

ЗМІЙ С. О., к.т.н., доцент,  
ХІСМАТУЛІН В. Ш., к.т.н., професор,  
СІРОКЛИН І. М., к.т.н., доцент,  
СОСУНОВ О. О., к.т.н., доцент  
(Український державний університет залізничного транспорту)



Оцінювання потенціалу впровадження альтернативних джерел енергії для залізничної автоматики в Україні

*У статті розглянуто актуальну науково-прикладну задачу підвищення стійкості електропостачання об'єктів залізничної автоматики України в умовах воєнних дій, техногенних загроз і системних порушень роботи централізованої енергосистеми. Показано, що традиційна модель гарантованого електропостачання пристроїв сигналізації, централізації та блокування (СЦБ), побудована на двопробному живленні від зовнішніх мереж із резервуванням дизель-генераторними агрегатами, формально відповідає вимогам I категорії надійності, однак на практиці виявляє обмежену здатність щодо функціонування в умовах тривалих масових відключень електроенергії та порушення логістики пального.*

*Обґрунтовано необхідність переходу від парадигми надійності до парадигми стійкості (resilience), яка передбачає здатність об'єктів СЦБ зберігати працездатність в автономному режимі протягом тривалого часу та швидко відновлювати функціонування після зовнішніх впливів. Як основний інструмент такого переходу розглянуто впровадження децентралізованих гібридних систем енергозабезпечення на основі відновлюваних джерел енергії з використанням фотоелектричних станцій, малих вітроенергетичних установок і систем накопичення енергії.*

*Проаналізовано розрахункові електричні навантаження постів електричної централізації, визначено характер базових і пікових режимів споживання, а також обґрунтовано вимоги щодо потужності інверторного обладнання та ємності акумуляторних батарей для забезпечення автономної роботи протягом не менше 48 годин. Оцінено сонячний і вітровий енергетичний потенціал України з урахуванням регіональних і сезонних особливостей, що дало змогу сформулювати диференційовані рекомендації щодо конфігурації гібридних систем для різних кліматичних зон.*

*Показано доцільність використання двосторонніх фотоелектричних модулів на основі технології N-type TOPCon із тонною архітектурою з'єднання елементів, які забезпечують підвищену ефективність у зимовий період, крацу роботу за умов слабого освітлення та підвищену стійкість до вібраційних навантажень, характерних для залізничної інфраструктури. Запропонована методика дає змогу підвищити енергетичну автономність об'єктів СЦБ, знизити експлуатаційні витрати і забезпечити додатковий екологічний ефект за рахунок скорочення викидів вуглекислого газу.*

**Ключові слова:** залізнична автоматика, електропостачання I категорії, відновлювані джерела енергії, фотоелектричні станції, вітроенергетичні установки, системи накопичення енергії, гібридні енергосистеми, стійкість критичної інфраструктури.

## Вступ

Сучасна залізнична інфраструктура України функціонує в умовах безпрецедентних викликів, спричинених цілеспрямованими атаками на енергетичні об'єкти. Традиційна модель живлення постів електричної централізації (ЕЦ), що спирається на централізовану мережу, продемонструвала критичну вразливість через одночасне знеструмлення обох незалежних фідерів. Перетворення дизель-генераторним агрегатом (ДГА) енергії на основне джерело створює логістичні ризики щодо постачання пального та демаскує розташування об'єктів через тепловий і шумовий слід. Необхідним є негайний

перехід від концепції надійності до парадигми стійкості (resilience) через впровадження децентралізованих джерел [1–3, 7].

Практичне завдання полягає в забезпеченні гарантованої автономності систем СЦБ як фундаменту безпеки руху поїздів. Модернізація через інтеграцію сонячної генерації та систем накопичення (BESS) дає змогу об'єктам зберігати функціональність навіть у режимі «енергетичного острова».

**1. Принципи функціонування та категоризація надійності електропостачання пристроїв СЦБ**

## ІНФОРМАЦІЙНО-КЕРУЮЧІ СИСТЕМИ НА ЗАЛІЗНИЧНОМУ ТРАНСПОРТІ

Системи сигналізації, централізації та блокування (СЦБ) є фундаментом безпеки руху на залізничному транспорті. Безперебійна та коректна робота безпосередньо впливає на запобігання аварійним ситуаціям, забезпечення встановленої пропускнуєї спроможності дільниць і виконання графіка руху поїздів. Зважаючи на це, нормативні документи України встановлюють найвищі вимоги щодо надійності електропостачання цих систем. Детальні вимоги щодо електропостачання пристроїв СЦБ конкретизовані в галузевих інструкціях, зокрема «Інструкції з технічного обслуговування і ремонту пристроїв електропостачання систем сигналізації, централізації та блокування (СЦБ)» ЦЕ-0033. За цими документами та загальнодержавними нормами, пристрої СЦБ належать до споживачів електричної енергії І категорії надійності. Це означає, що перерва в їхньому електропостачанні може призвести до загрози життю людей, значних матеріальних збитків і порушення функціонування критичної інфраструктури держави. Більш того, найбільш відповідальні об'єкти, такі як пости ЕЦ на станціях із кількістю стрілок понад 30, а також диспетчерські центри, виділені в особливу групу І категорії. Для таких споживачів необхідно забезпечити безперебійне живлення від трьох незалежних взаємно резервованих джерел. Два з них є зовнішніми джерелами (фідерами), а третє – місцевим автономним джерелом, зазвичай ДГА [4–6].

