

*О.Р. КОРСАКОВ, О.О. ДУНЄВ***ОГЛЯД ТИПОВИХ КОНСТРУКЦІЙ ЛІНІЙНИХ ГЕНЕРАТОРІВ З ПОСТІЙНИМИ МАГНІТАМИ ДЛЯ ВИКОРИСТАННЯ У ХВИЛЬОВИХ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЯХ**

Вступ. Зростання потреби в екологічно чистій та стабільній електроенергії стимулює розвиток нових відновлюваних джерел енергії, серед яких хвильова енергетика вирізняється високою щільністю енергії та потенціалом покриття суттєвої частки світового енергоспоживання. Одним із найперспективніших технічних рішень для перетворення енергії морських хвиль є системи прямого приводу на основі лінійних генераторів із постійними магнітами, що дозволяють уникнути складних механічних трансмісій і зменшують експлуатаційні витрати. **Мета.** Метою статті є огляд типових конструкцій лінійних генераторів з постійними магнітами, що застосовуються в хвильових електростанціях, та визначення їх ключових переваг, недоліків і перспектив розвитку. **Методи.** Дослідження виконано у вигляді огляду сучасних наукових праць та технічних рішень, присвячених будові та особливостям роботи лінійних генераторів у системах хвильової енергетики. **Результати.** Проаналізовано основні конструктивні різновиди лінійних генераторів, зокрема циліндричні та плоскі топології, різні схеми розташування постійних магнітів - заглиблених, поверхневих та масивів Халбаха - а також варіанти застосування залізного та повітряного осердя. Окремо розглянуто машини з поздовжнім та поперечним напрямком магнітного потоку; наведено їхні порівняльні характеристики. **Висновки.** Огляд показав, що для підвищення ефективності та надійності хвильових електростанцій найбільш перспективними напрямками подальших досліджень є вдосконалення конструкцій лінійних генераторів поперечного потоку, що дає змогу мінімізувати механічні навантаження та збільшити коефіцієнт корисної дії установки.

Ключові слова: хвильова енергетика, лінійний генератор, постійні магніти, масив Халбаха, WEC.

*O.R. KORSKOV, O.O. DUNIEV***A REVIEW OF TYPICAL DESIGNS OF LINEAR GENERATORS WITH PERMANENT MAGNETS FOR USE IN WAVE ENERGY CONVERTERS**

Introduction. The growing demand for clean and stable electrical energy stimulates the development of new renewable energy sources, among which wave energy stands out due to its high energy density and potential to cover a significant share of global electricity consumption. One of the most promising technical solutions for converting wave energy is the use of direct-drive systems based on permanent-magnet linear generators, which eliminate the need for complex mechanical transmissions and reduce operational costs. **Purpose.** The purpose of this article is to review typical designs of permanent-magnet linear generators used in wave power plants and to identify their key advantages, disadvantages, and development prospects. **Methods.** The study is conducted as a review of contemporary scientific publications and technical solutions related to the design and operating principles of linear generators in wave energy systems. **Results.** The main structural varieties of linear generators are analyzed, including cylindrical and flat topologies, different permanent-magnet arrangements-embedded, surface-mounted, and Halbach arrays - as well as the use of iron-core and air-core configurations. Machines with longitudinal and transverse magnetic flux paths are examined separately, and their comparative characteristics are presented. **Conclusion.** The review shows that improving the designs of transverse-flux linear generators is the most promising direction for further research aimed at enhancing the efficiency and reliability of wave power plants, as these designs allow for the minimization of mechanical loads and the increase of the overall performance of the system.

Keywords: wave energy, linear generator, permanent magnets, Halbach array, WEC.

Вступ. Розвиток електроенергетики має великий вплив на стан економіки в кожній державі. Щорічне зростання споживання електроенергії призводить до необхідності розвитку існуючих електростанцій та пошуку нових альтернативних джерел енергії. Це є пріоритетним завданням енергетичної політики держави. Для створення конкурентоздатних, надійних, екологічно безпечних і економічно обґрунтованих електричних станцій необхідно залучення фахівців з різних галузей науки і техніки.

