

DIAGNOZOWANIE OKRĘTOWEGO UKŁADU NAPĘDOWEGO Z TURBINOWYMI SILNIKAMI SPALINOWYMI

Andrzej GRZĄDZIELA*

*Akademia Marynarki Wojennej, Wydział Mechaniczno-Elektryczny, ul. inż. J. Śmidowicza 69, 81-103 Gdynia

a.gradziela@amw.gdynia.pl

Streszczenie: W artykule przedstawiono propozycję metodyki oceny dynamiki okrętowego układu napędowego z silnikami turbinowymi LM 2500 z wykorzystaniem systemów DGPS i EGNOS. Rozpatrzone wytypowane parametry eksploatacyjne oraz ich powiązanie z przyspieszeniem, prędkością i drogą okrętu w stanie nieustalonym. Scharakteryzowano sposób przetwarzania i gromadzenia danych oraz omówiono powstałe przy pomiarze błędy a także przeprowadzono dyskusję nad przydatnością obu systemów dla pozycjonowania jednostki.

1. WSTĘP

Ocena stanu technicznego okrętowego układu napędowego stanowi podstawę do uzyskania niezbędnych dokumentów certyfikacyjnych zarówno przy nowo budowanych jednostkach jak i dla statków remontowanych. Próby techniczne silników realizowane są podczas pracy na uwięzi (na tzw. palu) oraz w warunkach morskich. Celem prowadzonych badań jest:

- weryfikacja podstawowych parametrów technicznych okrętu będących przedmiotem zamówienia armatorskiego;
- ocena jakości wykonanych czynności regulacyjnych i naprawczych w zakresie silników napędu głównego, pracy pędnika oraz czystości (chropowatości bezwzględnej) kadłuba okrętowego;
- zdolności układu napędowego do krótkotrwałej pracy przy przeciążeniu.

Przedstawione zadania realizowane są w ustalonych stanach obciążeń. Próby stoczniove na uwięzi są praktycznie tylko pomiarami testowymi mającymi na celu sprawdzenie i dopuszczenie jednostki do prób morskich. Badania w morzu są wykonywane na otwartych akwenach lub na tzw. mili pomiarowej. Prowadzone pomiary w kursie i kontrkursie mają na celu określenie maksymalnej trwałej prędkości przy jednoczesnym sprawdzeniu zakresu parametrów eksploatacyjnych elementów transmisji momentu obrotowego. Badania są często obciążone dużymi błędami wynikającymi z tolerancji przyrządów pomiarowych. Innym problemem jest brak jednoznacznie identyfikujących stan techniczny elementów układu napędowego procedur dla oceny pracy jednostki w stanach nieustalonych. Zakres badań zdawczych obejmuje zagadnienia zmian parametrów technicznych silników w zakresie tzw. pola parametrów kontraktowych przy jednoczesnej kontroli rozwinięcia przez silnik lub silniki kontraktowej mocy ciągłej – rysunek 1.

2. ANALIZA PARAMETRÓW EKSPLOATACYJNYCH OKRĘTOWEGO UKŁADU NAPĘDOWEGO

Przedstawiona na rysunku 1 charakterystyka pracy silnika turbinowego jest dokumentem na podstawie, którego dokonuje się oceny stanu technicznego silnika w stanach ustalonych. Moment i moc zapotrzebowaną przez pędnik śrubowy można określić w postaci zależności (Charchalis, 2001; Wojnowski, 1998):

$$M = k_M \cdot \rho \cdot n_{WS}^2 \cdot D^5 \quad (1)$$

$$N_S = 2 \cdot \pi \cdot M \cdot n_{WS} = 2 \cdot \pi \cdot k_M \cdot \rho \cdot n_{WS}^3 \cdot D^5 \quad (2)$$

gdzie: k_M – bezwymiarowy współczynnik momentu; ρ – gęstość wody (dla Bałtyku Południowego $\rho=1025$ kg/m³); D – średnica śruby [m]; M – moment zapotrzebowany [Nm]; N_S – moc na stożku śruby [W], n_{WS} – prędkość obrotowa śruby [obr/s].

