УДК 621.311.2:533.6 DOI https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2025.4.1.5

І. С. БІЛЮК
кандидат технічних наук, доцент,
доцент кафедри автоматики
Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова
ORCID: 0000-0003-1654-7468

А. В. РАЧИНСЬКИЙ
аспірант кафедри автоматики
Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова
ORCID: 0009-0005-3726-5293

А. М. ФОМЕНКО
старший викладач кафедри автоматики
Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова
ORCID: 0009-0005-9163-2090

# ДОСЛІДЖЕННЯ ПРИНЦИПІВ РОБОТИ АВТОНОМНОЇ ХВИЛЬОВОЇ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЇ ДЛЯ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЕНЕРГІЄЮ ПРИБЕРЕЖНИХ ТЕРИТОРІЙ

*Метою даної статті є дослідження принципів роботи автономних хвильових енергетичних установок, спрямованих на забезпечення електроенергією прибережних регіонів на середньохвильовому потенціалі. Для самодостатньої, сталої та відновлюваної енергетики важливо розвивати такі технології, особливо в районах, де доступ до центральних мереж є важким або важкодоступним. У дослідженні розглядаються всі аспекти роботи хвильової огинаючої, включаючи всі аспекти екологічної оцінки при виробництві електроенергії та щоденному аналізі розподілу. Режим хвилі заснований на класичній моделі CV енергії хвилі, класична модель хвилі до 5-6,5 метрів, а фронт – 2,5-8,3 кВт / хв. Потужність хвилі поступово зростає з кількістю хвиль поступово та з певною висотою хвилі (H = 2 м) на найвищому рівні при найвищому значенні. У внутрішніх морях вона має максимальне значення, що символізує режим прибережних районів. Моделювання частоти похибки частоти плавучості показало стан високого піку, який узгоджувався з масово-інерційними характеристиками системи, одночасно ефективно поглинаючи енергію хвилі в робочому діапазоні частот. Далі механічний і електричний ККД системи ВВП становить 28-41% в залежності від хвильового навантаження і режиму роботи, а генератор розрахований на 5 кВт. Виробництво електроенергії в добовому циклі становить 80-92 кВт/год, вночі 6 кВт/год і 2,8-3,3 кВт. Базуючись на цих характеристиках, установка може забезпечувати стабільну електроенергію під буфером зберігання. Для демонстрації потенціалу малих енергетичних систем для забезпечення середньої потужності берегової інфраструктури, подальшої оптимізації проектування, удосконалення та розвитку підвищення ефективності PTO та адаптивного керування генерацією.*

***Ключові слова:*** *хвильова енергетика; автономна хвильова електростанція; point absorber; хвильовий потенціал; амплітудно-частотна характеристика; система відбору потужності (PTO); резонансні коливання; гідродинамічне моделювання; добовий профіль генерації; прибережні енергосистеми.*

I. S. BILIUK
Candidate of Technical Sciences, Associate Professor,
Associate Professor at the Department of Automation
Admiral Makarov National University of Shipbuilding
ORCID: 0000-0003-1654-7468

A. V. RACHYNSKYI
Postgraduate Student at the Department of Automation
Admiral Makarov National University of Shipbuilding
ORCID: 0009-0005-3726-5293

A. M. FOMENKO
Senior Lecturer at the Department of Automation
Admiral Makarov National University of Shipbuilding
ORCID: 0009-0005-9163-2090

© І. С. Білюк, А. В. Рачинський, А. М. Фоменко, 2025
Стаття поширюється на умовах ліцензії CC BY 4.0

# EXPLORING THE ADVANTAGES AND LIMITATIONS OF THE FEATURE-SLICED DESIGN ARCHITECTURAL METHODOLOGY IN COMMERCIAL FRONTEND PROJECTS

*The results of the study of an autonomous point-absorber wave energy converter for supplying power to low to medium wave energy potential coastal regions are the focus of this paper. This subject is relevant because there is increasing demand for self-reliant, sustainable and eco-friendly sources of energy, especially in areas with no connectivity to centralized grids. The study details all aspects of wave energy conversion, from its environmental assessment to the production of electricity and the analysis of the daily production. During the simulation phase at wave heights of 0.7–1.5 m at periods of 5–6 s, in accordance with the classical wave power density is achieved 2.5–8.3 kW/m. Wave potential increases with growing wave height in a quadratic fashion, and for H = 2 m the maximum achievable value is above 14 kW/m, representing typical characteristics of coastal semi-enclosed seas. Modeling within the frequency domain of buoy velocity provided a resonant maximum at about 0.20 Hz indicating that the parameters applied (mass–inertia) selected were suitable to absorb energetic wave energy at this range. The mechanical and electrical power calculations further confirm that the PTO system can achieve 28–41% efficiency depending on the wave loading and work modes, with a 5 kW generator. The daily energy output level is 80–92 kWh, reaching day peak power of approximately 6 kWh/period and night power of 2.8–3.3 kWh, as expected due to stochasticity inherent in the wave climate. Based on these conditions then, the power is stable when the power is stored in a battery-energy storage buffer system. The findings validate that compact autonomous wave energy systems are feasible to work in coastal facilities operating at moderate wave potential regions, and establish the base for additional optimization of the design of the buoy, improvement of PTO efficiency, and formulation of adaptive generation control strategies.*

