

ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНІ КОМПЛЕКСИ ТА СИСТЕМИ

УДК 621.311.25:532.59

DOI: <https://doi.org/10.15407/publishing2024.67.005>**ЕНЕРГЕТИЧНІ ПОКАЗНИКИ ПЕРЕТВОРЮВАЧА ЕНЕРГІЇ МОРСЬКИХ ХВИЛЬ З ВИПРЯМЛЯЧЕМ СТРУМУ ТА АКТИВНО-ЄМНІСНИМ НАВАНТАЖЕННЯМ**

І.П. Кондратенко^{*}, чл.-кор. НАН України, **Р.С. Крищук**^{**}, канд. техн. наук
Інститут електродинаміки НАН України,
пр. Берестейський, 56, Київ, 03057, Україна
e-mail: dep7ied@ukr.net¹, dygogive@gmail.com²

Статтю присвячено визначенню енергетичних показників генеруючого комплексу при стохастичному типі генерації електроенергії. Метою роботи є порівняння енергетичних показників та коефіцієнта споживання потужності енергії хвиль імітаційних моделей генеруючих комплексів з магнітоелектричними генераторами, що працюють зі змінною швидкістю на активне та активно-ємнісне навантаження з випрямленою напругою. Для розрахунку параметрів та енергетичних показників магнітоелектричного генератора використано аналітичний метод. Виконано розрахунок індуктивності, опору та генерованої постійними магнітами ротора напруги в трифазній обмотці магнітоелектричного генератора для моделювання електричних схем з наявністю та відсутністю трифазного випрямляча струму, а також активно-ємнісного та активного навантаження. Частота обертання ротора змінюється за гармонічним законом з однаковим періодом та амплітудою для всіх електричних схем. Визначений в електричних схемах струм використовується для розрахунку електромагнітного поля генератора і енергетичних показників. Для схем з активним і активно-ємнісним навантаженням виконується порівняння потужності споживання електроенергії, потужності втрат в обмотці статора, потужності на виході з генератора, та коефіцієнта споживання потужності енергії хвиль. Порівняння енергетичних показників здійснюється за умови однакової частоти обертання ротора та моменту на валу, що досягається змінюючи опору навантаження. Бібл. 10, рис. 8, таблиця.

Ключові слова: імітаційна модель, електричне коло, перетворення енергії хвиль, активно-ємнісне навантаження.

Вступ. Однією з головних проблем енергетики є ефективно 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. За даними літератури [1], 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 [1].

Дослідження експериментальної моделі [2] 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 сягає 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.

Зазвичай у морі хвилі є меншого розміру, порівняно з океаном. Тому для морів залишається відкритим питання вибору оптимальних параметрів перетворювачів та їхнє масшта-



бування для максимізації виробництва електроенергії. У дослідженні [3] проведено аналіз потенціалу енергії хвиль в Адріатичному морі та виявлено, що зменшені конвертори енергії хвиль можуть бути більш ефективними на цих місцях, зберігаючи економічну доцільність.

У світі розроблено і практично впроваджено велику кількість технологічних схем і методів перетворення кінетичної енергії хвиль в електричну. Наприклад, в [2] представлено результати експериментальних та теоретичних досліджень перетворювача, у якому енергія коливання буя передається до генератора через гідравлічну систему, що складається з насоса та системи клапанів для одностороннього протікання робочої рідини. У [4] порівнюються різні методи виробництва електроенергії і виявлено, що пристрої прямого приводу типу «точковий поглинач» (використання буя) є перспективними. Огляд літератури [4] показує, що лінійні генератори більш підходять для прямого приводу виробництва електроенергії, але генерована потужність низька через низьку відносну швидкість між статором та транслятором. У [5] презентується гібридний перетворювач енергії хвиль та течій океану, який одночасно збирає енергію як з океанських хвиль, так і з течії, використовуючи один пристрій для збору енергії. Система збору енергії об'єднує два типи перетворювачів енергії: точковий поглинач (буй) та горизонтальну гідротурбіну. У роботі [6] досліджено розробку перетворювача енергії океанських хвиль, у якому буй виконує роль поршня для створення течії у вертикальній підводній трубі з гідротурбіною. У будь-якому випадку вертикальне періодичне переміщення поверхні моря, що має хвилі, відносно нерухомого тіла або морського дна перетворюється на обертовий (або лінійний) рух ротора (або транслятора) генератора. У [7] підхід базується на використанні системи точкових поглиначів, тобто буйів, які безпосередньо з'єднані з лінійними трубчастими генераторами, підключеними до електричної системи з використанням різних типів випрямлячів струму.