Zakładając wstępnie, że śruba ma stałą średnicę $D = idem$ oraz że pracuje w ośrodku o stałej gęstości, należy zauważyć, że moment zapotrzebowany przez pędnik zależy od kwadratu prędkości obrotowej n_{WS} oraz bezwymiarowego współczynnika momentu k_M , który z kolei zależy od bezwymiarowego współczynnika posuwu określonego jako:

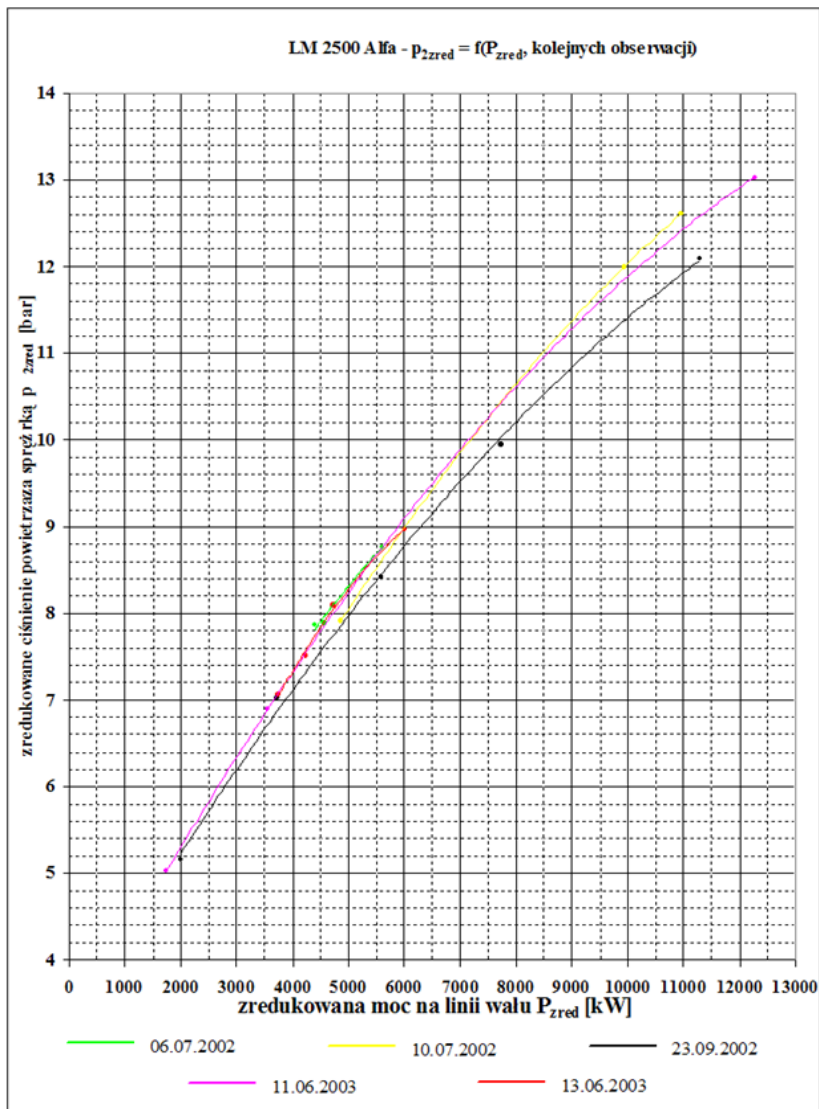
$$J = \frac{v_p}{D \cdot n_{WS}} \quad (3)$$

gdzie: v_p – postępową prędkość śruby względem wody.

Badania eksperymentalne dowiodły, że w stanach ustalonych dla podobnych wyporności kadłuba oraz przy podobnych warunkach pogodowych iloraz v_p/n_{WS} jest prawie niezmienny, co w analizie stanów ustalonych skutkuje twierdzeniem, że przy stałej prędkości pływania można przyjąć uproszczenie, że $J=idem$ oraz $k_M = idem$ – rysunek 2 (Kruppa, 1976). Należy jednak zauważyć, że większość kolizji morskich następuje w trakcie manewrowania, a więc poza stanami ustalonymi. Zatem modelowanie oraz badania

morskie zachowania się układu kadłub – silnik – śruba w stanach nieustalonych pozwalają nie tylko na weryfikację przyjętych uproszczeń, ale przede wszystkim skutkować mogą prognozowaniem zachowania się jednostki podczas

awaryjnych manewrów np. CAŁA NAPRZÓD – CAŁA WSTECZ, a także umożliwić mogą obserwację charakterystycznych parametrów diagnostycznych w procesie akceleracji i deceleracji.