***Key words:*** *wave energy; autonomous wave power plant; point absorber; wave energy potential; frequency response; power take-off (PTO) system; resonance oscillations; hydrodynamic modelling; daily generation profile; coastal energy systems.*

## Постановка проблеми

Через зростання виробництва енергії в прибережних регіонах традиційна енергія недовикористовується, і важливо забезпечити стабільну автономну енергію, що підвищує інтерес до розвитку індустрії хвильової енергії, яка, можливо, є одним із найперспективніших секторів відновлюваної енергетики. Хвильові електростанції здатні виробляти безперервну енергію, на відміну від сонячних і вітрових електростанцій. Але це не легко реалізувати на морських узбережжях України та за їх межами, оскільки гідродинамічний процес ускладнюється низьким ступенем стандартизації конструкцій та надзвичайно чутливими технологіями до специфіки хвильового клімату. Особливо важливі автономні хвильові установки, які повинні працювати автономно без централізованої інфраструктури для їх експлуатації та забезпечувати енергією місцеві об'єкти, такі як навігаційні системи, прибережні технологічні станції, телеметричні комплекси та малі поселення. Такі проблеми є надзвичайно проблематичними; вони вимагають технічної надійності, економічного обґрунтування та екологічної стійкості автономних хвильових електростанцій, які можуть ефективно працювати за неконтрольованих змін висоти та періоду хвиль. В основі лежать міжнародні стандарти оцінки хвильової енергії (IEC 62600-101 [1]; IEC TS 62600-2 [2]; EMEC [3]), але з безліччю реальних застосувань існує недостатньо або навіть, у кількох сценаріях реалістичних сценаріїв, мало методів для впровадження таких стандартів, і тому оптимізація параметрів хвильових перетворювачів, а також прогнозування їхньої продуктивності за нормальних реальних умов є надзвичайно складними. Тут необхідно знайти основну наукову роботу, щоб зрозуміти вимоги до роботи автономної хвильової електростанції, яка гарантує максимальне використання, постійну продуктивність енергії протягом добового циклу та за змінних умов хвильового клімату. Абсолютно необхідно враховувати глибше дослідження взаємодії буя та хвильового фронту, особливості частотно-амплітудного хвильового генератора, ефективність механічного перетворювача енергії (PTO) та ефективність умов добового генерування за фактичних та прогнозованих хвильових умов. Таким чином, об'єктом дослідження є оцінка гідродинамічної, структурної та енергетичної продуктивності сценаріїв, за яких автономний проект хвильової генерації здатний забезпечити стабільне електропостачання для прибережних районів, а також технічні обмеження, з якими стикаються під час експлуатації. Ця робота визначить принципи, які визначають функціонування автономного хвильового перетворювача, оцінить енергоефективність на практиці та встановить ключові параметри, які надають реалістичний погляд на ефективність автономної електростанції.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій**

На сьогоднішній день тенденція енергетики хвиль у сучасному розвитку зосереджена на системах перетворення хвиль низької енергії та автономних системах, що забезпечують енергопостачання для локалізованих прибережних об'єктів. Дизайн поверхні, що поглинає енергію, ефективність системи перетворення механічних вібрацій, частотно-амплітудні властивості буйків та адаптація хвильового модуля щодо внутрішніх морів та захищених вод давно підкреслюються в сучасних дослідженнях. Це дослідження використовуватиме дослідження хвильових перетворювачів у внутрішніх морських середовищах, що є сильною основою цього дослідження. Результати, отримані від К. Капітанчука та М. Андрійишина [4], також проливають світло на вплив оптимізації хвильового перетворювача на локальний хвильовий клімат та орієнтацію елементів захоплення енергії, які є незамінними

