

HERDZIK Jerzy

ZMIANA POŁOŻENIA ŚRODKA CIĘŻKOŚCI STATKU A POPRAWNOŚĆ DZIAŁANIA SYSTEMÓW DYNAMICZNEGO POZYCJONOWANIA

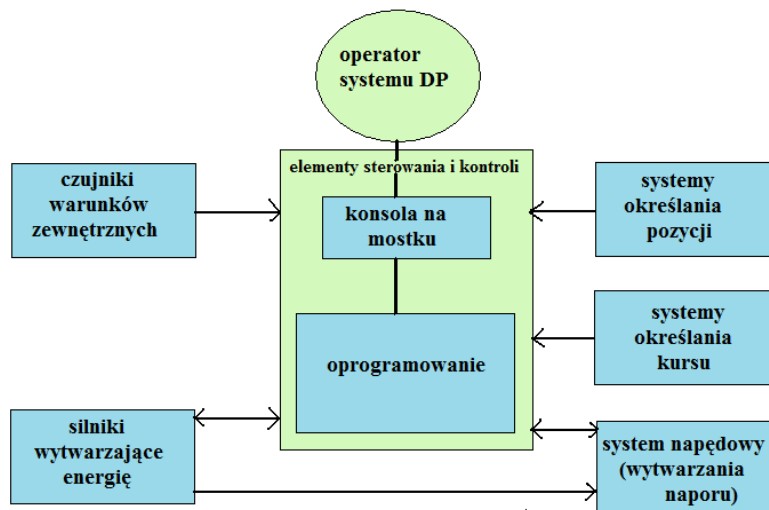
Streszczenie

Położenie środka ciężkości statku zmienia się podczas jego eksploatacji. Spowodowane jest to wieloma czynnikami m.in. zmianą ilości paliwa na statku, wody sanitarnej, wody zęzowej itd. Minimalne i maksymalne stany zapasów są uwzględniane przy obliczeniach statecznościowych statku. Dla statków typu dźwigi pływające, rurowce, obsługa nurków itp. zachodzi istotna zmiana rozkładu masy na statku podczas pracy. Przy wyznaczaniu wektora naporu kompensującego zmianę położenia statku w systemach dynamicznego pozycjonowania istotne są współrzędne położenia pędników oraz środka ciężkości statku (najczęściej przyjmuje się w tym punkcie środek układu współrzędnych). Zmiana położenia środka ciężkości powoduje, że wytworzony sygnał sterujący jest nie do końca poprawny, w stosunku do teoretycznego sygnału, który mógłby być wytworzony, gdyby „na bieżąco” uwzględniano tą zmianę. Błąd sygnału jest jednak nieduży. Można przyjąć, że efekt końcowy jest podobny, jakby źle oszacowano siłę oddziaływania warunków zewnętrznych. Pozwala to korektę tego sygnału w kolejnej pętli i ostatecznie na zachowanie przez statek wymaganej dokładności pozycjonowania. Pomiary i wprowadzanie na bieżąco do systemu DP aktualnego położenia środka ciężkości statku może zwiększyć dokładność sygnału sterującego, a w rezultacie zachować dokładność pozycjonowania, na ewentualność gorszych warunków zewnętrznych lub stanów niesprawności systemów DP. W referacie zwrócono uwagę na ten problem.

WSTĘP

Systemy dynamicznego pozycjonowania statków są już standardowym wyposażeniem na rynku usług offshorowych. Pozwalają one uzyskać wymaganą klasę dynamicznego pozycjonowania, która ma zapewnić bezpieczeństwo przewidzianych prac na statku lub obsługi innych jednostek. Odpowiednie wyposażenie statku, którego podstawowe elementy pokazano na rys.1, pozwala na spełnienie wymagań dokładności pozycjonowania i/lub kursu do określonych maksymalnych (najgorszych) warunków zewnętrznych, przy odpowiedniej sprawności systemu [4,5,8].

