

Waldemar Mironiuk

Adam Pawłędzio

Ryszard Wróbel

ANALIZA STATECZNOŚCI STATYCZNEJ PONTONU PROSTOPADŁOŚCIENNEGO O WYMIARACH $L \times B \times H$

STRESZCZENIE

W pracy rozpatruje się zagadnienie stateczności statycznej pontonu prostopadłościennego o wymiarach $L \times B \times H$. Analizy problemu dokonano za pomocą obliczeń i napisanego w Instytucie Konstrukcji i Eksploatacji Okrętów programu komputerowego. Krzywa ramion prostujących opisana została trzema zależnościami odpowiadającymi trzem zakresom. Począwszy od kąta wejścia pokładu do wody (lub wyjścia obła), poprzez kąt, przy którym obło wynurza się z wody (lub pokład wchodzi do wody), aż do wartości kątów powyżej wymienionych. Wykorzystany do obliczeń program komputerowy może posłużyć do analizy stateczności statycznej nie tylko pontonów, ale po odpowiednich modyfikacjach także do analizy stateczności okrętu w dowolnym stanie załadowania. Ponadto w pracy przeprowadzono analizę wpływu wymiarów pontonu i położenia środka masy na przebieg krzywej ramion prostujących oraz przedstawiono ich komputerową wizualizację.

WSTĘP

Z analizy literaturowej i doświadczeń autorów prac [2, 3, 4, 5, 7, 8] wynika, że wysokość metacentryczna poprzeczna jest miarą stateczności statku tylko i wyłącznie dla małych kątów przechyłu (około $7 - 8^\circ$). Po wystąpieniu większych kątów przechyłu statku miarą jego stateczności jest moment prostujący M_{Π} . Natomiast wartość zewnętrznych momentów przechylających M_p działających na statek powoli narasta. Prowadzi to do zachowań, w których moment prostujący i moment przechylający są sobie równe, przy coraz większych wolno narastających wartościach [8].

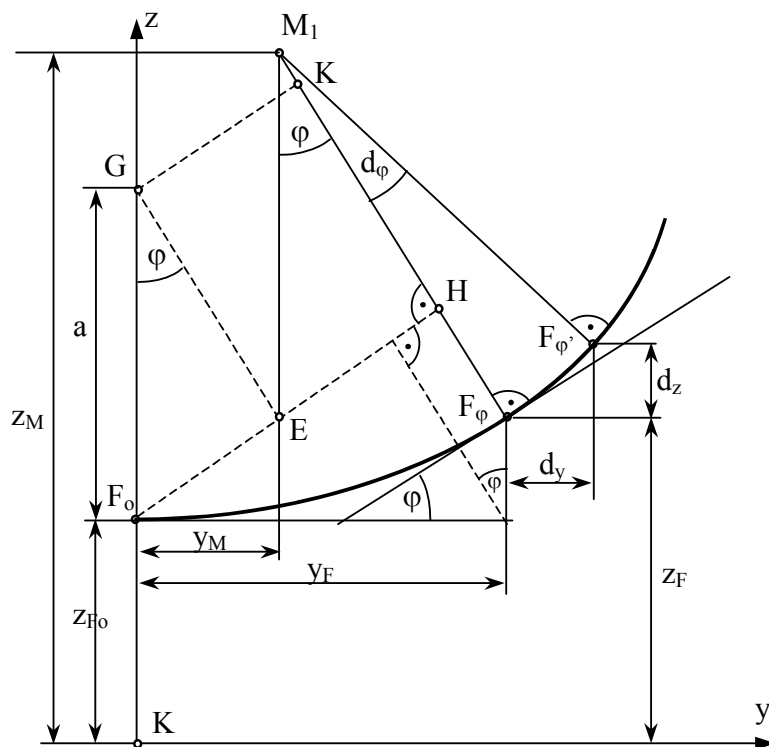
W takiej sytuacji charakterystyka momentu przechylającego jest identyczna jak krzywa ramion prostujących (krzywą Reeda). Z doświadczeń wynika również, że w celu wyraźnego zobrazowania procesów towarzyszących przechylaniu statku dobrze jest przeanalizować problemy z tym związane na przykładzie pontonu prostopadłościennego [4]. W zakresie małych kątów przechyłu do 8° wielkość momentu prostującego wyraża się znaną zależnością:

$$M_u = P GM \sin \varphi . \quad (1)$$

Przy większych przechyłach wzór powyższy traci ważność ze względu na to, że krzywej środków wyporu (ewolwenty) nie można traktować jako łuku okręgu o promieniu FoM. Ponadto poprzeczne metacentrum zmienia swoje położenie w zależności od kąta przechyłu, przemieszczając się po tak zwanej ewolucie metacentrycznej. Wynika stąd fakt, że krzywa środków wyporu jest ewolwentą swojej ewoluty. A zatem normalna do krzywej środków wyporu jest styczna do ewoluty metacentrycznej, a punkt styczności znajduje się w metacentrum. Oprócz tego, wodnice równoobjętościowe (a tylko takie rozpatruje się w stateczności okrętu, ponieważ masa okrętu w czasie przechylania nie ulega zmianie) nie przecinają się przy większych kątach przechyłu w płaszczyźnie symetrii zarówno pontonu prostopadłościennego, jak i statku [5]. Dlatego też przy większych kątach przechyłu w celu obliczenia ramienia momentu prostującego należy brać pod uwagę rzeczywiste przemieszczenia środka wyporu i metacentrum.

WSPÓLRZĘDNE ŚRODKA WYPORU I EWOLUTY METACENTRYCZNEJ JAKO WARTOŚCI DO OKREŚLENIA RAMIENIA PROSTUJĄCEGO

Określenie ramienia momentu prostującego przy kącie przechyłu pontonu φ przedstawia rysunek 1.



