

MODELOWANIE I WYZNACZANIE CHARAKTERYSTYK MOCY UKŁADU NAPĘDOWEGO STATKU WYPORNOŚCIOWEGO ZE ŚRUBĄ O STAŁYM SKOKU

W artykule scharakteryzowano problem wyznaczenia charakterystyk napędowych mocy statku ze śrubą o stałym skoku. W celu sformułowania modeli charakterystyk mocy wykorzystano w pierwszej kolejności znane aspekty fizyczne, w następnej zaś – metody statystyczne. Do weryfikacji modeli wykorzystano dostępne w literaturze przedmiotu wyniki badań układu napędowego statku m/s „Garnuszewski”. W sumie wyłoniono trzy dające zbieżne, praktycznie równe, wyniki aproksymacji danych pomiarowych mocy. Dokonano analizy odchyleń wyników pomiarów od modeli, w wyniku czego jeden punkt ze zbioru pierwotnych danych został odrzucony. Analiza charakterystyk mocy na uwięzi wyznaczonych drogą ekstrapolacji pokazała, że przebieg tej charakterystyki dla jednego z modeli wielomianowych znacznie odbiega od pozostałych dwóch charakterystyk, dając znacznie niższe wartości, co może świadczyć, że ta charakterystyka powinna być odrzucona.

Słowa kluczowe: charakterystyki napędowe statku ze śrubą o skoku stałym, modelowanie i wyznaczanie charakterystyk mocy, napęd statku, praca na uwięzi.

WSTĘP

Znajomość charakterystyk napędowych ma znaczenie dla zapewnienia bezpiecznej i ekonomicznej eksploatacji układu napędowego i w szczególności dla bezpiecznej eksploatacji silników napędowych w aspekcie niedopuszczania do nadmiernych obciążeń mechanicznych oraz cieplnych [2, 4, 6].

W praktyce eksploatacyjnej charakterystyki napędowe są mało wykorzystywane. Poziom obciążenia mechanicznego i termicznego kontrolowany jest na podstawie parametrów pracy silnika, jak: prędkość obrotowa, wałów, położenie listwy paliwowej, temperatury spalin na wylocie z cylindrów i przed turbodoładowarkami itd. Niekiedy układy napędowe wyposażane są w momentomierze.

Znajomość charakterystyk układu napędowego i silników napędowych ma duże znaczenie praktyczne na etapie prób morskich, zwłaszcza prototypu, kiedy to sprawdzana jest poprawność doboru pędników oraz ustalane pole osiągow układu napędowego [4, 5].

W celu poszukiwania modeli charakterystyk wykorzystano w artykule opublikowane wyniki badań układu napędowego statku m/s „Garnuszewski” [3].

Tabela 1. Dane z badań charakterystyk napędowych statku m/s „Garnuszewski” [3]:
 n – prędkość obrotowa wału, v – prędkość statku, N – moc na wale

Table 1. Data from propulsion characteristic study of vessel „Garnuszewski” [3]:
 n – propeller rotational speed, v – vessel velocity, N – shaft power

Numer serii	Numer pomiaru	n [obr/min]	v [w]	N [kW]
1	1	75	9,5	542
	2	95	12	1144
	3	115	14	2124
	4	125	14	2911
	5	135	16	3946
2	6	48	3,5	270
	7	72	6	694
	8	95,6	9,2	1535
	9	116	12	2701
	10	128	12	3700
3	11	128	12	3844
	12	49	6,5	158
	13	72	9,1	462
	14	93,1	11,5	972
	15	115,4	14	2131
	16	125,9	15	2628
	17	137,2	16	3570

1. MODELOWANIE CHARAKTERYSTYK

1. 1. Model oparty na przesłankach metody Siłukowa

W prezentowanej pracy modele mocy utworzono, bazując na dotychczasowej wiedzy z zakresu wyznaczania charakterystyk napędowych, kierując się znanymi aspektami fizycznymi modeli wyznaczanych charakterystyk.

Pierwszym modelem, który rozpatrzono w pracy, jest model wynikający z tzw. metody Siłukowa budowy charakterystyk napędowych mocy na uwięzi [3].

