

**ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНЕ ПЕРЕТВОРЕННЯ ЕНЕРГІЇ**

УДК 621.311.25:532.59

DOI: <https://doi.org/10.15407/publishing2023.64.005>**МЕТОДИКА РОЗРАХУНКУ ЕНЕРГЕТИЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПЕРЕТВОРЮВАЧА ЕНЕРГІЇ МОРСЬКИХ ХВИЛЬ ЗА ПЕРІОД КОЛИВАННЯ ХВИЛІ**

**І.П. Кондратенко**<sup>\*</sup>, чл.-кор. НАН України, **Р.С. Кришук**<sup>\*\*</sup>, канд. техн. наук,  
**О.М. Карлов**<sup>\*\*\*</sup>, канд. техн. наук  
Інститут електродинаміки НАН України,  
пр.Перемоги, 56, Київ, 03057, Україна  
e-mail: [\\*dep7ied@ukr.net](mailto:*dep7ied@ukr.net), [\\*\\*dygogive@gmail.com](mailto:**dygogive@gmail.com), [\\*\\*\\*lexa.k.ua@gmail.com](mailto:***lexa.k.ua@gmail.com)

*Використання ефективних та екологічно чистих методів виробництва електроенергії є одним із головних питань енергетики. Переваги та недоліки електростанцій, що працюють на енергії морських хвиль, відомі й постійно досліджуються. Існує багато підходів і методів розрахунку перетворення енергії морських хвиль в електроенергію, які мають свої переваги та недоліки, призначені для різних конструкцій перетворювачів і використовують різні підходи. У статті пропонується проста схема перетворювача, що перетворює енергію коливань циліндричного буя в електричну енергію. Метою роботи є розроблення простої методики розрахунку енергетичних характеристик перетворювача енергії морських хвиль, який складається з циліндричного буя, шківів та магнітоелектричного генератора, з використанням усереднених енергетичних показників генератора. Для перетворення електроенергії була використана проста схема з одним циліндричним буюм та трифазним генератором. В якості споживача електроенергії використано резистивне навантаження. Функцію коливань морської поверхні представлено у вигляді синусоїди з вищими гармоніками. Складено рівняння балансу сил, що діють на буй, з урахуванням коефіцієнта відношення моменту на роторі генератора до його швидкості. Використано ітераційне обчислення оптимальної швидкості обертання ротора для максимізації потужності споживання електроенергії. Для встановлення опору резисторів використовуються характеристики ustalених режимів роботи генератора та усереднена за період морської хвилі оптимальна швидкість ротора. Для встановлення змінних за період морської хвилі енергетичних показників виконується моделювання генератора з оптимальним опором резисторів та заданою змінною за період швидкістю ротора. Досліджуються енергетичні характеристики перетворювача з одним буюм, з амплітудою хвилі 1 метр і періодом 10 секунд. Бібл. 16, рис. 10.*

**Ключові слова:** відновлювана енергетика, морські хвилі, перетворювач енергії хвиль, методика розрахунку, швидкість ротора, енергетичні характеристики.

**Вступ.** Однією з головних проблем енергетики є ефективне використання екологічно чистих методів виробництва електроенергії. Морські хвилі є екологічно чистим джерелом енергії. Переваги та недоліки електростанцій, які використовують енергію морських хвиль, постійно досліджуються. Кожне нове дослідження сприяє розширенню знань у цій галузі, висвітлюючи проблему з погляду унікальності.

За даними літератури [1, 2], енергоресурс морських хвиль узбережжя Чорного моря становить 200 млрд. кВт·год на рік із середньою потужністю 5...7,5 кВт на метр ширини хвилі. Для моделювання електростанцій, що перетворюють енергію хвиль в електроенергію, рекомендується використовувати моделі морських хвиль з амплітудою від 0,5 до 1,75 м і періодом від 4 до 7 с. Такі хвилі для узбережжя Чорного моря мають помірну довжину  $\lambda = 16-60$  м і доступні від 2500 до 7000 годин на рік [3].

Дослідження експериментальної моделі [4] показало, що за висоти хвилі 0,5 м, піковий період хвиль 3,2 с дає середню видобуту потужність приблизно в 6,1 кВт від трьох перетворювачів хвильової енергії, в той час як найменша середня потужність досягає 1,4 кВт



при піковому періоді 7,5 с. Коли значуща висота хвилі становить 1 м, максимальна потужність 16,1 кВт досягається, якщо період хвилі складає 3,8 с, тоді як потужність 6,4 кВт досягається, якщо період складає 8,2 с. У цій роботі для прикладу досліджується потужність, що забирається одним буєм, з амплітудою хвилі 1 м і періодом 10 с.

У світі розроблено і практично впроваджено велику кількість технологічних схем і методів перетворення кінетичної енергії хвиль в електричну [3–8]. Більшість цих схем включають турбіни, гідронасоси й механічні редуктори для передачі зворотно-поступального руху води на традиційний електрогенератор. Такі пристрої мають дуже складну й дорожу конструкцію, що знижує надійність електростанцій. Наприклад, у роботі [6] представлено гібридний перетворювач енергії океанських хвиль і течій в електричну енергію, що використовує редуктор для одностороннього обертання вала генератора. У роботі [15] коливання буя передається через шестерню на вал генератора.

Розроблено і досліджено різні методики розрахунку перетворення енергії хвиль в електроенергію, наприклад [3, 9]. Очевидно, що для дослідження потужності, яку можна отримати із широкого діапазону параметрів морських хвиль, потрібно виконувати серію розрахунків. Для цього потрібна проста й одночасно достатньо точна методика розрахунку для певної вибраної схеми перетворювача енергії морських хвиль.

Розрахунок перехідних процесів енергетичних показників генератора, який входить до складу перетворювача енергії морських хвиль в електроенергію, потребує певного часу обчислення лише для одного періоду хвилі. Відомо, що розрахунок усереднених (усталених) енергетичних показників генератора, коли задається постійна швидкість обертання ротора, вимагає менше часу. Тому видається цікавим встановити, яким чином можна використати розрахунок усереднених (усталених) енергетичних показників генератора для проектування перетворювача енергії морських хвиль.

