

## МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ПРИСТРОЮ ДЛЯ ПЕРЕТВОРЕННЯ ЕНЕРГІЇ МОРСЬКИХ ХВИЛЬ

*І. П. Кондратенко, д.т.н., А. П. Ращепкин, д.т.н., проф.*

*Інститут електродинаміки НАН України*

*пр. Перемоги, 56, 03680, м. Київ, Україна*

*E-mail: dep7ied@ukr.net*

*Д. Д. Ващишин, асп.*

*Національний університет біоресурсів і природокористування України*

*вул. Героїв Оборони, 8, 03041, м. Київ, Україна*

*E-mail: dubn0@meta.ua*

Розроблено математичну модель для дослідження електромагнітних процесів в електротехнічному комплексі пристрою для перетворення енергії морських хвиль, до складу якого входить лінійна електрична машина з періодичною структурою постійних магнітів. Проведені дослідження роботи комплексу на активне навантаження.

**Ключові слова:** лінійний генератор, Simulink модель, енергія хвиль.

**Вступ.** Енергетичні показники пристроїв для перетворення енергії з відновлювальних джерел наперед залежать від методів перетворення і передачі енергії від сприймаючого органу до генеруючих установок з мінімальною кількістю проміжних передавальних елементів. Така умова особливо актуальна при низьких показниках, наприклад, швидкості вітру, сонячної радіації, амплітуди та періоду морської хвилі тощо.

**Аналіз попередніх досліджень.** Проведені дослідження [5] показали, що висота хвилі в Чорному морі змінюється протягом року в середньому від 15 см до 60 см., а потужність, що має хвиля, – від 400 Вт/м до 3000 Вт/м.

За таких енергетичних показників постає питання про доцільність використання такої низькопотенціальної енергії та створення пристроїв для її ефективного перетворення. Одним з можливих варіантів перетворення енергії є використання пристроїв, які для генерації електричної енергії використовують вертикальне переміщення. Така схема може бути реалізована в лінійних генераторах, в яких індуктор (ротор) за допомогою поплавка-буя відслідковує коливання хвилі. Основою індуктора є високоенергетичні постійні магніти на основі ітерметалічного композиту NbFeB. Використання постійних магнітів на основі високоенергетичного компаунду NbFeB для збудження магнітного поля в лінійному генераторі може значно підвищити ефективність перетворення енергії хвиль.

Попередні дослідження [1] показали, що електрорушійна сила (ЕРС) лінійного генератора змінюється за амплітудою і частотою, що ускладнює використання такої енергії. Внаслідок цього лінійний генератор для перетворення енергії морських хвиль потрібно розглядати в єдиному комплексі з електричними перетворювальними пристроями – трифазний випрямляч струму, ємнісний накопичувач, акумуляторні батареї тощо.

**Мета роботи.** Розробка математичної моделі для об'єктного моделювання енергетичних та динамічних режимів роботи пристрою для перетворення енергії морських хвиль.

**Матеріал і результати дослідження.** Для об'єктного моделювання електротехнічного ком-

плексу в складі пристрою для перетворення енергії морських хвиль обрано програмне середовище MathLab Simulink. У цьому середовищі можливо задати всі елементи, які входять до складу електротехнічного комплексу: лінійний генератор із заданою формою вхідного сигналу, значення активних опорів та індуктивностей, навантаження, випрямляч струму, ємнісний фільтр, а також засоби вимірювання електричних величин.

Вихідними даними для об'єктного моделювання електротехнічного комплексу в MathLab Simulink є характеристики морської хвилі: амплітуда  $A$  та період  $T$ , конструктивні розміри лінійного генератора і параметри обмотки, до яких належать: активний опір обмотки, індуктивність і взаємоіндуктивність фаз обмоток, кількість витків у пазу, кількість пар полюсів індуктора.