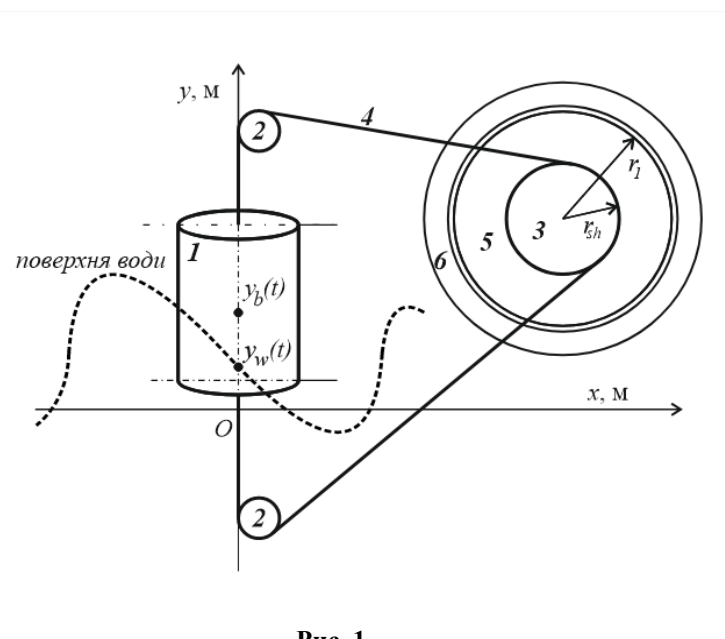


Рис. 1

У [8] запропоновано імітаційну модель перетворювача енергії морських хвиль типу «точковий поглинач», і методику для розрахунку розмірів буя, визначення закону переміщення буя на морських хвилях $y_b(t)$ та частоти обертання ротора $n_1(t)$ (рис. 1). На рис. 1 введені такі позначення: 1 – циліндричний буй; 2 – роликові опори для троса або ланцюга; 3 – шків, що закріплений на обертовий вал генератора; 4 – трос або ланцюг; 5 – ротор циліндричного генератора; 6 – статор генератора. Для врахування сили, з якою генератор протидіє переміщенню буя під час споживання електроенергії, в роботі [8] введено коефіцієнт моменту k_M (Н·м·с/об)

$$k_M(t) = M_M(t) / n_1(t), \quad (1)$$

де M_M – електромагнітний момент на обертовому валу ротора генератора. Модель на рис. 1 є одним з багатьох можливих варіантів механічного перетворення лінійного двостороннього руху буя заданої форми, об'єму і маси, в обертовий двосторонній рух ротора генератора з урахуванням передатного відношення кількості обертів ротора до відстані вертикального переміщення буя відносно корпусу генератора.

Для заданих розмірів повітряних пустот буя (висота 2 м, радіус 1 м) і ваги 2,9 т, щоб буй знаходився наполовину занурений у воду, заданих параметрах хвилі (амплітуда 1,4 м, період 10 с) та радіуса шківів ротора (0,318 м) в [8] наведено приклад розрахунку оптимального коефіцієнта моменту k_M (19 кН·м·с/об) та середньої частоти обертання ротора n_{1av} (12

об/хв) за період коливання хвиль T_w з резистивним (активним) навантаженням на виводах обмотки генератора без перетворення струму зі змінного в постійний. Водночас $k_M(t)$ майже не змінюється в періоді T_w при незмінному опорі навантаження на виводах обмотки генератора.

Струм в електричній схемі зазвичай випрямляють зі змінного в постійний для накопичення енергії в акумуляторах, наприклад, за схемою Ларіонова А.Н. Для імітації заряджання акумулятора можемо використати резистор як споживач потужності, і в електричній схемі буде протікати струм [7]. Зміна опору такого резистора-споживача дасть змогу регулювати струм в обмотці статора та відповідно момент M_M . Для зменшення пульсацій випрямленого струму після напівпровідникового перетворювача струму використовується конденсатор, що підключається паралельно до резистора, який є споживачем потужності. Паралельно підключені резистор для споживання енергії та конденсатор для зменшення пульсацій є активно-ємнісним навантаженням. Наявність перетворювача струму та конденсатора буде впливати на струми в обмотці статора і, як наслідок, на втрати в обмотці, потужність споживання електроенергії, електромагнітний момент, втрати потужності. Тому для оцінки впливу напівпровідникового перетворювача та конденсатора на енергетичні показники перетворювача енергії морських хвиль необхідно виконати порівняння схем: без випрямлення струму, з випрямленим струмом, з випрямленим струмом та конденсатором.

Метою роботи є порівняння енергетичних показників та коефіцієнта споживання потужності енергії хвиль імітаційних моделей генеруючих комплексів з магнітоелектричними генераторами, що працюють зі змінною швидкістю на активне та активно-ємнісне навантаження з випрямленою напругою.

Початкові умови. Частота коливання хвилі та відповідна частота ротора генератора n_1 змінюють полярність з періодом T_w і мають непостійне прискорення $\partial n_1 / \partial t$. Водночас усереднені за період T_w значення моменту M_M та струму в статорі генератора залежать прямо пропорційно від частоти n_{1av} [8]. Тому для оцінки енергетичних показників перетворювача енергії хвиль достатньо прийняти, що n_1 підлягає, наприклад, гармонічному закону:

$$n_1(t) = \sqrt{2} n_{1av} \sin(2\pi f_n t), \quad (2)$$

де f_n – частота коливання буя та, відповідно до схеми на рис. 1, ротора генератора, t – час.

