

Patryk Richter
Wydział Oceanotechniki i Okrętownictwa
Politechnika Gdańska, Gdańsk

WPŁYW ROZMIESZCZENIA ZAŁOGI NA STATECZNOŚĆ NA WYBRANYM JACHCIE ŻAGLOWYM NA STATECZNOŚĆ JACHTU.

STRESZCZENIE

Praca prezentuje wpływ rozmieszczenia załogi na stateczność wybranego jachtu żaglowego. Do analizy wybrano typowe stany balastowania załogi. Podstawą do badań był jacht zaprojektowany przez autora w ramach zajęć programu dydaktycznego Projektowanie Statków i Jachtów II. Rozpatrzono sześć typowych stanów eksploatacyjnych, dla których określono przebieg krzywej stateczności statycznej jachtu, jak również kąty przechyłu od balastowania i wiatru dla 3, 4 i 5 w skali Beauforta. Badania stateczności odbywały się dla dwóch stopni swobody. Dla każdego rozpatrywanego stanu balastowania określono wynikowe kąty przechyłu, które decydują o szybkości jachtu. Wyniki badań pokazały, iż rozmieszczenie załogi na jachcie ma znaczny wpływ na stateczność, a najefektywniejszym sposobem balastowania jest balastowanie na trapezie.

Słowa kluczowe: Jacht żaglowy; stateczność; balastowanie załogą

THE INFLUENCE OF SAILING BOAT CREW DISLOCATION ON HER STABILITY.

ABSTRACT

Thesis presents the influence of sailing boat crew dislocation on the stability of sailing yacht. For analysis selected typical ballasting crew position. The basis for the research was designed yacht by the author during classes Design of Ships and Yachts II. Examined six typical operation positions, for whom defined the static stability curve of the yacht, as well as the tilt angles of ballasting and wind for 3, 4 and 5 on the Beaufort scale. Stability researches were held for two degrees of freedom. For each crew ballast positions were defined resulting condition tilt angles that determine the speed of the boat. The results showed that the dislocation of the crew on the boat has a significant impact on the stability, and the most effective way of ballasting is ballasting on the trapeze.

Keywords: Sailing yacht; stability; crew ballasting

WSTĘP

Żeglarstwo to sport, który w ostatnich latach znacząco zyskuje na popularności. Spowodowane jest to między innymi bezpośrednim dostępem Polski do morza oraz dużą ilością wód śródlądowych pokrywających nasz kraj. Ze względu na położenie geograficzne sezon żeglarski w Polsce trwa od maja do września. Warunki klimatyczne w naszej strefie geograficznej niestety wpływają niekorzystnie na okres żeglowania. Powodując, że jest on o połowę krótszy, niż na przykład we Francji, Hiszpanii czy Włoszech. Wielu amatorów żeglarstwa krótki okres eksploatacyjny jachtów w Polsce zastępuje poprzez czarter jachtów w basenie Morza Śródziemnego, Karaibach czy Azorach, gdzie dzięki wspaniałej lokalizacji geograficznej, a za tym bardziej sprzyjającej aurze żeglarstwo to sport całoroczny.

Ważnym elementem uprawiania żeglarstwa oprócz turystyki jest żeglarstwo regatowe. Od wielu lat intensywnie rozwija się na świecie na różnym poziomie. Poczynając od regat dziecięcych w klasie Optimist, aż po America's Cup, gdzie budżety ścigających się grup, sięgają dziesiątków milionów dolarów. Technologie wykorzystywane do projektowania i budowy współczesnych jednostek regatowych umacniają, w przekonaniu, że żeglarstwo to nie tylko romantyczna wizja, a starcie inżynierów z fizyką oraz żywiołem, jakim jest woda.

Balast ludzi na jachcie przekłada się na rozkład masy na jachcie, czego efektem może być powiększenie powierzchni nośnej żagli, w zamian otrzymując zwiększone prędkości jachtu, co w żeglarstwie regatowym jest szczególnie poszukiwane. Możliwości balastowania ciałem na jachcie jest kilka. Najpopularniejszym sposobem w żeglarstwie turystycznym jest balastowanie wykonywane przemieszczeniem masy załogi na burtę nawietrzną. Jest to metoda wygodna, bezpieczna i niewymagająca specjalnego przeszkolenia i zwinności załogi. Podczas regat stosuje się głównie balastowanie na trapezie, jednak ono wymaga od załogi większej sprawności fizycznej i odwagi. Trapezując należy wysunąć się po za burtę jachtu używając do tego trapezu, który jest połączeniem specjalnej uprząży załoganta z masztem na wysokości mocowania want, w celu przesunięcia środka masy.