Наприкінці минулого століття у всьому світі почалися дослідження використання енергії морської або океанічної хвилі. За оцінками, глобальна потенційна енергія цього ресурсу сягає 1170 ТВт·год на рік [1]. Варто зазначити, що щільність води приблизно в 1000 разів більша за щільність повітря. Хвильове навантаження, що виникає внаслідок руху частинок води набагато вище, ніж навантаження, що виникає під дією вітру, а також залежить від розміру елемента конструкції. Таким чином можна отримати значно більшу щільність енергії у порівнянні з відомими і широко застосовуваними джерелами відновлюваної енергії, такими як вітер та сонця.

Аналіз берегових регіонів світу показав, що перетворення енергії хвилі може забезпечити понад 10%

поточного світового споживання електроенергії. Однак тип берегової лінії, рельєф дна, наявність пляжів істотно впливають на енергію хвиль. Тому, останні роки, проводяться дослідження з розробок електрогенеруючого устаткування подалі від берегової лінії, де відсутні фактори, що впливають на потужність хвилі. Однак основні проблеми перетворення енергії океанічних хвиль обумовлені їхньою природою, а саме: різна амплітуда коливання хвилі, мала швидкість переміщення хвилі по вертикалі (1 м/с); значні впливи на енергію морських хвиль, що перевищують їхнє середнє значення в кілька десятків разів під час штормів і ураганів [2].

Потужність хвильової енергії змінюється з плином часу та залежить від сезону. Зміну потужності можна коригувати системами керування, які інтегруються до електрогенеруючого устаткування. Дана тенденція вже добре налагоджена на вітрових електричних станціях, де відсутність вітру зустрічається значно частіше ніж відсутність хвиль на воді.

Принцип перетворення енергії хвиль. Електрична енергія отримується з води за допомогою перетворювачів енергії морських хвиль WEC (від англ. Wave Energy Converter). Внесок таких установок у виробництво електроенергії все ще відносно низький, хоча

розробка постійно ведеться. Згідно з даними у [3, 4] у Європі було встановлено близько 32 МВт потужностей WEC перетворювачів починаючи з 2010 року. Станом на кінець 2024 року близько 13 МВт досі виробляють електроенергію, інші вже виведені з експлуатації через закінчення терміну служби. Очікується, що додавання потужностей різко зросте у 2026-2027 роках, оскільки будуть розгорнуті державно фінансовані хвильові електростанції. Враховуючи ці цифри, все ще існує великий простір для вдосконалення, досліджень та розробок, щоб збільшити частку WEC у виробництві електроенергії, так як багато WEC перетворювачів знаходиться на стадії створення дослідних установок різних конструкцій.

WEC перетворювачі мають широкий спектр моделей. Їх можна диференціювати за багатьма критеріями, такими як принцип роботи, рух перетворювача, метод відбору потужності, механічна структура, місце розміщення тощо. Однак, одна доцільна класифікація, яка підсумовує її розвиток з самого початку, - це за рухом перетворювача, який є компонентом систему відбору потужності РТО (від англ. Power Take-off). Найбільш розповсюджені принципи роботи систем відбору потужності представлені на рис. 1.

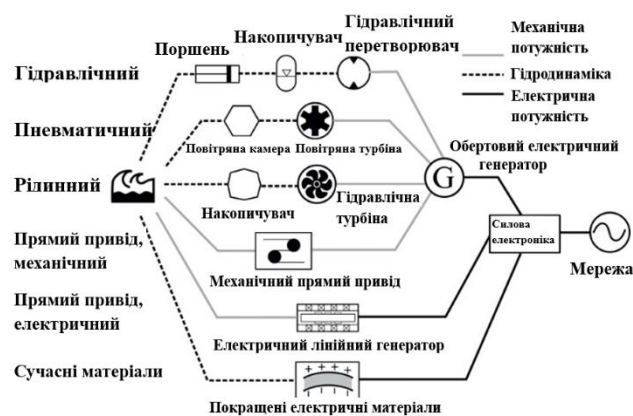


Рис. 1. Принципи відбору потужності, що використовуються для перетворення енергії хвиль