Методикою [8] визначається оптимальний коефіцієнт моменту k_M (19 кН·м·с/об), який має постійне значення для схеми з активним навантаженням без випрямляча струму в межах періоду хвилі T_w за середньої частоти $n_{1av} = 12$ об/хв за певних заданих масогабаритних параметрів буя. Механічна потужність на роторі, що перетворюється в електричну потужність в обмотці статора, прямо пропорційна коефіцієнту моменту k_M . Тому умовою для порівняння схем, що показано далі на рис. 4, є використання однакових значень k_M .

Модель генератора. На рис. 2 зображено двовимірну модель магнітоелектричного генератора (синхронного генератора з постійними магнітами) в межах двох полюсів [9]. Модель складається з повітряного проміжку між магнітопроводами статора та ротора в циліндричній системі координат та граничних умов. На границях проміжку магнітопроводи ідеальні, без пазів. Струм обмотки статора зосереджується на поверхні феромагнітного осердя у вигляді нескінченно тонких шарів лінійного струмового навантаження j_w , яке розміщено в місцях знаходження пазів. На поверхні магнітопроводу ротора на границі $\rho = r_1$ розміщені лінійні струмові контури j_p еквівалент-

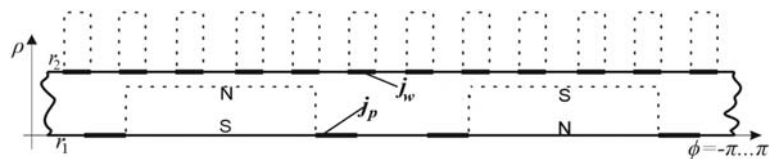


Рис. 2

них соленоїдів, якими замінюються постійні магніти. Особливістю є те, що струмові контури j_p у разі чисельної реалізації методу розрахунку електромагнітного поля мають скінченні розміри уздовж азимутальної координати, що дозволяє врахувати поле розсіювання постійних магнітів. За цих умов контури j_p знаходяться на краях уявного розміщення постійних магнітів, позначених штриховими лініями.

Розподіл двовимірної моделі електромагнітного поля в немагнітному проміжку між магнітопроводами статора і ротора (рис. 2) підлягає рівнянню відносно векторного магнітного потенціалу A_z [9]:

$$\frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial \rho} \left(\rho \frac{\partial A_z}{\partial \rho} \right) + \frac{1}{\rho^2} \frac{\partial^2 A_z}{\partial \phi^2} + \frac{\partial^2 A_z}{\partial z^2} = 0, \quad (3)$$

де $\partial^2 A_z / \partial z^2 = 0$ для двовимірної постановки в площині координат ϕ та ρ (рис. 2). Розрахунок енергетичних показників та параметрів генератора реалізуються в програмі Wolfram Mathematica з використанням функцій у [9]. У загальному випадку для розрахунку параметрів генератора можна скористатися іншими методами.

Результатом розрахунку електромагнітного поля є індуктивності фаз трифазної обмотки L_{AA}, L_{BB}, L_{CC} , індуковані напруги у фазах обмотки статора u_{pA}, u_{pB}, u_{pC} , а також коефіцієнти магнітного зв'язку між фазами K_1, K_2, K_3 . За допомогою відомих виразів з літератури з проектування електричних машин [10] розраховується окремо індуктивність пазового розсіювання обмотки статора L_{gA}, L_{gB}, L_{gC} , індуктивність розсіювання лобових частин L_{eA}, L_{eB}, L_{eC} , опір обмотки статора R_{wA}, R_{wB}, R_{wC} .

Для дослідження обрано такі параметри генератора [8]: $r_1 = 318$ мм (рис. 1, 2); немагнітний проміжок $\delta = 5$ мм; довжина моделі за координатою z становить 1 м; розміри пазів 25×8 мм; кількість пар полюсів $p = 12$; кількість пазів на полюс і фази $q = 2$; коефіцієнт вкорочення обмотки $\beta = 5/6$; струм у контурах j_p (рис. 1) 3560 А, що еквівалентно постійному магніту товщиною 4 мм та намагніченістю 890000 А/м; полюсний кут магнітів $\varphi_p = 2\varphi_\tau/3$; кількість витків у котушках одного шару обмотки $w_c = 25$. Тут φ_τ – кут полюсного кроку.

Одержано такі параметри обмотки статора: індуктивність $L_{AA} = L_{BB} = L_{CC} = 0.928$ Гн; коефіцієнт магнітного зв'язку $K_1 = K_2 = K_3 = 0.447$; індуктивність розсіювання лобових частин $L_{eA} = L_{eB} = L_{eC} = 0.008$ Гн; індуктивність пазового розсіювання $L_{gA} = L_{gB} = L_{gC} = 0.142$ Гн; опір обмотки $R_{wA} = R_{wB} = R_{wC} = 18.22$ Ом.