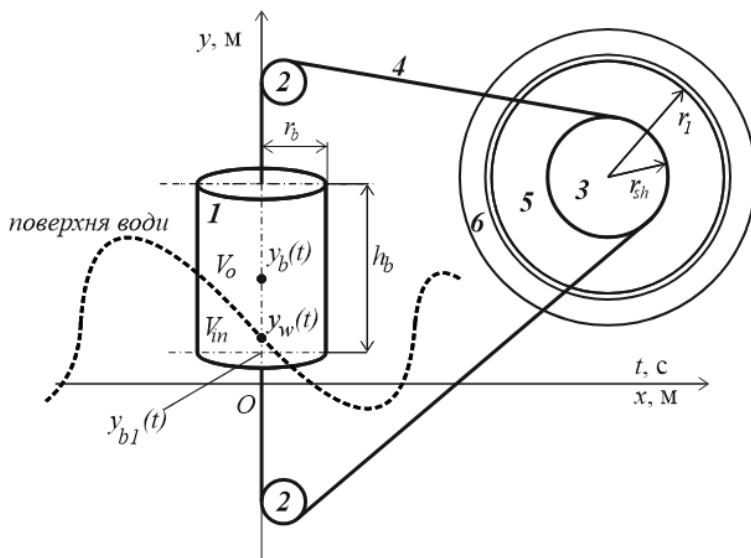


Рис. 1

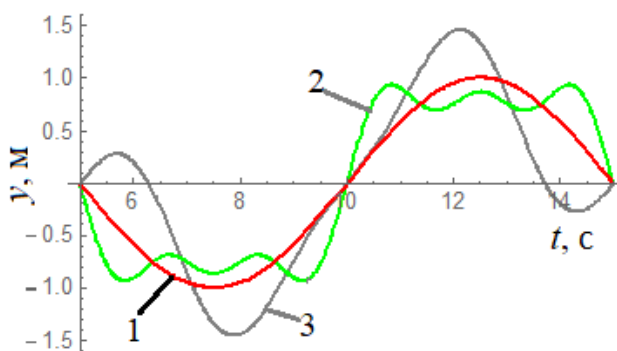


Рис. 2

**Метою роботи** є розроблення простої методики розрахунку енергетичних характеристик перетворювача енергії морських хвиль, який складається з циліндричного буя, шківів та магнітоелектричного генератора, з використанням усереднених енергетичних показників генератора.

**Схема перетворювача.** У цій роботі пропонується для дослідження проста схема перетворювача, що здійснює перетворення лінійного коливання буя в обертове коливання ротора генератора (рис. 1). Тут показано осі:  $y$  – висота;  $t$  – час;  $x$  – відстань. Позначення на рисунку: 1 – буй; 2 – роликові опори; 3 – шків радіусом  $r_{sh}$ ; 4 – трос (або ремінь, ланцюг); 5 – ротор генератора радіусом  $r_1$ ; 6 – статор. Буй рухається вгору-вниз уздовж осі ординат і під час руху тягне закріплений на роликових опорах трос для обертання шківів, який жорстко з'єднаний з обертаним валом ротора генератора. Також в [9] показана альтернативна схема передачі

руху на обертовий вал генератора з використання зубчастої передачі.

Виконані умови: генератор встановлений на платформі, яка є нерухомою відносно дна моря. Роликоопори жорстко прикріплені до платформи. Буй розташований між роликооперами і коливається відносно них. Буй рухається лише вертикальною віссю.

Висота центру буя  $y_b(t)$  і поверхня води  $y_w(t)$  залежать від часу  $t$  (рис. 1).  $V_{in}$  – частина об'єму буя, яка знаходиться під водою,  $V_o$  – частина об'єму буя над водою. Поверхня води  $y_w(t)$  залежить також від відстані  $x$  відносно центру буя і може бути записана як функція  $y_w(t, x)$ .

**Функція коливання морської поверхні.** Вважається, що функція  $y_w(t, x)$  відома і задана. Найпростішим типом коливань морської води є синусоїда [2, 10] (рис. 2, позначка 1):

$$y_w(t, x) = a_w \sin \left( \omega_w \left( t + \frac{x}{v_w} \right) \right). \quad (1)$$

Тут  $a_w$  – амплітуда хвилі;  $v_w$  – швидкість хвилі,

$$T_w = \lambda_w / v_w, \quad \omega_w = 2\pi f_w, \quad f_w = 1/T_w, \quad (2)$$

де  $T_w$  – період коливання хвилі,  $\lambda_w$  – її довжина,  $f_w$  – частота хвиль. Оскільки морські хвилі коливаються хаотично і залежать від багатьох природних факторів, ідеально синусоїдальних морських хвиль у природі не існує. Тому використання функції морської хвилі у формі простої синусоїди (1) є значним спрощенням. Морську хвилю можна також подати сумою окремих гармонічних складових [2], наприклад:

$$y_w(t, x) = a_w \sin \left( \omega_w \left( t + \frac{x}{v_w} \right) \right) + \frac{a_w}{\kappa_{11}} \sin \left( \kappa_{12} \omega_w \left( t + \frac{x}{v_w} \right) \right) + \frac{a_w}{\kappa_{21}} \sin \left( \kappa_{22} \omega_w \left( t + \frac{x}{v_w} \right) \right). \quad (3)$$

Тут  $\kappa_{11}$ ,  $\kappa_{12}$ ,  $\kappa_{21}$ ,  $\kappa_{22}$  – коефіцієнти гармонік. Наприклад, встановлені такі значення:  $v_w = 1$  м/с,  $\lambda_w = 10$  м,  $a_w = 1$  м. Якщо присутні 1-а, 3-я і 5-а гармоніки [3], то  $\kappa_{11} = \kappa_{12} = 3$ ,  $\kappa_{21} = \kappa_{22} = 5$ , і функція (3) має вигляд як на рис. 2 (позначка 2). Якщо ці коефіцієнти підібрати довільно, наприклад  $\kappa_{11} = \kappa_{12} = 2$ ,  $\kappa_{21} = -3$ ,  $\kappa_{22} = 3$ , тоді функція (3) може виглядати так, як на рис. 2 (позначка 3).

**Рівняння балансу сил, що діють на буй.** Сили Архімеда і земне тяжіння. На буй, що знаходиться на воді, діють сили Архімеда  $F_a$  і сили тяжіння  $F_e$  [11] у напрямку координати  $y$  (рис. 1):

$$F_a(t) = \rho_w g V_{in}(t), \quad (4)$$

$$F_e = -m_b g. \quad (5)$$

Тут  $\rho_w = 1000$  кг/м<sup>3</sup> – густина води;  $g = 9,8$  м/с<sup>2</sup> – прискорення вільного падіння;  $m_b$  – маса буя;

$$V_{in}(t) = \int_{-r_b}^{r_b} S_{in}(t, x) dx, \quad (6)$$

де  $S_{in}(t, x) = \Theta[h_{in}(t, x)] \left( 2h_{in}(t, x)r_{b1}\Theta[(y_{b1}(t) + h_b) - y_w(t, x) - 10^{-\infty}] + 2h_b r_{b1}\Theta[y_w(t, x) - (y_{b1}(t) + h_b)] \right)$  (7)

Тут  $S_{in}(t, x)$  – частина перерізу циліндричного буя під водою з нормаллю до координати  $x$ ,  $\Theta$  – функція Хевісайда, яка наближається до неперервної функції [12, 13] із коефіцієнтом  $k_p$ , що виконано далі у виразі (10). Значення коефіцієнта  $k_p$  впливає на точність апроксимованої функції Хевісайда. У виразі (7) присутні наступні змінні:

$$r_{b1} = \sqrt{r_b^2 - x^2}; \quad h_{in}(t, x) = y_w(t, x) - y_{b1}(t); \quad y_{b1}(t) = y_b(t) - 0.5h_b, \quad (8)$$

