

Marek Szczotka
Akademia Techniczno-Humanistyczna, Bielsko-Biała

INSTALACJA ELEMENTÓW INFRASTRUKTURY OFFSHORE Z DEDYKOWANYM UKŁADEM MPHS

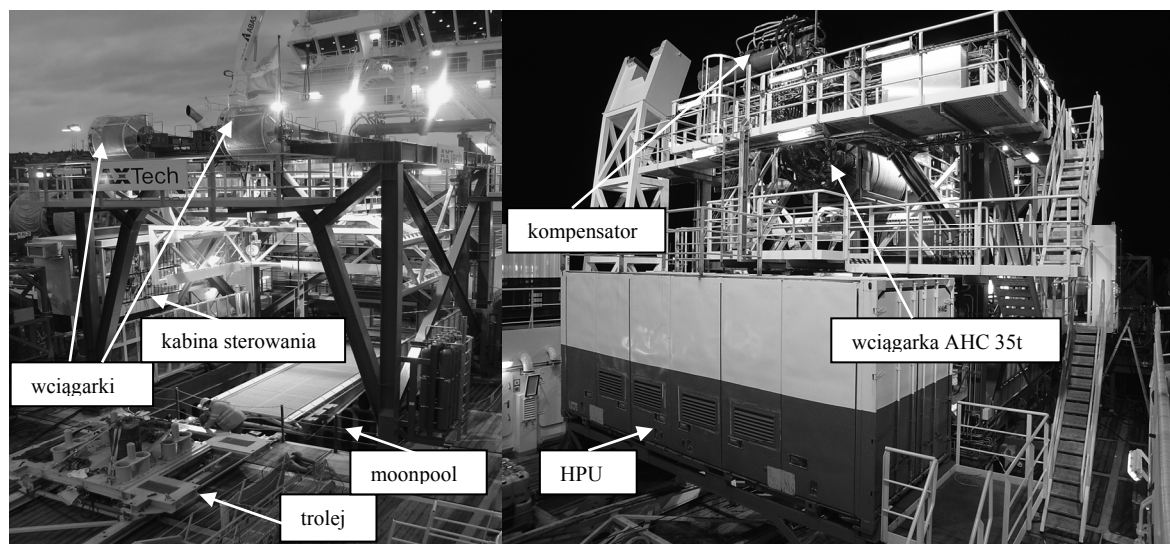
Streszczenie: W pracy przedstawiono model układu przeznaczonego do instalacji offshore modułów niezbędnych do transportowania ropy i gazu z odwiertów w dnie morskim. System jest montowany na specjalnych jednostkach pływających, wyposażonych w układy dynamicznego pozycjonowania. Jednym z istotniejszych elementów układu jest system AHC (*Active Heave Compensation*), który kompensuje ruchy statku spowodowane falowaniem. Zastosowano uproszczony układ pneumatyczno-hydrauliczny, wraz z odpowiednimi algorytmami sterowania pracą wciągarek. Ładunek jest opuszczany na dno za pomocą wciągarki z kompensacją. Zamodelowano również dodatkowe liny prowadzące ładunek. Przedstawiono wyniki przykładowych obliczeń numerycznych, dla układu pracującego w zadanych warunkach, przy włączonym oraz wyłączonym układzie prowadzenia modułu w trakcie instalacji.

Słowa kluczowe: *Multi-Purpose Handling System* (MPHS), urządzenia offshore

1. WSTĘP

Systemy dźwignicowe stosowane w pracach przeładunkowych charakteryzowały się do niedawna manualną obsługą. Wiele zależało od doświadczenia i staranności operatora maszyny. W minionej dekadzie nastąpił znaczny postęp w dziedzinie automatyzacji urządzeń przeładunkowych (żurawi, suwnic, itp.). Jest on szczególnie widoczny w żurawiach i innym sprzęcie stosowanym w warunkach offshore. Rozwiązania techniczne stosowane w przemyśle są bardzo różnorodne. Do najbardziej efektywnych maszyn należą tu niewątpliwie żurawie offshore, które mają liczne zalety. Jednak z reguły ich cena jest bardzo wysoka i nie zawsze tego typu urządzenie jest najodpowiedniejsze do pewnych prac. Często stosuje się A-ramy, wieże do obsługi dedykowanych modułów, czy systemy wciągarek z rozwiązaniami wspomagającymi linę nośną. W artykule przedstawiono system do opuszczania i podnoszenia modułów używanych przy eksploatacji morskich rurociągów na polach naftowych i gazowych.