Отже, уся архітектура системи електроживлення СЦБ побудована за принципом глибокого резервування для мінімізації ймовірності знеструмлення. Будь-яка модернізація чи впровадження нових технологій мають не просто відповідати цим вимогам, а й посилювати їх, особливо в умовах нових загроз, що не були повною мірою враховані під час розроблення чинної нормативної бази.

## 2. Архітектура типової схеми живлення поста ЕЦ

Стандартна схема електропостачання пристроїв СЦБ на залізницях України є багаторівневою системою, розробленою для забезпечення максимальної надійності відповідно до вимог І категорії. Вона включає три основні ешелони живлення: основний, резервний, аварійний.

**Основне живлення** реалізовано за схемою двопробеневого живлення від щонайменше двох незалежних джерел. Зазвичай це дві високовольтні повітряні лінії (ПЛ) напругою 10 кВ (у деяких випадках 35 кВ), що проходять уздовж залізничних колій. Ці лінії мають двобічне живлення від різних підстанцій, що знижує ймовірність їхнього одночасного знеструмлення. На електрифікованих дільницях живлення ПЛ СЦБ зазвичай здійснюване від тягових підстанцій, а на неелектрифікованих – від підстанцій регіональних енергосистем або інших відомств. На постах ЕЦ напругу 10 кВ знижують до

робочих рівнів (380/220 В) за допомогою трансформаторних підстанцій. Перемикання між двома основними фідерами відбувається автоматично за допомогою пристроїв автоматичного вводу резерву (АВР).

**Резервне живлення** забезпечено автономним джерелом, яке вводять у дію у випадку зникнення напруги на обох основних фідерах. Стандартним рішенням для цього є дизель-генераторний агрегат із системою автоматичного запуску. Критичною вимогою є забезпечення запасу пального, який має гарантувати безперервну роботу ДГА протягом щонайменше двох діб.

**Аварійне живлення** є останнім порогом захисту і призначене для забезпечення безперебійності роботи пристроїв СЦБ на короткий проміжок часу, необхідний для перемикання між фідерами або запуску та виходу на робочий режим ДГА. Цю функцію виконує акумуляторна батарея (АБ), яка постійно знаходиться в буферному режимі. Вона миттєво бере на себе навантаження за будь-якого зникнення напруги змінного струму, живлячи найбільш відповідальні кола (релейні схеми, апаратуру керування) через перетворювачі DC/AC. Найчастіше використовують стаціонарні кислотні акумулятори.

Отже, існуюча архітектура є класичною схемою гарантованого живлення, що добре зарекомендувала себе в умовах стабільної роботи централізованої енергосистеми. Однак її ефективність суттєво залежить від пошкодження енергоінфраструктури, надійності зовнішніх джерел і логістики пального для ДГА.

## 3. Розрахункові навантаження та енергоспоживання постів ЕЦ

Енергоспоживання поста електричної централізації є комплексним і складається з декількох важливих компонентів, що мають різний режим роботи.

Складові навантаження поста ЕЦ:

1. Релейна апаратура та схеми керування. Це основа переважної більшості систем СЦБ, що працює в безперервному режимі. Навантаження від релейних стативів є відносно стабільним і складає значну частину базового енергоспоживання поста.

2. Стрілочні електроприводи. Це найбільш потужні, але короткочасно працюючі споживачі. Переведення однієї стрілки триває кілька секунд, але в моменти пікової маневрової роботи може відбуватися одночасне переведення кількох стрілок. Типовий електродвигун стрілочного переводу, наприклад МСП-0,25, має номінальну потужність 250 Вт, але його пускові струми значно вищі.

3. Рейкові кола. Системи контролю вільності ділянок колії, які споживають енергію постійно. Потужність одного рейкового кола є невеликою (близько 11 Вт), але на станції їх можуть бути десятки.

4. Світлофори. Споживання залежить від типу ламп (лампи розжарювання чи світлодіодні) і сигнального показання. Світлодіодні світлофори є значно більш енергоефективними.

5. Допоміжні системи. Освітлення приміщень поста ЕЦ, опалення (у зимовий період), вентиляція, апаратура зв'язку та робочі місця персоналу.

Для прикладу наведемо орієнтовний розрахунок навантаження для типового поста ЕЦ малої станції (до 15 стрілок). Загальне базове навантаження (реле, рейкові кола, чергове освітлення) можна оцінити в межах 1.5-2.0 кВт. Пікове навантаження виникає під час переведення стрілок (потужність двигуна 250-600 Вт, з урахуванням пускових струмів пікова потужність може сягати 1-1.5 кВт на привод) загальна потужність може короткочасно зростати до 5-7 кВт. Середньодобове споживання такого об'єкта з урахуванням роботи допоміжних систем оцінюють у діапазоні 40-60 кВт·год. Ці розрахункові дані є основою для вибору потужності резервного ДГА, а в нашому випадку – для визначення необхідної потужності сонячної електростанції та ємності системи накопичення енергії.

#### 4. Вразливості поточної централізованої моделі в умовах воєнних дій і техногенних ризиків

Існуюча система електропостачання СЦБ, розроблена в умовах відносно стабільної та передбачуваної роботи національної енергосистеми, продемонструвала низку критичних вразливостей в умовах повномасштабних воєнних дій. Цілеспрямовані атаки на енергетичну інфраструктуру України виявили фундаментальну слабкість централізованої моделі.

