

**Volodymyr BLINTSOV<sup>1</sup>, Aleksander BLINTSOV<sup>1</sup>  
Piotr SZYMCZAK<sup>2</sup>**

Narodowy Uniwersytet Budowy Okrętów w Mikołajewie (1)  
Zachodniopomorski Uniwersytet Techniczny w Szczecinie (2)

## **Elektrownia falowa z elementem sprężystym do przekształcania energii**

### **Abstract**

*In this paper the information on the wave power engineering has been presented and additionally some research issues were discussed as well. The paper presents a new type of the water-wave power station, in which the elastic element there was used to transform the water-wave energy into mechanical energy and then into the electric one. In addition the mathematical model of mechanical subsystem and some results of modeling have been included. Research results with the spring element were confirmed in the experimental basin. The final part of this paper includes the conclusions.*

**Keywords:** *the water-wave power station, the spring element, the mathematical model, the mechanical subsystem, energy converter, computer simulation*

### **Wstęp**

Morskie elektrownie falowe (MEF) są perspektywicznymi ekologicznymi źródłami energii, które w przeciwieństwie do innych odnawialnych źródeł energii, posiadają wysoką jednostkową koncentrację mocy na jednostkę długości fali [1-6]. Duże morskie państwa (Australia, Anglia, Norwegia, Japonia) budują MEF głównie do eksploatacji na otwartych morzach i oceanach, gdzie morskie fale posiadają dużą długość i amplitudę. Na morzach zamkniętych (Azowskim, Czarnym i Bałtyckim) są charakterystyczne krótkie i strome fale. Przy tym średnioroczne charakterystyki fal są znacząco niższe.

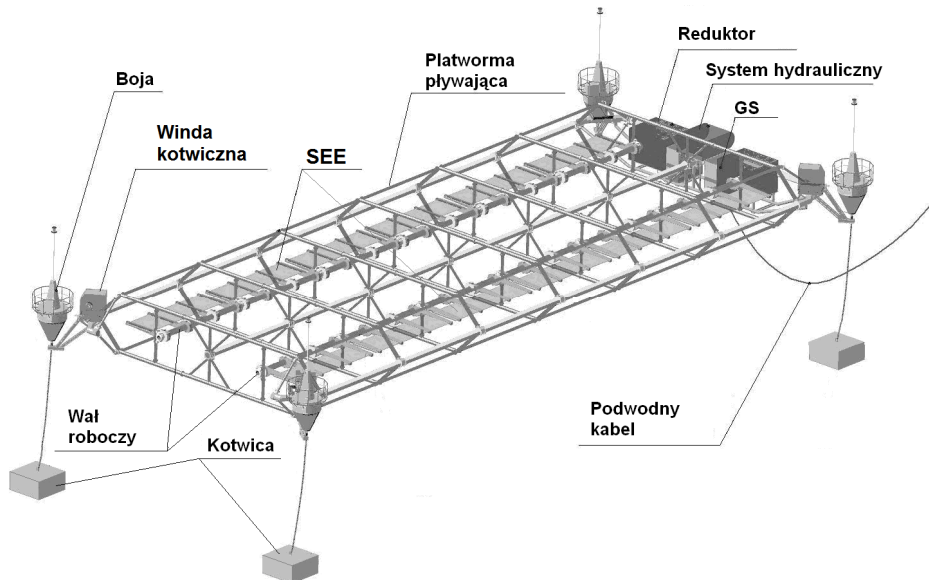
W prognozach energetyki morskiej przewiduje się jej dalszy rozwój [1-3]. Ze względu na dużą nieregularność zjawiska falowania, a także na duże zmiany wartości energii, MEF aktualnie są na etapie budowy rozwiązań prototypowych. Dotychczas zrealizowane rozwiązania to umieszczone w pławach turbiny powietrzne i prądnice, zasilające lampy światła na morskich znakach nawigacyjnych. Interesujące rozwiązania wdrożono w Japonii, USA, Norwegii i w innych państwach. Obecnie obserwuje się duże zainteresowanie wykorzystaniem energii falowania.