Активний опір визначається як опір провідника постійного струму, в залежності від площі пазу  $S_{\text{п}}, \text{м}^2$ , довжини витка  $l_{\text{в}}, \text{м}$ , кількості витків у пазу  $w$  та перерізу провідника  $d, \text{м}^2$ . Розрахунок індуктивності й взаємоіндуктивності фаз обмотки можливо провести на основі розв'язку польової задачі. Вона розв'язується чисельно в програмному пакеті Comsol у двовимірній постановці за наступних умов: статор лінійного генератора прийнятий нескінченної довжини та ширини, внаслідок чого по вздовжній та поперечній крайові ефекти відсутні. Тоді, за умови симетрії магнітного кола лінійного генератора, для розрахунку індуктивності і взаємоіндуктивності фаз обмотки статора лінійного генератора достатньо розглядати тільки подвійний полюсний крок  $2\tau$  (рис. 1).

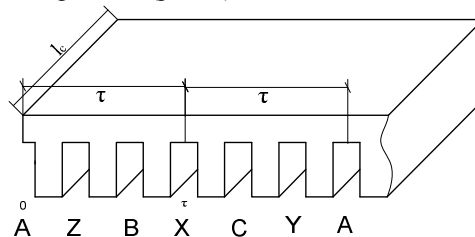


Рисунок 1 – Модель статора лінійного генератора для розрахунку індуктивності

Результат розрахунку індуктивності в такій постановці не враховує вплив лобових частин обмотки. Але похибка такого розрахунку не є великою, зважаючи на відомі результати розрахунку електричних машин. Граничними умовами по довжині статора приймаються умови періодичності:

$$\left. \frac{\partial A_z}{\partial x} \right|_{-r} = \left. \frac{\partial A_z}{\partial x} \right|_r = 0. \quad (1)$$