для проектування автономних систем у прибережних регіонах з низькою хвильовою енергією. Аналогічно, автори представили метод оцінки параметрів малої хвильової електростанції та її гвинтоподібної поверхні на основі тієї ж концепції, що геометрія перетворювача та частотні характеристики хвильового фронту безпосередньо відповідають один одному. Цей підхід дозволяє додатково досліджувати взаємодію коливальних систем з їх хвильовими умовами, що може дозволити налаштування продуктивності автономної установки в річкових та прибережних регіонах [5]. Оглядова стаття К. Прасад та ін. [6] зосереджується на дослідженні систем PTO, що використовуються у хвильових установках, галузі, яка викликала великий науковий інтерес. Автори вказують на недоліки, присутні в класичних механічних та гідравлічних схемах приводу (важливих для проектування автономних станцій) та внесок нової гібридної системи збору хвиль-фотонної енергії для малих прибережних громад. Інтегровані гібридні рішення, здатні вирішити проблему стохастичного навантаження хвиль, будуть критичними для подолання розриву. Спеціалізовані дослідження в галузі прикладних портових енергетичних систем також проводилися, спираючись на дослідження, проведене С. Бонамано та ін. [7], і було досліджено виробництво електроенергії на установці WaveSAX в умовах порту. Спираючись на дослідження, що вивчає доцільність менших та середніх хвильових електростанцій, автори наголошують на важливості автономії та енергетичної незалежності електроенергії від портових установок. Прямий шлях – це робота, що розглядає встановлення хвильових енергетичних мереж у захищених водах. Робота Р. Каскахо та ін. [8] у секторальному дослідженні оцінювала кілька критеріїв оцінки життєздатності генерації хвиль у портах за підходом Delphi. Вони говорять про хвильовий режим, технічний стан інженерних споруд, економічну ефективність та вплив на навколишнє середовище, які є важливими для роботи автономної установки, що працює на узбережжі. Дослідження такого роду було повідомлено в літературі в різних дисциплінах: Т. Назаре та ін. [9] також залишається унікальним; воно застосовує домен кібербезпеки як фокус для системи океанічної енергії. Хоча стаття стосується інформаційної безпеки, ризики та обмеження системи, пояснені в ній, можуть бути безпосередньо застосовані до автономії хвильової платформи, типу платформи, яка потребує рішення, яких є багато, та несанкціонованих впливів, що застосовуються під час безперервної роботи хвиль у морському середовищі. Ще одна корисна стаття, яка вносить подальші наукові знання для дослідників, які розглядають ефективність установок для безпілотних хвиль, – це систематичний огляд Д. Клементе та ін. [10] щодо алгоритмів оптимізації для процесів оцінки хвильових ресурсів. Вона представляє огляд алгоритмів моделювання хвильового клімату, ідентифікації спектральної структури, прогнозування енергетичного потенціалу та налаштування перетворювача до реальних водних умов для точного оцінювання продуктивності автономних систем. Оцінка останніх статей показує, що комплексні технічні та методологічні покращення в роботі над техніками з метою покращення хвильових перетворювачів та розширення їх сфери автономної практики активно розвиваються. Деякі питання, наприклад, взаємодія буйка з хвильовим полем краще, ніж можна отримати, оптимальна продуктивність систем PTO, коли хвиля є стохастичною, та підтримка автономних станцій у середовищі на щоденній основі, потребують подальших досліджень.

**Формулювання мети дослідження**

Метою роботи є з'ясування принципів роботи автономної хвильової електростанції, а також розрахунок конструктивних і гідродинамічних параметрів, від яких залежить її здатність ефективно забезпечувати енергією прибережні райони. У цьому розділі акцентується увага на поведінці хвильового перетворювача в реальному хвильовому середовищі, ефективності передачі енергії від коливань буя до енергетичного блоку, а також на добовій динаміці виробництва електроенергії в умовах зміни хвильових умов. Послідовний аналіз ключових характеристик хвильового ресурсу, конструктивних схем перетворювача, моделювання функціонування системи «хвиля – буй – PTO» та визначення показників, від яких залежить енергетичний вихід автономної установки, є частиною дослідницьких завдань. Особлива увага приділяється оцінці того, як зміни висоти хвиль і періоду хвиль впливають на амплітуду і частоту коливань буя, кількість механічної енергії, яку може витягти система перетворення, та добове виробництво в типових прибережних умовах. Метою роботи є показати, як мала хвильова електростанція може використовуватися для живлення місцевої інфраструктури і коли вона може працювати як автономна система та забезпечувати рівень генерації енергії передбачуваним чином. Бажаним результатом є узагальнення властивостей автономного хвильового модуля, розробка науково обґрунтованих параметрів його роботи та аналіз ефективності енергії в реалістичних хвильових умовах.

**Викладення основного матеріалу дослідження**

Метою цієї роботи було дослідити функціонування автономного хвильового перетворювача типу поглинача, що демонструє коливання буя через хвильовий фронт і подальшу передачу енергії до системи перетворення. Така конструкція обрана, оскільки вона є операційно доцільною для внутрішніх вод з низьким хвильовим потенціалом, що характерно для прибережних регіонів, де автономні системи мають найбільше практичне значення. Робота хвильової електростанції не розглядається як окремий коливальний фактор, а скоріше як інтегрований процес дії – від ініціації хвильового потоку до генерації електроенергії та передачі до локальної мікромережі. Оцінка потенціалу хвильового середовища проводилася за методологією, яка зазвичай застосовується, з визначенням специфічної хвильової потужності за залежністю (1):

$$P = \frac{\rho g^2 H^2 T}{64\pi}; \quad (1)$$

що дозволяє встановити кількісну оцінку доступної енергії при різних комбінаціях висоти та періоду хвилі [11; 12].

