

**Monika BORTNOWSKA**

Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny,  
Szczecin

## **WYKORZYSTANIE ANALIZY REGRESJI DLA WSTĘPNEGO WYZNACZENIA GŁÓWNYCH CHARAKTERYSTYK POJAZDOWCA**

### **Słowa kluczowe**

Statek ro-ro (pojazdowiec), projekt wstępny, analiza statystyczna, wymiary główne, parametry projektowe pojazdownca.

### **Streszczenie**

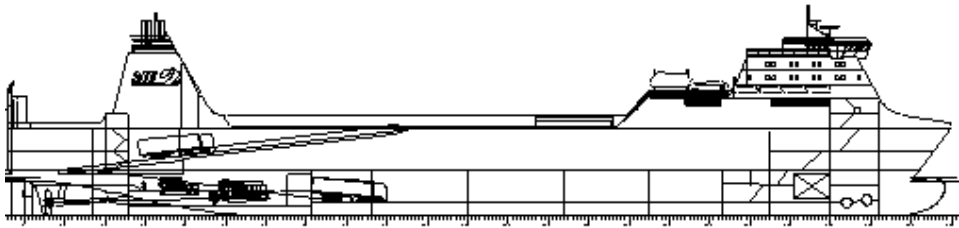
W artykule przedstawiono główne charakterystyki rozwiązań projektowych typowych pojazdowców, m.in. rozplanowanie przestrzenne statku, typ konstrukcyjny. Przy wykorzystaniu analizy regresji oceniono wpływ istotności badanych parametrów. Zawarte w artykule zależności regresyjne jedno- i wieloparametrowe umożliwiają we wczesnym etapie projektowania oszacowanie wielkości statku-pojazdownca, jak i głównych jego charakterystyk.

### **1. Wprowadzenie**

Pojazdownce (*ro-ro trailer ships*) należą do grupy specjalistycznych statków poziomego ładowania, znanych pod nazwą ro-ro (*roll on-roll off*). Statki te przeznaczone są przede wszystkim do przewozu samochodów ciężarowych i naczep drogowych, ale również do przewozu kontenerów (w tym kontenerów chłodzonych) – rys. 1.

Statki poziomego ładownia charakteryzują się dużą różnorodnością typów. W tej grupie wyróżnia się m.in.: promy pasażersko-samochodowe, promy kolejowe, samochodowce, pojazdowce, chłodniowce, uniwersalne ro-ro, tj.: con-ro, bulk-ro, sto-ro itd. [2]. Cechą charakterystyczną wszystkich statków poziomego ładowania jest to, że ładunek transportowany jest do ich przestrzeni ładunkowej po trasach poziomych i w taki sam sposób odbywa się manipulowanie ładunkiem, jak również rozładowanie. Każdy z grupy statków poziomego ładowania różni się nie tylko rodzajem przewożonego ładunku, ale również konstrukcją statku, jak i stosowaną na nim technologią przeładunku.

W artykule po zdefiniowaniu głównych parametrów projektowych wybranego typu statku ro-ro zostaną opracowane wstępne zależności funkcyjne do oszacowania głównych charakterystyk pojazdowca. Zależności te będą mogły być wykorzystane przy opracowywaniu projektu koncepcyjnego statku pojazdowca, tj: wielkość statku, jego parametry masowe, jak i parametry dotyczące napędu – dla założonych parametrów wejściowych.



Rys. 1. Widok boczny sylwetki typowego pojazdowca [3]

## 2. Baza danych parametrów techniczno-eksploatacyjnych pojazdowców

Baza danych cech techniczno-eksploatacyjnych pojazdowców biorących udział w analizie składa się z 38 statków z ostatnich lat. Nie jest ona w pełni kompletnym zbiorem danych z uwagi na trudności dostępu do niektórych danych technicznych, jednakże pozwoliła na przeprowadzenie obliczeń.

Pod względem wielkości dominują statki średnie od 5000÷10000 DWT, z kilkoma wyjątkami przekraczającymi 12500 DWT. Całkowita długość linii ładunkowej mieści się w granicach od 1500 do 3800 m. Są to statki najbardziej uniwersalne, eksploatowane zarówno na szlakach oceanicznych, jak i na liniach krótkich.

Przykładowe charakterystyki kilku wybranych spośród bazy danych statków, tj.: wymiary główne, parametry masowe oraz dane dotyczące systemu energetycznego przedstawiono w zbiorczej tabeli 1.