Частоту (2) задано відповідно до [8] з періодом 10 с та середнім значенням $n_{1av} = 12$ об/хв, для якої оптимальний коефіцієнт моменту k_M було вибрано 19 кН·м·с/об.

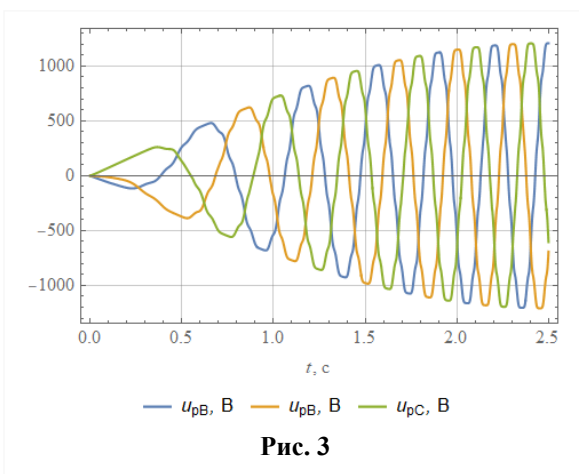


Рис. 3

Індукована струмовими контурами j_p (постійними магнітами) напруга в обмотці статора u_{pA}, u_{pB}, u_{pC} представлена на рис. 3 в межах 1/4 періоду морської хвилі та відповідно частоти (2).

Імітаційні моделі електричних схем. Схема без випрямляча струму (рис. 4 а) може бути розрахована аналітично за другим законом Кірхгофа. Проте з використанням напівпровідникового перетворювача струму (рис. 4 б) розрахунок аналітичним методом ускладнено. Тому параметри (індуктивність, активний опір) генератора та генерована напруга в обмотці (рис. 3) від програми

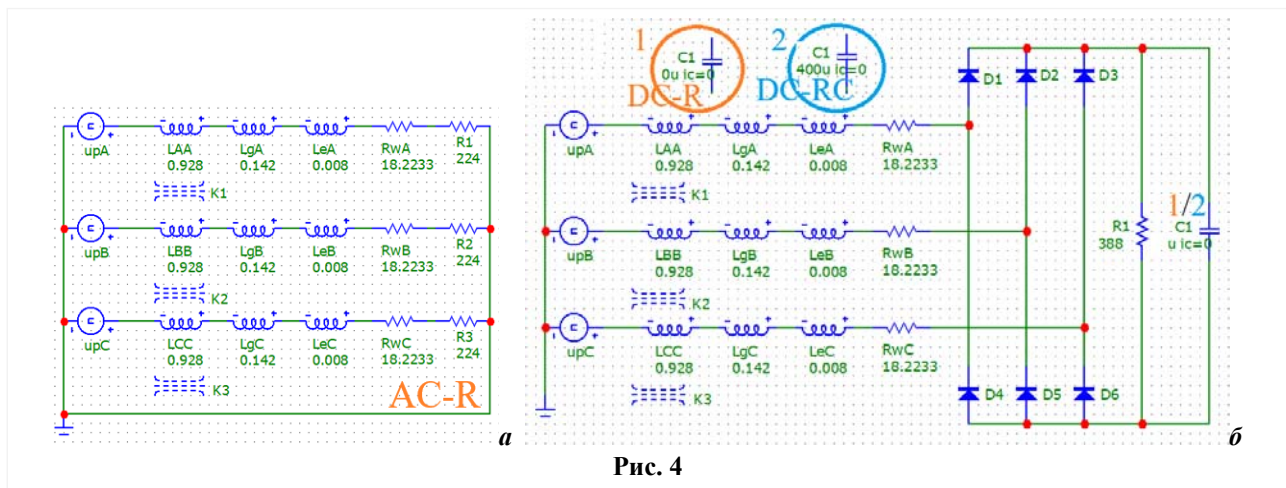


Рис. 4

в Wolfram Mathematica для розрахунку енергетичних показників генератора за методом [9] автоматично передаються в модель електричної схеми в Micro-Cap (рис. 4). Потім розраховані струми в електричному колі та в обмотці статора передаються автоматично від Micro-Cap у програму розрахунку генератора в Wolfram Mathematica для визначення енергетичних показників генератора та коефіцієнта моменту k_M .

На рис. 4 а представлено модель з активним навантаженням (AC-R схема) в програмі Micro-Cap. На рис. 4 б – модель з випрямлячем струму і активно-ємнісним (DC-RC) навантаженням, а також активним (DC-R) навантаженням у випадку відсутності конденсатора $C1$. Напруга u_{pA}, u_{pB}, u_{pC} на усіх трьох схемах однакова і відповідає рис. 3.

