

ТРАНСПОРТ

УДК 656.259

DOI DOI DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2026.2.2/29>

Бех Я.П.

<https://orcid.org/0009-0005-6697-8727>

Український державний університет науки і технологій

РЕЗЕРВУВАННЯ ПРИСТРОЇВ ЗАЛІЗНИЧНОЇ АВТОМАТИКИ ТА ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНИХ СИСТЕМ ЗА РАХУНОК ВПРОВАДЖЕННЯ СОНЯЧНОЇ ЕНЕРГЕТИКИ

Проведено моделювання гібридного живлення із сонячною електростанцією при змінних умовах сонячного випромінювання, зроблено акценти на взаємодії між фотоелектричною системою, акумуляторами, інвертором, контролером і алгоритмом керування.

Для оцінки стабільності системи були проаналізовані різні погодні умови (сонячно, хмарно, шторм, зима).

Результати підтверджують здатність системи підтримувати стабільну напругу постійного струму та безперервне живлення. Зафіксовано майже оптимальне відстеження потужності. Однак його чутливість до шуму і затінення свідчить про необхідність більш адаптивних підходів.

Зимове моделювання показало зниження генерації струму, незважаючи на вищу напругу панелі, що підкреслює важливість адаптивності управління енергією та навантаженням.

Досліджено використання альтернативної енергії на залізничному транспорті, що також дозволяє дотримуватись стратегій збереження енергії та зменшення шкідливих викидів вуглекислого газу.

Досліджено використання тягових потужностей залізниць, які можуть широко використовувати нові та відновлювані джерела енергії, не пов'язаної з тягою, яка також може використовуватись у великих обсягах. Електрична енергія, отримана з нових та відновлюваних джерел енергії, також може використовуватись в широкому спектрі.

Враховано активний розвиток напрямку напругу сонячної енергії у багатьох країнах.

Розглянута модернізація системи електропостачання залізничної автоматики. Пропонується використовувати сонячні панелі та мережевий інвертор з акумулятором або без нього. Розглянуто модернізацію системи резервного живлення залізничної автоматики та телекомунікаційних пристроїв. Проведено оцінку електромагнітної сумісності системи відновлюваної енергетики.

В залізничній енергетичній системі пристрої з автоматизації та телемеханіки належать до першої категорії і вважаються одними з основних споживачів. Тому їх слід забезпечити джерелом гарантованого живлення.

Основна мета роботи – розвинути та продемонструвати модульну, масштабовану сонячну генераторну систему, що підвищує енергетичну стійкість і доступ до чистої розподіленої енергії – особливо для застосування в регіонах як Україна, де надійність енергетичної інфраструктури є критичною.

Ключові слова: сонячні панелі, інвертор, сонячна енергія, залізнична автоматика, симуляція, моделювання, резервне живлення.

Постановка проблеми. Завдяки розробці нових технологій вартість сонячних панелей та перетворювачів швидко знижується. Відновлювана електроенергія в деяких країнах дає електроенергію за тими ж або нижчими цінами, що і традиційні викопні типи палива. Сонячна енергія може стати однією з головних, бо це чисте, невичерпне джерело енергії, і найближчим часом очі-

кується дефіцит палива традиційної енергетики [4, с. 2].

Залізничний транспорт має унікальні конкурентні переваги у використанні нових і відновлюваних джерел енергії [1, с. 201], що проявляються у двох ключових аспектах:

Електроенергія, що використовується для руху поїздів, сприяє диверсифікації джерел виробни-



цтва електроенергії. Окрім традиційних вугільних і гідроенергетичних ресурсів, залізниця може активно використовувати енергію з альтернативних джерел, таких як біомаса, вітер, сонце, морські припливи, геотермальні ресурси, водень тощо.

Залізнична інфраструктура включає велику кількість станцій, що споживають значні обсяги енергії. Це дозволяє ефективно застосовувати електричну та теплову енергію, отриману з нових і відновлюваних джерел, у масштабах всієї галузі.

