

## MODELOWANIE CHARAKTERYSTYKI PRĘDKOŚCI JEDNOSTKI ZE ŚRUBAMI NASTAWNYMI NA PODSTAWIE WYNIKÓW BADAŃ

## MODELING OF THE SPEED CHARACTERISTIC OF THE SHIP WITH THE CONTROL PITCH PROPELLERS BASED ON RESEARCH RESULTS

**Stanisław Polanowski**

Uniwersytet Morski w Gdyni, Morska 81-87, 81-225 Gdynia, Wydział Mechaniczny,  
Katedra Siłowni Okrętowych, e-mail: s.polanowski@wm.am.gdynia.pl,  
ORCID 0000-0003-0501-6266

**Streszczenie:** W artykule przedstawiono proces i wyniki wyłaniania modelu charakterystyki napędowej prędkości dla dwuwałowej jednostki ze śrubami nastawnymi. Sformułowano trzy postacie modeli charakterystyk: wielomian potęgowy budowany metodą aproksymacji krokowej, wielomian potęgowy drugiego stopnia stosowany wprost, wielomian potęgowy drugiego stopnia budowany krokowo, wielomian (jednomian) o potęgach rzeczywistych. Modele liczbowe wyłoniono metodą najmniejszych kwadratów, kierując się minimum sum kwadratów odchyień. W wyniku odrzucenia trzech punktów jako nadmiernie odchyłających się wykonano obliczenia także dla zbioru dwunastopunktowego. Następnie oszacowano zachowanie się modeli w punktach brzegowych, którymi są zerowe nastawy, zerowe prędkości obrotowe i zerowe prędkości jednostki. W wyniku przeprowadzonych analiz uznano, że właściwym modelem może być model o potęgach rzeczywistych, a kolejnym modelem – wielomian potęgowy budowany metodą krokową.

**Słowa kluczowe:** jednostka pływająca, charakterystyka napędowa prędkości, badania morskie, modelowanie charakterystyki.

**Abstract:** The paper presents the process and results of selecting the speed drive characteristics model for a two-shaft ship with control pitch propellers. Three forms of models of characteristics were formulated: a polynomial created by the stepwise approximation method, a second degree power polynomial applied directly, a second degree power polynomial built stepwise, a polynomial (monomial) with real powers. Numerical models were determined using the least-squares method, guided by the minimum sum of squared deviations. As a result of rejecting the three points as excessively deviating, calculations were also made for the twelve-point set. Next, the behavior of the models at the boundary points, which are zero pitch, zero revolution and zero speeds of the ship, were estimated. As a result of the conducted analyses, it was recognized that the right model may be a model with real powers, and the next model is a power polynomial built using a stepwise method.

**Keywords:** vessel, speed drive characteristic, marine research, characteristic modeling.

## 1. WSTĘP

Współcześnie ukształtowała się trwała tendencja ograniczania zużycia paliw przez silniki okrętowe. W przeszłości zainteresowanie ograniczaniem zużycia paliw nasilało się okresowo w związku ze wzrostem ich cen. Takie przesłanki były podstawą wykonania pomiarów w celu sporządzenia charakterystyk napędowych ORP „Hydrograf”, zwłaszcza że jako paliwo stosowano lekki olej napędowy o wysokiej czystości. Obecnie znajomość charakterystyk, a przede wszystkim charakterystyk zużycia paliwa na milę morską, ma duże znaczenie nie tylko ze względu na minimalizację kosztów paliw, lecz także z uwagi na potrzebę ograniczania emisji szkodliwych składników produktów spalania.

Wykonano badania w stałych warunkach morskich 1–2°B, na podstawie których sporządzono charakterystyki napędowe kilku wielkości.

Wyniki pomiarów oraz zbiór wyznaczonych charakterystyk nie były dotychczas publikowane. Znajdują się w sprawozdaniu z pracy [Polanowski i Czyż], będącym w posiadaniu autora – mogą być udostępnione zainteresowanym.

Podstawową charakterystyką, której wyznaczenia oczekiwano, była charakterystyka godzinowego zużycia paliwa przez silniki z zamiarem jej wykorzystania do minimalizacji zużycia paliwa przez odpowiedni dobór nastaw i prędkości obrotowej silników.