### **Struktura MEF**

MEF może być umownie podzielona na trzy podsystemy: pierwotny mechaniczny, wyjściowy elektryczny oraz sterowania. Celem referatu jest przedstawienie modelu matematycznego podsystemu mechanicznego, w którym pozyskiwanie energii z fal odbywa się przy pomocy nowego typu przetwornika elektromechanicznego – ze sprężystym elementem energetycznym (SEE) [4-6].

Struktura MEF pokazana jest na rys. 1. Stanowi ona pływającą zakotwiconą platformę, na której zamontowano określoną liczbę SEE, które pod wpływem fal morskich wykonują pionowe drgania i za pomocą dźwigni doprowadzają do obrotu wał roboczy, a następnie poprzez przekładnię zwiększającą przekazują energię do hydro-systemu. Składa się on z pompy hydraulicznej, akumulatora hydraulicznego i turbiny wodnej. Ta ostatnia wprawia w ruch obrotowy generator synchroniczny (GS), z którego energia jest przekazywana na brzeg przy pomocy kabla podwodnego.

## VII Lubuska Konferencja Naukowo-Techniczna – i-MITEL 2012



Rys. 1. Struktura elektrowni falowej ze sprężystym elementem energetycznym

Przy projektowaniu zaproponowanej MEF należy rozwiązać fundamentalne problemy naukowo-techniczne, które pozwolą w przyszłości stworzyć wiarygodne metodyki projektowe, z czym wiąże się w szczególności:

- problem energetycznego i hydromechanicznego współdziałania SEE z falą morską w ujęciu quasi-stacjonarnym i dynamicznym,
- problem optymalnego sterowania procesem wielokrotnego przekształcania energii w łańcuchu: „Hydrauliczna energia fali → Mechaniczna energia wału roboczego → Energia systemu hydraulicznego → Energia elektryczna GS → Obciążenie elektryczne GS”,
- problem wielopoziomowej syntezy systemu automatycznego sterowania (SAS) do automatyzacji podstawowych i wspomagających procesów, w celu zapewnienia maksymalnej efektywności eksploatacyjnej MEF

Pierwszy problem polega na adekwatnym sformułowaniu zależności typu  $L_L = F_L(L_V)$  niezbędnej do wykorzystania w SAS, gdzie  $L_L$ ,  $L_V$  – odpowiednio, długości SEE i fali.

Drugi problem wiąże się z analizą zjawisk dotyczących wzajemnego energetycznego oddziaływania wszystkich ogniw łańcucha przetwarzania energii i sformułowania zależności, pozwalającej na określenie maksymalnie dopuszczalnego obciążenia elektrowni MEF  $P = F_E(P_m)$ , gdzie  $P_m$  – moc mechaniczna, przekazywana z SEE do wału roboczego elektrowni. Niezwykle istotnym ogniwem jest zastosowanie GS z

## VII Lubuska Konferencja Naukowo-Techniczna – i-MITEL 2012

wysokoenergetycznymi magnesami trwałymi i innowacyjnymi rozwiązaniami [7, 8]. Funkcja  $F_E$  powinna zapewnić stabilną pracę MEF w zadanym zakresie charakterystyki fal przy  $P \rightarrow \max$ .

Trzeci problem dotyczy syntezy pięciu poziomów SAS: przestrzennego usytuowania MEF względem kierunku rozchodzenia się fal; sterowania hydrodynamicznym oddziaływaniem fal na SEE; regulacji napięcia wyjściowego i mocy czynnej MEF; regulowania mocy biernej MEF; określenia maksymalnie możliwej wielkości obciążenia elektrycznego dla MEF, przy której praca jest wciąż stabilna.