де  $r_b$  – радіус буя;  $h_b$  – висота буя;  $r_{b1}(x)$  – радіус перерізу буя в площині  $yOz$  (рис. 3) при

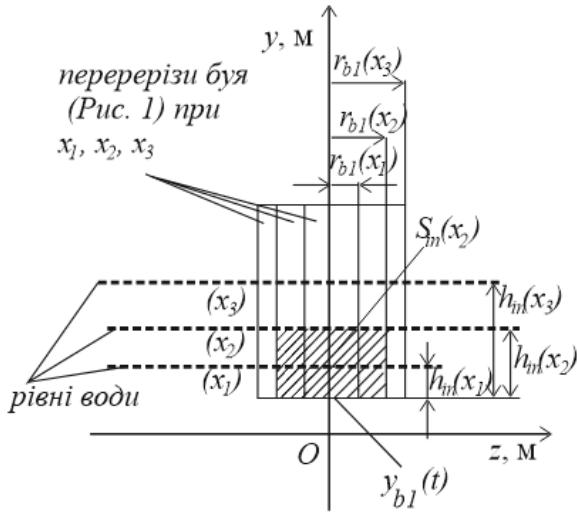


Рис. 3

зміщенні буя на будь-яку відстань від центру вздовж  $x$ ;  $h_{in}(t, x)$  – висота перерізу буя під водою (рис. 3);  $y_{b1}(t)$  – центр дна буя ( $x = 0$ ). На рис. 3 показано, яким чином у виразі (7) обчислюються секції буїв  $S_{in}$ , які розташовані під водою, для трьох точок координати  $x$ . Також показано одну з площин  $S_{in}$  для певних значень  $t$  і  $x$  (рис. 3)

$$S_{in} = 2r_{b1}h_{in}. \quad (9)$$

З урахуванням заміни функції Хевісайда на неперервну функцію вираз (7) запишеться так:

$$S_{in}(t, x) \approx \frac{1}{1 + e^{-2k_p h_{in}(t, x)}} \times$$

$$\times \left( \frac{2h_{in}(t, x)r_{b1}}{1 + e^{-2k_p((y_{b1}(t)+h_b)-y_w(t, x)-10^{-9})}} + \frac{2h_b r_{b1}}{1 + e^{-2k_p(y_w(t, x)-(y_{b1}(t)+h_b))}} \right). \quad (10)$$

*Сила опору води.* Сила опору води  $F_d(t)$ , яка діє на буй проти його руху, існує за умови, що центр дна буя за  $x = 0$  (рис. 1) знаходиться у воді  $\Theta[y_w(t, x) - y_{b1}(t)]$ . Швидкість буя розраховується відносно швидкості води

$$v'_b(t, x) = \left( \frac{d}{dt} y_b(t) - \frac{d}{dt} y_w(t, x) \right), \quad (11)$$

яка має від'ємне значення, коли буй знаходиться в процесі занурення у воду, і навпаки. Для оцінки сили опору  $F_d(t)$  необхідно задати коефіцієнт опору  $C_x$  [14], який вибирають залежно від форми тіла, що рухається у воді, а також числа Рейнольдса:

$$Re_i(t, x) = \frac{2r_b \rho}{\eta} v'_b(t, x). \quad (12)$$

Тут використовується динамічна в'язкість води  $\eta = 10^{-3}$ , кг/(м·с). Виберемо коефіцієнти лобового опору  $C_{x1} = 1,15$  і  $C_{x2} = 0,5$  для циліндричного буя відповідно за від'ємної і додатної відносно швидкості буя  $v'_b$  (11) [14].

Функція сили опору  $F_d(t)$  має вигляд:

$$F_d(t)_{x=0} = \Theta[y_w(t, x) - y_{b1}(t)] \left( 0.5r_b^2 \pi \rho (v'_b(t, x))^2 (C_{x1} \Theta[-v'_b(t, x)] - C_{x2} \Theta[v'_b(t, x)]) \right) \approx \frac{1}{1 + e^{-2k_p(y_w(t, x) - y_{b1}(t))}} \left( 0.5r_b^2 \pi \rho (v'_b(t, x))^2 \left( \frac{C_{x1}}{1 + e^{-2k_p v'_b(t, x)}} - \frac{C_{x2}}{1 + e^{-2k_p v'_b(t, x)}} \right) \right). \quad (13)$$

*Сила, пов'язана з електромагнітним моментом на валу генератора.* Сила, з якою генератор гальмує коливання буя, визначається коефіцієнтом  $k_M$ , який є відношенням моменту  $M_e$  до швидкості  $n_1$  ротора.

$$F_g(t) = \frac{-M_e(t)}{r_{sh}} = \frac{-k_M n_1(t)}{r_{sh}} = \frac{-k_M k_{tr} v_b(t)}{r_{sh}}, \quad (14)$$

$$k_{tr} = 1/(2\pi r_{sh}); \quad v_b(t) = \frac{d}{dt} y_b(t); \quad k_M = M_e/n_1. \quad (15)$$

Коефіцієнт  $k_M$  залежить від опору обмотки генератора (показано далі на рис. 8) і майже не залежить від швидкості ротора. Тут  $r_{sh}$  – радіус шківів (рис. 1);  $v_b(t)$  – лінійна

швидкість буя;  $k_{tr}$  – кількість обертів шківа в 1 метрі окружності шківа.

Сила моменту інерції ротора і шківа. Момент інерції ротора та шківа відповідно [15]:

$$J_{sh}(t) = 0,5m_{sh}(r_{sh}^2 + r_{sh2}^2); \quad (16)$$

$$J_1(t) = 0,5m_1(r_1^2 + r_2^2), \quad (17)$$

де  $m_{sh}$  і  $m_1$  – маса шківа й ротора відповідно;  $r_{sh2}$  і  $r_2$  – радіус порожнечі в центрі шківа й ротора відповідно,

$$m_{sh} = \rho_{sh}\pi(r_{sh} - r_{sh2})l_{sh}, \quad m_1 = \rho_1\pi(r_1 - r_2)l_1, \quad (18)$$

де  $\rho_{sh}$  і  $\rho_1$  – відповідно густина матеріалів барабана й ротора;  $l_{sh}$  – довжина шківа;  $l_1$  – довжина ротора. Тоді сила моменту інерції, що діє на буй, визначається за допомогою основного рівняння динаміки обертального руху:

$$F_{inr}(t) = -\frac{J_{sh}(t)\frac{d}{dt}(\Omega(t))}{r_{sh}} - \frac{J_1(t)\frac{d}{dt}(\Omega(t))}{r_{sh}} = -\frac{\frac{d}{dt}\left(\frac{v_b(t)}{r_{sh}}\right)(J_{sh}(t) + J_1(t))}{r_{sh}}, \quad (19)$$

$$\Omega(t) = 2\pi n_1(t) = 2\pi v_b(t)k_{tr}.$$

Тут  $\Omega(t)$  – кутова частота ротора й шківа, які з'єднані з одним валом.

