

**141 ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИКА, ЕЛЕКТРОТЕХНІКА ТА
ЕЛЕКТРОМЕХАНІКА**

УДК 621.311.245:621.311.1

DOI: 10.31498/2225-6733.53.2.2026.359857

**АВТОНОМНІ СИСТЕМИ ЕЛЕКТРОЖИВЛЕННЯ ОБ'ЄКТІВ СПЕЦІАЛЬНОГО
ПРИЗНАЧЕННЯ НА ОСНОВІ МАЛИХ ВІТРОЕНЕРГЕТИЧНИХ УСТАНОВОК**

- Якимець С.М.** канд. техн. наук, доцент, Кременчуцький національний університет ім. М. Остроградського, м. Кременчук, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2797-2796>, e-mail: ysm.krnu.et@gmail.com;
- Чорна В.О.** канд. техн. наук, ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», м. Дніпро, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3641-4152>, e-mail: chornajav@gmail.com;
- Шутько О.С.** магістрант, Кременчуцький національний університет ім. М. Остроградського, м. Кременчук

У статті проведено комплексне наукове дослідження, спрямоване на розв'язання актуальної задачі забезпечення енергетичної автономності та стратегічної витривалості мобільних радіолокаційних станцій в умовах сучасної воєнно-політичної нестабільності. Встановлено, що систематичне ураження об'єктів централізованої енергосистеми України детермінує необхідність впровадження децентралізованих систем на основі відновлюваних джерел енергії, де особливе місце посідає мала вітроенергетика. У роботі детально проаналізовано режими функціонування сучасних малогабаритних радіолокаційних систем, таких як RADAR-XI-M, DELTA та KHARZA MRF, що дозволило класифікувати їх за енергетичними ознаками та визначити реальні добові потреби у генерації. Обґрунтовано, що для забезпечення безперебійної роботи споживачів першої категорії надійності в умовах помірного вітрового потенціалу Полтавського регіону необхідна встановлена потужність вітроенергетичної установки має становити не менше 2,5 кВт. Доведено, що попри теоретичну потребу у більшому діаметрі ротора для низьких швидкостей вітру, застосування серійної моделі з діаметром 5,6 м у поєднанні з інтелектуальною системою накопичення енергії забезпечує сталий профіцит генерації на рівні 50%. Синтезовано структуру енерговузла на базі літій-залізо-фосфатних акумуляторів, що гарантує автономну роботу радіолокаційної системи протягом 36 годин у періоди повного штилю. Особливу увагу приділено застосуванню MPPT-контролерів з алгоритмом WindCurveTracking та інверторного обладнання з чистою синусоїдою, що є критичним для стабільності високочастотних трактів радіолокаційних станцій. Наукова новизна роботи полягає в обґрунтуванні концепції мобільного енергозабезпечення, яка дозволяє не лише досягти енергетичної незалежності військових об'єктів, а й суттєво знизити їхню теплову та акустичну помітність порівняно з дизель-генераторними установками. Результати дослідження мають практичне значення для підвищення живучості підрозділів системи моніторингу повітряного простору та розширення можливостей оперативного розгортання локальних вузлів спостереження у важкодоступних районах.

Ключові слова: вітроенергетична установка; радіолокаційна станція; автономне живлення; енергетична безпека; енергетичний баланс; акумулятор; інвертор.

Постановка проблеми

Енергетична безпека як домінуюча складова національної безпеки держави в умовах сучасної воєнно-політичної нестабільності трансформується у фактор стратегічної витривалості. Повномасштабна збройна агресія проти України детермінувала критичну вразливість централізованої об'єднаної енергетичної системи (ОЕС). Систематичне вогневе ураження об'єктів генерації, магістральних мереж та вузлів розподілу призвело до деградації структурної цілісності енергосистеми, що вимагає перегляду парадигми енергозабезпечення об'єктів критичної інфраструктури.

У контексті окреслених викликів стратегічного пріоритету набуває впровадження децентралізованих (локальних) систем електроживлення на основі відновлюваних джерел енергії (ВДЕ). Перехід від

ієрархічної структури енергопостачання до розподіленої генерації з можливістю роботи в острівному режимі дозволяє суттєво мінімізувати ризики каскадних відключень та забезпечити функціональну автономність споживачів. Серед номенклатури ВДЕ особливий науково-практичний інтерес становить вітроенергетика. Завдяки високому коефіцієнту використання встановленої потужності (КВВП) у певних регіонах України та технологічній адаптивності до автономної роботи, вітроенергетичні установки (ВЕУ) розглядаються як релевантне джерело енергії для розосереджених об'єктів.

З огляду на високу енергоємність сучасних радіолокаційних засобів та їхню вразливість до дестабілізації зовнішніх мереж, актуалізується задача розробки автономних комплексів електроживлення. Інтеграція

автономних ВЕУ в поєднанні з інтелектуальними системами накопичення енергії та гібридними інверторами дозволяє досягти наступних переваг:

- підвищення живучості – мінімізація теплового та акустичного демаскування порівняно з традиційними дизель-генераторами;
- автономність – забезпечення тривалого функціонування радіолокаційного обладнання у польових умовах без необхідності регулярного підвезення пально-мастильних матеріалів;
- мобільність – можливість розгортання локальних енерговузлів у важкодоступних районах зі сприятливим вітровим потенціалом.

Таким чином, синергія вітроенергетичних технологій та засобів радіолокації є перспективним напрямом наукових досліджень, спрямованих на зміцнення обороноздатності держави через призму енергетичної незалежності військових об'єктів.

Аналіз останніх досліджень та публікацій

Питання оцінки вітрового ресурсу як фундаментального етапу проектування малих вітрових турбін (SWT) висвітлено у працях багатьох вітчизняних та закордонних учених [1-6].

Зокрема, методологічні підходи до класифікації та стандартизації SWT детально розглядаються в роботі [7], де акцентується увага на гармонізації національних нормативів із міжнародним стандартом IEC 61400-2 [8].

В оновленому Атласі енергетичного потенціалу відновлюваних джерел енергії України під редакцією С. О. Кудрі [9] представлено актуалізовані дані щодо розподілу вітрових потоків, що дозволяє уточнити зони ефективного впровадження малих вітроенергетичних установок у різних регіонах.

Питання визначення техніко-економічних меж використання автономних вітроелектричних систем ґрунтовно досліджено у працях [10-12]. Це дозволяє сформулювати методологічну базу для оптимізації параметрів малих вітрових турбін.

Проведений аналіз нормативної бази США (DOE) та Японії (ClassNK) [13, 14] свідчить про відсутність єдиного термінологічного підходу до визначення потужності «малої» енергетики, що підтверджує доцільність використання критерію площі ротора згідно з вимогами IEC [8].

Дослідженням вітроенергетичного потенціалу центральних регіонів України, зокрема Полтавської області, присвячені актуальні розвідки [15, 16]. Встановлено, що попри помірні показники швидкості вітру (3-3,5 м/с на висоті 10 м), перехід до висот 80-120 м дозволяє досягти значень 6-7 м/с, що корелює з даними Атласу енергетичного потенціалу ВДЕ (2024 р.) [9].