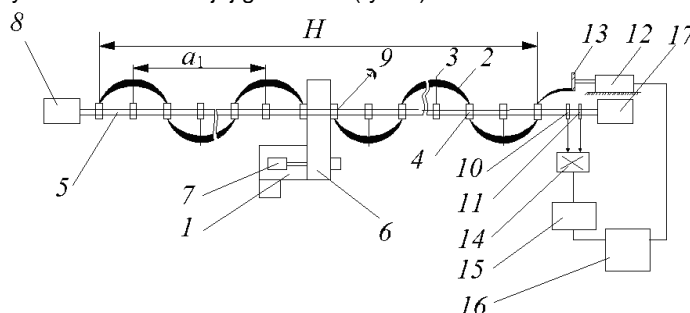
### Model matematyczny SEE

SEE można przedstawić w formie sprężystej taśmy o zerowej pływalności, która leży na powierzchni fali. Wzór, opisujący pionową składową ruchu wodnych mas, wyraża się zależnością:

$$y_h = A \cdot \sin \left[ \frac{n}{c} (x - ct) \right] + h \quad (1)$$

gdzie,  $y_h$ ,  $h$  - odpowiednio położone cząsteczki wzdłuż składowej pionowej przy falowaniu i jego nie występowaniu ( $h=0$ );  $x$  - położenie cząsteczki wzdłuż osi poziomej;  $A$  - amplituda fali;  $n$  - częstotliwość fali;  $c$  - prędkość rozprzestrzeniania się fali;  $t$  - dany czas.

Do zapewnienia maksymalnego odbioru energii fali, przy zmianie jej długości, proponuje się wprowadzić mechanizm automatycznego regulowania długości SEE [6]. W tym przypadku SEE przyjmuje formę fali, co zapewnia maksymalny moment obrotowy na wale i odpowiednio największą efektywność energetyczną przy zmianie charakterystyk fali w szerokich jej granicach (rys. 2).



Rys. 2 MEF z SAS długości SEE, 1 – pływająca platforma; 2- organ roboczy SEE; 3 – dźwignie; 4 – mechanizmy zapadkowe; 5 – wał roboczy; 6 – przekładnia z systemem hydraulicznym; 7- generator elektryczny; 8 i 17 pontony; 9 – kotwica; 10 i 11- odpowiednio, czujniki momentu obrotowego i prędkości kątowej wału roboczego; 12 - napęd elektryczny bębna, na którym znajduje się zmieniana część SEE; 13 – bęben z hamulcem; 14,15,16 –bloki: mikroprocesora, regulatora i czujników sterowania SEE.

SAS, zawierający czujniki, połączony z mikroprocesorem i wzmacniaczem, zapewnia dopasowanie napędu elektrycznego z hamulcem i bębniem do wybranej optymalnej

## VII Lubuska Konferencja Naukowo-Techniczna – i-MITEL 2012

długości  $L_{opt}$  SEE, przy której moc mechaniczna na wale jest maksymalna. Regulacja długości SEE pozwala, zwiększyć efektywność energetyczną MEF w szerokim zakresie długości fal  $a_{max} > a > a_{min}$ , gdyż przy ich zmniejszeniu nie ulega zmniejszeniu moment obrotowy i moc mechaniczna na wale.

Analizując energetyczne aspekty funkcjonowania MEF z SEE, przyjmujemy długość spirali  $L = const$  (długość SEE), wówczas zależność średnicy  $d$  spiralnego wirnika od długości fali  $a$  może być opisana wyrażeniem:

$$d = \frac{a\sqrt{L^2 - H^2}}{\pi H} \quad (2)$$

gdzie,  $H < L$  – efektywna długość wału.

Mechanizm regulowania długości SEE jest zgodny z prawem sterowania:

$$L_{opt} = f(P_{max}) \quad (3)$$

gdzie,  $P_{max} = M \times \omega = f(L) \rightarrow \max$

Efektywność energetyczna MEF z bazowym wariantem elektrowni w porównaniu ze spiralnym pływającym wirnikiem określa się współczynnikiem  $k \geq 1$ :

$$k = \frac{a_{max}}{a} \quad (4)$$

gdzie,  $a_{max} > a > a_{min}$

Przy długości wybranej części taśmy  $L$ , jej szerokości  $w$  i grubości  $b$  - masę taśmy wyraża zależność  $m = Lab\rho$ , gdzie  $\rho$  – jednostkowa gęstość wody.