Rys. 1. Przykładowe pole pracy okrętowego silnika turbinowego

Procesy zwiększania prędkości pływania okrętów odbywają się zawsze przy włączonym napędzie śruby i dlatego niezależnie od rozwiązań konstrukcyjnych analiza procesu może być podobna. Po uwzględnieniu zależności (1) i (2) równania dynamiki ruchu okrętu przyjmą postać:

$$(m + \Delta m) \frac{dv}{dt} = \sum_{i=1}^k T_{ei} - R(v) \sum_{i=1}^k M_i = \sum_{i=1}^k (M_s + M_t) \quad (4)$$

gdzie: R – opór okrętu, T_e – napór pędnika, M_s – moment silnika/ów napędu głównego, M_t – moment oporowy (występują ze znakiem minus); m – masa okrętu, Δm – masa wody towarzyszącej.

Dla przyspieszania okrętu powinna występować nadwyżka rzeczywistej siły naporu nad wielkością oporu pływania w stanie ustalonym. Z kolei wielkość siły naporu (5) zależy od zapotrzebowanego momentu śruby, który przedstawia zależność (1).

$$T = k_T \cdot \rho \cdot n_{ws}^2 \cdot D^4 \quad (5)$$

Dla śrub o skoku ustalonym wzrost prędkości pływania może być realizowany tylko poprzez zwiększenie prędkości obrotowej silnika napędowego i tym samym prędkości obrotowej śruby, co uzyskuje się to poprzez zwiększenie ilości paliwa dostarczanego do silnika w jednostce czasu. Im większy będzie nadmiar rzeczywistej siły naporu śruby T_e wobec wielkości oporu pływania R , tym krótsze będą czasy oraz drogi manewru – rysunek 3. Aby określić wielkości liczbowe analizowanych parametrów przedstawiono je w postaci analitycznej. Posłużono się pierwszym z równań (4) uwzględniając, że:

$$(m + \Delta m) \frac{dv}{ds} = \sum_{i=1}^k T_{ei} - R(v) \quad (6)$$

Równanie (6) po scałkowaniu w przedziale prędkości, tzn. równanie procesu przyspieszania od v_1 do v_2 , przyjmie postać:

$$(m + \Delta m) \frac{v_2^2 - v_1^2}{2} = \int_{v_1}^{v_2} (\sum T_e - R) ds. \quad (7)$$

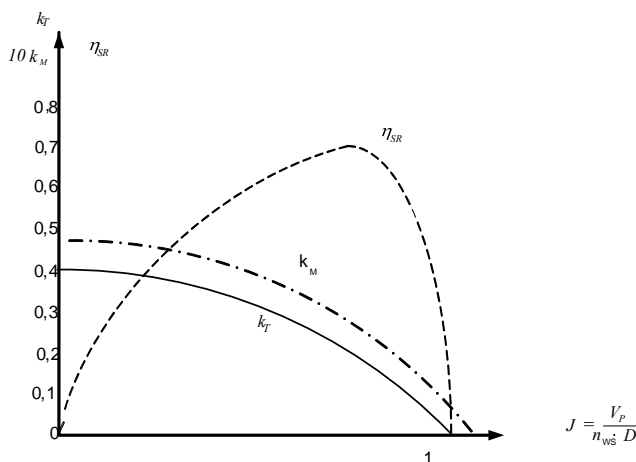
Z równania (7) wynika, że w czasie przyspieszania statku, akumulowana przez niego energia kinetyczna ruchu wzrasta kosztem nadmiaru siły naporu śrub $\sum T_e$ wobec wielkości jego bieżącego oporu R . Czas manewru w funkcji naporu śrub napędowych można uzyskać z pierwszego z równań (4). Jest to czas przyspieszania od prędkości v_1 do v_2 . Po przekształceniu otrzymano:

$$dt = (m + \Delta m) \frac{dv}{\sum T_e - R}, \quad t = (m + \Delta m) \cdot \int_{v_1}^{v_2} \frac{dv}{\sum T_e - R}. \quad (8)$$