Разом з тим, залишаються недостатньо вивченими питання ефективності функціонування мікропроцесорних систем керування в умовах нестабільного

вітрового потоку Полтавщини, а також специфіки інтеграції автономних ВЕУ в мобільні системи енергозабезпечення спеціального призначення, наприклад, для живлення РЛС.

Мета статті

Метою даного дослідження є обґрунтування технічних параметрів та розробка структури автономної мобільної системи електроживлення на основі малих вітроенергетичних установок (ВЕУ) для забезпечення безперебійної роботи радіолокаційних станцій (РЛС) малої потужності в умовах змінного вітрового потенціалу.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні задачі:

1. Проаналізувати режими функціонування мобільних підрозділів системи моніторингу повітряного простору (черговий, робочий, піковий) та кількісно оцінити їхні добові потреби в електроенергії для визначення цільових показників генерації.
2. Визначити необхідну встановлену потужність та геометричні параметри ротора ВЕУ, адаптовані до кліматичних умов Полтавського регіону, враховуючи обмеження щодо мобільності та габаритів обладнання.
3. Виконати порівняльний аналіз існуючих зразків малих вітрових турбін та обґрунтувати вибір конкретної моделі, здатної забезпечити позитивний річний енергобаланс для найбільш енергоємних об'єктів обраної групи.
4. Синтезувати систему накопичення енергії на базі літій-залізо-фосфатних (LiFePO₄) акумуляторів, здатної підтримувати автономну роботу РЛС протягом доби в умовах відсутності вітру (штилю).
5. Розробити структуру енерговузла з використанням інтелектуальних систем керування (МРРТ-контролерів) для стабілізації вихідних параметрів мережі та підвищення скритності (теплової та акустичної) об'єктів спеціального призначення.

Матеріали та методи

Радіолокаційна станція (РЛС) розглядається як складний багатофункціональний радіотехнічний комплекс, що виконує завдання детекції, ідентифікації та супроводження об'єктів у різних середовищах. Відповідно до нормативних вимог щодо надійності електропостачання, РЛС належать до споживачів першої категорії, що обумовлює неприпустимість тривалих перерв у живленні та необхідність резервування потужності.

Експлуатаційна специфіка РЛС визначається наступними чинниками:

- Режим генерації: безперервний або квазібезперервний характер споживання з вираженою імпульсною складовою навантаження.
- Чутливість до якості електричної енергії: високі вимоги до стабільності напруги та частоти, що критично для роботи прийомо-передавальних трактів.

• Локація: функціонування в умовах автономності або віддаленості від централізованих мереж, що робить актуальним впровадження ВДЕ.

Для оптимізації параметрів автономної системи живлення на основі ВЕУ доцільно використовувати класифікацію РЛС за функціональними та енергетичними ознаками:

1. За функціональним призначенням та мобільністю: оглядові (виявлення повітряних та наземних об'єктів), станції супроводження, спеціалізовані комплекси (контрбатареї, морські, висотоміри), а також стаціонарні та пересувні системи.

2. За частотним діапазоном: метровий та дециметровий діапазони (VHF, UHF), що характеризуються високою енергоємністю передавачів; сантиметровий діапазон (S, X, C), де при меншій потужності зростають вимоги до спектральної чистоти та стабільності живлення.

Визначальним параметром для розрахунку номінальної потужності ВЕУ є встановлена потужність споживання РЛС (табл. 1).

Таблиця 1
Енергетична класифікація РЛС для вибору потужності ВЕУ

Тип РЛС	Типова потужність споживання, кВт
Малогабаритні мобільні	0,3–1
Тактичні мобільні	1–5
Оглядові 3D РЛС	10–30
Далекого виявлення	30–100

Наведена класифікація є вихідною базою для вибору номінальної потужності ВЕУ.

Електричне навантаження сучасних радіолокаційних комплексів характеризується високим ступенем нерівномірності та багатоконпонентною структурою. Для коректного синтезу системи автономного електропостачання (САЕ) на базі ВЕУ проведено декомпозицію основних споживачів за їх функціональним призначенням:

1. Передавальний тракт: основне джерело імпульсних навантажень та пікових струмів. Вимагає високої динамічної стабільності напруги для запобігання фазовим спотворенням сигналу.

2. Приймальний тракт та системи цифрової обробки сигналів: прецизійні споживачі, що потребують безперервного живлення з мінімальним рівнем кондуктивних перешкод.

3. Антенно-поворотні пристрої: динамічне навантаження, зумовлене роботою електроприводів, що змінюється залежно від механічного опору та вітрового тиску на дзеркало антени.

4. Системи термостабілізації та охолодження: енергоємний сегмент, на який припадає до 30–40% загального бюджету потужності. Ефективність цих систем безпосередньо корелює з показниками надійності всієї станції.

5. Допоміжні вузли: підсистеми зв'язку, телеметрії, діагностики та внутрішнього освітлення.

Проектування САЕ базується на розрахунку середнього та пікового споживання в межах трьох основних експлуатаційних режимів:

• Черговий режим (20–40% $P_{ном}$): функціонують лише системи моніторингу та критичні вузли керування.

• Робочий режим ($P_{ном}$): штатне функціонування при номінальній частоті зондування.

• Піковий режим: короточасні перевантаження, обумовлені максимальною шпаруватістю імпульсів випромінювання або інтенсивними обчислювальними операціями.

Процес поєднання РЛС із ВЕУ в єдину енергосистему ускладнюється двома критичними факторами:

1. Електромагнітна сумісність та завадозахищеність. Обертання лопатей вітрогенератора в зоні видимості радара створює специфічні завади, зокрема мікродоплерівські ефекти, що можуть призводити до хибних цілевказань або маскуванню реальних об'єктів. Це потребує розробки алгоритмів цифрової фільтрації або просторового рознесення ВЕУ та антени РЛС.

2. Кліматична адаптація. Експлуатація в екстремальних умовах (висока вологість, сольовий туман, вібраційні навантаження) вимагає від компонентів ВЕУ підвищеного класу захисту (IP) та корозійної стійкості.

Враховуючи стохастичний характер вітрового потоку, для забезпечення безперервності технологічного циклу РЛС, архітектура системи живлення обов'язково повинна включати блоки резервування: накопичувачі енергії та/або дизель-генераторні установки як гарантовані джерела живлення.

На основі аналізу технічних характеристик сучасних зразків РЛС, представлених у відкритих експортних специфікаціях, встановлено, що встановлена потужність споживання є базовим критерієм при синтезі архітектури автономної системи живлення. За результатами проведеної систематизації, досліджувані типи РЛС класифіковано на три енергетичні групи.

Малопотужні мобільні системи (встановлена потужність до 1 кВт). Типовими представниками даного класу за енергетичними показниками є комплекси типу RADAR-X1-M, DELTA та KHARZA MRF. Техніко-економічне обґрунтування показує, що такі системи можуть функціонувати від локальної ВЕУ потужністю 1–5 кВт за наявності буферного накопичувача енергії ємністю 10–20 кВт·год. Це забезпечує високу мобільність та можливість розгортання на віддалених позиціях поза межами централізованої енергомережі.