Tabela 1. Zestawienie wymiarów głównych, parametrów masowych i napędowych pojazdowców – fragment bazy danych [3], [5]

Rok budowy	$\Pi_{\text{pokł}}$	$L_{\text{ład}}$ [m]	$L_{\text{pp}}$ [m]	B [m]	$H_{\text{gi}}$ [m]	$H_{\text{max}}$ [m]	T [m]	DWT [t]	D [t]	$M_{\text{SP}}$ [t]	GT [-]	V [w]	Moc SG [kW]	Moc elektrowni [kW]	$D_{\text{snaby}}$ [m]	Liczba śrub	Stery strumien.	Moc sterów strumien.	
1	2000	3	2640	182,39	26	8,6	16,7	5,7	7730	-	8018	22900	21,6	16200	6410	5,0	2	1D	1400
2	2000	3	1562	134	23,2	7,4	13,15	5,01	4593	11472	6879	13073	19,4	10740	3173	4,0	2	2D	1820
3	2000	3	1870	148,77	20,6	8	13,8	6,6	8050	12100	4050	11400	20	12600	4200	-	1	1D, 1R	1400
4	2006	4	2960	190	25,5	9	15,65	7,22	11776	25170	13394	28301	22,7	25200	8680	5,4	2	2D	1700
5	-	3	2640	182,39	26	8,6	16,7	5,7	7730	-	-	22900	21,6	16200	6080	-	-	1D	1400
6	2006	4	3735	182,39	26	-	16,7	6,45	9150	-	-	29004	21,5	16200	6080	-	-	1D	1400
7	2003	3	1762	147	23,2	8	15,6	6,2	5600	-	-	22000	23	16200	5300	5,0	2	1D	1400
8	1999	3	2630	166,2	25,2	8,5	16,7	6	9600	19900	8400	19992	20,6	21600	7600	6,0	2	2D	-
9	1999	3	1625	142,8	20,6	8,42	14,15	7	7438	12736	5258	10471	20	18900	4112	4,3	2	2D	2200
10	1999	3	-	173,6	25,2	9,3	15,3	7,5	12500	21667	9167	21005	18	12600	2360	5,0	1	1D, 1R	1295
11	2001	4	2000	139,5	25,2	8,4	16,6	6,5	7666	17300	9634	17505	22,3	10920	3360	5,2	1	2D, 1R	2400
12	2001	3	2510	179,2	23,4	8,2	14,2	6,08	7100	15925	9122	18450	22,5	25200	5400	4,5	-	2D	2000
13	2002	3	2620	182,39	26	8,6	16,7	6,6	10090	20000	9910	23000	18	18900	4320	4,8	2	2D	1600
14	2004	3	-	144,2	21,6	8,4	15,2	7,1	10254	16080	5826	12460	16,5	12600	6120	5,0	-	1D	-

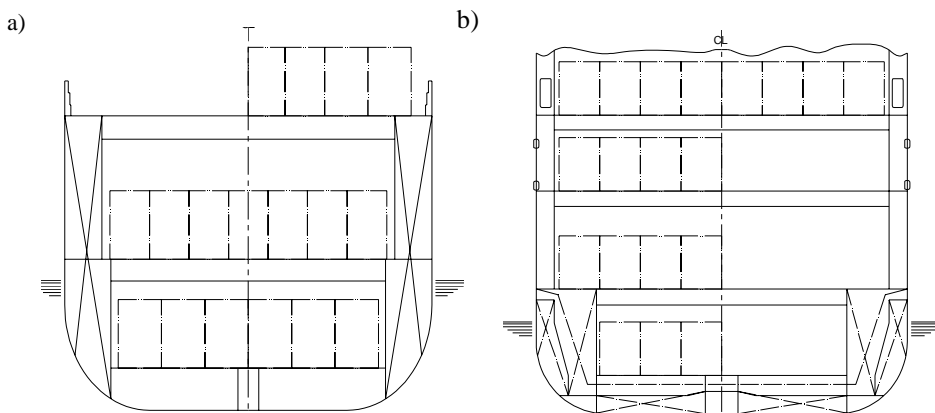
### 3. Analiza rozwiązań projektowych pojazdowców

Większość ze zgromadzonych pojazdowców to jednostki z dwoma śrubami napędowymi o skoku nastawnym, z maksymalnie czterema silnikami średnio-obrotowymi. Na statkach zastosowano dwa rodzaje napędu: spalinowo-mechaniczny (poprzez przekładnię i linię wałów) oraz spalinowo-elektryczny.