Традиційні гідралічні та пневматичні WEC працюють вловлюючи рух хвиль, а потім перетворюють його на відповідний рух обертових генераторів за допомогою редукторів, гвинтів, гідралічних пристроїв або турбін. Це спричиняє механічну складність та підвищує витрати на встановлення та обслуговування. Альтернативою є прямий привід із використанням лінійних генераторів на постійних магнітах, що зменшує кількість рухомих частин і спрощує конструкцію. Принцип роботи системи прямого приводу полягає у використанні плаваючих буїв – установок, в яких буй на прямую з'єднаний тросом з рухомою частиною генератора, що закріплена на морському дні. Така система дозволяє використовувати вертикальні коливання хвиль для генерування електроенергії. Однією з модифікацій є розташування генератора над поверхнею води, що полегшує доступ до обладнання для технічного обслуговування. Інша топологія – повністю занурені системи, в яких використовується підводний генератор, захищений від впливу хвиль. Хоча така система менш

вразлива до штормових умов, вона вимагає значних витрат на обслуговування через корозію та зношування деталей. Далі в тексті статті наводиться огляд типових конструкцій лінійних генераторів з постійними магнітами з точки зору різноманіття їх будови.

Огляд конструкцій лінійних генераторів із постійними магнітами. Конструкція базового лінійного генератора доволі проста і реалізується розгортанням і розплющенням класичного циліндричного генератора в лінійний. Рухома частина лінійного генератора має назву транслятора, оскільки він має кінцеву довжину і змінює напрямок свого руху, коли пересувається до своїх кінцевих положень. Вказана зміна напрямку руху необхідна для безперервного руху і тоді відбувається генерування електричної напруги змінної частоти.

Загальна конструкція. Лінійні генератори з постійними магнітами можна класифікувати в залежності від різних факторів. В своєму загальному виконанні вони мають циліндричну або плоску конструкцію як показано на рис. 2.

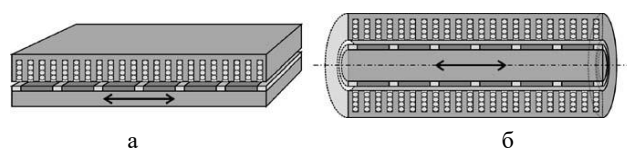


Рис. 2. Загальна конструкція лінійного генератора; а - плоска, б - циліндрична

Плоский варіант простіший у виготовленні, дешевший та зручніший в обслуговуванні. Щоб компенсувати сили притягання між статором і транслятором, застосовують двобічні або багатобічні схеми. Проте виробничі похибки можуть спричинити нерівномірність повітряного проміжку. Трубчаста конструкція усуває цю проблему завдяки циліндричній симетрії, зменшує втрати та покращує використання магнітів, хоча є дорожчою у виробництві через складність укладання пакетів заліза паралельно до осі транслятора.

Розташування постійних магнітів. Постійні магніти можуть розташовуватися, як на статорі, так і на трансляторі, як показано на рис. 3.

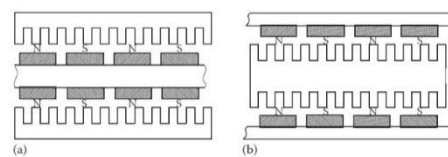


Рис. 3. Розташування постійних магнітів: а - на трансляторі, б - на статорі

Класична топологія передбачає встановлення магнітів на трансляторі, однак це ускладнює конструкцію, погіршує теплову стабільність та збільшує ризик розмагнічування. Тож є три можливі варіанти розташування масиву магнітів на трансляторі показані на рис. 4.

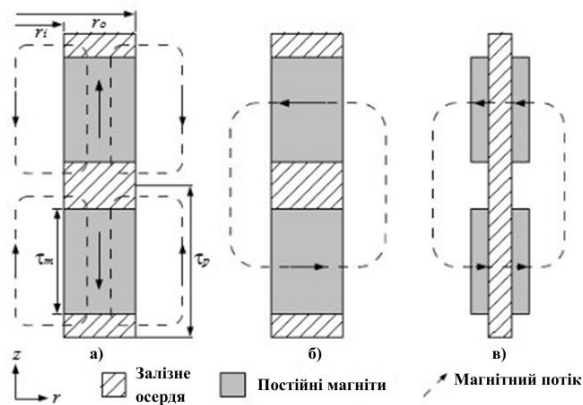


Рис. 4. Розташування постійних магнітів на трансляторі: а - заглиблені, аксіально направлені, б - заглиблені, радіально направлені, в - розташовані на поверхні