РЛС середньої потужності (діапазон 5–10 кВт). До цієї групи віднесено модернізовані зразки типу P-18MA та TRASSA-1. Для забезпечення стабільного коефіцієнта готовності таких об'єктів доцільним є впровадження гібридних енергосистем (ВЕУ у поєднанні з фотоелектричними панелями та резервним дизель-

генератором), що дозволяє оптимізувати питому витрату палива.

Високотужні радіолокаційні комплекси (понад 30 кВт). Представлені системами типу 36D6-M2 та 80K6M. З огляду на високу енергоємність, повне автономне живлення від ВЕУ є технічно складним. Проте інтеграція вітрогенераторів дозволяє суттєво компенсувати навантаження на основні джерела живлення, зокрема під час роботи комплексу в черговому режимі.

Зважаючи на результати проведеного аналізу, для подальших досліджень обрано РЛС першої групи.

Виклад основного матеріалу

Для проведення порівняльного аналізу та подальшого розрахунку параметрів ВЕУ визначено енергетичні характеристики трьох репрезентативних зразків РЛС малої потужності. Вихідні дані, що базуються на технічних специфікаціях [7], систематизовано в табл. 2.

Таблиця 2

Паспортні дані споживаної потужності РЛС

РЛС	Максимальна споживана потужність, Вт
RADAR-X1-M	300
DELTA	500
KHARZA MRF	≈ 600*

* Для моделі KHARZA MRF значення прийнято експертним шляхом з урахуванням сумарної потужності обчислювального модуля та активної антени С-діапазону

Експлуатаційний цикл РЛС розподілено на три характерні режими, що відрізняються інтенсивністю випромінювання та глибиною обробки даних. Для кожного режиму встановлено коефіцієнт навантаження ($k_{нав}$) та часовий інтервал (t_i) згідно з типовим добовим графіком чергування (табл. 3).

Таблиця 3

Коефіцієнти навантаження

Режим	Коефіцієнт навантаження $k_{нав}$	Тривалість t_i , год
Черговий	0,35	12
Робочий	0,7	10
Піковий	1,0	2

Розрахунок споживаної потужності для кожного режиму здійснюється за залежністю:

$$P_{реж} = k_{нав} P_{max}$$

Результати обчислень для кожної моделі наведено у табл. 4.

Таблиця 4

Потужність РЛС у різних режимах

РЛС	Черговий, Вт	Робочий, Вт	Піковий, Вт
RADAR-X1-M	105	210	300
DELTA	175	350	500
KHARZA MRF	210	420	600

Сумарне добове споживання електроенергії визначається як інтегральна величина за формулою:

$$E_o = P_i t_i$$

Отримані дані дозволяють побудувати графіки навантаження (рис. 1), які є базою для розрахунку ємності акумуляторних батарей.

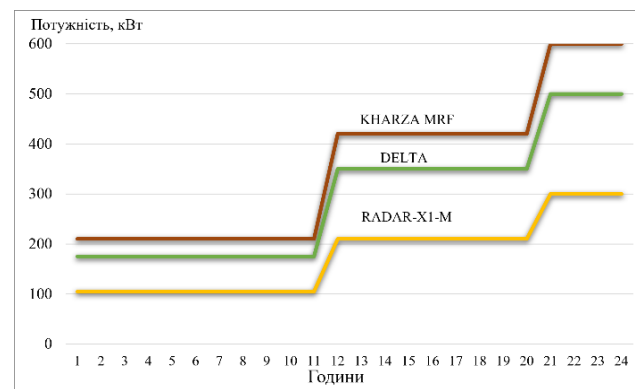


Рис. 1 – Графіки навантажень РЛС

Аналіз розрахункових даних свідчить про суттєву варіативність енергетичного профілю обраних систем:

1. RADAR-X1-M демонструє найбільш низький рівень енергоспоживання (3,96 кВт·год/добу), що робить цей комплекс оптимальним для інтеграції з мікро-ВЕУ потужністю 1–2 кВт навіть в умовах низької вітрової активності.

2. DELTA займає проміжне положення (6,60 кВт·год/добу) і потребує стабілізації живлення за допомогою ESS (EnergyStorageSystem) для компенсації пікових навантажень у робочому режимі.

3. KHARZA MRF характеризується найвищою інтенсивністю енергоспоживання (7,92 кВт·год/добу), що обумовлено багатоканальною обробкою сигналів та розширеним функціоналом.

Для всіх розглянутих типів РЛС обов'язковим елементом автономної системи живлення має бути буферний накопичувач. Це необхідно для згладжування стохастичної природи вітрогенерації та забезпечення безперервного живлення в моменти переходу між експлуатаційними режимами.

Для подальших розрахунків використано наступні значення величин:

– коефіцієнт запасу за потужністю ВЕУ $k_{зан} = 1,4$;

- глибина розряду АКБ (LiFePO4) $DoD = 0,8$;
- ККД інвертора та контролера $\eta = 0,9$;
- номінальна напруга DC-шини 48 В.

Вибір номінальної потужності ВЕУ (P_{BEU}) здійснюється на основі пікового споживання РЛС із урахуванням коефіцієнта запасу, що компенсує втрати в інверторі та нестабільність вітрового потоку.

Розрахункова потужність визначається визначається з урахуванням коефіцієнта запасу.

Відповідно до розрахованих значень та стандартного ряду потужностей серійних ВЕУ, встановлено необхідні номінальні параметри генерації (табл. 5).

Таблиця 5

Розрахунок потужностей ВЕУ

Об'єкт дослідження	Розрахункова потужність, Вт	Прийнята потужність, кВт
RADAR-X1-M	$300 \cdot 1.4 = 420$	1
DELTA	$500 \cdot 1.4 = 700$	2
KHARZA MRF	$600 \cdot 1.4 = 840$	2–3

Для забезпечення безперервної роботи РЛС у періоди відсутності вітрового навантаження (штилю) або в темну пору доби (для гібридних систем) необхідне використання акумуляторних батарей (АКБ). Розрахунок необхідної ємності АКБ (C_{AKB}) виконано за методикою [17], виходячи з умови забезпечення автономної роботи протягом 24 годин:

$$C_{AKB} = \frac{E_d}{U \cdot DoD \cdot \eta}.$$

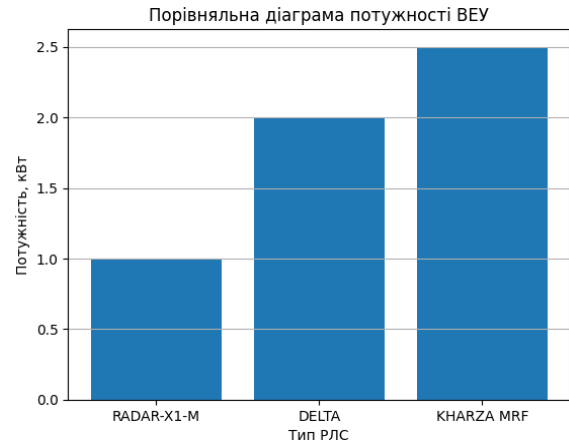
На основі проведених розрахунків сформовано підсумкову специфікацію основних компонентів автономної системи живлення (табл. 6). При виборі ємності накопичувачів враховано перехід на системну напругу 48 В, що є галузевим стандартом для мінімізації втрат на передачу енергії та уніфікації з інверторним обладнанням.