Опір навантаження $R1, R2, R3 = 224$ Ом на схемі AC-R (рис. 4 а) підібраний таким чином, щоб досягти $k_M = 19$ кН·м·с/об [8], який розраховується виразом (1). За умови використання одного резистора $R1$ на схемах з перетворювачем DC-R та DC-RC (рис. 4 б) опір задано в $\sqrt{3}$ разів більший від величини опору $R1, R2, R3$ на схемі AC-R (рис. 4 а) – 388 Ом. Ємність конденсатора $C1$ (рис. 4 б) вибрано такої величини (400 мкФ), щоб досягти суттєвого зменшення пульсацій струму на резисторі $R1$. Опір $R1$ на схемі з конденсатором DC-RC вибирається такої величини (430 Ом), щоб досягалася значення $k_M = 19$ кН·м·с/об.

Результати дослідження. На рис. 5 а представлено струм i_C фази C в обмотці генератора з AC-R схемою, на рис. 5 б – зі схемою DC-R, і на рис. 5 в – зі схемою DC-RC. Частота струму змінюється від 0 Гц при позначці часу 0 с до максимального значення

$$f_I = \sqrt{2}n_{1av}p/60 = 3,4 \text{ Гц} \quad (4)$$

на позначці часу 2,5 с, коли досягається амплітудне значення частоти (2). Чим більше полюсів має генератор, тим більше періодів колювання струму буде спостерігатися на рис. 5 відповідно до (4).

Діючі значення струму фази C для усіх схем на рис. 4 становлять 2 А (таблиця), отже, енергія хвиль, що споживається генератором, також однакова. Випрямлений струм на резисторі $R1$ (i_R) у схемі без конденсатора (рис. 5 б) співпадає з максимальними значеннями струму в обмотці статора i_C , і його діюче значення становить 3,05 А. За умови використання конденсатора (рис. 5 в) діюче значення струму i_R становить 2,75 А. Струм на конденсаторі i_{Cap} на рис. 5 в має амплітуду 1,2 А і діюче значення 0,7 А. Наявність конденсатора дає змогу згладити колювання струму в резисторі $R1$: на позначці часу 2,5 мкс колювання струму становить в межах 0,7 А без конденсатора і 0,1 А з конденсатором.

На рис. 6 показано напругу однієї з фаз (фаза C) відповідно для трьох схем (рис. 4): U_{IsC} – напруга втрат в опорі обмотки R_{wC} ; U_{csC} – напруга на виводах обмотки генератора; U_{R3} – напруга на опорі споживача $R3$ схеми на рис. 4 а; U_{R1} – напруга на опорі споживача

$R1$ схеми на рис. 4 б. Середні діючі значення напруги (рис. 6) представлено в таблиці, де показано, що діючі значення усіх напруг для різних схем є однаковими. Але у випадку наявності перетворювача струму (рис. 6 б) є помітний вплив вищих гармонік від випрямляча струму,