Analizowany w pracy model systemu MPHS (*Multi-Purpose Handling System*) jest wyposażony w układ AHC (*Active Heave Compensation*) oraz wciągarki pomocnicze stosowane do prowadzenia ładunku. Zdjęcia na Rys. 1 przedstawiają opisywane urządzenie.



Rys.1. a) MPHS, widok od przodu, b) HPU i wciągarka AHC (projekt: AXTech AS)

Struktura nośna stanowi rodzaj wieży, na której zamocowano wciągarki dla lin prowadzących, główną wciągarkę, kabinę sterowniczą oraz wiele innych komponentów. Całość jest montowana na statkach stosowanych w pracach instalacyjnych i obsłudze wydobywania, przy czym do stosowania omawianego systemu niezbędny jest specjalny kanał w kadłubie statku (*moon pool*). Wykonanie podobnej operacji za pomocą klasycznego żurawia offshore, przy opuszczaniu ładunku poza burtą statku, wymagałoby kilkukrotnie większego zapasu udźwigu, ze względu na dużą dynamikę przy założonych, dopuszczalnych warunkach falowania. Moduły są transportowane po pokładzie statku z hangaru do wieży, wykorzystując troleje i system szyn. Przedstawiony układ jest przeznaczony do opuszczania modułów o masie do 35t, wymiarach 6.5m x 6.5m x 8m, na głębokość do 1500m. Maksymalna zdolność kompensacji falowania zostaje osiągnięta przy wysokości fal 5.0m. Całkowita masa własna urządzenia dochodzi do 120t.

2. MODEL MATEMATYCZNY

W modelu matematycznym przyjęto następujące założenia:

- ruch statku w wyniku oddziaływania falowania traktuje się jako znany,
- nie uwzględnia się podatności struktury nośnej wieży,
- napęd wciągarek lin prowadzących zapewnia względnie stały naciąg lin,

- wciągarka główna posiada hybrydowy układ napędowy (hydro-pneumatyczny),
- uwzględnia się podatność lin prowadzących oraz podatność głównej liny nośnej,
- ładunek traktuje się jako bryłę sztywną o sześciu stopniach swobody.

Ruch statku, na którym zamontowane jest urządzenie, jest określony zależnością:

$$\mathbf{q}_D = \mathbf{f}(t, H_s, T_z, \mathbf{RAO}) \quad (1)$$

gdzie: H_s, T_z

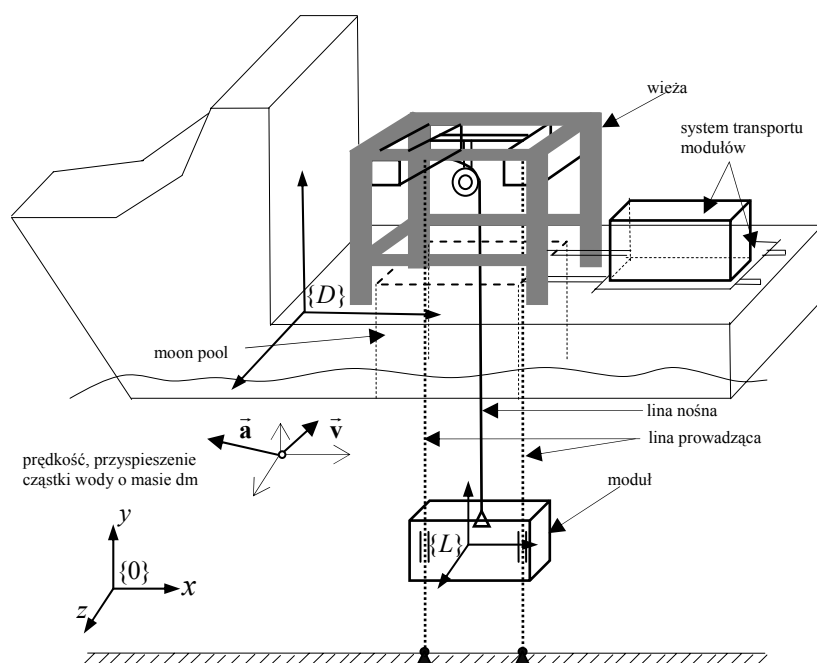
– wysokość i okres fali,

$\mathbf{q}_D = [x_D \ y_D \ z_D \ \psi_D \ \theta_D \ \varphi_D]^T$ – współrzędne określające ruch statku,

$x_D = x_D(t), \dots, \varphi_D = \varphi_D(t)$,

RAO

– funkcje przejścia statku.