By uzyskać wielkość drogi manewru pomnożono pierwsze z równań (8) przez prędkość pływania v . Uzyskano w ten sposób drogę przebytą przez okręt w czasie przyspieszania go od prędkości v_1 do v_2 . Po dalszych przekształceniach uzyskano:

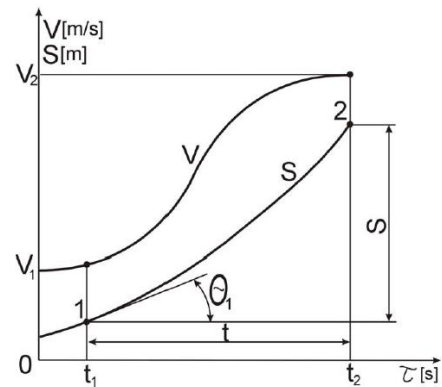
$$ds = v \cdot dt = (m + \Delta m) \frac{v \cdot dv}{\sum T_e - R}. \quad (9)$$

$$s = (m + \Delta m) \cdot \int_{v_1}^{v_2} \frac{v \cdot dv}{\sum T_e - R}$$

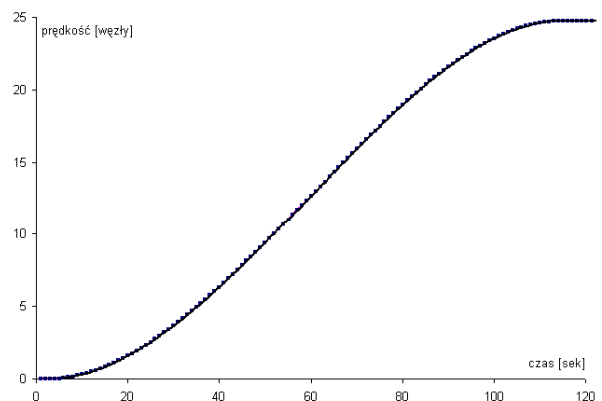


Rys. 2. Charakterystyka hydrodynamiczna śruby swobodnej, gdzie: η_{SR} – sprawność pędnika, v_p – prędkość postępową śruby okrętowej, J – współczynnik posuwu, n_{WS} – prędkość obrotowa wału śrubowego, D – średnica śruby okrętowej, k_M – współczynnik momentu, k_T – współczynnik naporu

Analizując równania (8) i (9) należy zauważyć, że w badaniach eksperymentalnych najważniejszym czynnikiem, mającym wpływ na jakość otrzymanych wyników jest możliwość dokładnego określenia parametrów ruchu kadłuba. Znajomość charakterystyk hydrodynamicznych śruby oraz program obliczeń oporu całkowitego pozwala na wyznaczenie charakterystyk napędowych dla stanów nieustalonych. Tak, więc zarówno dla potrzeb modelowania jak i dla badań morskich podstawową potrzebą jest dokładna informacja o chwilowej pozycji środka ciężkości okrętu, którą może zapewnić system GPS lub jego wersje różnicowe.



Rys. 3. Podstawowe zależności i parametry zwiększania prędkości okrętu



Rys. 4. Zmiany prędkości postępowej okrętu

3. ANALIZA PRZYDATNOŚCI SYSTEMÓW DGPS I EGNOS DLA DYNAMICZNEGO POZYCJONOWANIA JEDNOSTKI

Powszechność wykorzystania systemu GPS w szeroko rozumianej nawigacji zapewnia uzyskiwanie dokładności określenia pozycji na poziomie 13m ($p=0.95$) w płaszczyźnie horyzontalnej (Cydejko i Oszczak, 2003; Gautier i inni, 2005). Większość współczesnych odbiorników GPS wykorzystywanych w nawigacji morskiej umożliwia korektę pozycji poprzez wykorzystanie pomiarów różnicowych, zapewniających zwiększenie dokładności. Z tego względu w ramach badań podjęto próbę oceny, polegającą na porównaniu dokładności wyznaczenia współrzędnych pozycji dla dwóch rozwiązań różnicowych systemu GPS możliwych do zastosowania w procesie pomiaru parametrów ruchu okrętu, niezbędnych do wyznaczenia charakterystyk napędowych, na obszarze Bałtyku Południowego, tj:

- różnicowy system DGPS wykorzystujący stację referencyjną Rozewie (301KHz),
- Europejski Geostacjonarny Satelitarny System Wspomagania Nawigacyjnego EGNOS wykorzystujący korekty różnicowe transmitowane przez łącze satelitarne.