Ogólna długość taśmy będzie określana według wzoru:

$$L_L = \sum_{n=1}^{N-1} \sqrt{(x_{n+1} - x_n)^2 + (y_{n+1} - y_n)^2} \quad (5)$$

gdzie,  $N$  – liczba elementarnych części, z których składa się taśma;  $y_n$  i  $x_n$  współrzędne centrów elementarnych części taśmy, przy tym  $x_{n+1} - x_n = const$

Jeżeli  $L_L > L$ , to taśma znajduje się w stanie naprężonym i każda elementarna część taśmy będzie poddana działaniu siły naprężenia zgodnie z prawem Hooke'a:

$$\Delta L = L_L; \quad F_n = -k\Delta L; \quad F_{nn} = 0,5(l_y|F_n| + r_y|F_n|) \quad (6)$$

gdzie,  $\Delta L$  – wydłużenie taśmy;  $F_n$  – moduł siły naprężenia działającej na taśmę;  $k$  – współczynnik sprężystości taśmy;  $F_{nn}$  – moduł siły naprężenia działającej na elementarną część taśmy;  $l_y, r_y$  - współrzędne jednostkowych wektorów sił naprężenia działających na elementarną część taśmy.

Wielkości  $l_y$  i  $r_y$  charakteryzujące stopień wpływu siły naprężenia na n-tą część taśmy odpowiednio z lewej i prawej strony określane są ze wzorów:

$$l_y = \frac{y_{n+1} - y_n}{\sqrt{(x_{n+1} - x_n)^2 + (y_{n+1} - y_n)^2}} \quad r_y = \frac{y_{n-1} - y_n}{\sqrt{(x_{n+1} - x_n)^2 + (y_{n+1} - y_n)^2}} \quad (7)$$

## VII Lubuska Konferencja Naukowo-Techniczna – i-MITEL 2012

Wzory (3) – (4) wyrażają wzajemne oddziaływanie pomiędzy elementarnymi cząsteczkami taśmy i pozwalają na modelowanie taśmy, jako jednolitego ciała z właściwościami sprężystymi.

Głównym czynnikiem, który wprowadza części taśmy w ruch, jest hydrodynamiczna siła  $F_h$ , która powstaje w rezultacie ruchu mas wodnych z pionową prędkością  $V_w$  o różnej wartości. Taśma przedstawiona jest za pomocą elementarnych powierzchni – odcinków, wówczas wpływ hydrodynamicznych sił na nią należy rozpatrywać oddzielnie na każdą jej część, według znanego prawa hydrodynamiki:

$$F_{hn} = 0,5\rho(V_{wn} - V_{Ln})|V_{wn} - V_{Ln}|c_{Ln}S_{Ln} \quad (8)$$

gdzie,  $F_{hn}$  – hydrodynamiczna siła działająca na n-tą elementarną część taśmy;

$V_{wn}$  – prędkość ruchu mas wodnych w obszarze n-tej elementarnej części taśmy;

$c_{Ln}$  i  $S_{Ln}$  – odpowiednio, hydrodynamiczny współczynnik i charakterystyczna powierzchnia n-tego elementarnej części taśmy.

Jeśli część taśmy znajduje się nad powierzchnią wodną, to będzie na nią działała siła ciężkości  $F_{mn} = m_n g$ , gdzie  $m_n$  – masa elementarnej części taśmy;  $g$  – przyspieszenie ziemskie. Wielkość  $m_n$  można wyznaczyć z wyrażenia,  $m_n = m / N$  gdzie  $N$  - liczba elementów, na które podzielona jest taśma.

Na podstawie przytoczonych zależności otrzymujemy wyrażenie na siłę zewnętrzną  $F_{zn}$ , która działa na elementarną część taśmy:

$$F_{zn} = \begin{cases} F_{hn, przy} & y_n > y_0 \\ F_{mn, przy} & y_n \leq y_0 \end{cases} \quad (9)$$

gdzie,  $y_n$  - rzędna n-tej elementarnej części taśmy,  $y_0$  – współrzędna powierzchni fali w n-tym punkcie (dla  $h = 0$ ).