Metoda bazuje na modelu potęgowym mocy napędowej w postaci:

$$N = c_f n^p, \quad (1)$$

gdzie:

N – moc na wale,

n – prędkość obrotowa wału,

c_f – współczynnik będący funkcją warunków pływania,

p – stała (wykładnik) wyznaczana na podstawie wyników badań.

Funkcja c została zdefiniowana następująco:

$$c_f = -a_f v + c_u, \quad (2)$$

gdzie:

a_f – współczynnik będący funkcją n ,

v – prędkość statku,

c_u – stała uwzględniająca warunki pracy układu na uwięzi.

Funkcję a_f zdefiniowano następująco [3]:

$$a_f = \frac{b}{n^z}, \quad (3)$$

gdzie:

b – stała,

z – stała (potęga).

Dokonując odpowiednich podstawień wzoru (3) do wzoru (2) oraz otrzymanego wzoru do wzoru (1), otrzymuje się wyrażenie na moc w postaci:

$$N = c_f n^p = \left(-\frac{b}{n^z} v + c_u \right) n^p. \quad (4)$$

Dokonując nowych oznaczeń w wyrażeniu (4), można nadać temu wyrażeniu następującą postać:

$$N_p = d_1 n^{w_{n1}} v + d_2 n^{w_{n2}}, \quad (5)$$

gdzie d_1, d_2, w_{n1}, w_{n2} – stałe wyznaczone metodą najmniejszych kwadratów.

W celu statystycznego potwierdzenia poprawności modelu (5) model ten rozszerzono do następującej postaci:

$$N_p = d_1 n^{w_{n1}} v^{w_{v1}} + d_2 n^{w_{n2}} v^{w_{v2}}, \quad (6)$$

gdzie $d_1, d_2, w_{n1}, w_{n2}, w_{v1}, w_{v2}$ – stałe wyznaczone metodą najmniejszych kwadratów.

Do wyznaczenia współczynników model (5) wymaga najmniej czterech punktów pomiarowych (przypadek interpolacji), a model (6) – najmniej sześciu punktów pomiarowych.

W metodzie Siłukowa, będącej metodą interpolacyjną, wymagane są trzy punkty pomiarowe, ponieważ w wyniku dodatkowych założeń liczba wyznaczanych stałych została zredukowana do trzech, w tym jeden pomiar powinien być wykonany na uwięzi [3]. Jest to założenie niezrozumiałe ze względu na to, że jeżeli istnieje fizyczna możliwość wykonania jednego pomiaru, to nie ma praktycznych powodów do niewykonania większej liczby pomiarów.

Należy zauważyć, że zagadnienie aproksymacji średniokwadratowej modelami (5) i (6) i wyznaczenie współczynników jest zagadnieniem nieliniowym.

Zasadne jest przypuszczenie, że w przypadku badań wykonanych w różnych warunkach pływania bez badań na uwięzi taka informacja w danych pomiarowych

także się znajduje tym pewniejsza, im bliżej warunków pracy na uwięzi wykonano niektóre pomiary. Jeżeli informacje okażą się wystarczające, to nie ma potrzeby wykonywania pomiarów charakterystyk na uwięzi, co na ogół nie jest realne i prawdopodobnie zbędne, pomijając holowniki i jednostki o podobnych funkcjach. Jednakże dysponowanie charakterystykami mocy i momentu na uwięzi jest wskazane na wypadek potrzeby holowania przez statki do tego nieprzewidziane, co niekiedy może mieć miejsce. Mogą być również przydatne w szczególnie ciężkich warunkach pływania.

1.2. Model oparty na przesłankach metody Silovic-Fanceva

Przekształcając wzór na współczynnik momentu, wyrażenie na moment obrotowy na stożku śruby można zapisać następująco [1]:

$$M = cK_M n^2, \quad (7)$$

gdzie:

- c – stała,
- K_M – bezwymiarowy współczynnik momentu,
- n – prędkość obrotowa śruby.