Перевага конструкції транслятора із заглибленими магнітами полягає в тому, що щільність магнітного потоку в повітряному зазорі може перевищувати залишкову щільність потоку постійних магнітів. Основна проблема такого варіанта полягає у відносно низькій механічній міцності масиву магнітів на великих довжинах транслятора. Оскільки секції магнітів укладені вздовж транслятора, який буде встановлений вертикально, то необхідні стрижні, щоб проходити через магніти та залізні блоки для зміцнення всієї конструкції. В такому випадку довжина транслятора буде обмежена міцністю на розтяг цих стрижнів. Збільшення довжини транслятора, отже, і ваги супроводжується збільшенням товщини стрижня, що погіршує магнітні характеристики.

Конфігурація з поверхневим монтажем враховує ці проблеми. Механічна опора магнітів є суцільною, міцність якої досягається за рахунок її безперервної форми.

На додаток до попередніх варіантів розташування магнітів для збільшення щільності магнітного потоку в певному напрямку в лінійних генераторах можуть використовуватися масиви Халбаха. Приклад такого масиву наведено на рис. 5.

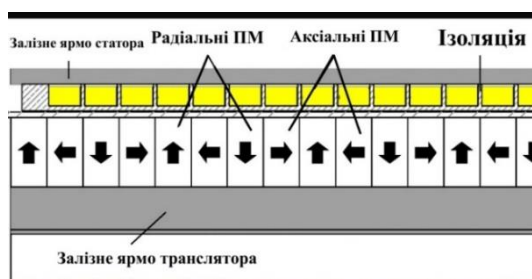


Рис. 5. Приклад розташування постійних магнітів у масиві Халбаха

За допомогою правильно підбраного розташування магнітів у масивах Халбаха магнітний потік може бути погашений з одного боку масиву, тоді як з іншого боку він посилюється. Лінійний генератор на основі масиву Халбаха порівнювався з іншими типовими конструкціями і було виявлено, що масиви

Халбаха також можуть зменшити загальну силу магнітного залипання [5,6].

Тип осердя. У лінійних генераторах, які використовуються в хвильовій енергетиці вибір типу магнітного осердя – ключовий аспект конструювання. Осердя сильно впливає на ефективність, габарити, втрати та механічну надійність генератора. Основні типи осердь, що застосовуються, – це залізне та повітряне осердя.

Багато WEC з прямим приводом на основі лінійних генераторів із залізним осердям були розроблені та випробувані завдяки їхній продуктивності. Дослідження [7] показало, що статор із залізним осердям може генерувати втричі вищу напругу (середньоквадратичне значення), ніж статор без заліза (з повітряним осердям), оскільки магнітний потік всередині залізного осердя вищий через низький магнітний опір. Проте залізні осердя значно підвищують сили магнітного залипання (cogging forces) між статором і рухомих транслятором, особливо коли використані постійні магніти [8, 9]. Ця проблема значною мірою ускладнює проектування підшипників та конструкцію самої машини, а також зменшує вихідну потужність генератора. На додаток ці сили створюють додаткові пульсації, які підвищують вібрацію та акустичний шум, пошкоджуючи магніти та зубці статора.

Через перераховані проблеми машини з повітряним осердям отримують все більшу увагу для використання в хвильових установках. Приклад [10] такого проекту з університету Стеленбош (Південно Африканська Республіка) показано на рис. 6. Незважаючи на те, що використовується більше постійних магнітів, ніж у порівнянні з генератором з залізним осердям, усунення сил зубцевого зчеплення і усунення сил тяжіння між статором і транслятором робить генератори з повітряним осердям привабливими для розгляду і використанню в хвильових установках.

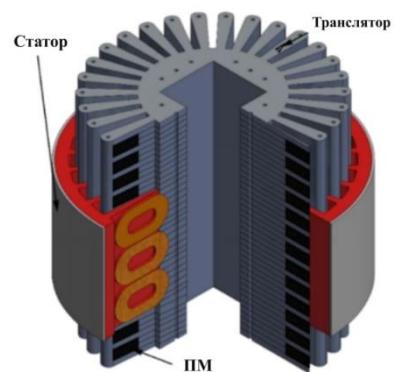


Рис. 6. Конфігурація багатостороннього лінійного генератора з повітряним (немагнітним) осердям статора

Наявність пазів статора. В класичному виконанні лінійного генератора обмотка статора укладається в пази статора.