Wypadkowa sił, które działają na każdą elementarną część taśmy, jest określona wzorem:

$$F_n = F_{mn} + F_{zn} \quad (10)$$

Kinematyczne parametry każdej elementarnej części taśmy można wyznaczyć według wzorów:

$$\left. \begin{aligned} a_n &= \frac{F_n}{m_n} \\ V_{Ln} &= \int a_n dt + V_{Ln0} \\ y_n &= \int V_{Ln} dt + y_{n0} \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

gdzie,  $a_n$  - przyspieszenie elementarnej części taśmy;  $V_{Ln0}$  i  $y_{n0}$  - odpowiednio początkowe wartości prędkości i położenia n-tej elementarnej części taśmy, te wielkości na ogół są równe zero.

Przytoczone powyżej równania opisują ruch mas wodnych przy falowaniu morza i tworzą model matematyczny SEE jako systemu składającego się ze skończonej liczby elementarnych części, na które działają siły zarówno zewnętrzne (hydrodynamiczne) jak i wewnętrzne (naprężenia).

## VII Lubuska Konferencja Naukowo-Techniczna – i-MITEL 2012

### **Model matematyczny podsystemu mechanicznego**

Rozpatrzmy modelowanie wzajemnego oddziaływania SEE z obracającym się roboczym wałem i akumulatorem hydraulicznym MEF. Wał roboczy jest umieszczony prostopadle do ruch fal, dzięki odpowiedniemu ustawieniu pływającej platformy. Jego ruch opisany jest przez równanie:

$$J \frac{d\omega}{dt} = M_L - M_a \quad (12)$$

gdzie,  $J$  - moment bezwładności wału;  $\omega$  - prędkość kątowna wału;  $M_L$  - moment na wale pod wpływem SEE;  $M_a$  - moment hamujący wytworzony przez pompę hydrauliczną. Moment bezwładności  $J$  dla wału przy okrągłym przekroju poprzecznym wynosi

$$J = 0,5\pi^4 \rho_w L_w k_w \quad (13)$$

gdzie,  $r$  - promień wału;  $\rho_w$  - gęstość materiału z którego wykonano wał;  $L_w$  - długość wału;  $k_w$  - współczynnik korygujący, który uwzględnia wpływ tzw. mas wodnych przyłączonych oraz inne osobliwości konstrukcji.

Przy modelowaniu akumulatora hydraulicznego energii stosujemy znaną zależność między energią potencjalną ciała sprężystego  $E_a$ , a miarą jego deformacji  $X_a$  i współczynnikiem sztywności  $k_a$ :

$$E_a = 0,5k_a x_a^2 \quad (14)$$

Tej zależności, z pewnym stopniem dokładności, podlega model akumulatora hydraulicznego. Zatem, wielkość  $M_a$  wyrażamy wzorem:

$$M_a = -k_a \int \alpha dt + M_{a0} \quad (15)$$

gdzie,  $M_{a0}$  - początkowa wartość momentu, wytwarzanego na wale akumulatora hydraulicznego, która zazwyczaj jest równy zeru.

Wielkość  $k_a$  uwzględnia wszystkie konstrukcyjne osobliwości akumulatora hydraulicznego, a w tym i obecność przekładni między nim a wałem. Ponieważ elementarne części SEE wykonują ruch postępowy, a wał – obrotowy, niezbędne jest sprowadzenie ruchu wału do SEE. Z pewnym przybliżeniem można stwierdzić, że przy względnie dużej długości dźwigni i niewielkiej amplitudzie liniowego przemieszczania cząsteczek SEE, prawdziwe są następujące zależności:

$$m_w \frac{dV_w}{dt} = F_L + F_a; \quad m_w = \frac{J}{l^2}; \quad V_w = \omega_w l; \quad F_L = \frac{M_L}{l}; \quad F_a = \frac{M_a}{l}; \quad (16)$$

gdzie,  $m_w$  - zastępcza masa od momentu bezwładności wału na końcu dźwigni;  $V_w$  – zastępcza prędkość liniowa wału obrotowego na końcu dźwigni,  $F_L$  - siła, która powstaje na wale w rezultacie wpływu SEE;  $F_a$  - siła, która powstaje na końcu dźwigni pod wpływem akumulatora hydraulicznego;  $l$  - długość dźwigni (ramienia).