Celem pracy było badanie wpływu rozmieszczenia załogi na stateczność jachtu. Obserwacje zachowywania się jachtu przy różnych próbach rozmieszczenia załogi, pozwolą na otrzymanie rezultatów, które pomogą pogłębić wiedzę na temat stateczności.

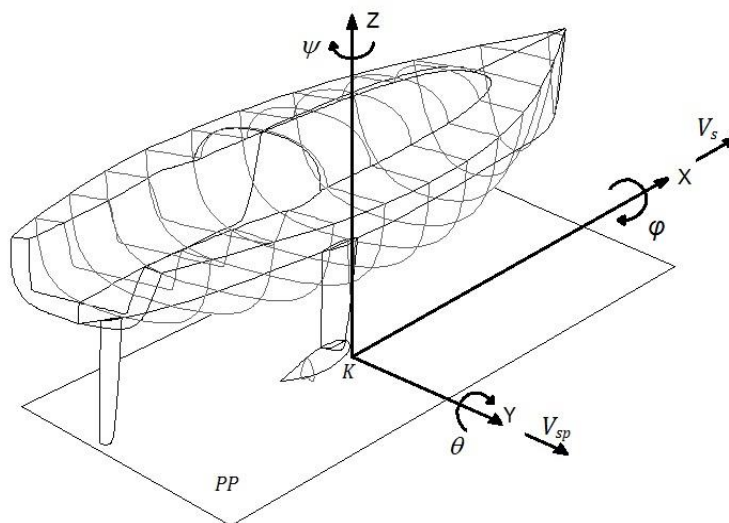
1. STATECZNOŚĆ JACHTU ŻAGLOWEGO

Stateczność jest to zdolność jednostki powrotu do pozycji wyjściowej, po zadziałaniu sił zakłócających położenie stanu równowagi.^[9]

Siłami zewnętrznymi powodującymi przechył jachtu mogą być działania wiatru jak i zafalowanie morza i przesunięcie mas.^[3] Momenty przechylające mogą wysoce zagrozić bezpieczeństwu jednostki jak i załodze, powodując znaczny przechył prowadzący do zalania otworów wnętrza kadłuba, bądź nawet przewrócenia jednostki. Jednostka pływająca posiada sześć stopni swobody, co przedstawiono na Rys. 1.1. Dla uproszczenia zagadnienia, rozpatruje się te najbardziej niebezpieczne związane z przechylem poprzecznym i wzdłużnym.^[1] Dla jachtów bada się stateczność poprzeczną i stateczność podłużną.

Uwzględniając stateczność okrętu, dla uproszczenia rozpatruje się tylko 1 stopień swobody- kąt przechylu- stateczność poprzeczną. Dla jachtów, gdzie wodnica pływania jest niesymetryczna względem osi Y, podczas przechylu następuje wzdłużne przemieszczenie środka wyporu, co związane jest z rozpatrywaniem stateczności wzdłużnej.^[1] Zdarza się, że małe jachty wywracają się przez dziób. Dlatego zaleca się dla jachtów żaglowych sprawdzanie stateczności wzdłużnej, pomimo że wszystkie przepisy klasyfikacyjne ograniczają się tylko do stateczności poprzecznej. Uwzględnienie stateczności wzdłużnej i poprzecznej związane jest ze swobodnym przemieszczaniem się środka wyporu, pod wpływem działania sił zewnętrznych generowanych na żaglach, które tworzą momenty, przechyły i przegłębienia.

Dla pokazania ruchu jednostki przyjęto prostokątny układ współrzędnych XYZ.^[2] Układ został przedstawiony na Rys. 1.1.



Rys. 1.1. Układ współrzędnych związany z jednostką pływającą

2. WYBÓR JACHTU ŻAGLOWEGO DO BADAŃ

Do badań wybrano jacht o nazwie P112, który został zaprojektowany przez autora w ramach programu dydaktycznego studiów inżynierskich, podczas zajęć 'Projektowanie Statków i Jachtów II.'^[8]

Wymiary główne jachtu P112:

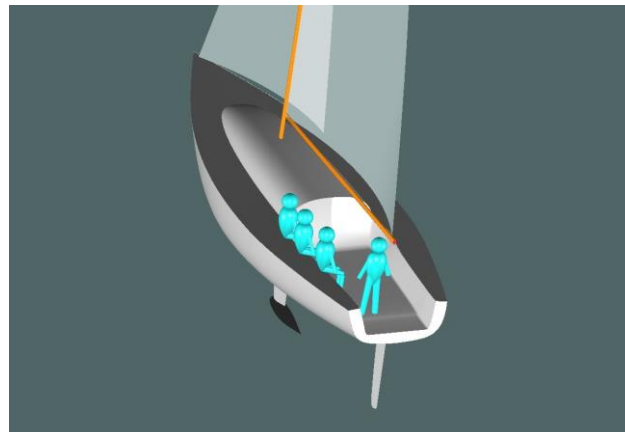
| | |
|--------------------------------|---|
| Długość całkowita | $L_C = 11,20$ [m] |
| Długość na linii wodnej | $L_{WL} = 10,04$ [m] |
| Szerokość maksymalna | $B_C = 3,79$ [m] |
| Zanurzenie całkowite | $T_C = 2,00$ [m] |
| Zanurzenie kadłuba | $T_K = 0,42$ [m] |
| Wysokość kadłuba | $H_K = 1,60$ [m] |
| Wyporność objętościowa | $\nabla = 5,11$ [m ³] |
| Wyporność masowa | $D = 5,20$ [t] |
| Powierzchnia rzeczywista żagli | $S_a = 63,6$ [m ²] |
| Współczynnik balastowy | $\frac{m_b}{D} = \frac{1594}{5200} = 0,307$ [-] |

3. TYPOWE STANY EKSPLOATACYJNE JACHTU W CZASIE REGAT, ZWIĄZANE Z ROZMIESZCZENIEM ZAŁOGI

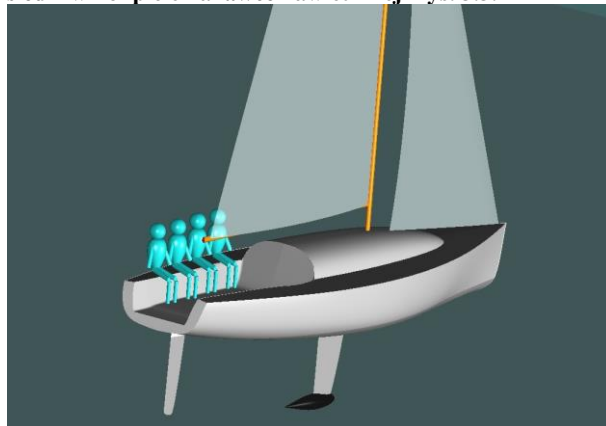
Do zaprezentowania stanów eksploatacyjnych jachtu *P 112*, jak i późniejszych obliczeń, został wykonany przez autora model przestrzenny 3D w programie Maxsurf. Model przedstawiony na Rys. 3.1. Program Maxsurf zapewnia architektom okrętowym narzędzia do wszystkich faz procesu projektowania i analizy statku. W tym programie, dzięki użyciu modelu 3D, pliki projektów mogą być optymalizowane przez wszystkie etapy projektowania.

3.1. Stan 1- Załoga siedzi w kokpicie na ławkach, po dwie osoby na stronie nawietrznej i na zawietrznej- Rys. 3.1.

Rys. 3.1. Załoga siedzi w kokpicie na ławkach, po dwie osoby na stronie nawietrznej i na zawietrznej^[10]

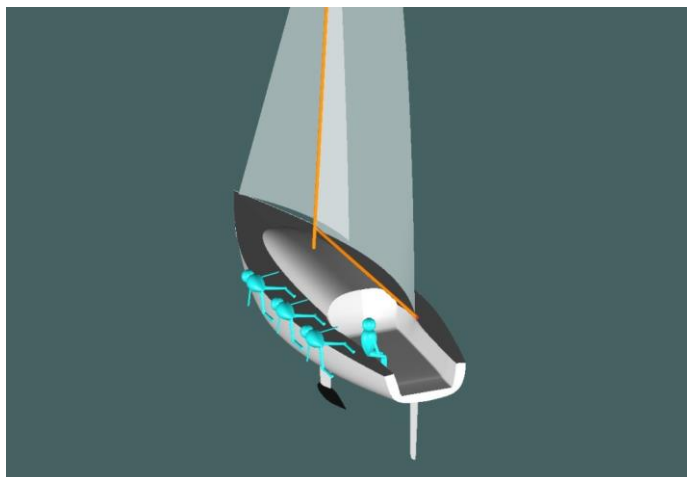
3.2. Stan 2- Trzy osoby siedzą na ławce nawietrznej w kokpicie, sternik stoi w kokpicie po nawietrznej stronie osi jachtu- Rys. 3.2.

