

MACZYŃSKI Andrzej¹
WOJCIECH Stanisław²

MODELOWANIE PRZEŁADUNKOWYCH URZĄDZEŃ OFFSHORE

W praktyce inżynierskiej, w zależności od przeznaczenia, stosowane są bardzo różne konstrukcje żurawi offshore. Żurawie offshore są urządzeniami przeładunkowymi instalowanymi na jednostkach pływających i platformach wydobywczych. Najistotniejszą cechą różniącą je od ich lądowych odpowiedników są znaczne ruchy bazy wywołane falowaniem morza. W niniejszym artykule przedstawione zostaną przykłady modelowania różnych typów żurawi offshore. Omówione zostaną metody modelowania ruchu bazy oraz podatności wybranych elementów konstrukcyjnych. Zaprezentowane zostaną wyniki symulacji numerycznych.

MODELING HANDLING OFFSHORE FACILITIES

In engineering practice, depending on destination, very different structures of offshore cranes are used. Offshore cranes are handling equipment installed on vessels and oil platforms. The most important feature of these structures in comparison with their overland counterparts are significant movements of their base induced by sea waving. In this article the examples of modelling of different type of offshore cranes are presented. The methods of the modelling of base movement and the flexibility of selected subsystems are discussed. Examples of numerical simulation results are also presented.

1. WSTĘP

Wraz ze wzrostem znaczenia eksploatacji podwodnych złóż surowców naturalnych rośnie zapotrzebowanie na prace przeładunkowe i montażowe wykonywane z pokładu jednostek pływających. Stosowane do wykonywania tych prac urządzenia transportu bliskiego nazywane są żurawiami offshore. Są one montowane na platformach wiertniczych oraz wydobywczych, jak również na jednostkach pływających. W zależności od przeznaczenia posiadają różnorodne konstrukcje. Mogą być wyposażone w wysięgnik teleskopowy bądź stały, kratownicowy bądź skrzynkowy. Zmiana wysięgu może być

¹Akademia Techniczno-Humanistyczna, Wydział Zarządzania i Informatyki; 43-309 Bielsko-Biała; ul. Willowa 2.
Tel: +48 33 82-79-289, E-mail: amaczynski@ath.eu

²Akademia Techniczno-Humanistyczna, Wydział Zarządzania i Informatyki; 43-309 Bielsko-Biała; ul. Willowa 2.
Tel: +48 33 82-79-289, E-mail: swojciech@ath.eu

realizowana przez linowy lub hydrauliczny układ zmiany wysięgu. Niektóre posadowione są na specjalnych, kilkudziesięciometrowych kolumnach. Stosowane są także żurawie w postaci suwnicy czy tak zwanej A-ramy. Wszystkie należą do grupy przeładunkowych urządzeń offshore. Najistotniejszą różnicą w stosunku do urządzeń lądowych są znaczne ruchy bazy żurawi offshore wywołane falowaniem morza. Ruchy te wywierają istotny wpływ na dynamikę urządzenia, komplikując zagadnienie ich sterowania.

Pracownicy Katedry Transportu i Informatyki od szeregu lat zajmują się modelowaniem dynamiki i sterowaniem urządzeń offshore. Oprócz ruchów bazy, często uwzględniają w modelach podatność wybranych elementów konstrukcji żurawi (wysięgnika, kolumny, konstrukcji nośnej A-ramy itp.) i inne istotne cechy układu (np. luzy). Celem sterowania jest zwykle stabilizacja położenia ładunku. W dalszej części artykułu omówiono sposoby modelowania ruchów bazy i uwzględniania podatności członów. Przedstawiono przykładowe modele i programy opracowane w ostatnich latach w Katedrze, dotyczące między innymi: żurawia wysięgnikowego, A-ramy, suwnicy oraz żurawia posadowionego na kolumnie. Zaprezentowano przykładowe wyniki symulacji numerycznych.

2. STOSOWANE METODY MODELOWANIA

Opis geometrii układu przeprowadzono najczęściej z użyciem współrzędnych złączowych i transformacji jednorodnych [2]. Metoda ta pozwala w łatwy sposób transformować współrzędne z jednego układu współrzędnych (np. $\{p+1\}$) do drugiego (np. $\{p\}$). Dodatkową jej zaletą jest zwartość wzorów na transformację współrzędnych, bowiem:

$${}^p \mathbf{r} = {}^p \mathbf{T} {}^{p+1} \mathbf{r}, \quad (1)$$

gdzie: ${}^p \mathbf{r}, {}^{p+1} \mathbf{r}$ – odpowiednio, wektory pozycji punktu w układzie $\{p\}$ i $\{p+1\}$,
 ${}^p \mathbf{T}$ – macierz przekształcenia jednorodnego z układu $\{p+1\}$ do układu $\{p\}$,
 uwzględniająca zarówno ich wzajemne przesunięcie jak i obrót.