Rys. 1. Przesunięcie środka wyporu i metacentrum po przechyle pontonu do kąta φ

Ramię to wyraża się wzorem [5, 7]:

$$l = GK = FoH - FoE; \quad (2)$$

$$l = y_F \cos \varphi + (z_F - z_{F_0}) \sin \varphi - a \sin \varphi, \quad (3)$$

gdzie: y_F, z_F – współrzędne środka wyporu odpowiadające kątowi przechyłu φ i odniesione do układu xyz z początkiem na linii podstawowej w punkcie K ;

a – odległość środka ciężkości od środka wyporu.

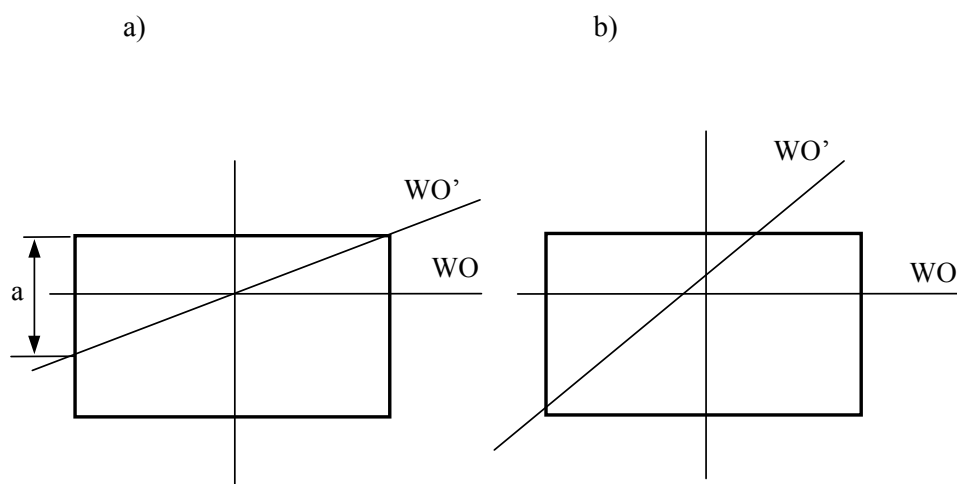
Widać stąd, że aby móc korzystać z wzoru na ramię prostujące, należy znać współrzędne środka wyporu y i z , które wylicza się z następujących zależności:

$$y_F = \int_0^{\varphi} FM \cos \varphi \, d\varphi$$

$$z_F = z_0 + \int_0^{\varphi} FM \sin \varphi \, d\varphi$$
(4)

gdzie $z_0 = z_{F0}$.

Obliczenia wyżej wymienionych współrzędnych służące do sporządzania krzywej ramion prostujących przeprowadzone zostały w trzech etapach (rys. 2.):



Rys. 2. Etapy obliczeń: a) I; b) II i III

- I – obliczenia do kąta wejścia pokładu do wody (lub wyjścia obła) – φ_1 ;
- II – obliczenia do kąta wynurzenia się obła pontonu z wody (lub pokład wchodzi do wody) – φ_2 ;
- III – obliczenia do kąta powyżej φ_2 .

Wzory wyjściowe na współrzędne wymienionych punktów we wszystkich etapach są takie same. Ich modyfikacja następuje w wyniku zmian promienia meta-centrycznego.

Współrzędne metacentrum zapisuje się wzorami:

$$\begin{aligned} y_M &= y_F - FM \sin \varphi \\ z_M &= z_F + FM \cos \varphi \end{aligned} \quad (5)$$

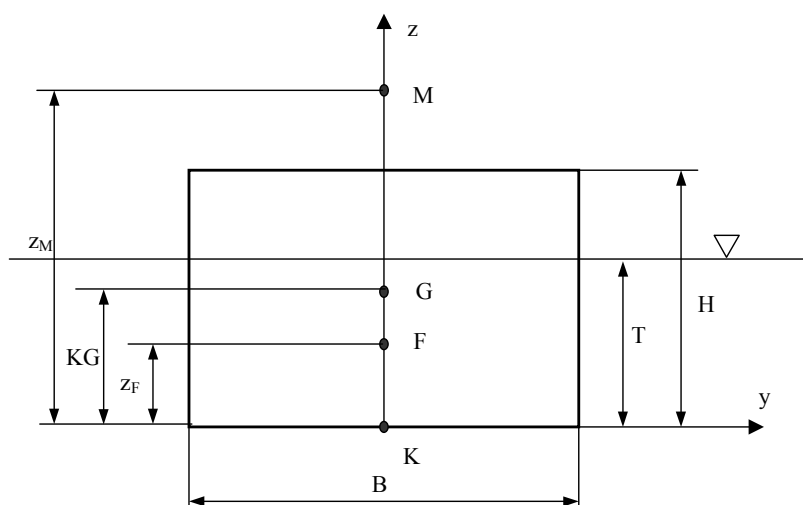
gdzie: y_M, z_M – współrzędne metacentrum;
 y_F, z_F – współrzędne środka wyporu;
 z_0 – współrzędna środka wyporu przy $\varphi = 0$;
 FM – promień metacentryczny liczony w położeniu po obrocie o dowolny kąt.

Jak widać, obliczenia sprowadzają się do scałkowania dwóch równań, w których występuje wielkość FM inna w każdym etapie obliczeń. Z tego powodu powyższe wzory będą miały inną postać końcową w poszczególnych etapach.

W pierwszym etapie obliczeń (na którym następuje wchodzenie pokładu do wody lub wyjście obła) dla oznaczeń przyjętych jak na rysunku 3. można zapisać wzór:

$$\operatorname{tg} \varphi_1 = \frac{(H - T) \cdot 2}{B}, \quad (6)$$

na podstawie którego możemy obliczyć szukany kąt φ_1 .