Przestrzeń ładunkową stanowią zazwyczaj:

- ✓ trzy pokłady, tj.: pokład główny, górny i dolny jako dno wewnętrzne (rys. 2a),
- ✓ cztery pokłady, tj.: pokład widokowy, pokład górny, główny i dolny jako dno wewnętrzne (rys. 2b).

Pojazdy z naczepami najczęściej przewożone są na pokładzie górnym i głównym. Wysokość projektowana głównie pod kątem oczekiwanych ładunków. Dotyczy to również szerokości linii ładunkowych.

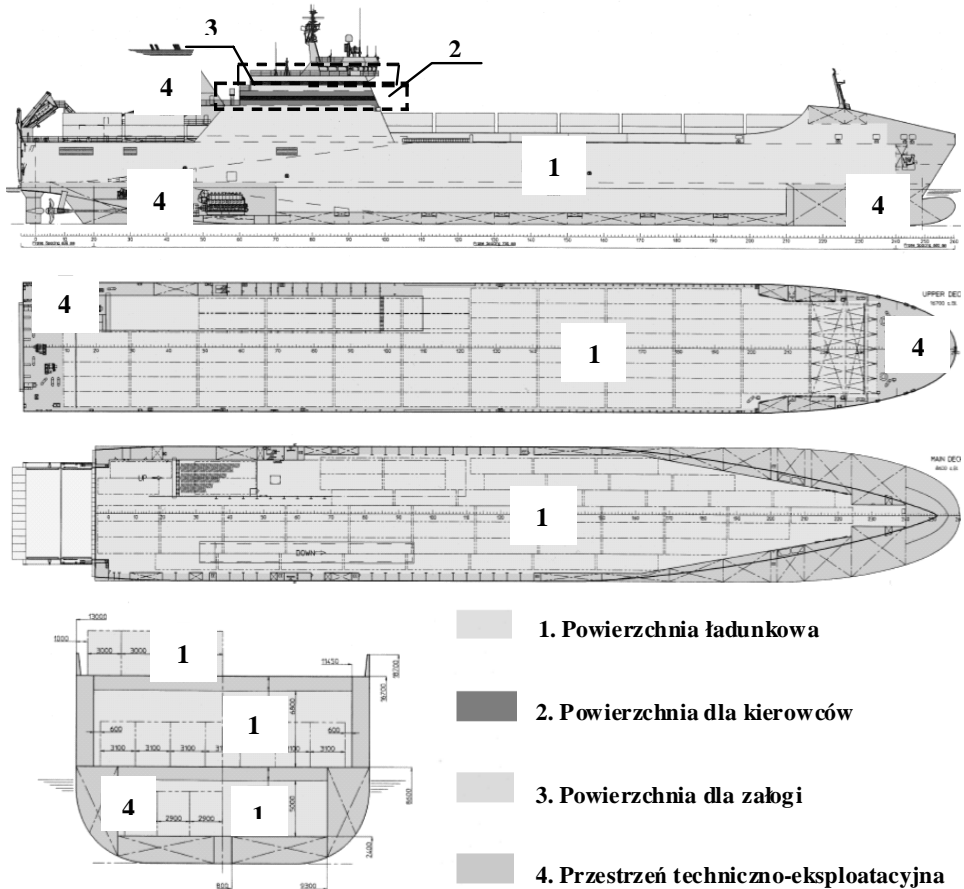


Rys. 2. Przykładowy widok poprzeczny przestrzeni ładunkowej pojazdowca, na podstawie [1]:  
a) trzypokładowy, b) czteropokładowy

Przestrzeń ładunkowa, ze względu na charakter załadunku i rozładunku nie jest podzielona grodziami. Z tego względu statki ro-ro charakteryzują się dużymi, otwartymi przestrzeniami pokładów. Załadunek trailerów odbywa się poprzez: rampy/furty dziobowe i rufowe. Komunikację wewnątrz statku – przemieszczanie się pojazdów pomiędzy pokładami umożliwiają rampy wewnętrzne – stałe lub unoszone, które podnoszą się wraz z pojazdami, co powoduje wydłużenie się całkowitej długości linii pokładowej. Rozwiązanie takie występuje w kilku przypadkach spośród zgromadzonych danych.