Із лютого 2022 року енергетична інфраструктура, зокрема та, що належить АТ «Укрзалізниця», стала ціллю систематичних атак. Зафіксовано численні удари по об'єктах у Сумській, Полтавській, Дніпропетровській, Харківській та інших областях. За звітом Світового банку, транспортний сектор України зазнав колосальних збитків, а залізнична інфраструктура становить значну їхню частину. Ці атаки призводять до масштабних і довготривалих відключень електроенергії, що безпосередньо впливає на роботу СЦБ. Основна проблема полягає в тому, що обидва незалежні фідери, від яких живляться пости ЕЦ, часто підключені до підстанцій, що входять до єдиної регіональної енергосистеми. Системна атака на головні вузли цієї системи (генеруючі потужності,

магістральні підстанції) призводить до одночасного знеструмлення обох фідерів на невизначений термін.

У таких умовах єдиним джерелом живлення стає ДГА. Це кардинально змінює його роль. Із резервного джерела, що працює кілька годин на рік, він перетворюється на основне джерело, що має працювати в безперервному режимі днями, а іноді й тижнями. Це породжує каскад нових ризиків.

Виникає критична потреба в регулярному та безперебійному постачанні дизельного пального, що в умовах бойових дій, пошкоджених доріг і дефіциту палива стає надскладним завданням. Робота в безперервному режимі значно прискорює знос дизель-генератора, збільшує ймовірність технічних відмов і потребує значно частішого технічного обслуговування. Вартість електроенергії, виробленої ДГА, у разі перевищує вартість мережевої, що призводить до значного зростання експлуатаційних витрат. Робота ДГА також створює шум і тепловий слід, що може демаскувати розташування критично важливих об'єктів інфраструктури.

Отже, виникла фундаментальна суперечність між нормативною вимогою щодо абсолютної надійності живлення СЦБ і практичною вразливістю централізованої моделі, яка спирається на стабільність зовнішньої енергосистеми. Існуюча система, що формально відповідає стандартам, розробленим для мирного часу, на практиці виявилася крихкою перед сучасними гібридними загрозами. Це потребує переходу від парадигми надійності (здатності працювати без збоїв у стабільних умовах) до парадигми стійкості (здатності витримувати зовнішні шоки, зберігати функціональність в автономному режимі та швидко відновлюватися). Впровадження децентралізованих джерел енергії є важливим кроком на цьому шляху.

5. Оцінювання потенціалу впровадження альтернативних джерел енергії для об'єктів АТ «Укрзалізниця»

Перехід до децентралізованої моделі енергозабезпечення об'єктів СЦБ потребує ретельного оцінювання потенціалу доступних відновлюваних джерел енергії (ВДЕ) на території України. Основними технологіями, що розглядають, є сонячна та вітрова енергетика, кожна з яких має свої переваги та обмеження в контексті застосування на залізничній інфраструктурі.

#### Потенціал сонячної енергетики

Україна має сприятливі кліматичні умови для розвитку сонячної енергетики. За даними «Атласу енергетичного потенціалу відновлюваних джерел енергії України», середньорічна кількість сумарної сонячної радіації, що надходить на 1 м<sup>2</sup> горизонтальної поверхні, становить від 1070 кВт·год/м<sup>2</sup> у північних областях до понад 1400

## ІНФОРМАЦІЙНО-КЕРУЮЧІ СИСТЕМИ НА ЗАЛІЗНИЧНОМУ ТРАНСПОРТІ

кВт·год/м<sup>2</sup> на півдні країни, зокрема в Криму та на узбережжях Чорного і Азовського морів (рис. 1) [8].