Для мінімізації сил зубцевого зчеплення було запропоновано генератор без пазів [11], як показано на рис. 7. У такому лінійному генераторі обмотка статора рівномірно розподілена на гладкому осерді статора.

Безпазові лінійні генератори забезпечують меншу пульсацію протидіючого моменту, і при високій вхідній частоті можуть досягати більш високої ефективності, ніж генератори із зубцово-пазовою конструкцією.

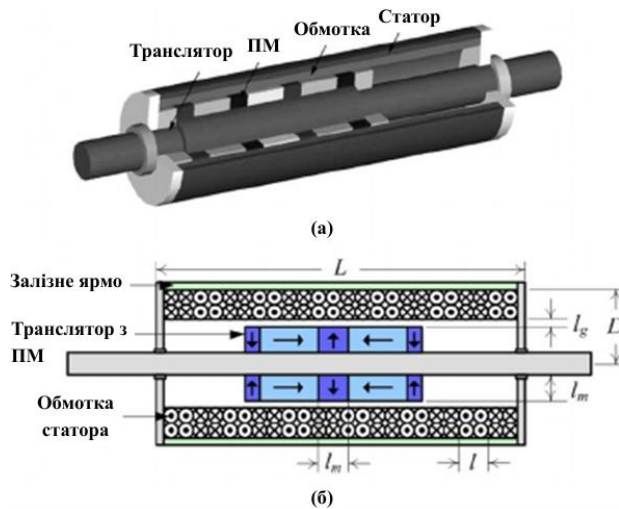


Рис. 7. Лінійний генератор без пазів статора
а - загальний вигляд, б - поперечний переріз

Аналіз запропонованого генератора показав, що сили залипання можна істотно зменшити, у той час як питома потужність виходить трохи нижче, ніж у генератора з пазами. Тому генератору без пазів потрібен більший об'єм, ніж генератору з пазами, щоб генерувати ту саму електроенергію з енергії морської хвилі. На додаток, більший повітряний проміжок вимагає більшої кількості матеріалу постійних магнітів.

Шлях магнітного потоку. Розрізняють лінійні генератори із поздовжнім і поперечним напрямком магнітного потоку. У першого лінії магнітного потоку замикаються у площині, паралельній напрямку руху транслятора, як зображено на рис. 8.

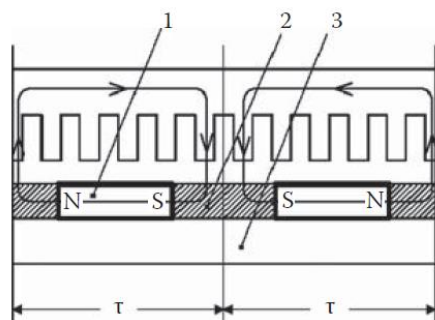


Рис. 8. Лінійний генератор з поздовжнім напрямком магнітного потоку (*Longitudinal Flux Machine*);
1 - постійний магніт, 2 - феромагнітна вставка, 3 - ядро транслятора

Особливої уваги заслуговують лінійні генератори поперечного потоку, в яких площа ліній магнітного потоку перпендикулярна напрямку руху транслятора. Такі генератори продемонстрували високу ефективність за низьких швидкостей, що є типовим для хвильових умов.

Базова конструкція машини поперечного потоку показано на рис. 9. На ньому зображено фрагмент статора з П-подібними осердями та транслятор з розташованими на ньому з чергуванням постійні магніти. Кратне співвідношення осердь магнітопроводу на статорі і пар постійних магнітів на трансляторі забезпечує замкнуті шляхи магнітного потоку навколо котушок.

