

*analiza dynamiczna, rurociągi offshore,
wpływ parametrów falowania morza,
metoda sztywnych elementów skończonych*

Marek SZCZOTKA¹

DYNAMIKA KABLI I RUR INSTALOWANYCH NA DNIE MORZA

Praca jest poświęcona modelowaniu procesu instalacji elementów do transportu zasobów naturalnych (na przykład ropy lub gazu) przy użyciu rurociągów umieszczonych na dnie morza. Model może być również adoptowany do obliczeń dotyczących instalacji kabli (elektrycznych lub komunikacyjnych). Zbudowano model matematyczny urządzenia, którego podstawowymi elementami są jednostka pływająca i opis jej ruchu oraz rurociąg/kabel, których podatność (w wyniku instalacji podlegają dużym odkształceniom) uwzględniono dzięki użyciu metody elementów skończonych. Opracowano autorskie oprogramowanie, które umożliwia przeprowadzanie obliczeń trzema typowymi metodami instalowania rurociągów: bębnową, J-lay oraz S-lay. Zaprezentowano wyniki przykładowych eksperymentów numerycznych wykonanych dla układu stosującego metodę J-lay.

DYNAMICS OF OFFSHORE PIPELINES AND CABLES

The paper deals with modelling of a typical installation process for a subsea infrastructure required in transportation of natural resources (such as oil and gas), by mean of pipelines constructed on the seabed. A model developed can be adopted to analysis of cables (used in power transmission or communication) installations as well. The mathematical model contains two main parts: a vessel, with description of its motion and pipeline/cable model, which flexibility (due to specific installation procedure large deformations develop) has been taken into account by mean of the rigid finite element method. An own simulation software has been developed, which allows an analysis to be performed for three different commonly used methods: the reel method, J-lay and S-lay methods. Example simulation results have been presented, performed for a J-lay system.

1. WSTĘP

Artykuł jest poświęcony pewnym zagadnieniom modelowania dynamiki procesu instalacji rurociągów na dnie morza. Rurociągi są obecnie popularnym środkiem transportu surowców naturalnych (na przykład ropy i gazu) lub innego medium, przesyłanego między jednostkami produkcyjnymi (na przykład platformy) a stacjami odbiorczymi. Są to

¹Akademia Techniczno-Humanistyczna, Wydział Zarządzania i Informatyki; 43-309 Bielsko-Biała, ul. Willowa 2, tel. +48 33 8279 289, e-mail: mszczotka@ath.bielsko.pl

specyficzne układy transportowe, do których konstrukcji stosuje się specjalistyczne jednostki pływające. Statki lub barki wyposaża się w stanowiska spawalnicze, które na pełnym morzu wykonują spawanie odcinków rur, tworząc w ten sposób rurociąg. Kilkudziesięciometrowe odcinki rur, są dostarczane do jednostki układającej przez inne statki dostawcze. Istnieją dwie podstawowe metody instalacji rurociągów: S-lay (stosowana przeważnie w akwenach o małej i średniej głębokości) oraz J-lay (lepsza w przypadku głębokich akwenów). Obie posiadają zalety i wady, wybór konkretnej metody jest uzależniony przede wszystkim od głębokości i średnicy instalowanego rurociągu [1, 2]. Zaletą metody S-lay jest większa wydajność (kilka- kilkanaście kilometrów ułożonego rurociągu w ciągu doby), wadą jest natomiast znaczna siła wymaganego naciągu w trakcie instalacji, zwłaszcza przy większych głębokościach. Z kolei metoda J-lay oferuje większe możliwości pracy na akwenach o głębokości kilku kilometrów, przy niższej wydajności (powodem jest tylko jedno stanowisko spawalnicze). Obie metody wymagają specjalnych konstrukcji prowadzących rurociąg (tak zwany *stinger* w metodzie S-lay oraz regulowana rampa w metodzie J-lay).