Rys.2. Schemat układu

Schemat układu przedstawiono na Rys. 2. Liny prowadzące ładunek dyskretyzowano metodą sztywnych elementów skończonych [3]. Pojedynczy sztywny element skończony $ses_i^{(l)}$ jest opisany przez współrzędne uogólnione:

$$\tilde{\mathbf{q}}_i^{(l)} = [x_i^{(l)} \ y_i^{(l)} \ z_i^{(l)} \ \psi_i^{(l)} \ \theta_i^{(l)} \ \varphi_i^{(l)}]^T \quad (2)$$

gdzie: $x_i^{(l)}, y_i^{(l)}, z_i^{(l)}$ - przemieszczenia elementu i w układzie $\{D\}$,

$\psi_i^{(l)}, \theta_i^{(l)}, \varphi_i^{(l)}$ - kąty obrotu Eulera elementu względem układu $\{D\}$,

l - numer liny prowadzącej ładunek (w pracy zakładano $l = 1, 2$).

Macierze transformacji jednorodnych są zdefiniowane zgodnie z konwencją kątów Eulera, w sposób podany w [1]. Transformacji współrzędnych z układu lokalnego, związanego ze sztywnym elementem skończonym $ses_i^{(l)}$, dokonuje się stosując przekształcenie jednorodne:

$$\mathbf{r}_0 = \mathbf{T}_D(\mathbf{q}_D(t)) \cdot \mathbf{T}_i^{(l)}(\tilde{\mathbf{q}}_i^{(l)}) \cdot \mathbf{r}_{i,loc}^{(l)} = \mathbf{B}_i^{(l)} \cdot \mathbf{r}_{i,loc}^{(l)} \quad (3)$$

gdzie: $\mathbf{r}_0 = [x_0 \ y_0 \ z_0 \ 1]^T$ - wektor współrzędnych w układzie bezwładnościowym,
 $\mathbf{r}_{i,loc}^{(l)} = [x_{i,loc}^{(l)} \ y_{i,loc}^{(l)} \ z_{i,loc}^{(l)} \ 1]^T$ - wektor współrzędnych w układzie lokalnym,
 $\mathbf{T}_D(\mathbf{q}_D(t))$ - macierz transformacji współrzędnych z układu statku $\{D\}$ do układu $\{0\}$,
 $\mathbf{T}_i^{(l)}(\tilde{\mathbf{q}}_i^{(l)})$ - macierz transformacji z układu lokalnego $ses_i^{(l)}$ do układu statku $\{D\}$.

Równania ruchu liny prowadzącej l wyprowadzono z równań Lagrange'a II rodzaju:

$$\varepsilon_k^{(l)} + \frac{\partial V}{\partial q_k^{(l)}} + \frac{\partial D}{\partial \dot{q}_k^{(l)}} = Q_k^{(l)} \quad (4)$$

gdzie: $\varepsilon_k^{(l)} = \frac{d}{dt} \frac{\partial T}{\partial \dot{q}_k^{(l)}} - \frac{\partial T}{\partial q_k^{(l)}}$ - operator Lagrange'a,
 E, V - energia kinetyczna i potencjalna,
 D - funkcja dyssypacji energii,
 $Q_k^{(l)}$ - niepotencjalna siła uogólniona,
 $k = 0, \dots, n_l$, - n_l jest liczbą elementów skończonych.

