

ВИКОРИСТАННЯ МАЛИХ ВІТРОУСТАНОВОК ДЛЯ ДЕЦЕНТРАЛІЗОВАНОГО ЕНЕРГОПОСТАЧАННЯ

Вінницький національний технічний університет

Анотація

У сучасному світі зростання використання викопного палива призводить до глобального потепління через викиди парникових газів, що спонукає країни впроваджувати політики, спрямовані на поступову заміну традиційних джерел енергії відновлювальними. Малі вітротурбіни (МВТ) відіграють ключову роль у розвитку децентралізованого енергопостачання, дозволяючи генерувати електроенергію в розподілених мережах, особливо в сільських районах, віддалених місцевостях. Ця робота аналізує поточний стан технології МВТ, їх переваги для децентралізованого енергопостачання, бар'єри впровадження та приклади з досвіду США та Бразилії. На основі огляду літератури, включаючи аналіз ринків, механізмів генерації енергії та застосування в IoT, пропонується стратегія для розширення використання МВТ в Україні, з акцентом на технологічні покращення, сертифікацію та фінансові стимули. Це сприятиме переходу до низьковуглецевої економіки та забезпеченню енергетичної незалежності.

Ключові слова

Малі вітротурбіни, децентралізоване енергопостачання, відновлювальна енергія, розподілена генерація, Інтернет речей, вітроенергетика, стале енергозабезпечення, бар'єри впровадження, політика стимулювання.

Abstract

In today's world, the growing use of fossil fuels leads to global warming due to greenhouse gas emissions, encouraging countries to implement policies aimed at gradually replacing traditional energy sources with renewable ones. Small wind turbines (SWTs) play a crucial role in the development of decentralized power supply, enabling electricity generation in distributed networks, particularly in rural and remote areas. This work examines the current state of SWT technology, their advantages for decentralized energy supply, barriers to implementation, and lessons learned from the experience of the United States and Brazil. Based on a literature review, including market analysis, energy generation mechanisms, and IoT applications, a strategy is proposed to expand the use of SWTs in Ukraine, focusing on technological improvements, certification, and financial incentives. This will contribute to the transition to a low-carbon economy and strengthen energy independence.

Keywords: *Small wind turbines, decentralized power supply, renewable energy, distributed generation, Internet of Things, wind energy, sustainable energy supply, implementation barriers, incentive policies.*

Вступ

Зростання глобального попиту на енергію та проблеми, пов'язані з вичерпанням викопних ресурсів і забрудненням довкілля, роблять актуальним перехід до відновлювальних джерел енергії. Вітроенергетика, як один з найперспективніших напрямків, традиційно асоціюється з великими вітровими фермами, що генерують мегават електроенергії. Однак, малі вітротурбіни (МВТ) потужністю від кількох Вт до 100 кВт пропонують альтернативу для децентралізованого енергопостачання, дозволяючи виробляти електроенергію безпосередньо біля споживача, зменшуючи втрати на передачу та підвищуючи енергетичну незалежність. За даними оглядів [3], у США малі вітротурбіни вже становлять значну частину розподіленої генерації, з встановленою потужністю понад 150 МВт у 2018 році, тоді як у Бразилії цей сектор тільки розвивається, з фокусом на сільські та ізольовані регіони.

Децентралізоване енергопостачання за допомогою МВТ особливо актуальне для країн з великими територіями та нерівномірним доступом до централізованих мереж, як-от Україна. Воно дозволяє інтегрувати вітрову енергію в гібридні системи з сонячними панелями чи акумуляторами, забезпечуючи стабільне живлення для домогосподарств, ферм, віддалених сіл та IoT-пристроїв (фізичні об'єкти, оснащені технологіями, які можуть збирати, обробляти та обмінюватися даними через Інтернет). Як зазначають [4], МВТ мають потенціал для застосування в Інтернеті речей (мережа фізичних пристроїв, оснащених сенсорами, програмним забезпеченням та технологіями, які дозволяють їм обмінюватися даними через Інтернет), де низькопотужні пристрої, такі як сенсори в сільському господарстві чи транспорті, потребують автономного живлення без часткої заміни батарей. Це не тільки знижує витрати на обслуговування, але й сприяє екологічній стійкості, зменшуючи залежність від батарей з обмеженим терміном служби.