W większości przypadków do wyprowadzenia równań ruchu stosowano równania Lagrange'a II rodzaju w postaci:

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial E}{\partial \dot{\mathbf{q}}} - \frac{\partial E}{\partial \mathbf{q}} + \frac{\partial V}{\partial \mathbf{q}} + \frac{\partial D}{\partial \dot{\mathbf{q}}} = \mathbf{Q}, \quad (2)$$

gdzie: $\mathbf{q} = [q_1 \ \dots \ q_k \ \dots \ q_n]^T$ – wektor współrzędnych uogólnionych,

E – energia kinetyczna,

V – energia potencjalna,

D – funkcja dysypacji energii,

\mathbf{Q} – wektor niepotencjalnych sił uogólnionych,

n – liczba współrzędnych uogólnionych (stopni swobody układu).

Otrzymany układ nieliniowych równań różniczkowych rozwiązywano metodą Rungego-Kutty 4 rzędu ze stałym krokiem całkowania lub metodą Newmarka.

2.1 Modelowanie ruchu bazy

W literaturze spotkać można wiele sposobów opisu ruchu statku lub platformy. Ich przegląd zamieszczono w [7]. Niektóre z nich są bardzo złożone i przeznaczone głównie do obliczeń związanych z budową jednostki pływającej oraz analizą jej ruchu. W przypadku formułowania modeli żurawi offshore zwykle zakłada się stosunkowo proste wymuszenia od falowania morza w postaci przebiegów harmonicznnych [3], [4]. W pracach pracowników Katedry najczęściej zakładano wymuszenie pseudoharmoniczne w postaci:

$$\alpha_i = \sum_{j=1}^{n_i} A_{i,j} \sin(\omega_{i,j}t + \varphi_{i,j}), \tag{3}$$

gdzie: i – indeks współrzędnej (dla bryły sztywnej $i = 1, \dots, 6$), w dalszych rozważaniach przyjmuje się, że indeksy 1,2,3 oznaczają odpowiednio przesunięcie wzdłuż osi X, Y, Z, natomiast indeksy 4,5,6 to odpowiednio obroty wokół tych osi,

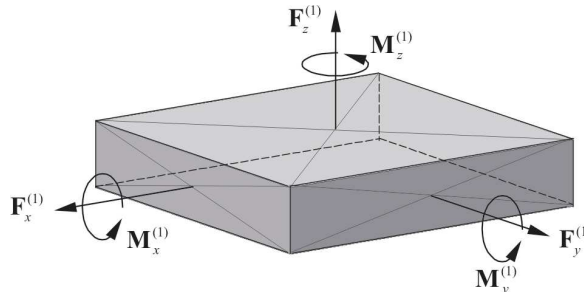
$A_{i,j}, \omega_{i,j}, \varphi_{i,j}$ – j -ta amplituda, częstość kołowa oraz kąt fazowy ruchu bazy żurawia dla funkcji α_i ,

n_i – liczba wyrazów szeregu funkcji α_i .

Jednym ze sposobów uwzględnienia ruchu bazy żurawia jest zapisanie macierzy przekształcenia jednorodnego z układu bazy żurawia $\{A\}$ do układu bezwładnościowego $\{0\}$ w postaci:

$${}^0_A\mathbf{T}(t) = \begin{bmatrix} c\alpha_6 c\alpha_5 & c\alpha_6 s\alpha_5 s\alpha_4 - s\alpha_6 c\alpha_4 & c\alpha_6 s\alpha_5 c\alpha_4 + s\alpha_6 s\alpha_4 & \alpha_1 \\ s\alpha_6 c\alpha_5 & s\alpha_6 s\alpha_5 s\alpha_4 + c\alpha_6 c\alpha_4 & s\alpha_6 s\alpha_5 c\alpha_4 - c\alpha_6 s\alpha_4 & \alpha_2 \\ -s\alpha_5 & c\alpha_5 s\alpha_4 & c\alpha_5 c\alpha_4 & \alpha_3 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \tag{4}$$

gdzie: $c\alpha_i = \cos \alpha_i, s\alpha_i = \sin \alpha_i$.