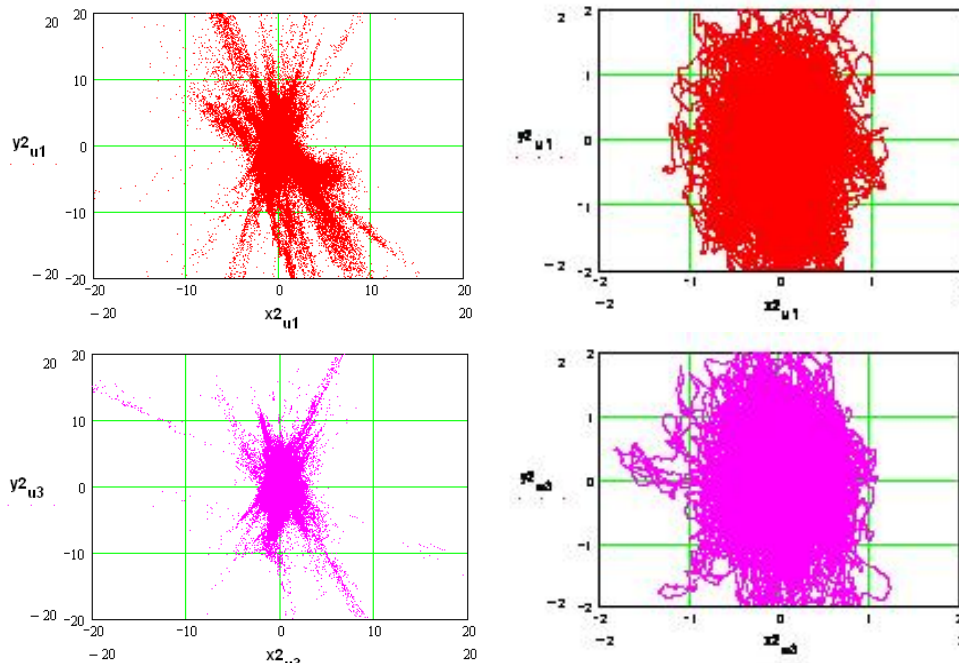
Dla oceny dwóch rozwiązań różnicowych GPS: DGPS LF/MF oraz EGNOS i możliwości ich zastosowania dla oceny charakterystyk napędowych przeprowadzono dwutygodniową kampanię pomiarową, której postawiono następujące cele:

- określenie horyzontalnej dokładności wyznaczenia pozycji przez system EGNOS w długotrwałej sesji pomiarowej.
- w oparciu o równoległe pomiary DGPS LF/MF dokonanie analizy porównawczej pomiędzy systemem EGNOS oraz rozwiązaniem DGPS wykorzystującym referencyjne stacje morskie celem ustalenia optymalnego rozwiązania pozycyjnego dla pomiarów charakterystyk napędowych (Gautier i inni, 2001; Global Positioning System Standard Positioning Service).

Punkt referencyjny dla odbiorników EGNOS oraz DGPS wyznaczono na maszcie portu handlowego w Gdyni. Podstawowe założenia pomiarowe obejmowały: długość sesji pomiarowej – 2 tygodnie (ok. 2.5 mln. pomiarów), L1-pomiary kodowe, minimalna wysokość topocentryczna >5 deg, parametry sygnału: SS/SNR 40/19, PDOP <10 deg, HDOP <6 deg. Rejestracji dokonano z wykorzystaniem standardu NMEA-0183, depeza GGA co 1 s, z następującymi parametrami: przepływość binarna -4800 bodów, 8 bitów danych (bit 7=0, najbardziej znaczący bit = 0), bez kontroli parzystości, 1 bit stopu, logicznej „1” odpowiada

napięcie od -15V do 0.5V, logicznemu zeru odpowiada napięcie od +4V do 15V. Dla realizacji tej transmisji używano 9-cio stykowe złącze RS 232C. Przykładowe wyniki pomiarów zobrazowano w formie graficznej na rysunku 6.