Таблиця 6

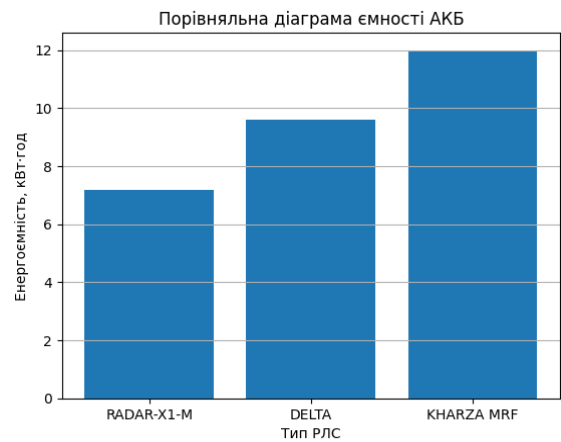
Зведені технічні параметри автономної системи живлення

Об'єкт дослідження	Потужність ВЕУ, кВт	Ємність АКБ (48 В), А·год	Сумарна енергоємність, кВт·год
RADAR-X1-M	1,0	150	7,2
DELTA	2,0	200	9,6
KHARZA MRF	2,5	250	12,0

Візуалізацію співвідношення встановленої потужності генерації та ємності буферного накопичувача наведено у вигляді порівняльних діаграм на рис. 2.



а)



б)

Рис. 2 – Порівняльні діаграми потужності ВЕУ (а) та ємності АКБ (б)

Для оцінки потенціалу системи в реальних експлуатаційних умовах виконано розрахунок річного енергетичного балансу. Як базис прийнято кліматичні показники Полтавської області для відкритих ландшафтів. З урахуванням вертикального профілю вітру (формула Лайхтмана для висоти вежі 10–20 м) середньорічна швидкість вітру становить 5,5 м/с. КВВП для обраного класу ВЕУ прийнято на рівні $k_{КВВП} = 0,25$.

Річна генерація електроенергії визначена за залежністю:

$$E_{річн} = P_{BEU} \cdot 8760 \cdot k_{КВВП}.$$

Результати зіставлення прогнозованої генерації та фактичного річного споживання наведено нижче (табл. 7).

$$E_{річн}^{RADAR-X1M} = 1 \cdot 8760 \cdot 0,25 = 2190 \text{ кВт/рік}.$$

Потреба складає 1460 кВт/рік. Баланс позитивний (запас $\approx 50\%$).

$$E_{річн}^{DELTA} = 2 \cdot 8760 \cdot 0,25 = 4380 \text{ кВт/рік}.$$

Потреба складає 2409 кВт/рік. Стійке покриття навантаження.

$$E_{річн}^{KHARZA MRF} = 2,5 \cdot 8760 \cdot 0,25 = 5475 \text{ кВт/рік.}$$

Потреба складає 2884 кВт/рік. Рекомендовано резервне джерело.

Позитивний баланс підтверджено розрахунками, проте з огляду на складність системи доцільним є варіант інтеграції резервного джерела (дизель-генератора) для критичних режимів роботи.

Отже, проведені дослідження підтверджують технічну доцільність та енергетичну ефективність застосування автономних вітроенергетичних систем для живлення РЛС малої потужності. У всіх розглянутих сценаріях розрахункова річна генерація ВЕУ перевищує сумарне споживання об'єктів, що дозволяє не лише забезпечити безперервність технологічного циклу радіолокації, а й створити необхідний енергетичний резерв для роботи допоміжних систем у складних метеорологічних умовах.

Таблиця 7

Характеристики вибраних контролерів заряду для ВЕУ

РЛС	ВЕУ, кВт	Номінальна потужність	Контролер
RADAR-X1-M	1,0	~20 А	MPPT 48 В/30 А
DELTA	2,0	~40 А	MPPT 48 В 60 А
KHARZA MRF	2,5	~52 А	MPPT 48 В/80 А

Виходячи із попередніх розрахунків, обрано РЛС KHARZA MRF з урахуванням того, що за потреби спроектована ВЕУ здатна підтримувати роботу інших розглянутих станцій.

Наступний етап досліджень полягає в розрахунках геометричних розмірів ВЕУ для РЛС KHARZA MRF.

Потужність вітроенергетичної установки визначається за виразом [16]:

$$P_{BEU} = \frac{1}{2} \rho A v_{cep}^3 C_p \eta,$$

де A – площа, що омітається лопатями, m^2 .

Перетворений відносно площі вираз має наступний вигляд:

$$A = \frac{2P_{BEU}}{\rho v_{cep}^3 C_p \eta}.$$

Діаметр ротора D горизонтально-осьової ВЕУ розраховується з виразу:

$$A = \frac{\pi \cdot D^2}{4}.$$

Для подальших розрахунків прийнято стандартне значення діаметра $D = 10$ м.

Частота обертання вітроколеса n критично залежить від швидкохідності z , яка визначається кількістю лопатей m згідно з [15]:

$$n = \frac{60v_{cep}Z}{L} = \frac{60v_{cep}Z}{\pi D}.$$

Стартовий обертовий момент $M_{ст}$ вітрових коліс може бути оцінений за наближеною формулою:

$$M_{ст} = \frac{v_{cep}^2 R^3}{Z^2} = \frac{v_{cep}^2 D^3}{8Z^2}.$$

Порівняльні динамічні характеристики вітроколіс представлені в табл. 8.

Таблиця 8

Порівняльні динамічні характеристики вітроколіс

Кількість лопатей m , шт	1	2	3	6	12
Швидкохідність вітряка z	9,0	7,0	5,0	3,0	1,2
Частота обертання n	94,33	73,53	52,52	31,51	12,6
Кутова швидкість ω , c^{-1}	9,87	7,69	5,49	3,29	1,31
Стартовий обертовий момент $M_{ст}$	8,48	14,03	27,5	76,38	477,43

На основі критерію мінімізації відцентрових сил та забезпечення достатнього стартового моменту для подолання інерції генератора, для системи живлення РЛС обрано трилопатеву конфігурацію. Це забезпечує оптимальний баланс між швидкохідністю та механічною тривкістю конструкції.

Висота щогли H визначається з умови мінімізації впливу приземної турбулентності та екранування від перешкод:

$$H = (1,2 \div 1,5)D.$$

Для мобільних РЛС та відкритої місцевості прийнято $H = 10$ м. Радіус зони безпеки для таких об'єктів становить $1,25 \cdot H = 12,5$ м.

Вибір типу опори (щогла з розтяжками, фермова або трубчаста башта) залежить від мобільності комплексу. Для ВЕУ потужністю до 2,5 кВт найбільш раціональним є використання щогли з системою розтяжок, що забезпечує мінімальну матеріаломісткість при високій стійкості.

Статичне вітрове навантаження на опору вітроустановки при екстремальних швидкостях вітру визначається згідно виразу:

$$P_{max} = R_x \left(\frac{H}{H_{mod}} \right)^2 V_{бур}^2,$$

де $V_{бур} = 40$ м/с – швидкість вітру під час бурі;
 R_x – коефіцієнт лобового тиску, який вибирають залежно від форми опори; H – висота натурної опори, м;
 H_{mod} – висота моделі опори, м.