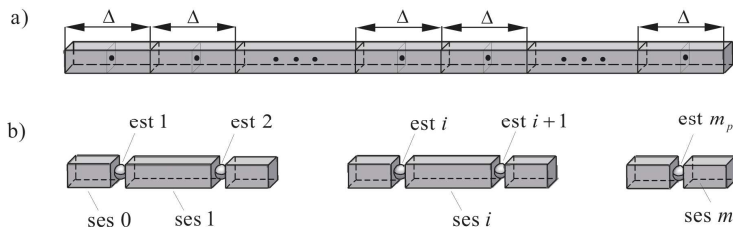


Rys.1. Siły zewnętrzne i momenty sił zewnętrznych działających na podstawę żurawia

W niektórych modelach, w celu zwiększenia jednolitości opisu, stosowano inny sposób modelowania ruchu bazy, polegający na wprowadzeniu do układu sił i momentów sił (rys. 1) działających na podstawę żurawia, zapewniających jej ruch zgodny z równaniami (3). Takie postępowanie pozwala przyjąć, że $\alpha_i = q_{0,i}$ ($q_{0,i}$ – współrzędne uogólnione bazy), co znacznie upraszcza wzory opisujące dynamikę kolejnych członów żurawia. Równocześnie powoduje jednak zwiększenie rozmiarów zagadnienia o 6 równań.

2.2 Uwzględnienie podatności wybranych elementów konstrukcyjnych

W pewnych analizach ważne jest uwzględnienie podatności wybranych elementów konstrukcyjnych żurawia, w szczególności wysięgnika, kolumny itp. Powszednie stosowane metody uwzględniania podatności członu polegają na jego dyskretyzacji. W Katedrze od kilkunastu lat rozwijana jest polska metoda – metoda sztywnych elementów skończonych. W przypadku belki o stałym przekroju postępowanie w tej metodzie jest następujące: w pierwszym etapie (podział pierwotny), belka o długości L_p dzielona jest na m_p odcinków o takiej samej długości Δ (rys. 2a). W połowie długości każdego elementu umieszczane są elementy sprężysto-tłumiące (est) przejmujące cechy podatne poszczególnych elementów. W ten sposób otrzymuje się podział wtórny członu podatnego na m_p+1 sztywnych elementów skończonych (ses), połączonych poprzez m_p bezmasowych i bezwymiarowych elementów sprężysto-tłumiących (rys. 2b). Sposób definiowania energii kinetycznej i potencjalnej tak modelowanego układu przedstawiono dokładnie w [2] oraz [14].



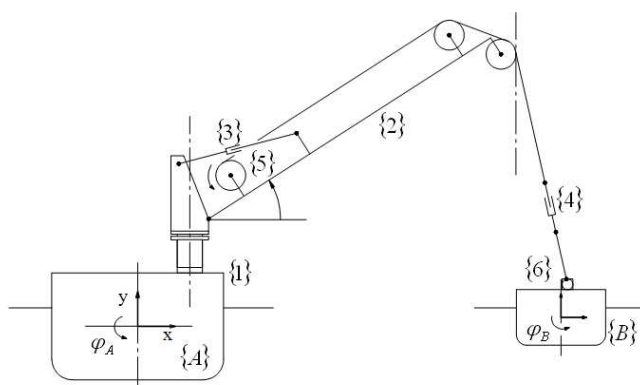
Rys.2. Podział członu podatnego: a) podział pierwotny, b) podział wtórny

Warto zaznaczyć, że oprócz wspomnianych elementów, w większości modeli jako podatną traktuje się także linię nośną (ewentualnie linię zmiany wysięgu), przy czym współczynnik sztywności bywa niekiedy funkcją długości linii. Modelowana jest ona jako element bezmasowy.

3. PRZYKŁADOWE MODELE

W ciągu ostatnich lat w Katedrze powstało wiele modeli różnych offshore'owych urządzeń przeładunkowych. W niniejszym rozdziale przedstawiono niektóre z nich.