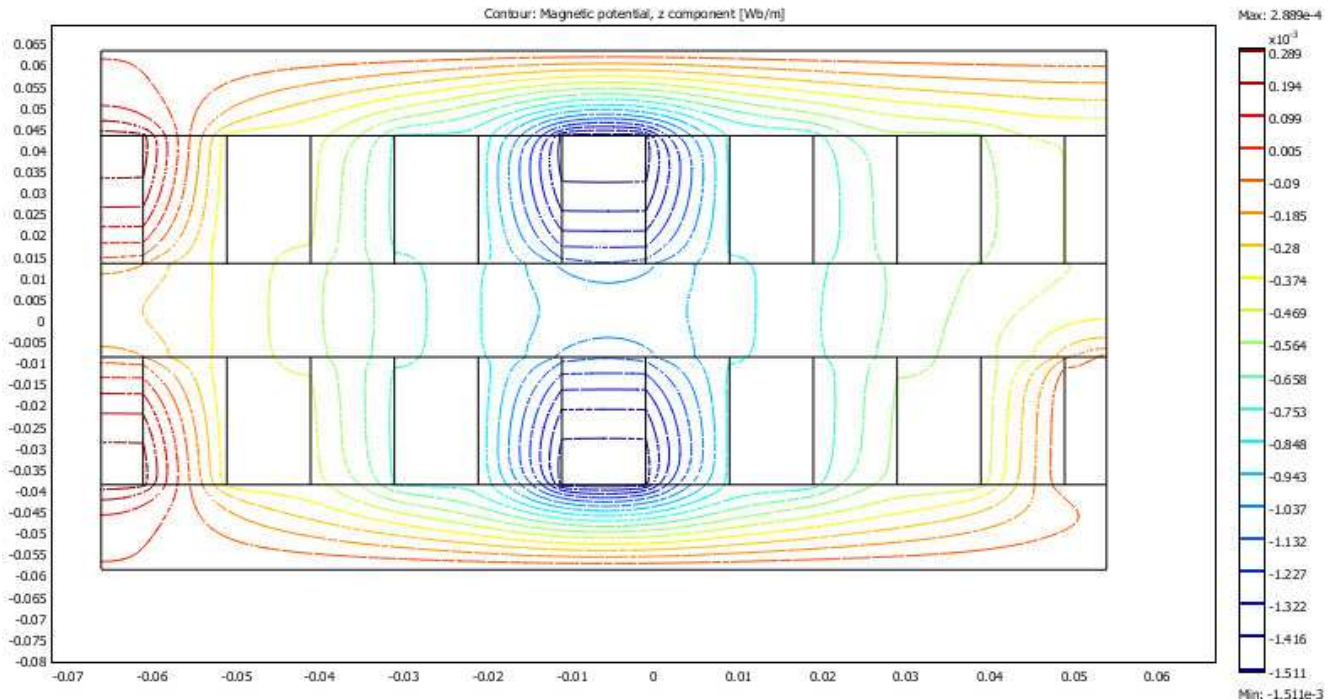


Рисунок 2 – Розподіл векторного магнітного потенціалу

Впливом ротора лінійного генератора, який виконується з постійних магнітів, магнітна проникність яких близька до магнітної постійної, можна знехтувати й вилучити його з розрахункової схеми. У пазах статора трифазного генератора розташовані фазні обмотки, послідовність яких показана на рис. 1. У моделі, представленій на рис. 2, обмотка задається областю з нульовою електропровідністю та визначеною густиною струму. Магнітна проникність осердя і зубців статора розраховується за формулою:

$$\mu = 820(1 + 0,025|B|^9)^{-1}. \quad (2)$$

У програмному середовищі Comsol отримано розподіл векторного магнітного потенціалу (рис. 2), що визначений за умови завдання густини струму  $j_m$ . Густина струму в пазу є заданою величиною, причому її значення обирається як характерне значення для електричних машин, наприклад,  $1A/мм^2$ .

Відомо, що індуктивність визначається через відношення потокощеплення до струму, який викликав цей магнітний потік.

$$L_A = \psi / I_A, \quad (3)$$

де  $I_A = (j_{mA} S_n) / w$ .

Потокощеплення обмотки  $\psi$  визначається магнітним потоком, що пронизує витки обмотки  $w$ , які розміщені в пазу  $\psi = w\Phi$ .

Тобто, індукція магнітного поля на границях області по осі  $x$  має лише нормальну складову  $-B_x$ .

Розрахункова модель, що побудована в програмному пакеті Comsol, включає до свого складу два статори, розташовані протилежно один одному (рис. 2).

Тоді, якщо магнітну індукцію представити через векторний магнітний потенціал  $rot\mathbf{A} = \mathbf{B}$ , магнітний потік визначається як

$$\Phi = \int_S rot\mathbf{A} dS, \quad (4)$$

де  $S$  – площа полюсного кроку,  $мм^2$ .

Відповідно до теореми Стокса, можна перейти від інтегралу по площі до інтегралу по контуру:

$$\int_S rot\mathbf{A} dS = \oint \mathbf{A} dl, \quad (5)$$

де  $A$  визначається як векторний магнітний потенціал, значення якого можливо розрахувати в середовищі Comsol.

У розглянутому варіанті лінійного генератора, у відповідності до прийнятих припущень, лобові частини котушок не враховуються, тоді інтеграл по контуру можна замінити сумою

$$\oint \mathbf{A} dl = 2l_c A_z, \quad (6)$$

де  $2l_c A_z$  враховує дві сторони котушки.

Тоді потокощеплення визначається:

$$\psi = w \oint \mathbf{A} dl = w 2l_c A_z. \quad (7)$$

У зв'язку з тим, що векторний магнітний потенціал у пазу розподілений нерівномірно, введемо се-

реднє значення векторного магнітного потенціалу в пазу  $A = \frac{1}{S_n} \int A_z dS$ , тоді залежність (7) набуває вигляду:

$$\psi = w l_c \frac{1}{S_n} \int A_z dS. \quad (8)$$

Індуктивність фаз лінійного двостороннього

генератора розраховується за виразом:

$$L_A = (4w^2 l_c p \frac{1}{S_n} \int A_z dS) (j_{m4} S_n)^{-1}. \quad (9)$$

де  $l_c$  – ширина статора лінійного генератора,  $m$ .