Rys. 3.2. Trzy osoby siedzą na ławce nawietrznej w kokpicie, sternik stoi w kokpicie po nawietrznej stronie osi jachtu^[10]

3.3. Stan 3- Cała załoga siedzi w kokpicie na ławce nawietrznej-Rys. 3.3.

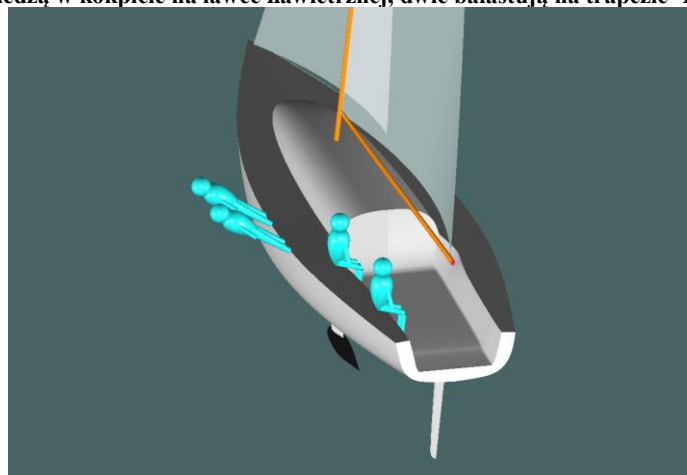
Rys. 3.3. Cała załoga siedzi w kokpicie na ławce nawietrznej^[10]

3.4. Stan 4- Sternik siedzi w kokpicie na ławce nawierzchni, trzy osoby leżą na pokładzie z nogą i ręką na burcie- Rys. 3.4.



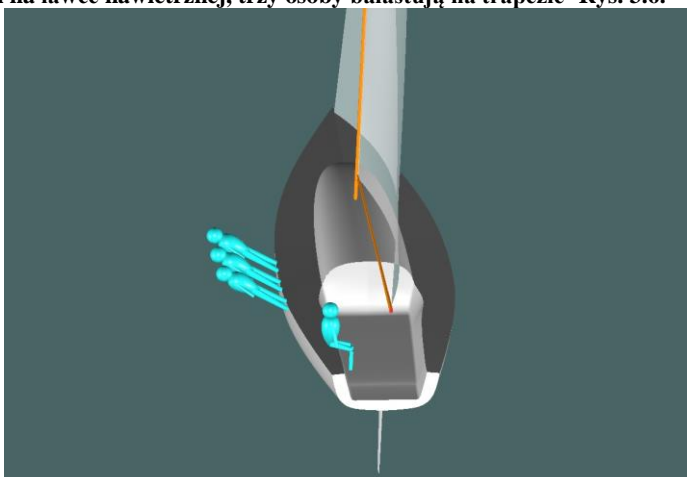
Rys. 3.4. Sternik siedzi w kokpicie na ławce nawierzchni, trzy osoby leżą na pokładzie z nogą i ręką na burcie^[10]

3.5. Stan 5- Dwie osoby siedzą w kokpicie na ławce nawierzchni, dwie balastują na trapezie- Rys. 3.5.



Rys. 3.5. Dwie osoby siedzą w kokpicie na ławce nawierzchni, dwie balastują na trapezie^[10]

3.6. Stan 6- Sternik siedzi na ławce nawierzchni, trzy osoby balastują na trapezie- Rys. 3.6.



Rys. 3.6. Sternik siedzi na ławce nawierzchni, trzy osoby balastują na trapezie^[10]

4. ZAŁOŻENIA DO BADAŃ WPŁYWU ZMIANY ROZMIESZCZENIA ZAŁOGI JACHTA, NA ZMIANĘ POŁOŻENIA ŚRODKA MASY.

Do analizy stateczności jachtu *P112* wybrano sześć powyżej opisanych stanów eksploatacyjnych.

Kursem badanego jachtu żaglowego będzie kurs na wiatr, gdyż to podczas niego wiatr wywołuje największy moment przechylający. Na jacht będzie działał moment przechylający od lewej burty, powodując przechył jachtu na burtę prawą. Obliczenia statecznościowe zostały dokonane w programie Hydromax^[11], w którym przyjęto układ współrzędnych jak na Rys. 1.1. Określanie współrzędnych środka ciężkości jachtu i załogi, będzie odbywać się w stosunku do płaszczyzny podstawowej *PP*.

4.2. Określenie masy jachtu pustego

Położenie wzdłużne środka ciężkości jachtu podobnie jego wysokość, została określona proporcjonalnie do jachtu *YD-40*^[2]. Jacht ten posiada podobną długość linii wodnej i wysokość kadłuba, do jachtu zaprojektowanego przez autora. Projektant jachtu *YD-40* wyliczył środek masy względem linii wodnej. Uzyskany środek ciężkości dla jachtu *P 112* zostanie przeliczony do wcześniej założonego układu współrzędnych.