Rys. 3. Podstawowe wymiary pontonu w płaszczyźnie owręza

Promień metacentryczny oblicza się następującym wzorem:

$$FM = \frac{I_B}{V}, \quad (7)$$

gdzie: I_B – moment bezwładności przekroju wodnicowego;

V – objętość podwodzia;

Objętość podwodzia jest stała i wynosi:

$$V = L B T. \quad (8)$$

Dla $\varphi = 0$ poprzeczny moment bezwładności przekroju wodnicowego jest równy:

$$I_B = \frac{B^3 L}{12}, \quad (9)$$

gdzie: L – długość pontonu[m];

B – szerokość pontonu[m].

Podczas przechyłu pontonu szerokość przekroju wodnicowego zmienia się w zależności od kąta przechyłu. Ujmuje to wzór:

$$B_\varphi = \frac{B}{\cos \varphi}. \quad (10)$$

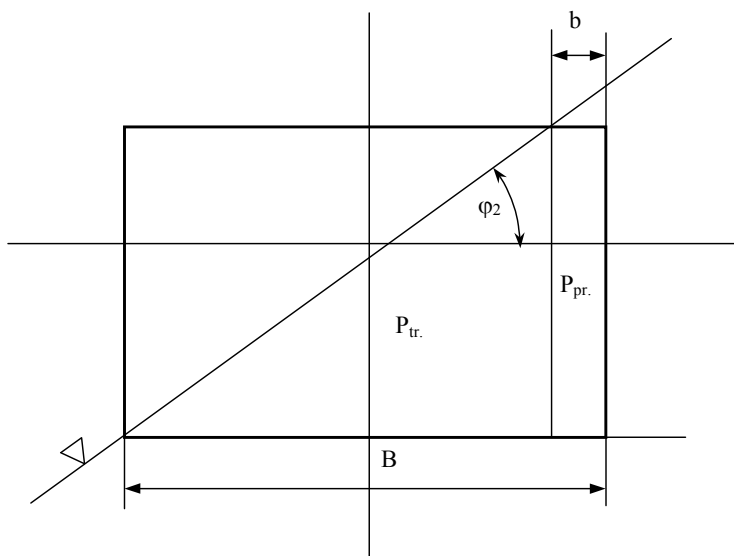
Stąd:

$$FM = \frac{B_\varphi^3 L}{12 L B T} = \frac{B^2}{12 \cos^3 \varphi T} = \frac{FM_0}{\cos^3 \varphi}; \quad (11)$$

$$y_F = \int_0^\varphi FM \cos \varphi \, d\varphi = \int_0^\varphi \frac{FM_0}{\cos^2 \varphi} \, d\varphi = FM_0 \operatorname{tg} \varphi; \quad (12)$$

$$z_F = z_0 + \int_0^\varphi FM \sin \varphi \, d\varphi = z_0 + FM_0 \int_0^\varphi \frac{\operatorname{tg} \varphi}{\cos^2 \varphi} \, d\varphi = z_0 + \frac{1}{2} FM_0 \operatorname{tg}^2 \varphi. \quad (13)$$

Drugi etap obliczeń trwa do kąta, który można wyznaczyć, wiedząc, że pole przekroju pod wodnicą jest stałe.



Rys. 4. Położenie wodnicy w końcu II etapu

$$P = T B; \quad (14)$$

$$P = P_{tr} + P_{pr}; \quad (15)$$

$$T B = \frac{1}{2}(B - b)H + b \cdot H = b \left(H - \frac{1}{2}H \right) + \frac{1}{2}BH; \quad (16)$$

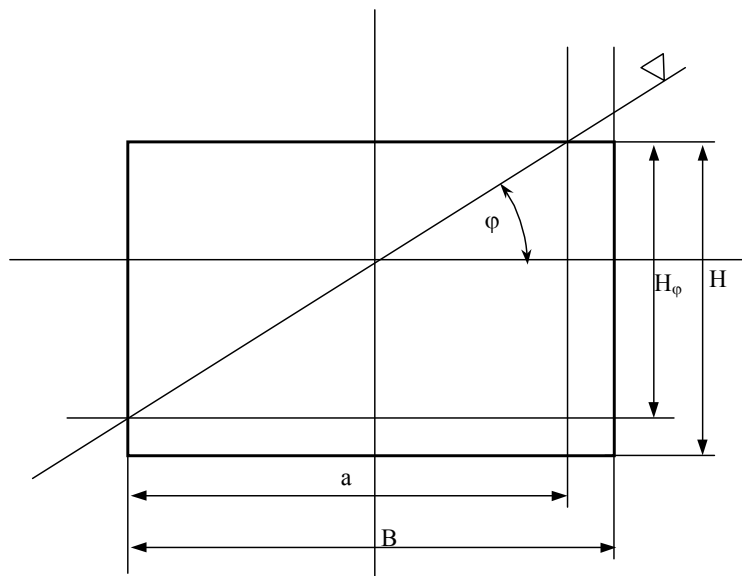
$$b = \frac{T \cdot B - 0.5 \cdot B \cdot H}{H - 0.5 \cdot H} = \frac{2T \cdot B}{H} - B. \quad (17)$$

Podstawiając wielkość b do poniższego wzoru:

$$\operatorname{tg} \varphi_2 = \frac{H}{B - b} = \frac{H^2}{2TB}, \quad (18)$$

otrzymamy kąt wyjścia obła z wody.

Szerokość przekroju wodnicowego B_φ można obliczyć, wykorzystując ponownie informację, że pole pod przekrojem wodnicowym jest stałe.