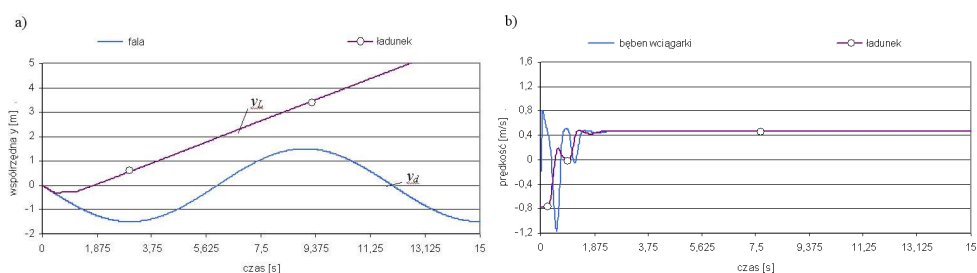
3.1 Modelowanie żurawia offshore podnoszącego ładunek ze statku dostawczego



Rys.3. Płaski model żurawia offshore

Jednym z najbardziej newralgicznych etapów operacji przeładunkowych realizowanych w warunkach falowania morskiego jest moment podnoszenia ładunku z pokładu jednostki dostawczej. Przedstawiony poniżej model (rys. 3), opisany dokładnie w [8], składa się z: statku bazy {A}, kolumny żurawia {1}, wysięgnika {2}, hydraulicznego siłownika zmiany wysięgu {3}, shock absorbera {4}, wciągarki z układem linowym {5}, ładunku {6} oraz statku dostawczego {B}. Jest to model płaski, w którym uwzględniono podatność liny, podatność giętną i skrętną wysięgnika oraz wzdłużną siłownika zmiany wysięgu i shock absorbera.

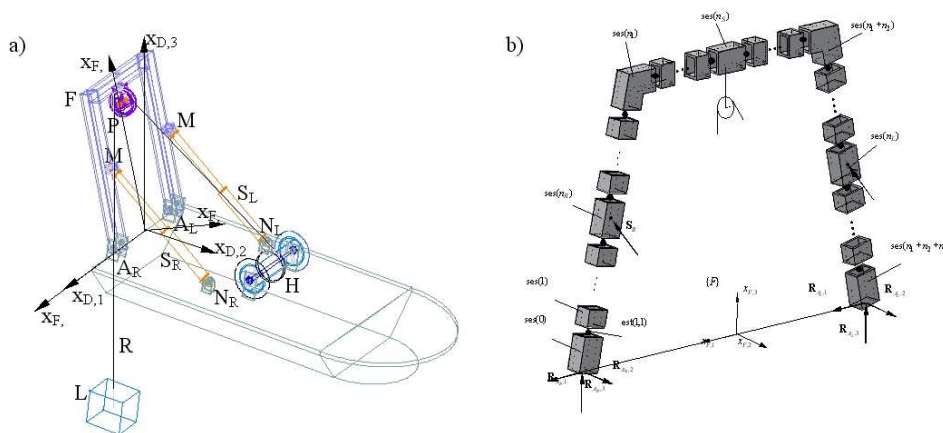
W trakcie podnoszenia ładunku z jednostki dostawczej w warunkach falowania może dochodzić do niekorzystnego zjawiska podbijania ładunku przez pokład. Prezentowany model pozwolił na przeprowadzenie analiz w tym zakresie. Przykład otrzymanych wyników przedstawiono na rys. 4.



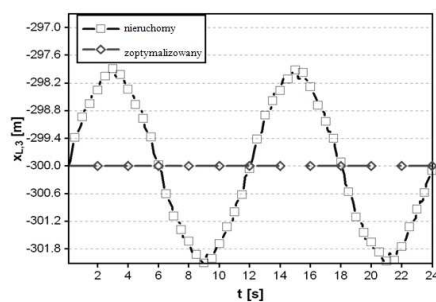
Rys.4. Przykład podrywania ładunku a) współrzędna y ładunku i profil fali b) prędkość ładunku i bębna wciągarki

3.2 Model A-ramy

A-rama, to żuraw o konstrukcji spotykanej w zasadzie wyłącznie w technice offshorowej. Montowany jest zazwyczaj na rufie jednostki pływającej. Służy do prac przeładunkowych, montażowych, badawczych oraz opuszczania i podnoszenia podwodnych pojazdów. Na rys. 5a przedstawiono schemat modelu A-ramy, a na rys. 5b podział konstrukcji nośnej na elementy skończone. Opracowane w Katedrze modele i programy były stosowane we wstępnej fazie projektowania przez norweską firmę AKTRO AS, a obecnie firmę PROTEA z Gdańska.