Рівняння сил, що діють на буй, і сили реакції. У будь-який момент часу сила реакції, або сила дії-протидії, або сила другого закону Ньютона дорівнює:

$$F_N(t) = -m_b \frac{d^2 y_b(t)}{dt^2}. \quad (20)$$

Рівняння коливань буя складається із суми всіх сил, що діють на буй, які подані виразами (4), (5), (13), (14), (19), (20):

$$F_a(t) + F_e + F_d(t) + F_g(t) + F_{inr}(t) + F_N(t) = 0. \quad (21)$$

Корінь рівняння (21) – це  $y_b(t)$ . Початковими даними за  $t = 0$  для розв'язування рівняння (21) є висота центру буя  $y_b$  і швидкість буя  $dy_b/dt$ . Якщо розмістити буй на спокійній воді, без хвиль, то висота центру буя  $y_b$  оцінюється за (4) і (5) за таким виразом:

$$y_b = \frac{h_b}{2} - \frac{m_b}{\rho\pi b^2}. \quad (22)$$

Вираз (22) можна використовувати для встановлення початкової висоти буя для вирішення рівняння (21).

Швидкість шківа і ротора, які закріплені на одному валу, розраховується за виразом:

$$n_1(t) = v_b(t)k_{tr} = \frac{d(y_b(t))}{dt}k_{tr}, \quad (23)$$

в якому функція  $y_b(t)$  відома як результат розв'язання рівняння (21). Тоді визначається середня швидкість обертання ротора  $n_{1av}$  за період  $T_w$ :

$$n_{1av} = \frac{1}{T_w} \int_{t_0}^{t_0+n_T T_w} |n_1(t)| dt. \quad (24)$$

Тут  $t_0$  – заданий початковий час, з якого починається розрахунок у періоді  $T_w$ ,  $n_T$  – кількість періодів. Використання виразів (3)...(24) потребує розробки програмного коду для створення обчислювальної програми, що дасть змогу здійснювати багатоваріантні розрахунки для досягнення оптимального підбору розміру та ваги циліндричного буя, а також потужності генератора.

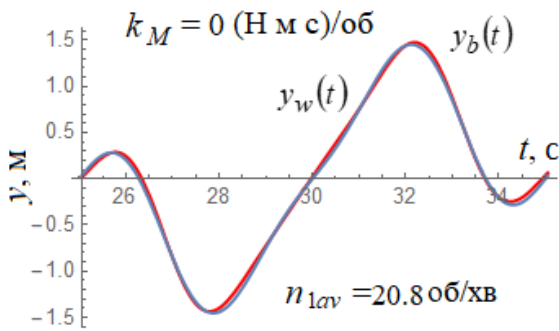


Рис. 4

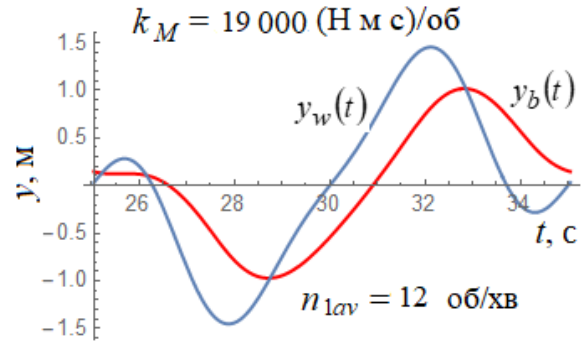


Рис. 5

**Оптимальна швидкість обертання ротора.** На рис. 4 і 5 зображено для прикладу вертикальний рух морської води  $y_w(t)$  за виразом (3) (рис. 3). Задано такі параметри хвилі:  $v_w = 1$  м/с,  $\lambda_w = 10$  м,  $a_w = 1$  м,  $\kappa_{11} = \kappa_{12} = 2$ ,  $\kappa_{21} = -3$ ,  $\kappa_{22} = 3$ . Задано параметри буя:  $h_b = 2$  м,  $r_b = 1$  м,  $m_b = 2941$  кг. І вертикальне переміщення  $y_b(t)$  центру буя (рис. 4, 5), обчислене за виразами (2)...(24). Маса буя  $m_b = 2941$  кг обрана так, щоб він був наполовину занурений у воду, оскільки генератор виробляє електроенергію за руху вгору під дією Архімедової сили і вниз під дією земного тяжіння. Недостатня маса буя може призвести до того, що буй буде зависати в повітрі через протидію електромагнітного моменту генератора.

Потрібно вибрати оптимальний коефіцієнт  $k_M$ , щоб досягти максимальної потужності, що передається на вал генератора. З цією метою виконується серія розрахунків з масивом коефіцієнтів  $k_M$ , а момент і потужність обчислюються за виразами:

$$M_e = n_{1av} k_M / 60; \quad P_2 = 2\pi n_{1av} M_e / 60. \quad (25)$$

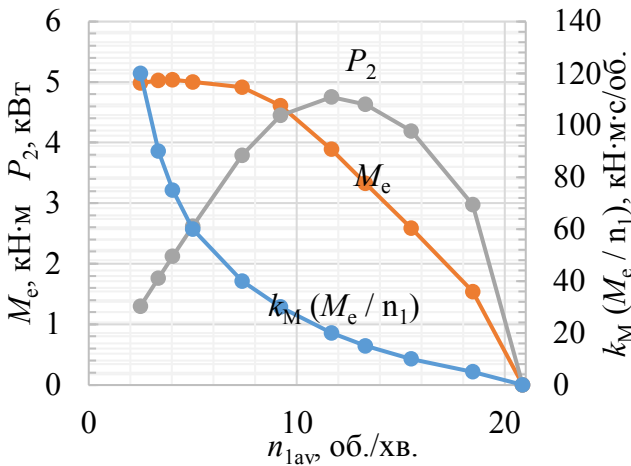


Рис. 6

Результат розрахунків показано на рис. 6. Потужність  $P_2$  пов'язана з постійною швидкістю обертання  $n_{1av}$  (24) і необхідна для визначення оптимальних значень  $k_M$ ,  $n_{1av}$  та  $M_e$ , коли  $P_2$  має максимальне значення. Як видно з рис. 6, максимальної потужності вдається досягти за швидкості  $n_{1av} = 12$  обертів за хвилину.

**Модель генератора.** На рис. 7 зображено двовимірну модель магнітоелектричного генератора (синхронного генератора з постійними магнітами) [3] в одному полюсі з кількістю пар полюсів  $p = 12$ , пазами на полюс і фазою  $q = 2$ .

Застосовано позначення: 1 – магнітопровід ротора; 2 – магнітопровід статора; 3 – постійний магніт; 4 – обмотка статора.

