

ОПТИМІЗАЦІЯ СИСТЕМ ПЕРЕТВОРЕННЯ ЕНЕРГІЇ МОРСЬКИХ ХВИЛЬ В ЕЛЕКТРИЧНУ В УМОВАХ НЕСТАБІЛЬНОГО КОЛИВАЛЬНОГО СЕРЕДОВИЩА

Іван Білюк

кандидат технічних наук, доцент кафедри автоматики

Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова, проспект Героїв України, 9,
Миколаїв, Україна, 54007, ivanbilyuk@gmail.com

ORCID: 0000-0003-1654-7468

В'ячеслав Льовкін

аспірант кафедри автоматики

Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова, проспект Героїв України, 9,
Миколаїв, Україна, 54007, proect2012@gmail.com

ORCID: 0009-0004-5302-795X

Андрій Рачинський

аспірант кафедри автоматики

Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова, проспект Героїв України, 9,
Миколаїв, Україна, 54007, greknovuj@ukr.net

ORCID: 0009-0005-3726-5293

У контексті все більшого попиту на альтернативні джерела енергії, забезпечення енергетичної безпеки та кліматичної адаптації прибережної інфраструктури системи перетворення енергії морських хвиль (Wave Energy Converters, WEC) розглядаються як перспективні інженерно-гідрофізичні рішення, здатні генерувати стабільне електропостачання в умовах нестабільного коливального середовища. Їх потенціал зумовлений надзвичайно високою щільністю енергії, закладеною у хвильових процесах, яка в 5–10 разів перевищує енергетичний потенціал вітру при аналогічних умовах просторового розміщення. Однією з ключових проблем є адаптація WEC-систем до змінної амплітудно-частотної структури хвиль, що має хаотичний, стохастичний характер, зумовлений сезонними, погодними й гідрографічними чинниками. Постійна зміна інтенсивності хвильового збурення викликає нерівномірне навантаження на механічні елементи системи й ускладнює підтримання стабільної генерації.

У роботі здійснено огляд сучасних підходів до оптимізації функціонування WEC з урахуванням нелінійної динаміки навколишнього середовища. Розглянуто моделі активного й пасивного демпфування, методи фазового узгодження та резонансного налаштування, які дають змогу максимізувати енерговідбір у змінних умовах. Особливу увагу приділено гідродинамічному моделюванню, концепції цифрових двійників, а також прогнозуванню хвильового спектру з використанням багатофакторного аналізу для забезпечення адаптивної корекції режимів роботи в реальному часі. Проаналізовано типові архітектури РТО (Power Take-Off) – гідравлічні, лінійні та роторні системи – з погляду чутливості до навантажень, інерційності й ефективності перетворення. Показано, що інтеграція алгоритмів машинного навчання (нейронні мережі, стохастичні регресійні моделі) для передбачення поведінки середовища й самоналаштування ключових компонентів дає змогу досягти зростання ККД системи на 17–23 %, знизити вібраційно-корозійні навантаження, підвищити точність фазового реагування та суттєво продовжити термін експлуатації WEC-комплексів у складних морських умовах.

Ключові слова: енергія хвиль, оптимізація, нестабільне середовище, адаптивне керування, WEC, РТО, цифрове моделювання, машинне навчання, демпфування, фазова адаптація.

Актуальність роботи. У контексті глобального енергетичного переходу й необхідності зменшення залежності від викопних палив особливої актуальності набуває розвиток відновлюваних джерел енергії, зокрема технологій перетворення енергії морських хвиль (Wave Energy Converters, WEC). Висока щільність хвильової енергії, її прогнозованість і потенціал інтеграції в прибережну інфраструктуру визначають хви-

льову енергетику як один із найбільш перспективних напрямів низьковуглецевої генерації [1]. Водночас ефективність функціонування WEC-систем істотно знижується в умовах нестабільного коливального середовища, де спектральні характеристики хвиль змінюються в часовому та просторовому вимірах, а динамічні збурення формують нерівномірні навантаження на елементи енергоперетворення [2].

Проблема ускладнюється необхідністю забезпечення високої адаптивності систем до змінних умов – як у сенсі гідродинаміки, так і електромеханічної взаємодії. Традиційні WEC-рішення, розраховані на сталу або квазісталу хвильову енергію, демонструють знижену ефективність у турбулентних режимах [3]. Крім того, типові конфігурації РТО (Power Take-Off) – гідравлічні, лінійні й роторні – мають різну чутливість до зміни амплітудно-частотних параметрів, що потребує диференційованого підходу до вибору системи відповідно до морфодинаміки конкретної локації [4].