Artykuł dotyczy wyłącznie charakterystyki napędowej prędkości.

Do obróbki danych i modelowania charakterystyk zastosowano nowe podejście w porównaniu z poprzednim.

## 2. PRZEDMIOT I WYNIKI BADAŃ

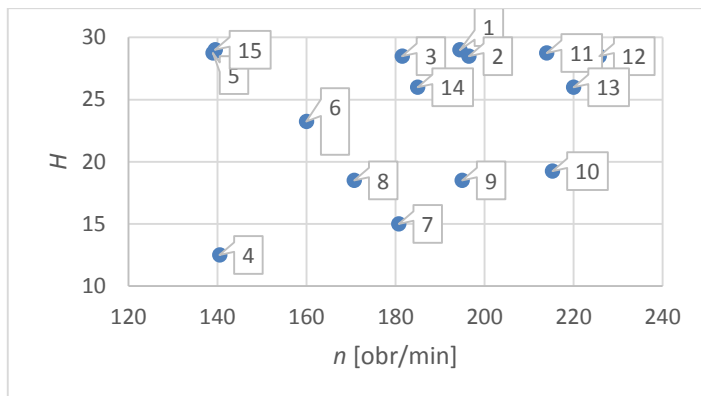
Przedmiotem badań było wyznaczenie charakterystyk napędowych ORP „Hydrograf”. Układ napędowy ORP „Hydrograf” jest układem dwuwałowym ze śrubami nastawnymi.

Plan badań przewidywał wykonanie pomiarów kilku wielkości w równomiernie rozmieszczonych punktach obszaru ograniczonego dopuszczalnymi wartościami nastaw śrub i prędkości obrotowych wałów. Prędkości obrotowe i nastawy śrub są wielkościami niezależnymi (wejściowymi, zadawanymi).

Z różnych przyczyn w badaniach morskich na ogół nie uzyskuje się ścisłego wykonania założonego planu pomiarów.

Rozmieszczenie zrealizowanych punktów pomiarowych w obszarze badań pokazano na rysunku 1.

Głównymi zmierzonymi i zarejestrowanymi wielkościami są: prędkość jednostki, moment obrotowy, godzinowe zużycie paliwa, wskaźnik obciążenia. W dwóch przypadkach pomiar powtórzono: pomiary 1 i 2 oraz 5 i 15. Należy pamiętać, że układ napędowy jest dwuwałowy.



**Rys. 1.** Zrealizowany program badań układu napędowego:  $H$  [działki] – nastawa śruby (średnia),  $n$  – prędkość obrotowa (średnia)

**Fig. 1.** Completed program of propulsion system research:  $H$  [graduations] – propeller pitch (average),  $n$  – rotation speed (average)

Wyniki pomiarów prędkości jednostki  $v$  w funkcji  $H$  i  $n$  przytoczono w tabeli 1.

**Tabela 1.** Wyniki pomiarów prędkości  $v$  i momentu obrotowego  $M$  jednostki

**Table 1.** The results of measurements of velocity  $v$  and torque  $M$  of the ship

Numer pomiaru	$H$	$n$	$v$	$M$
	[działki]	[obr/min]	[kn]	[kNm]
1	29,0	194,5	15,0	39,8
2	28,5	196,5	15,4	38,7
3	28,5	181,5	13,4	34,2
4	12,5	140,5	6,7	5,9
5	28,75	139,0	11,5	17,6
6	23,25	160,0	11,2	16,5
7	15,0	180,8	8,6	10,9
8	18,5	170,8	10,1	12,2
9	18,5	195,0	11,3	15,9
10	19,25	215,3	12,5	20,1
11	28,75	214,0	16,3	46,3
12	28,5	225,8	16,9	51,9
13	26,0	220,0	15,6	41,0
14	26,0	185,0	13,6	28,3
15	29,0	139,5	11,5	17,3

Do sprawdzenia ewentualnego wpływu stanu morza i siły wiatru na wyniki badań wykorzystano wyniki pomiarów momentu obrotowego (tab. 1). Nie stwierdzono istotnego wpływu momentu obrotowego  $M$  (jako trzeciego parametru) na prędkość jednostki  $v$ , a jedynie zależność modelu od  $H$  i  $n$ , co potwierdza brak wpływu zmienności stanu morza podczas pomiarów.