Незважаючи на переваги, впровадження МВТ стикається з викликами: вищі витрати на кВт порівняно з великими турбінами, вплив місцевого рельєфу та вітрового режиму, а також брак регуляторних стимулів. Досвід США, описаний у звітах Департаменту енергетики (DOE), показує, як державні політики, включаючи податкові кредити та сертифікацію, сприяли зростанню ринку. Аналогічно, у Бразилії акцент на розподіленій генерації допомагає подолати енергетичну бідність. Ця робота базується на аналізі літератури, щоб запропонувати рекомендації для України, де потенціал вітрової енергії значний, але малі турбіни поки що недостатньо поширені. Вступний огляд підкреслює необхідність інтеграції технологічних інновацій, таких як електромагнітні, п'єзоелектричні та трибоелектричні генератори, для підвищення ефективності МВТ у децентралізованих системах.

Результати дослідження

Аналіз сучасного стану ринку малих вітротурбін (МВТ) показує, що вони є ефективним інструментом для децентралізованого енергопостачання, особливо в умовах зростання попиту на відновлювальні джерела енергії. За даними огляду [3], у США встановлена потужність МВТ зросла до 150 МВт у 2018 році, тоді як у Бразилії цей показник становить лише 0.4 МВт, що вказує на значний потенціал зростання в країнах, що розвиваються [3]. Таблиця 1 демонструє еволюцію встановленої потужності МВТ у різних країнах з 2013 по 2018 рік, де Китай лідирує з 573.57 МВт, а глобальний кумулятивний показник сягає 1726.71 МВт. Ці дані підкреслюють, що МВТ потужністю до 100 кВт ідеально підходять для розподіленої генерації, зменшуючи втрати на передачу енергії та підвищуючи енергетичну незалежність домогосподарств і ферм.

Таблиця 1 – Динаміка встановленої потужності (МВт) та сумарної встановленої потужності малих вітрових турбін (МВТ) у різних країнах (2013–2018 рр.)

Країна	Встановлена потужність до 2012 року, МВт	2013	2014	2015	2016	2017	2018	Сумарна встановлена потужність до 2018 р., МВт
Бразилія	0,00	0,03	0,02	0,11	0,04	0,11	0,09	0,40
Китай	280,01	72,25	69,68	48,60	45,00	27,27	30,76	573,57
Німеччина	24,55	0,02	0,24	0,44	2,25	2,25	1,00	30,75
Південна Корея	2,99	0,01	0,06	0,09	0,79	0,08	0,06	4,08
Велика Британія	77,98	14,71	28,53	11,64	7,73	0,39	0,42	141,40
США	130,73	5,60	3,70	4,30	2,43	1,74	1,50	150,00
Інші країни	626,80	8,65	17,59	16,04	63,30	80,85	13,28	826,51
Усього у світі	1143,06	101,27	119,82	81,22	121,54	112,69	47,11	1726,71
Сумарно (глобально)	1143,06	1244,33	1364,15	1445,37	1566,91	1679,60	1726,71	1726,71

Технологічні аспекти МВТ включають різні типи роторів та генераторів, адаптованих до низькошвидкісних вітрів. Згідно з [4], горизонтальні ротори з пропелерними лопатями забезпечують високу ефективність у середніх вітрах, тоді як вертикальні ротори типу Darrieus та Savonius краще працюють у турбулентних умовах, типових для урбанізованих зон [4]. Рисунок 1 ілюструє еволюцію технологій вітроенергетики від механічної до електричної енергії, підкреслюючи перехід до мініатюрних, самозабезпечених систем для IoT. Формула потужності вітру $P = (1/2) \cdot \rho \cdot A \cdot v^3$, де ρ - густина повітря, A - площа обметання, v - швидкість вітру, є базовою для аналізу [1]. У дизайні лопатей використовується теорія елементів лопаті, де коефіцієнт потужності C_p досягає максимуму 0.59 за лімітом Бетца, але для МВТ він нижчий через низькі числа Рейнольдса [1].