W niniejszej pracy rozpatruje się wyłącznie metodę J-lay. Istotną cechą modelowanego układu są: duże ruchy unoszenia jednostki pływającej (platforma pół-zanurzalna), duże ugięcia rurociągu w czasie układania na dnie, zjawiska hydrodynamiczne towarzyszące procesowi instalacji w warunkach falowania. Założono, że ruch platformy jest znany (dostępne są charakterystyki amplitudowo-fazowe). Podatność rurociągu można uwzględnić stosując metody sztywnych (SES) lub odkształcalnych (MES) elementów skończonych. Obie metody prowadzą do podobnych wyników, przy czym we własnym oprogramowaniu komputerowym zastosowano metodę SES (wyniki porównano z MES w programie ANSYS). Modele matematyczne uzupełnia opis falowania i interakcji konstrukcji z środowiskiem wodnym. Dla elementów smukłych (takich jak rurociągi, kable) odpowiedni opis oddziaływania, stosowany w wielu normach międzynarodowych (DNV, API), został zaproponowany w pracy [3] (i zastosowany również w niniejszej publikacji). Rozważano przy tym dwa rodzaje wymuszeń (falowania): regularne, opisane prostą funkcją harmoniczną oraz nieregularne, zbudowane na podstawie znanych rozkładów gęstości falowania. Oba typy wymuszeń generują ruchy unoszenia jednostki oraz siły hydrodynamiczne działające na zanurzoną część instalowanego ciągu transportowego.

W pracy przedstawiono krótko model matematyczny urządzenia oraz zbadano wpływ falowania na dynamikę układu. Zamieszczono przykładowe wyniki obliczeń numerycznych.

2. MODEL MATEMATYCZNY

2.1 Model urządzenia

W modelu matematycznym wyodrębniono następujące elementy:

- jednostkę pływającą, jej ruch określony jest jeśli znane są składowe tworzące wektor \mathbf{q}_S :

$$\mathbf{q}_S(t, x_S, S(\omega), \mathbf{RAO}, \beta) = \left[q_1^{(S)} \quad \dots \quad q_6^{(S)} \right]^T \quad (1)$$

gdzie: $q_i^{(S)}$ - składowa ruchu jednostki względem układu bezwładnościowego $\{0\}$, przy czym $i=1,2,3$ dla ruchów kiwania wzdłużnego poprzecznego i nurzania, $i=6,5,4$ określa kolejno kąty myśkowania, kotysania poprzecznego i wzdłużnego,

x_S - odległość przebyta przez jednostkę od punktu referencyjnego,

$S(\omega)$ - założona funkcja gęstości falowania,

RAO - wektor funkcji przejścia jednostki (charakterystyki amplitudowo-fazowe),

β - orientacja jednostki względem kierunku propagacji fali,

- instalowany ciąg transportowy (rurociąg, kabel), dyskretyzowany metodą sztywnych elementów skończonych, którego współrzędne uogólnione można zapisać w postaci wektora:

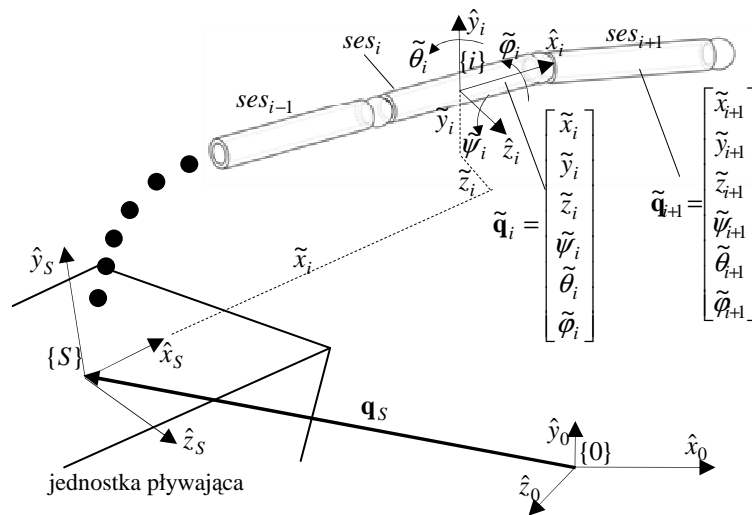
$$\mathbf{q} = [\tilde{\mathbf{q}}_0^T, \dots, \tilde{\mathbf{q}}_{n_{SES}}^T]^T \quad (2)$$

gdzie: $\tilde{\mathbf{q}}_i = [\tilde{x}_i \ \tilde{y}_i \ \tilde{z}_i \ \tilde{\psi}_i \ \tilde{\theta}_i \ \tilde{\phi}_i]^T, i=0, \dots, n_{SES}$,

\dots, n_{SES} - liczba elementów skończonych na który dyskretyzuje się element podatny,

$\tilde{x}_i, \tilde{y}_i, \tilde{z}_i$ - położenie środka masy ses i względem początku układu $\{S\}$ (Rys. 1),

$\tilde{\psi}_i, \tilde{\theta}_i, \tilde{\phi}_i$ - kąty obrotu Eulera ZYX osi układu lokalnego $\{i\}$ względem $\{S\}$.