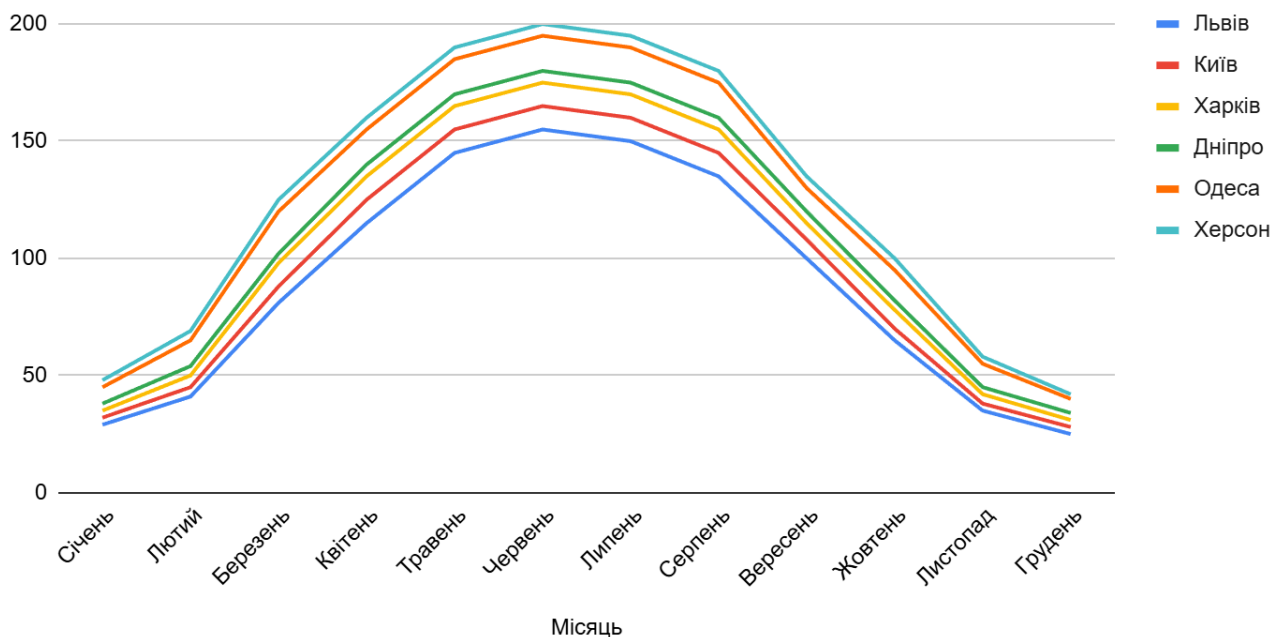


Рис. 1. Середньомісячна генерація електроенергії з 1 м<sup>2</sup> сонячних панелей

Для об'єктів залізничної інфраструктури, які рівномірно розподілені по всій території країни, важливо аналізувати не лише загальнорічні, а й сезонні та добові коливання сонячної інсоляції. Наприклад, для центральних регіонів (м. Київ) середньодобова сумарна сонячна радіація варіюється від мінімальних значень 0.86-1.07 кВт·год/м<sup>2</sup> у грудні-січні до максимальних 5.31-5.34 кВт·год/м<sup>2</sup> у червні-липні. Цей показник, також відомий як кількість пікових сонячних годин, є основним для розрахунку потенційної генерації фотоелектричної станції (ФЕС). Сезонна нерівномірність є головним викликом, який необхідно враховувати для проектування гібридних систем, оскільки зимова генерація може бути в п'ять-шість разів нижчою за літню.

Важливою перевагою для розміщення ФЕС на об'єктах АТ «Укрзалізниця» є наявність значних потенційних площ. Пости ЕЦ, вокзали, адміністративні та технічні споруди мають дахи, які можуть бути використані для встановлення сонячних панелей.

На багатьох станціях є вільні земельні ділянки, придатні для розміщення наземних ФЕС. Залізничні колії мають широкі смуги відведення, які можуть бути використані для встановлення сонячних панелей уздовж колій, що є перспективною світовою практикою.

Ураховуючи високий потенціал інсоляції та наявність придатних площ, сонячна енергетика є

найбільш перспективною та універсальною технологією для децентралізації живлення об'єктів СЦБ по всій території України.

На сьогодні світова фотоелектрична промисловість перейшла до масового виробництва N-тип елементів, що поступово витісняють застарілу технологію P-типу PERC.

PERC (Passivated Emitter and Rear Cell) тривалий час була стандартом завдяки низькій ціні. Проте її ефективність обмежена 23-24 %, а панелі мають вищий рівень щорічної деградації (0.6-0.8 %) і чутливість до світлоіндукованої деградації (LID).

Технологія TOPCon (Tunnel Oxide Passivated Contact) є лідером ринку (близько 70 % виробництва у 2024 році). Використовує ультратонкий шар оксиду для зменшення втрат на рекомбінацію електронів. ККД серійних модулів сягає 24-25 %, кращий температурний коефіцієнт (-0.30 %/°C), вищий показник двосторонності (85 %), що критично для вловлювання відбитого світла [9–11].

Технологія HJT (Heterojunction Technology) поєднує кристалічний і аморфний кремній, забезпечуючи найвищу ефективність (>26 %) і найкращу роботу за високих температур (-0.24 %/°C). Проте вища вартість (+15-25 %) і складність виробництва поки обмежують її використання преміальними проектами.

## ІНФОРМАЦІЙНО-КЕРУЮЧІ СИСТЕМИ НА ЗАЛІЗНИЧНОМУ ТРАНСПОРТІ

Shingled (гонтове з'єднання) технологія, де сонячні комірки нарізані смужками та з'єднані внахлест за допомогою гнучкого струмопровідного клею (ECA). Це дає змогу прибрати мідні шини (busbars), збільшити площу поглинання світла та кардинально підвищити стійкість модуля до механічних напруг.

### Потенціал вітрової енергетики

Вітрова енергетика є другим за значущістю напрямом ВДЕ в Україні. За «Атласом», країна має значний вітровий потенціал, особливо в Карпатському та Кримському регіонах, а також на узбережжях Чорного і Азовського морів. Для ефективної роботи промислових вітроелектростанцій (ВЕС) необхідна середньорічна швидкість вітру понад 5 м/с.

Для потреб живлення окремих об'єктів СЦБ ідеться не про великі ВЕС, а малі вітроенергетичні установки (ВЕУ) потужністю до 50 кВт. Для їхньої роботи достатньо середньорічної швидкості вітру близько 4.5-5 м/с. Такі умови наявні на значній частині території України, особливо на відкритих ділянках, характерних для залізничних перегонів [12].

Таблиця 1

Потенціал ВЕУ

Регіон	Осінь-зима (жовтень-березень)	Весна-літо (квітень-вересень)
Причорномор'я / Приазов'я	Дуже високий потенціал (стабільні та сильні вітри)	Помірний потенціал
Карпатський регіон	Високий потенціал (особливо на перевалах і вершинах)	Помірний потенціал
Центральні та Східні регіони	Помірний потенціал	Низький потенціал

### 6. Порівняльний аналіз технологій для залізничної інфраструктури

Вибір оптимальної технології для живлення об'єктів СЦБ має бути базований на специфічних умовах їх експлуатації: високі вимоги щодо надійності, розподілений характер об'єктів, обмеженість простору та необхідність мінімального обслуговування.