Równania ruchu elementu $ses_k^{(l)}$ można zapisać w postaci:

$$\mathbf{A}_k^{(l)} \cdot \ddot{\mathbf{q}}_k^{(l)} = \mathbf{F}(t, \tilde{\mathbf{q}}_k^{(l)}, \dot{\tilde{\mathbf{q}}}_k^{(l)}, \tilde{\mathbf{q}}_{k-1}^{(l)}, \tilde{\mathbf{q}}_{k+1}^{(l)}, \mathbf{q}_D) \quad (5)$$

gdzie: $\mathbf{A}_k^{(l)} = \begin{bmatrix} \mathbf{M}_k^{(l)} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \overline{\mathbf{A}}_k^{(l)} \end{bmatrix}$ - macierz mas,
 $\mathbf{M}_k^{(l)} = \text{diag}\{m_k^{(l)}, m_k^{(l)}, m_k^{(l)}\}$ - podmacierz 3x3 o stałych elementach,
 $m_k^{(l)}, I_{x,k}^{(l)}, I_{y,k}^{(l)}, I_{z,k}^{(l)}$ - masa i momenty bezwładności $ses_k^{(l)}$,
 $\overline{\mathbf{A}}_k^{(l)} = \overline{\mathbf{A}}_k^{(l)}(\psi_k^{(l)}, \theta_k^{(l)}, \varphi_k^{(l)})$ - podmacierz 3x3 o zmiennych (zależnych od $\psi_k^{(l)}, \theta_k^{(l)}, \varphi_k^{(l)}$),
 $\mathbf{F}_k^{(l)}$ - wektor prawych stron zawierający składowe od sił uogólnionych, ruchu unoszenia, sił ciężkości, itp.

Warunki pracy urządzenia określają, że element $ses_{n_l}^{(l)}$ jest zamocowany na dnie morza. W modelu realizuje się to poprzez uwzględnienie równania:

$$\mathbf{r}_{n_l,0}^{(l)} = \mathbf{B}_{n_l}^{(l)} \cdot \mathbf{r}_{n_l,loc}^{(l)} \equiv const . \quad (6)$$

Równanie (6) reprezentuje połączenie kuliste, łączące $ses_{n_l}^{(l)}$ z dnem w punkcie o współrzędnych lokalnych określonych w $\mathbf{r}_{n_l,loc}^{(l)}$.

Element $ses_0^{(l)}$ jest obciążony siłą w linii prowadzącej. Ruch bębna wciągarki prowadzącej określony jest współrzędną uogólnioną $\varphi_{GW}^{(l)}$, którą wyznacza się z równania:

$$I_{GW}^{(l)} \varphi_{GW}^{(l)} = T_{const}^{(l)} - F_l^{(l)} r_{GW}^{(l)} \quad (7)$$

gdzie: $I_{GW}^{(l)}$ - masowy moment bezwładności bębna wciągarki,
 $T_{const}^{(l)}$ - stały moment napędowy,
 $r_{GW}^{(l)}$ - promień podziałowy,
 $F_l^{(l)}$ - siła w linii l .

Zakłada się, iż ładunek jest bryłą sztywną o sześciu stopniach swobody. Jego ruch jest określony w układzie bezwładnościowym przez równania ruchu wyprowadzone również z równań Lagrange'a II rodzaju:

$$\mathbf{A}_L \ddot{\mathbf{q}}_L = \mathbf{F}_L(t, \mathbf{q}_L, \dot{\mathbf{q}}_L) \quad (8)$$

gdzie: $\mathbf{A}_L = (a_{k,j}^{(L)})_{k,j=1,\dots,6}$, $a_{k,j}^{(L)} = tr \left\{ \mathbf{B}_k^{(L)} \mathbf{H}^{(L)} \mathbf{B}_j^{(L)T} \right\}$,

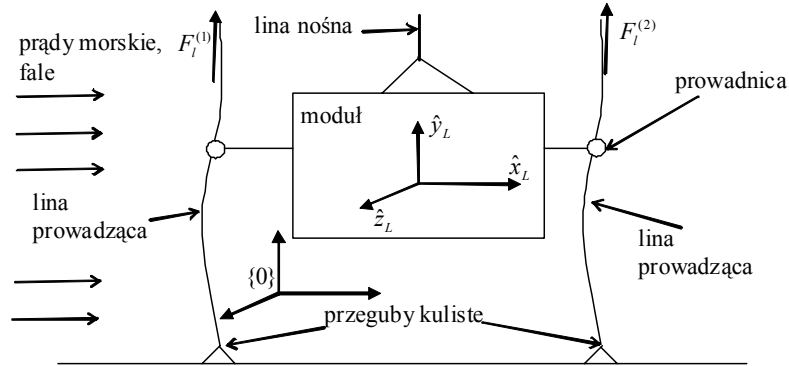
$\mathbf{H}^{(L)}$ jest macierzą pseudo-masową,

$\mathbf{q}_L = [x_L \ y_L \ z_L \ \psi_L \ \theta_L \ \varphi_L]^T$,

$\mathbf{B}_k^{(L)} = \frac{\partial \mathbf{B}^{(L)}}{\partial q_k^{(L)}}$, $\mathbf{B}^{(L)}$ - macierz transformacji z $\{L\}$ do $\{0\}$,

\mathbf{F}_L - wektor prawych stron równań ruchu.