W modelu liniowym Silovic-Fanceva, rozpatrywanym w [3], założono liniową zależność współczynnika momentu K_M od współczynnika posuwu, tutaj zaś założono zależność kwadratową w funkcji posuwu w postaci:

$$K_M = b_1 + b_2 J + b_3 J^2, \quad (8)$$

gdzie $b_1 \div b_3$ – stałe wyznaczane z aproksymacji.

Uwzględniając, że współczynnik posuwu można przedstawić wzorem:

$$J = d \frac{v}{n}, \quad (9)$$

gdzie:

- d – stała,
- v – prędkość statku,
- n – prędkość obrotowa śruby.

Podstawiając wyrażenie (9) do wzoru (8) i tak otrzymane wyrażenie dla K_M do wzoru (7), po uporządkowaniu zmiennych i stałych model charakterystyki momentu obrotowego przyjmie postać:

$$M = g_1 n^2 + g_2 n v + g_3 v^2, \quad (10)$$

gdzie $g_1 \div g_3$ – stałe uzyskiwane z aproksymacji.

Przewidując, że może występować pewien moment szcztątkowy (stały), model (10) można uzupełnić o stałą g_4 , otrzymując ostatecznie następujący model charakterystyki momentu:

$$M = g_1 n^2 + g_2 n v + g_3 v^2 + g_4. \quad (11)$$

Wykorzystując zależność definicyjną mocy od momentu i prędkości obrotowej w postaci:

$$N = 2\pi \cdot 60^{-1} M n = c_\omega M n \text{ [kW]}, \quad (12)$$

po podstawieniu wzoru (11) do wzoru (12) i wprowadzeniu nowych stałych $c_1 \div c_4$ oraz po uzupełnieniu modelu o stałą c_5 , rozszerzony model bazujący na przesłankach modelu Silovic-Fancewa przyjmie postać:

$$N = c_1 n^3 + c_2 n^2 v + c_3 n v^2 + c_4 n + c_5. \quad (13)$$

Stałe $c_1 \div c_5$ wyznaczone są metodą najmniejszych kwadratów, opartą na analizie danych pomiarowych.

2. WYZNACZANIE CHARAKTERYSTYK MOCY UKŁADU NAPĘDOWEGO

W pierwszej kolejności rozpatrzono aproksymację modelem (13), stosując metodę krokowego wyłaniania modelu optymalnego ze względu na najmniejszą wartość sumy kwadratów odchyleń dla kolejno wyłanianych członów funkcji aproksymującej w postaci:

$$N_k = a_k \cdot n^{m_k} \cdot v^{p_k}, \quad (14)$$

gdzie m_k, v_k – wykładniki zadawane i wyłanianie w kroku k .

W pierwszym kroku sprawdzono kolejno wszystkie człony modelu (13) (tab. 2).

Wyłoniono wielomian o parametrach $m_1 = 3$; $p_1 = 0$, dla którego wartość S okazała się najmniejsza.

W drugim kroku aproksymacji tworzone kombinacje liniowe jednomianu wyłonionego w pierwszym kroku z kolejnymi jednomianami ujętymi w tabeli 2.

Jak widać w tabeli 2, w kroku 2 wyłoniono dwa wielomiany dające równorzędne (praktycznie jednakowe) wyniki w aspekcie minimum sumy kwadratów odchyleń S . Są to modele:

$$N_{W1} = a_1 n^3 + a_2 n^2 v, \quad (15)$$

$$N_{W2} = b_1 n^3 + b_2 n v^2. \quad (16)$$

Model (15) jest znany jako wyżej wymieniony model Silowic-Fanceva [3]. Model ten przyjęto dla wykonania kroku 3, będącego próbą znalezienia kolejnego członu aproksymującego.