### 3. PODSTAWOWE ASPEKTY MODELOWANIA CHARAKTERYSTYKI PRĘDKOŚCI $v = f(H, n)$

Prędkość śruby, pracującej bez poślizgu, wyraża oczywista zależność  $v = H \cdot n$ . Uwzględniając poślizg, prędkość jednostki w najprostszym przypadku można wyrazić wzorem:

$$v = c \cdot H \cdot n, \quad (1)$$

gdzie  $c$  – stała.

Powyższe uwzględnienie poślizgu może być niewystarczające, stąd celowe jest uzupełnienie jednomianu (1) dodatkowym wielomianem, co można zapisać następująco:

$$v_{Ak} = a_1 \cdot H \cdot n + \sum_{i=2}^{i=k} a_i J_i, \quad (2)$$

Jednomiany  $J_i$  są tu założone z góry lub poszukiwane metodą aproksymacji krokowej. Liczba  $k$  jednomianów jest wyznaczana w procesie aproksymacji.

Jak wiadomo, w charakterze jednomianów mogą być wybierane dowolne liniowo niezależne funkcje. W pracy wykorzystano jednomiany potęgowe  $H$  i  $n$  z krokowym dobieraniem potęg (3).

$$J_i = H^{w_{Hi}} \cdot n^{w_{ni}}. \quad (3)$$

Jako kryterium wyboru wartości potęg  $w_{Hi}$  i  $w_{ni}$  jednomianu  $J_i$  w kolejnym kroku aproksymacji przyjęto uzyskanie najmniejszej wartości sumy kwadratów odchyłań w tym kroku.

Niekiedy do aproksymacji stosuje się pełne lub częściowe wielomiany potęgowe. Do aproksymacji zbioru pomiarowego prędkości statku ze śrubami nastawnymi zaproponowano np. pełny wielomian potęgowy drugiego stopnia w postaci [Giernalczyk i Górski 2011]:

$$v_{Bk} = a_1 + a_2 \cdot H + a_3 \cdot n + a_4 \cdot H \cdot n + a_5 \cdot H^2 + a_6 \cdot n^2. \quad (4)$$

W pracy do aproksymacji zbioru pomiarowego (tab. 1) zastosowano zarówno bezpośrednio model (4), jak i model tworzony drogą krokowego doboru jednomianów spośród jednomianów modelu (4). Uzyskano wyniki pokrywające się w znacznym stopniu, lecz nie zawsze tak jest. Łatwo zauważyć, że wielomian (4) niezamierzenie zawiera jednomian (1). W rzeczywistości liczba  $k$  jednomianów

może okazać się mniejsza od 6 ze względu na zbyt mały wpływ niektórych jednomianów na sumę kwadratów odchyień lub może okazać się niewystarczająca, zwłaszcza jeżeli model jest w rzeczywistości wyższego rzędu.

Ostatnim modelem, który zastosowano do aproksymacji danych jest wielomian bazujący na jednomianie potęgowym o poszukiwanych wykładnikach rzeczywistych  $w_{Hi}$  i  $w_{ni}$  (5):

$$v_c = a_1 \cdot H^{w_{H1}} \cdot n^{w_{n1}} + \sum_{i=2}^{i=k} a_i J_i . \quad (5)$$

#### 4. ANALIZA WYNIKÓW APROKSYMACJI PEŁNEGO ZBIORU 15 PUNKTÓW

Wyniki aproksymacji pełnego zbioru 15 danych metodą aproksymacji krokowej, dobieganymi krokowo jednomianami, zamieszczono w tabeli 2.