Rys. 5. Położenie wodnicy w II etapie obliczeń

Stosując oznaczenia jak na rysunku 5., można sformułować zapis:

$$\frac{1}{2} a H_\varphi + a(H - H_\varphi) + H(B - a) = T \cdot B ; \quad (19)$$

$$\begin{aligned} a^2 + H_\varphi^2 &= B_\varphi^2 \\ H_\varphi &= B_\varphi \sin \varphi . \\ a &= B_\varphi \cos \varphi \end{aligned} \quad (20)$$

Dokonując szeregu przekształceń, otrzymuje się:

$$B_\varphi = \sqrt{\frac{2B(H - T)}{\sin \varphi \cos \varphi}} . \quad (21)$$

Zależność tę wprowadza się do wzoru na promień metacentryczny:

$$FM = \frac{B_\varphi^3 L}{12LBT} = \frac{\left(\frac{2B(H-T)}{\sin \varphi \cos \varphi}\right)^{\frac{3}{2}}}{12BT}. \quad (22)$$

Ponieważ

$$\operatorname{tg} \varphi_1 = \frac{(H-T) \cdot 2}{B}, \quad (23)$$

więc:

$$FM = \frac{FM_0}{\cos^3 \varphi} \left(\frac{\operatorname{tg} \varphi_1}{\operatorname{tg} \varphi}\right)^{\frac{3}{2}}. \quad (24)$$

Współrzędne środka wyporu dla drugiego etapu wynoszą:

$$y_F = y_F(\varphi_1) + \int_{\varphi_1}^{\varphi} FM \cos \varphi d\varphi = y_F(\varphi_1) + FM_0 \operatorname{tg}^{\frac{3}{2}} \varphi_1 \int_{\varphi_1}^{\varphi} \frac{\operatorname{ctg}^{\frac{-1}{2}} \varphi}{\sin^2 \varphi} d\varphi = \quad ; \quad (25)$$

$$y_F(\varphi_1) + 2FM_0 \operatorname{tg}^{\frac{3}{2}} \varphi_1 \sqrt{\operatorname{ctg} \varphi} \Big|_{\varphi_1}^{\varphi} = 3FM_0 \operatorname{tg} \varphi_1 - 2FM_0 \operatorname{tg}^{\frac{3}{2}} \varphi_1 \sqrt{\operatorname{ctg} \varphi}$$

$$z_F = z_F(\varphi_1) + \int_{\varphi_1}^{\varphi} FM \sin \varphi d\varphi = z_F(\varphi_1) + FM_0 \operatorname{tg}^{\frac{3}{2}} \varphi_1 \int_{\varphi_1}^{\varphi} \frac{1}{\sqrt{\operatorname{tg} \varphi \cos^2 \varphi}} d\varphi = \quad (26)$$

$$= z_0 - \frac{3}{2} FM_0 \operatorname{tg}^2 \varphi_1 + 2FM_0 \operatorname{tg}^{\frac{3}{2}} \varphi_1 \sqrt{\operatorname{tg} \varphi}$$

W trzecim etapie obliczeń szerokość wodnicy pływania wynosi:

$$B_\varphi = \frac{H}{\sin \varphi}. \quad (27)$$

Moment bezwładności przekroju wodnicowego:

$$I_B = \frac{LB_\phi^3}{12} = \frac{LH^3}{12\sin^3\phi} \quad (28)$$

Promień metacentryczny obliczamy ze znanej zależności:

$$FM = \frac{I_B}{V} = \frac{H^3}{12BT\sin^3\phi} = \frac{FM_0}{\sin^3\phi} \left(\frac{H}{B}\right)^3 \quad (29)$$

Odcięta środka wyporu wynosi:

$$\begin{aligned} y_F &= y(\phi_2) + \int_{\phi_2}^{\phi} FM \cos\phi = y(\phi_2) + \left(\frac{H}{B}\right)^3 FM_0 \int_{\phi_2}^{\phi} \frac{\cos\phi}{\sin^3\phi} d\phi \\ &= y(\phi_2) - \left(\frac{H}{B}\right)^3 \left[\frac{\text{ctg}^2\phi}{2} \right]_{\phi_2}^{\phi} \end{aligned} \quad (30)$$

Wykorzystując zależności:

$$\text{tg}\phi_1 \text{tg}\phi_2 = \left(\frac{H}{B}\right)^2, \quad (31)$$

$$y_F(\phi_2) = 3FM_0 \text{tg}\phi_1 - 2FM_0 \text{tg}^2\phi_1 \sqrt{\text{ctg}\phi_2}$$

odcięta środka wyporu zapisuje się wzorem:

$$y_F = 3FM_0 \text{tg}(\phi_1) - \frac{3}{2} FM_0 \text{tg}(\phi_1) \sqrt{\frac{\text{tg}\phi_1}{\text{tg}\phi_2}} - \frac{1}{2} FM_0 \left(\frac{H}{B}\right)^3 \text{ctg}^2\phi. \quad (32)$$

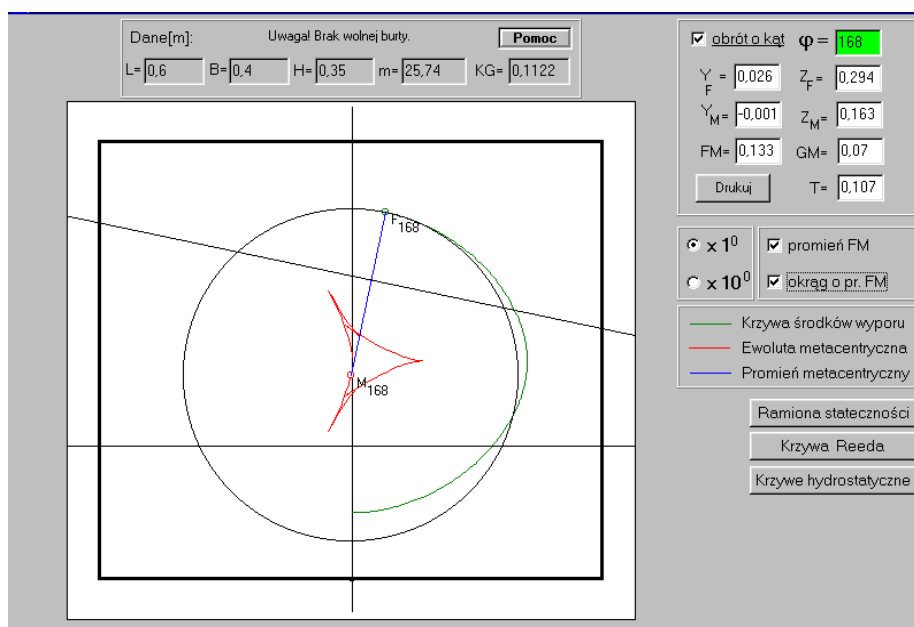
Rzędną środka wyporu można obliczyć z następującej zależności:

$$\begin{aligned} z_F &= z_F(\phi_2) + \int_{\phi_2}^{\phi} FM \sin\phi d\phi = z_F(\phi_2) + FM_0 \left(\frac{H}{B}\right)^3 \int_{\phi_2}^{\phi} \frac{1}{\sin^3\phi} d\phi \\ &= z_0 - \frac{3}{2} FM_0 \text{tg}^2\phi_1 + 3FM_0 \text{tg}^2\phi_1 \sqrt{\frac{\text{tg}\phi_2}{\text{tg}\phi_1}} - FM_0 \left(\frac{H}{B}\right)^3 \text{ctg}\phi \end{aligned} \quad (33)$$

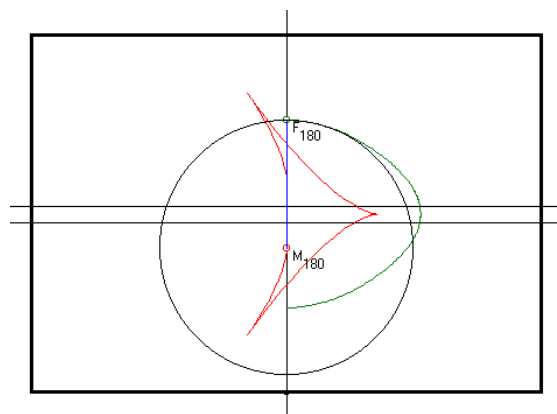
Powyższe zależności umożliwiają obliczenie współrzędnych poszukiwanych punktów F oraz M.

Do wizualizacji położenia punktów F i M pontonu po przechyle do kąta φ opracowano program komputerowy. Elementami programu są między innymi przebiegi zmian promienia metacentrycznego, krzywych hydrostatycznych oraz krzywej Reeda. Wykresy do prezentacji tych przebiegów mają samoskalujące się osie i w szerokim zakresie wartości obliczeniowych przedstawiają pożądane pole wyników. Program może być uruchamiany na dowolnej platformie systemu Windows. Ponieważ program w znacznej mierze bazuje na operacjach graficznych, zaleca się, aby komputer miał procesor o zegarze min. 300 MHz i kartę graficzną z pamięcią 4 MB.

Program jest cały czas uaktualniany, uzupełniany o nowe funkcje. W związku z tym jego kod ciągle się powiększa. W chwili obecnej plik wykonywalny zajmuje około 1MB pojemności. Wizualizacje przebiegu ewoluty metacentrycznej i jej ewolwenty przedstawiają rysunki 6. i 7.



Rys. 6. Wizualizacja komputerowa krzywej środków wyporu i ewoluty metacentrycznej proponowanej do wdrożenia konstrukcji pływającej o parametrach: $L = 0.60$ [m], $B = 0.4$ [m], $H = 0.35$ [m], $m = 25.4$ [kg], $KG = 0.1122$ [m], $T = 0.107$ [m]



Rys. 7. Krzywa środków wyporu (evolwenta) i ewoluta metacentryczna pontonu prostokątnego przy zmianie parametrów początkowych na parametry:
 $L = 0.6$ [m], $B = 0.5$ [m], $H = 0.35$ [m], $m = 50$ [kg], $KG = 0.112$ [m], $T = 0.167$ [m]

Analizę przebiegów zmian promieni metacentrycznych można prowadzić dla dowolnych parametrów pontonu prostokątnego.

OKREŚLENIE RAMION PROSTUJĄCYCH PONTONU PROSTOPADŁOŚCIENNEGO

Po otrzymaniu rzeczywistych przemieszczeń środka wyporu i metacentrum ramiona prostujące w poszczególnych fazach przechylenia wyraża się po odpowiednich przekształceniach wzoru (3) [7, 11]:

– w pierwszym etapie

$$l = (GM_o + \frac{1}{2}FM_o \operatorname{tg}^2 \varphi) \sin \varphi; \quad (34)$$

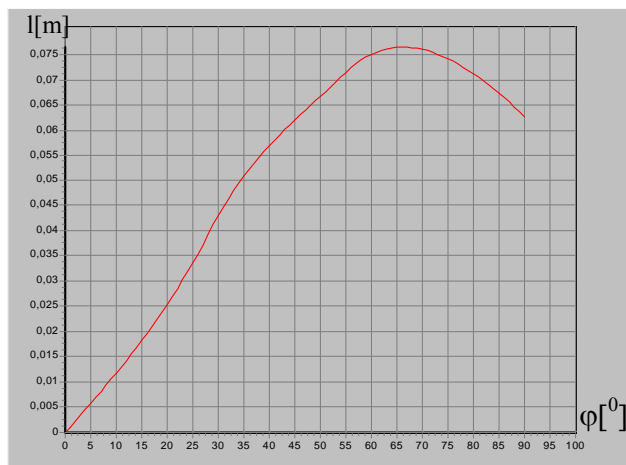
– w drugim etapie

$$l = 3FM_o \operatorname{tg} \varphi_1 (\cos \varphi - \frac{1}{2} \operatorname{tg} \varphi_1 \sin \varphi) - 2\sqrt{2}FM_o \operatorname{tg}^{\frac{3}{2}} \varphi_1 \frac{\cos 2\varphi}{\sqrt{2 \cos \varphi \sin \varphi}} - (z_G - z_{F_o}) \sin \varphi; \quad (35)$$