Для розрахунку електромагнітних полів двовимірної моделі (рис. 7) використовується рівняння магнітного поля для векторного магнітного потенціалу:

$$\text{rot} \frac{\text{rot} A}{\mu} = j_s - \sigma \frac{\partial A}{\partial t} - \sigma \text{grad} \phi + \text{rot} H_c + v \times \text{rot} A, \quad (26)$$

де  $A$  – векторний магнітний потенціал;  $\mu$  – магнітна проникність;  $\sigma$  – електропровідність матеріалів, у яких наводяться струми;  $t$  – час;  $j_s$  – густина струму в

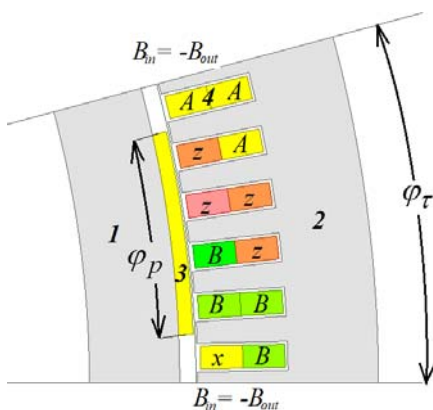


Рис. 7



провідниках, у пазах 4 (рис. 7);  $H_c$  – коерцитивна сила постійного магніту;  $\phi$  – електричний скалярний потенціал;  $v$  – швидкість обертів частин моделі генератора. Двовимірна модель генератора на рис. 7 та рівняння (26) використовуються для моделювання електромагнітного поля та розрахунку електромагнітного моменту  $M_e$ , струмів у пазах  $I_A$ ,  $I_B$ ,  $I_C$ , потужності  $P$ , що споживається від генератора. Для моделювання використовуються або аналітичні методи розрахунку, такі як [3], або програмне забезпечення для моделювання електромагнітних полів методом скінченних елементів, наприклад COMSOL Multiphysics, ANSYS Maxwell, JMAG, FEMM, MagNet.

Для прикладу візьмемо такі параметри генератора:  $r_1 = 318$  мм (рис. 1); розміри пазів (рис. 7, позначка 4) –  $25 \times 8$  мм; кількість пар полюсів  $p = 12$ ; кількість пазів на полюс і фазу  $q = 2$ ; відносна магнітна проникність магнітопроводів статора й ротора  $\mu_r = 1000$ ; повітряний проміжок між статором й ротором  $\delta = 1$  мм; товщина постійних магнітів  $h_p = 4$  мм; коерцитивна сила постійних магнітів  $H_c = 890000$  А/м; полюсний кут магнітів  $\varphi_p = 2\varphi_\tau/3$  (рис. 7); кількість витків  $w = 50$  у кожному пази. Індуктивність лобових частин обмотки для кожної фази становить 0,122 Гн, що розраховується виразами із підручників для проектування електричних машин [16]. Активний опір споживача на кожній фазі обмотки задано масивом  $r_{ph} = 50, 80, 110, \dots, 380, 400$  Ом, у який уже включено опір проводів обмотки 2,44 Ом на фазу.

На рис. 8 показано струм, момент, потужність і обертовий момент генератора за

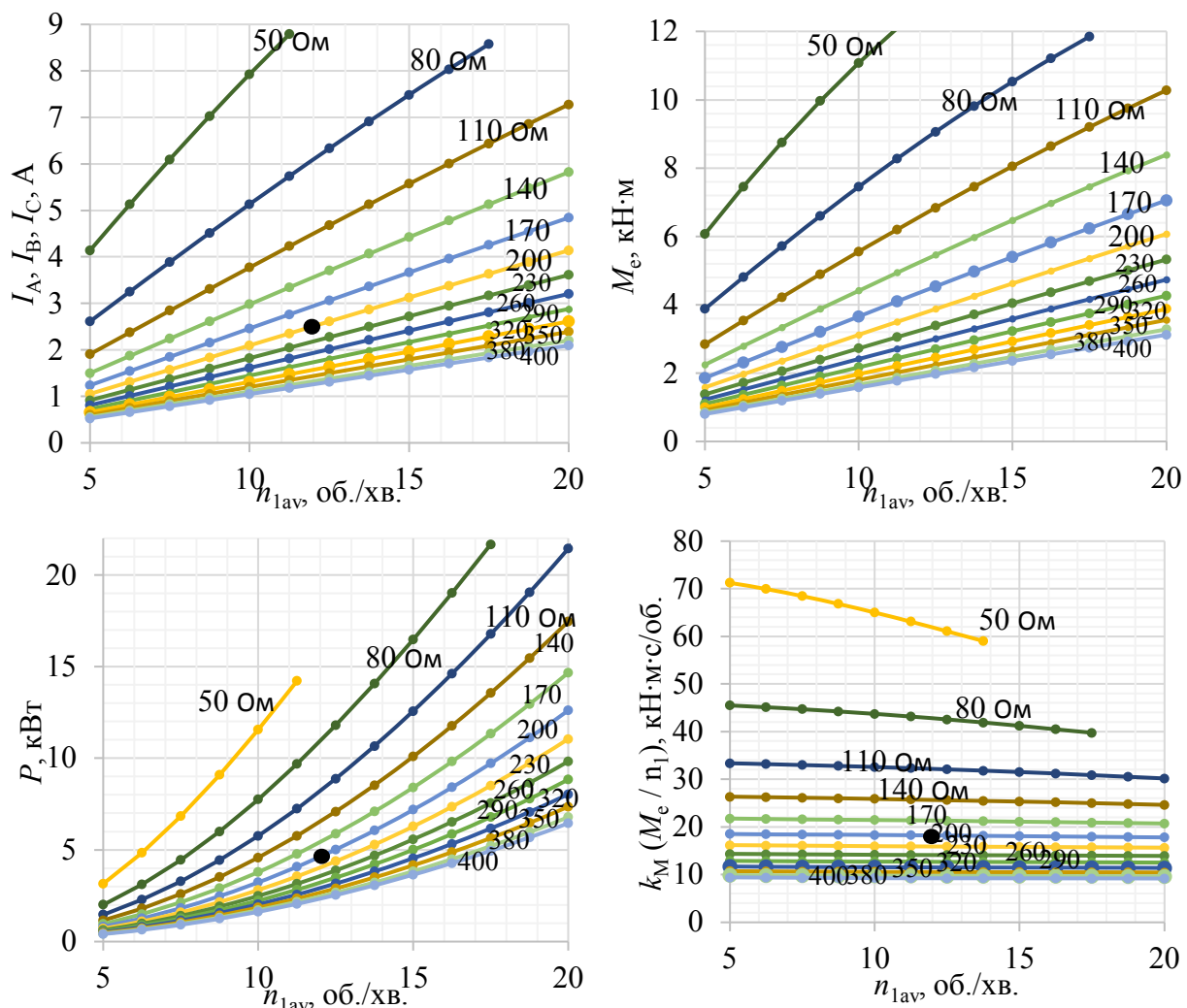


Рис. 8

різних частот обертання ротора в усталеному режимі для низки значень  $r_{ph}$ . На рис. 8 показано мітки за швидкості  $n_{1av} = 12$  об/хв та моменту на валу  $M_e = 3,7$  кН м, які встановлено на рис. 6 як оптимальні і які відповідають опору 200 Ом на кожній фазі обмотки генератора.

**Енергетичні показники генератора.** На рис. 9 показано зміну в часі споживаної потужності, електромагнітного моменту генератора та струму однієї з фаз для постійної швидкості  $n_{1av} = n_1 = 12$  об/хв. Параметри хвилі (середні значення) указані у правому верхньому куті рис. 9, які також є присутні на рис. 8.