Електротехнічний комплекс пристрою для перетворення енергії хвиль, що побудовано в MatLab Simulink, показано на рис. 3.

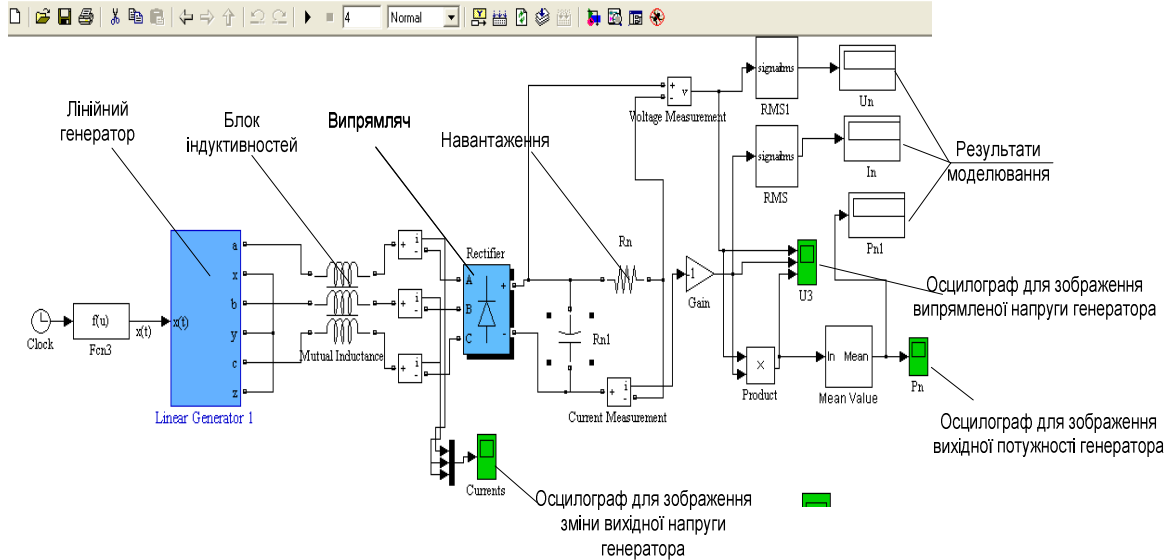


Рисунок 3 – Simulink модель пристрою для перетворення енергії морських хвиль

Припустимо, що коливання морської хвилі можна описати [1] синусоїдальною функцією, яка є вхідною величиною для лінійного генератора. Трифазна обмотка генератора виконана за схемою зірка. Для завдання опору обмотки, індуктивностей та взаєміндуктивностей призначений блок індуктивності. Проведені розрахунки показали, що напруга та струм генератора змінюються по амплітуді та періоду, що в подальшому ускладнює використання такої енергії. Відомо, що трифазний випрямляч струму для мережі є симетричним навантаженням. Тому напруга та струм генератора зміщені на  $120^\circ$ . Що реалізовано за допомогою блоків, які моделюють роботу лінійного генератора (рис. 4)

В якості навантаження генератора використовується активний опір. Запропонована математична модель (рис. 3) пристрою для перетворення енергії хвиль дає можливість отримати середньоквадратичні значення струму та напруги, а також середнє значення потужності за період хвилі.

Проведемо розрахунок параметрів пристрою для перетворення енергії хвиль відповідно до запропонованої методики.