При швидкості вітру 40 м/с розрахункове навантаження становить 1307 кг, що враховується при проектуванні вузлів кріплення та основи.

Для забезпечення заданих енергетичних параметрів об'єкта обрано промислову ВЕУ малої потужності FORTIS Montana 2,5 кВт (табл. 9). Дана установка належить до класу SWT (Small Wind Turbines) згідно з ІЕС 61400-2 і характеризується високою експлуатаційною надійністю в автономних системах спеціального призначення.

Таблиця 9
Технічні характеристики FORTIS MONTANA

Параметр	Значення
Номінальна потужність	2,5 кВт
Номінальна напруга	48 В DC
Тип ротора	горизонтально-осьовий
Кількість лопатей	3
Діаметр ротора	5,6 м
Початкова швидкість вітру	2,5 м/с
Номінальна швидкість вітру	11 м/с
Максимальна швидкість вітру	60 м/с
Тип генератора	безредукторний, з постійними магнітами
Система захисту	пасивне флюгування
Рекомендована висота щогли	10–25 м

Слід зауважити, що розрахований раніше теоретичний діаметр ротора (10 м) забезпечував би номінальну потужність при швидкості вітру 5,5 м/с. Проте, з огляду на масогабаритні обмеження мобільних РЛС, обрано серійну модель із діаметром ротора 5,6 м. Необхідний енергетичний баланс досягається за рахунок стохастичного розподілу вітрового потенціалу та акумулювання енергії в періоди перевищення миттєвої потужності над споживанням.

З метою забезпечення безперервного циклу роботи РЛС у періоди штилю обрано літій-залізо-фосфатну (LiFePO4) акумуляторну батарею PYLONTECH US5000 (табл. 10). Вибір зумовлений високою щільністю енергії та здатністю до глибокого розряду (DoD 90%) без втрати ресурсу (більше 6000 циклів).

Таблиця 10

Параметри АКБ Pylontech US5000

Параметр	Значення
Тип акумулятора	LiFePO4
Номінальна напруга	48 В
Номінальна ємність	100 А·год
Номінальна енергоемність	4,8 кВт·год
Глибина розряду (DoD)	до 90 %
Кількість циклів	>6000
Діапазон робочих температур	-10...+50 °С
ККД заряд/розряд	≥95 %

Для перетворення постійного струму в змінний (230 В, 50 Гц) обрано інвертор Victron Energy Multi Plus-II 48/3000/35 (табл. 11). Даний пристрій забезпечує формування чистої синусоїди, що є критичним для стабільної роботи високочастотних трактів РЛС.

Узгодження генератора ВЕУ з АКБ здійснюється через контролер Midnite Solar Classic 200 (табл. 11) з підтримкою алгоритму MPPT (Wind Curve Tracking). Це дозволяє максимізувати відбір енергії при змінних швидкостях вітру.

Таблиця 11

Параметри контролера та інвертора

Параметр	Значення
Номінальна потужність інвертора	3,0 кВА (2,4 кВт)
Номінальна потужність інвертора	3,0 кВА (2,4 кВт)
Пікова потужність	6,0 кВА
Вхідна напруга DC	48 В
Вихідна напруга AC	230 В, 50 Гц
ККД	до 95 %
Форма вихідної напруги	чиста синусоїда
Вбудований зарядний пристрій	35 А
Робочий температурний діапазон	-40...+65 °С
Клас захисту	IP21
Тип контролера	MPPT для вітрогенераторів
Номінальна напруга системи	48 В
Максимальний струм заряду	79 А
Максимальна вхідна напруга	200 В DC
Максимальна потужність ВЕУ	до 4 кВт (48 В)
ККД	до 98 %
Тип регулювання	MPPT (Wind Curve Tracking)
Підтримка DumpLoad	так (зовнішнє)
Сумісність з LiFePO4	так
Інтерфейси	Ethernet, RS-232
Робоча температура	-40...+60 °С
Клас захисту	IP20

Для верифікації обраного обладнання виконано розрахунок струмових навантажень DC-шини.

Струмові навантаження DC-шини визначені з урахуванням як генерації ВЕУ, так і споживання інвертора. Найбільш навантаженим є режим відсутності генерації, коли вся потужність забезпечується АКБ.

На відміну від спрощених підходів, де використовується стала потужність, у даному дослідженні застосовано енергетичний підхід, що базується на добовому споживанні. Еквівалентна середня потужність становить приблизно 330 Вт (рис. 1), тоді як пікова потужність, з урахуванням імпульсного характеру навантаження, досягає 1 кВт. Такий підхід забезпечує узгодженість між аналітичними розрахунками, чисельним моделюванням та енергетичним балансом системи.

Інвертор повинен покривати повну (апаратну) потужність:

– для номінального режиму:

$$S_{ном} = \frac{P_{сеп}}{\cos\varphi} = \frac{330}{0,8} = 412,5 \text{ В}\cdot\text{А};$$

– для пікового режиму:

$$S_{пик} = \frac{P_{пик}}{\cos\varphi} = \frac{1000}{0,8} = 1250 \text{ В}\cdot\text{А}.$$

Максимальний струм у DC-шині з урахуванням ККД інвертора:

– для номінального режиму:

$$I_{DC} = \frac{P_{сеп}}{U_{DC}\eta_{инв}} = \frac{330}{48 \cdot 0,95} = 7,2 \text{ А};$$

– для пікового режиму:

$$I_{пик} = \frac{P_{пик}}{U_{DC}\cos\varphi} = \frac{1000}{48 \cdot 0,8} = 26 \text{ В}\cdot\text{А};$$

– для ВЕУ:

$$I_{ВЕУ} = \frac{P_{ном}}{U_{DC}} = \frac{2500}{48} = 52,1 \text{ А}. \quad (1)$$

При живленні від ВЕУ струмові навантаження DC-шини мають виражений динамічний характер, зумовлений змінністю генерації та імпульсним режимом роботи навантаження.

У зв'язку з цим у розрахунках введено коефіцієнт динамічності $k_{дин} = 2,5...3$, що враховує перехідні процеси та короточасні пікові навантаження. Це дозволяє уникнути заниження розрахункових струмів та забезпечує коректний вибір елементів системи.

Інверторний піковий струм становить:

$$I_{DC\ max} = 26 \cdot 3 = 78 \text{ А},$$

перевищує струм генерації, тому його обрано за основу.

Згідно з (1), максимальний струм генерації становить 52,1 А. Оскільки контролер MidNite Solar Classic 200 має граничний вихідний струм 79 А, обрана модель забезпечує запас за струмом 33%, що сприяє стабільній роботі пристрою без перегріву.

Номинальний струм інвертора:

$$I_{инв} = \frac{P_{сеп}}{U_{DC}\eta} = \frac{330}{48 \cdot 0,95} = 7,24 \text{ А}.$$

Піковий струм пускових режимів:

$$I_{пик} \approx 2,5 \cdot I_{ном} \approx 18,1 \text{ А}.$$

Вибраний інвертор Victron Energy Multi Plus-II 48/3000/35 задовольняє вимогам системи, оскільки його номінальний струм споживання при повному навантаженні більше 60 А, що перевищує розрахунковий піковий струм.