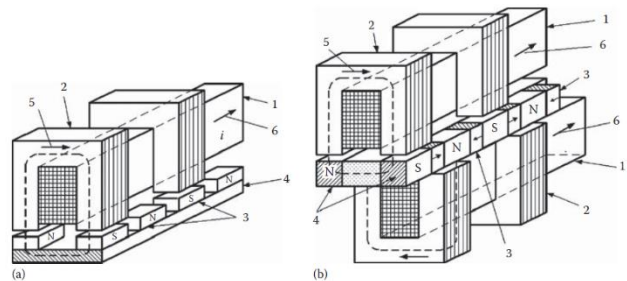


Рис. 9. TFM генератор (*Transverse Flux Machine*)
з поперечним напрямком магнітного потоку
а - односторонній варіант, б - двосторонній варіант;
1 - обмотка статора, 2 - П-подібні осердя, 3 - постійні магніти, 4 - феромагнітне осердя транслятора, 5 - магнітний потік, 6 - струм

Згідно з даними в [12, 13], лінійний генератор з поперечним магнітним потоком має значно більші значення питомої потужності в повітряному проміжку і коефіцієнта магнітного потоку ніж у генераторів поздовжнього потоку, а також у генераторів без металевих осердь. Даний факт є безпосередньою його перевагою і потребує подальших досліджень і вдосконалень конструкції.

Висновки. У сучасних умовах зростання потреби в чистій та стабільній енергії дослідження лінійних генераторів для хвильових електростанцій є важливими через їхню перспективність у прямому перетворенні низькошвидкісних коливальних рухів хвиль у електроенергію без складних механічних передач. У статті було розглянуто основні типи конструкцій таких генераторів: плоскі та циліндричні конфігурації, різні схеми розташування постійних магнітів (заглиблені, поверхневі, масиви Халбаха), варіанти осердь (залізне та повітряне), а також генератори з поздовжнім і поперечним напрямком магнітного потоку. Аналіз показує, що найбільш перспективним напрямом майбутніх досліджень є вдосконалення лінійних генераторів поперечного потоку, оскільки вони забезпечують високу ефективність за малих швидкостей та мають потенціал для підвищення надійності хвильових енергетичних установок.

Список літератури

1. Farrok, O.; Ahmed, K.; Tahlil, A.D.; Farah, M.M.; Kiran, M.R.; Islam, R. Electrical Power Generation from the Oceanic Wave for Sustainable Advancement in Renewable Energy Technologies. *Sustainability* 2020, 12, 2178.
2. Рашепкін А. П., Кондратенко І. П., Карлов О. М., Кришук Р. С. Магнітоелектричний перетворювач енергії морських хвиль. *Технічна електродинаміка*. 2021. № 4. С. 25-34.
3. Ocean Energy Europe (2025). *Ocean Energy Stats & Trends 2024*. Report by Ocean Energy Europe.

