

# XVI Konferencja Naukowo-Techniczna

# TK12022

## TECHNIKI KOMPUTEROWE W INŻYNIERII

18–21 października 2022

### Modelowanie numeryczne dynamiki łańcucha kotwicznego pływającej turbiny wiatrowej

Paweł Dymarski<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Institut Oceanotechniki i Okrętownictwa, Wydział Inżynierii Mechanicznej i Okrętownictwa, Politechnika Gdańska  
email: pawdymar@pg.edu.pl

**STRESZCZENIE:** W niniejszym artykule przedstawiono metodę obliczania dynamiki łańcucha (ciągna) układu kotwienia pływającej turbiny wiatrowej. Opisany został układ równań różniczkowych będący podstawą symulacji ruchu łańcucha oraz metody numeryczne, które użyto do uzyskania rozwiązania. Opisane prace są częścią projektu, którego celem jest rozwój metod i oprogramowania do analizy numerycznej dynamiki pływających turbin wiatrowych.

**SŁOWA KLUCZOWE:** dynamika łańcucha, układ kotwienia, pływająca turbina wiatrowa, analizy numeryczne, offshore wind energy

#### 1. Wprowadzenie

Morska energetyka wiatrowa to jedna z najbardziej dynamicznie rozwijających się gałęzi przemysłu na Świecie, a zwłaszcza w Europie. Przykładowo w roku 2020 łączna wielkość mocy zainstalowanej morskich elektrowni wiatrowych w Europie wyniosła 2.9 GW. Zainstalowano 356 nowych elektrowni wiatrowych, które zostały podłączone do sieci energetycznych w ramach budowanych dziewięciu farm wiatrowych. Łączna skumulowana moc zainstalowana na morzu, w Europie, wynosiła w roku 2020 25 GW [1].

Większość z instalowanych na morzu elektrowni wiatrowych wykorzystuje konstrukcje wsporcze posadowione, np.: typu *jackiet* zastosowane w elektrowniach farmy Moray East u wybrzeży Szkocji, typu *monopile* zastosowane jako konstrukcje wsporcze farmy Triton Knoll (Anglia) oraz farmy Kriegers Flak (Dania) i lub typu grawitacyjnego. Ograniczeniem konstrukcji wsporczych posadowionych jest głębokość akwenu, która zasadniczo nie przekracza 50 metrów.

W ostatnich latach coraz większym zainteresowaniem cieszą się pływające turbiny wiatrowe (PTW), gdyż mogą być one instalowane na akwenach znacznie głębszych niż 50 metrów. Pierwszą pływającą farmę wiatrową *Hywind Scotland* o mocy zainstalowanej 30 MW oddano do użytku w 2017. Kolejnymi farmami pływającymi są *WindFloat Atlantic* (Portugalia, 2020) oraz *Kincardine* (Szkocja, 2021) o mocach odpowiednio 25 i 50 MW.

#### 2. Układy kotwienia Pływających Turbin Wiatrowych

Wyróżnia się zasadniczo trzy typy układów kotwienia, które stosuje się dla platform pływających [2]:  
a) układ typu *catenary*, w którym wykorzystuje się stalowe liny lub łańcuchy częściowo leżące na dnie,

- b) układ typu *taut*, w którym wykorzystuje się elastyczne ciągną (liny z tworzyw sztucznych),  
c) układ kotwienia pionowego, typu *tension leg*.

Układ kotwienia zastosowany w projektach *Hywind Scotland* oraz *WindFloat Atlantic* to układ typu *catenary* – siła, która przywracająca platformę do położenia początkowego powstaje w skutek działania siły ciężkości na ogniwa łańcucha.

Układ kotwienia typu *catenary* jest stosunkowo trudny do modelowania, gdyż wymaga obliczenia ruchu poszczególnych ogniw łańcucha, przy czym połączenie ogniwo-ogniwo jest połączeniem bardzo sztywnym, co wymaga zastosowania krótkiego kroku czasowego podczas obliczeń.

#### 3. Model numeryczny łańcucha

Łańcuch modelowany jest za pomocą ogniw czyli segmentów o skończonej długości, które oddziałują z segmentami sąsiednimi oraz z otoczeniem. Liczba segmentów nie musi być równa rzeczywistej liczbie ogniw łańcucha, jednak powinno być ich odpowiednio dużo, aby zachować wymaganą dokładność symulacji.

Równanie ruchu łańcucha opisuje druga zasada dynamiki:

$$m_i \mathbf{x}_i = \sum_k \mathbf{F}_{i,k} \quad (1)$$

gdzie:  $m_i$  – masa segmentu łańcucha,  $\mathbf{x}_i$  – położenie środka  $i$ -tego segmentu,  $\mathbf{F}_{i,k}$  – siły działające na  $i$ -ty segment.

Do składników  $\mathbf{F}_{i,k}$  siły całkowitej działającej na ogniwo należą: oddziaływanie ogniwo-ogniwo (opisane prawem Hooke'a); oddziaływanie podłoża (dna morskiego) zdefiniowane jako siła pionowa, działająca do góry i proporcjonalna do głębokości „zatopienia” ogniwa w dnie morskim; opór hydrodynamiczny proporcjonalny do

kwadratu prędkości ogniwa; siły wywołane obecnością tak zwanych mas hydrodynamicznych oraz ciężar ogniwa i siła wyporu.