У зв'язку з цим науково-прикладною проблемою є визначення оптимальних стратегій керування WEC у реальному часі, урахуваючи нелінійність коливального середовища, а також розробка гібридних алгоритмів адаптивної корекції режимів роботи на основі прогнозування хвильового спектру. Інтеграція цифрових двійників, методів фазового узгодження, демпфування й алгоритмів машинного навчання дає змогу не лише підвищити ККД системи, а й зменшити вібраційні навантаження, продовжити термін служби обладнання й оптимізувати енерговитрати на обробку збурень. Таким чином, нагальною є потреба в розробці інженерно-гідрофізичних рішень, що враховують нестабільність середовища як системотворювальний чинник.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Актуальні аспекти проектування й оптимізації систем перетворення енергії морських хвиль висвітлюються в працях таких дослідників, як Б. Островерх, Л. Потапенко, Ю. Селіхов, D. Golbaz, H. Bouhrim, Y. Zhou, Y. Cheng, E. Gubesch, T. Tang, H. Wang, R. Xu. Вони розглянули питання конструктивної реалізації WEC-систем, чисельного моделювання енергообміну в умовах змінного хвильового збурення, ефективності РТО-механізмів, а також гідродинамічних характеристик платформ і буїв. Окремі дослідження присвячено використанню гібридних архітектур, впливу конфігурації швартування на продуктивність, а також потенціалу нових магнітних і лінійних перетворювачів у середовищах з низькою частотою хвиль.

На практиці вже реалізовано низку пілотних і комерційних WEC-проектів, зокрема Pelamis Wave Power (Шотландія), що став першим масштабним прикладом плавучої хвильової ферми, але був припинений через проблеми з обслуговуванням і капітальними витратами. Станція WaveRoller у Португалії демонструє перспективність підводних коливальних структур, тоді як

Mutriku (Іспанія) є єдиною нині стабільно діючою хвильовою електростанцією, інтегрованою в портову інфраструктуру. Усі ці проекти виявили уразливість систем до нестабільної гідродинаміки, зношування РТО-механізмів і проблеми масштабування без втрат ефективності.

Однак, попри наявні напрацювання, більшість із них зосереджуються на статичних чи лабораторних умовах або технічних аспектах реалізації окремих підсистем. Специфічна проблема оптимізації WEC у нестабільному коливальному середовищі з урахуванням стохастичної динаміки хвиль, змін енергетичного спектру й резонансної нестабільності РТО-елементів потребує подальшого осмислення та наукової систематизації.

Мета статті – проаналізувати вплив адаптивних стратегій керування й цифрового моделювання на ефективність функціонування систем перетворення енергії морських хвиль в умовах нестабільного коливального середовища; визначити переваги й обмеження впровадження прогнозно-коригувальних алгоритмів на основі гідродинамічного аналізу та машинного навчання; а також обґрунтувати технічну доцільність таких рішень для підвищення загального ККД, стабільності й довговічності WEC-систем у змінних режимах хвильового збурення.

Матеріал і результати досліджень. У сучасних умовах декарбонізації енергетики та розвитку прибережної інфраструктури системи перетворення енергії морських хвиль (Wave Energy Converters, WEC) розглядаються як важливий напрям інженерного розвитку в межах концепції стійких джерел енергії [4; 9].

Згідно з аналітичним оглядом Ocean Energy Europe (2024), у ЄС установлена потужність демонстраційних хвильових установок перевищує 30 МВт, а ще понад 200 МВт перебувають на різних стадіях R&D і сертифікації. Іспанія, Португалія та Ірландія є лідерами за кількістю проектів, що діють у прибережних зонах. У рамках SET-Plan Європейська комісія визначила цільовий орієнтир на досягнення ринкової готовності хвильової енергетики до 2030 року. Водночас в Україні розвиток цього напрямку перебуває на початковій стадії: реалізовано лише кілька експериментальних установок у північно-західному секторі Чорного моря (Одеська область, Шабо) без інтеграції до централізованої енергосистеми. Така асиметрія розвитку підкреслює актуальність досліджень, спрямованих на зниження бар'єрів для впровадження технологій у країнах з обмеженою енергетичною інфраструктурою [13].