4.3. Określenie środków masy załogi

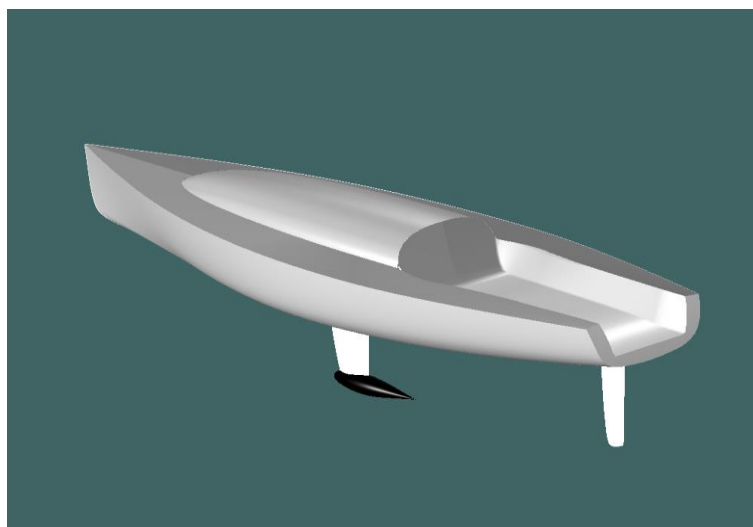
Obliczenia zostały przygotowane dla sytuacji, gdzie załoga startuje w regatach jednodniowych. Żeglarz do takich wyścigów powinien przygotować dla siebie prowiant i dodatkowy ubiór. Dla tego warunku do masy załoganta 75 kg, dodano dodatkowe 5kg wyposażenia do regat, co daje łącznie 80kg. Dla uzyskania obiektywnych wyników. Dla załoganta leżącego, środek masy został przyjęty, tak jak dla załoganta siedzącego, czyli w odległości 0,3 m licząc od końca tułowia w kierunku głowy.

5. BADANIE STATECZNOŚCI WYBRANEGO JACHTU DLA PRZYJĘTYCH STANÓW EKSPLOATACYJNYCH

Do badania stateczności jachtu wykorzystano program komputerowy Hydromax^[11].

Dane wprowadzone do obliczeń w programie:

- model przestrzenny kadłuba według Rys. 5.1.
- współrzędne środka masy jachtu pustego *P 112*
- współrzędne środka masy załogi dla poszczególnych stanów balastowania



Rys. 5.1. Model 3D kadłuba jachtu *P 112*^[10]

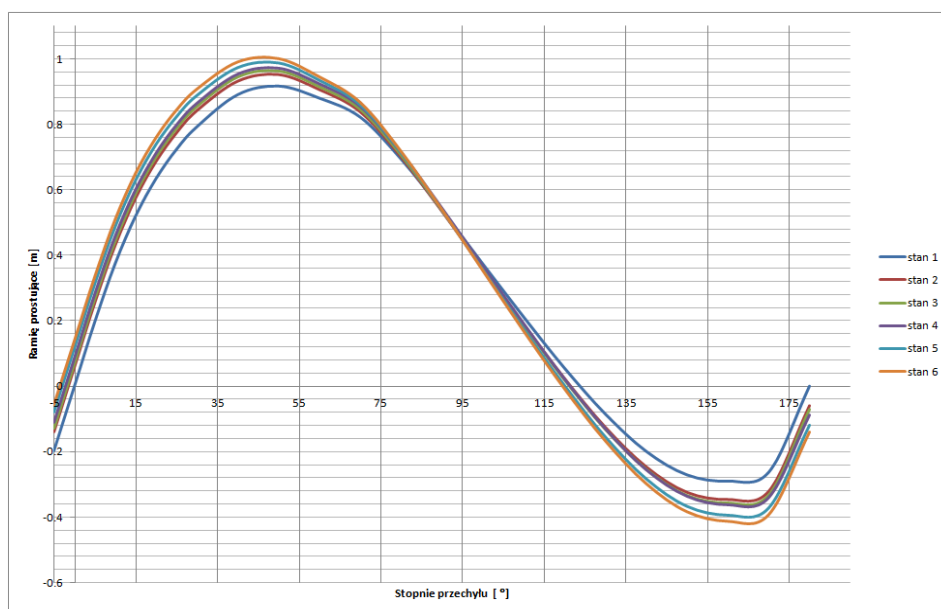
6. ANALIZA WYKONANYCH OBLICZEŃ

Dla ułatwienia analizy, krzywe ramion prostujących wszystkich sześciu stanów eksploatacyjnych jachtu P 112, zostały zamieszczone na jednym wykresie, na Rys 6.1., a wyniki zostały zestawione w Tabeli 6.1.