Ładunek opuszczany jest za pomocą liny głównej. Aby ograniczyć wpływ prądów morskich, stosuje się prowadzenie ładunku z wykorzystaniem dodatkowych lin, Rys. 3.



Rys.3. Ładunek (moduł) opuszczany przy wykorzystaniu lin prowadzących

W celu określenia sił działających na ładunek oraz linię l , założono, że przewodnice posiadają sztywność i tłumienie w kierunkach osi \hat{x}_L oraz \hat{z}_L . Obliczając współrzędne początku i końca $ses_i^{(l)}$ będącego w kontakcie z przewodnicą:

$$\mathbf{r}_{a,i}^{(l)} = \mathbf{B}_i^{(l)} \mathbf{r}_{i,a,loc}^{(l)} = [x_a \quad y_a \quad z_a \quad 1]^T \quad (9.1)$$

$$\mathbf{r}_{b,i}^{(l)} = \mathbf{B}_i^{(l)} \mathbf{r}_{i,b,loc}^{(l)} = [x_b \quad y_b \quad z_b \quad 1]^T \quad (9.2)$$

gdzie: $\mathbf{r}_{i,a,loc}^{(l)} = [-l_i^{(l)}/2 \quad 0 \quad 0 \quad 1]^T$, $\mathbf{r}_{i,b,loc}^{(l)} = [l_i^{(l)}/2 \quad 0 \quad 0 \quad 1]^T$,

oraz zakładając współrzędną $y_{L,0}$ określoną przez:

$$y_{L,0} = \mathbf{\Lambda} \cdot \mathbf{B}^{(L)} \mathbf{r}_k^{(L)} \quad (10)$$

gdzie: $\mathbf{\Lambda} = [0 \quad 1 \quad 0 \quad 0]$,

$\mathbf{r}_k^{(L)}$ - wektor współrzędnych przewodnicy w układzie $\{L\}$,

$k = 1, \dots, n_p^{(L)}$, $n_p^{(L)}$ - liczba przewodnic,

można wyznaczyć siły wynikające z odkształceń przewodnicy z zależności:

$$F_{c,x,k}^{(l)} = c_{k,z}^{(l)} (x_{L,0} - x_c^{(l)}) \quad (11.1)$$

$$F_{c,z,k}^{(l)} = c_{k,z}^{(l)} (z_{L,0} - z_c^{(l)}) \quad (11.2)$$

gdzie: $x_c^{(l)} = m(x_b - x_a) + x_a$, $z_c^{(l)} = m(z_b - z_a) + z_a$, $m = \frac{y_{L,0} - y_a}{y_b - y_a}$,

$x_{L,0}, z_{L,0}$ - współrzędne otrzymane z zależności (10) zakładając odpowiedni

operator zwięzający $\mathbf{\Lambda}$,

$c_{k,x}^{(l)}, c_{k,z}^{(l)}$ - współczynniki sztywności.

W pracy założono, iż siły hydrodynamiczne mogą być opisane zgodnie z równaniem Morisona [2]. Założenie to jest słuszne zarówno dla lin jak i samego ładunku, jeśli wymiar charakterystyczny jest co najmniej pięciokrotnie mniejszy od długości fal.

Równania ruchu całego układu, wraz z równaniami wieżów, zapisano w formie układu równań różniczkowych:

$$\begin{aligned} \mathbf{A}\ddot{\mathbf{q}} - \mathbf{D}\dot{\mathbf{R}} &= \mathbf{H}(t, \mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) \\ \mathbf{D}^T \ddot{\mathbf{q}} &= \mathbf{G}(t, \mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) \end{aligned} \quad (12)$$

gdzie: $\mathbf{A} = \text{diag}\{\mathbf{A}^{(1)}, \mathbf{A}^{(2)}, I_{GW}^{(1)}, I_{GW}^{(2)}, \mathbf{A}_L\}$, $\mathbf{A}^{(l)} = \text{diag}\{\tilde{\mathbf{A}}_0^{(l)}, \dots, \tilde{\mathbf{A}}_{n_l}^{(l)}\}$,