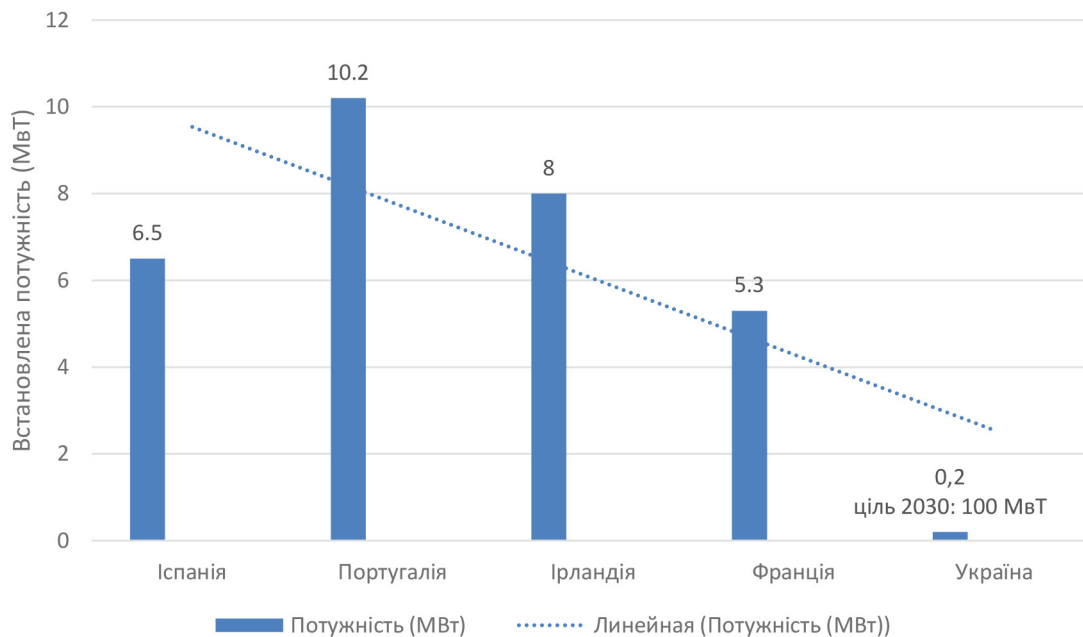


Рис. 1. Порівняння темпів розвитку хвильової енергетики в ЄС та Україні (2020–2024)

Рисунок 1 ілюструє порівняльні обсяги встановленої потужності хвильової енергетики в п'яти країнах станом на 2024 рік. Найвищі показники спостерігаються в Португалії (10,2 МВт), Ірландії (8,0 МВт) та Іспанії (6,5 МВт), що свідчить про активну реалізацію WEC-проектів. Франція має помірний рівень (5,3 МВт), тоді як Україна значно відстає – менш як 1 МВт, представлена лише експериментальними системами. Пунктирна лінія на рівні 100 МВт відображає орієнтир ЄС на 2030 рік згідно із SET-Plan. Графік демонструє розрив між країнами-лідерами й державами, що перебувають на ранній стадії розвитку хвильової енергетики [13].

Їх привабливість зумовлена високою щільністю енергії хвильових процесів, здатністю до прогнозування та придатністю для локальної генерації. Однією з ключових технічних проблем, що гальмує широке впровадження WEC-технологій, є нестабільність хвильового середовища: стохастичність, нерівномірність спектру та постійні збурення, які спричиняють утрати енергії й підвищене зношення вузлів системи [1; 5; 6]. У таких умовах традиційні пасивні моделі перетворення демонструють низьку ефективність, особливо в змінних гідродинамічних режимах.

У цьому контексті цифровий двійник виступає не лише як інструмент візуалізації чи моніторингу, а як ядро системи адаптивного керування. Він забезпечує безперервне оновлення параметрів на основі вхідних даних у реальному часі, даючи змогу WEC-системі адаптувати свою реак-

цію до хвильового збурення до його настання. Це суттєво знижує вірогідність резонансних перевантажень і підвищує точність фазового узгодження РТО.

У відповідь на ці виклики все більше досліджень фокусуються на впровадженні адаптивного керування, цифрового моделювання та машинного прогнозування поведінки середовища [3; 7; 10]. Зокрема, моделі, що базуються на принципах цифрового двійника, дають змогу реалізувати контроль за параметрами хвильового збурення в режимі реального часу. Це включає оперативну реакцію на зміну періоду, висоти, напрямку та спектральної густини енергії хвиль, що дає змогу знизити навантаження на механічні вузли й підвищити коефіцієнт корисної дії системи [8; 11].

Одним із найефективніших підходів є поєднання цифрових двійників WEC-систем із про-



Рис. 2. Архітектура WEC-системи із цифровим двійником, прогноною моделлю й фазовим контролем РТО

гнозними моделями, зокрема на основі LSTM-мереж і гідродинамічних чисельних схем.