На рис. 10 показано характеристики, аналогічні рис. 9, також із усередненою частотою обертання ротора  $n_{1av} = 12$  об/хв. Але швидкість  $n_1$ , описана на рис. 10, не є постійною і визначається виразом (23) із функції переміщення центру буя  $y_b(t)$ , яку показано на рис. 5.

Порівнюючи результати на рис. 9 і 10, встановлено, що середні значення електромагнітного моменту і струму однакові на рис. 9 та 10. Отже, можна використати усереднену швидкість обертового колювання ротора  $n_{1av}$  (24), для того щоб встановити електромагнітний момент  $M_e$  на валу генератора, як це виконано на рис. 6. І потім на рис. 8 визначити, якими будуть опір споживача і середній струм в обмотці.

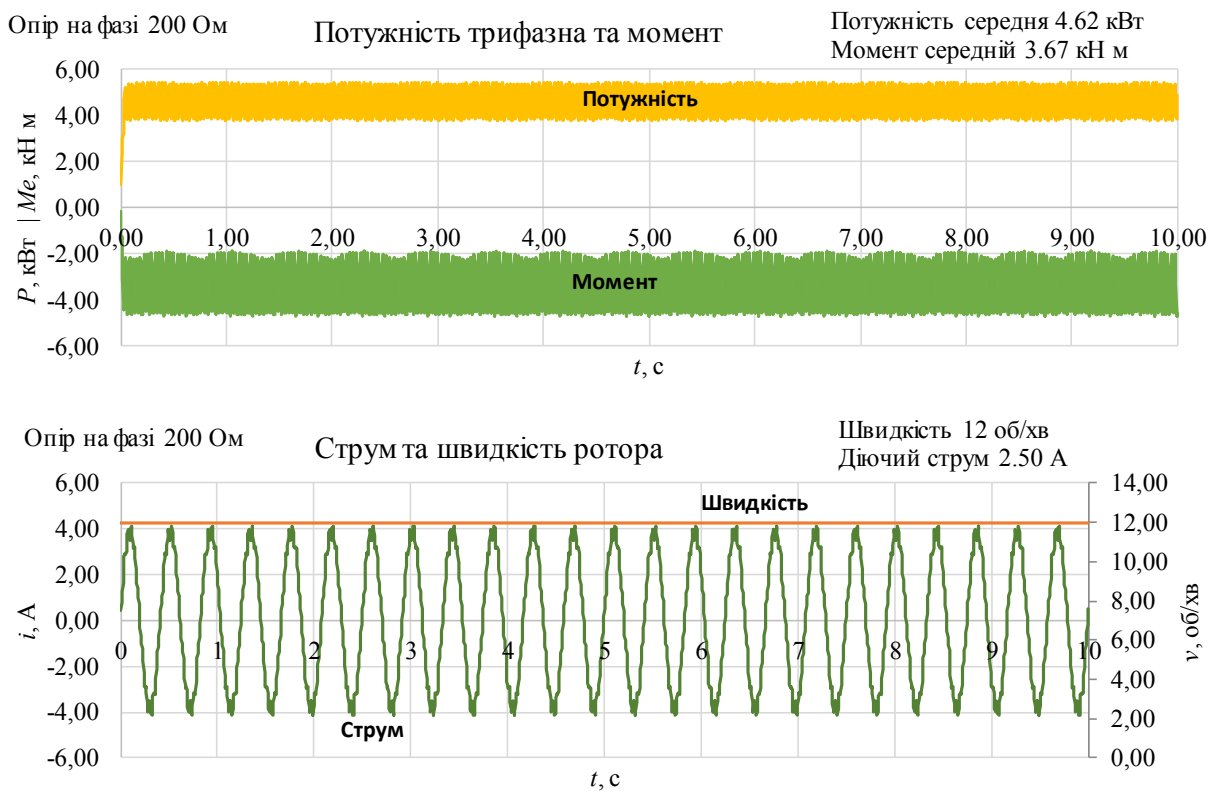


Рис. 9

Середнє за період значення потужності  $P$  на рис. 10 становить 5,9 кВт, що на 28% більше порівняно з 4,6 кВт на рис. 9. Причиною цього є ширший діапазон колювань струму на рис. 10 ( $\pm 14$  А) порівняно з рис. 9 ( $\pm 8$  А), оскільки усереднена за період потужність залежить від миттєвих значень струму  $i(t)$ :

$$P = \frac{1}{T_w} \int_{t_0}^{t_0+T_w} \left( i_A^2(t)r_{ph} + i_B^2(t)r_{ph} + i_C^2(t)r_{ph} \right) dt. \quad (27)$$