**Tabela 2.** Wyniki aproksymacji 15 punktów modelem  $v_{Ak}$  (2) metodą krokowego doboru jednomianów:  $S$  – suma kwadratów odchyień,  $st$  – standardowe odchylenie,  $Dv_{max}$ ,  $Dv_{min}$  – maksymalne i minimalne odchylenia dla zbioru,  $sw$  – stopień swobody

**Table 2.** Results of approximation of 15 points with model  $v_{Ak}$  (2) by stepwise selection of monomials:  $S$  – sum of squared deviations,  $st$  – standard deviation,  $Dv_{max}$ ,  $Dv_{min}$  – maximum and minimum deviations for the set,  $sw$  – degree of freedom

$J_{Ai}$	$J_{A1}$	$J_{A2}$	$J_{A3}$	$J_{A4}$	$J_{A5}$	$J_{A6}$
$w_{Hi}$	1	0	2	1	0	0
$w_{ni}$	1	0	1	2	2	1
$v_{Ak}$	$v_{A1}$	$v_{A2}$	$v_{A3}$	$v_{A4}$	$v_{A5}$	$v_{A6}$
$S_k$	12,89	1,61	0,91	0,88	0,78	0,66
$st_k$	0,96	0,35	0,28	0,28	0,28	0,27
$Dv_{maxk}$	1,80	0,51	0,35	0,35	0,37	0,47
$Dv_{mink}$	-1,04	-0,81	-0,66	-0,68	-0,64	-0,53
$sw_k$	14	13	12	11	10	9

Bazując na modelu (2), uzyskano wartość  $st_3 = 0,28$  dla modelu  $v_{A3}$  (tab. 2). Dalsze kroki aproksymacji nie zmniejszają istotnie wartości  $st$ .

Wyznaczony tą metodą wielomian aproksymujący ma postać:

$$v_{A3\_15} = 0,00287 \cdot H \cdot n + 2,076 - 0,0000194 \cdot H^2 \cdot n \text{ [kn]} \quad (6)$$

W tabeli 3 przytoczono wyniki aproksymacji pełnym wielomianem drugiego stopnia (4).

**Tabela 3.** Wyniki bezpośredniej aproksymacji wielomianem drugiego stopnia (4) dla 15 punktów

**Table 3.** The results of direct approximation with the second degree polynomial (4) for 15 points

$J_{Bi}$	$J_{B1}$	$J_{B2}$	$J_{B3}$	$J_{B4}$	$J_{B5}$	$J_{B6}$
$w_{Hi}$	0	1	0	1	2	0
$w_{ni}$	0	0	1	1	0	2
$v_{Ak}$	$v_{B1}$	$v_{B2}$	$v_{B3}$	$v_{B4}$	$v_{B5}$	$v_{B6}$
$S_k$	119,54	42,27	2,00	1,09	0,80	0,68
$st_k$	2,92	1,80	0,41	0,32	0,28	0,28
$Dv_{maxk}$	4,26	2,42	0,63	0,34	0,38	0,48
$Dv_{mink}$	-5,94	-3,19	-0,72	-0,69	-0,65	-0,52
$sw_k$	14	13	12	11	10	9

Wartość  $st_5 = 0,28$  osiągnięto dla  $v_{B5}$  (tab. 3). Bardzo bliskim modelem jest model  $v_{B4}$ .

Model  $v_{B5}$  ma postać:

$$v_{B5_{15}} = 0,064 + 0,323 \cdot H - 0,00247 \cdot n + 0,00236 \cdot H \cdot n - 0,0086 \cdot H^2 \text{ [kn]} \quad (7)$$

W tabeli 4 zamieszczono wyniki aproksymacji krokowej z wykorzystaniem jednomianów wielomianu (4).

**Tabela 4.** Wyniki aproksymacji krokowej jednomianami modelu (4) dla 15 punktów

**Table 4.** The results of stepwise approximation by monomials of the model (4) for 15 points

$J_{BSi}$	$J_{BS1}$	$J_{BS2}$	$J_{BS3}$	$J_{BS4}$	$J_{BS5}$	$J_{BS6}$
$w_{Hi}$	1	0	0	1	2	0
$w_{ni}$	1	0	2	0	0	1
$v_{BSk}$	$v_{BS1}$	$v_{BS2}$	$v_{BS3}$	$v_{BS4}$	$v_{BS5}$	$v_{BS6}$
$S_k$	12,89	1,61	1,14	1,06	0,80	0,68
$st_k$	0,96	0,35	0,31	0,31	0,28	0,28
$Dv_{maxk}$	1,80	0,51	0,33	0,38	0,39	0,48
$Dv_{mink}$	-1,04	-0,81	-0,67	-0,64	-0,64	-0,52
$sw_k$	14	13	12	11	10	9

Model aproksymacji krokowej wielomianem drugiego stopnia ma postać:

$$v_{BS5_{15}} = 0,002077 \cdot H \cdot n + 0,216 + 0,0000144 \cdot n^2 + 0,3158 \cdot H - 0,00734 \cdot H^2 \text{ [kn]} \quad (8)$$

Wyniki aproksymacji modelem (5) zamieszczono w tabeli 5.