Він показує характерне квадратичне зростання потужності та дозволяє визначити діапазон максимальної вихідної потужності, досягнутої хвильовою електростанцією. Результат показано графічно на рисунку 1, щоб проілюструвати залежність потужності від висоти хвилі.

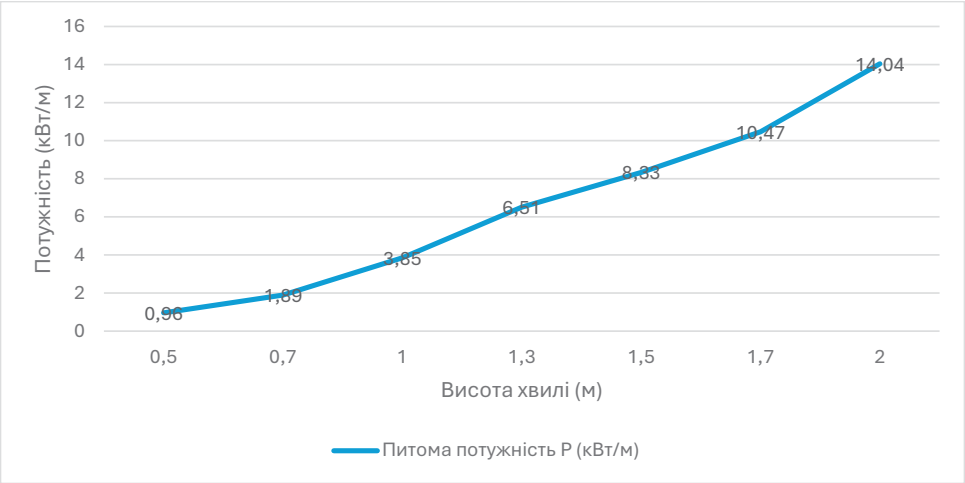


**Рис. 1. Залежність питомої потужності хвилі від висоти хвилі при сталому періоді** $T = 6$ **с**

Природа кривої є квадратичною, і тому вона тісно відповідає класичним моделям прогнозування енергії хвиль. При великій висоті хвилі генерована потужність зростає значно швидше, і при H=2м значення перевищує 14 кВт/м, що відповідає типовим показникам для прибережних районів внутрішніх морів. Графік можна використовувати для визначення максимальних параметрів хвиль, при яких автономна хвильова електростанція може забезпечити найвищий рівень енергії. Щодо визначених результатів хвильового потоку, зміщення буя було змодельовано як лінійну коливальну систему, яка має природну частоту, що відповідає середній частоті хвиль цього прибережного регіону. Для цього використовувалася амплітудно-частотна характеристика (2).

$$A(f) = \frac{A_0}{\sqrt{\left(1-(f/f_0)^2\right)^2 + (2\zeta f/f_0)^2}} \quad (2)$$

дозволяючи оцінити резонанс перетворювача з хвильовим фронтом [12; 13]. Графік отриманих даних ілюструється на рис. 2, і різке збільшення, що спостерігається поблизу резонансної частоти, підтверджує, що вибір геометричного параметра та масово-інерційних параметрів буйка був обґрунтованим.