У США, за даними [5], встановлена потужність розподіленої вітроенергетики сягнула 1110 МВт з 2003 по 2023 рік, з яких 2.3 МВт у 2023 році припадає на МВТ до 100 кВт [5]. Ринок демонструє тенденцію до зниження витрат: середня вартість встановлення зменшилася до 7370 \$/кВт у 2023 році. Бар'єри впровадження включають високі витрати порівняно з сонячними панелями, турбулентність у міських зонах та нестабільні політики [2].

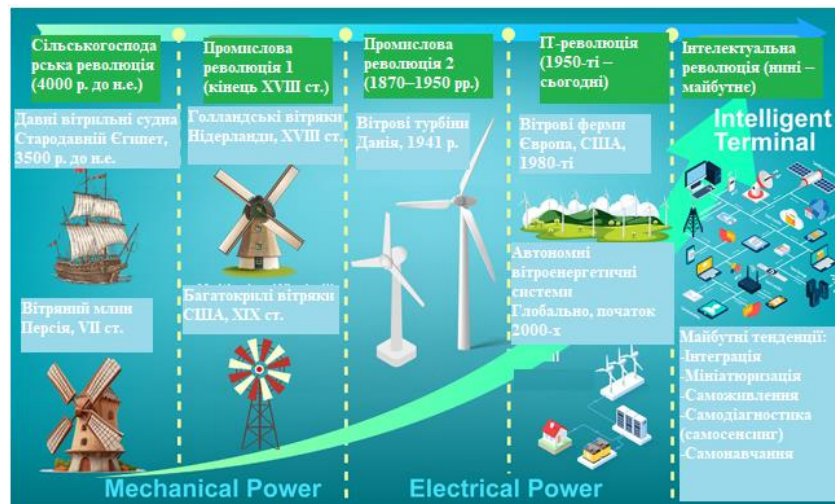


Рисунок 1 – Віхи розвитку технології використання вітрової енергії в контексті продуктивних революцій

Таблиця 2 – Зведення бар'єрів для вітрових турбін у забудованому середовищі

Сфери	Бар'єри
Безпека	Вплив середовища з високим рівнем втоми на термін служби ВТЗС є недостатньо вивченим. ВТЗС бракує наступних функцій безпеки: надмірність гальмування; відмовостійкі функції; захист від обмерзання; та стримування відкидання частин.
Вітровий ресурс	Наступні аспекти вітрового ресурсу в забудованому середовищі є недостатньо вивченими: турбулентність та мінливість напрямку; спутні сліди, вихори та зони відриву; тривимірний профіль швидкості вітру; та розподіл. Існуючі карти вітрових ресурсів не відповідають забудованому середовищу.
Технологія турбін	Наступні аспекти технології турбін у забудованому середовищі є недостатньо вивченими: стратегії керування для зменшення вібрації та шуму; вимірювання навантажень та швидкості відхилення (рискання). Стандарти проектування та випробувань для ВТЗС (особливо для середовищ із високим рівнем втоми) відсутні.
Взаємодія з будівлями	Резонансні частоти (пов'язані вібрації будівля-турбіна) недостатньо вивчені. Дотримання будівельних норм є складним (більшість норм не стосуються ВТЗС; існуючі норми додають значної невизначеності; можуть застосовуватися додаткові вимоги до зонування та дозволів). Механічна та електрична інтеграція є дорогою та складною.
Нетехнічні перешкоди	Існують небезпеки для персоналу, який встановлює та обслуговує ВТЗС. Потрібна інформаційно-просвітницька робота, оскільки достовірна інформація про ВТЗС обмежена. Економічні показники (вартість проекту та рентабельність інвестицій) є непередбачуваними.

Застосування MBT у IoT охоплює транспорт, урбанізовані зони, розумне сільське господарство та самозабезпечені датчики вітру. Основні механізми генерації: електромагнітні, п'єзоелектричні та трибоелектричні наногенератори, які дозволяють збирати енергію від низькошвидкісних вітрів для живлення сенсорів [4]. Рисунок 2 ілюструє інтеграцію MBT з IoT для низькопотужних пристроїв, зменшуючи залежність від батарей. У транспорті MBT використовуються для живлення моніторингу на залізницях і автошляхах, де потужність сягає до 738 Вт при 18 м/с [4].