**Tabela 5.** Wyniki aproksymacji modelem (5) dla 15 punktów

**Table 5.** The results of approximation with the model (5) for 15 points

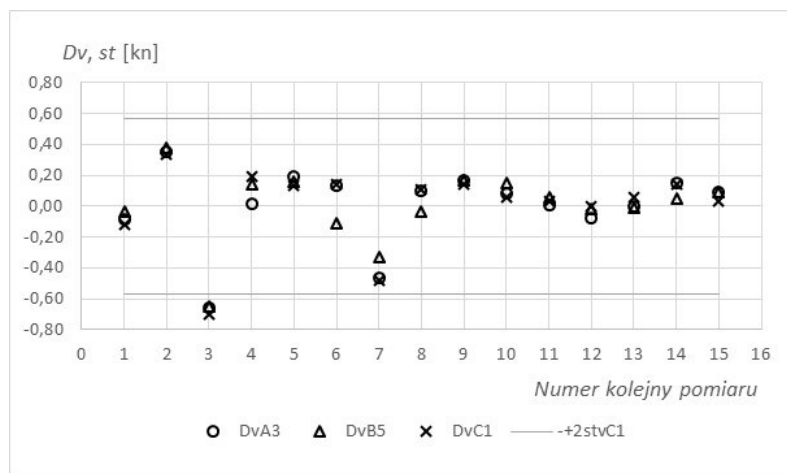
$J_{Ci}$	$J_{C1}$	$J_{C2}$	$J_{C3}$	$J_{C4}$
$w_{Hi}$	0,68	0	1	0
$w_{ni}$	0,83	0	0	1
$v_{Ak}$	$v_{C1}$	$v_{C2}$	$v_{C3}$	$v_{C4}$
$S_k$	0,99	0,98	0,98	0,96
$st_k$	0,29	0,30	0,31	0,33
$Dv_{maxk}$	0,33	0,34	0,34	0,32
$Dv_{mink}$	-0,70	-0,70	-0,70	-0,71
$sw_k$	12	11	10	9

Równanie aproksymacji  $v_{C1}$  zawiera tylko jeden człon (jednomian), dla którego  $st = 0,29$ . Dodawanie innych jednomianów nie wpływa znacząco na zmniejszenie  $S$ . Zadając liczbę stopni swobody, uwzględniono to, że dla tego jednomianu wyznaczano trzy współczynniki: mnożnik i dwie potęgi rzeczywiste.

Model aproksymacji ma postać:

$$v_{C1_{15}} = 0,01928 \cdot H^{0,68} \cdot n^{0,83} \text{ [kn]}. \quad (9)$$

Na rysunku 2 porównano odchylenia wartości z aproksymacji powyższymi modelami od wartości zmierzonych w poszczególnych punktach.



**Rys. 2.** Odchylenia dla aproksymacji opartej na 15 punktach:  $Dv_{A3}$  – dla modelu (2),  $Dv_{B5}$  – dla modelu (4),  $Dv_{C1}$  – dla modelu (5),  $\pm 2stvc1$  – podwojona wartość odchylenia standardowego  $v_{C1}$

**Fig. 2.** The deviations for approximation based on 15 points:  $Dv_{A3}$  – for model (2),  $Dv_{B5}$  – for model (4),  $Dv_{C1}$  – for model (5),  $\pm 2stvc1$  – the twice value of standard deviation of  $v_{C1}$

Ma tu miejsce duża zbieżność odchyłeń dla modeli. Współczynniki korelacji WK wynoszą:  $WK[Dv_A; Dv_B] = 0,92$ ;  $WK[Dv_A; Dv_C] = 0,97$ ;  $WK[Dv_B; Dv_C] = 0,92$ .