Cechą charakterystyczną wszystkich ładunków statków ro-ro jest to, że do ładowni przedostają się na kołach.

Przykład rozplanowania przestrzennego wraz z podziałem na główne powierzchnie pojazdownca wg [4] przedstawiono na rys. 3.



Rys. 3. Rozplanowanie funkcjonalno-przestrzenne – przykład statku Ro-Ro 2700 wg [4]

Podczas projektowania należy mieć na uwadze fakt, iż poruszanie się w ładowni pojazdów kołowych stwarza pewne ograniczenia. Ograniczenia te wynikają między innymi: z ustawienia i ruchu pojazdów w ładowni, które z kolei mają wpływ na obciążenie pokładu, z wymiarów i nośności pomostu wjazdowego. Wysokość pojazdów będzie miała decydujący wpływ na wysokość pomiędzy pokładami ładunkowymi.

Do głównych zalet przewozów statkami poziomego ładowania należy krótki czas załadunku i rozładunku, co związane jest z niedługim czasem postoju w porcie. Do głównych wad natomiast należy mały stosunek wykorzystania nośności statku  $DWT/D$  (w granicach  $0,4 \div 0,67$ ). Wynikiem tych dwóch cech

jest charakterystyka przewozów, które odbywają się najczęściej na krótkich trasach.

Zagrożenie bezpieczeństwa na pojazdach i wszystkich typach statków ro-ro wynika przede wszystkim z budowy kadłuba. Otwierane furty dziobowe czy rufowe znajdują się blisko wodnicy konstrukcyjnej i wdarcie się wody na pokład nie jest rzeczą trudną. Przykładem na to może być szybka utrata stateczności i zatonięcie m.in. promu *Estonia*, *Princess Victoria*. Ponadto rozciągający się przez prawie całą długość statku pokład ładunkowy stwarza zagrożenie nie tylko pożarowe, ale wdarcie się wody na pokład może wytworzyć swobodną powierzchnię cieczy – pogarszając właściwości statecznościowe statku.

#### 4. Wstępne oszacowanie głównych charakterystyk pojazdowców z wykorzystaniem analizy regresji

Do opracowania zależności pomiędzy głównymi charakterystykami pojazdowców wykorzystano regresję wielokrotną zarówno jedno-, jak i wieloparametrową (programem STATISTICA), poszukując rozwiązania w różnych postaciach funkcji, głównie w funkcjach nieliniowych typu m.in.: funkcje logarytmiczne postaci  $y = \log(x)$ , potęgowe postaci  $y = ax^b$ , wielomiany postaci  $y = a_0 + a_1x + \dots + a_{n-1}x^{n-1} + a_nx^n$ , czy wykładnicze postaci  $y = e^x$  lub  $y = 10^x$ .

Analiza regresji jest jednym z najczęściej stosowanych modeli statystycznych, gdyż pozwala na szacowanie związku pomiędzy zmiennymi oraz na predykcję jednej zmiennej bazując na wiedzy o wartościach skorelowanych z nią innych zmiennych. Ogólnym celem regresji wielokrotnej jest zbadanie związków pomiędzy wieloma zmiennymi niezależnymi ze zmienną zależną. Ten model regresji stosowany jest w przypadku złożonych zagadnień, kiedy obserwuje się nie jedną, a kilka zmiennych i ich oddziaływanie ze zmienną zależną.

##### 4.1. Podstawowe parametry projektowe pojazdowców

W oparciu o bazę danych (tabela 1) wyznaczono zakresy podstawowych parametrów projektowych, m.in.: współczynnik wykorzystania wyporności  $\eta$ , stosunki wymiarów głównych, liczbę Freuda  $F_n$ , współczynnik admiralicji  $c$  itd. Wyniki analiz przedstawiono w tabeli 2.

Parametrami wyjściowymi do wyznaczenia wymiarów głównych pojazdowca są przede wszystkim:

- długość linii ładunkowych  $L_{lad}$ ,
- prędkość statku  $V$ ,
- nośność  $DWT$ .