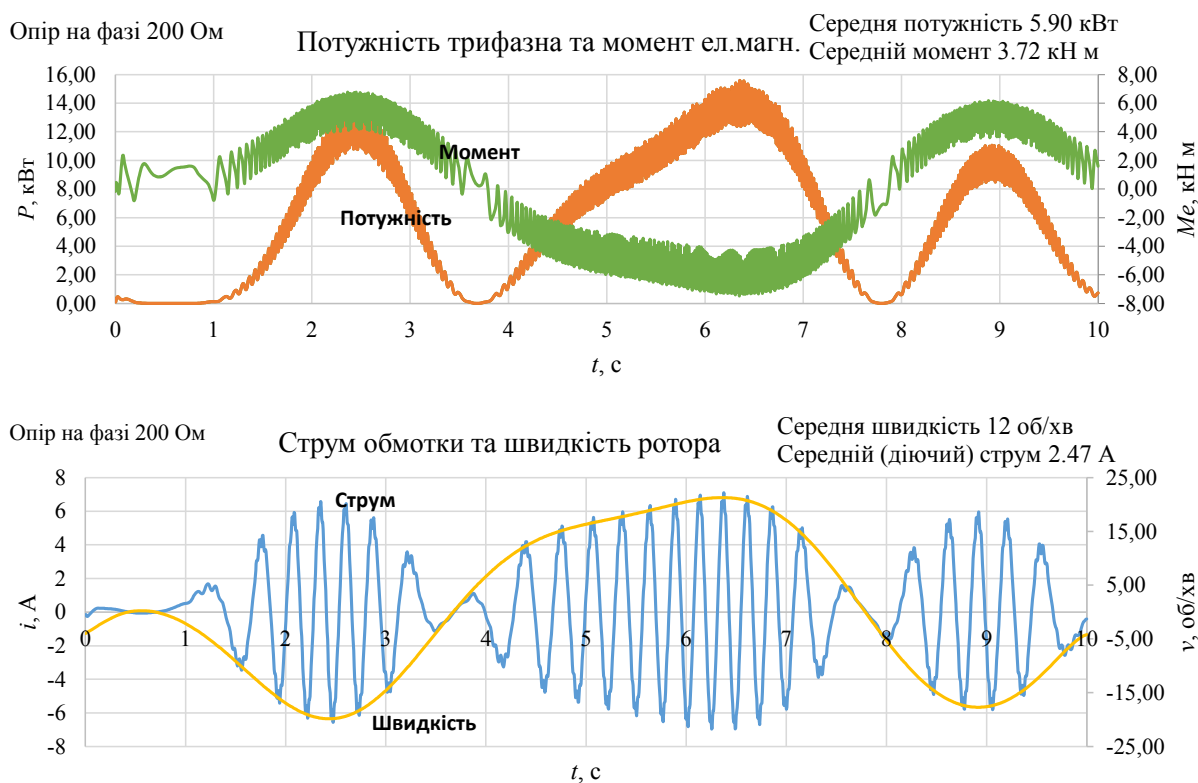


Рис. 10

Таким чином, використовуючи постійну швидкість ротора  $n_{1av}$  (24) для моделювання усталених енергетичних характеристик генератора (рис. 8 і 9), з'ясуємо, що середня за період потужність споживання електроенергії (27) буде меншою при незмінній частоті обертання ротора (рис. 9), ніж реальна потужність за змінної частоти (рис. 10). Це також підтверджує висновок у роботі [2], що генерована потужність значно зростає при врахуванні інтерференції простих хвиль. Тому кінцевий вибір поперечного перерізу провідників обмотки генератора і розрахунок усередненої потужності споживання електроенергії потрібно виконувати з урахуванням змінної швидкості (рис. 10) та з урахуванням максимальних амплітуд морських хвиль для обраної місцевості.

**Висновки.** У методиці для розрахунку енергетичних характеристик використовується сила, з якою генератор протидіє коливанню буя під час вироблення електроенергії, яка визначається коефіцієнтом відношення електромагнітного моменту генератора до швидкості його ротора. Для вибору характеристик генератора (середній за період струм, електромагнітний момент і опір споживача потужності) розраховуються оптимальна середня за період коливання морської хвилі швидкість обертання ротора та електромагнітний момент на валу ротора, за яких досягається максимальна потужність, що передається на генератор.

Середні значення електромагнітного моменту і струму однакові при моделюванні генератора з постійною (усталений режим) та змінною (режим перехідних процесів) швидкістю ротора, якщо середні значення цих швидкостей однакові. Але миттєві значення струму і середні значення потужності будуть вищими при змінній швидкості ротора. Тому при виборі генератора потрібно враховувати змінну швидкість ротора, з урахуванням максимальних амплітуд морських хвиль для обраної місцевості.

*Робота фінансується державною програмою "Розвиток удосконалених електромеханічних та електромагнітних систем електростанцій та методів їх діагностики" (під назвою "Агрегат-3", державний реєстраційний номер 0122U000840).*

2. A. Raschepkin, I. Kondratenko, O. Karlov, R. Kryshchuk. Energy Indicators Of A Cylindrical Magneto-Electric Sea Wave Energy Converter. *2021 IEEE International Conference on Modern Electrical and Energy Systems (MEES)*. 2021. DOI: <https://doi.org/10.1109/MEES52427.2021.9598590>
3. Ращепкін А.П., Кондратенко І.П., Карлов О.М., Кришчук Р.С. Магнітоелектричний перетворювач енергії морських хвиль. *Технічна електродинаміка*. 2021. № 4. С. 25–34. URL: <https://doi.org/10.15407/techned2021.04.025>
4. Jeongrok Kim, Dongeun Kim, Arun George, Il-Hyoung Cho. Experimental study of multiple hemisphere wave energy converters arrayed in a water channel resonator. *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering*. 2023. Vol. 15. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijnaoe.2023.100513>
5. Omar Farrok, Koushik Ahmed, Abdirazak Dahir Tahlil, Mohamud Mohamed Farah, Mahbubur Rahman Kiran, Md. Rabiul Islam. Electrical power generation from the oceanic wave for sustainable advancement in renewable energy. *Technologies Sustainability*. 2020. Vol. 12(6). Pp. 1–23. DOI: <https://doi.org/10.3390/su12062178>
6. Boxi Jiang, Xiaofan Li, Shuo Chen, Qiuchi Xiong, Bang-fuh Chen, Robert G. Parker, Lei Zuo. Performance analysis and tank test validation of a hybrid ocean wave-current energy converter with a single power takeoff. *Energy Conversion and Management*. 2020. Vol. 224. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2020.113268>
7. Falcao, AFO, Candido, JJMB, Justino, PAP, & Henriques, JCC. Modelling of the IPS Buoy Wave Energy Converter Including the Effect of Non-Uniform Tube Cross-Section. *Proceedings of the ASME 2011 30th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering. Vol. 5: Ocean Space Utilization; Ocean Renewable Energy. Rotterdam, The Netherlands. June 19–24, 2011*. Pp. 289–298. DOI: <https://doi.org/10.1115/OMAE2011-49117>
8. Abdul Hai Alami. Analytical and experimental evaluation of energy storage using work of buoyancy force. *Journal of Renewable and Sustainable Energy*. 2014. Vol. 6. DOI: <https://doi.org/10.1063/1.4866036>
9. Kesayoshi Hadano, Ki Yeol Lee, Byung Young Moon, Wave energy conversion utilizing vertical motion of water in the array of water chambers aligned in the direction of wave propagation, *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering*, Vol. 9. 2017. Pp. 239–245, <https://doi.org/10.1016/j.ijnaoe.2016.06.002>
10. Selim Molla, Omar Farrok, Md. Rabiul Islam, Kashem M. Muttaqi Application of Iron Nitride Compound as Alternative Permanent Magnet for Designing Linear Generators to Harvest Oceanic Wave Energy. *IET Electr. Power Appl.* 2020. Vol. 14. Iss. 5. Pp. 762–770. DOI: <https://doi.org/10.1049/iet-epa.2019.0372>
11. Колчунов В. І. Теоретична та прикладна гідромеханіка: Навч. посібник. К.: НАУ, 2004. 336 с.
12. Anton Iliev, Nikolay Kyurkchiev, Svetoslav Markov. On the Approximation of the Cut and Step Functions by Logistic and Gompertz Functions. *Biomath*. 2015. Vol. 4 No. 2. <https://doi.org/10.11145/j.biomath.2015.10.101>
13. J. Sullivan, L. Crone, J. Jalickee. Approximation of the unit step function by a linear combination of exponential functions. *Journal of Approximation Theory*, 1980. Vol. 28, Iss. 4. Pp. 299–308. DOI: [https://doi.org/10.1016/0021-9045\(80\)90064-7](https://doi.org/10.1016/0021-9045(80)90064-7)
14. Heddleson C.F., Brown D.L., Cliffe R.T. Summary of Drag Coefficients of Various Shaped Cylinders. *General Electric Co Cincinnati Oh*. 1957. 56 p. URL: <https://apps.dtic.mil/sti/pdfs/ADA395503.pdf>
15. Serway, Raymond A. Physics for Scientists and Engineers (2nd ed.). *Philadelphia: Saunders College Pub.*, 1986. 202 p.
16. Постников И.М. Проектирование электрических машин. К.: ГТИ. 1962. 736 с.