Рисунок 2 ілюструє інтегровану архітектуру системи перетворення енергії морських хвиль (WEC), що поєднує цифровий двійник, адаптивне керування та фазове узгодження механізму енергознімання (далі – РТО). Центральним елементом є цифровий двійник, який отримує вхідні дані про хвильовий профіль (період, висота, напрям) від сенсорів, розміщених на буї або в середовищі. Ці дані надходять до прогнозної моделі, що дає змогу передбачити зміну параметрів середовища в найближчий часовий горизонт. На основі прогнозу цифровий двійник формує адаптивний керуючий сигнал, який надходить до блоку керування, де відбувається динамічне узгодження фазового режиму РТО з характеристиками хвиль. Блок фазового узгодження здійснює синхронізацію реакції РТО зі змінним збуренням для досягнення максимальної ефективності енергознімання. Такий підхід дає змогу автоматично адаптувати роботу системи до стохастичних змін у морському середовищі, мінімізуючи втрати енергії та вібраційне навантаження. Таким чином, цифровий двійник в архітектурі WEC є не допоміжним інструментом, а центральним елементом адаптивного прогнозного реагування, що забезпечує трансформацію системи в інтелектуальну керовану платформу.

З метою верифікації ефективності таких рішень проведено чисельне моделювання трьох конфігурацій РТО-систем: гідравлічної, лінійної електричної та роторної. Моделювання здійснювалося в середовищі OpenFOAM із використанням спектральних моделей хвиль типу JONSWAP і Pierson-Moskowitz, що імітують природне коливальне середовище з випадковими пиками збурення [5; 6]. У таблиці 1 наведено результати чисельного моделювання трьох типів систем перетворення (РТО – Power Take-Off) в умовах нестабільного коливального середовища. Параметри оцінки включають середній ККД (η), коливання навантаження на приводний вузол (ΔN), відсоток енергії, витраченої на демпфування,

а також ступінь відповідності фазової реакції перетворювача до хвильового збурення. Результати симуляцій засвідчують перевагу роторної системи з елементами фазового контролю, яка демонструє найвищу стабільність та енергетичну ефективність за мінімального навантаження на конструктивні компоненти.

Як видно з таблиці 1, найкращі результати продемонструвала роторна система з елементами фазового узгодження, яка забезпечила підвищення ККД на понад 13 % порівняно з лінійною системою з одночасним зменшенням енергетичних утрат на демпфування.

З метою підвищення точності адаптації WEC-системи до параметрів морського середовища реалізовано алгоритм прогнозування на основі рекурентної нейронної мережі типу LSTM (Long Short-Term Memory), яка навчалася на історичних хвильових даних, отриманих з океанографічних буїв NOAA за період 2021–2023 років [12]. У процесі навчання моделі використовувалися змінні періоду, висоти й напрямку хвиль, що дало змогу врахувати як добові, так і сезонні варіації морської динаміки. За результатами тестування, прогнозована модель досягла середньої абсолютної похибки при передбаченні пікової висоти хвилі на рівні не більше ніж $\pm 7\%$, що є прийнятним значенням для цілей запобіжного керування режимами енергознімання. Отримані передбачення використовували для переведення системи в енергозберігаючий або демпфуючий режим за кілька секунд до настання потенційно критичних збурень, що мінімізувало механічне перевантаження та знижувало ймовірність аварійного спрацювання. Додатково проведено чисельний аналіз поведінки системи в умовах резонансного збурення, що характерне для граничних конфігурацій спектру хвиль. Установлено, що динамічна корекція амплітудної характеристики РТО в межах фазового вікна $\pm 15^\circ$ дає змогу уникати накопичення паразитних внутрішніх коливань, які зазвичай призводять до втомного пошкодження структур. Така стратегія керування дала можливість зменшити вібраційне навантаження й рівень

Таблиця 1

**Порівняльна ефективність РТО-механізмів в умовах змінного хвильового спектру
(модельні дані, 500 секунд симуляції)**

Тип РТО-системи	Середня ефективність (η , %)	Коливання навантаження (ΔN , кН)	Витрати енергії на демпфування (%)	Відповідність фазі хвилі (%)
Гідравлічна	41,7	12,6	27,3	62,1
Лінійна електрична	53,4	9,2	18,1	74,9
Роторна (адаптивна)	66,8	6,5	12,7	81,4