Таким чином, розвиток використання екологічно чистих енергетичних ресурсів на залізницях сприяє енергозбереженню, зниженню рівня шкідливих викидів і загальному скороченню вуглецевого сліду залізничного транспорту. Це дає змогу залізницям стати лідерами у впровадженні сталих енергетичних рішень для великомасштабних перевезень [3, с. 67].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Сучасні електричні системи все частіше використовують відновлювані джерела енергії джерела енергії як основне або додаткове джерело енергії.

Сонячні та вітрові електростанції допомагають зменшити залежність від традиційне паливо, таке як вугілля або нафта. Проте, на жаль, ефективність сонячної енергетичної системи сильно залежить від кілька факторів, а саме: час доби, хмарність, сезонність, та атмосферні умови. Ці впливи ускладнюють прогнозування виробництва енергії та інтеграція сонячної енергії електростанцій в загальну енергетичну систему. Перевага гібридних сонячних електростанцій полягає у використанні резервних систем зберігання, що компенсують нестабільність генерації. Використання таких конфігурацій потребує оптимізації під умови динамічної змінної сонячної активності.

Окрім того, що сонячні електростанції виробляють екологічно чистішу енергію, ніж дизельна, вони також можуть пропонувати електроенергію за нижчою вартістю порівняно з традиційними джерелами [2, с. 997].

До 2038 року Deutsche Bahn планує повністю перейти на використання відновлюваних джерел енергії [1, с. 202].

У Швейцарії почали встановлювати сонячні батареї безпосередньо на залізничних коліях.

У районі Переяслав-Хмельницька, відкрита найбільша сонячна електростанція в Україні, панелі якої розташовані на дахах будинків.

Потужність електростанції становить 12,4 мегават. За приблизними підрахунками, вона

може виробляти 15 мільйонів кіловат-годин на рік. На зараз, йде використання в приватному бізнесі, але такі проекти можуть бути застосовані й на залізниці [3, с. 66].

Постановка завдання. Метою статті є впровадження резервного живлення посту ЕЦ, який звичайно живиться від тягових підстанцій та автономних високовольтних ліній сигналізації, централізації і блокування 6/10 кВ на електрифікованих залізницях, оскільки є споживачем електроенергії першої особливо важливої категорії. Пости ЕЦ застосовуються для систем диспетчерської станційної централізації, що робить їх важливим вузлом Об'єктів критичної інфраструктури (залізниця).

Сонячні батареї дозволяють забезпечити не тільки резервне електропостачання споживачів залізничної автоматики, але й накопичувати енергію та забезпечувати внутрішні потреби залізничних станцій та постів ЕЦ, такі як освітлення, електродвигуни, охолодження, вентиляція та опалення. Дизель-генератори використовуються як резервні лінії, але з розвитком електромереж вони перестали використовуватися при будівництві нових постів або при модернізації.

Виклад основного матеріалу. Системи електропостачання класифікуються наступним чином:

- за типом джерела електроенергії можна поділити на електрохімічні, дизель-електричні, атомні тощо;
- по конфігурації – централізовані, децентралізовані, комбіновані;
- за родом і частотою струму – постійного струму, змінного струму 50 Гц, змінного струму 400 Гц та ін.;
- за кількістю фаз – одно-, дво-, три-, багатофазні;
- за режимом нейтралі — із ізольованою нейтраллю, глухозаземленою нейтраллю, компенсованою нейтраллю тощо.

За надійністю електропостачання – забезпечення споживачів 1 (1А, 1Б, 1В), 2, 3 категорій надійності, забезпечення змішаних споживачів.

За призначенням – це системи автономного, резервного, аварійного, чергового електропостачання.

За рівнем мобільності – стаціонарні, мобільні, ті, які пересуваються, такі що носяться.