Tabela 6.1. Zestawienie wyników badań

| Stan | GM [m] | GZ _{max} [m] | GZ _{30°} [m] | GZ _{60°} [m] | Φ _{max} [°] |
|------|--------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|----------------------|
| 1 | 2,303 | 0,917 | 0,792 | 0,879 | 124 |
| 2 | 2,302 | 0,955 | 0,843 | 0,907 | 122 |
| 3 | 2,305 | 0,964 | 0,854 | 0,914 | 121 |
| 4 | 2,290 | 0,974 | 0,864 | 0,923 | 121 |
| 5 | 2,288 | 0,992 | 0,889 | 0,935 | 120 |
| 6 | 2,289 | 1,008 | 0,909 | 0,946 | 120 |

gdzie:

 \overline{GM} - wysokość metacentryczna \overline{GZ} - ramię prostujące statyczneGZ_{30°} - ramię prostujące statyczne dla kąta 30°GZ_{60°} - ramię prostujące statyczne dla kąta 60°GZ_{max} - maksymalne ramię prostujące statyczneΦ_{max} - maksymalny kąt przechyłu jachtu od momentu zewnętrznegoRys. 6.1. Wykres krzywych ramion prostujących dla wszystkich sześciu badanych stanów eksploatacyjnych^[11,12]

6.1. Wpływ rozmieszczenia załogi na stateczność jachtu, przy kącie przechyłu 20°

Wraz z narastającym przechylem, wpływ rozmieszczenia załogi ma znaczenie na stateczność jachtu. Ze wzrostem kąta przechyłu rośnie również opór jachtu. Maksymalny kąt przechyłu dopuszczalny na regatach ze względu na opór jachtu wynosi 18÷20°. Żeglowanie przy większych kątach, prowadzi do dużego dryfu i utraty prędkości. Różnice dla badanych stanów eksploatacyjnych, dla kąta przechyłu wynoszącego 20° zostały przedstawione na Rys. 6.2. Wyniki ramion prostujących dla badanych stanów przy kącie przechyłu 20° zostały przedstawione w tabeli 6.2. Różnice wpływu rozmieszczenia załogi na kąt przechyłu w poszczególnych stanach zostały porównane w Tabeli 6.3. Punktem odniesienia będzie wartość momentu prostującego $\overline{GZ} = 0,634 \text{ m}$ przy kącie przechyłu 20° dla *Stanu 1*.

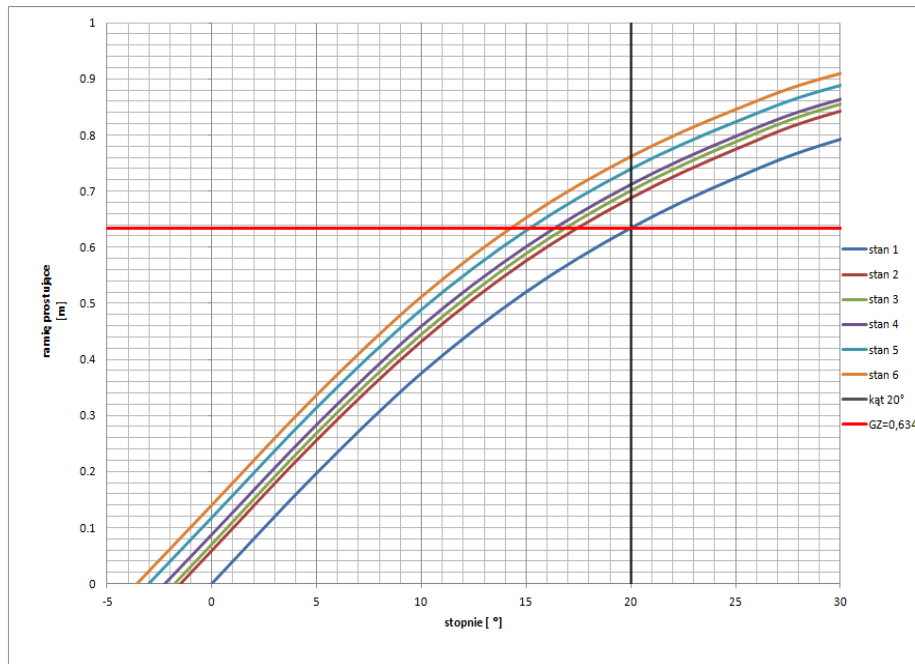
Rys. 6.2. Wykres ramion prostujących wszystkich sześciu badanych stanów eksploatacyjnych^[11,12]

Tabela 6.2. Ramię prostujące stanów eksploatacyjnych dla kąta przechyłu 20°

| | Stan 1 | Stan 2 | Stan 3 | Stan 4 | Stan 5 | Stan 6 |
|----------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| $\varphi = 20^\circ$ | 0,634 | 0,688 | 0,700 | 0,712 | 0,740 | 0,761 |

Tabela 6.3. Porównanie kątów przechyłu, wszystkich badanych stanów eksploatacyjnych dla jednakowego $\overline{GZ} = 0,634$

| | Stan 1 | Stan 2 | Stan 3 | Stan 4 | Stan 5 | Stan 6 |
|----------------------------|--------|---------|---------|---------|---------|---------|
| $\overline{GZ} = 0,634$ m | 20° | 17,7° | 16,9° | 16,4° | 15,2° | 14,3° |
| Różnica kąta przechyłu [%] | - | -13,1 % | -15,5 % | -18,2 % | -24,1 % | -28,6 % |