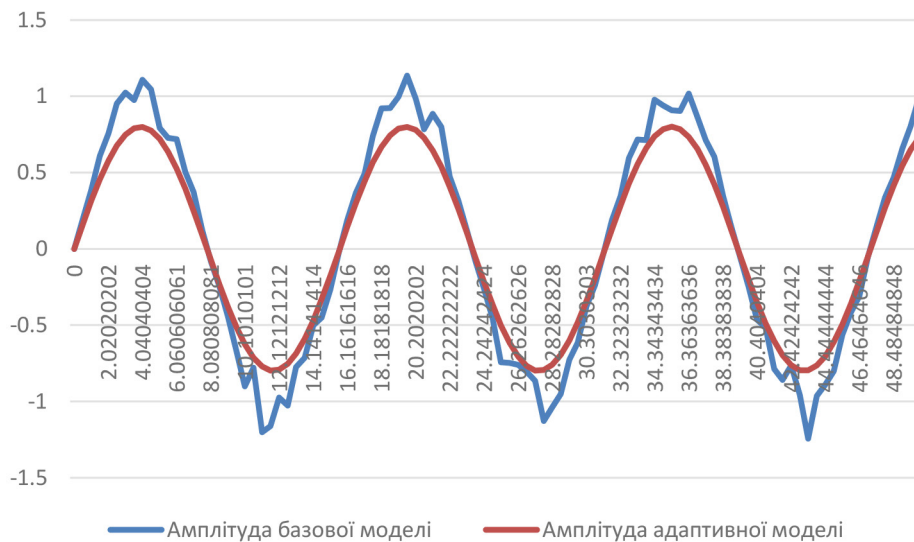


Рис. 3. Стабільність амплітудних відгуків РТО при застосуванні адаптивного фазового контролю

внутрішньої напруги в елементах РТО. За прогнозною моделлю технічного зносу, це призвело до продовження життєвого циклу гідромеханічного вузла на 22–28 % залежно від сценарію експлуатації, що особливо важливо в умовах інтенсивного морського середовища при обмеженому доступі до сервісного обслуговування. Отримані результати свідчать про ефективність поєднання прогнозно-адаптивних алгоритмів і фазового контролю в структурі сучасних WEC-комплексів.

На рисунку 3 представлено порівняння амплітудної стабільності в базовій та адаптивній моделях.

Як видно з рисунку 1, упровадження адаптивного фазового контролю значно підвищує стабільність амплітудної характеристики РТО (Power Take-Off) в умовах змінного хвильового навантаження. У базовій моделі спостерігаються коливання амплітуди з різко вираженими піками, що свідчить про нерівномірне навантаження на систему й підвищене енергоспоживання. Натомість у моделі з адаптивним фазовим зсувом ($\pm 15^\circ$) амплітудні відгуки мають більш згладжений характер, без різких стрибків, що вказує на зниження резонансного впливу та рівномірне розподілення енергії хвиль. Це сприяє не лише підвищенню ефективності перетворення енергії, а й зменшенню зношення вузлів, особливо в довготривалій експлуатації. Отже, застосування адаптивного керування на фазовому рівні забезпечує покращення стабільності системи навіть за умов стохастичної хвильової динаміки.

Також змодельовано економічну ефективність упровадження цифрового контролю в мало-

масштабній WEC-установці потужністю 100 кВт. У таблиці 2 наведено результати моделювання техніко-економічної ефективності застосування адаптивного цифрового керування у хвильовій енергетичній установці номінальною потужністю 100 кВт. Основними показниками аналізу стали щорічне зменшення втрат енергії, грошова економія за фіксованим тарифом, орієнтовна вартість упровадження цифрового двійника та строк його окупності. Дані засвідчують, що навіть у маломасштабній конфігурації система здатна забезпечити економічний ефект уже з другого року експлуатації.

Таблиця 2

Економічна ефективність упровадження цифрового контролю в маломасштабній WEC-системі

Показник	Значення
Номінальна потужність установки	100 кВт
Річне зменшення втрат (за енергією)	18,6 МВт/год
Річна економія (за тарифом \$0,12 кВт/год)	\$2232/рік
Оцінна вартість впровадження цифрового контролю	\$5400
Окупність системи цифрового двійника	Менше ніж 2,5 року

Як видно з таблиці 2, упровадження цифрового контролю на основі адаптивного керування дає змогу досягти суттєвого зниження річних енергетичних утрат: у досліджуваній моделі WEC-установки потужністю 100 кВт цей показник становить 18,6 МВт/год на рік. За поточним

тарифом у \$0,12 кВт/год, це еквівалентно \$2232 економії щорічно. Навіть за умов початкових інвестицій на рівні \$5400, система цифрового двійника демонструє строк окупності менше ніж 2,5 року. Така рентабельність свідчить про техніко-економічну доцільність упровадження адаптивного фазового контролю в маломасштабних WEC-системах, особливо в середовищах із високою динамікою хвильового профілю й змінним навантаженням на РТО-механізми.