Konstrukcyjnie wał jest przymocowany do ramy MEF poprzez mechanizm zapadkowy i może się obracać tylko w jedną stronę, tj. zawsze spełniony jest warunek

## VII Lubuska Konferencja Naukowo-Techniczna – i-MITEL 2012

$\omega \geq 0$ . Z powodu tego wzajemnego wpływu wału i SEE zależności są skomplikowane i opisuje się je wyrażeniami, zawierającymi poniższe założenia:

- w każdym momencie czasu na wał mogą działać tylko te  $n$ -te części taśmy, których prędkość przekracza prędkość wału:  $V_{Ln} > V_w$ ;
- prędkości elementarnych części taśmy i prędkość wału są wyrównywane zgodnie z prawem zachowania pędu przy niesprężystym zderzeniu ciał:

$$\left. \begin{aligned} V_c &= \frac{m_n}{m_c} \sum V_{Ln} \\ m_c &= m_w + \sum m_n \end{aligned} \right\} \quad (17)$$

gdzie,  $V_c$  - nowa prędkość systemu wzajemnie działających ciał - wału i elementarnych części taśmy biorących udział w ruchu;  $m_c$  - masa biorących udział w ruch ciał.

Wielkość  $F_L$ , jako sumę sił hydrodynamicznych i naprężenia, które działają na każdą część taśmy w ruchu wyraża wzór:

$$F_L = \sum F_n \quad (18)$$

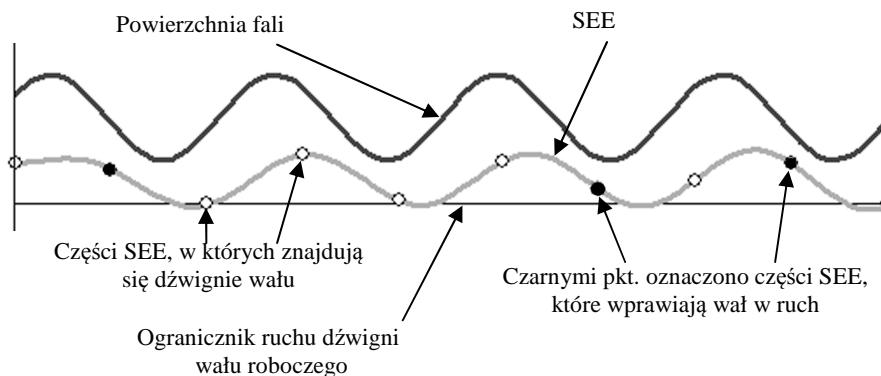
Następnie, znajdujemy przyspieszenie całego systemu:

$$\frac{dV_{Ln}}{dt} = \frac{dV_w}{dt} = \frac{1}{m_c} (F_L + F_a) \quad (19)$$

Wtedy na każdą część taśmy będzie działała siła obciążenia, uwarunkowana wpływem pompy hydraulicznej i akumulatora hydraulicznego:

$$F_{an} = m_n \frac{dV_{Ln}}{dt} - F_{Ln} \quad (20)$$

Podsumowując naszą analizę, możemy przedstawić model matematyczny podsystemu mechanicznego MEF - "Fala - SEE – akumulator hydrauliczny" – który wyrażony jest układem ww. równań (4) ÷ (20).