6.2. Określanie kątów przechyłu jachtów przy różnych stanach eksploatacyjnych przy wybranej sile wiatru.

Analizę przeprowadzono dla wiatru o sile 3, 4 i 5 w skali Beauforta.. Momenty przechylające od wiatru w porywie M_W dla sześciu stanów eksploatacyjnych obliczono wg wzoru:

$$M_W = S * p * h$$

gdzie:

p - ciśnienie statyczne wiatru w porywie [Pa];

h - ramię siły naporu wiatru (odległość od środka naporu żagli do środka bocznego oporu części podwodnej [m].

S - klasyfikacyjna powierzchnia ożaglowania [m²].

Wartości ciśnienia statycznego wiatru w porywie p zostały przyjęte z tabeli 6.4. ^[7] Przebieg zmienności momentu przechylającego od funkcji przechyłu został wyliczony według relacji ^[4]

$$M_{W\varphi} = M_{W\varphi=0} * \cos^{1,3}\varphi$$

gdzie:

φ - kąt przechyłu statycznego jachtu [°]

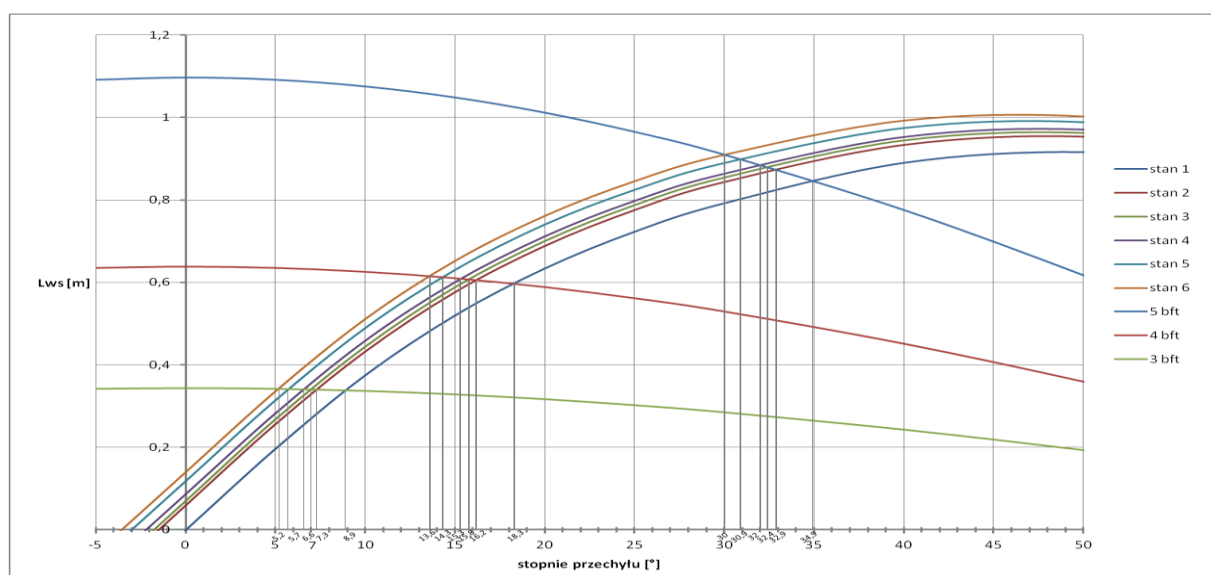
Wykres momentów przechylających od wiatru o sile 3, 4 i 5 Bft, nałożonych na krzywe ramion prostujących dla sześciu stanów eksploatacyjnych, przedstawiono na Rys. 6.3. Zestawienie kątów przechyłu dla badanych prędkości wiatru i uwzględnienie różnic kątów przechyłu stanów balastowania w odniesieniu do stanu pierwszego, zostało zamieszczone w Tabeli 6.5.