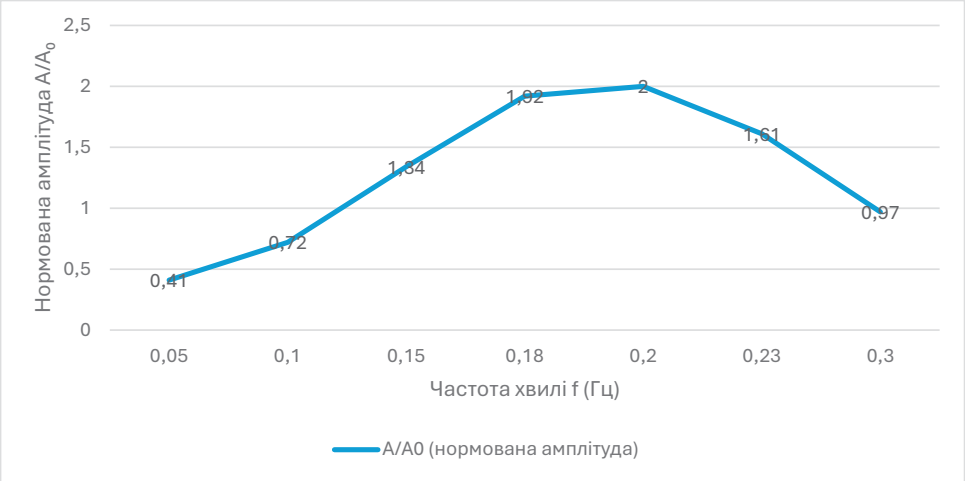


**Рис. 2. Амплітудно-частотна характеристика коливань буя хвильового перетворювача**

Модель (2) показує, що коливання буя залежать від частотних збурень хвиль. Резонансний пік спостерігається в області близько 0,20 Гц, що відображає типові хвильові режими для прибережних районів внутрішніх морів. Зростання амплітуди між 0,15 Гц і 0,20 Гц підтверджує, що масово-інерційні параметри буя тісно імітують особливості хвильового середовища. Після проходження через резонанс амплітуда поступово зменшується, що підтверджує вплив демпфування та правильність вибору параметра ζ для системи приводу PTO. Графік яскраво відображає діапазон робочих частот, в якому хвильова електростанція забезпечує максимальну потужність для поглинання енергії. Після налаштування цих параметрів ми розраховуємо механічну потужність, яку система може передати на привід PTO. Перехід до електричної енергії залежав від типу перетворювача, коефіцієнтів втрат і умов роботи генератора. Таблиця 1 зображує узагальнені технічні показники, що дозволяє оцінити зв'язок між хвильовим режимом, рухом буя та генерацією електроенергії.

Таблиця 1

**Узагальнені технічні параметри автономної хвильової електростанції**

| Параметр | Значення |
|---|---|
| Тип перетворювача (WEC) | Point Absorber |
| Робоча висота хвилі, H | 0.7–1.5 м |
| Період хвилі, T | 5–6 с |
| Питома потужність хвилі | 2.5–8.3 кВт/м |
| Номінальна потужність генератора | 5 кВт |
| ККД PTO | 28–41 % |
| Добова генерація | 80–92 кВт·год |
| Глибина встановлення | 12–18 м |

Таблиця 1 показує, що розроблена автономна хвильова електростанція добре функціонує в умовах хвильового середовища з нормальними налаштуваннями для внутрішніх морів на узбережжі, які покладаються на перетворювач типу поглинача. Висота хвиль від 0,7 до 1,5 м і інтервали між 5–6 секундами визначають хвильовий клімат, завдяки якому система здатна працювати на резонансній частоті. Це максимізує амплітуду вертикальних коливань буйка і допомагає системі PTO ефективніше витягувати енергію. Розрахована специфічна хвильова потужність – яка становить близько 2,5–8,3 кВт/м – відповідає діапазону, визнаному прийнятним для автономних систем малої потужності у світі [14; 15]. Це вказує на те, що енергетичний ресурс на узбережжі не лише достатній для обслуговування роботи однієї установки, але й для генерації невеликого резерву потужності, який може накопичуватися і подаватися під час пікового споживання. Особливо важливим є показник ефективності системи PTO (28–41%). Для хвильових установок малого класу ці значення є нормальними і відповідають даним EMEC [3]. Нижня межа відповідає роботі при низькій хвильовій потужності, а верхня межа досягається з частковим підвищенням резонансу. Це разом з номінальною потужністю генератора 5 кВт призводить до щоденної генерації від 80 до 92 кВт·год, що є достатнім для роботи навігаційних буйків, станцій телеметричного спостереження, прибережних постів, малих економічних об'єктів або віддалених дослідницьких пунктів. Глибина установки 12–18 м вказує на напрямок системи до водних зон, де хвильовий процес достатньо сформований, але має менший вплив дна. Також це забезпечує стабільність параметрів хвильового фронту, спрощуючи установку та обслуговування. Цей діапазон глибин має бути доступним у більшості прибережних районів України. Важливою частиною дослідження було моделювання щоденної генерації автономної хвильової електростанції під впливом природних хвильових коливань. Для цього була розроблена тимчасова модель, висота і період хвиль змінювалися зі стохастичним компонентом на висоті і період часу моделювалися, що відповідає реалістичним умовам. Відповідна крива щоденного виробництва (Рисунок 3) зображує профіль вихідної потужності для кожного дня в годинах і може визначити, чи може генераційна потужність такої системи забезпечити надійне виробництво вихідної потужності на цьому етапі за різних умов і, отже, аналіз здатності станції забезпечити стабільну потужність, коли існує накопичений буфер.