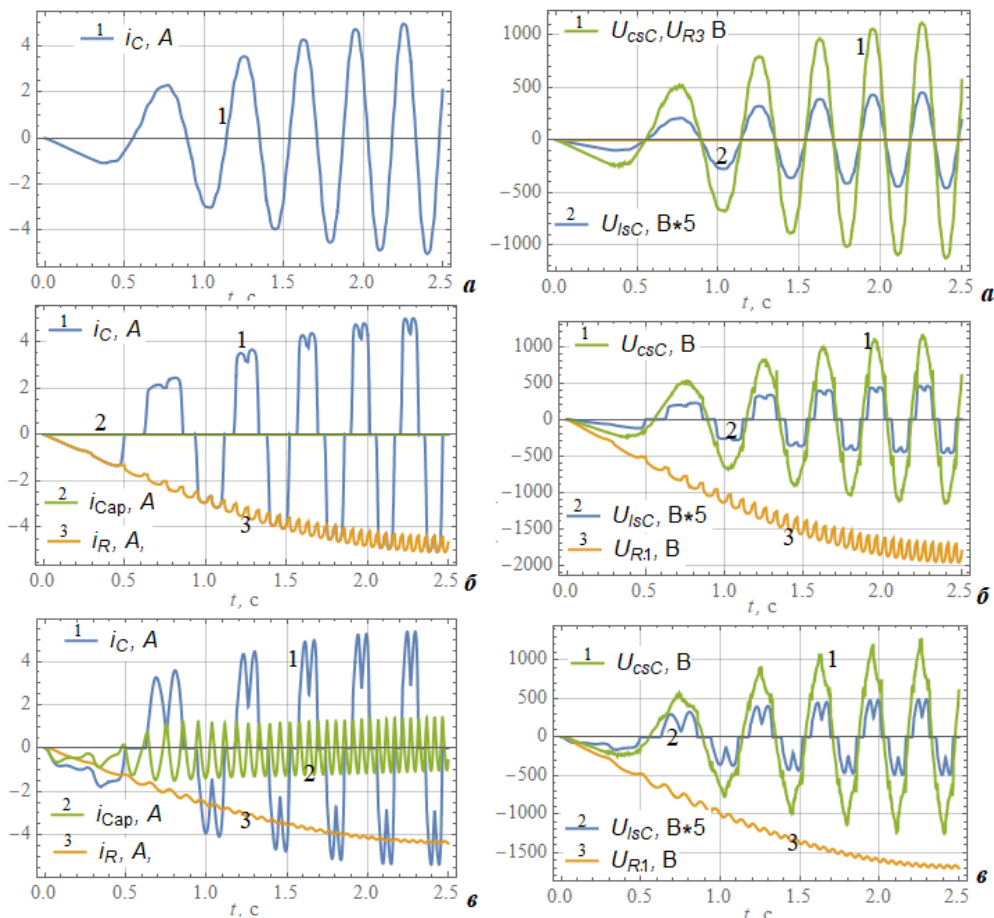


Рис. 5

Рис. 6

що спотворює криві напруги. За наявності конденсатора (рис. 6 в) напруга на опорі $R1$ вирівнюється: коливання напруги при позначці часу близько 2,5 мкс було 0,26 кВ на рис. 6 б і стало 0,04 кВ на рис. 6 в.

На рис. 7 представлено такі характеристики: P_2 – потужність, що передається від хвилі на обертовий вал генератора; P_{cs} – потужність на виході від генератора; P_R , P_{R1} – потужність споживання електроенергії на резисторах; M_M – магнітний момент на роторі. Частота n_1 (2) однакова для усіх схем за умовою. Середні значення показників потужності, що на рис. 7, представлено в таблиці.

На схемі з випрямлячем рис. 7 б спостерігається значне високочастотне коливання потужності та моменту. З використанням конденсатора на рис. 7 в потужність на резисторі P_{R1} має значно менші коливання, порівняно з випадком без конденсатора на рис. 7 б. Але за наявності конденсатора збільшуються межі коливання моменту на валу ротора та активної потужності генератора. Такі високочастотні коливання моменту (рис. 7 б, в) можуть спричинити вібрацію, яку можна частково компенсувати пружною муфтою між шківом 3 та ротором 5 на рис. 1.

На рис. 8 представлено порівняння коефіцієнта моменту k_M (1) для досліджуваних схем, який в межах часу 0,5...2,5 с має подібне усереднене значення 19 кН·м·с/об. У межах часу 0...0,3 с за наявності конденсатора k_M досягає значення 80 кН·м·с/об, що може впливати на зрушення буя з нерухомого стану при зміні напрямку його вертикального переміщення на воді. У такому випадку очікується, що буй (рис. 1) за зміни напрямку руху буде більше занурюватися у воду та виринати з води. Тому для більш точного розрахунку динамічних