– w trzecim etapie

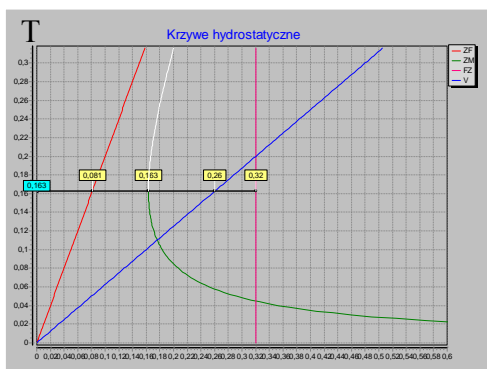
$$l = 6FM_o \frac{T_2}{B} (1 - \frac{T_2}{H}) (\cos \varphi + \frac{H}{B} \sin \varphi) - FM_o (\frac{H}{B})^3 (1 + \frac{1}{2} \operatorname{ctg}^2 \varphi) - (z_G - z_{F_o}) \sin \varphi. \quad (36)$$

Przykładowy wykres krzywej ramion prostujących pontonu prostopadłościennego z wykorzystaniem do obliczeń powyższych wzorów przedstawia rysunek 8.

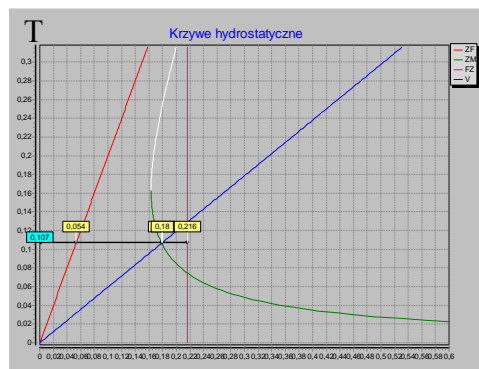


Rys. 8. Krzywa ramion prostujących pontonu prostopadłościennego o wymiarach $L \times B \times H$

Dla proponowanych parametrów pontonu prostopadłościennego o wymiarach L , B , H wykonano wizualizację krzywych hydrostatycznych tego pontonu. Wykres krzywych hydrostatycznych zawiera krzywe objętości podwodzia V , wysokości środka wyporu z_F , pola powierzchni przekroju wodnicowego oraz wysokości metacentrum poprzecznego od płaszczyzny podstawowej z_M . Wartości KM dla różnych zanurzeń (możliwość zmiany zanurzenia w sposób ciągły) pontonu przedstawiają rysunki 9. i 10.



Rys. 9. Krzywe hydrostatyczne pontonu dla zanurzenia $T = 0.16$ [m]



Rys. 10. Krzywe hydrostatyczne pontonu dla zanurzenia $T = 0.11$ [m]

Z wykresu widać, że KM ma znaczne wartości dla małych zanurzeń i zmniejsza się gwałtownie wraz ze wzrostem zanurzenia, osiągając swoje minimum dla $T = 0.16$ [m], aby ponownie wzrastać. Zanurzenie, dla którego KM ma wartość minimalną, może być określone po różniczkowaniu KM i przyrównaniu tego równania do zera, co przedstawia zależność:

$$\begin{aligned} KM &= z_F + r_B \\ z_F &= T/2. \end{aligned} \quad (37)$$

$$r_B = \frac{B^2}{12T}; \quad (38)$$

$$\frac{dKM}{dT} = \frac{1}{2} - \frac{B^2}{12T^2} = 0. \quad (39)$$

Minimalną wartość KM otrzymuje się dla T:

$$T = \frac{B}{\sqrt{6}}. \quad (40)$$

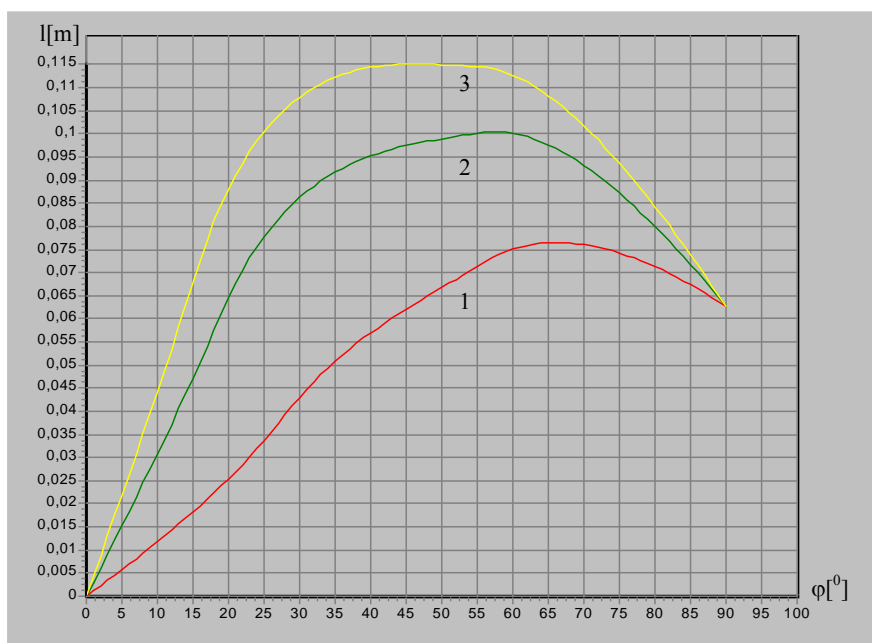
Dla proponowanego rozwiązania pontonu wystąpi to przy zanurzeniu $T = 0.16$ [m]. Wartość KM wraz z dalszym wzrostem zanurzenia zmienia się nadal, bowiem pomimo zmniejszania się poprzecznego promienia metacentrycznego ze wzrostem zanurzenia T przyrost wysokości środka wyporu z_F jest na tyle duży, że powoduje dalszy, już nieznaczny, wzrost KM.

WPLYW WYMIARÓW PONTONU I POŁOŻENIA ŚRODKA MASY NA PRZEBIEG KRZYWEJ RAMION PROSTUJĄCYCH

Z analizy literaturowej wynika [2, 3, 4, 8], że znaczny wpływ na przebieg krzywej ramion prostujących pontonu prostopadłościennego mają jego wymiary oraz położenie środka masy. W pracy rozpatruje się kolejno wpływ szerokości pontonu, wolnej burty oraz zmiany położenia środka masy na krzywą ramion prostujących, przy założeniu że pozostałe wielkości są niezmiennie.