W tabeli 1 zestawiono wartości statystyk błęd określenia pozycji dla obu analizowanych systemów. Nadmienić w tym miejscu należy, że dodatkowo prezentowaną miarą jest błąd pozycji z $p=0.95$ obliczony z populacji. W wyniku badań stwierdzono, że dla pomiaru współrzędnych pozycji – niezbędnych dla wyznaczenia przebytej drogi, system DGPS wykorzystujący stację referencyjną w Rozewiu zapewnia utrzymanie dokładności pomiaru przebytej drogi poniżej 2m ($p=0.95$) przy dostępności 99.9967% (1.999.934 wyznaczeń, na 2.000.000 możliwych). Natomiast wykorzystanie systemu EGNOS dla przeprowadzonych badań jest niewskazane, bowiem pomimo zadawalającej dokładności określenia pozycji dostępność systemu wyniosła 88.7266 % (1.774.532 wyznaczeń, na 2.000.000 możliwych).



Rys. 6. Rozkład pozycji względem wartości oczekiwanej systemu EGNOS (lewa kolumna) i DGPS (prawa kolumna) w czasie kampanii pomiarowej

Przeprowadzone badania wykazały, że system DGPS wykorzystujący lokalne stacje referencyjne może być z powodzeniem stosowany dla wyznaczania przebytej drogi podczas wyznaczania charakterystyk napędowych jednostek, gwarantując przy tym bardzo wysoką dostępność serwisu.

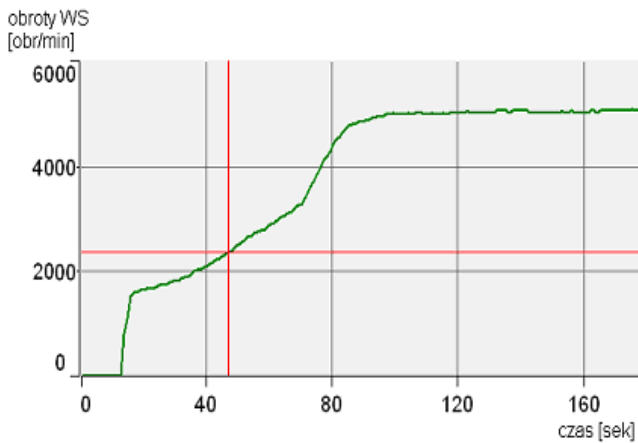
Badania pilotażowe przeprowadzono na okrętach podczas rutynowych badań diagnostycznych silników napędu głównego. Program badań obejmował:

- pomiar parametrów układu napędowego;
- pomiar przyrostu prędkości kadłuba;
- pomiar przebytej drogi wg. wskazań odbiornika DGPS.

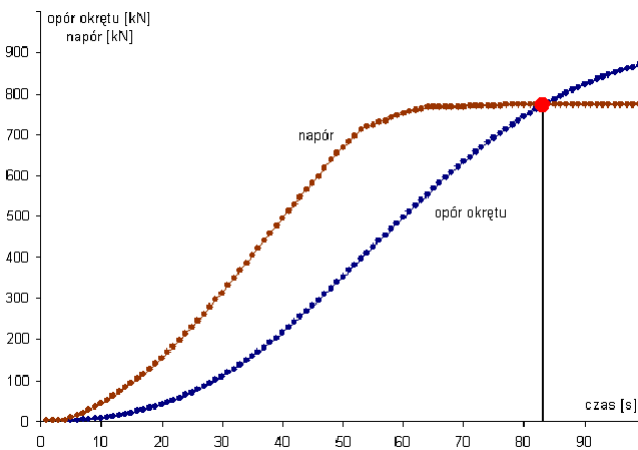
Przeprowadzenie pomiaru czasu ruszania okrętu z miejsca wykonano dwukrotnie, aż do momentu osiągnięcia przez okręt prędkości 25 węzłów. W związku z tym, że częstotliwość pomiarów systemu DGPS wynosiła $f=1$ Hz, wystąpić mógł błąd odczytu faktycznej pozycji okrętu. Przy obliczeniu przebytej drogi dokonano korekcji pozycji o przemieszczenie 10,5 m. Na podstawie wyników pomiarów sporządzono wykres zmian prędkości postępowej okrętu oraz wykres zmian prędkości obrotowej wału turbiny napędowej w zależności od czasu – rysunek 7, a także zmianę wartości oporu i naporu w funkcji czasu – rysunek 8.