За приналежністю до основного споживача – СЕС автомобіля, танка, гелікоптера, супутника тощо.

Відповідно до проведеного аналізу найчастіше виходять з ладу:

- 30,5 % – магнітні пускачі (контактори);
- 19,6 % – захисні автомати;
- 18,5% – запобіжники;
- 13 % – монтаж;
- 7% – зарядні прис- рої;
- 5,4% – тумблери і пакетні вимикачі.

Головними та необхідними елементами засобів залізничної автоматики та телемеханіки є живильні панелі на постах ЕЦ. У разі їх поломки може статися повна відмова в роботі пристроїв електричної централізації та масових затримок поїздів, що не повинно бути допустиме.

Для перевірки продуктивності фізичної моделі системи відновлюваного електропостачання для залізничної автоматики були обрані сонячні панелі монокристалічні NEON® R 30RS-BB та інвертор Huawei SUN2000-30KTL-M3. Характеристики інвертора Huawei наведені в таблиці 1, а характеристики сонячних панелей наведені в таблиці 2. Вони були обрані для тестування.

Кожен інвертор має свій унікальний діапазон максимальної потужності (УДМП), як зазначено в техніці інвертора. Цей параметр визначає напругу, при якій визначається максимальна точка потужності. Іншим важливим параметром є мінімальна початкова напруга інвертора, яка означає напругу, при якій інвертор ініціює та починає генерувати енергію. У приведеному сценарії діапазон УДМП становить 200-1000 В, мінімальне значення – 200 В. Обидва ці параметри відіграють ключову роль у визначенні конфігурації та кількості з'єднаних сонячних панелей.

Таблиця 1

**Характеристики інвертора
Huawei SUN2000-30KTL-M3**

Параметр	Значення
Клас потужності мережевого інвертора	30000 W
Кількість УДМП-трекерів	4
Максимальна вхідна потужність постійного струму від СП	45000 W
Діапазон постійної напруги від СП	200...1100 V
Робочий діапазон УДМП	200...1000 V
Максимальний струм від СП для кожного входу	26 A
Кількість записів у трекері УДМП	3
Максимальна вихідна потужність динаміка	33000 W
Максимальний вихідний струм змінного струму	48 A
Максимальна ефективність	98.7 %
Робоча температура	-25... +60°C

Температурні коефіцієнти дозволяють розраховувати напругу та потужність, що генеруються сонячними панелями в екстремальних умовах,

припускаючи постійне значення сонячної радіації. В Україні панелі можуть працювати в діапазоні температур від -25 до +60°C, тому розрахунки проводяться для наступних екстремальних умов.

Таблиця 2

**Характеристики сонячної панелі
NEON® R 30RS-BB**

Параметр	Значення
Модель	LG350Q1C-A5
Максимальна потужність (P_{max})	350 W
Максимальна напруга живлення (V_{mp})	36.1 V
Струм при максимальній потужності акумулятора (I_{mp})	9.7 A
Напруга холостого ходу (V_p)	42.7 V
Струм короткого замикання (I_{sc})	10.77 A
Максимальна напруга системи	1000 V
Температурний коефіцієнт I_p, V_{oc}, P_{max}	+0.04 %, -0.24 % / °C

Максимальний струм, який може генерувати одна сонячна панель, можна розрахувати за формулою:

$$I = I_p [1 + (T-25) \alpha / 100], \quad (1)$$

I – значення струму сонячної панелі на 60°C;

I_p – значення струму за стандартних тестових умов, яке зазначено в характеристиці модуля (10.77 A);

T – максимальна температура (60°C);