Rys.5 Schemat modelu A-ramy i podział konstrukcji nośnej na sztywne elementy skończone



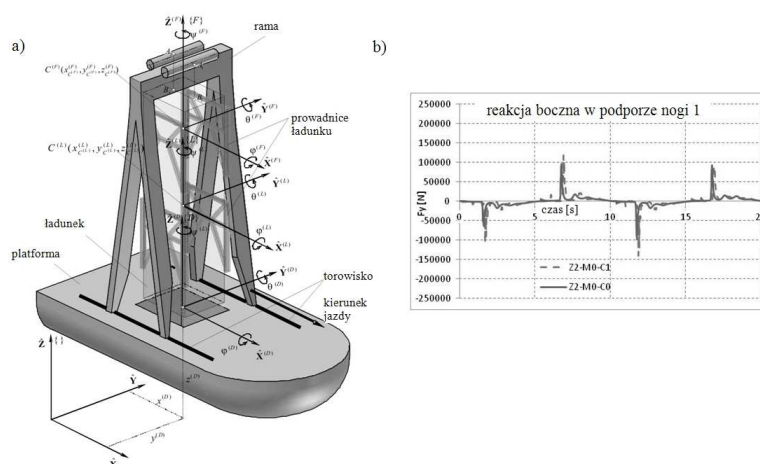
Rys.6 Przebieg czasowy współrzędnej pionowej ładunku przy falowaniu morza oraz nieruchomym i obracającym się ruchem zoptymalizowanym bębnie wciągarki

W tym przestrzennym modelu także uwzględniono podatność liny. W pracy [1] przedstawiono dwa modele różniące się sposobem dyskretyzacji konstrukcji nośnej. W pierwszym modelowano ją za pomocą trzech prostoliniowych belek, w drugim (rys. 5b) jako jedną, zakrzywioną belkę. Jednym z analizowanych zagadnień była stabilizacja

wysokości zawieszenia ładunku (współrzędnej pionowej). Wpływ falowania morskiego był kompensowany poprzez zoptymalizowany ruch obrotowy bębna wciągarki. Przykładowe wyniki zaprezentowano na wykresie z rys. 6.

3.3 Model suwnicy BOP

W artykule [13] przedstawiono model suwnicy służącej do transportu zespołu zaworów czopujących odwiet w dnie morskim, montowanej na platformach wiertniczych. Zespół ten oznaczany jest skrótem BOP (BlowOut Prewentor). Schemat modelu przedstawiono na rys. 7a. Z uwagi na bardzo sztywną konstrukcję pominięto podatność ramy. Uwzględniono natomiast podatność liny oraz podatności i luzy w układzie prowadnic ładunku oraz w układzie podparcia suwnicy. Dane geometryczno-masowe przyjęto bazując na parametrach technicznych suwnicy produkowanej przez firmę PROTEA.



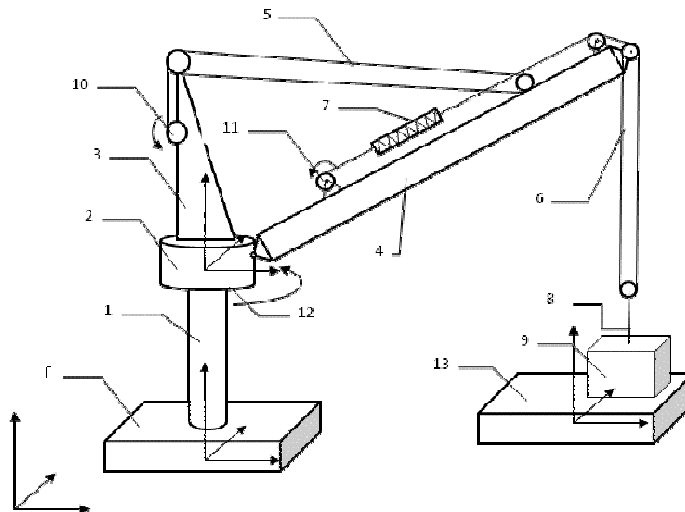
Rys.7 Model suwnicy do transportu zespołu zaworów BOP oraz przykładowe wyniki obliczeń

Jednym z rozważanych zagadaniem była dynamika układu jazdy suwnicy z uwzględnieniem występujących luzów w układzie koło-szyna. Przykładowy wykres przebiegu czasowego reakcji bocznej zamieszczono na rys. 7b.