Джерело [2] підкреслюють виклики: покращення конверсії енергії в турбулентних умовах, прогнозування довгострокової продуктивності та економічна життєздатність. Формула LCOE враховує витрати на встановлення, експлуатацію та коефіцієнт потужності, який для MBT становить 13-21% [5]. Діаграми в [1] показують криві підйомної сили та опору для профілів лопатей, таких як NACA, що є ключовими для дизайну в децентралізованих системах.

Політики стимулювання відіграють ключову роль у розширенні ринку MBT. У США федеральний податковий кредит (ITC) на 30% для систем до 100 кВт, гранти USDA REAP та програми сертифікації AWEA сприяли зростанню експорту до 5.5 МВт у 2017 році [3]. Таблиця 3 порівнює тарифи на ввід (feed-in tariffs) у різних країнах, де США пропонують 0.13 \$/кВт·год для деяких штатів, що стимулює децентралізовану генерацію. Бар'єри, такі як нестабільні політики та конкуренція з сонячною енергією, призвели до скорочення кількості виробників з 13 у 2021 до 8 у 2023 [5].

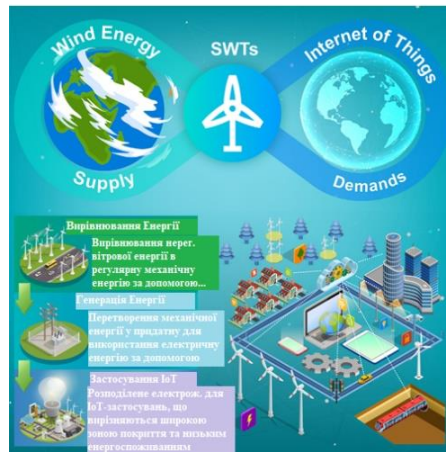


Рисунок 2 – Розгортання малих вітрових турбін як важливого та здійсненого заходу для задоволення енергетичних потреб малопотужних IoT-пристроїв

Таблиця 3 – Тарифи на «зелений» тариф для малих вітрових електростанцій (обрані країни)

Країна/Регіон	Обмеження за потужністю	EUR/кВт·год	Країна/Регіон	Обмеження за потужністю	EUR/кВт·год
Тайвань (Китай)	1–10 кВт	0.185	Японія	< 20 кВт	0.418
Канада	–	–	Японія	≥ 20 кВт	0.167
Онтаріо	< 10 кВт	0.074	Литва	< 10 кВт	0.095
Нова Шотландія	< 50 кВт	0.332	Литва	10–350 кВт	0.092
Кіпр	< 30 кВт	0.220	Португалія	< 3.68 кВт	0.432
Кіпр	Автономні системи	0.190	Словенія	< 50 кВт	0.095
Греція	< 50 кВт	0.250	Швейцарія	< 10 кВт	0.247
Греція	> 50 кВт	0.090	Велика Британія	< 100 кВт	0.207
Греція	Автономні системи	0.100	США	–	–
Італія	1–20 кВт	0.285	Індіана	5–100 кВт	0.130
Італія	20–200 кВт	0.262	Гаваї	< 20 кВт	0.123
Італія	0.2–1.0 МВт	0.146		20–100 кВт	0.105
Ізраїль	< 15 кВт	0.250	Вермонт	< 15 кВт	0.181

У Бразилії великий вітровий потенціал не використовується для МВТ через фокус на великих фермах, але досвід з США може допомогти: впровадження сертифікації, фінансових стимулів та мапування ресурсів [3].

Застосування в IoT, включає гібридні системи для самозабезпечених сенсорів, де потужність сягає 19.24 мВт при 6.5 м/с [4]. Рисунок 3 демонструє архітектуру SWT для IoT, з фокусом на ректифікацію, конверсію та використання енергії. У 2023 році глобальний ринок МВТ зріс на 11.45%, з потенціалом до 190 млн дол. до 2025 [2].