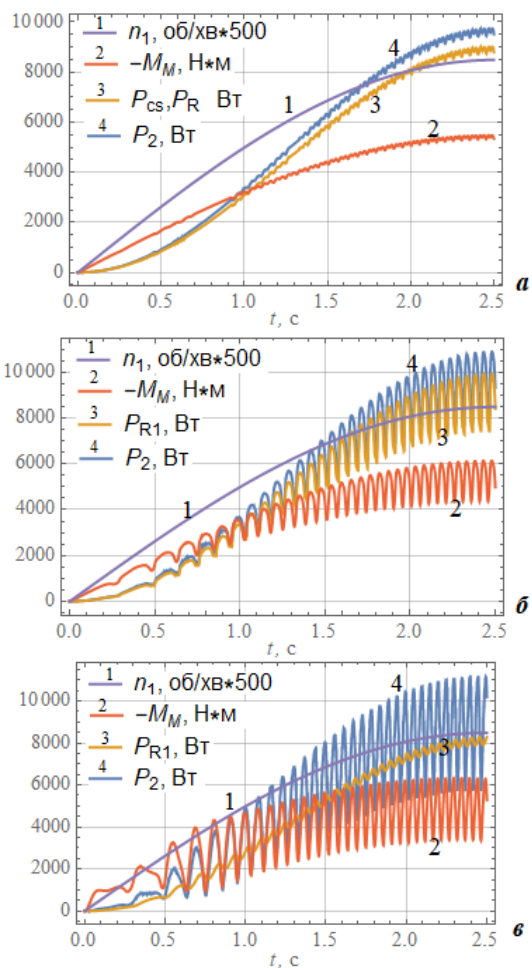


Рис. 7

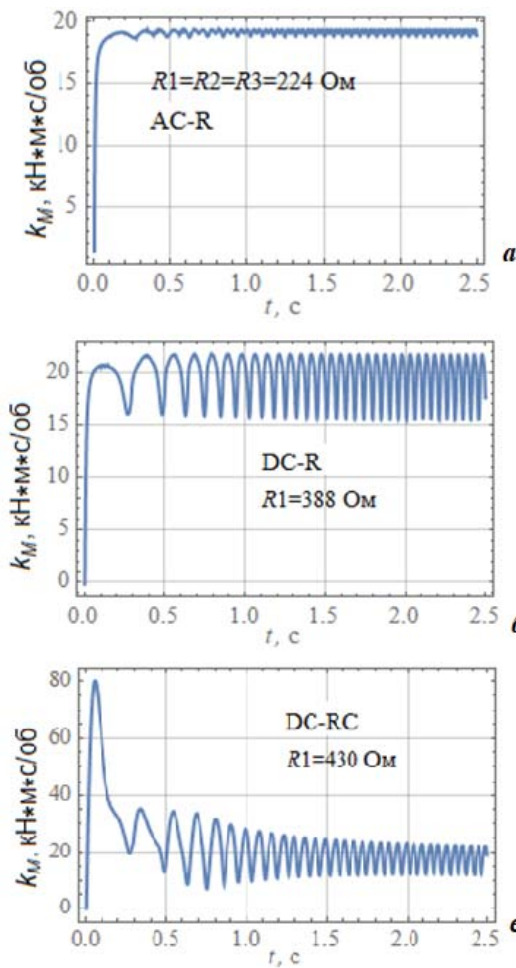


Рис. 8

процесів генеруючого комплексу потрібно виконувати розрахунки магнітного моменту, коливання буя на воді та струму в електричній схемі комплексно.

Аналізуючи дані в таблиці, можна зробити висновок, що схеми AC-R і DC-R без конденсатора практично дають однакові результати, крім втрат в обмотці P_{Is} за період хвили, які більші на 12 % у схемі DC-R. Причиною збільшення втрат P_{Is} , що прямо пропорційні сумі

	1	2	3
Схема (рис. 4)	«AC-R»	«DC-R»	«DC-RC»
$R1, R2, R3$	224 Ом	–	–
$R1$	–	388 Ом	430 Ом (+11%)
I_A, I_B, I_C (DC)	2,08 А	2,04 А (-2%)	2,04 А (-2%)
U_{IsC} (DC)	38 В	37 В (-2%)	37 В (-2%)
U_{csC} (DC)	468 В	471 В (+0%)	471 В (+0%)
U_{R1} (DC)	–	1185 В	1183 В (+0%)
P_2	4815 Вт	4890 Вт (+2%)	4729 Вт (-2%)
P_{cs}	4453 Вт	4483 Вт (+0%)	4322 Вт (-2%)
P_{Is}	362 Вт	406 Вт (+12%)	406 Вт (+12%)
P_{R1}	1484 Вт	4473 Вт	4031 Вт (-19%)
P_R	4453 Вт		
M_M	3453 Н·м	3515 Н·м (+2%)	3521 Н·м (+2%)
η_P (5)	92 %	91 %	85 %

квадратів миттєвих значень струму, є поява вищих гармонік (рис. 5 б) внаслідок нелінійності навантаження з напівпровідниковим випрямлячем струму. Порівнюючи схеми DC-RC і DC-R, маємо зниження потужності споживання P_{R1} на 19 %, але більш рівні криві струму та напруги на споживачі R1 (рис. 5 б та рис. 6 б). Схема з конденсатором має коефіцієнт споживання потужності

$$\eta_P = P_{R1}/P_2 \quad (5)$$

найменший – 85 %, тоді як без конденсатора він становить 92 %.

Висновки. У порівнянні схем з резистором як споживачем потужності, з перетворювачем струму на шести діодах та без перетворювача, виявлено очікувану відмінність кривих струму та напруги і зростання потужності втрат в обмотці статора на 12 % за рахунок нелінійного спотворення струму. Наявність перетворювача уже спричинює високочастотні коливання потужності, струму та електромагнітного моменту генератора, які потім зростають ще на 1/3 при додаванні конденсатора паралельно до резистора. Збільшення коливання моменту може призводити до збільшення вібрацій.

При роботі перетворювача енергії хвиль з випрямлячем струму за умови наявності конденсатора паралельно зі споживачем (резистор) суттєво знижуються високочастотні коливання потужності, струму та напруги на резисторі. Водночас відбувається зростання на 11 % опору резистора, зменшення потужності споживання електроенергії на 19 % та зменшення коефіцієнта споживання потужності енергії хвиль від 91 до 85 %.

За наявності перетворювача струму коефіцієнт моменту k_M (частка електромагнітного моменту та частоти обертання ротора) має високочастотне коливання, порівняно з таким коефіцієнтом без перетворювача. Якщо присутній конденсатор, то при старті обертання ротора генератора він короткий проміжок часу заряджається і водночас спостерігається в 4 рази більше значення коефіцієнта моменту k_M .

Роботу виконано за темою "Розвиток удосконалених електромеханічних та електромагнітних систем електростанцій та методів їх діагностики" ("Агрегат-3", державний реєстраційний номер 0122U000840).