Сонячні електростанції мають високу надійність через відсутність рухомих частин, мінімальні вимоги щодо обслуговування (періодичне очищення), безшумність, модульність (легко масштабувати), передбачуваність генерації в короткостроковій перспективі. Проте мають залежність від сонячного світла (відсутність генерації вночі), значну сезонну та добову нерівномірність

Головною перевагою вітрогенерації є її здатність виробляти електроенергію незалежно від часу доби, а також вища продуктивність в осінньо-зимовий період, коли сонячна активність є мінімальною (табл. 1). Це створює потенціал для синергії та взаємної компенсації з використанням вітрових і сонячних установок у складі єдиної гібридної системи.

Однак впровадження ВЕУ на об'єктах СЦБ має і суттєві обмеження. ВЕУ потребують вільного простору та відсутності перешкод (будівель, лісосмуг), що обмежує їх використання на станціях, розташованих у щільній забудові. Наявність рухомих частин потребує більш складного та регулярного технічного обслуговування порівняно з сонячними панелями. Вібрації від роботи ВЕУ можуть негативно впливати на чутливу апаратуру СЦБ та колійну інфраструктуру. Робота вітрогенератора створює шум, що може бути проблемою для розміщення поблизу житлових зон.

генерації, потребу у відносно великих площах для встановлення.

Аналіз потенціалу відновлюваної енергетики для об'єктів залізничної автоматики України демонструє значну територіальну нерівномірність, що обумовлює необхідність диференційованого підходу щодо проектування гібридних систем енергозабезпечення. Основні відмінності в генерації визначені широтою розташування, кліматичними особливостями регіону та сезонними коливаннями сонячної інсоляції.

Вітроенергетичні установки здатні генерувати електроенергію цілодобово, вища генерація в зимовий період, менша площа безпосередньо під установкою. Проте мають меншу надійність через наявність механічних вузлів, потребу в регулярному ТО, шум і

## ІНФОРМАЦІЙНО-КЕРУЮЧІ СИСТЕМИ НА ЗАЛІЗНИЧНОМУ ТРАНСПОРТІ

вібрації, залежність від стабільності вітру, вищі вимоги щодо фундаменту і монтажу.

На основі цього порівняння можна зробити висновок, що для переважної більшості постів ЕЦ та інших об'єктів СЦБ сонячні електростанції є більш доцільним та універсальним базовим рішенням. Вони краще відповідають вимогам щодо надійності та низьких експлуатаційних витрат.

Водночас потенціал ВДЕ в Україні є достатнім, але нерівномірним, що диктує необхідність розроблення регіонально адаптованої стратегії впровадження. Універсальне рішення «тільки ФЕС» може бути неоптимальним для всіх регіонів. Наприклад, на відкритих ділянках у південних і західних областях, де стабільний вітровий потенціал, комбінація сонячної та вітрової генерації може значно згладити сезонні та добові коливання. Така гібридна модель, де базовим ВДЕ є сонячні панелі, а на ділянках із високим вітровим потенціалом вони доповнені малими ВЕУ, створює синергетичний ефект і підвищує загальний коефіцієнт заміщення мережевої енергії, наближаючи об'єкт до повної енергетичної автономності.

Для забезпечення гарантованого живлення станційної автоматики в Україні найбільш доцільним є використання двосторонніх (Bifacial) модулів на основі N-type TOPCon з архітектурою Shingled. Ця технологія демонструє найкращу ефективність в умовах слабого освітлення (low-light), характерного для українських зим, генеруючи на 3-5 % більше енергії на світланку і в сутінках порівняно з PERC. Залізничний баласт (щебінь) і сніговий покрив мають високий коефіцієнт відбиття (альbedo). Двосторонні TOPCon модулі здатні вловлювати це світло тильною стороною, що дає додатковий приріст генерації до 30 % без збільшення площі. Крім того, традиційні панелі з паяними шинами схильні до появи мікротріщин в умовах вібрації. Гонтове з'єднання елементів завдяки своїй гнучкості та відсутності жорстких шин є набагато стійкішим до вібраційних і динамічних навантажень, що підтверджено випробуваннями на надійність [9–11].

#### Обґрунтування та оцінювання найдоцільнішої технології для завдань залізниці

Ефективність функціонування постів електричної централізації в автономному режимі визначена сукупним потенціалом сонячної та вітрової енергії, що мають виражену регіональну специфіку. Для північних областей (умовна станція на 15 стрілок у Київській області) характерним є критичне

зниження сонячної генерації взимку, що потребує інтеграції вітроенергетичних установок для балансування системи. На півдні (Херсонська область) високий рівень інсоляції дає змогу мінімізувати площу фотоелектричних панелей, проте стабільний вітровий потенціал прибережних зон робить використання ВЕУ економічно доцільним для цілодобового підзаряджання систем накопичення.