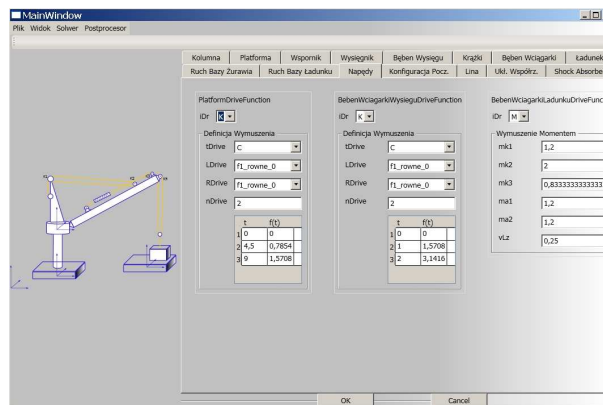
3.3 Żuraw posadowiony na kolumnie

Często stosowanym rozwiązaniem w technice offshore jest posadawianie żurawi na specjalnych kolumnach. Ich wysokość dochodzić może do kilkudziesięciu metrów, a średnica wynosi kilka metrów. Schemat modelu takiego żurawia przedstawiono na rys. 8. W modelu istnieje możliwość uwzględnienia podatności kolumny (1), wspornika (3) oraz wysięgnika (4). Do dyskretyzacji tych podukładów zastosowano metodę sztywnych elementów skończonych. Układy linowe zmiany wysięgu (5) oraz podnoszenia (6) są

traktowane jako elementy bezmasowe o własnościach sprężysto-tłumiących. Założono nieliniową charakterystykę shock absorbera (7), która może być dość dowolnie definiowana przez użytkownika. Na rys. 9 przedstawiono przykładowy ekran z interfejsu, który ułatwia wprowadzanie danych i wstępną analizę wyników.



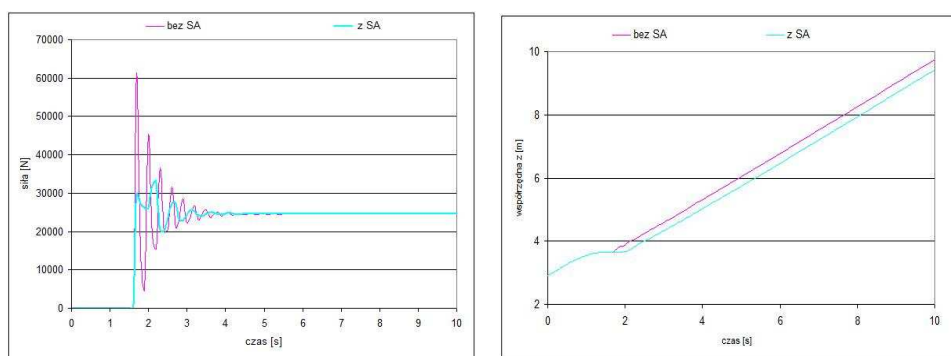
Rys.8 Model żurawia offshore posadowiony na kolumnie



Rys.9 Interfejs użytkownika

Opracowany model umożliwia wszechstronną analizę dynamiczną pracy żurawia w różnych warunkach. Niezależnie definiowane są ruchy bazy żurawia i statku dostawczego. Ładunek może być ponoszony z powietrza lub z pokładu statku dostawczego. Możliwe jest także symulowanie zjawiska przymarznięcia ładunku do pokładu. Opracowano procedurę optymalizacyjną związaną z doбором najkorzystniejszej charakterystyki shock absorbera.

Na rys. 10 przedstawiono wykresy obrazujące wpływ zastosowania shock absorbera na siłę w linie nośnej i współrzędną z ładunku. Ładunek był podnoszony z ruchomego pokładu statku dostawczego, przy nieruchomej bazie żurawia.