$\mathbf{q} = [\mathbf{q}^{(1)T} \quad \mathbf{q}^{(2)T} \quad \varphi_{GW}^{(1)} \quad \varphi_{GW}^{(2)} \quad \mathbf{q}_L^T]^T$ - wektor współrzędnych uogólnionych,

$\mathbf{q}^{(l)} = [\tilde{\mathbf{q}}_0^{(l)T} \quad \dots \quad \tilde{\mathbf{q}}_{n_l}^{(l)T}]^T$,

\mathbf{H} - wektor prawych stron równań ruchu,

$\mathbf{R} = [R_x^{(1)} \quad R_y^{(1)} \quad R_z^{(1)} \quad R_x^{(2)} \quad R_y^{(2)} \quad R_z^{(2)}]^T$ - wektor nieznanych reakcji wieżów,

\mathbf{D}, \mathbf{G} - macierze współczynników równań wieżów.

Równania (12) całkowano metodą Rungego-Kutty IV rzędu ze stałym krokiem całkowania. Warunki początkowe zagadnienia dynamiki wyznaczano metodą Newtona rozwiązując układ równań nieliniowych w zadaniu statyki.

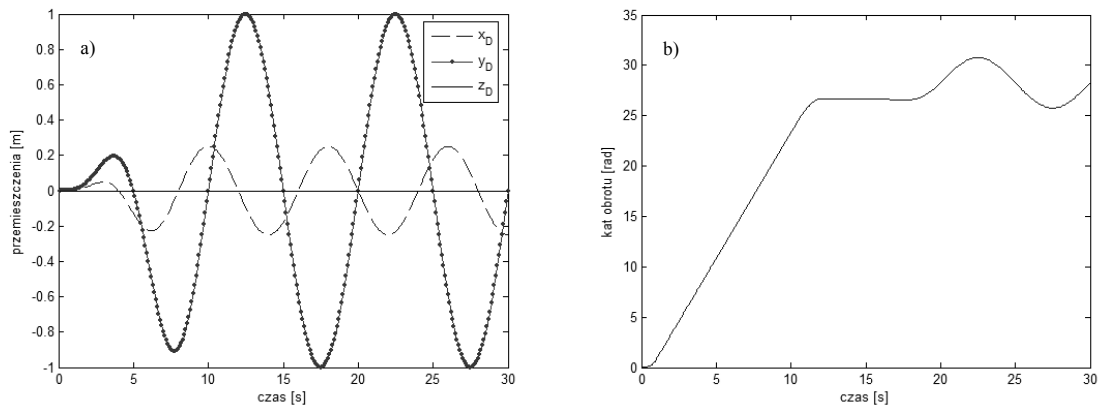
3. PRZYKŁADOWE SYMULACJE NUMERYCZNE

Model matematyczny układu został zaimplementowany w środowisku Microsoft Visual C++. Podstawowe dane przyjęte w obliczeniach zawarto w Tabeli 1. Ruch statku oraz kąt obrotu bębna głównej wciągarki przedstawiono na Rys. 4. Wciągarka opuszcza ładunek ze stałą prędkością 30m/min, a następnie kompensuje ruch jednostki wynikający z falowania.

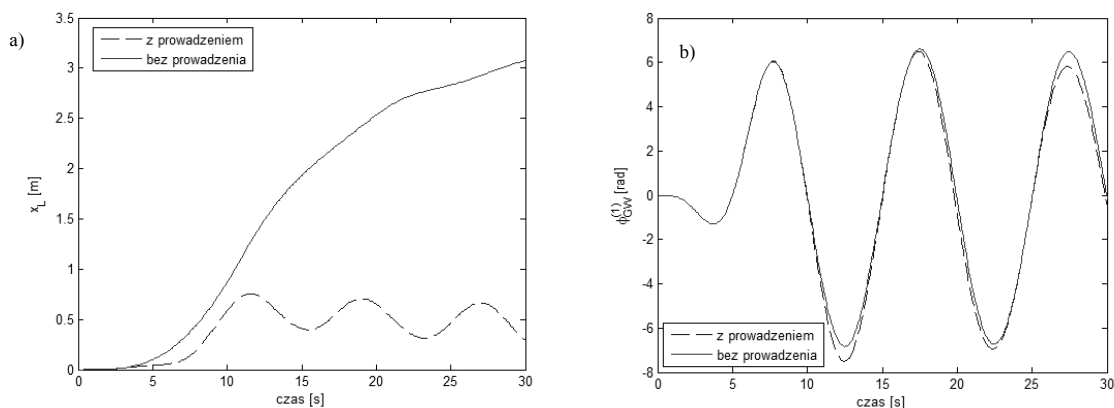
Tablica 1.