Рис. 3 показує змодельоване зображення добового профілю генерації електроенергії від автономної хвильової електростанції з природною варіабельністю у хвильовому середовищі. Ця крива демонструє регулярні коливання вихідної потужності через зміни висоти хвиль і періоду протягом добового циклу. У середині дня (12:00–15:00) стають видимими пікові значення генерації, коли фронт хвилі стає більш енергійним; вночі та вранці потужність зменшується. Такий розподіл відповідає типовому хвильовому режиму прибережних зон внутрішніх морів: добова нерівномірність хвильової активності формується синоптичними факторами. Підсумовуючи результати моделювання та аналізу, очевидно, що автономна хвильова електростанція типу поглинача демонструє узгодженість між усіма ключовими підсистемами – від збудження хвиль до генерації електроенергії. Поєднання розрахунків хвильового потенціалу, частотної характеристики буя та характеристик системи PTO дозволило систематично зрозуміти режими роботи станції, а також визначити умови, за яких досягається максимальна кількість енергії. Подальше моделювання добової генерації підтвердило, що така станція може надійно працювати в умовах

природної стохастичності хвильового середовища з буфером збору. Отримані результати демонструють потенціал такого ретельно підготовленого підходу для сфери автономних прибережних енергетичних систем, а також закладають основу для подальшої оптимізації дизайну моделі, підвищення ефективності РТО та дослідження роботи станції за різних хвильових умов.

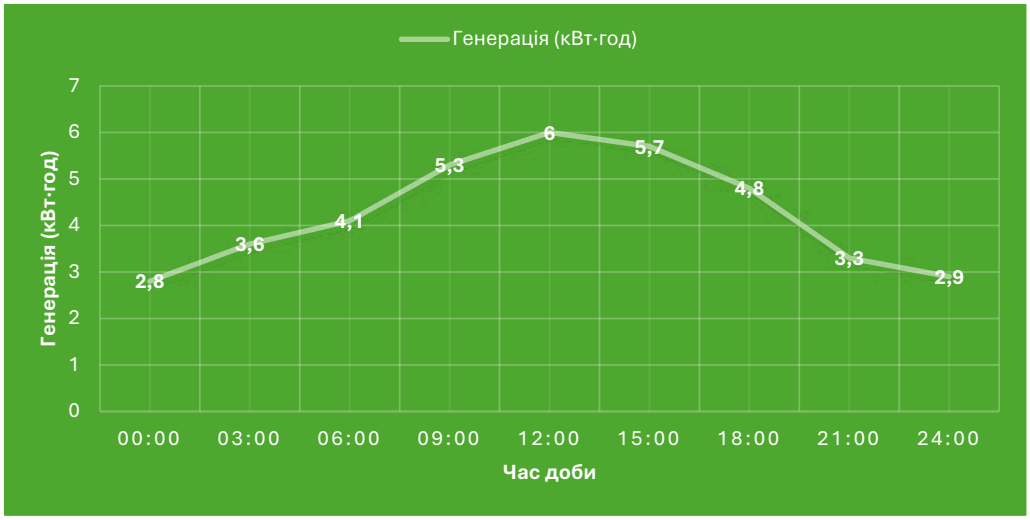


**Рис. 3. Добовий профіль генерації хвильової електростанції**

## Висновки

Результати цього дослідження дозволили повністю охарактеризувати автономну хвильову електростанцію типу точкового абсорбера, що працює в типових прибережних умовах внутрішніх морів. Згідно з розрахунками хвильового потенціалу, було встановлено, що при висоті хвилі 0,7–1,5 м і періоді 5–6 секунд, питома потужність хвильового потоку становить 2,5–8,3 кВт/м, що є адекватним ресурсом для ефективної роботи низькопотужних перетворювачів. Побудований графік залежності питомої потужності від висоти хвилі показав квадратичне зростання енергетичного потенціалу і дозволив реалізувати робочий діапазон, в якому станція генеруватиме максимальну потужність. Амплітудно-частотна характеристика коливальної системи буя та частотна характеристика резонансів показали виражений резонансний максимум біля 0,20 Гц, що є приблизною частотою, з якою хвиля поводиться в прибережних зонах. Це підтверджує правильність вибору геометричних та масо-інерційних параметрів коливального буя і підтверджує, що перетворювач добре працює в розширеному режимі поглинання енергії. Повільне зменшення амплітуди поза резонансною областю покаже, що демпфуючі характеристики системи РТО є критичним елементом для стабільності електричного виходу. Ефективність РТО у 28–41% відповідає міжнародним експериментальним даним, забезпечуючи генерацію 80–92 кВт·год для номінальної потужності генератора 5 кВт на добу. Такі показники підтверджують доцільність системи для автономного енергопостачання малих об'єктів – навігаційних буїв, сенсорних станцій, прибережних постів або окремих економічних структур. Щоденне моделювання виробництва показало, що протягом 24 годин варіації хвильового потенціалу є по суті стохастичними і призводять до нерівномірної генерації. Але при нижчих нічних значеннях станція все ще підтримує стабільну роботу з буфером накопичення для згладжування пікових варіацій і енергопостачання. Досягнуті результати підтвердили можливість використання автономних хвильових електростанцій типу точкового абсорбера для електропостачання прибережних районів з помірним хвильовим потенціалом. Дослідження підтримує концепцію подальшої оптимізації конструкції технології буя, вдосконалення системи вилучення енергії РТО та розширених моделей генерації, пристосованих до сезонних змін хвильового клімату. Інші можливості включають інтеграцію таких установок з адаптивним управлінням навантаження в межах локальних мікромереж.