α – температурний коефіцієнт I_p (0.04 %/C)

$$I = 10,77 \cdot (1 + (60 - 25) \cdot 0,04 / 100) = 10,92 \text{ A}$$

На відміну від струму, напруга, що створюється сонячними панелями, зростає зі зниженням температури. Таким чином, розрахунок проводиться для мінімального значення температури -25°C. При розрахунках враховується температурний коефіцієнт напруги холостого ходу. Максимальне значення напруги розраховується за формулою:

$$V = V_p [1 + (T - 25) \beta / 100], \quad (2)$$

де V – значення напруги при -25°C; V_p – напруга холостого ходу (42,7 В); T – мінімальна робоча температура (-25°C), β – температурний коефіцієнт (-0,24 % / C).

$$V = 42,7 \cdot (1 + (-25 - 25) \cdot (-0,24 / 100)) = 47,8 \text{ В}$$

Розрахунок показує, що для інвертора потужністю 30 кВт перший вхід трекера ДМП не повинен містити більше двох паралельно з'єднаних сонячних панелей, тоді як для другого входу можливе лише послідовне підключення. Це пояснюється тим, що при паралельному з'єднанні струми підсумовуються. При проектуванні та налаштуванні сонячної електростанції необхідно врахо-

увати вказані обмеження щодо кількості та типу підключення сонячних панелей, а також максимальні значення струму та напруги для кожного входу трека УДМП.

Фотоелектрична система являє собою складну комбінацію компонентів, кожен з яких відіграє ключову роль у використанні сонячної енергії та перетворенні її на корисну електричну енергію. Система складається з:

- сонячні панелі: на передньому краї перетворення енергії сонячні панелі є основою системи, використовуючи фотоелектричний ефект для перетворення падаючого сонячного випромінювання на електричну енергію. Їхня основна функція полягає у забезпеченні постійної напруги постійного струму, що формує основу для подальшої роботи системи.

- інвертор з IGBT-транзисторами: центральним елементом функціональності системи є інвертор, побудований з ізольованих біполярних транзисторів (IGBT), який очолює перетворення постійної напруги від сонячних панелей на змінну напругу. IGBT-транзистори, відомі своєю швидкою реакцією та надійними можливостями обробки струму, слугують стрижнем у цьому трансформаційному процесі.

- ШІМ-контролер: ШІМ-контролер виступає в ролі керуючої системи, генеруючи сигнали широтно-імпульсної модуляції (ШІМ) для регулювання IGBT-транзисторів. Модулюючи ширину імпульсів, ці сигнали ретельно диктують інтервали вмикання та вимикання транзисторів, тим самим керуючи контрольованою зміною вихідної напруги та струму.

- LCL-фільтр: розташований після інвертора, LCL-фільтр виконує вирішальну роль в уточненні вихідної змінної напруги та стабілізації цілісності сигналу системи. Його ретельний механізм фільтрації забезпечує ослаблення небажаних компонентів, сприяючи уточненню та стабільності вихідного сигналу.

- підвищувальний перетворювач постійного струму в постійного струму: є важливим інстру-

ментом оптимізації, підвищувальний перетворювач постійного струму в постійного струму сприяє підвищенню рівнів напруги, оптимізуючи вихідні параметри системи для оптимальної продуктивності. Завдяки вмілому керуванню рівнями напруги цей пристрій сприяє безперебійній передачі максимальної вихідної потужності.

Висновки. Використовуючи симуляцію для моделювання та аналізу системи, були отримані результати, що дають детальне розуміння її операційної динаміки. Ці змодельовані результати ретельно поєднуються з реальними вимірюваннями, що дозволяє провести комплексну перевірку характеристик продуктивності системи. Завдяки такому інтегративному підходу отримується глибше розуміння поведінки та ефективності системи, що закладає основу для прогресу у використанні сонячної енергії та сталого виробництва електроенергії.

Таким чином, результати моделювання підтверджують ефективність гібридної фотоелектричної системи з точки зору стабільного, енергоефективного електропостачання, стійкого при змінних сонячних умовах. Запропонована модель може служити як фундамент для подальших досліджень і розробок автономних та резервних систем живлення, адаптованих до сучасних екологічних умов.