Добове споживання РЛС складає $E_{доб} = 12 \text{ кВт}\cdot\text{год}$. Ємність обраних АКБ:

$$C = \frac{E_{доб}}{U \cdot DoD} = \frac{12000}{48 \cdot 0,9} = 287 \text{ А}\cdot\text{год}.$$

Вибрано три АКБ Pylontech US5000 300 А·год (14,4 кВт·год) забезпечує більше 24 год автономії.

При добовому споживанні 8,5 кВт·год сумарна ємність АКБ 14,4 кВт·год забезпечує час автономної роботи 36 годин.

Вибір перерізу кабелів виконано за умовою допустимого падіння напруги $\Delta U \leq 2\%$. Прийнято мідний кабель перерізом 16 мм². Захист системи реалізовано на базі DC-автоматів (80 А та 125 А) та пристрою захисту від перенапруг II типу для захисту від грозових перенапруг.

Конструктивна схема обраної ВЕУ FORTIS Montana базується на використанні горизонтально-осьової турбіни, встановленої на секційній трубчастій щоглі з розтяжками. Таке інженерне рішення є оптимальним для мобільних систем енергозабезпечення РЛС, оскільки забезпечує мінімальну матеріаломісткість при збереженні високої жорсткості конструкції.

Верхня частина установки (гондола) інтегрує трилопатеве вітроколесо, що характеризується високим значенням швидкохідності та стабільним моментом інерції. Використання трьох лопатей дозволяє досягти оптимального компромісу між аеродинамічною ефективністю та динамічною збалансованістю ротора, що мінімізує вібраційні навантаження на щоглу та, як наслідок, знижує рівень завад для антенних систем РЛС.

Горизонтальна орієнтація осі ротора дозволяє реалізувати пасивну систему флюгування, яка автоматично виводить турбіну з-під потоку при перевищенні номінальної швидкості вітру, забезпечуючи живучість установки без використання складних активних систем керування.

Щогла виконана у вигляді розбірної металевої трубчастої конструкції. Секційність щогли (фланцеві

з'єднання) суттєво підвищує мобільність комплексу, дозволяючи транспортування стандартними засобами логістики підрозділів ППО. Статична стійкість та вертикальність вежі забезпечується ярусною системою сталевих розтяжок із гвинтовими натягувачами (талрепами).

Використання розтяжок трансформує розрахункову схему щогли з консольної балки в багатопротітну нерозрізну систему, що працює переважно на стиск. Це дозволяє радикально знизити згинальні моменти в основі щогли, зменшити її діаметр і загальну масу металоконструкції на 30–40 % без втрати стійкості при ураганних вітрах (до 60 м/с).

Зважаючи на специфіку розгортання в польових умовах, конструкція фундаменту має комбінований характер:

- центральний залізобетонний вузол сприймає осьові зусилля стиску та стабілізує положення опори;
- анкерні блоки працюють на виривання та розташовані радіально під кутом 120°, забезпечуючи компенсацію перекидного моменту від тиску вітру на ротор.

Результати та їх обговорення

На основі аналізу тактико-технічних характеристик сучасних мобільних РЛС та прийнятих коефіцієнтів навантаження (черговий режим – 0,35; робочий – 0,7; піковий – 1,0) встановлено часові та кількісні показники енергоспоживання. Результати розрахунків свідчать, що для РЛС малої потужності (RADAR-X1-M, DELTA, KHARZA MRF) добова потреба в енергії становить від 4,2 до 8,5 кВт·год.

Найбільш енергоємним об'єктом у вибраній групі є мобільна станція KHARZA MRF з добовим споживанням 8,5 кВт·год. З урахуванням коефіцієнта запасу потужності ВЕУ та ККД системи перетворення, необхідна встановлена потужність генерації має становити не менше 2,5 кВт.

Для забезпечення заданої потужності в умовах Полтавського регіону (середньорічна швидкість вітру 5,5 м/с) розрахункова площа омітання ротора становить 78 м². Проведений порівняльний аналіз промислових зразків SWT показав, що найбільш адаптованою до мобільних умов є ВЕУ Fortis Montana номінальною потужністю 2,5 кВт.

Хоча розрахунковий діаметр ротора для низьких швидкостей вітру склав 10 м, для практичної реалізації обрано серійну модель з діаметром 5,6 м. Таке рішення обумовлене необхідністю збереження мобільності щогли та використанням стохастичного розподілу вітрових потоків, що підтверджується позитивним річним енергобалансом із запасом близько 50% (3066 кВт·год генерації проти 2190 кВт·год споживання для KHARZA MRF).

3. З огляду на вимоги до безперервності роботи РЛС (споживач першої категорії), синтезовано систему накопичення на базі трьох LiFePO₄ модулів Pylontech US5000. Вибір даного типу АКБ обґрунтований

високим ресурсом (більше 6000 циклів) та здатністю працювати при глибокому розряді до 90% без деградації пластин.

Сумарна енергоємність блоку АКБ становить 14,4 кВт·год, що гарантує автономну роботу РЛС протягом понад 24 годин у періоди повного штилю. Для стабілізації напруги та мінімізації електромагнітних перешкод у системі використано MPPT-контролер MidNiteSolarClassic 200, який реалізує алгоритм відстеження вітрової кривої потужності (Wind Curve Tracking).

Запропонована структура автономного енерговузла дозволяє не тільки забезпечити енергетичну незалежність РЛС, але й знизити теплову та акустичну помітність об'єкта, що є критично важливим у бойових умовах.

Висновки

1. У результаті проведеного дослідження обґрунтовано концепцію створення автономних систем енергозабезпечення мобільних РЛС на основі малих вітроенергетичних установок, що дозволяє досягти високого рівня енергетичної децентралізації та живучості об'єктів спеціального призначення в умовах дефіциту потужності в ОЕС України.

2. На основі синтезу добових графіків навантаження встановлено, що для забезпечення функціонування сучасних малогабаритних РЛС (класу KHARZA MRF) необхідна встановлена потужність генерації повинна становити не менше 2,5 кВт із обов'язковим використанням буферних накопичувачів енергії ємністю від 14,4 кВт·год.

3. Виконано математичне моделювання енергетичного балансу для кліматичних умов Полтавського регіону, яке підтвердило, що використання ВЕУ Fortis Montana забезпечує сталий профіцит енергії (близько 50% на рік), що дозволяє компенсувати стохастичний характер вітрової активності та гарантувати безперервність живлення споживача першої категорії.

4. Доведено, що застосування LiFePO₄ акумуляторів у поєднанні з інтелектуальними MPPT-контролерами дозволяє не лише стабілізувати параметри напруги в локальній мережі, а й суттєво знизити акустичну та теплову помітність об'єкта порівняно з традиційними дизель-генераторними установками.

5. Перспективи подальших досліджень полягають у розробці адаптивних алгоритмів керування гібридними системами (вітро-сонячними), що дозволить оптимізувати масогабаритні показники енерговузлів для їх оперативного розгортання в польових умовах.