W systemach DP możliwe jest wypracowanie sygnału sterującego do pędników, aby wypadkowy wektor wytworzonych naporów przez pędniki i momentu wypadkowego pozwolił na kompensację sił i momentów zewnętrznych oddziaływujących na kadłub. Dzięki temu możliwe będzie utrzymanie przez statek określonej pozycji i/lub kursu. Każdy z elementów systemu DP (rys.1) pełni ważną funkcję i ma istotny wpływ na poprawną pracę systemu jako całości. Oprogramowanie winno zapewnić wytworzenie takiego sygnału sterującego, aby operator systemu DP mógł pozwolić na tryb automatycznego sterowania, miał możliwość kontroli nad całością i mógł w razie potrzeby wybrać najlepsze rozwiązanie.



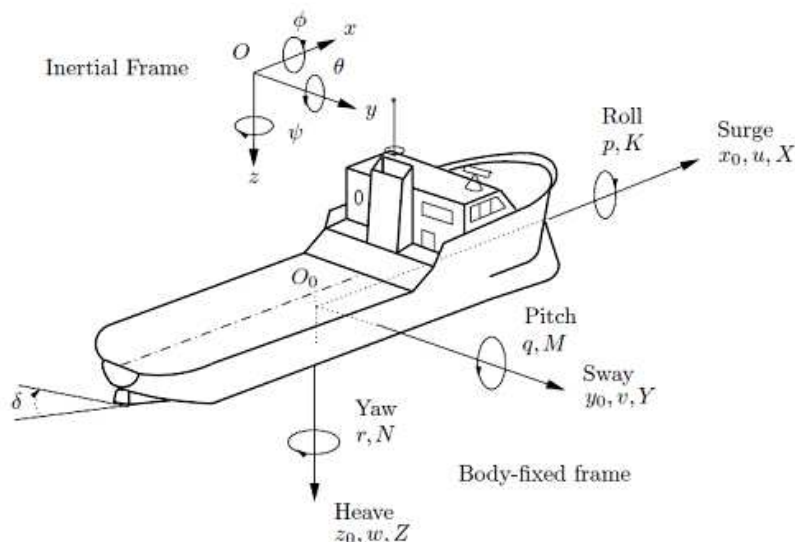
Rys.1. Elementy systemu dynamicznego pozycjonowania statku.

Źródło: [własne, na podstawie 3]

Przejście przez operatora systemu DP na sterowanie ręczne oznacza, że system DP w trybie automatycznym ma problemy lub pojawił się tzw. „alarm żółty” informujący o zagrożeniu spowodowanym wystąpieniem niesprawności w systemie DP zmniejszającym zdolność statku do pozycjonowania.

1. PRZYCZYNY ZMIAN POŁOŻENIA ŚRODKA CIĘŻKOŚCI STATKU

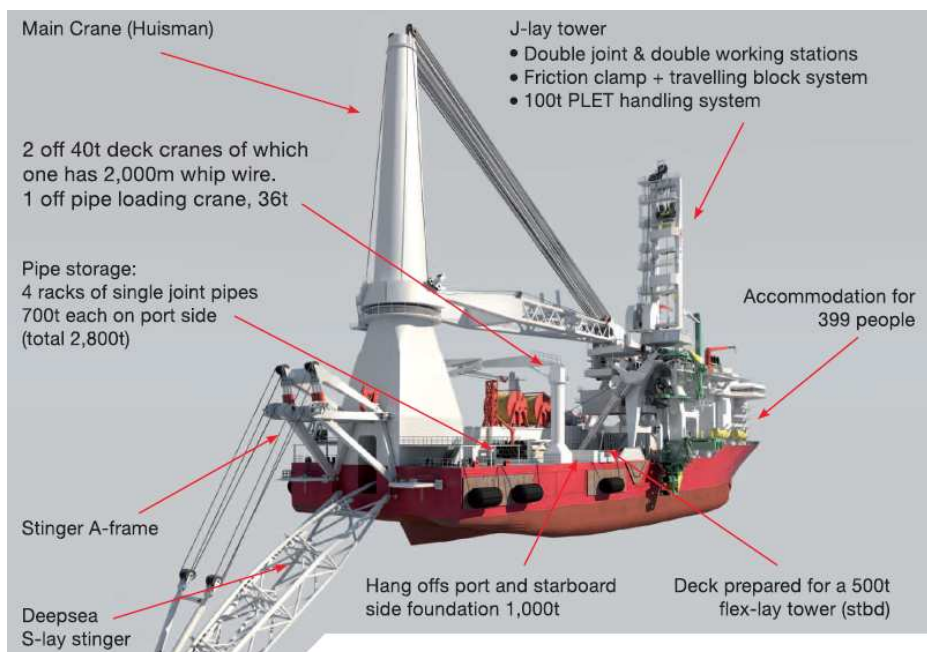
W związku z przyjętym standaryzowanym układem współrzędnych dla systemów DP (rys.2) – środek tego układu znajduje się w środku ciężkości statku. Względem tego punktu podaje się położenie pędników, wektor siły naporu wytwarzanego przez pędnik o numerze „i”, wyznacza wypadkowy napór i moment od sił naporu.