Проект показав можливість створення сталого і ефективного джерела «зеленої» енергії, яке може працювати навіть в зимові умови нестачі сонячного світла.

Зимовий режим показав, що система залишалася працездатною навіть за низького сонячного випромінювання. Контролер ефективно компенсує слабку генерацію, а акумулятор згладжує різницю між денним виробництвом і вечірнім споживанням.

Взаємодія з мережею забезпечує гнучкий баланс управління: надлишок енергії направляється в загальну мережу, а в разі нестачі система автоматично переходить на зовнішнє джерело.

Список літератури:

1. Бех Я. П. Використання сонячної енергії для живлення залізничних стрілочних електроприладів [Текст] / Бех Я. П. Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського. Серія: «Технічні науки», Том 36 (75) № 2, 2025 Частина 1, С. 200-204. DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2025.2.1/29>
2. J. A. Aguado, A. J. Sanchez-Racero, S. de la Torre. Optimal Operation of Electric Railways with Renewable Energy and Electric Storage Systems // IEEE Transactions on Smart Grid. – 2018. – Vol. 9. – I. 2. – Pp. 993–1001. DOI: 10.1109/TSG.2016.2574200.
3. Бех Я. П. Аналіз резервних систем електроживлення пристроїв залізничної автоматики [Текст] / Системи та технології (право наступник наукового журналу «Вісник Академії митної служби України». Серія: «Технічні науки»), № 2 (66), 2023, С. 66-73. DOI: <https://doi.org/10.32782/2521-6643-2023.2-66.8>.

4. Bekh Ya. Dynamic Simulation of a Hybrid Solar Power System Under Fluctuating Irradiance Conditions, M. Serchenko, Y. Bekh and T. Serdiuk, 2025 IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering and 2025 IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe (EEEIC / I&CPS Europe), Chania, Crete, Greece, 2025, pp. 1-5, doi: 10.1109/EEEIC/ICPSEurope64998.2025.11169086

Bekh Ya.P. RESERVATION OF RAILWAY AUTOMATION DEVICES AND TELECOMMUNICATION SYSTEMS FOR IMPLEMENTATION OF SOLAR ENERGY

Modeling of hybrid power with a solar power plant under variable conditions of solar radiation is carried out, emphasis is placed on the interaction between the photovoltaic system, batteries, inverter, controller and control algorithm.

Various weather conditions (sunny, cloudy, stormy, winter) were analyzed to assess the stability of the system.

The results confirm the system's ability to maintain stable DC voltage and uninterrupted power. Fixed near optimal power tracking. However, its sensitivity to noise and shading suggests the need for more adaptive approaches.

Winter simulations showed reduced current generation despite higher panel voltages, highlighting the importance of adaptive power and load management.

The use of alternative energy in railway transport has been studied, which also allows for energy conservation strategies and reduction of harmful carbon dioxide emissions.

The use of traction capacities of railways, which can make extensive use of new and renewable sources of non-traction energy, which can also be used in large volumes, is explored. Electric energy obtained from new and renewable energy sources can also be used in a wide spectrum.

The active development of solar energy in many countries is taken into account.

The modernization of the power supply system of railway automation is considered. It is suggested to use solar panels and grid inverter with or without battery. The modernization of the backup power supply system of railway automation and telecommunication devices was considered. An assessment of the electromagnetic compatibility of the renewable energy system was carried out.

In the railway power system, automation and telemechanics devices belong to the first category and are considered one of the main consumers. Therefore, they should be provided with a guaranteed power source.

The main goal of the work is to develop and demonstrate a modular, scalable solar generator system that increases energy sustainability and access to clean, distributed energy – especially for applications in regions like Ukraine where the reliability of energy infrastructure is critical.

Keywords: solar panels, inverter, solar energy, railway automation, simulation, modeling, backup power.

Дата першого надходження статті до видання: 18.02.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 13.03.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті 11.05.2026