Перелік використаних джерел

- [1] Світовий досвід оцінювання вітрових ресурсів / Кудря С. О., Ткаленко М. А., Яценко Л. В., Шинкаренко Л. Я. *Відновлювана енергетика та енергоефективність у XXI столітті* : матеріали XXIII міжнар. наук.-практ. конф., м. Київ, 19–20 трав.

- 2022 р. Київ: Ін-т відновлюваної енергетики НАНУ, 2022. С. 189–191.
- [2] Петренко К. В., Іванченко І. В., Кармазін О. О. Застосування діаграми Вороного для оцінки якості інформаційного покриття території України джерелами даних про вітер. *Відновлювана енергетика та енергоефективність у XXI столітті* : матеріали XXIV міжнар. наук.-практ. конф., м. Київ, 18–19 трав. 2023 р. К.: Інститут відновлюваної енергетики НАН України, 2023. С. 248–250.
- [3] Оцінка можливості використання даних швидкості вітру, отриманих методом реаналізу, для вирішення задач вітроенергетики / К. В. Петренко та ін. *Відновлювана енергетика*. 2023. № 3. С. 75–85. DOI: [https://doi.org/10.36296/1819-8058.2023.3\(74\).75-85](https://doi.org/10.36296/1819-8058.2023.3(74).75-85).
- [4] Основи вітроенергетики : підручник / Півняк Г., Шкрабець Ф., Нойбергер М., Ципленков Д. Дніпро : НГУ, 2015. 335 с.
- [5] High-resolution large-scale onshore wind energy assessments: A review of potential definitions, methodologies and future research needs / R. McKenna et al. *Renewable Energy*. 2022. Vol. 182. Pp. 659–684. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2021.10.027>.
- [6] Bigger Is Not Always Better: Review of Small Wind in Brazil / F. Araújo et al. *Energies*. 2021. Vol. 14, no. 4. Article 976. DOI: <https://doi.org/10.3390/en14040976>.
- [7] Відновлювані джерела енергії : підручник / за заг. ред. С. О. Кудрі. Київ : Інститут відновлюваної енергетики НАН України, 2020. 392 с.
- [8] IEC 61400-2:2014. Wind turbines. Part 2: Small wind turbines. Geneva : International Electrotechnical Commission, 2014. 172 p.
- [9] Атлас енергетичного потенціалу відновлюваних джерел енергії України / за заг. ред. С. О. Кудрі. 3-тє вид., оновл. Київ : Інститут відновлюваної енергетики НАН України, 2024. 56 с.
- [10] Лесько В. О., Покровський К. Б., Ференсович Р. Я. Оцінка ефективності вітрогенераторів в реальних умовах з додатковими експлуатаційними витратами. *Вісник Вінницького політехнічного інституту*. 2022. Вип. 6. С. 37–41. DOI: <https://doi.org/10.31649/1997-9266-2022-165-6-37-41>.
- [11] A Techno-Economic Analysis of Power Generation in Wind Power Plants Through Deep Learning: A Case Study of Türkiye / Z. Demirkol et al. *Energies*. 2025. Vol. 18, no. 10. Article 2632. DOI: <https://doi.org/10.3390/en18102632>.
- [12] Techno-Economic Analysis of a Stand-Alone Hybrid Wind-Power Fuel-Cell Grid System: A Case Study in Shahrvar Region of Tehran / Hashemi A., Derakhshan G., Alizadeh Pahlavani M. R., Abdi B. *Environmental and Climate Technologies*. 2020. Vol. 24, no. 1. Pp. 694–711. DOI: <https://doi.org/10.2478/rtuct-2020-0043>.
- [13] Distributed Wind Market Report: 2024 Edition. Washington : U.S. Department of Energy ; Richland : Pacific Northwest National Laboratory, 2024. 84 p. URL: <https://www.energy.gov/eere/wind/distributed-wind-market-report-2024-edition> (дата звернення: 22.10.2025).
- [14] Type Certification for Wind Turbines : Electronic resource. Nippon Kaiji Kyokai (ClassNK). URL: <https://www.classnk.or.jp/hp/en/authentication/renewableenergy/windturbine.html> (дата звернення: 15.10.2025).
- [15] Вітроенергетичний сектор України 2021. Огляд ринку за рік до війни : УВЕА. URL: https://uwea.com.ua/up-loads/docs/uwea_2021_ua_web_2.pdf (дата звернення: 18.10.2025).
- [16] Причини і результати перегляду оцінки потенціалу вітрових електростанцій України / С. О. Кудря та ін. *Відновлювана енергетика*. 2020. № 1. С. 6–16. [https://doi.org/10.36296/1819-8058.2020.1\(60\).6-16](https://doi.org/10.36296/1819-8058.2020.1(60).6-16).
- [17] Основи конструювання енергоустановок з відновлюваними джерелами енергії : курс лекцій / С. О. Кудря, В. М. Головка; Нац. техн. ун-т України «Київ. політехн. ін-т». К. : НТУУ «КПІ», 2005. 132 с.

AUTONOMOUS POWER SUPPLY SYSTEMS FOR SPECIAL-PURPOSE FACILITIES BASED ON SMALL-SCALE WIND TURBINES

Yakymets S.

PhD (Engineering), associate professor, Mykhailo Ostrohradskyi Kremenchuk National University, Kremenchuk, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2797-2796>, e-mail: ysm.krnu.et@gmail.com;

Chorna V.

PhD (Engineering), SHEI «Priazovskyi state technical university», Dnipro, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3641-4152>, e-mail: chornajav@gmail.com;

Shutko O.

master's student, Mykhailo Ostrohradskyi Kremenchuk National University, Kremenchuk

The article presents a comprehensive scientific study aimed at addressing the critical challenge of ensuring energy autonomy and strategic resilience for mobile radar stations amid contemporary military and political instability. It is

established that systematic strikes against Ukraine's centralized power grid necessitate the implementation of decentralized systems based on renewable energy sources, with small-scale wind power playing a pivotal role. The study provides a detailed analysis of the operational modes of modern compact radar systems, such as RADAR-XI-M, DELTA, and KHARZA MRF, which facilitated their classification by energy characteristics and the determination of actual daily generation requirements. It is substantiated that to ensure the uninterrupted operation of Category I reliability consumers under the moderate wind potential of the Poltava region, the installed capacity of the wind energy conversion system must be at least 2.5 kW. The research proves that despite the theoretical requirement for a larger rotor diameter at low wind speeds, the application of a production model with a 5.6 m diameter, coupled with an intelligent energy storage system, ensures a sustained generation surplus of 50%. A power node structure based on lithium iron phosphate (LiFePO₄) batteries has been synthesized, guaranteeing the autonomous operation of the radar system for 36 hours during periods of total calm. Particular attention is paid to the use of MPPT controllers featuring the WindCurveTracking algorithm and pure sine wave inverters, which are critical for the stability of the high-frequency circuits of radar stations. The scientific novelty of this work lies in the substantiation of a mobile power supply concept that not only achieves energy independence for military assets but also significantly reduces their thermal and acoustic signatures compared to diesel generator units. The findings are of practical importance for enhancing the survivability of airspace monitoring units and expanding the operational deployment capabilities of local surveillance nodes in remote areas.

Keywords: wind power plant; radar; autonomous power supply; energy security; energy balance; battery; inverter.