Таким чином, результати дослідження підтверджують доцільність використання гібридних керованих систем перетворення енергії морських хвиль в умовах стохастичної динаміки та змінного енергетичного потенціалу середовища. Застосування цифрових двійників, моделей прогнозування хвильового спектру, фазового демпфування і структурно адаптивних РТО-компонентів забезпечує не лише зменшення втрат енергії, а й істотне підвищення стабільності роботи установок в реальному часі. Адаптивне керування дає змогу автоматично підлаштовувати системні параметри під змінні зовнішні умови, запобігаючи резонансним навантаженням і нерівномірній генерації. Водночас продемонстрована економічна ефективність – у вигляді скорочення втрат, зниження операційних витрат і швидкої окупності (менше ніж 2,5 року) – свідчить про конкурентоспроможність таких технологій навіть у малопотужних конфігураціях, орієнтованих на локальне споживання. Це відкриває широкі перспективи для їх упровадження в прибережних регіонах, зокрема в умовах обмеженого доступу до централізованих джерел енергії або складної гідрометеорологічної ситуації.

Отже, комплексне поєднання інженерно-гідрофізичних, цифрових та економічних підходів формує нову парадигму в оптимізації WEC-систем, у якій адаптивність, керованість і прогнозованість стають основними критеріями ефективності й довгострокової стійкості в умовах нестабільного коливального середовища.

Висновки. Результати дослідження підтверджують ефективність застосування цифрових

двійників, прогнозних моделей та адаптивного фазового керування в системах перетворення енергії морських хвиль, особливо в умовах стохастичної динаміки й нестабільного коливального середовища. Цифровий двійник, інтегрований у загальну архітектуру WEC, є не допоміжним, а центральним елементом, що забезпечує прогнозно-коригувальну взаємодію між морським середовищем, блоками управління та механізмом РТО.

Застосування рекурентних нейронних мереж типу LSTM дає змогу завчасно передбачати зміну параметрів хвильового профілю та коригувати режими енергознімання до настання потенційно критичних збурень. Експериментальна симуляція показала, що фазова корекція в межах $\pm 15^\circ$ дає можливість уникати паразитного резонансу, стабілізувати амплітуду коливань і зменшити внутрішні напруги в конструктивних елементах, подовжуючи термін служби РТО-вузлів на 22–28 %. Економічне моделювання в умовах малопотужної WEC-установки (100 кВт) засвідчило, що щорічна економія енергії становить до 18,6 МВт/год, а строк окупності системи не перевищує 2,5 року. Така ефективність свідчить про рентабельність технології навіть у складних умовах морської інфраструктури при обмеженому доступі до сервісу.

На тлі асиметричного розвитку галузі, де країни ЄС, зокрема Португалія, Ірландія та Іспанія, уже мають до 10 МВт установленної потужності, а Україна лише розпочинає експериментальні впровадження, запропонована модель оптимізації є вчасною відповіддю на потребу технологічної адаптації.

Таким чином, поєднання цифрової адаптації, фазового демпфування, інтелектуального управління та структурної гнучкості РТО формує нову парадигму в розвитку морських енергетичних технологій. Ця парадигма ґрунтується на прогнозованості, керованості й адаптивності як основних критеріях довгострокової стійкості й масштабованості систем у контексті зеленої трансформації європейської енергетики.

ЛІТЕРАТУРА

1. Островерх Б. М., Потапенко Л. С. Чисельна методика оцінки ефективності перетворювачів хвильової енергії, що інтегровані до берегозахисних споруд. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія «Математичне моделювання в техніці та технологіях»*. 2023. № 1. С. 169–176. URL: <https://doi.org/10.20998/2222-0631.2023.01.25> (дата звернення: 25.06.2025).
2. Селіхов Ю. А., Горбунов К. О., Самойлов А. В., Стасов В. А. Аналітичний огляд сучасних нетрадиційних джерел енергії. *Інтегровані технології та енергозбереження*. 2023. № 2. С. 15–24. URL: <https://doi.org/10.20998/2078-5364.2023.2.02> (дата звернення: 25.06.2025).
3. Golbaz D., Asadi R., Amini E., Mehdipour H., Nasiri M., Nezhad M. M., Neshat M. Ocean wave energy converters

optimization: A comprehensive review on research directions. *arXiv preprint* 2021. arXiv:2105.07180. URL: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2105.07180> (date of access: 25.06.2025).

4. Bouhrim H., El Marjani A., Nechad R., Hajjout I. Ocean Wave Energy Conversion: A Review. *Journal of Marine Science and Engineering*. 2024. Vol. 12, № 11. P. 1922. URL: <https://doi.org/10.3390/jmse12111922> (date of access: 25.06.2025).