Parametry przyjęte w obliczeniach

Parametr	Wartość	Parametr	Wartość
masa ładunku m_L	10000kg	naciąg lin $F_{l,nom}^{(l)}$, $l = 1,2$	10kN
głębokość d	220m	plyw morza v_c	$0.5 \frac{m}{s}$
wysokość fali H_s	1.75m	okres fali T_z	9 s
wsp. oporu ładunku $C_{D,L}$	2.2	wsp. oporu liny $C_{D,l}$	1.4



Rys.4. a) Wymuszenia ruchu statku, b) Kąt obrotu bębna wciągarki opuszczającej ładunek



Rys.5. a) Współrzędna X ładunku, b) Kąt obrotu wciągarki prowadzącej linię nr 1

Na Rys. 5 a) przedstawiono współrzędną X ładunku w przypadku stosowania lin prowadzących w trakcie opuszczania. Znacząca wartość prędkości prądu morskiego sprawia, iż bez zastosowania tego rozwiązania, ładunek byłby znacznie przesunięty w stosunku do położenia statku. Wartość przemieszczenia poprzecznego X ładunku maleje wraz ze zbliżaniem się do dna. Kąt obrotu bębna wciągarki prowadzącej linię przedstawiono na Rys. 5 b). Założona wartość momentu napędowego skutkuje odchyleniem ładunku o około 0.5m, gdy znajduje się on w połowie głębokości.

4. PODSUMOWANIE

Przedstawiony model urządzenia do transportu modułów z pokładu jednostki na dno morza służył wyznaczeniu sił działających na poszczególne komponenty układu. Rzeczywisty obiekt został wykonany i zainstalowany na jednym ze statków świadczących usługi dla firm wydobywczych. Systemy te stosuje się w instalacji i obsłudze infrastruktury do wydobycia oraz transportu ropy i gazu oraz w wielu instalacjach

pomocniczych. Ma on szczególne zastosowanie w rejonach gdzie występują silne prądy morskie.

Odrębnym zagadnieniem jest kwestia układów napędowych w omawianym systemie. Są one złożonymi układami elektryczno-hydro-pneumatycznymi, umożliwiającymi automatyzację instalacji modułów. Opis tych układów, ze względu na ograniczony rozmiar pracy, został pominięty.

Bibliografia

1. Craig J. J.: Wprowadzenie do robotyki, WNT, Warszawa 1995.
2. Morison J.R., O'Brien M.P., Johnson J.W., Schaaf S.A.: The force exerted by surface waves on piles, Petroleum Transactions, 1950, Vol. 189, 149-154.
3. Wittbrodt E., Adamiec-Wójcik I., Wojciech S.: Dynamics of flexible multibody systems. The rigid finite element method. Springer, 2006.

Podziękowania

Autor składa podziękowania firmie AXTech AS z siedzibą w Molde, Norwegia, projektantowi oraz wykonawcy urządzeń offshore, za udostępnienie zdjęć oraz danych do obliczeń.

Pracę zrealizowano częściowo w ramach projektu N N502 464934, finansowanego ze środków Ministerstwa Nauki i Szkolnictwa Wyższego.

INSTALLATION OF SUBSEA MODULES WITH A DEDICATED MHPS

Abstract: A multi-purpose module handling system (MPHS) is presented in the paper. It is assembled on a special offshore construction vessel, performing various services related to subsea installations. Modules lowered towards the seabed are positioned precisely thanks to application of guide wires and an AHC (Active Heave Compensation) system. The MPHS is especially useful tool in the case of strong sea currents, when the module has to be lowered directly into a spot in seabed. A mathematical model of the system is shortly presented as well as some simulation results. The influence of guide wires is demonstrated, by comparing the load location during a subsea lift.

Keywords: subsea installation, module handling system, offshore equipment