References

- [1] S. O. Kudria, M. A. Tkalenko, L. V. Yatsenko, and L. Ya. Shynkarenko, "Svitovyi dosvid otsiniuvannia vitrovyykh resursiv" ["World experience of wind resource assessment"], in *Proc. of the XXIII Int. Sci.-Pract. Conf. «Renewable energy and energy efficiency in the 21st century»*, Kyiv, Ukraine, May 19–20, 2022, pp. 189–191. (Ukr.)
- [2] K. V. Petrenko, I. V. Ivanchenko, and O. O. Karmazin, "Zastosuvannia diahramy Voronoho dlia otsinky yakosti informatsiynoho pokryttia terytorii Ukrainy dzherelamy danykh pro viter" ["Application of the Voronoi diagram to assess the quality of information coverage of the territory of Ukraine by wind data sources"], in *Proc. of the XXIV Int. Sci.-Pract. Conf. «Renewable energy and energy efficiency in the 21st century»*, Kyiv, Ukraine, May 18–19, 2023, pp. 248–250. (Ukr.)
- [3] K. V. Petrenko, M. P. Kuznietsov, I. V. Ivanchenko, O. O. Karmazin, and A. S. Borsuk, "Otsinka mozhyvosti vykorystannia danykh shvydkosti vitru, otrymanykh metodom reanalizu, dlia vyrishennia zadach vitroenerhetyky" ["Assessment of the possibility of using wind speed data obtained by the reanalysis method for solving wind energy problems"], *Vidnovliuvana enerhetyka*, no. 3, pp. 75–85, 2023. doi: [10.36296/1819-8058.2023.3\(74\).75-85](https://doi.org/10.36296/1819-8058.2023.3(74).75-85). (Ukr.)
- [4] H. Pivniak, F. Shkrabets, M. Neuberger, and D. Tsyplenkov, *Osnovy vitroenerhetyky* [Fundamentals of wind energy]. Dnipro, Ukraine: NHU, 2015. (Ukr.)
- [5] R. McKenna et al., High-resolution large-scale on-shore wind energy assessments: A review of potential definitions, methodologies and future research needs, *Renewable Energy*, vol. 182, pp. 659–684, 2022. doi: [10.1016/j.renene.2021.10.027](https://doi.org/10.1016/j.renene.2021.10.027).
- [6] F. R. P. de Araújo, M. G. Pereira, M. A. V. Freitas, N. F. da Silva, E. J. de A. Dantas, "Bigger Is Not Always Better: Review of Small Wind in Brazil," *Energies*, vol. 14, no. 4, article 976, 2021. doi: [10.3390/en14040976](https://doi.org/10.3390/en14040976).
- [7] S. O. Kudria, Ed., *Vidnovliuvani dzherela enerhii* [Renewable energy sources]. Kyiv, Ukraine: Instytut vidnovliuvanoi enerhetyky NANU, 2020. (Ukr.)
- [8] *Wind Turbines - Part 2: Small Wind Turbines*, IEC 61400-2:2014, International Electrotechnical Commission, Geneva, Switzerland, 2014.
- [9] S. O. Kudria, Ed., *Atlas enerhetychnoho potentsialu vidnovliuvanykh dzherel enerhii Ukrainy* [Atlas of energy potential of renewable energy sources of Ukraine], 3rd ed. Kyiv, Ukraine: Instytut vidnovliuvanoi enerhetyky NANU Ukrainy, 2024. (Ukr.)
- [10] V. O. Lesko, K. B. Pokrovskiy, and R. Ya. Ferensovych, "Otsinka efektyvnosti vitroheneratoriv v realnykh umovakh z dodatkovyimi ekspluatatsiynymi vytratamy" ["Evaluation of the efficiency of wind generators in real conditions with additional operating costs"], *Visnyk Vinnytskoho politekhnichnoho instytutu – Visnyk of Vinnytsia Politechnical Institute*, no. 6, pp. 37–41, 2022. doi: [10.31649/1997-9266-2022-165-6-37-41](https://doi.org/10.31649/1997-9266-2022-165-6-37-41). (Ukr.)
- [11] Z. Demirkol, F. Dayi, A. Erdoğan, A. Yanik, and A. Benek, "A Techno-Economic Analysis of Power Generation in Wind Power Plants Through Deep Learning: A Case Study of Türkiye," *Energies*, vol. 18, no. 10, article 2632, 2025. doi: [10.3390/en18102632](https://doi.org/10.3390/en18102632).
- [12] A. Hashemi, G. Derakhshan, M. R. Alizadeh Pahlavani, and B. Abdi, "Techno-Economic Analysis of a Stand-Alone Hybrid Wind-Power Fuel-Cell Grid System: A Case Study in Shahryar Region of Tehran," *Environmental and Climate Technologies*, vol. 24, no. 1, pp. 694–711, 2020. doi: [10.2478/rtuect-2020-0043](https://doi.org/10.2478/rtuect-2020-0043).
- [13] *Distributed Wind Market Report: 2024 Edition*, U.S. Department of Energy and Pacific Northwest National Laboratory, Washington, DC, USA, Rep. 2024, 84 p. [Online]. Available: <https://www.energy.gov/eere/wind/distributed-wind-market-report-2024-edition>. Accessed on: Oct. 22, 2025.

- [14] Nippon Kaiji Kyokai (ClassNK). Type Certification for Wind Turbines. ClassNK.jp. [Online]. Available: <https://www.classnk.or.jp/hp/en/authentication/renewableenergy/windturbine.html>. Accessed on: Oct. 15, 2026).
- [15] UWEA. Vitroenerhetychnyi sektor Ukrainy 2021. Ohliad rynku za rik do viiny (Wind energy sector of Ukraine 2021. Market overview a year before the war). UWEA.com.ua. [Online]. Available: https://uwea.com.ua/uploads/docs/uwea_2021_ua_web_2.pdf. Accessed on: Oct. 18, 2026. (Ukr.)
- [16] S. Kudria, N. Mkhitarian, B. Tuchynskyi, O. Riepin, I. Ivanchenko, and K. Petrenko, "Prychyny i rezultaty perehliadu otsinky potentsialu vitrovyykh elektrostantsii Ukrainy" ["Potential of Ukraine's wind power plants reassessment. The reasons and the results"], *Vidnovliuvana enerhetyka*, no. 1, pp. 6–16, 2020. doi: 10.36296/1819-8058.2020.1(60).6-16. (Ukr.)
- [17] S. O. Kudria, and V. M. Holovko, *Osnovy konstruiuvannia enerhoustanovok z vidnovliuvanymy dzherelamy enerhii* [Fundamentals of designing power plants with renewable energy sources]. Kyiv, Ukraine: NTUU «KPI», 2005. (Ukr.)

Стаття надійшла 13.12.2025

Стаття прийнята 10.01.2026

Стаття опублікована 26.03.2026

Цитуйте цю статтю як: Якимець С. М., Чорна В. О., Шутько О. С. Автономні системи електроживлення об'єктів спеціального призначення на основі малих вітроенергетичних установок. *Вісник Приазовського державного технічного університету*. Серія: Технічні науки. 2026. Вип. 53, том 2. С. 7–18. DOI: <https://doi.org/10.31498/2225-6733.53.2.2026.359857>.