Tab. 1. Analiza porównawcza dokładności określenia pozycji w płaszczyźnie horyzontalnej systemów DGPS LF/MF oraz EGNOS

Numer pomiaru	DGPS			Numer pomiaru	EGNOS		
	rms (p=0.65) [m]	2rms (p=0.95) [m]	95 % z populacji [m]		rms (p=0.65) [m]	2rms (p=0.95) [m]	95 % z populacji [m]
000001-500.000	0.8824	10.76	1.6171	000001-500.000	4.6205	9.2411	9.3202
500.001-999.999	0.8566	10.71	1.6146	500.001-999.999	4.1557	8.3114	7.4831
1.000.000-1.500.000	0.8335	10.66	1.5562	1.000.000-1.500.000	1.8219	3.6439	3.1172
1.500.001-2.000.000	0.8615	10.72	1.6084	1500001-1.700.000	3.5034	7.0069	5.9393
Σ	0,8587	0.717	1.6021	Σ	3.7120	7.4240	6.6970



Rys. 7. Zmiany prędkości obrotowej wału turbiny napędowej



Rys. 8. Zależność prędkości obrotowej wału turbiny od prędkości postępowej okrętu

4. WNIOSKI

Zastosowanie analiz parametrów eksploatacyjnych w stanach nieustalonych ma wiele ograniczeń oraz narzuca rygorystyczne wymogi powtarzalności badań. Użytkowane systemy pomiarowe mogą współcześnie podolać powyższym wymaganiom a uzyskane wyniki mogą stanowić doskonałą platformę nowych, kompleksowych badań diagnostycznych nie tylko okrętowego układu napędowego, ale także urządzeń sterowych, nawigacyjnych itp. Przed-

stawione wyniki analiz i badań pilotażowych stanowią podstawę dla wdrożenia pomiarów wszystkich parametrów eksploatacyjnych w stanach nieustalonych dla potrzeb okrętowego, wielosymptomowego systemu diagnostycznego.

LITERATURA

1. **Charchalis A.** (2001), *Opory okrętów wojennych i pędniki okrętowe*, AMW, Gdynia.
2. **Cydejko J., Oszczak S.** (2003), The Maritime Tests of EGNOS System Test Bed (ESTB) Performance in Poland, *11th IAIN World Congress Proceedings* Berlin.
3. **Gauthier L., P. Michel P., Ventura-Traveset J., Benedicto J.** (2001), EGNOS: The First Step in Europe's Contribution to the Global Navigation Satellite System, *ESA bulletin*, No 105.
4. **Gauthier L., Ventura-Traveset J., Toran F., Lathievant Ch., Bedu J.** (2005), EGNOS Operations and Their Planned Evolution, *ESA bulletin*, No 124.
5. **Kruppa C.** (1976), Practical aspects in the design of high speed small propellers, *Int. Shipbuilding Progress*, Vol. 23, Nr. 268.
6. **Wojnowski W.** (1998), *Okrętowe silownie spalinowe – cz. I*, AMW, Gdynia.
7. *Global Positioning System Standard Positioning Service, Performance Standard*, Assistant Secretary of Defense, 2001.

DIANOSING OF COMBINED COGAG TYPE SHIPS POWER PLANT

Summary: The paper presents a proposal method of diagnosing dynamics of ships combined propulsion system with gas turbine engines LM 2500 type with the use of DGPS and EGNOS systems. Two operational parameters were considered according acceleration, speed and distance of the ship during non-steady state. Methods of collecting and processing of measurement data were characterized, moreover calculated errors were presented as well. The discussion about helpfulness of both systems for positioning of vessel finalized the paper.