Розрахунок встановленої потужності фотоелектричної станції (ФЕС) базований на необхідності покриття середньодобового споживання

$$W_{\text{доба}} \approx 50 \text{ кВт}\cdot\text{год};$$

$$P_{\text{ФЕС}} = \frac{W_{\text{доба}}}{H_{\text{інс}} \cdot \eta},$$

де  $H_{\text{інс}}$  – кількість пікових сонячних годин, що для півночі взимку становить  $\approx 1.0$  год, а для півдня  $\approx 1.5$  год;

$\eta$  – коефіцієнт корисної дії системи ( $\approx 0.85$ ).

Розраховують виробіток вітроенергетичної установки потужністю до 50 кВт за формулою

$$P_w = 0.5 \cdot \rho \cdot A \cdot v^3 \cdot C_p,$$

де  $\rho$  – щільність повітря;

$A$  – площа ометання ротора;

$v$  – швидкість вітру, яка для ефективної роботи малих ВЕУ має становити не менше 4.5-5 м/с;

$C_p$  – коефіцієнт використання потужності вітру [12].

Розміщують генеруюче обладнання на даху поста ЕЦ і критих пасажирських платформах для забезпечення децентралізації та стійкості до пошкоджень. На умовній станції з 15 стрілками встановлюють 40-45 фотоелектричних модулів Bifacial типу, що дають змогу вловлювати відбите світло від щебеню та снігу, додаючи до 30 % генерації. Малу ВЕУ вертикального типу монтують на технічних щоглах або краях платформ, де забезпечена відсутність перешкод для вітрових потоків (рис. 2).



Рис. 2. Розміщення альтернативних джерел на даху поста ЕЦ

Для підвищення ефективності в умовах півночі пропонувано використання систем ручного сезонного регулювання кута нахилу панелей  $\alpha$ . Це дає змогу персоналу двічі на рік оптимізувати кут:

– взимку кут встановлений на рівні  $60 - 65^\circ$ , що максимізує поглинання низького сонця та запобігає накопиченню снігового покриву;

– влітку кут змінений на  $30 - 35^\circ$  для перпендикулярного падіння променів у зеніті.

Змінюють кут електромеханіки СЦБ згідно з регламентом технічного обслуговування.

Для детального порівняльного аналізу та розроблення методичних рекомендацій з енергозабезпечення постів електричної централізації (ЕЦ) на 15 стрілок розраховано параметри гібридної автономної системи для декількох міст України. В основі розрахункової моделі лежить вимога щодо забезпечення повної автономності об'єкта протягом 48 годин за умови середньодобового енергоспоживання

$$W_{\text{доба}} = 50 \text{ кВт}\cdot\text{год.}$$

### Методологія регіонального розрахунку

Таблиця 2

Результати розрахунків для міст України

Місто	$H_{\text{рік}}$ , год/день	$P_{\text{ФЕС}}$ , кВт	$C_{\text{СНЕ}}$ , кВт·год	$P_{\text{інв}}$ , кВт	Доцільність ВЕС
Львів	2.95	20.0	111.1	10	Висока (зимовий дефіцит)

Для кожного міста визначено середньорічний показник пікових сонячних годин  $H_{\text{рік}}$  на основі даних енергетичного потенціалу та сезонних графіків генерації. Встановлену потужність фотоелектричної

станції розраховано за формулою  $P_{\text{ФЕС}} = \frac{W_{\text{доба}}}{H_{\text{рік}} \cdot \eta}$ , де

коефіцієнт корисної дії системи  $\eta$  прийнято на рівні 0.85 для врахування втрат для перетворення та передавання енергії.

Ємність системи накопичення енергії (СНЕ) для всіх локацій залишається незмінною, оскільки вона визначена виключно графіком навантаження та вимогою щодо автономності:

$$C_{\text{СНЕ}} = \frac{50 \cdot 2}{0.9} \approx 111.1 \text{ кВт}\cdot\text{год}, \text{ де } 0.9 -$$

допустима глибина розряду акумуляторів LiFePO4.

Потужність інверторного обладнання  $P_{\text{інв}}$  вибрано на рівні 10 кВт для надійного покриття пікового навантаження 7 кВт з одночасним переведенням стрілочних приводів. Результати розрахунку для різних міст України зведено до табл. 2.

## ІНФОРМАЦІЙНО-КЕРУЮЧІ СИСТЕМИ НА ЗАЛІЗНИЧНОМУ ТРАНСПОРТІ

Київ	3.22	18.3	111.1	10	Середня (балансування)
Харків	3.42	17.2	111.1	10	Середня (зимовий вітер)
Дніпро	3.70	15.9	111.1	10	Низька
Одеса	3.97	14.8	111.1	10	Висока (прибережний вітер)
Херсон	4.13	14.2	111.1	10	Середня (стабільність)

Результати демонструють суттєву територіальну нерівномірність сонячного потенціалу, що потребує диференційованого підходу щодо проєктування систем залізничної автоматики. Для північних і західних дільниць (Львів, Київ) характерним є критичне зниження інсоляції в зимовий період, що робить впровадження малої ВЕС обов'язковим елементом для підтримки заряду СНЕ в умовах короткого світлового дня.

На півдні (Одеса, Херсон) висока інтенсивність сонячної радіації дає змогу оптимізувати площі розміщення фотопанелей на дахах постів ЕЦ, використовуючи вивільнені площі критих платформ для встановлення двосторонніх bifacial модулів, які ефективно вловлюють відбите світло від щебеню. Для об'єктів у Харкові та Львові стратегічно важливим є застосування систем ручного регулювання кута нахилу панелей, що дає змогу силами персоналу СЦБ двічі на рік змінювати кут від  $35^{\circ}$  до  $65^{\circ}$ , значно підвищуючи ефективність системи у найбільш складні зимові місяці.