Rys.1. Współrzędne uogólnione ses i

Na podstawie przyjętej postaci wektora \mathbf{q}_S (znane funkcje czasu, modelu falowania i właściwości jednostki pływającej), nieznane są składowe wektora \mathbf{q} z (2). Dodatkowe nieznane wynikają z nałożenia na pewne elementy rurociągu równań więzów. Wykorzystując fakt, że współrzędne uogólnione każdego z ses są niezależne od współrzędnych uogólnionych innych elementów, z równań dynamiki można wyznaczyć wprost przyspieszenia elementów ses nieskrępowanych więzami:

$$\ddot{\mathbf{q}}_i = \mathbf{A}_i^{-1} \mathbf{Q}_i \text{ dla } i \in \Theta, \quad (3)$$

gdzie: Θ - zbiór numerów ses, na które nie nakłada się więzów,

$\mathbf{A}_i = \text{diag}\{\mathbf{m}_i, \mathbf{b}_i\}$ - macierz mas elementu,

$\mathbf{m}_i = \text{diag}\{m_i, m_i, m_i\}$,

$\mathbf{b}_i = \mathbf{b}_i(\tilde{\psi}_i, \tilde{\theta}_i, \tilde{\phi}_i, J_i^{(X)}, J_i^{(Y)}, J_i^{(Z)})$,

$J_i^{(X)}, J_i^{(Y)}, J_i^{(Z)}$ - główne centralne momenty bezwładności elementu i ,

$\mathbf{Q}_i = \mathbf{Q}_i(\tilde{\mathbf{E}}_i^{(h)}, \tilde{\mathbf{E}}_i^{(d)}, \tilde{\mathbf{E}}_i^{(t)})$ - wektor sił uogólnionych,

$\tilde{\mathbf{E}}_i^{(h)}$ - wektor sił i momentów hydrodynamicznych, $\tilde{\mathbf{E}}_i^{(d)}$ - wektor sił i momentów oddziaływania dna morskiego na rurociąg, $\tilde{\mathbf{E}}_i^{(t)}$ - wektor sił i momentów wywołanych oddziaływaniem konstrukcji statku (na przykład rampy).

Ruch pozostałych (kilku) elementów ses, w których występują więzy, wyznacza się z równań różniczkowych uzupełnionych odpowiednimi równaniami więzów:

$$\begin{aligned} \mathbf{A}_i \ddot{\mathbf{q}}_i - \mathbf{D}_i \mathbf{R}_i &= \mathbf{Q}_i \\ \mathbf{D}_i^T \ddot{\mathbf{q}}_i &= \Lambda(t, \mathbf{q}_S, \tilde{\mathbf{q}}_i, \dot{\tilde{\mathbf{q}}}_i) \end{aligned} \text{ dla } i \notin \Theta \quad (4)$$

gdzie: \mathbf{D}_i - macierz współczynników reakcji więzów,

$\mathbf{R}_i = [R_i^{(X)} \ R_i^{(Y)} \ R_i^{(Z)} \ M_i^{(Z)} \ M_i^{(Y)} \ M_i^{(X)}]^T$,

$\Lambda(t, \mathbf{q}_S, \tilde{\mathbf{q}}_i, \dot{\tilde{\mathbf{q}}}_i)$ - prawa strona równań więzów.

Cechą szczególną równań (3) i (4) jest łatwość implementacji dla obliczeń równoległych na komputerze wieloprocesorowym, ponieważ każde z tych równań można rozwiązać niezależnie.