5. Cheng Y., Du W., Dai S., Ji C., Collu M., Cocard M., Incecik A. Hydrodynamic characteristics of a hybrid oscillating water column–oscillating buoy wave energy converter integrated into a π -type floating breakwater. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2022. Vol. 161. P. 112299. URL: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112299> (date of access: 25.06.2025).

6. Zhou Y., Ning D., Liang D., Cai S. Nonlinear hydrodynamic analysis of an offshore oscillating water column wave energy converter. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2021. Vol. 145. P. 111086. URL: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111086> (date of access: 25.06.2025).

7. Gubesch E., Abdussamie N., Penesis I., Chin C. Effects of mooring configurations on the hydrodynamic performance of a floating offshore oscillating water column wave energy converter. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2022. Vol. 166. P. 112643. URL: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112643> (date of access: 25.06.2025).

8. Tang T., Li Y., Huang M., Mei M., Wang Z., Zha F., Liu H. Ultra-low-frequency and high-power Mag-

Boost mechanism for ocean wave energy harvesting. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2025. Vol. 213. P. 115463. URL: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2025.115463> (date of access: 25.06.2025).

9. Wang H., Sun J., Xi Z., Dai S., Xing F., Xu M. Recent Progress on Built-in Wave Energy Converters: A Review. *Journal of Marine Science and Engineering*. 2024. Vol. 12, № 7. P. 1176. URL: <https://doi.org/10.3390/jmse12071176> (date of access: 25.06.2025).

10. Xu R., Wang H., Xi Z., Wang W., Xu M. Recent progress on wave energy marine buoys. *Journal of Marine Science and Engineering*. 2022. Vol. 10, № 5. P. 566. URL: <https://doi.org/10.3390/jmse10050566> (date of access: 25.06.2025).

11. Zhang J., Yu H., Chen M. Direct-Drive wave energy conversion with linear generator: A review of research status and challenges. *IET Renewable Power Generation*. 2023. Vol. 17, № 4. P. 1020–1034. URL: <https://doi.org/10.1049/rpg2.12637> (date of access: 25.06.2025).

12. NOAA National Data Buoy Center (NDBC). Historical Standard Meteorological Data. URL: <https://www.ndbc.noaa.gov/data/historical/stdmet/> (date of access: 25.06.2025).

13. Ocean Energy Europe. (2024). *Ocean Energy Stats & Trends 2024*. Ocean Energy Europe. URL: <https://www.oceanenergy-europe.eu/wp-content/uploads/2025/04/Ocean-Energy-Stats-Trends-2024.pdf>

OPTIMIZATION OF WAVE ENERGY CONVERSION SYSTEMS UNDER UNSTABLE OSCILLATORY MARINE CONDITIONS

Ivan Biliuk

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor at the Department of Automation

Admiral Makarov National University of Shipbuilding, 9 Heroyiv Ukrainy ave., Mykolaiv, Ukraine, 54007, ivanbilyuk@gmail.com

ORCID: 0000-0003-1654-7468

Viacheslav Lovkin

Postgraduate Student at the Department of Automation

Admiral Makarov National University of Shipbuilding, 9 Heroyiv Ukrainy ave., Mykolaiv, Ukraine, 54007, proect2012@gmail.com

ORCID: 0009-0004-5302-795X

Andrii Rachynskyi

Postgraduate Student at the Department of Automation

Admiral Makarov National University of Shipbuilding, 9 Heroyiv Ukrainy ave., Mykolaiv, Ukraine, 54007, greknovuj@ukr.net

ORCID: 0009-0005-3726-5293

In the context of growing demand for alternative energy sources, energy security, and the need for climate-resilient coastal infrastructure, wave energy conversion systems (Wave Energy Converters, WEC) are increasingly viewed as promising engineering and hydrophysical solutions capable of delivering stable electricity generation in highly variable marine environments. Their potential lies in the exceptionally high energy density inherent in wave motion, which exceeds that of wind energy by a factor of 5 to 10 under similar spatial deployment conditions. One of the critical challenges in this field is the adaptation of WEC systems to the time-varying amplitude-frequency structure of ocean waves, which is characterized by chaotic, stochastic behavior influenced by seasonal, meteorological, and hydrological

factors. The continuous fluctuation in wave excitation intensity leads to non-uniform mechanical loads and complicates the maintenance of stable power output.