Tabela 6.4. Wartości ciśnienia wiatru w porywie^[7]

| Skala Beauforta [°Bft] | Ciśnienie statyczne wiatru w porywie q_{wd} [Pa] |
|------------------------|--|
| 3 | 36,40 |
| 4 | 67,49 |
| 5 | 116,74 |

Tabela 6.5. Porównanie kątów przechyłu, wszystkich badanych stanów eksploatacyjnych, przy sile wiatru 3, 4 i 5 Bft

| Siła wiatru | Kąt przechyłu statycznego jachtu [°] | | | | | |
|----------------------------|--------------------------------------|---------|---------|---------|---------|---------|
| | Stan 1 | Stan 2 | Stan 3 | Stan 4 | Stan 5 | Stan 6 |
| 3 [Bft] | 8,9° | 7,3° | 7° | 6,6° | 5,7° | 5,2° |
| Różnica kąta przechyłu [%] | - | -17,98% | -21,35% | -25,84% | -35,96% | -41,57% |
| 4 [Bft] | 18,3° | 16,2° | 15,8° | 15,3° | 14,3° | 13,6° |
| Różnica kąta przechyłu [%] | - | -11,48% | -13,66% | -16,39% | -21,86% | -25,68% |
| 5 [Bft] | 34,9° | 32,9° | 32,4° | 32° | 30,9° | 30° |
| Różnica kąta przechyłu [%] | - | -5,73% | -7,16% | -8,31% | -11,46% | -14,04% |

Rys. 6.3. Wykres krzywych momentów przechylających od wiatru, nalożonych na krzywe ramion prostujących dla sześciu stanów eksploatacyjnych^[11,12]

PODSUMOWANIE

- Rozmieszczenie załogi ma znaczny wpływ na kąty przechyłu jachtu, a tym samym na jego prędkość;
- Projektując jacht regatowy, należy wziąć pod uwagę możliwości balastowania załogi przystosowując ergonomiczne rozplanowanie pokładu i kokpitu jachtu do balastowania różnego typu w zależności od jego klasy i przepisów regatowych;
- Mając na celu poprawę stateczności na jachcie żaglowym, nie należy rozmieszczać załogi na burcie zawietrznej. Wyjątkiem mogą być sytuacje, gdy wiatr jest bardzo słaby. Można wtedy przechylić jacht delikatnie na stronę zawietrzną, aby żagle nabrały kształtu, lub gdy załoga wykonuje manewry jak np. zwrot z kołyską;
- Nie powinno się przyjmować pozycji stojącej na jachcie, z powodu podnoszenia środka masy jachtu, obniżając równocześnie stateczność. Wyjątkiem jest wykonywanie prac koniecznych związanych z trzymaniem lub klarowaniem

sprzętu i olinowania, jak również stanie na trapezie. Jeśli istnieje taka możliwość, zalecane jest wykonywanie wszystkich prac utrzymując pozycje jak najbliższej płaszczyźnie podstawowej;

- Balastowanie załogi na trapezie, przynosi najlepsze efekty dla poprawy stateczności. Zdecydowanie wyróżnia się wynikami od balastowania siedząc lub leżąc na burcie;
- Negatywną cechą rozmieszczenia całej załogi na trapezie, jak w przypadku leżenia na burcie jest, utrudniony dostęp do szotów i kokpitu. Podczas nagłych zdarzeń załoga potrzebuje więcej czasu na reakcje i powrót do kokpitu. Takie rozmieszczenie załogantów, również podczas nagłej zmiany odpadającej wiatru, spowoduje samoczynne przerzucenie żagli na stronę nawietrzną i przechył jachtu na stronę wiszącej załogi, co grozi jej wpadnięciem do wody lub nawet do wywrotki;
- Skuteczne balastowanie, znacznie poprawia stateczność jachtu, co pozwala na pływanie przy pełnym ożaglowaniu, przy większej sile wiatru. Przekłada się to na osiąganie większych prędkości jachtu, a jest to priorytetem podczas regat żeglarskich.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Dudziak, Jan. Teoria Okrętu. Gdańsk : Wydawnictwo Morskie Gdańsk, 1988,
- [2] Larsson, Lars. Principles of Yacht Design. Maine : International Marine, 1994,
- [3] Marchaj, Czesław. Teoria żeglowania. Warszawa : "Alma-Press", 2013. str. 130,
- [4] Młynarczyk, Jan. Materiały pomocnicze do wykładów. Gdańsk, 2010,
- [5] Parlament Europejski i Rada Unii Europejskiej. Dyrektywa 94/25/WE Parlamentu Europejskiego i Rady. 1994,
- [6] Polski Rejestr Statków. Część III Wyposażenie i stateczność. Gdańsk : Polski Rejestr Statków, 1996,
- [7] Polski Rejestr Statków. Publikacja nr 29/P Obliczanie i ocena stateczności statków żaglowych o długości nie mniejszej niż 24 m. Gdańsk : Polski Rejestr Statków, 2013,
- [8] Richter, Patryk. Projekt jachtu turystyczno- regatowego dla 4 os. Gdańsk, 2014,
- [9] Wełnicki, Wiesław. Mechanika Ruchu Okrętu. Gdańsk : Wydawnictwo Politechniki Gdańskiej, 1989. str. 11.

PROGRAMY KOMPUTEROWE

- [10] Program Maxsurf v.11.03
- [11] Program Hydromax v.11.03
- [12] Program Microsoft Excel 2007