with renewable energy sources. Available at: <https://www.kmu.gov.ua/news/ukraina-ta-nimechchyna-zapuskaiut-spilnyi-proekt-z-osnashchennia-objektiv-krytychnoi-infrastruktury-vidnovliuvanymy-dzherelamy-enerhii>.
6. Mingliang W., Weiyang W., Wenli D., Huabo C., Chaohua D. and Weirong C. Back-to-back PV generation system for electrified railway and its control strategy. 2017 IEEE Transportation Electrification Conference and Expo, Asia-Pacific (ITEC Asia-Pacific), Harbin, China, 2017. P. 1-6. doi: 10.1109/ITEC-AP.2017.8080799.
7. Deng W., Dai C. A multifunctional energy storage system with fault-tolerance and its hierarchical optimization control in AC-fed railways. *IEEE Trans. Power Del.* 2022. 37. P. 2440–2452. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9536433>.
8. Badea I., Șerban B., Anasiei I., Mitrică D., Olaru M. T., Rabin A., Ciurdaș M. The Energy Storage Technology Revolution to Achieve Climate Neutrality. *Energies*. 2023. 17(1). P. 140. URL: <https://doi.org/10.3390/en17010140>.
9. Bobba S., Mathieux F., Ardente F., Blengini G. A., Cusenza M. A., Podias A., Pfrang A. Life cycle assessment of repurposed electric vehicle batteries: An adapted method based on modelling energy flows. *J. Energy Storage*. 2018, 19. P. 213–225. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352152X18300677?via%3Dihub>.
10. Ji L., Yu Z., Ma J., Jia L., Ning F. The Potential of Photovoltaics to Power the Railway System in China. *Energies*. 2020. 13(15). P. 3844. URL: <https://doi.org/10.3390/en13153844>.
11. Kim S., Lee Y., Moon H.-R. Siting criteria and feasibility analysis for PV power generation projects using road facilities. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 2018. 81. P. 3061–3069.
12. Vasisht M. S., Vashista G., Srinivasan J., Ramasesha S. K. Rail coaches with rooftop solar photovoltaic systems: A feasibility study. *Energy*. 2017. 118. P. 684–691.
13. World's first solar panel 'carpet' on railway tracks may generate electricity. URL: <https://interestingengineering.com/innovation/solar-panel-carpet-on-railway-tracks> (accessed Aug 11 2023).
14. Jan Fabián, Tomáš Binar, Pavel Šafl. Photovoltaic system design for strategic infrastructure and mobile command center. *Acta Innovations*. 2023. no. 46. P. 81-92. URL: <https://doi.org/10.32933/ActaInnovations.46.6>.

15. Asensio F. J., Martín J. I. S., Zamora I., Oñederra O., Saldaña G. and Eguia P. A system approach to harnessing wind energy in a railway infrastructure. IECON 2018 - 44th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, Washington, DC, USA. 2018. P. 1646-1651. doi: 10.1109/IECON.2018.8591777.
16. Kachan Yu., Kuznetsov V. Features of operation of wind power stations as an supplementary source of electricity for non-traction consumers of railway electric mains. Теорія та практика металургії. 2019. № 3. С. 36-41. URL: <https://doi.org/10.34185/tpm.3.2019.06>.
17. Mitrofanov S. V., Kiryanova N. G., Gorlova A. M. Stationary Hybrid Renewable Energy Systems for Railway Electrification: A Review. Energies. 2021. 14. P. 5946. URL: <https://doi.org/10.3390/en14185946>.
18. Shavolkin O., Gerlici J., Shvedchykova I., Kravchenko K. Solar–Wind System for the Remote Objects of Railway Transport Infrastructure. Energies. 2022. 15. P. 6546. URL: <https://doi.org/10.3390/en15186546>.
19. Kampik M., Bodzek K., Piaskowy A., Pilśniak A., Fice M. An Analysis of Energy Consumption in Railway Signal Boxes. Energies. 2023. 16(24). P. 7985. URL: <https://doi.org/10.3390/en16247985>.
20. Iftekharruzaman I., Ghosh S., Basher M. K., Islam M. A., Das N., Nur-E-Alam M. Design and Concept of Renewable Energy Driven Auto-Detectable Railway Level Crossing Systems in Bangladesh. Future Transportation. 2023. 3(1). P. 75-91. URL: <https://doi.org/10.3390/futuretransp3010005>.
21. Instructions on the arrangement and operation of railway crossings. Available at: <https://ips.ligazakon.net/document/REG6921?an=23>
22. Railway crossing. Wikipedia. Available at: Railway crossing - Wikipedia (wikipedia.org)
23. Order of the Ministry of Transport №386 ( z0607-99 ) from 23.07.99. Rules of technical operation of railways of Ukraine. On the approval of the Rules of Technical Operation of Railways of Ukraine. Available at: <https://zakon.rada.gov.ua/go/z0050-97> (date of access 02.01.2024)
24. Lead-acid batteries ABN-72 and ABN-80. "Vladarmet" LLC. Available at: <https://www.vladar.ua/uk/main-2/>
25. Kohlrautz D., Kuhnimhof T. E-Bike Charging Infrastructure in the Workplace—Should Employers Provide It? *Sustainability*. 2023. 15(13). P. 10540. Available at: <https://doi.org/10.3390/su151310540>
26. Electromechatronic system of autonomous electric cart. *Mechanisms of Scientific and Technical Potential Development: Materials of the 3rd International Scientific and Practical Internet Conference*. November 23-24, 2023, Dnipro, Ukraine, 195. P. 141-144. Available at: <http://www.wayscience.com/wp-content/uploads/2023/12/Conference-Proceedings-November-23-24-2023-1.pdf>
27. MEC 4 - Motorised Electric Cart. Available at: <https://www.donfabsandconsillia.com/railway/Rail-utility-vehicles/Motorised-Electric-Cart-MEC4>

Надійшла до редакції 05.10.2023р.