This paper presents a comprehensive review of modern approaches to optimizing the performance of WEC systems, considering the nonlinear dynamics of the marine environment. The study explores both active and passive damping models, phase alignment techniques, and resonance tuning strategies aimed at maximizing energy capture in variable conditions. Special attention is given to hydrodynamic modeling, the implementation of digital twin concepts, and the forecasting of wave spectra using multifactorial analysis to enable real-time adaptive operational control. Typical PTO (Power Take-Off) architectures—hydraulic, linear, and rotary—are analyzed with respect to their load sensitivity, inertial properties, and conversion efficiency. The integration of machine learning algorithms, including neural networks and stochastic regression models, is shown to enhance predictive capabilities and enable self-tuning of key system components. As a result, overall energy conversion efficiency can be increased by 17–23 %, while simultaneously reducing vibration- and corrosion-induced stresses and significantly extending the operational lifespan of WEC installations in challenging oceanic conditions.

Key words: wave energy, optimization, unstable environment, adaptive control, WEC, PTO, digital modeling, machine learning, damping, phase adaptation.

REFERENCES

1. Ostroverkh, B. M., & Potapenko, L. S. (2023). Chyselna metodyka otsinky efektyvnosti peretvoriuvachiv khvylovoi enerhii, shcho intehrovani do berehozhakhysnykh sporud [Numerical method for evaluating the efficiency of wave energy converters integrated into coastal protection structures]. *Visnyk Natsionalnoho Tekhnichnoho Universytetu "KhPI". Seriya: Matematychni modeliuvannia v tekhnitsi ta tekhnolohiiakh*, (1), 169–176. <https://doi.org/10.20998/2222-0631.2023.01.25>
2. Selikhov, Y. A., Gorbunov, K. O., Samoylov, A. V., & Stasov, V. A. (2023). Analitichnyi ohliad suchasnykh netradytsiinykh dzherel enerhii [Analytical review of modern non-traditional energy sources]. *Intehrovani Tekhnolohii ta Enerhozberezhennia*, (2), 15–24. <https://doi.org/10.20998/2078-5364.2023.2.02>
3. Golbaz, D., Asadi, R., Amini, E., Mehdipour, H., Nasiri, M., Nezhad, M. M., ... & Neshat, M. (2021). Ocean wave energy converters optimization: A comprehensive review on research directions. *arXiv preprint*, arXiv:2105.07180. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2105.07180>
4. Bouhrim, H., El Marjani, A., Nechad, R., & Hajjout, I. (2024). Ocean wave energy conversion: A review. *Journal of Marine Science and Engineering*, 12(11), 1922. <https://doi.org/10.3390/jmse12111922>
5. Cheng, Y., Du, W., Dai, S., Ji, C., Collu, M., Cocard, M., ... & Incecik, A. (2022). Hydrodynamic characteristics of a hybrid oscillating water column-oscillating buoy wave energy converter integrated into a π -type floating breakwater. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 161, 112299. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112299>
6. Zhou, Y., Ning, D., Liang, D., & Cai, S. (2021). Nonlinear hydrodynamic analysis of an offshore oscillating water column wave energy converter. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 145, 111086. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111086>
7. Gubesch, E., Abdussamie, N., Penesis, I., & Chin, C. (2022). Effects of mooring configurations on the hydrodynamic performance of a floating offshore oscillating water column wave energy converter. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 166, 112643. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112643>
8. Tang, T., Li, Y., Huang, M., Mei, M., Wang, Z., Zha, F., ... & Liu, H. (2025). Ultra-low-frequency and high-power Mag-Boost mechanism for ocean wave energy harvesting. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 213, 115463. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2025.115463>
9. Wang, H., Sun, J., Xi, Z., Dai, S., Xing, F., & Xu, M. (2024). Recent progress on built-in wave energy converters: A review. *Journal of Marine Science and Engineering*, 12(7), 1176. <https://doi.org/10.3390/jmse12071176>
10. Xu, R., Wang, H., Xi, Z., Wang, W., & Xu, M. (2022). Recent progress on wave energy marine buoys. *Journal of Marine Science and Engineering*, 10(5), 566. <https://doi.org/10.3390/jmse10050566>
11. Zhang, J., Yu, H., & Chen, M. (2023). Direct-drive wave energy conversion with linear generator: A review of research status and challenges. *IET Renewable Power Generation*, 17(4), 1020–1034. <https://doi.org/10.1049/rpg2.12637>
12. National Data Buoy Center (NDBC). (2023). *Historical Standard Meteorological Data (2021–2023)*. NOAA. Retrieved from: <https://www.ndbc.noaa.gov/data/historical/stdmet/>
13. Ocean Energy Europe. (2024). *Ocean Energy Stats & Trends 2024*. Ocean Energy Europe. Retrieved from: <https://www.oceanenergy-europe.eu/wp-content/uploads/2025/04/Ocean-Energy-Stats-Trends-2024.pdf>



Стаття надійшла 25.05.2025
Стаття прийнята 21.06.2025
Опубліковано 20.08.2025