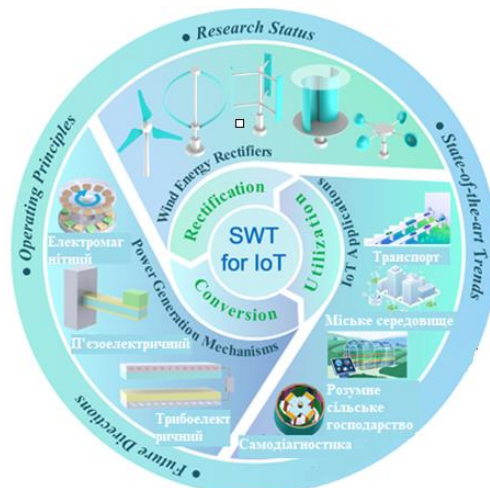


Рисунок 3 – Архітектурна основа для огляду МВТ для IoT-додатків

Висновки

Використання малих вітротурбін для децентралізованого енергопостачання є перспективним шляхом до стійкої енергетики, зменшуючи залежність від централізованих мереж та сприяючи переходу до низьковуглецевої економіки. Результати досліджень показують, що МВТ ефективні для IoT-застосувань у транспорті, урбанізованих зонах та сільському господарстві, залежно від вітрових умов [4,5]. Бар'єри, такі як високі витрати та турбулентність, можуть бути подолані через політики стимулювання, подібні до США, включаючи податкові кредити та сертифікацію [3,2]. Для України, з її значним вітровим потенціалом, рекомендації включають картування ресурсів, розвиток гібридних систем та інтеграцію з IoT для моніторингу [1]. Загалом, МВТ сприяють енергетичній незалежності, створюючи робочі місця та зменшуючи викиди, з глобальним потенціалом зростання до 1.8 ГВт [2].

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- [1] David Wood — Small Wind Turbines: Analysis, Design, and Application, https://archive.org/details/David_Wood_Small_Wind_Turbines/page/n279/mode/2up
- [2] A. Bianchini et al., «Current status and grand challenges for small wind turbine technology» (Wind Energy Science, 2022), <https://wes.copernicus.org/articles/7/2003/2022/>
- [3] C. C. M. Chagas et al., «From Megawatts to Kilowatts: A Review of Small Wind Turbines» (Sustainability / огляд, 2020)
- [4] H. Wang et al., «Small Wind Turbines and their potential for Internet of Things (IoT) applications» (review, 2023, PMC)
- [5] U.S. Department of Energy — Distributed Wind Market Report, <https://www.energy.gov/eere/wind/distributed-wind-market-report>

Кочмарук Володимир Олександрович — студент, факультет електроенергетики та електромеханіки, група ЕСМ-24м, Вінницький національний технічний університет, Вінниця, e-mail: vova.kochmaryk1400@gmail.com

Кісик Олександр Сергійович — студент, факультет електроенергетики та електромеханіки, група ЕСМ-24м, Вінницький національний технічний університет, Вінниця, e-mail: alexander.kisyk@gmail.com

Макогонюк Богдан Олександрович — студент, факультет електроенергетики та електромеханіки, група ЕСМ-24м, Вінницький національний технічний університет, Вінниця, e-mail: makohoniuk_bo@kness.energy

Науковий керівник: **Нетребський Володимир Васильович** — кандидат технічних наук, доцент, факультет електроенергетики та електромеханіки, Вінницький національний технічний університет, Вінниця, e-mail: netrebskiy@ukr.net

Kochmaruk Volodymyr — student, Faculty of Electrical Power Engineering and Electromechanics, ECM-24m group, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, e-mail: vova.kochmaryk1400@gmail.com

Kisyk Oleksandr — student, Faculty of Electrical Power Engineering and Electromechanics, ECM-24m group, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, e-mail: alexander.kisyk@gmail.com

Makohoniuk Bogdan — student, Faculty of Electrical Power Engineering and Electromechanics, ECM-24m group, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, e-mail: makohoniuk_bo@kness.energy

Supervisor: Netrebskiy V. – Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), docent, Vinnitsa National Technical University, docent of power plants and systems department; Vinnitsa, Ukraine; e-mail: netrebskiy@ukr.net