## 5. APROKSYMACJA ZREDUKOWANEGO DO 12 PUNKTÓW ZBIORU DANYCH

W wyniku przeprowadzonych analiz odchyłeń ze zbioru aproksymowanego usunięto trzy nadmiernie odchylające się punkty pomiarowe, redukując zbiór do 12 punktów. Usunięto punkty: 2; 3; 7. W tabeli 6 zamieszczono wyniki aproksymacji zbioru modelem  $v_A(2)$ .

**Tabela 6.** Wyniki aproksymacji krokowej modelem  $v_A(2)$  dla 12 punktów

*Table 6. The results of stepwise approximation with the model (2) for 12 points*

$J_{Ai}$	$J_{A1}$	$J_{A2}$	$J_{A3}$	$J_{A4}$	$J_{A5}$	$J_{A6}$
$w_{Hi}$	1	0	2	1	0	1
$w_{ni}$	1	0	1	2	2	0
$v_{Ak}$	$v_{A1}$	$v_{A2}$	$v_{A3}$	$v_{A4}$	$v_{A5}$	$v_{A6}$
$S_k$	10,66	0,730	0,068	0,026	0,026	0,022
$st_k$	0,98	0,27	0,09	0,06	0,06	0,06
$Dv_{maxk}$	1,78	0,43	0,12	0,07	0,07	0,06
$Dv_{mink}$	-1,14	-0,36	-0,14	-0,11	-0,11	-0,07
$sw_k$	11	10	9	8	7	6

Łatwo zauważyć, że odpowiednim modelem jest  $v_{A4}$ , dla którego parametry  $S$  i  $st$  osiągają wartość najmniejszą (tab. 6). Wyłoniony model aproksymacji ma postać:

$$v_{A4\_12} = 3,334 \cdot H \cdot n + 1,66 - 0,0000263 \cdot H^2 \cdot n - 0,00000099 \cdot H \cdot n^2 \text{ [kn]}. \quad (10)$$

Wyniki aproksymacji wielomianem potęgowym drugiego stopnia przytoczono w tabeli 7.

**Tabela 7.** Wyniki aproksymacji wielomianem drugiego stopnia (4) dla 12 punktów

*Table 7. The results of approximation with the second degree polynomial (4) for 12 points*

$J_{Bi}$	$J_{B1}$	$J_{B2}$	$J_{B3}$	$J_{B4}$	$J_{B5}$	$J_{B6}$
$w_{Hi}$	0	1	0	1	2	0
$w_{ni}$	0	0	1	1	0	2
$v_{Ak}$	$v_{B1}$	$v_{B2}$	$v_{B3}$	$v_{B4}$	$v_{B5}$	$v_{B6}$
$S_k$	95,00	40,09	0,67	0,087	0,024	0,024
$st_k$	2,94	2,00	0,273	0,104	0,059	0,063
$Dv_{maxk}$	4,22	2,41	0,36	0,15	0,08	0,08
$Dv_{mink}$	-5,98	-3,19	-0,49	-0,13	-0,08	-0,08
$sw_k$	11	10	9	8	7	6



Wyłoniony model jest następujący:

$$v_{BS_{1,2}} = -0,496 + 0,2352 \cdot H + 0,01303 \cdot n + 0,001775 \cdot H \cdot n + 0,00451H^2 \text{ [kn]}. \quad (11)$$

W tabeli 8 zamieszczono wyniki aproksymacji krokowe wielomianem drugiego stopnia, gdzie włączając do modelu kolejny jednomian, kierowano się jego maksymalnym wpływem na zmniejszenie sumy kwadratów odchyleń.