Wpływ szerokości pontonu na krzywą ramion prostujących

Szerokość pontonu ma znaczący wpływ na stateczność i wielkość ramion prostujących [4]. W pracy dokonano analizy wpływu zmiany szerokości pontonu na wielkość ramion prostujących przy niezmiennych jego pozostałych parametrach. W wyniku obliczeń otrzymano trzy przebiegi krzywej ramion prostujących dla różnych B w zakresie od $B = 0.4$ [m] do $B = 0.55$ [m], co przedstawia rysunek 11.



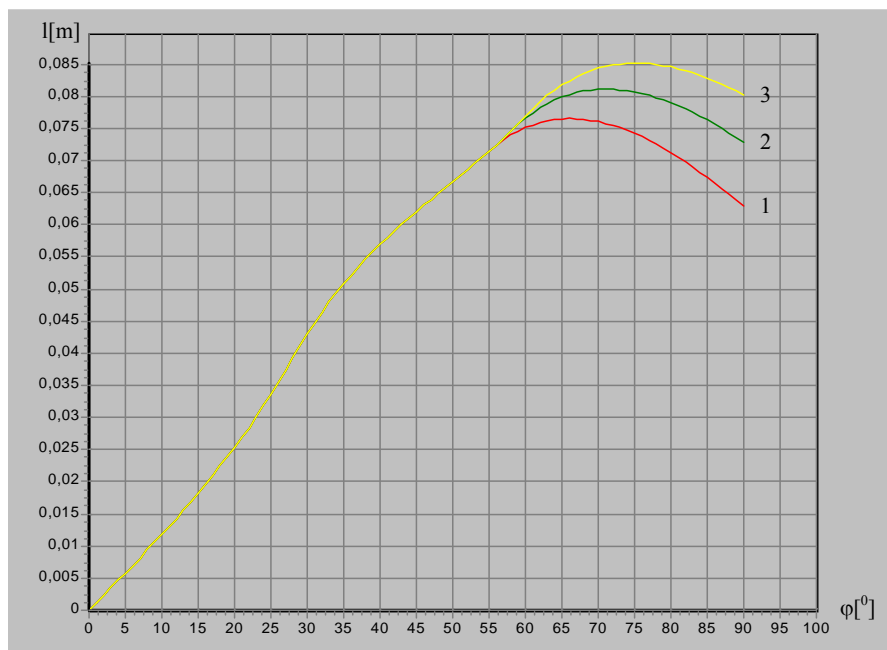
Rys. 11. Wpływ zmiany szerokości pontonu B na krzywą ramion prostujących:
 $H = 0.35$ [m], $m = 25.74$ [kg], $z_G = 0.1122$ [m], $H - T = 0.243$ [m], $T = 0.107$ [m]
 $B = 0.4$ [m] – krzywa (1)
 $B = 0.5$ [m] – krzywa (2)
 $B = 0.55$ [m] – krzywa (3)

Ramię prostujące pontonu w zakresie kątów przechyłu od 0 do 90° jest dodatnie, wynosi $l = 0.063$ [m] przy kącie przechyłu 90° i jest zbliżone wartością dla wszystkich rozpatrywanych przypadków.

Wpływ wolnej burty na przebieg krzywej ramion

Wysokość metacentryczna bezpośrednio nie stanowi o zakresie krzywej ramion ani o wartości maksymalnego ramienia prostującego. Dwa okręty o jednakowej

GM mogą mieć zupełnie odmienne warunki stateczności. Wolna burta ma więc wpływ na przebieg krzywej ramion prostujących. W pracy przeanalizowano wpływ zmiany wolnej burty na krzywą ramion prostujących pontonu prostopadłościennego. W wyniku przeprowadzonych obliczeń uzyskano trzy przebiegi krzywej ramion prostujących l dla różnych H przy niezmiennych pozostałych parametrach pontonu przedstawione na rysunku 12.



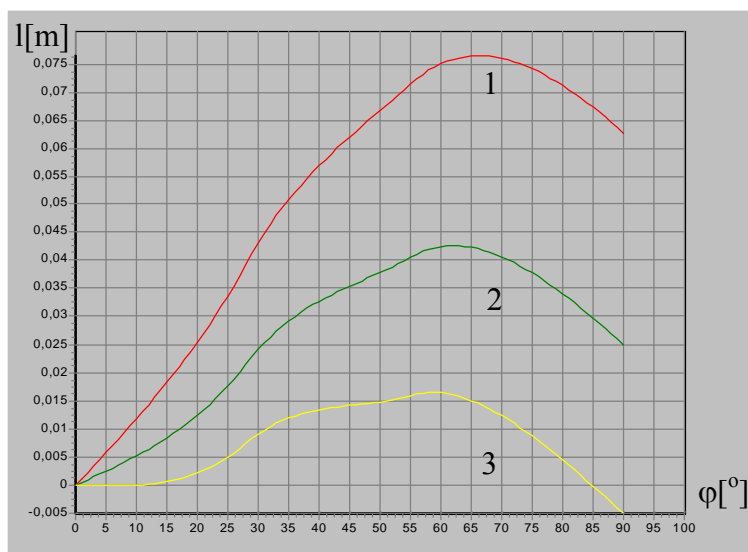
Rys. 12. Wpływ zmiany wolnej burty na krzywą ramion prostujących pontonu o danych:
 $H = 0.35$ [m], $m = 25.74$ [kg], $z_G = 0.1122$ [m], $H - T = 0.243$ [m], $T = 0.107$ [m] – krzywa (1)
 $H = 0.37$ [m], $m = 25.74$ [kg], $z_G = 0.1122$ [m], $H - T = 0.263$ [m], $T = 0.107$ [m] – krzywa (2)
 $H = 0.385$ [m], $m = 25.74$ [kg], $z_G = 0.1122$ [m], $H - T = 0.278$ [m], $T = 0.107$ [m] – krzywa (3)

Z przebiegu krzywych widać, że wolna burta pontonu ma znaczny wpływ na przebieg krzywej ramion dla większych kątów przechyłu (co występuje w tym wypadku przy kącie około 55°), nie ma natomiast wpływu na ramiona prostujące w zakresie kątów od 0 do 55° i tym samym na stateczność początkową. Wielkości tych kątów zmieniają się wraz ze zmianą parametrów pontonu, co może być dalszym etapem badań.