Rys. 3 Rezultaty symulacji komputerowej podsystemu mechanicznego MEF z SEE

## **VII Lubuska Konferencja Naukowo-Techniczna – i-MITEL 2012**

### **Rezultaty modelowania**

Opracowany model matematyczny był realizowany przez autorów w formie specjalistycznego oprogramowania „WaveEnergy\_v1.0”, przy badaniach studialnych i projektowaniu SAS MEF. Na rys. 3 pokazano fragment modelowania podsystemu mechanicznego MEF, dla amplitudy fali 0,5 m i częstotliwości fali 5 rad/s oraz prędkości fali 2 m/s. Parametry SEE wynoszą: długość - 11,1 m, szerokość - 0,1 m [4]. W przeciągu 60 sekund symulacji komputerowej akumulator hydrauliczny gromadzi energię 338 J.

### **Podsumowanie**

W pracy opisano szczegółowo konstrukcję MEF nowego typu, która wykorzystuje sprężystą taśmę do przekształcenia energii fali w energię mechaniczną oraz sformułowało aktualne zadania w dziedzinie hydromechaniki, elektromechaniki i automatyzacji, rozwiązanie których pozwoli maksymalnie efektywnie przekształcać energię falową w energię elektryczną i przesyłać ją dla odbiorców na brzegu. Uzyskane wyniki modelowania i badań na basenie doświadczalnym pozwalają rekomendować zaproponowany model matematyczny w charakterze pierwotnego narzędzia do badań studialnych przy projektowaniu MEF.

### **P.S.**

Praca została przygotowana w ramach współpracy naukowo-badawczej Narodowego Uniwersytetu Budowy Okrętów w Mikołajewie z Zachodniopomorskim Uniwersytetem Technologicznym w Szczecinie.

### **Literatura:**

1. Renewable Energy. Power for a Sustainable Future., Ed. by G. Boyle, The Open University, Oxford, 1996
2. Brooke J., Wave Energy Conversion, vol.6, Elsevier Science Ltd., Oxford 2003
3. Mazurkiewicz B., Encyklopedia Inżynierii Morskiej, Fundacja Promocji Przemysłu Okrętowego i Gospodarki Wodnej, Gdańsk 2009
4. Наумова В.А., Евстигнеев М.П., Евстигнеев В.П., Любарец Е.П. Ветро-волновые условия Азово-Черноморского побережья Украины. // Наук. праці УкрНДГМІ., Севастополь, 2010., Вип. 259., С. 263-282.
5. Овсянкін В.В. Пристрій для перетворення енергії хвиль водної поверхні. Деклараційний патент України №56481. МКИ<sup>7</sup> F03B13/12. Бюл. №5, 2003 р.
6. Патент України №57968. МПК F03B13/12 (2006.1). Пристрій для перетворення енергії хвиль водної поверхні [Текст] / В. С. Блінцов, Нгуен Тхань Хай, № 57968; заявл.10.08.2010; опубл. 25.03.2011, Бюл. №6.
7. Szymczak P. i inni, Siłownie wiatrowe małej mocy do zasilania stałych znaków nawigacyjnych; Wyd. Politechniki Szczecińskiej; Szczecin 1994, s.289 - 294
8. Szymczak P., Dyskowyje Synchronnyje maszyny s postojannymi magnitami: sowriemiennoje sostoianie i tendenciji razwitia; Elektricziestwo 2009, nr. 8, s. 37-46

**Autorzy:** prof. dr hab. inż. Volodymyr S. Blintsov; Narodowy Uniwersytet Budowy Okrętów w Mikołajewie, e-mail: [blintsov@mksat.net](mailto:blintsov@mksat.net)  
dr inż. Aleksander V. Blintsov; Narodowy Uniwersytet Budowy Okrętów w Mikołajewie, e-mail: [blintsov@mksat.net](mailto:blintsov@mksat.net)  
dr inż. Piotr Szymczak; Katedra Elektroenergetyki i Napędów Elektrycznych Zachodniopomorskiego Uniwersytetu Technologicznego w Szczecinie, e-mail: [piotr.szymczak@zut.edu.pl](mailto:piotr.szymczak@zut.edu.pl)