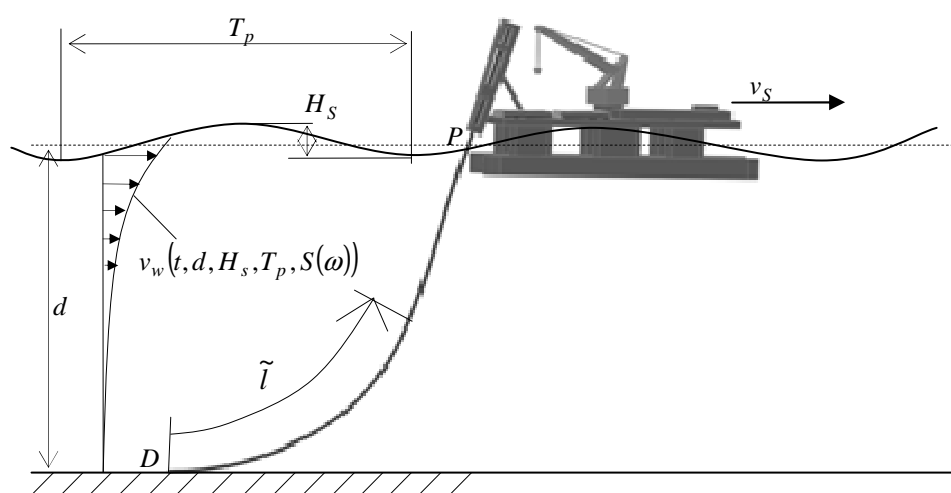
Model matematyczny stosowany w pracy jest modyfikacją metod sztywnych elementów skończonych, których szczegółowy opis można znaleźć w [4].

2.2 Wymuszenia jednostki oraz opis falowania

Projektowanie wszelkiego typu urządzeń związanych z instalacją rurociągów offshore lub innych konstrukcji w warunkach falowania morza, wiąże się z koniecznością obliczania sił działających na jej elementy. Są one wywołane działaniem: wiatru, prądów morskich, a przede wszystkim falowania. Sposób obliczania tych sił stanowi obszerny dział

hydromechaniki. W praktycznych zastosowaniach, zadowalającą dokładność otrzymuje się stosując teorię płynów idealnych (nielepkich), w których przepływy traktuje się jako potencjalne. Na tej podstawie zaproponowano zależności pozwalające w łatwy sposób określić ruch cieczy w dowolnym punkcie analizowanego obszaru, a następnie stosując odpowiednie równania można obliczyć siły działające na elementy instalacji umieszczone w środowisku wodnym [5].

Na Rys. 2 przedstawiono schemat analizowanego w pracy układu. Podstawowe parametry, niezbędne do obliczeń, to: wysokość fali H_S , okres fali T_p oraz głębokość akwenu d .



Rys.2. Schemat układu do instalacji rurociągów metodą J-lay

Ruch jednostki może być opisany za pomocą funkcji harmoniczných:

$$q_i^{(S)} = A_i^{(S)} \sin(\omega t + \varphi_{0,i}^{(S)}), \text{ dla } i = 1, \dots, 6 \quad (5)$$

gdzie: $A_i^{(S)} = \frac{1}{2} H_S \cdot \xi_i^{(S)}$ - amplituda wymuszenia dla współrzędnej i ,

$\xi_i^{(S)} = \xi(\mathbf{RAO}, T_p, H_S)_i$ - współczynnik przenoszenia,

$\omega = \frac{2\pi}{T_p}$ - częstość kołowa,

$\varphi_{0,i}^{(S)} = \varphi_0^{(S)}(\mathbf{RAO}, T_p)_i$ - faza początkowa.

Dobór amplitudy i fazy początkowej w przypadku zakładania wymuszenia typu (5) jest zatem bezpośredni, jeśli dla danej jednostki znane są jej charakterystyki **RAO** oraz

parametry fali: H_S, T_p . W przypadku fali nieregularnej, lepiej oddającej charakter falowania, wartość $q_i^{(S)}$ odpowiada przyjętej funkcji rozkładu gęstości prawdopodobieństwa. W analizach praktycznych często przyjmuje się następującą funkcję (dla parametrów fali spełniających zależność: $3.6 < \frac{T_p}{\sqrt{H_S}} < 5.0$) [6]:

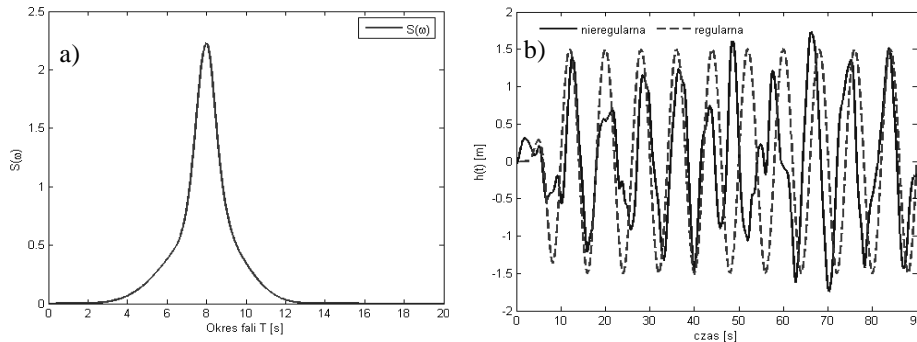
$$S(\omega) = [1 - \ln(\eta)] \frac{5}{16} H_S^2 \omega_p^4 \omega^{-5} \exp\left(-\frac{5}{4} \left(\frac{\omega}{\omega_p}\right)^{-4}\right) \cdot \eta^{\exp\left(-\frac{1}{2} \left(\frac{\omega - \omega_p}{\sigma \omega_p}\right)\right)} \quad (6)$$

gdzie: $\eta = 3.3$ - współczynnik kształtu (przyjęto wartość średnią),

$$\omega_p = \frac{2\pi}{T_p},$$

$\sigma = 0.07$ dla $\omega \leq \omega_p$, $\sigma = 0.09$ dla $\omega > \omega_p$ (przyjęto zgodnie z [7]).

Funkcję (6) przedstawiono na Rys. 3a), natomiast otrzymany profil fali na Rys. 3b).



Rys.3. Przebiegi funkcji opisujących falowanie dla parametrów $H_S = 3m$, $T_p = 8s$

a) funkcja rozkładu gęstości prawdopodobieństwa według (6), b) profil fali $h(t)$

Przebieg falowania z Rys. 3b) uzyskano stosując zależność:

$$h(t) = \sum_{k=0}^N a_k \cos(\omega_k t + \gamma_k) \quad (7)$$

gdzie: $a_k = \sqrt{2\Delta\omega \cdot S(\omega_k)}$,

$$\Delta\omega_k = \omega_k - \omega_{k-1},$$

$\gamma_k \in \langle 0, \dots, 2\pi \rangle$ - pseudolosowy kąt fazowy o rozkładzie równomiernym.

W obu przypadkach fali regularnej i nieregularnej stosuje się zależności dla liniowej teorii falowania (model Airy'ego) [8].

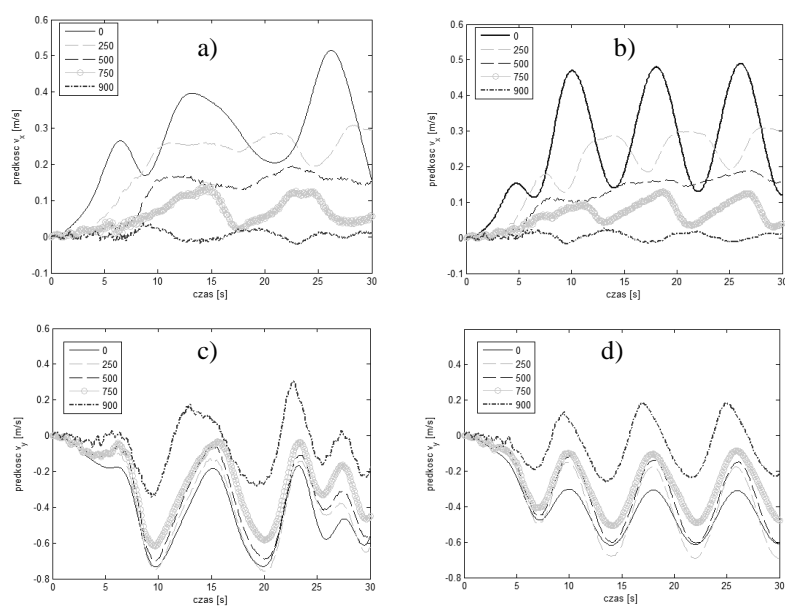
3. PRZYKŁADOWE SYMULACJE NUMERYCZNE

Przykładowe wyniki symulacji numerycznych dotyczą układu J-lay przedstawionego na Rys. 2, gdzie główne parametry zebrano w Tab. 1.