## Список використаної літератури

1. International Electrotechnical Commission. IEC 62600-101: Marine Energy – Wave, Tidal and Other Water Current Converters – Part 101: Wave Energy Resource Assessment and Characterisation. Geneva: IEC, 2015. URL: https://webstore.iec.ch/publication/22293

2. International Electrotechnical Commission. IEC TS 62600-2: Marine Energy – Wave, Tidal and Other Water Current Converters – Part 2: Design Requirements for Marine Energy Systems. Geneva: IEC, 2016. URL: https://webstore.iec.ch/publication/24764

3. European Marine Energy Centre. EMEC Wave Energy Converter Performance Database and Guidelines. Orkney: EMEC, 2020. URL: https://www.emec.org.uk/marine-energy/wave-devices/

4. Капітанчук К., Андріїшин М. Характеристики потужності хвильової електростанції з гнучкою енергопоглинальною поверхнею в умовах внутрішнього моря. Наукоємні технології. № 61(1). Київ, 2024. С. 94–101. https://doi.org/10.18372/2310-5461.61.18517

5. Kapitanchuk K., Andriyishyn M. Determination of Parameters of a Small Power Plant on a River with an Energy-Absorbing Surface in the Form of a Sinusoidal Helicoid. Science-Based Technologies. № 65(1). Kyiv, 2025. P. 141–146. https://doi.org/10.18372/2310-5461.65.19935

6. Prasad K. A., Chand A. A., Kumar N. M., Narayan S., Mamun K. A. A critical review of power take-off wave energy technology leading to the conceptual design of a novel wave-plus-photon energy harvester for island/coastal communities' energy needs. Sustainability. № 14(4). Basel, 2022. Article 2354. URL: https://www.mdpi.com/2071-1050/14/4/2354

7. Bonamano S., Peviani M. A., Agate G., Burgio C. G., Fersini G., Marcelli M. The evaluation of WaveSAX power generation to support port energy self-sufficiency. Journal of Marine Science and Engineering. № 11(11). Basel, 2023. Article 2097. https://doi.org/10.3390/jmse11112097

8. Cascajo R., Molina R., Pérez-Rojas L. Sectoral Analysis of the Fundamental Criteria for the Evaluation of the Viability of Wave Energy Generation Facilities in Ports – Application of the Delphi Methodology. Energies. № 15(7). Basel, 2022. Article 2667. https://doi.org/10.3390/en15072667

9. Nazare T., Nardo L., Arias-Garcia J., Nepomuceno E. Ensuring resilience in ocean energy power plants: a survey of cybersecurity measures. Proceedings of the European Wave and Tidal Energy Conference. Vol. 15. Paris, 2023. https://doi.org/10.36688/ewtec-2023-452

10. Clemente D., Teixeira-Duarte F., Rosa-Santos P., Taveira-Pinto F. Advancements on optimization algorithms applied to wave energy assessment: an overview on wave climate and energy resource. Energies. № 16(12). Basel, 2023. Article 4660. https://doi.org/10.3390/en16124660

11. Mi J., Wu X., Capper J., Li X., Shalaby A., Wang R., Zuo L. Experimental investigation of a reverse osmosis desalination system directly powered by wave energy. Applied Energy. № 343. Amsterdam, 2023. Article 121194. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2023.121194

12. Alshmeel G. H. A., Al-Doori A. S. B., Ahmed S. R., Abrahim Z. A., Ghaffoori A. J., Hussain A. S. T. Self-sustaining buoy system: harnessing water wave energy for smart, wireless sensing and data transmission. Proceedings of the Cognitive Models and Artificial Intelligence Conference. Lisbon, 2024. P. 349–356. https://doi.org/10.1145/3660853.3660940

13. De Oliveira L., Dos Santos I. F. S., Schmidt N. L., Tiago Filho G. L., Camacho R. G. R., Barros R. M. Economic feasibility study of ocean wave electricity generation in Brazil. Renewable Energy. № 178. Amsterdam, 2021. P. 1279–1290. https://doi.org/10.1016/j.renene.2021.07.009

14. Li H., Wu X., Zhang Z., Tan X., Pan Y., Dai C., Xu Y. An extended-range wave-powered autonomous underwater vehicle applied to underwater wireless sensor networks. iScience. № 25(8). Cambridge, 2022. Article 104596. URL: https://www.cell.com/iscience/fulltext/S2589-0042(22)01010-0

15. Garcia D. A., Dionysis G., Raskovic P., Duić N. Advanced technological options for sustainable development of energy, water and environment systems upgrade towards climate neutrality. Energy Conversion and Management: X. № 22. Amsterdam, 2024. Article 100528. https://doi.org/10.1016/j.ecmx.2024.100528