Tabela 2. Zakresy podstawowych parametrów projektowych pojazdowców wyznaczonych na podstawie opracowanej bazy danych

Badany parametr projektowy	Zakres wartości pojazdowców
$L_{pp}/B$	5,5 ÷ 7,6
$B/T$	2,9 ÷ 4,6
$H_{gl}/T$ *	1,1 ÷ 1,5
$\eta = DWT/D$	0,4 ÷ 0,67
$M_{SP}/D$	0,33 ÷ 0,6
$C_B$	0,59 ÷ 0,72
$Fn = \frac{V}{\sqrt{L_w g}}$ **	0,21 ÷ 0,3
$c = \frac{D^{2/3} V^3}{P_B}$	295 ÷ 400

\*  $H_{gl}$  – wysokość do pokładu głównego,

\*\*  $L_w$  – długość na wodnicy pływania – odczytana z planów ogólnych statków

#### 4.2. Zależności regresyjne do wyznaczenia głównych parametrów projektowych pojazdowców

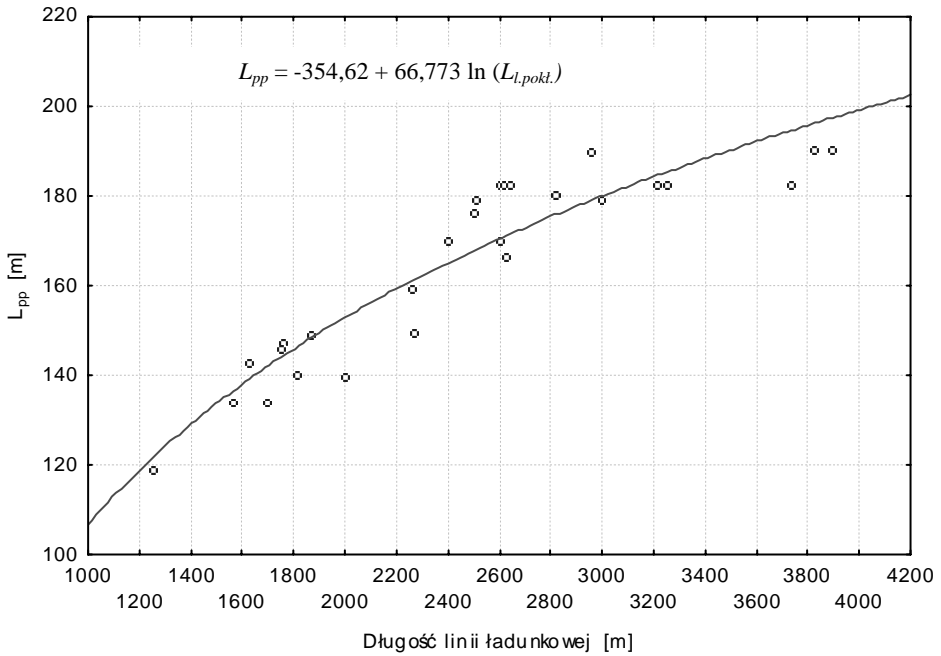
Analizę statystyczną przeprowadzono dla takich parametrów projektowych, które umożliwią w pierwszym przybliżeniu oszacowanie głównych wymiarów statku, a następnie jego głównych charakterystyk.

Przykładowe wyniki analiz w postaci graficznej przedstawiono na rysunkach 4÷7, zawierającej postać funkcji, która najlepiej odwzorowywała przebieg badanych parametrów, natomiast w tabeli 3 przedstawiono zbiór najistotniejszych zależności regresyjnych do wstępnych analiz projektowych.

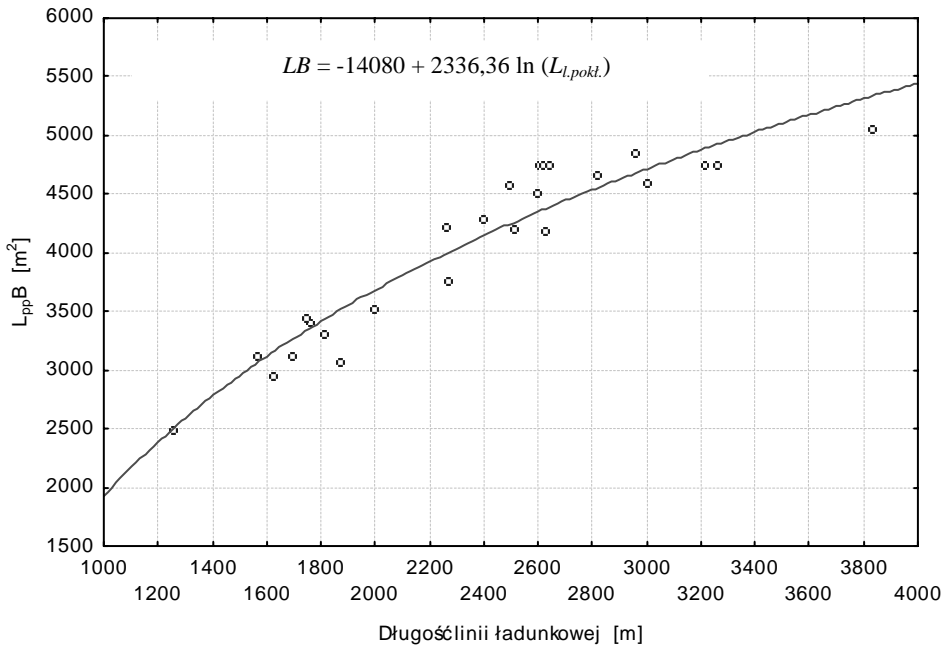
Zakres stosowalności wzorów z tabeli 3:

$$DWT = 4500 \div 13000 \text{ t}, L_{l.pokł.} = 1200 \div 3750 \text{ m}, n_{pokł.} = \max. 4$$

W związku z tym, iż baza danych zawiera statki trzy- i czteropokładowe, zależności regresyjne do wyznaczenia wysokości bocznej statku (maksymalnej  $H_{max}$  i do pokładu głównego  $H_{gl}$ ), jak i zanurzenie, zostały opracowane z uwzględnieniem dwóch zmiennych:  $L_{l.tad}$  i  $n_{pokł.}$ . Podział na dwie grupy analiz (oddzielnie statki z trzema i czterema pokładami) nie wpłynął na poprawę wyników. Zbyt mała populacja statków czteropokładowych nie pozwoliła na uzyskanie w tym przypadku wiarygodnych wyników badań.



Rys. 4. Zależność długości między pionami  $L_{pp}$  do długości linii ładunkowej  $L_{lad}$



Rys. 5. Zależność  $L_{pp}B$  do długości linii ładunkowej  $L_{lad}$



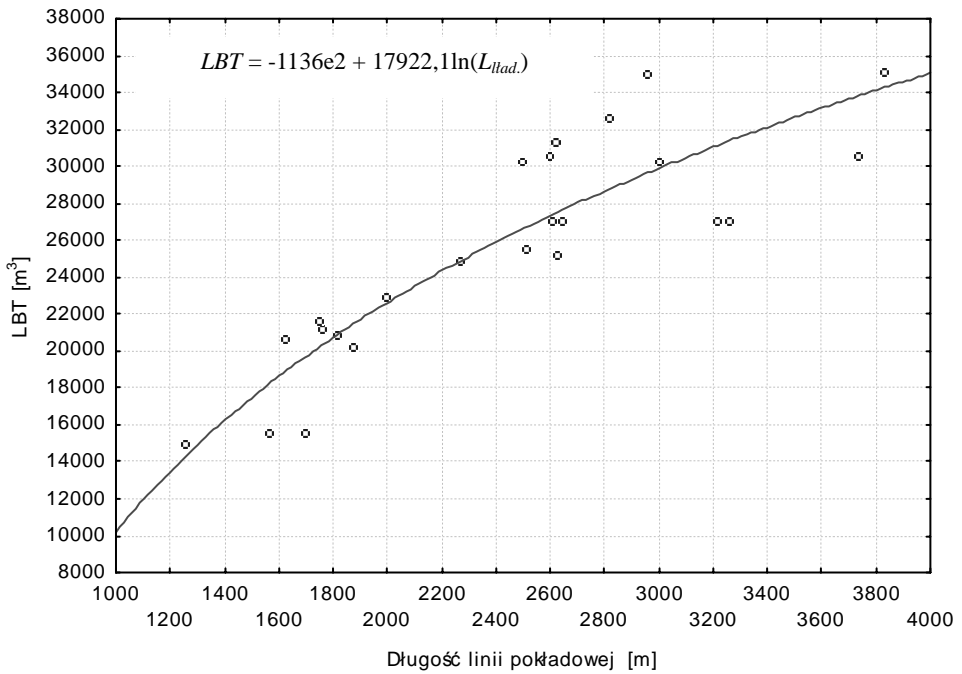
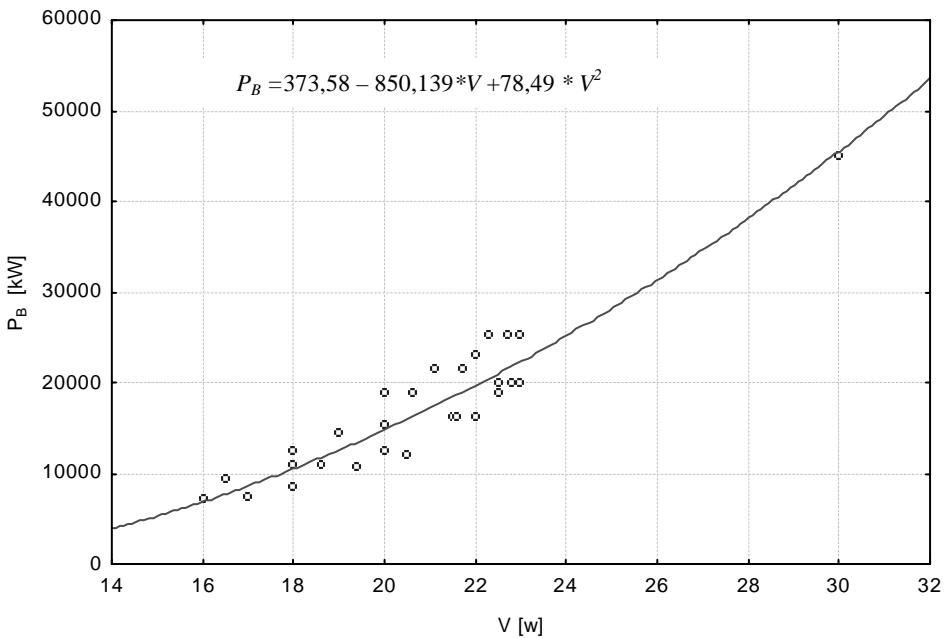
Rys. 6. Zależność  $LBT$  do długości linii ładunkowej  $L_{nad}$ Rys.7. Zależność mocy silnika  $P_B$  do prędkości statku  $V$