Вибір довжини статора залежить від величини напруги, на яку проектується генератор з дотриманням умови періодичності та рівності полюсного кроку статора та індуктора. Довжина індуктора розраховується в залежності від довжини статора так, щоб довжина індуктора була більшою довжини статора на подвійну амплітуду морської хвилі. Це потрібно для того, щоб індуктор під час коливань не виходив за межі статора.

Для запропонованої моделі (рис. 3) прийнято:  $42p = 8$ , полюсний крок  $\tau = 0,06 m$ , ширина статора

генератора  $l_c = 0,2 m$  та площа пазу  $300 mm^2$ . З урахуванням полюсного кроку генератора, заданих конструктивних параметрів генератора та вимог при проектуванні електричних машин активний опір обмотки фази  $A$  дорівнює  $R_A = 6,344 \Omega$ , для провідника  $d = 1,42 mm$ , при  $109$  витках в пазу.

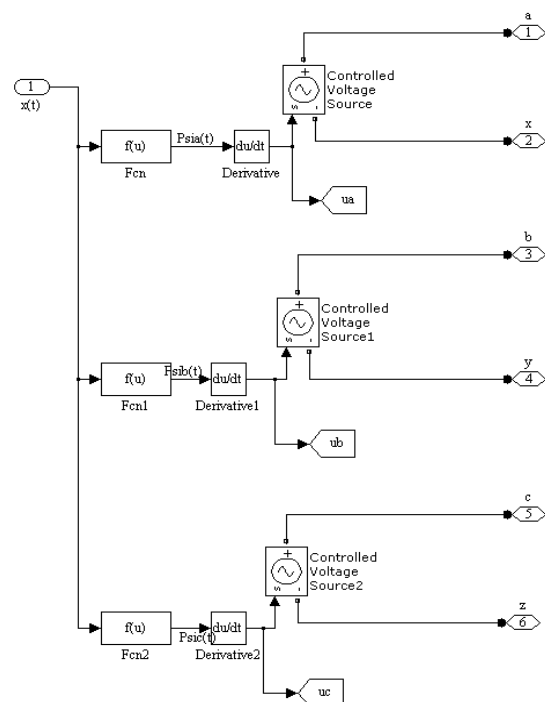


Рисунок 4 – Simulink – модель лінійного генератора

За відомими конструктивними розмірами генератора у програмному середовищі Comsol побудовано модель лінійного генератора для розрахунку індуктивності (рис. 2). Індуктивність обмотки фази А, що розраховується за вищенаведеними формулами, дорівнює  $L_A = 0,167 \text{ Гн}$ . Активні опори та індуктивності інших фаз приймаються рівними між собою у зв'язку із симетричністю системи. Взаємна індуктивність фаз обмоток у зв'язку із симетричністю навантаження дорівнює  $M_{AC(AB,BC)} = 0,5 L_{A(B,C)}$ .

На основі Simulink – моделі на рис. 3 – для розрахованих конструктивних параметрів генератора та відомих параметрах хвилі ( $2A = 0,6 \text{ м}$ ,  $T = 2 \text{ с}$ ), розраховано максимальну потужність генератора в залежності від опору навантаження (рис. 5), яка складає  $P = 253,6 \text{ Вт}$  при опорі навантаження  $R_n = 11 \text{ Ом}$ .

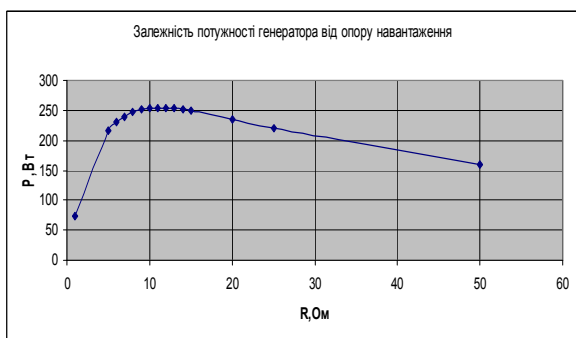


Рисунок 5 - Залежність потужності генератора від опору навантаження.