**References**

1. International Electrotechnical Commission. (2015). IEC 62600-101: Marine energy – Wave, tidal and other water current converters – Part 101: Wave energy resource assessment and characterisation. IEC. https://webstore.iec.ch/publication/22293

2. International Electrotechnical Commission. (2016). IEC TS 62600-2: Marine energy – Wave, tidal and other water current converters – Part 2: Design requirements for marine energy systems. IEC. https://webstore.iec.ch/publication/24764

3. European Marine Energy Centre. (2020). *EMEC Wave Energy Converter performance database and guidelines.* EMEC. https://www.emec.org.uk/marine-energy/wave-devices/

4. Kapitanchuk, K., & Andriyshyn, M. (2024). Kharakterystyky potuzhnosti khvylovoi elektrostantsii z hnutkoiu enerhopohlynalnoiu poverkhneiu v umovakh vnutrishnoho morya [Power characteristics of a wave power plant with a flexible energy-absorbing surface in inland sea conditions]. *Naukoiemni tekhnolohii, 61*(1), 94–101. https://doi.org/10.18372/2310-5461.61.18517 [in Ukrainian].

5. Kapitanchuk, K., & Andriyishyn M. (2025). Determination of Parameters of a Small Power Plant on a River with an Energy-Absorbing Surface in the Form of a Sinusoidal Helicoid. *Science-Based Technologies*, *65*(1), 141–146. https://doi.org/10.18372/2310-5461.65.19935

6. Prasad, K. A., Chand, A. A., Kumar, N. M., Narayan, S., & Mamun, K. A. (2022). A critical review of power take-off wave energy technology leading to the conceptual design of a novel wave-plus-photon energy harvester for island/coastal communities' energy needs. *Sustainability*, *14*(4), 2354. https://www.mdpi.com/2071-1050/14/4/2354

7. Bonamano, S., Peviani, M. A., Agate, G., Burgio, C. G., Fersini, G., & Marcelli, M. (2023). The evaluation of WaveSAX power generation to support port energy self-sufficiency. *Journal of Marine Science and Engineering*, *11*(11), 2097. https://doi.org/10.3390/jmse11112097

8. Cascajo, R., Molina, R., & Pérez-Rojas, L. (2022). Sectoral Analysis of the Fundamental Criteria for the Evaluation of the Viability of Wave Energy Generation Facilities in Ports–Application of the Delphi Methodology. *Energies*, *15*(7), 2667. https://doi.org/10.3390/en15072667

9. Nazare, T., Nardo, L., Arias-Garcia, J., & Nepomuceno, E. (2023, September). Ensuring resilience in ocean energy power plants: a survey of cybersecurity measures. *Proceedings of the European wave and tidal energy conference, 15*. https://doi.org/10.36688/ewtec-2023-452

10. Clemente, D., Teixeira-Duarte, F., Rosa-Santos, P., & Taveira-Pinto, F. (2023). Advancements on optimization algorithms applied to wave energy assessment: an overview on wave climate and energy resource. *Energies*, *16*(12), 4660. https://doi.org/10.3390/en16124660

11. Mi, J., Wu, X., Capper, J., Li, X., Shalaby, A., Wang, R., … & Zuo, L. (2023). Experimental investigation of a reverse osmosis desalination system directly powered by wave energy. *Applied Energy*, *343*, 121194. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2023.121194

12. Alshmeel, G. H. A., Al-Doori, A. S. B., Ahmed, S. R., Abrahim, Z. A., Ghaffoori, A. J., & Hussain, A. S. T. (2024, May). Self-sustaining buoy system: harnessing water wave energy for smart, wireless sensing and data transmission. In *Proceedings of the Cognitive Models and Artificial Intelligence Conference,* 349–356. https://doi.org/10.1145/3660853.3660940

13. de Oliveira, L., dos Santos, I. F. S., Schmidt, N. L., Tiago Filho, G. L., Camacho, R. G. R., & Barros, R. M. (2021). Economic feasibility study of ocean wave electricity generation in Brazil. *Renewable Energy*, *178*, 1279–1290. https://doi.org/10.1016/j.renene.2021.07.009

14. Li, H., Wu, X., Zhang, Z., Tan, X., Pan, Y., Dai, C., … & Xu, Y. (2022). An extended-range wave-powered autonomous underwater vehicle applied to underwater wireless sensor networks. *Iscience, 25*(8). https://www.cell.com/iscience/fulltext/S2589-0042(22)01010-0

15. Garcia, D. A., Dionysis, G., Raskovic, P., & Duić, N. (2024). Advanced technological options for sustainable development of energy, water and environment systems upgrade towards climate neutrality. *Energy Conversion and Management: X*, *22*, 100528. https://doi.org/10.1016/j.ecmx.2024.100528

*Дата першого надходження рукопису до видання: 29.11.2025*
*Дата прийнятого до друку рукопису після рецензування: 12.12.2025*
*Дата публікації: 31.12.2025*