Rys. 2. Standaryzowany układ współrzędnych statku dla systemu DP.

Źródło: [SNAME 1950]

Zmiana położenia środka ciężkości statku może być powodowana wieloma czynnikami m.in. zmianą ilości zapasów na statku (paliwa, wody sanitarnej, prowiantu), stanu zabalastowania, zmianą położenia ciężkich elementów na statku lub ich przyjęciem na pokład. Skalę potencjalnych zmian dla statku (w postaci mas, które podlegają zmianom położenia), którego zadaniem jest układanie rurociągów, przedstawiono na rys.3.



Rys.3. Masy głównych elementów statku do układania rurociągów (pipe-layer vessel) VB Seven Borealis.

Źródło: [13]

Zmianę położenia środka ciężkości w pionie (oś „z”) można kompensować poprzez odpowiednie zabalastowanie statku. Przesunięcie wzdłuż osi „y” (rys.2) koryguje się poprzez użycie zbiorników balastowych kompensacyjnych. Zmiany powodują przechył boczny statku, w wyniku kompensacji można statek wyrównać. Przed przyjęciem dużej masy niesymetrycznej względem środka ciężkości statku, można zmniejszyć przechył boczny po jej przyjęciu, poprzez wstępny przechył statku na drugą burtę, a następnie zmniejszyć przechył boczny do wymaganego poziomu. Zmiana położenia środka ciężkości wzdłuż osi głównej statku (oś „x”) nie ma najczęściej istotnego znaczenia (powoduje znacznie mniejszy efekt w postaci zmiany trymu) i może być w wielu przypadkach niekompensowana (dotyczy to przesunięcia środka ciężkości, nie przesunięcia statku).

Na statku ważną rolę odgrywa wpływ swobodnych przestrzeni w zbiornikach balastowych i paliwowych (pogarsza się m.in. tzw. stateczność dynamiczna statku). Należy dążyć do tego, aby sumaryczna wielkość tych powierzchni była jak najmniejsza.

2. KOREKCJA WSPÓŁRZĘDNYCH ŚRODKA CIĘŻKOŚCI STATKU

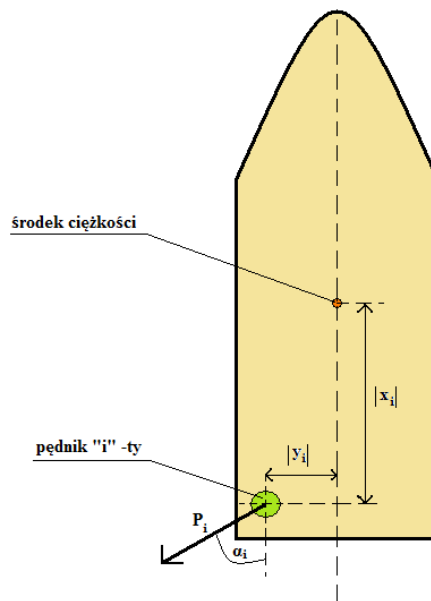
Posiadając poprzez system DP, wyznaczoną wypadkową siłę naporu od pędników \vec{T} , jaką należy uzyskać z układu napędowego statku, należy dokonać rozdziału tej siły pomiędzy dostępne pędniki systemu napędowego, aby spełnić wymagania, przy których wystąpi najmniejsze zapotrzebowanie na moc. Skutkiem tego będzie uzyskanie najmniejszego sumarycznego zużycia paliwa przez elementy układu energetycznego statku. Problem optymalizacji może być zapisany w postaci ogólnej jako:

$$\min_u f(u) \quad (1)$$

$$g_i(u) \leq 0 \quad i = 1, 2, \dots, m \quad (2)$$

$$h_j(u) = \vec{T}_j \quad j = 1, 2, 3 \quad (3)$$

gdzie: $u \in R^p$ oraz $p > 3$ przedstawia układ (położenie) pędników oraz f, g_i, h_j są funkcjami ciągłymi. Wektor \vec{T} przedstawia rzeczywisty wektor sterujący. Jeśli funkcja f jest trójmianem kwadratowym, a funkcje g_i i h_j są liniowe to rozwiązanie jest dość proste. Jeśli powyższe funkcje są nieliniowe proces optymalizacji staje się skomplikowany. Na rys.4 przedstawiono położenie (współrzędne) i-tego pędnika.



Rys. 4. Położenie (współrzędne) pędnika i – tego.

Źródło: [własny]

Wektor \vec{T}_j może być przedstawiony w postaci macierzowej charakteryzującej pędnik i-ty:

$$\vec{T}_i = [P_i \quad \alpha_i \quad x_i \quad y_i] \quad (4)$$

gdzie: P_i przedstawia moc dostarczoną do pędnika i-tego.

Zakładając, że statek wyposażony jest n_1 pędników azymutalnych i n_2 pędników stałych, czyli $n_1 + n_2 = n$ pędników, zadanie sprowadza się do wyznaczenia:

$$\min P^T W P \quad (5)$$

gdzie: $P = [P_1 \quad P_2 \quad P_3 \quad \dots \quad P_n]^T$, a macierz $W \in \lambda \geq 0, \lambda \in \mathbb{R}^{n \times n}$ jest dodatnio zdefiniowaną macierzą wagową.

Poszukiwana konfiguracja ustawienia i naporów (mocy) z poszczególnych pędników będzie osiągnięta, jeśli suma geometryczna naporów i momentów obrotowych odpowiadać będzie wymaganej sile \vec{T} . Oznacza to spełnienie następujących równań:

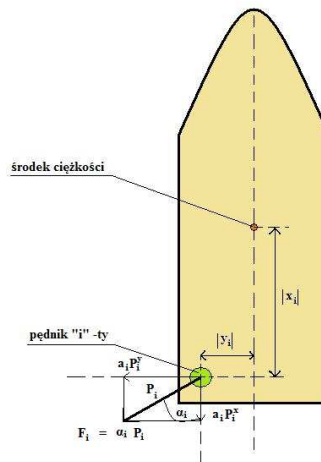
$$\sum_{j=1}^n F_j^x (T_1, T_2, T_3, \dots, T_n) = t_1 \quad (6)$$

$$\sum_{j=1}^n F_j^y (T_1, T_2, T_3, \dots, T_n) = t_2 \quad (7)$$

$$\sum_{j=1}^n M_j (T_1, T_2, T_3, \dots, T_n) = t_3 \quad (8)$$

gdzie: F_j^x , F_j^y , M_j przedstawiają odpowiednio siły w kierunkach x, y i moment od tych sił od pędnika i-tego. Należy określić wielkości F_j^x , F_j^y , M_j dla wszystkich pędników będących w dyspozycji.

Rozkład wektora siły naporu (odpowiadającej pobieranej mocy P_i) na siły naporu w kierunkach x,y przedstawiono na rys.5.



Rys. 5. Rozkład wektora siły naporu pędnika i-tego w kierunkach x,y.