Powiększanie wielomianu aproksymującego w kroku 3 o kolejny człon (tab. 2) nie zmniejsza istotnie sumy kwadratów odchyleń S . Wartości odchylenia standardowego s wręcz wzrastają wobec małych spadków wartości S , co można zauważyć, porównując wyniki aproksymacji dla kroku 3 (tab. 2) z wartościami osiągniętymi dla modelu w kroku 2. W przypadku pozostałych modeli obserwuje się analogiczne zjawisko. Wynika to ze zmniejszania się liczby stopni swobody przy stosunkowo małym obniżeniu sumy kwadratów S w kolejnym kroku. Wobec braku powtórzeń pomiarów w punktach eksperymentu nie można dokonać klasycznej oceny statystycznej adekwatności modelu.

Tabela 2. Wyniki wyłaniania wielomianowego modelu charakterystyki mocy napędowej statku

Table 2. Results of selecting polynomial model ship propulsion power characteristics

$k = 1$ (krok 1)					
$m_1; p_1$	3; 0	2; 1	1; 2	1; 0	0; 0
S	1,38E6	4,22E6	8,18E6	1,04E7	2,89E7
s	293	514	715	808	1343
$k = 1$ (krok 2)					
$m_2; p_2$		2; 1	1; 2	1; 0	0; 0
S		3,13E5	3,13E5	1,37E6	1,37E6
s		144,4	144,6	302	302
$k = 3$ (krok 3)					
$m_3; p_3$			1; 2	1; 0	0; 0
S			3,13E5	3,10E5	3,11E5
s			149,5	148,7	149,1

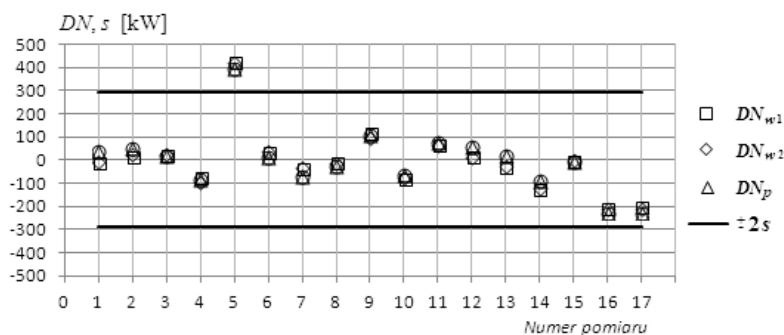
W przypadku średniokwadratowej aproksymacji danych pomiarowych modelem (6) otrzymano następujące wyniki: $S = 3,1E5$; $s = 143,7$ kW oraz wartości wykładników: $w_{n1} = 1,42$; $w_{n2} = 2,71$; $w_{v1} = 1,00$; $w_{v2} = 0,00$. Potwierdzono więc statystycznie zasadność stosowania modelu (5) i brak potrzeby rozszerzania modelu do postaci (6).

Porównując uzyskane wyniki z wynikami uzyskanymi dla modeli (15) i (16), należy uznać, że model (5) jest modelem równorzędnym ze statystycznego punktu widzenia. Wartość S jest wyższa niż dla pozostałych modeli, lecz różnica ta nie jest istotna. Należy przy tym pamiętać, że w przypadku modelu (5) łączna liczba wyznaczanych parametrów wynosi 4, podczas gdy w przypadku modeli (15) i (16) są to dwa parametry. W obydwu przypadkach liczba współzależnych liniowo parametrów wynosi 2.

3. WERYFIKACJA ZBIORU DANYCH POMIAROWYCH I WARTOŚCI PARAMETRÓW MODELU

Wyznaczone modele charakteryzują się prawie identycznymi wynikami aproksymacji. Współczynniki korelacji WK pomiędzy odchyleniami od modeli z aproksymacji są bliskie jedności i wynoszą: $WK\{DN_{w1}; DN_{w2}\} = 1,00$; $WK\{DN_{w1}; DN_p\} = 0,98$; $WK\{DN_{w2}; DN_p\} = 0,98$.