Аналіз форми напруги, що генерується (рис. 6.а.) і струму, що споживається випрямлячем (рис. 6.б.) мають не синусоїдальний характер. В певні моменти генерація (проходження індуктором максимальної і мінімальної точки) відсутня.

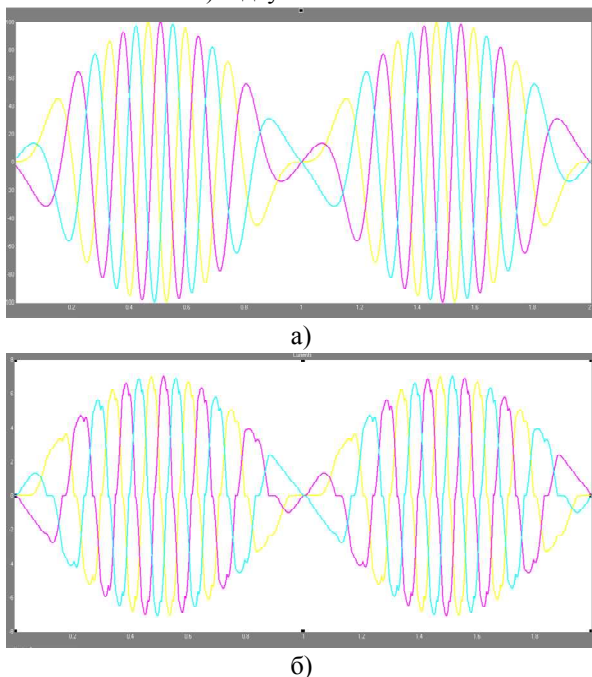


Рисунок 6 – Зміна напруги та струму лінійного генератора при роботі на активне навантаження  $R_n = 11 \text{ Ом}$

На рис. 7 представлено зміну напруги лінійного генератора при роботі в комплексі з трифазним випрямлячем при різних значеннях ємнісного фільтру. При роботі генератора на трифазний випрямляч з використанням згладжуючого фільтру провали по напрузі зменшуються, а також зменшується вплив вищих гармонік. Так, на рис. 7, а) показано зміну напруги при величині ємності в  $1 \text{ мФ}$ , а на рис. 7, б) показано зміну напруги при величині ємності в  $10 \text{ мФ}$ . При ємності в  $10 \text{ мФ}$  спостерігається зменшення впливу вищих гармонік та зменшується провал по напрузі на 12 % у порівнянні з ємністю в  $1 \text{ мФ}$ .

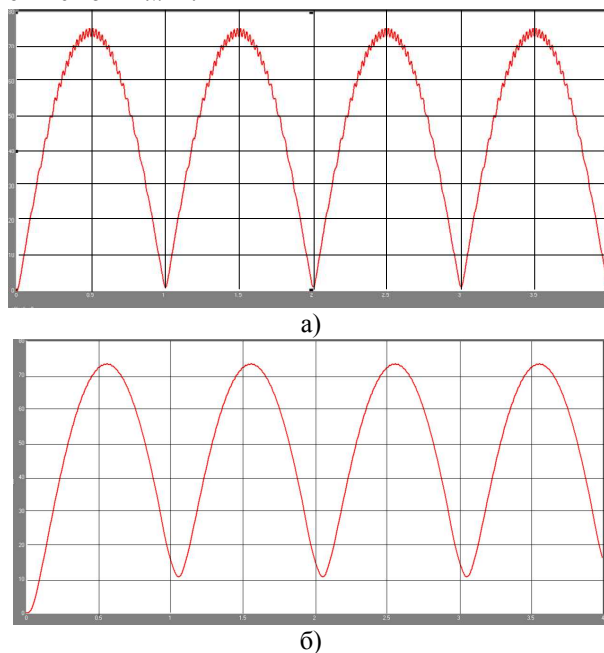


Рисунок 7 – Зміна напруги генератора при роботі на активне навантаження  $R_n = 11 \text{ Ом}$  у комплексі з випрямлячем струму та ємнісним фільтром ( рис.7, а) –  $1 \text{ мФ}$ ; . рис.7, б) –  $10 \text{ мФ}$  )