Źródło: [własny]

W rezultacie problem do rozwiązania otrzymuje się w postaci zależności:

$$\min P^T W P, \quad (9)$$

$$\sum_{j=1}^n F_j^x (T_1, T_2, T_3, \dots, T_n) = t_1 \quad (10)$$

$$\sum_{j=1}^n F_j^y (T_1, T_2, T_3, \dots, T_n) = t_2 \quad (11)$$

$$\sum_{j=1}^n M_j (T_1, T_2, T_3, \dots, T_n) = t_3 \quad (12)$$

przy ograniczeniach:

$$0 \leq P_i \leq P_i^{max}, \quad i = 1, 2, \dots, n_1 \quad (13)$$

$$\alpha_i^{min} \leq \alpha_i \leq \alpha_i^{max}, \quad i = 1, 2, \dots, n_1 \quad (14)$$

$$P_j^{wstecz} \leq P_j \leq P_j^{naprzód}, \quad j = n_1 + 1, n_1 + 2, \dots, n \quad (15)$$

$$dP_j^{wstecz} \leq \dot{P}_j \leq dP_j^{naprzód}, \quad j = n_1 + 1, n_1 + 2, \dots, n \quad (16)$$

$$d\alpha_j^{min} \leq \dot{\alpha}_j \leq d\alpha_j^{max}, \quad j = n_1 + 1, n_1 + 2, \dots, n \quad (17).$$

W ogólnej postaci problem optymalizacji (zależności 9-17) nie jest zbiorem wypukłym [10] i nie może być rozwiązany z użyciem podstawowych metod. Można to osiągnąć przy dodatkowych założeniach. W tym celu przyjmuje się, że ograniczenia w orientacji pędnika

oraz szybkość zmiany zapotrzebowania na moc mogą być zmieniane z małym skokiem dla wszystkich pędników. Usuwa to ograniczenia z zależności (14), (16) i (17).

Korekcję zmiany położenia środka ciężkości statku ze współrzędnych (0;0) (zmiana położenia wzdłuż osi „z” nie ma dla tego systemu większego znaczenia) do współrzędnych (a;b) można uzyskać m.in. poprzez modyfikację macierzy (zależność 4), do postaci:

$$\vec{T}_i = [P_i \quad \alpha_i \quad x_i+a \quad y_i+b] \quad (18).$$

Wymaga to każdorazowo wyznaczenia nowych współrzędnych środka ciężkości, wprowadzenia zmian do macierzy (18) tak jakby środek ciężkości nie zmienił współrzędnych (zmianie ulegają współrzędne posadowienia pędników). Pozostaje otwarty problem sposobu korekcji położenia środka ciężkości (wprowadzania danych do systemu DP).

Zmiana położenia środka ciężkości jest co najmniej o rząd wielkości większa (są to wielkości rzędu 1-50cm) od błędów w posadowieniu pędników (rzędu 0,1-0,5 cm) i dokładności określenia jego ustawienia oraz jego skoku. Jeśli w systemach DP podczas sterowania daje się zauważyć niesymetryczność wytwarzanej siły naporu lub jej wielkości przez pędniki posadowione teoretycznie symetrycznie, to zmiana położenia środka ciężkości statku musi powodować bardziej widoczne różnice. Dotychczas ten problem nie był rozważany. Jeśli wymagana dokładność pozycjonowania zostawała osiągnięta (jest to najczęściej 1-10 m), nie było potrzeby poprawy sytuacji. Wraz z koniecznością osiągnięcia większej dokładności (np. dla jednostek wiertniczych jest to 0,5 m) korzystają one z dodatkowych systemów pozycjonowania (np. kotwiczenia, cumowania, asysty innych jednostek). W przypadku potrzeby korzystania tylko z systemów dynamicznego pozycjonowania konieczne będzie skorzystanie z dodatkowych możliwości poprawy np. rozważanej korekcji zmiany położenia środka ciężkości statku podczas jego eksploatacji.

3. WYMAGANIA DOKŁADNOŚCI POZYCJONOWANIA STATKU Z SYSTEMEM DP

Wymagania dokładności pozycjonowania statku i/lub jego kursu i prędkości zależą od jego przeznaczenia i rodzaju wykonywanej pracy. Dla konkretnego zadania jest to określone i statek musi ten warunek spełnić. W sytuacji, w której nie może on zachować wymaganej dokładności pozycjonowania i/lub utrzymania kursu, musi przerwać pracę, przejść do stanu oczekiwania zabezpieczającego miejsce pracy, aby można było ją wznowić bez ponoszenia dodatkowych kosztów, po poprawie warunków zewnętrznych (np. stanu morza) lub usunięciu niesprawności (awarii). Czas przestoju generuje koszty z powodu przedłużenia czasu wykonania danego zadania. Koszt dziennego czarteru statku zależnie od jego wielkości i funkcji sięga kwoty od 50 tys. do ponad miliona dolarów.