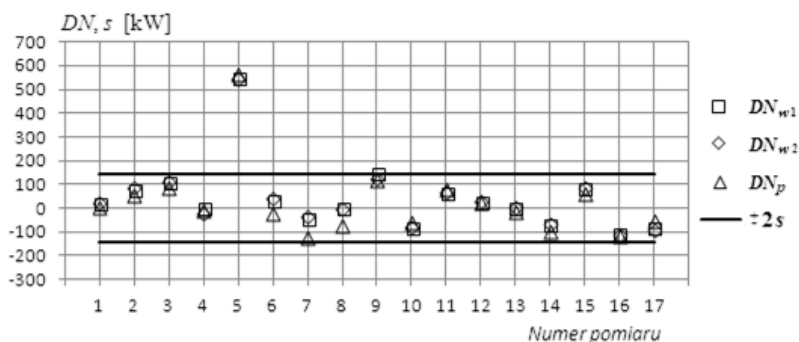
Uzyskane wyniki obrazuje wykres odchyłeń (rys. 1), na którym zaznaczono dodatkowo linie $\pm 2s$.



Rys. 1. Porównanie odchyłeń DN wartości zmierzonych mocy od wyznaczonych z aproksymacji modelami (15); (16) i (5)

Fig. 1. Comparison of differences DN values of measured power and calculated from the approximation models (15); (16) and (5)

Jak widać na rysunku, punkt pomiarowy nr 5 wyróżnia się przekroczeniem wartości $2s$, co wymaga sprawdzenia. Wykonano ponowne wyliczenia parametrów po wyłączeniu ze zbioru danych punktu 5 (tab. 1).



Rys. 2. Porównanie odchyłeń DN wartości zmierzonych mocy od wyznaczonych z aproksymacji modelami (15); (16) i (5) z pominięciem punktu 5 (tab. 1)

Fig. 2. Comparison of differences DN values of measured power and calculated from the approximation models (15); (16) and (5) excluding point 5 (tab. 1)

Okazało się, że nastąpił znaczny spadek odchylenia standardowego oraz wzrost odchylenia mocy z pomiarów dla punktu 5 (rys. 2.)

Jak łatwo dostrzec (rys. 2), usunięcie punktu 5 jest zasadne. Wartości odchyleń dla tego punktu po usunięciu pomiaru nr 5 przekraczają znacząco wartość $3s$.

4. WERYFIKACJA CHARAKTERYSTYK MOCY

Dokonana wyżej statystyczna weryfikacja charakterystyk mocy nie pozwoliła rozstrzygnąć, który z wyłonionych trzech modeli należy przyjąć.

Rozstrzygnięcie tego problemu może przynieść analiza charakterystyk mocy dla pracy na uwięzi. Charakterystyki mocy na uwięzi można otrzymać drogą ekstrapolacji, zadając w modelach (5); (15) i (16) $v = 0$.

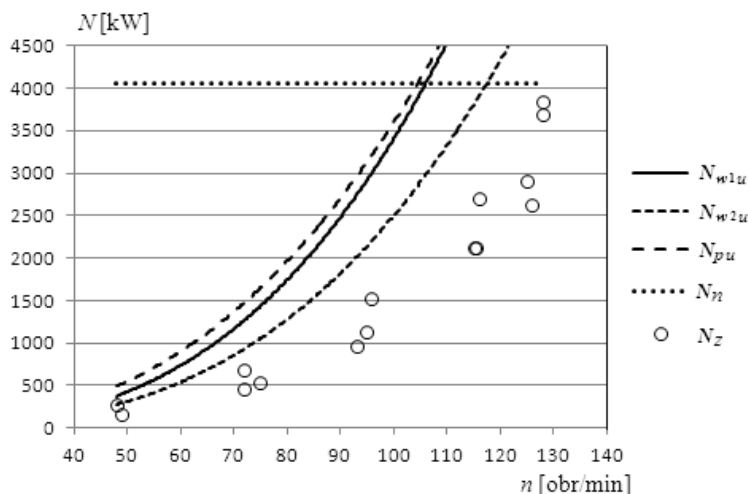
Tak otrzymane modele dla mocy na uwięzi są następujące:

$$N_{pu} = d_2 n^{w_{2n}}, \quad (17)$$

$$N_{w1u} = a_1 n^3, \quad (18)$$

$$N_{w2u} = b_1 n^3. \quad (19)$$

Przebiegi charakterystyk N_{pu} i N_{w1u} są zbliżone, podczas gdy wartości mocy na uwięzi w przypadku charakterystyki N_{w2u} są znacznie niższe (rys. 3).