**Висновки.** Розроблено метод визначення параметрів лінійного генератора на підставі розв'язку двовимірної польової задачі з урахуванням нелінійної магнітної проникності осердя. Визначено максимальну потужність пристрою для перетворення енергії хвиль при роботі на активне навантаження з заданими параметрами пристрою.

#### ЛІТЕРАТУРА

1. Кондратенко І.П., Ращепкин А.П., Ващишин Д.Д. Розрахунок електрорушійної сили лінійного генератора для перетворення енергії хвиль / Вісник Кременчуцького державного університету ім. М. Остроградського. – Кременчук: КДУ, 2010. – Вип.4/2010 (63), ч. 1. – С. 72–75.
2. Иванова И.А. Исследование и разработка магнитоэлектрического линейного генератора для преобразования энергии морских волн. – Санкт-Петербург, 2006. – 106 с.
3. Тамм И.Е. Основы теории электричества. – М.: Наука, 1989. – 507 с.

4. Вольдек А.И. Электрические машины. – Л.: Энергия, 1974. – 807 с.

5. Lorand Szabo, Claudiu Oprea Linear Generators for wave power plants to be up Near the Romanian coasts of the Black sea / Department of Electrical Machines, Technical University of Cluj P.O. Box 358, RO-400750 Cluj, Romania.

6. Baker N. J. Linear generators for direct drive marine renewable energy converters: [A thesis submitted in

partial fulfilment of the requirements of the Council of the University of Durham].

Стаття надійшла 20.06.2011 р.  
Рекомендовано до друку д.т.н., проф.  
Чорним О.П.

## МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ УСТРОЙСТВА ДЛЯ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ЭНЕРГИИ МОРСКИХ ВОЛН

*И. П. Кондратенко, д.т.н., А. П. Ращепкин, д.т.н., проф.*

*Институт электродинамики НАН Украины*

*пр. Победы, 56, 03680, г. Киев, Украина*

*E-mail: dep7ied@ukr.net*

*Ващишин Д.Д., асп.*

*Национальный университет биоресурсов и природоиспользования Украины*

*ул. Героев Оборонь, 8, 03041, г. Киев, Украина*

*E-mail: dubn0@meta.ua*

Разработана математическая модель для исследования электромагнитных процессов в электротехническом комплексе устройства для преобразования энергии морских волн, в состав которого входит линейная электрическая машина с периодической структурой постоянных магнитов. Проведенные исследования работы комплекса на активную нагрузку.

**Ключевые слова:** линейный генератор, Simulink модель, энергия волн.

## THE DEVICE MATHEMATICAL MODEL FOR TRANSFORMING THE SEA WAVES ENERGY

*I. Kondratenko, D.Sc. (Eng.), A. Raschepkin, D.Sc. (Eng.), Prof.*

*The Institute of Electrical Dynamics, National Academy of Science, Ukraine, Kyiv*

*vil. Peremohy, 56, 03680, Kyiv, Ukraine*

*E-mail: dep7ied@ukr.net*

*D. Vaschishin, post-grad.*

*National University of Biological Resources and Nature Using*

*vil. Gerojiv Oborony, 8, 03041, Kyiv, Ukraine*

*E-mail: dubn0@meta.ua*

The mathematical model for research the electromagnetic processes in the device for transforming the sea waves energy has been designed. This mathematical model has the linear electrical machine with permanent magnets periodical structure. Scientific research of the given model use the active load has been analysed. A method for calculating the mutual inductance and the winding of a linear generator. Built an object model of the device to convert the energy of sea waves.

**Key words:** linear generator, Simulink model, waves energy.