Na skuteczność pozycjonowania ma wpływ wiele czynników. Jednym z nich jest dokładność i szybkość odpowiedzi pędnika na wydane polecenie (Tab.1). Są to wartości wymagane przepisami towarzystw klasyfikacyjnych [2,12], które na podstawie obserwacji i doświadczeń w eksploatacji takich jednostek podały te wymagania.

Tab. 1. Dokładność i szybkość odpowiedzi pędnika na zadanie [mmm].

Zmiana prędkości lub skoku	Od zera do maksymalnego naporu w ciągu 8 sekund dla małych pędników do 15 sekund dla dużych
Szybkość obrotu pędnika	Kąt obrotu 180 ⁰ w ciągu 15 sekund przy zmianie prędkości obrotowej do 2 obr./min.
Prędkość lub skok śruby	±2% wartości maksymalnej
Dokładność kątowa	±1.5 ⁰

Źródło: [2]

Statek z systemem dynamicznego pozycjonowania ma określony najgorszymi warunkami zewnętrznymi (siła i kierunek wiatru, stan morza) zakres spełnienia wymagań

pozycjonowania (w postaci tzw. *DP capability plots*) w zależności od stanu technicznego układu napędowego i dostępnej mocy do napędu [3,11]. Stany niesprawności (w tym awarie) w systemie napędowym pozycjonowania powodują ograniczenie możliwości (np. do lepszych warunków zewnętrznych), ale ze względu na nadmiarowość (redundancję) jest ono dalej możliwe. Operator systemu DP musi umieć dokonać oceny sytuacji (podpowiada mu to system automatyki – w postaci alertów, alarmów sygnalizacją świetlną) [7, 14] i podjąć właściwe działania, zgodnie z procedurą.

Jak silne jest oddziaływanie środowiska morskiego na statek można ocenić poprzez dane zawarte w tab.2, w której podano parametry stanu morza dla Północnego Atlantyku zależnie od siły wiatru dla warunków ustalonych.

Tab.2. Parametry stanu morza dla Północnego Atlantyku zależnie od siły wiatru dla warunków ustalonych

Stan morza [°B]	Średnia prędkość wiatru [m/s]	Znacząca wysokość fali [m]	Zakres modalny okresu fali [s]	Najbardziej prawdopodobny okres fali [s]
0-1	0-3	0-0,1	-	-
2	3,5-5	0,1-0,5	3,3-12,8	7,5
3	5,5-8	0,5-1,25	5,0-14,8	7,5
4	8,5-10,5	1,25-2,5	6,1-15,2	8,8
5	11-13,5	2,5-4,0	8,3-15,5	9,7
6	14-23,5	4,0-6,0	9,8-16,2	12,4
7	24-27,5	6,0-9,0	11,8-18,5	15,0
8	28-31,5	9,0-14,0	14,2-18,6	16,4
>8	>31,5	>14,0	15,7-13,7	20,0

Źródło: [2]

W celu ograniczania czasu przestoju statku rozbudowuje się systemy napędowe i pozycjonowania, zwiększa dostępną moc do napędu, aby statek był w stanie sprostać wyzwaniom huraganowi zdarzającemu się raz na rok, w skrajnym przypadku dla wież wiertniczych raz na stulecie (czyli praktycznie nigdy) [3,8,9].

Zwiększenie dokładności pozycjonowania wymaga m.in. rozbudowy systemu napędowego i dostępnej mocy do napędu powoduje, że w dobrych warunkach atmosferycznych system ten pracuje w długich okresach czasu na niskich obciążeniach (5-15% nominalnych), co może powodować pracę silników wysokoprężnych na obciążeniach o niższej sprawności, powodujących zwiększenie zużycia paliwa i zwiększonej emisji szkodliwych substancji do atmosfery [1,6,7].