Rys. 3. Porównanie charakterystyk mocy na uwięzi wyznaczonych z modeli (17)÷(19) drogą ekstrapolacji: N_n – moc znamionowa, N_z – wartości mocy z badań (tab. 1)

Fig. 3. Comparison of mooring power curves determined from models (17)÷(19) by extrapolation: N_n – nominal power, N_z – values of measured power from trials (tab. 1)

Można oczekiwać, że właściwe są charakterystyki na uwięzi (17) i (18) i w tym przypadku charakterystyki mocy (5) i (15). Ostateczne rozstrzygnięcie tego problemu wymagałoby wykonania pomiaru na uwięzi lub przy małej prędkości (holowanie).

PODSUMOWANIE

Kierując się wiedzą o fizycznej naturze charakterystyk napędowych mocy oraz metodami statystycznymi, wyłoniono trzy modele charakterystyk mocy. Jest to nieliniowy model potęgowy (5) i modele wielomianowe (15) i (16). Modele te są równorzędne w aspekcie statystycznym – wyznaczone wartości mocy są zbliżone.

Analiza danych pomiarowych z badań układu napędowego (tab. 1) wykazała, że pomiar nr 5 jest obciążony błędem grubym. Ten pomiar został wykluczony ze zbioru danych pomiarowych.

Stosując ekstrapolację, wyznaczono charakterystyki mocy na uwięzi N_{w1u} ; N_{w2u} i N_{pu} (rys. 3). Ich przebiegi świadczą, że modele (5) i (15) są zbliżone. Model (16) odbiega od tych modeli ze względu na znacznie mniejsze wartości mocy na uwięzi N_{pu} .

Zagadnienie to można rozstrzygnąć, wykonując badania na uwięzi lub zbliżone (holowanie).

LITERATURA

1. Charchalis A., *Opory okrętów wojennych*, Akademia Marynarki Wojennej, Gdynia 2001.
2. Charchalis A., *Warunki przeprowadzania pomiarów napędowych i diagnostycznych w czasie prób morskich*, Journal of KONES Powertrain and Transport, 2006, Vol. 13, No. 4.
3. Giernalczyk M., Górski Z., *Silownie okrętowe. Cz. I. Podstawy napędu i energetyki okrętowej*, Wydawnictwo Akademii Morskiej w Gdyni, Gdynia 2011.
4. Kulczyk J., Skupień E., *Charakterystyki napędowe statku śródlądowego po modernizacji układu napędowego*, Prace Naukowe Politechniki Warszawskiej, Transport, 2012, z. 87.
5. Kulczyk J., Skupień E., *Metody modelowania charakterystyk napędowych statku śródlądowego*, „Logistyka”, 2012, nr 4.
6. Szelangowicz T., Żelazny K., *Prognozowanie charakterystyk napędowych statku ze śrubą stałą podczas pływania w zmiennych warunkach pogodowych*, Zeszyty Naukowe Akademii Morskiej w Szczecinie, 2004, nr 1(73).

MODELING AND DETERMINATION OF POWER PROPULSION CHARACTERISTICS OF THE PROPULSION SYSTEM WITH FIXED PITCH PROPELLER

Summary

The paper characterized the problem of finding propulsion characteristics of the propulsion system with a fixed pitch propeller. For this objective, statistical methods and the physical aspects of the construction of adequate models characteristics were used. Test results of propulsion system of vessel MS Garnuszewski were used for models verification. In total, five statistically comparable models of torque characteristics were developed, of which three models produce consistent results of tethered torque characteristics, obtained by extrapolation.

It has been shown that the other characteristics: power characteristics, characteristics of specific energy consumption per nautical mile should be determined with definitional formulas after determining torque characteristics. Put attention to the need for analysis of deviations of measurement points on the model and the removal of excessive deflecting points.

Keywords: *ship propulsion characteristics for ships with fixed propeller, modeling and determination of power characteristics, vessel propulsion, mooring trial.*