**Tabela 8.** Wyniki aproksymacji krokowej jednomianami modelu (4) dla 12 punktów

**Table 8.** The results of stepwise approximation with the monomials of model (4) for 12 points

$J_{BSi}$	$J_{BS1}$	$J_{BS2}$	$J_{BS3}$	$J_{BS4}$	$J_{BS5}$	$J_{BS6}$
$w_{Hi}$	1	0	0	1	2	0
$w_{ni}$	1	0	1	0	0	2
$v_{BSk}$	$v_{BS1}$	$v_{BS2}$	$v_{BS3}$	$v_{BS4}$	$v_{BS5}$	$v_{BS6}$
$S_k$	10,657	0,730	0,223	0,087	0,024	0,024
$st_k$	0,984	0,270	0,157	0,104	0,059	0,063
$Dv_{maxk}$	1,78	0,43	0,16	0,15	0,08	0,08
$Dv_{mink}$	-1,14	-0,36	-0,31	-0,13	-0,08	-0,08
$sw_k$	11	10	9	8	7	6

Model aproksymacji krokowej wielomianem drugiego stopnia ma postać:

$$v_{BS_{5,12}} = 0,0018 \cdot H \cdot n - 0,496 + 0,013 \cdot n + 0,2352 \cdot H - 0,005 \cdot H^2 \text{ [kn]} \quad (12)$$

Model aproksymacji wyznaczony metodą krokową (tab. 8) jest identyczny z wyznaczonym typowym rozwinięciem wielomianu 2 stopnia (tab. 7), lecz model B ujawnia wpływy poszczególnych jednomianów na obniżenie S.

W przypadku aproksymacji modelem C o rzeczywistych potęgach, rozwiązaniem okazał się model (5) na bazie jednego jednomianu potęgowego (tab. 9).

**Tabela 9.** Wyniki aproksymacji modelem (5) dla 12 punktów

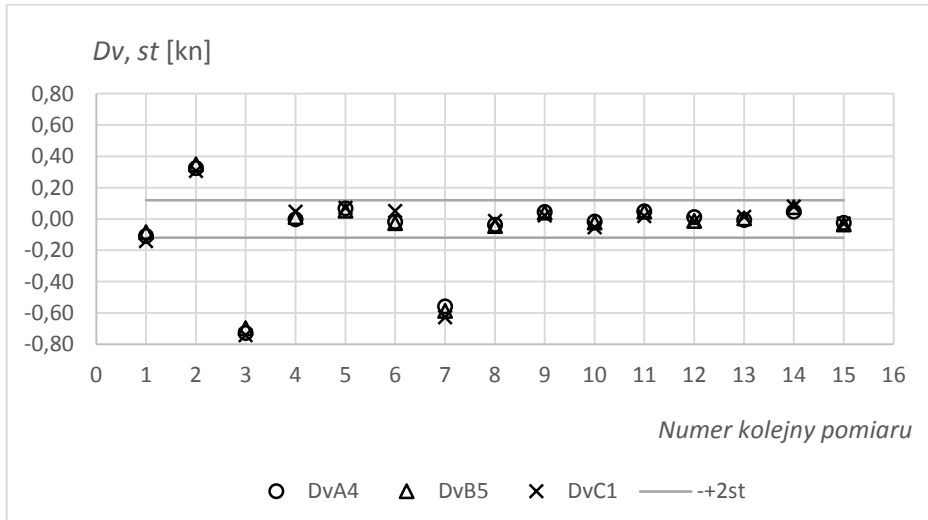
**Table 9.** The results of approximation with the model (5) for 12 points

$J_{Ai}$	$J_{C1}$	$J_{C2}$	$J_{B3}$	$J_{B4}$
$w_{Hi}$	0,66	0	1	0
$w_{ni}$	0,82	0	0	1
$v_{Ak}$	$v_{C1}$	$v_{C2}$	$v_{C3}$	$v_{C4}$
$S_k$	0,041	0,037	0,036	0,035
$st_k$	0,067	0,068	0,072	0,076
$Dv_{maxk}$	0,08	0,08	0,08	0,08
$Dv_{mink}$	-0,14	-0,13	-0,13	-0,14
$sw_k$	9	8	7	6

Model charakterystyki prędkości dla modelu  $C$  jest następujący:

$$v_{C1,12} = 0,02178 \cdot H^{0,66} \cdot n^{0,82} \text{ [kn]}. \quad (13)$$

Ma miejsce duża zbieżność odchyleń dla poszczególnych modeli (rys. 3).