PODSUMOWANIE

Na poprawność działania systemów dynamicznego pozycjonowania statków ma wpływ wiele czynników. Zwiększenie wymagań dokładności pozycjonowania statku powoduje dodatkowe koszty inwestycyjne, które generują również koszty eksploatacyjne, czyli pogorszenie rachunku ekonomicznego. Jednym z istotnych, a obecnie niedocenianym czynnikiem może być zmiana środka ciężkości statku podczas eksploatacji. Systemy automatyki radzą sobie pośrednio z tym problemem. Wygenerowanie nieoptymalnego sygnału sterującego nie pozwala na właściwą reakcję systemu pozycjonowania na zmianę położenia statku. Powstaje przyczyna generująca w stanach przejściowych dodatkowy błąd pogarszający dokładność pozycjonowania. Jeśli mieści to się w dopuszczalnych granicach, nie ma potrzeby uwzględniania tego czynnika. Jednak wraz z postępującym procesem zwiększenia wymagań dokładności pozycjonowania i/lub utrzymania kursu statku, rola tego czynnika będzie wzrastała.

BIBLIOGRAFIA

1. Dietmer D. *Principal Aspects of Thruster Selection*, Dynamic Positioning Conference, Houston, USA 1997.
2. *Dynamic Positioning Systems – Operation Guidance*, Recommended Practice DNV-RP-E307, DNV 2011.
3. *Guide to Dynamic Positioning of Vessels*, ALSTOM 2000.
4. Halstensen S.O. & Nordtun T. *Improving Total Efficiency and Safety during DP-operations*, First International Symposium on Marine Propulsors, Trondheim, Norway 2009.
5. Herdzik J., *Metoda szacowania wymagań stawianym układom napędowym statków*, str. 891-898, Logistyka 3/2011.
6. Herdzik J., *Propozycje wykorzystania parametrów aktywnych pędników w podniesieniu bezpieczeństwa żeglugi*, str. 899-907, Logistyka 3/2011.
7. Herdzik J., *Verifications of Thrusters Number and Orientation in Ship's Dynamic Positioning Systems*, The International Journal of Marine Navigation and Safety of Sea Transportation, 2013.
8. Holvik J., *Basics of Dynamic Positioning*, Dynamic Positioning Conference, Houston, USA, 1998.
9. *International Guidelines for The Safe Operation of Dynamically Positioned Offshore Supply Vessels*, IMCA M 182, 2009.
10. Nienhuis U., *Analysis of Thruster Effectivity for Dynamic Positioning and Low Speed Manoeuvring*, Doctor Thesis, Delft 1992.
11. *Operator Manual Kongsberg K-Pos DP Dynamic Positioning System*, Release 7.0. Kongsberg Maritime AS, Norway.
12. *Rules for Classification and Construction Ship Technology, Dynamic Positioning Systems*. chapter 15, Germanischer Lloyd 2010.
13. VB_Seven_Borealis 2012, www.subsea7.com
14. Rutkowski G., *Eksploracja statków dynamicznie pozycjonowanych*, tom VIII, Trademar, Gdynia 2013.

THE CHANGE OF LOCATION OF SHIP GRAVITY CENTRE VERSUS THE CORRECTNESS OF DYNAMIC POSITIONING SYSTEMS OPERATION

Abstract

The location of vessel gravity center has changed during operation. It is caused by many factors like: the change of fuel, sanitary water and bilge water quantities etc. The minimum and maximum quantity of reserves have been taken into consideration during the calculations of vessel stability. For the vessels like: pipe-layers, diver support vessels, ROV vessels etc. proceeds the essential mass distribution change during ship's operation. The coordinates of thrusters and gravity centre location (most often the centre point of cartesian co-ordinate system is here) are significant during the compensation thrust vector determining process in DP systems.

The change of mass gravity centre results in that generated steering signal is not quite proper in comparison to ideal signal when the change should be taken into account. The signal deviation is not often decisive. The final effect is similar to the fault estimation of environment condition. It allows for the signal correction in next loop and finally for the conservation of vessel positioning correctness. The measurement and introduction to DP system the actual position of gravity centre may increase the

positioning correctness in the eventuality of worse environmental condition or malfunctioning of DP systems. In the paper it was paid attention on that problem.

Autorzy:

dr inż. **Jerzy Herdzik** prof. nadzw. AM – Akademia Morska w Gdyni, Katedra Siłowni Okrętowych, georgher@am.gdynia.pl