Використання наведеної методики допомагає не лише забезпечити гарантовану стійкість критичної інфраструктури АТ «Укрзалізниця», а й досягти значного екологічного ефекту через скорочення викидів  $CO_2$  на рівні понад 11 т/р. для кожної модернізованої станції.

## Список використаних джерел

1. OECD. Resilience of Critical Infrastructure. Paris: OECD Publishing, 2022. [https://www.oecd.org/en/publications/government-at-a-glance-2025\\_0efd0bcd-en/full-report/ensuring-the-resilience-of-critical-infrastructure\\_896f59cf.html](https://www.oecd.org/en/publications/government-at-a-glance-2025_0efd0bcd-en/full-report/ensuring-the-resilience-of-critical-infrastructure_896f59cf.html).
2. World Bank; Government of Ukraine; European Union; United Nations. Second Ukraine Rapid Damage and Needs Assessment (RDNA2):

February 2022 - February 2023 (English). Washington, D.C.: World Bank Group. <http://documents.worldbank.org/curated/en/099184503212328877>.

3. ENTSO-E. Power System Resilience and Security. Brussels, 2022. 42 p.
4. Правила улаштування електроустановок. Київ: Міненерговугілля, 2017. 617 с.
5. Правила технічної експлуатації залізниць України: затв. Наказом Міністерства транспорту України від 20.12.1996 р. № 411. Київ: Дельта, 2025. 256 с.
6. Інструкція з технічного обслуговування і ремонту пристроїв електропостачання систем сигналізації, централізації та блокування (СЦБ): ЦЕ-0033: затв. Наказом Укрзалізниці від 09.02.2012 р. Київ, 2012. 142 с.
7. ISO 8528. Reciprocating internal combustion engine driven generating sets. ISO, 2021. 62 p.
8. Атлас енергетичного потенціалу відновлюваних джерел енергії України / С. О. Кудря та ін.; ІВЕ НАН України. Вид. 2-ге. Київ, 2020. 45 с.
9. ITRPV 2024. International Technology Roadmap for Photovoltaics. 15th ed. 2024. 88 p.
10. Fraunhofer ISE. Photovoltaics Report. Freiburg, Freiburg, 31 October 2025 [www.ise.fraunhofer.de](http://www.ise.fraunhofer.de). 2024. 56 p.
11. Jäger-Waldau A. PV Technology Status and Prospects. 2024.
12. IEC 61400-2. Small Wind Turbines. IEC, 2013. 156 p.

## References

1. **OECD. (2022). Resilience of critical infrastructure.** OECD Publishing. [https://www.oecd.org/en/publications/government-at-a-glance-2025\\_0efd0bcd-en/full-report/ensuring-the-resilience-of-critical-infrastructure\\_896f59cf.html](https://www.oecd.org/en/publications/government-at-a-glance-2025_0efd0bcd-en/full-report/ensuring-the-resilience-of-critical-infrastructure_896f59cf.html)
2. **World Bank, Government of Ukraine, European Union, & United Nations. (2023). Second Ukraine rapid damage and needs**

- assessment (RDNA2): February 2022 - February 2023. World Bank Group. <http://documents.worldbank.org/curated/en/099184503212328877>
3. **ENTSO-E. (2022).** *Power system resilience and security.* ENTSO-E.
  4. **Pravyla ulashtuvannia elektroustanovok [Rules for the installation of electrical installations]. (2017).** Minenerhovuhillia [in Ukrainian].
  5. **Ministry of Transport of Ukraine. (2025).** *Pravyla tekhnichnoi ekspluatatsii zaliznyts Ukrainy [Rules for technical operation of the railways of Ukraine]* (Order No. 411). Delta [in Ukrainian].
  6. **Ukrzaliznytsia. (2012).** *Instruktsiia z tekhnichnoho obsluhovuvannia i remontu prystroiv elektropostachannia system syhnalizatsii, tsentralizatsii ta blokuvannia (STsB): Tse-0033 [Instruction for maintenance and repair of power supply devices for signaling, centralization and blocking systems (SCB): CE-0033]* (Order dated February 9, 2012) [in Ukrainian].
  7. **International Organization for Standardization. (2021).** *Reciprocating internal combustion engine driven generating sets (ISO Standard No. 8528).* <https://www.iso.org/standard/72557.html>
  8. **Kudria, S. O., et al. (2020).** *Atlas enerhetychnoho potentsialu vidnovliuvanykh dzherel enerhii Ukrainy [Atlas of renewable energy potential of Ukraine]* (2nd ed.). Institute of Renewable Energy of the NAS of Ukraine [in Ukrainian].
  9. **ITRPV. (2024).** *International technology roadmap for photovoltaics (ITRPV): 15th edition.*
  10. **Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems ISE. (2025).** *Photovoltaics report.* <https://www.ise.fraunhofer.de>
  11. **Jäger-Waldau, A. (2024).** *PV technology status and prospects.* European Commission Joint Research Centre.
  12. **International Electrotechnical Commission. (2013).** *Wind energy generation systems - Part 2: Small wind turbines (IEC Standard No. 61400-2).*
- I reliability requirements but demonstrates limited practical effectiveness during prolonged blackouts and fuel supply disruptions.*
- The necessity of shifting from the classical reliability paradigm to the resilience paradigm is substantiated. This paradigm emphasizes the ability of critical railway automation facilities to maintain functionality in autonomous mode for extended periods and to rapidly recover after external shocks. As a key technological solution, the implementation of decentralized hybrid power supply systems based on renewable energy sources is considered, combining photovoltaic power plants, small wind energy converters, and battery energy storage systems.*
- The electrical load profiles of electric interlocking posts are analyzed, including base and peak consumption modes. Technical requirements for inverter capacity and battery storage size necessary to ensure at least 48 hours of autonomous operation are justified. An assessment of solar and wind energy potential across Ukraine is performed, taking into account regional and seasonal variability, which enables the development of region-specific configurations of hybrid energy systems.*
- The study demonstrates the feasibility of using bifacial photovoltaic modules based on N-type TOPCon technology with shingled cell architecture. These modules offer improved performance under low-light winter conditions, higher resistance to vibration loads, and enhanced energy yield due to reflected radiation from railway ballast and snow cover. The proposed methodology increases the energy autonomy of railway signalling facilities, reduces operational costs, and provides an additional environmental benefit through the reduction of carbon dioxide emissions.*
- Keywords:** railway signalling systems; Category I power supply; renewable energy sources; photovoltaic power plants; wind energy systems; battery energy storage systems; hybrid power systems; critical infrastructure resilience.