Wpływ położenia środka masy na krzywą ramion prostujących

Wpływ położenia środka masy na krzywą ramion prostujących jest oczywisty [3, 4]. Oddziałuje on zarówno na wielkość tych ramion, jak i na kąt zakresu krzywej ramion prostujących. W pracy rozpatrzono zmiany pionowego położenia środka ciężkości pontonu przy niezmiennych pozostałych parametrach. Wyniki obliczeń przedstawiono na rysunku 13.

Zmian z_G dokonywano w zakresie wielkości $z_G = 0.1122$ [m] do $z_G = 0.18$ [m], uzyskując krzywą ramion prostujących, dla której wysokość metacentryczna $GM = 0.0$ [m] (równowaga obojętna).



Rys. 13. Wpływ położenia środka masy na krzywą ramion prostujących pontonu prostopadłościennego:

$H = 0.35$ [m], $m = 25.74$ [kg], $H - T = 0.243$ [m], $T = 0.107$ [m], $z_G = 0.1122$ [m] – krzywa (1)
 $z_G = 0.15$ [m] – krzywa (2)
 $z_G = 0.18$ [m] – krzywa (3)

WNIOSKI

Na podstawie przeprowadzonych obliczeń i zastosowania odpowiednio przygotowanego w IkiEO programu komputerowego do obliczania promieni metacentrycznych i ramion prostujących pontonu prostopadłościennego można sformułować następujące wnioski:

1. Przeprowadzona analiza wpływu wymiarów pontonu i położenia środka masy na przebieg krzywej ramion prostujących jest zbieżna z wynikami prezentowanymi w dostępnej literaturze.
2. Zastosowanie algorytmu obliczeń ramion prostujących pontonu może posłużyć po odpowiednich modyfikacjach programu do obliczania stateczności nie tylko pontonów prostopadłościennych.
3. Wyniki obliczeń przedstawione w pracy umożliwią przeprowadzenie badań stateczności dynamicznej, sporządzenie wykresów ramion dynamicznych, a także ich komputerową wizualizację.

Proponowana forma komputerowej wizualizacji stateczności statycznej wraz z możliwością analizy wpływu wymiarów pontonu i położenia środka masy na przebieg krzywej ramion prostujących przyczyni się do zwiększenia efektywności procesu dydaktycznego w AMW. Jest też narzędziem do pogłębiania wiedzy z zakresu stateczności okrętu dla osób odpowiedzialnych na okręcie za bezpieczeństwo pływania.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Bronszejn N., Siemienidajew K. A., *Matematyka. Poradnik encyklopedyczny*, PWN, Warszawa 1995.
- [2] Derrett D. R., *Ship stability for Masters and Mates*, BH, Oxford 2003.
- [3] Dudziak J., *Teoria okrętu*, WM, Gdańsk 1988.
- [4] Kabaciński J., *Stateczność i niezatapialność statku*, WSM, Szczecin 1993.
- [5] Kobyliński L., *Zbiór zadań z teorii okrętu*, cz. I, PWN, Warszawa 1962.
- [6] *Kodeks stateczności w stanie nieuszkodzonym dla wszystkich typów statków objętych dokumentami IMO* [rez. MSC.75(69)], PRS 2003.
- [7] Pawłowski M., *Teoria okrętu*, cz. I, WSMW, Gdynia 1982.
- [8] Staliński J., *Teoria okrętu*, WM, Gdańsk 1969.
- [9] Tupper E., *Introduction to Naval Architecture*, Butterworth-Heinemann, Oxford 1996.
- [10] Więckiewicz W., Kucharski S., *Geometria kadłuba i obliczenia hydrostatyczne kadłuba statku*, WSM, Gdynia 1999.

- [11] Wróbel R., Pawłędzio A., *Komputerowe wspomaganie wyznaczania krzywej środków wyporu i ewoluty metacentrycznej pontonu prostopadłościennego o wymiarach LxBxH jako narzędzia do obliczeń promieni metacentrycznych oraz wysokości metacentrycznej*, projekt racjonalizatorski Nr 17/2002 z dnia 28.10.2002, nr ewid. 1665.
- [12] Wróbel R., Szubartowski R., Sikorski W., *Komputerowe wspomaganie obliczeń stateczności w warunkach okrętowych na przykładzie wybranego typu okrętu*, XX Sympozjum Siłowni Okrętowych, AMW, Gdynia 1998.
- [13] Wróbel R., *Określanie zmian stateczności wynikających z różnych stanów załadowania okrętu typu 888,570,660,1241*, praca statutowa pod kryptonimem „STATECZNOŚĆ”, AMW, Gdynia 1997.

ABSTRACT

The paper deals with the issue of static stability of a rectangular pontoon of LxBxH dimensions. The analysis was carried out by means of calculations and a computer program written in the Institute of Ship Construction and Exploitation. The curve of straightening arms was described with three dependencies corresponding to three ranges. Beginning with the angle at which deck enters water through the angle at which the bilge emerges from water (or deck enters water) up to the values of the angles mentioned above. The computer program used for calculations can be used to analyze ship stability at any condition of loading. In addition, the paper analyzes the effect of dimensions of the pontoon in the place of center of mass on the distribution of curves of strengthening arms, and it also presents their computer image.

Recenzent prof. dr hab. inż. Lech Kobyliński