**Rys. 3.** Odchylenia dla aproksymacji opartej na 12 punktach:  $Dv_{A4}$  – dla modelu (2),  $Dv_{B5}$  – dla modelu (4),  $Dv_{C1}$  – dla modelu (5),  $\pm 2st$  – dwukrotna wartość odchylenia standard  $v_{C1}$

**Fig. 3.** The deviations for approximation based on 12 points:  $Dv_{A4}$  – for model (2),  $Dv_{B5}$  – for model (4),  $Dv_{C1}$  – for model (5),  $\pm 2st$  – the twice value of standard deviation of  $v_{C1}$

Zbieżność odchyleń dla poszczególnych modeli jest jeszcze większa niż w przypadku wyżej przytoczonych wyników aproksymacji na zbiorze 15 punktów. Współczynniki korelacji WK pomiędzy odchyleniami dla poszczególnych modeli wynoszą:  $WK[Dv_A; Dv_B] = 0,997$ ;  $WK[Dv_A; Dv_C] = 0,992$ ;  $WK[Dv_B; Dv_C] = 0,991$ .

## 6. ANALIZA WŁAŚCIWOŚCI MODELI W PUNKTACH BRZEGOWYCH CHARAKTERYSTYKI PRĘDKOŚCI

Do punktów brzegowych należą punkty minimalnych i maksymalnych oraz zerowych wartości skoku śrub i prędkości obrotowej, a także zerowej prędkości statku. W przypadku aproksymacji 15-punktowej jedynie model  $C$  daje oczekiwane zerowe wartości we wszystkich punktach brzegowych (tab. 10).

**Tabela 10.** Wartości  $v$  wyliczone dla punktów brzegowych dla aproksymacji 15-punktowej

*Table 10. Values of  $v$  calculated for boundary points for 15 point approximation*

Numer	Działki	[obr/min]	[kn]	[kn]	[kn]
	$H$	$n$	$v_A$	$v_B$	$v_C$
1	0	0	2,08	0,06	0
2	0	140	2,08	0,06	0
3	0	230	2,08	0,06	0
4	12,5	0	2,08	2,78	0
5	29,0	0	2,08	2,20	0

W przypadku aproksymacji na zbiorze 12-punktowym sytuacja jest analogiczna (tab. 11).

**Tabela 11.** Wartości  $v$  wyliczone dla punktów brzegowych dla aproksymacji 12-punktowej

*Table 11. Values of  $v$  calculated for boundary points for 12 point approximation*

Numer	Działki	[obr/min]	[kn]	[kn]	[kn]
	$H$	$n$	$v_A$	$v_B$	$v_C$
1	0	0	1,66	-0,50	0
2	0	140	1,66	1,33	0
3	0	230	1,66	2,50	0
4	12,5	0	1,66	2,42	0
5	29,0	0	1,66	6,32	0

Jeżeli utworzyć model  $v_{C2}$ , czyli włączyć stałą do modelu, to dla każdego punktu brzegowego wartość  $v_{C2} = 0,082$  kn, a więc jest bliska zeru.

## 7. PODSUMOWANIE

Porównanie wyników aproksymacji danych wytypowanymi modelami pokazuje, że wyłonione modele liczbowe przybliżają wyniki badań z praktycznie tą samą dokładnością.

Model (5) daje oczekiwane wartości prędkości w punktach brzegowych pola pracy układów napędowych.

Największe odchylenia w punktach brzegowych daje model (4).

Należy zauważyć, że aproksymacja modelem (3) wymaga wyznaczenia najmniejszej liczby trzech stałych.

Aproksymacja pełnym wielomianem drugiego stopnia jest najmniej efektywna i może niekiedy prowadzić do pominięcia bazowego jednomianu (1), teoretycznie uzasadnionego modelu, maskując jego fizyczną istotę.

## LITERATURA

- Giernalczyk, M., Górski, Z., 2011, *Siłownie okrętowe*, cz. I, Wydawnictwo Akademii Morskiej w Gdyni, Gdynia.
- Polanowski, S., Czyż, S., 1979, *Charakterystyki układu ruchowego ORP „Hydrograf”*. *Sprawozdanie z badań*, Wyższa Szkoła Marynarki Wojennej w Gdyni, Instytut Technicznej Eksploatacji Okrętów, Gdynia.