**Zmii S., Khismatulin V., Sosunov A., Siroklyn I.** Assessment of the potential for implementing alternative energy sources for railway automation in Ukraine

**Abstract.** The article addresses a relevant scientific and applied problem of enhancing the power supply resilience of railway signalling and interlocking systems in Ukraine under conditions of military actions, technogenic threats, and large-scale disruptions of centralized power grids. It is shown that the traditional guaranteed power supply architecture for signalling, centralization, and blocking (SCB) systems-based on dual-feed external networks with diesel generator backup-formally complies with Category

**Змії Сергій Олексійович,** доцент кафедри автоматики та комп'ютерного телекерування рухом поїздів, кандидат технічних наук, Український державний університет залізничного транспорту, Харків, Україна. E-mail: [zmii.sergii@kart.edu.ua](mailto:zmii.sergii@kart.edu.ua). <https://orcid.org/0000-0002-7974-5181>. Scopus Author ID: 57192821601.

**Хісмамулін Володимир Шайдуллович,** кандидат технічних наук, професор кафедри автоматики та комп'ютерного телекерування рухом поїздів, кандидат технічних наук, Український державний університет залізничного транспорту, Харків, Україна. <https://orcid.org/0000-0001-7578-1217>. Тел.: +38(057) 730-10-32. E-mail: [khisvs@kart.edu.ua](mailto:khisvs@kart.edu.ua).

**Сіроклин Іван Миколайович,** кандидат технічних наук, доцент кафедри автоматики та комп'ютерного телекерування рухом поїздів, Український державний університет залізничного

---

ІНФОРМАЦІЙНО-КЕРУЮЧІ СИСТЕМИ НА ЗАЛІЗНИЧНОМУ ТРАНСПОРТІ

---

транспорту, Харків, Україна. ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0001-9978-8261>. Tel.: +38 (067) 975 78 78. E-mail: [seroklin@kart.edu.ua](mailto:seroklin@kart.edu.ua).

**Сосунов Олександр Олексійович**, доцент кафедри автоматики та комп'ютерного телекерування рухом поїздів, кандидат технічних наук, Український державний університет залізничного транспорту, Харків, Україна. ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0003-2175-7363>. Tel.: +38(068) 607-88-13. E-mail: [sosunov63@kart.edu.ua](mailto:sosunov63@kart.edu.ua).

**Zmii Serhii**, Associate Professor of the Department of Automation and Computerized Train Control, Cand. tech. Sciences, Ukrainian State University of Railway Transport, Kharkiv, Ukraine. E-mail: [zmii.sergii@kart.edu.ua](mailto:zmii.sergii@kart.edu.ua). <https://orcid.org/0000-0002-7974-5181>. Scopus Author ID: 57192821601.

**Khismatulın V.**, Professor of the Department of Automation and Computerized Train Control, Cand. tech. Sciences, Ukrainian State University of Railway Transport. <https://orcid.org/0000-0001-7578-1217>. Tel.: +38(057) 730-10-32. E-mail: [khisvs@kart.edu.ua](mailto:khisvs@kart.edu.ua).

**Sosunov Aleksandr**, Associate Professor of the Department of Automation and Computerized Train Control, Cand. tech. Sciences, Ukrainian State University of Railway Transport. ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0003-2175-7363>. Tel.: +38(068) 607-88-13. E-mail: [sosunov63@kart.edu.ua](mailto:sosunov63@kart.edu.ua).

**Siroklyn Ivan**, Associate Professor of the Department of Automation and Computerized Train Control, Cand. tech. Sciences, Ukrainian State University of Railway Transport. ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0001-9978-8261>. Tel.: +38 (067) 975 78 78. E-mail: [seroklin@kart.edu.ua](mailto:seroklin@kart.edu.ua).

Стаття надійшла 05.02.26

Стаття прийнята до друку після рецензування 10.03.26

Стаття опублікована (оприлюднена) 27.04.26

Стаття поширюється на умовах ліцензії Creative Commons Attribution License International CC-BY.