Rys.10 Przebieg czasowy siły w linie nośnej i współrzędna z ładunku w przypadku pracy żurawia bez i z shock absorberem

4. PODSUMOWANIE

Jak widać z tego krótkiego przeglądu, pracownicy Katedry Transportu i Informatyki ATH mają znaczne doświadczenie w modelowaniu przeładunkowych urządzeń offshore. Oprócz wspomnianych modeli zaproponowano także zastosowanie specjalnego układu pomocniczego, montowanego na końcu wysięgnika i prowadzącego na pewnym odcinku linę nośną [7]. Układ ten, w połączeniu z napędem bębna wciągarki, umożliwia utrzymanie żądanej pozycji ładunku we wszystkich trzech kierunkach, pomimo występowania ruchów bazy żurawia. Modele urządzeń stosowanych do układania podwodnych kabli i rurociągów zostały zamieszczone w [11]. W Katedrze powstało także szereg prac związanych z lądowymi urządzeniami transportu bliskiego, w szczególności z samojezdnymi żurawiami teleskopowymi. Niektóre z modeli znalazły zastosowanie w praktyce przemysłowej.

Tematyka związana z modelowaniem i sterowaniem urządzeniami transportu bliskiego, w szczególności offshore, była w ostatnim czasie obecna w 2 rozprawach habilitacyjnych [7], [11] oraz 3 pracach doktorskich [5], [6], [12] pracowników Katedry. Ukazały się także 2 monografie [2], [14], w tym jedna zagraniczna [14]. Realizowano ponadto dwa projekty badawcze [9], [10] nawiązujące do wspomnianych zagadnień.

5. BIBLIOGRAFIA

- [1] Adamiec-Wójcik I., Fałat P., Maczyński A., Wojciech S.: Load stabilisation an A-frame - a type of an offshore crane, *The Archive of Mechanical Engineering*, Vol. 56, nr 1, 2009, 37-59
- [2] Adamiec-Wójcik, I., Maczyński A., Wojciech, S.: *Zastosowanie metody przekształceń jednorodnych w modelowaniu dynamiki urządzeń offshore*, Warszawa, WKŁ 2008

- [3] Balachandran, B., Li, Y. Y., Fang, CC.: A mechanical filter concept for control of non-linear crane-load oscillations, *Journal of Sound & Vibrations*, 228, 1999, 651-682
- [4] Das, S. N., Das, S. K.: Mathematical model for coupled roll and yaw motions of a floating body in regular waves under resonant and non-resonant conditions, *Applied Mathematical Modelling*, 29, 2005, 19-34
- [5] Fałat P.: *Analiza dynamiczna żurawia okrętowego typu A-rama*, Praca doktorska, Bielsko-Biała 2004
- [6] Maczyński A.: *Dynamika żurawia samojezdnego w aspekcie sterowania jego napędami*, Praca doktorska, Bielsko-Biała 2000
- [7] Maczyński A.: *Pozycjonowanie i stabilizacja położenia ładunku żurawii wysięgnikowych*, Wydawnictwo ATH, Seria Rozprawy Naukowe, Nr 14, Bielsko-Biała 2005
- [8] Osiński M., Maczyński A., Wojciech S.: The influence of ship's motion in regular wave on dynamics of an offshore crane, *The Archive of Mechanical Engineering*, Vol. 51, No. 2, 2004, 131-163
- [9] Projekt badawczy nr 4 T07A 049 28 pt. *Implementacja komputerowa metody współrzędnych złączowych i przekształceń jednorodnych do modelowania układów wieloczłonowych*, realizowany od 18.04.2005 do 17.10.2007, kierownik Adamiec-Wójcik I.
- [10] Projekt badawczy nr N N502 464934 pt. *Rozwój metody sztywnych elementów skończonych i jej zastosowanie w projektowaniu urządzeń offshore*, realizowany od 15.05.2008 do 31.10.2011, kierownik Wittbrodt E.
- [11] Szczotka M.: *Metoda sztywnych elementów skończonych w modelowaniu nieliniowych układów w technice morskiej*, Rozprawa habilitacyjna, Wydawnictwo Politechniki Gdańskiej, Gdańsk 2011
- [12] Urbaś A.: *Analiza dynamiczna i sterowanie maszynami roboczymi posadowionymi podatnie*, Rozprawa doktorska, Bielsko-Biała 2010
- [13] Urbaś A., Szczotka M., Maczyński A.: Analysis of movement of the bop crane under sea weaving conditions, *Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 48, 3, 2010, 677-701
- [14] Wittbrodt E., Adamiec-Wójcik I, Wojciech S.: *Dynamics of flexible multibody systems. Rigid finite element method*, Berlin–Heidelberg–New York, Springer 2006

Praca powstała w ramach projektu badawczego nr N N502 464934 pt. *Rozwój metody sztywnych elementów skończonych i jej zastosowanie w projektowaniu urządzeń offshore*