## METHOD FOR CALCULATING ENERGY CHARACTERISTICS OF SEA WAVE ENERGY CONVERTER DURING WAVE OSCILLATION PERIOD

**I.P. Kondratenko, R.S. Kryshchuk, O.M. Karlov**

Institute of Electrodynamics of the National Academy of Science of Ukraine,

pr. Peremohy 56, Kyiv, 03057, Ukraine

e-mail: [\\*dep7ied@ukr.net](mailto:*dep7ied@ukr.net), [\\*\\*dygogive@gmail.com](mailto:**dygogive@gmail.com), [\\*\\*\\*lexa.k.ua@gmail.com](mailto:***lexa.k.ua@gmail.com)

*The use of efficient and environmentally friendly methods for electricity generation is one of the main concerns in the field of energy. The advantages and disadvantages of wave energy power plants are well-known and continuously researched. There are many approaches and methods for converting wave energy into electrical energy, each with its own advantages and disadvantages, designed for different converter constructions and utilizing various approaches. This article presents a simple converter scheme that converts the energy of cylindrical buoy oscillations into electrical energy. The aim of this work is to develop a methodology for calculating the energy characteristics of this wave energy converter, consisting of a cylindrical buoy, a pulley, and a magneto-electric generator, using the average energy indicators of the generator. The proposed converter scheme utilizes a single cylindrical buoy and a three-phase generator with resistors as the electricity consumer. The sea surface oscillation is represented by a sine wave with higher harmonics. The balance equation of forces acting on the buoy is formulated, taking into account the ratio of the moment on the rotor to its speed. An iterative calculation is used to determine the optimal rotor speed to maximize electricity consumption power. To establish the resistor's resistance, the steady-state operation modes of the generator and the average optimal rotor speed over the period of the sea wave are used. The generator is then modeled with an*

optimal resistor resistance and a specified variable rotor speed over the wave period. The energy absorbed by a single buoy, with a wave amplitude of 1 meter and a period of 10 seconds, is studied. Ref. 16, fig. 10.

**Keywords:** renewable energy, ocean waves, wave energy converter, calculation method, rotor speed, energy characteristics.

1. Savchenko H. Yu. Estimation of the energy parameters of a wave float power plant. *Prykladna Hydromekhanika*. 2016. Vol. 18. № 2. Pp. 58–63. URL: <http://dspace.nbuv.gov.ua/handle/123456789/116559> (Rus)
2. A. Raschepkin, I. Kondratenko, O. Karlov, R. Kryshchuk. Energy Indicators Of A Cylindrical Magneto-Electric Sea Wave Energy Converter. *2021 IEEE International Conference on Modern Electrical and Energy Systems (MEES)*. 2021. DOI: <https://doi.org/10.1109/MEES52427.2021.9598590>
3. A.P. Raschepkin, I.P. Kondratenko, A.N. Karlov, R.S. Kryshchuk Magneto-electric energy converter of sea waves. *Tekhnichna elektrodynamika*. 2021. № 4. Pp. 25–34. URL: <https://doi.org/10.15407/techned2021.04.025> (Ukr) DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2021.04.025>
4. Jeongrok Kim, Dongeun Kim, Arun George, Il-Hyoung Cho. Experimental study of multiple hemisphere wave energy converters arrayed in a water channel resonator. *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering*. 2023. Vol. 15. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijnaoe.2023.100513>
5. Omar Farrok, Koushik Ahmed, Abdirazak Dahir Tahlil, Mohamud Mohamed Farah, Mahbubur Rahman Kiran, Md. Rabiul Islam. Electrical power generation from the oceanic wave for sustainable advancement in renewable energy. *Technologies Sustainability*. 2020. Vol. 12(6). Pp. 1–23. DOI: <https://doi.org/10.3390/su12062178>
6. Boxi Jiang, Xiaofan Li, Shuo Chen, Qiuchi Xiong, Bang-fuh Chen, Robert G. Parker, Lei Zuo. Performance analysis and tank test validation of a hybrid ocean wave-current energy converter with a single power takeoff. *Energy Conversion and Management*. 2020. Vol. 224. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2020.113268>
7. Falca˜o, AFO, Caˆndido, JJMB, Justino, PAP, & Henriques, JCC. Modelling of the IPS Buoy Wave Energy Converter Including the Effect of Non-Uniform Tube Cross-Section. *Proceedings of the ASME 2011 30th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering. Vol. 5: Ocean Space Utilization; Ocean Renewable Energy. Rotterdam, The Netherlands. June 19–24, 2011. Pp. 289–298. DOI: <https://doi.org/10.1115/OMAE2011-49117>*
8. Abdul Hai Alami. Analytical and experimental evaluation of energy storage using work of buoyancy force. *Journal of Renewable and Sustainable Energy*. 2014. Vol. 6. DOI: <https://doi.org/10.1063/1.4866036>
9. Kesayoshi Hadano, Ki Yeol Lee, Byung Young Moon, Wave energy conversion utilizing vertical motion of water in the array of water chambers aligned in the direction of wave propagation, *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering*, Vol. 9. 2017. Pp. 239–245. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijnaoe.2016.06.002>
10. Selim Molla, Omar Farrok, Md. Rabiul Islam, Kashem M. Muttaqi Application of Iron Nitride Compound as Alternative Permanent Magnet for Designing Linear Generators to Harvest Oceanic Wave Energy. *IET Electr. Power Appl.* 2020. Vol. 14. Iss. 5. Pp. 762–770. DOI: <https://doi.org/10.1049/iet-epa.2019.0372>
11. Kolchunov V. I. Theoretical and applied hydromechanics. *Kyiv, Ukraine. National Aviation University, 2004. 336 p. (Ukr)*
12. Anton Iliev, Nikolay Kyurkchiev, Svetoslav Markov. On the Approximation of the Cut and Step Functions by Logistic and Gompertz Functions. *Biomath.* 2015. Vol. 4, No. 2. DOI: <https://doi.org/10.11145/j.biomath.2015.10.101>
13. J. Sullivan, L. Crone, J. Jalickee. Approximation of the unit step function by a linear combination of exponential functions. *Journal of Approximation Theory*, 1980. Vol. 28, Iss. 4. Pp. 299–308. DOI: [https://doi.org/10.1016/0021-9045\(80\)90064-7](https://doi.org/10.1016/0021-9045(80)90064-7)
14. Heddleson C.F., Brown D.L., Cliffe R.T. Summary of Drag Coefficients of Various Shaped Cylinders. *General Electric Co Cincinnati Oh.* 1957. 56 p. URL: <https://apps.dtic.mil/sti/pdfs/ADA395503.pdf> DOI: <https://doi.org/10.21236/ADA388540>
15. Serway, Raymond A. Physics for Scientists and Engineers (2nd ed.). *Philadelphia: Saunders College Pub.*, 1986. 202 p.
16. Postnikov I.M. Designing of electrical machines. Kiev. 1962. 736 p. (Rus)

Надійшла: 09.02.2023

Прийнята: 20.03.2023

Submitted: 09.02.2023

Accepted: 20.03.2023