Tab. 1. Podstawowe parametry modelu

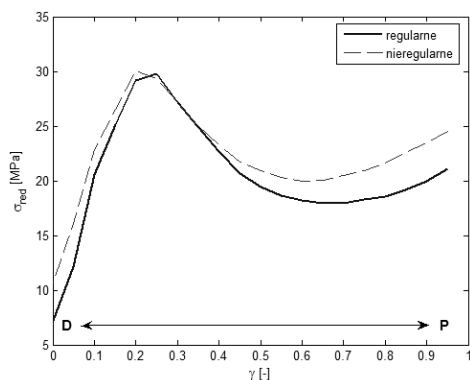
Wielkość	Wartość
Początkowa długość rurociągu	1000 m
Stan morza (wysokość/okres fali)	3 m/8 sec
Głębokość akwenu	600 m
Średnica zewn./wewn. rurociągu	0.13/0.10 m
Prędkość układania	0.5 m/sec

Przebiegi prędkości wybranych punktów rurociągu określonych parametrem \tilde{l} (Rys. 2) przedstawiono na Rys. 4.



Rys.4. Składowe prędkości wybranych punktów rurociągu: a)wzdłużna (nieregularne), b) wzdłużna (regularne), c) pionowa (nieregularna), d) pionowa (regularna)

Typowy przebieg naprężeń zredukowanych przedstawiono na Rys. 5. Maksymalne naprężenia występują w strefie kontaktu rurociągu z dnem (*touchdown zone*), natomiast wraz ze zbliżaniem się do punktu P, istotną rolę zaczynają odgrywać naprężenia normalne.



Rys.5. Naprężenia zredukowane w materiale wzdłuż osi rurociągu (od punktu D zamocowanego w dnie do punktu P w prowadnicy rampy)

3. WNIOSKI

Modelowanie dynamiki procesów instalacji rurociągów i innego rodzaju infrastruktury w warunkach offshore, wymaga uwzględnienia oddziaływania sił środowiskowych. Sposób ich modelowania może być różny: od prostego wymuszenia harmonicznego, po bardziej złożone opisy falowania, uwzględniające jego losowość. Jak przedstawiono na przykładowych wykresach, przyjęty typ wymuszenia (regularne, pseudolosowe) jest przyczyną różnic uzyskiwanych sił i naprężeń (poza różniącymi się w czasie trajektoriami elementów konstrukcji). W praktyce przyjęcie konserwatywnych współczynników projektowych i wymuszenia regularnego jest często stosowaną, ogólnie przyjętą metodą. Jednak bardziej szczegółowy model wymuszenia dla danego akwenu, pozwala przyjmować niższe współczynniki, a więc konstrukcja może być tańsza i bardziej optymalna.

4. BIBLIOGRAFIA

- [1] Bai Y., Bai Q.: *Subsea pipelines and risers*, Elsevier 2005.
- [2] Palmer A.C., King R.A.: *Subsea pipeline engineering*, 2nd ed., PennWell Corp. 2008.
- [3] Morison J.R. i in.: *The force exerted by surface waves on piles*, Petroleum Transactions, 189, str. 149-154, 1950.
- [4] Wittbrodt E., Adamiec-Wójcik I., Wojciech S.: *Dynamics of flexible multibody systems. The rigid finite element method*. Berlin, Springer, 2006.
- [5] Chakrabarti S.K.: *Handbook of offshore engineering*, Elsevier, 2005.
- [6] Hasselmann K. i in.: *Measurements of wind-wave growth and swell decay during the Joint North Sea Wave Project (JONSWAP)*, Deutsch. Hydrogr. Z., Suppl. A8, 12, 1973.
- [7] DNV-RP-C25: *Environmental conditions and environmental loads*, 2007.
- [8] Craik A.D.D.: *The origins of water wave theory*, Annu. Rev. Fluid Mech., 36, str. 1-28, 2004.