Tabela 3. Zależności regresyjne do oszacowania podstawowych parametrów projektowych statku na etapie wstępnym

Badany parametr wymiarowy	Postać zależności regresyjnej (jedno- i wieloparametrowej)	<i>r</i>
$L_{pp} = f(L_{l,pokt.})$	$L_{pp} = -354,62 + 66,773 * \ln(L_{l,pokt.})$	0,933
$L_C = f(L_{pp})$	$L_C = -637,49 + 159,81 * \ln(L_{pp})$	0,992
$L_W = f(L_{pp})$	$L_W = 3,2274 + 1,0241 * L_{pp}$	0,989
$LB = f(L_{l,pokt.})$	$LB = -14080 + 2336,36 \ln(L_{l,pokt.})$	0,952
$LBH_{gt} = f(L_{l,pokt.}, n_{pokt.})$	$LBH_{gt} = -205331 + 31965 \ln(L_{l,pokt.}) - 7023 \ln(n_{pokt.})$	0,954
$LBH_{max} = f(L_{l,pokt.}, n_{pokt.})$	$LBH_{max} = -575679 + 77581 \ln(L_{l,pokt.}) + 37354 \ln(n_{pokt.})$	0,97
$LBT = f(L_{l,pokt.}, n_{pokt.})$	$LBT = -123347 + 19612 \ln(L_{l,pokt.}) - 2828 \ln(n_{pokt.})$	0,9
$Fn = f(V_s, L_w)$	$Fn = 0,131 + 0,025 V - 0,8 * 10^{-3} L_w$	0,998
$D = f(DWT)$	$D = 6006,37 + 0,0537 * DWT^{1,346}$	0,857
$D = f(DWT, M_{SP})$	$D = 303,732 + 1,0007 * DWT + 0,9833 * M_{SP}$	0,992
$D = f(LBT)$	$D = -798,094 + 1,724 * LBT^{0,913}$	0,954
$M_{SP} = f(GT, D)$	$M_{SP} = -994,712 + 0,3647 * GT + 0,1583 * D$	0,927
$Z_{pal} = f(P_B, \rho_{pal}, R)$	$Z_{pal} = -1168,4 * P_B + 34,446 * \rho_{pal} + 0,1337 * R$	0,985
$P_B = (V)$	$P_B = 373,58 - 850,139 * V + 78,49 * V^2$	0,889
$D_{sr} = f(LBT)$	$D_{sr} = 2,682 + 0,00044 * LBT^{0,835}$	0,899
$\rho_{pal} = f(P_B)$	$\rho_{pal} = -7,262 + 0,0041 * P_B$	0,988
$GT = f(LBH_{max})$	$GT = -10869 + 54,0202 * LBH_{max}^{0,571}$	0,871