4. Jin, C.; Kang, H.; Kim, M.; Bakti, F.P. Performance evaluation of surface riding wave energy converter with linear electric generator. *Ocean Eng.* 2020, 218 p.
5. Zhang, J.; Yu, H.; Chen, Q.; Hu, M.; Huang, L.; Liu, Q. Design and experimental analysis of AC linear generator with Halbach PMarrays for direct-drive wave energy conversion. *IEEE Trans. Appl. Supercond.* 2013, 24, 1–4.
6. Boldea, I.; Linear Electric Machines, Drives, and MAGLEVs. Handbook, ISBN 978-1-4398-4514-1, 2013.
7. Szabo, L.; Oprea, C. Wave energy plants for the black sea possible energy converter structures. In Proceedings of the 2007 International Conference on Clean Electrical Power, Capri, Italy, 21–23 May 2007; IEEE: Piscataway, NJ, USA, 2007; pp. 306–311
8. Al Shami, E.; Zhang, R.; Wang, X. Point absorber wave energy harvesters: A review of recent developments. *Energies* 2019, 47 p.
9. Panicker, P. The Vertical Axis Oscillating Wave Power Generator. Available online: <https://contest.techbriefs.com/2012/entries/sustainable-technologies/2496> (accessed on 25 April 2024).
10. R. Vermaak and M. J. Kamper, "Construction and control of an air-cored permanent magnet linear generator for direct drive wave energy converters," *2011 IEEE International Electric Machines & Drives Conference (IEMDC)*, Niagara Falls, ON, Canada, 2011, pp. 1076–1081
11. Liu, Cheng-Tsung & Lin, Chien-Lin & Hwang, C.C. & Tu, Chun-Hung. (2010). Compact Model of a Slotless Tubular Linear Generator for Renewable Energy Performance Assessments. *Magnetics, IEEE Transactions on.* 46. 1467 - 1470. 10.1109/TMAG.2010.2042037.
12. Cruz, J. (Ed.) (2008). *Ocean wave energy: Current status and future perspectives*. Green Energy and Technology. Springer: Berlin.
13. Ballestín-Bernad, V.; Artal-Sevil, J.S.; Domínguez-Navarro, J.A. A Review of Transverse Flux Machines Topologies and Design. *Energies* 2021. <https://doi.org/10.3390/en14217173>.
2. Rashchepkin A. P., Kondratenko I. P., Karlov O. M., Kryshchuk R. S. *Mahnitoelektrychnyy peretvoryuvach enerhiyi mors'kykh khvyli'. Tekhnichna elektrodynamika.* 2021. № 4. S. 25-34.
3. Ocean Energy Europe (2025). *Ocean Energy Stats & Trends 2024*. Report by Ocean Energy Europe.
4. Jin, C.; Kang, H.; Kim, M.; Bakti, F.P. Performance evaluation of surface riding wave energy converter with linear electric generator. *Ocean Eng.* 2020, 218 p.
5. Zhang, J.; Yu, H.; Chen, Q.; Hu, M.; Huang, L.; Liu, Q. Design and experimental analysis of AC linear generator with Halbach PMarrays for direct-drive wave energy conversion. *IEEE Trans. Appl. Supercond.* 2013, 24, 1–4.
6. Boldea, I.; Linear Electric Machines, Drives, and MAGLEVs. Handbook, ISBN 978-1-4398-4514-1, 2013.
7. Szabo, L.; Oprea, C. Wave energy plants for the black sea possible energy converter structures. In Proceedings of the 2007 International Conference on Clean Electrical Power, Capri, Italy, 21–23 May 2007; IEEE: Piscataway, NJ, USA, 2007; pp. 306–311
8. Al Shami, E.; Zhang, R.; Wang, X. Point absorber wave energy harvesters: A review of recent developments. *Energies* 2019, 47 p.
9. Panicker, P. The Vertical Axis Oscillating Wave Power Generator. Available online: <https://contest.techbriefs.com/2012/entries/sustainable-technologies/2496> (accessed on 25 April 2024).
10. R. Vermaak and M. J. Kamper, "Construction and control of an air-cored permanent magnet linear generator for direct drive wave energy converters," *2011 IEEE International Electric Machines & Drives Conference (IEMDC)*, Niagara Falls, ON, Canada, 2011, pp. 1076–1081
11. Liu, Cheng-Tsung & Lin, Chien-Lin & Hwang, C.C. & Tu, Chun-Hung. (2010). Compact Model of a Slotless Tubular Linear Generator for Renewable Energy Performance Assessments. *Magnetics, IEEE Transactions on.* 46. 1467 - 1470. 10.1109/TMAG.2010.2042037.
12. Cruz, J. (Ed.) (2008). *Ocean wave energy: Current status and future perspectives*. Green Energy and Technology. Springer: Berlin.
13. Ballestín-Bernad, V.; Artal-Sevil, J.S.; Domínguez-Navarro, J.A. A Review of Transverse Flux Machines Topologies and Design. *Energies* 2021. <https://doi.org/10.3390/en14217173>.

References (transliterated)

1. Farrok, O.; Ahmed, K.; Tahlil, A.D.; Farah, M.M.; Kiran, M.R.; Islam, R. Electrical Power Generation from the OceanicWave for Sustainable Advancement in Renewable Energy Technologies. *Sustainability* 2020, 12, 2178

Надійшла (received) 21.11.2025

Відомості про авторів / About the authors

Корсаков Олександр Ростиславович (Oleksandr Korsakov) – аспірант, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»; м. Харків, Україна; ORCID <https://orcid.org/0009-0005-6085-2605>; e-mail: oleksandr.korsakov@ieec.khpi.edu.ua

Дунєв Олексій Олександрович (Oleksii Duniev) – кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»; м. Харків, Україна; ORCID <https://orcid.org/0000-0001-8196-7077>; e-mail: Oleksii.Duniev@khpi.edu.ua