W ogólności długości segmentów nie muszą być jednakowe, właściwości fizyczne poszczególnych odcinków liny/łańcucha też mogą być różne.

W wyniku zastosowania równania (1) do kolejnych segmentów łańcucha otrzymamy układ równań różniczkowych, który należy rozwiązać w dziedzinie czasu.

Rozwiązanie układu równań wymaga zastosowania jednej z metod numerycznych dedykowanych do rozwiązywania zagadnień niestacjonarnych [3, rozdz. 6]. Obliczenia dynamiki łańcucha były testowane z zastosowaniem metody Rungego-Kutty drugiego rzędu (metoda punktu środkowego) oraz metody R-K czwartego rzędu (schemat całkowania Simpsona).

Proste testy wykazały, że rozwiązania uzyskiwane z użyciem metody R-K czwartego rzędu są bardziej stabilne.

W celu przyspieszenia procesu obliczeniowego zmodyfikowano kod programu w ten sposób, aby wykonywać część obliczeń równoległe. Zrównoleglenie kodu programu zostało przeprowadzone z użyciem biblioteki OpenMP.

#### 4. Opis przypadku testowego. Weryfikacja modelu obliczeniowego

Do testowania opracowanego modelu łańcucha użyto stanowisko pomiarowe do badań dynamiki pływającej turbiny wiatrowej poddanej działaniu fali, rys. 1.

Modelowana pływająca turbina wiatrowa kotwiczona była za pomocą 6-ciu łańcuchów zamocowanych do 3 kotwic. Główne parametry układu kotwienia zostały przedstawione w tab. 1.

Jednym z testów jakie wykonuje się w celu kontroli właściwego przygotowania modelu do badań jest statyczny test układu kotwienia. Próba statyczna układu kotwienia polegała na przykładaniu poziomej siły (statycznej) na wysokości mocowania mooringów do modelu. W pierwszej fazie próby przebieg siły był skokowo narastający w czasie, a następnie skokowo zmniejszał się do zera.



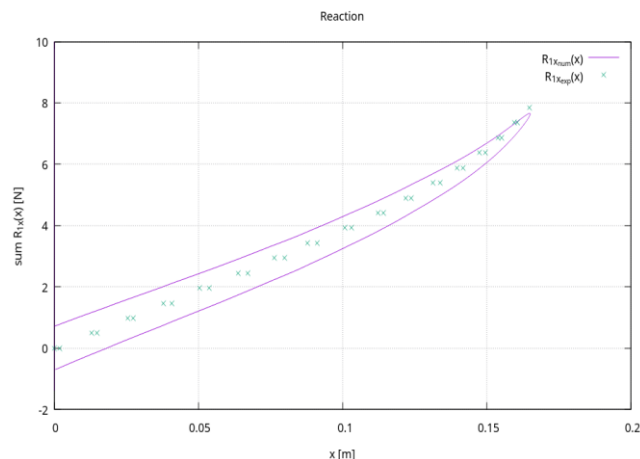
Rys. 1. Stanowisko do badań dynamiki PTW. Basen modelowy w Instytucie Oceanotechniki i Okrętownictwa, WIMiO, PG

Podczas symulacji komputerowej odtworzono podobny scenariusz jak podczas badań na modelu fizycznym, z tą różnicą, że obciążenie narastało i zmniejszało się w sposób ciągły, opisany funkcją  $x=x_A \cdot \sin((2\pi/T) \cdot t)$ , gdzie  $x_A$  jest maksymalnym odchyleniem modelu od położenia „neutralnego”,  $T$  – okres pełnego cyklu,  $t$  – czas.

Tabela 1. Dane układu kotwienia modelu PTW

Liczba łańcuchów	6
Liczba kotwic/punktów zaczepienia	3/3
Długość łańcucha	$L=1,572$ m
Masa jednostkowa łańcucha	$m_{lm}=0,2413$ kg/m
Głębokość punktów zaczepienia (kotwica)	$z_0=-1,290$ m
Głębokość punktu zaczepienia (PTW)	$z_l=-0,625$ m
Promień punktu zaczepienia (kotwica)	$R_0=1,391$ m
Promień punktu zaczepienia (PTW)	$R_l=0,247$ m

Wyniki obliczeń oraz testu na modelu fizycznym, w postaci wykresu przemieszczenie  $x$  vs siła przywracająca  $R_{lx}$ , pokazane zostały na wykresie, rys. 2.



Rys. 2. Wykres (całkowitej) siły przywracającej w funkcji przemieszczenia PTW. Wyniki obliczeń numerycznych i badań na modelu fizycznym

#### 5. Podsumowanie

W artykule przedstawiono model obliczeniowy do symulacji dynamiki łańcucha układu kotwienia pływającej turbiny wiatrowej.

Wykonano obliczenia testowe dla przypadku quasi-statycznego, których wyniki porównano z wynikami testu na modelu fizycznym w basenie modelowym Wydziału Inżynierii Mechanicznej i Okrętownictwa Politechniki Gdańskiej.

#### Literatura

- [1] *Offshore Wind in Europe. Key trends and statistics 2020*. Wind Europe 2021.
- [2] Moo-Hyun Kim, *Spar Platforms: Technology and Analysis Methods*. American Society of Civil Engineers (ASCE), Virginia 2012.
- [3] Ferziger J.H., Perić M., *Computational Methods for Fluid Dynamics*. Springer, Berlin 2002.