1. Савченко Г.Ю. Оценка энергетических параметров волновой поплавковой электростанции. *Прикладна гідромеханіка*. 2016. Т. 18. № 2. С. 58–63. URL: <http://dspace.nbu.gov.ua/handle/123456789/116559>
2. 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>
3. Mile Dragić, Milan Hofman, Veselin Tomin, Vladimir Miškov, Sea trials of Sigma wave energy converter – Power and efficiency. *Renewable Energy*. 2023. Vol. 206, P. 748–766. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2023.02.055>
4. 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>
5. Boxi Jiang, Xiaofan Li, Shuo Chen, Qiuchi Xiong, Bangfuh 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>
6. Falcão, AFO, Cândido, 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>
7. Giambattista Gruosso, Qi Zhou, Federica Bizzozero Comparison among passive and active rectifier for seawave energy production. *2015 International Conference on Clean Electrical Power (ICCEP)*, Taormina, Italy. 2015. Pp. 493–498. DOI: <https://doi.org/10.1109/ICCEP.2015.7177562>
8. Кондратенко І.П., Карлов О.М., Кришук Р.С. Методика розрахунку енергетичних характеристик перетворювача енергії морських хвиль за період коливання хвилі. *Праці Інституту електродинаміки НАН України*, 2023, Вип. 64. С. 5–14. DOI: <https://doi.org/10.15407/publishing2023.64.005>
9. Кондратенко І.П., Кришук Р.С. Математична модель магнітоелектричної машини. *Технічна електродинаміка*. 2024. № 2. С. 52–61. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2024.02.052>

10. Постников И.М. Проектирование электрических машин. К.: ГТИ. 1962. 736 с.

ELECTRICAL PARAMETERS AND POWER IN THE SEA WAVE ENERGY CONVERTER WITH RECTIFIER AND RC LOAD

I.P. Kondratenko, R.S. Kryshchuk

Institute of Electrodynamics of the National Academy of Sciences of Ukraine,
Beresteyskiy ave., 56, Kyiv, 03057, Ukraine

E-mail: dep7ied@ukr.net¹, dygogive@gmail.com²

The article is dedicated to determining the energy indicators of a generating complex with stochastic wave energy generation. The aim of the study is to compare the energy indicators and power consumption coefficient of wave energy generating complexes' simulation models with magneto-electric generators operating at variable speeds under resistive and resistive-capacitive loads with rectified voltage. The analytical method is employed to calculate the parameters and energy indicators of the magneto-electric generator. The calculation includes inductance, resistance, and voltage generated by the rotor with permanent magnets in the three-phase winding of the magneto-electric generator for electrical circuit modeling with and without a three-phase current rectifier, as well as active-reactive and active loading. The rotor rotation frequency varies harmonically with the same period and amplitude for all electrical circuits. The determined current in the electrical circuits is used to calculate the generator's electromagnetic field and energy indicators. Comparisons are made for circuits with active and active-reactive loads, including power consumption, power losses in the stator winding, power output from the generator, and the power consumption coefficient of wave energy. The comparison of energy indicators is conducted under the condition of equal rotor oscillation frequency and shaft torque, achieved by varying the load resistance. Bibl. 10, fig. 8, table.

Keywords: simulation model, electrical circuit, wave energy conversion, active-reactive load.

1. Savchenko H.Yu. Estimation of power parameters of wave float power-station. *Prikladna Hidromekhanika*. 2016. Vol. 18. No. 2. Pp. 58–63. URL: <http://dspace.nbuiv.gov.ua/handle/123456789/116559> (Rus)
2. 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>
3. Mile Dragić, Milan Hofman, Veselin Tomin, Vladimir Miškov, Sea trials of Sigma wave energy converter – Power and efficiency. *Renewable Energy*. 2023. Vol. 206, P. 748–766. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2023.02.055>
4. 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>
5. 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>
6. 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>*
7. Giambattista Gruosso, Qi Zhou, Federica Bizzozero Comparison among passive and active rectifier for seawave energy production. *2015 International Conference on Clean Electrical Power (ICCEP), Taormina, Italy. 2015. Pp. 493-498. DOI: <https://doi.org/10.1109/ICCEP.2015.7177562>*
8. Kondratenko I.P., Karlov O.M., Kryshchuk R.S. Methodology for calculating energy characteristics of a sea wave energy converter for the wave oscillation period. *Pratsi Instytutu elektrodynamiky Natsionalnoi Akademii Nauk Ukrainy*, 2023. No. 64. Pp. 5–14. DOI: <https://doi.org/10.15407/publishing2023.64.005> (Ukr)
9. Kondratenko I.P., Kryshchuk R.S. Mathematical model of a magnetoelectric machine. *Tekhnichna Elektrodynamicamika*. 2024. No. 2. Pp. 52–61. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2024.02.052> (Ukr)
10. Postnikov I.M. Design of electric machines. Kyiv: GTI. 1962. 736 p. (Rus)

Надійшла: 22.02.2024

Прийнята: 27.03.2024

Submitted: 22.02.2024

Accepted: 27.03.2024