### Spis ważniejszych oznaczeń

- A** – autonomiczność [doby],  
**C<sub>B</sub>** – współczynnik pełnotliwości podwodnej części kadłuba [-],  
**D** – wyporność projektowa [t],  
**D<sub>sr</sub>** – średnica śruby [m],  
**DWT** – nośność projektowa [t],  
**Fn** – liczba Froude'a,  
**GT** – pojemność brutto [-],  
**H<sub>gt</sub>** – wysokość do pokładu głównego [m],  
**H<sub>max</sub>** – maksymalna wysokość statku [m],  
**L<sub>l,pokt</sub>** – długość linii ładunkowej [m],  
**L<sub>pp</sub>** – długość między pionami [m],  
**M<sub>SP</sub>** – masa statku pustego [t],  
**n<sub>pokt.</sub>** – liczba pokładów  
**N<sub>el</sub>** – moc elektrowni [kW],

- $N_{man}$  – moc pędników manewrowych (pędników strumieniowych)[kW],  
 $P_B$  – moc silnika głównego [kW],  
 $r$  – współczynnik korelacji,  
 $R$  – zasięg pływania [Mm],  
 $R$  [%] – udział wariancji wyjaśnionej,  
 $T$  – zanurzenie projektowe [m],  
 $\rho_{pal}$  – zużycie paliwa [t/dobę].

## 5. Podsumowanie

Na podstawie zebranych danych techniczno-eksploatacyjnych pojazdowców przeprowadzono analizę regresyjną, na podstawie której zbadano, jakie parametry projektowe wpływają w sposób istotny na wymiary główne, na parametry masowe i na system energetyczny statku oraz wyznaczono zależności opisujące te relacje. Pomimo iż grupa zgromadzonych statków była dość liczna, to nie wszystkie z nich brały udział w każdej analizie, ze względu na niekompletne dane.

W artykule zawarto tylko najlepsze z możliwych analiz regresyjnych. Wiele istotnych zależności (z punktu widzenia projektowego) zostało pominiętych ze względu na niezadowalające wyniki (bardzo niski współczynnik korelacji, duży rozrzut wartości), dotyczy to m.in. zależności  $B = f(L_{pp})$ ,  $H = f(L_{pp})$ ,  $B/T = f(L/B)$ ,  $C_B = f(Fn)$  i wiele innych.

Opracowane zależności jedno- i wieloparametrowe umożliwiają oszacowanie głównych charakterystyk pojazdowców (m.in.: jego wielkości, zapotrzebowanej mocy dla silnika głównego i zespołów ogólnokrętowych) na etapie projektowania wstępnego, kiedy to znane są tylko założenia techniczne (wymagania armatora).

## Literatura

1. Krueger S.: Design of modern RoRo ships, Flensburger Schiffbau/ TU Hamburg-Harburg 2002,
2. Pałucha K., Puchalski J. Śliwiński A.: Statki poziomego ładowania, Trademar, Gdynia 1996,
3. Significant ships of 1998, 1999, 2000, 2001, 2002, 2003, 2004, 2006 – czasopismo branżowe,
4. Flensburger Schiffbau - Gesellschaft mbH & Co. KG, Ro-Ro 2700 carrier
5. Strony internetowe:  
[www.fsg-ship.de](http://www.fsg-ship.de),  
[www.norfolkline-ferries.co.uk/EN/Freight/Fleet](http://www.norfolkline-ferries.co.uk/EN/Freight/Fleet),  
[www.deltamarin.com/Members/koivum/ro-ro-and-container-vessels/](http://www.deltamarin.com/Members/koivum/ro-ro-and-container-vessels/),

Recenzent:  
**Jan KULCZYK**

## **Regression analysis use for the preliminary design of the main characteristics ro-ro trailer ships**

### **Key-words**

ro-ro trailer ship, preliminary design, statistical analysis, main dimensions, parameters design of design ro-ro trailer ship

### **Summary**

This article presents the main characteristics of typical design solutions of ro-ro trailer ships, including spatial layout of the ships and the type of design. With the use of regression analysis, the impact of the importance of the test parameters was assessed. The regression formulae, which are one and multi-variable, can be used in preliminary design for the estimation of ro-ro trailer vessel dimensions and main characteristics.