

Politechnika Gdańska  
Wydział Oceanotechniki i Okrętownictwa  
Zakład Mechaniki, Konstrukcji i Wytrzymałości Okrętu

Rozprawa doktorska

PÓLEMPIRYCZNA METODA PROGNOZOWANIA WŁAŚCIWOŚCI  
NAPĘDOWYCH STATKÓW Z NAPĘDEM WIELOPODOWYM

mgr inż. Jan Kanar

Promotor:  
doc. dr hab. Maciej Pawłowski

Gdańsk 2009 r.

<b>1. WYKAZ WAŻNIEJSZYCH OZNACZEŃ .....</b>	<b>6</b>
<b>2. WSTĘP .....</b>	<b>9</b>
<b>2.1 Problematyka pracy .....</b>	<b>9</b>
<b>2.2 Cel i zakres pracy .....</b>	<b>10</b>
<b>3. SFORMUŁOWANIE PROBLEMU .....</b>	<b>10</b>
<b>3.1. Definicja napędu podowego .....</b>	<b>10</b>
<b>3.2 Światowy rynek pędników podowych.....</b>	<b>12</b>
3.2.1 Przykład stanu na II połowę roku 2007 .....	12
3.2.2 Sytuacja bieżąca .....	13
<b>3.3 Konfiguracje pędników podowych .....</b>	<b>13</b>
<b>3.4 Główne aspekty hydromechaniczne napędu podowego .....</b>	<b>14</b>
3.4.1 Wprowadzenie .....	14
3.4.2 Zestawienie głównych problemów napędu statków podowych .....	14
3.4.3 Zakres prac projektu .....	16
<b>4. KRYTYCZNA OCENA STANU SZTUKI W NAPĘDZIE PODOWYM.....</b>	<b>19</b>
<b>4.1 W fazach projektowania koncepcyjnego.....</b>	<b>19</b>
4.1.1 Ogólna koncepcja statku podowego .....	19
4.1.2. Koncepcja kształtu kadłuba .....	19
4.1.3 Wybór pędników podowych.....	20
<b>4.2 W hydromechanicznych badaniach modelowych.....</b>	<b>21</b>
4.2.1 Charakterystyki oporowe.....	21
4.2.2 Nominalne pole prędkości w kręgu śruby statku podowego.....	21
4.2.3 Prognozowanie osiągow napędowych.....	22
4.2.4 Procedury badawcze CTO .....	22
<b>5. PRZYBLIŻONE METODY PROGNOZOWANIA CHARAKTERYSTYK</b>	
<b><u>OPOROWO-NAPĘDOWYCH STATKÓW WYPORNOŚCIOWYCH .....</u></b>	<b>25</b>
<b>5.1 Informacja ogólna .....</b>	<b>25</b>
<b>5.2 Metoda Holtropa .....</b>	<b>26</b>
5.2.1 Prognozy oporu .....	26
5.2.3 Prognozy charakterystyk napędowych .....	29
4.2.4 Określenie sprawności śruby napędowej.....	30
<b>6. OGRANICZENIA BADAWCZE NAPĘDU PODOWEGO .....</b>	<b>31</b>
<b>6.1 Efekt szczeliny pomiędzy piastą śruby i obudową podu .....</b>	<b>31</b>
<b>6.2 Efekt skali obudowy podu.....</b>	<b>32</b>

6.2.1 Wprowadzenie .....	32
6.2.2 Metoda SSPA .....	32
6.2.3 Metoda Instytutu Kryłowa .....	32
6.2.4 Metoda Sumitomo .....	33
6.2.5 Metoda HSVA .....	33
6.2.6 Metoda MARIN.....	33
6.2.7 Metoda CTO .....	33
6.2.8 Zastosowanie kodu RANS (Reynolds Averaged Navier-Stokes Solver).....	34
6.2.9 Technika symulacji zadanych warunków eksploatacyjnych.....	35
<b>7. ZESTAWIENIE WYJŚCIOWYCH ZBIORÓW DANYCH .....</b>	<b>35</b>
<b>7.1 Zastosowane procedury .....</b>	<b>35</b>
7.1.1 Próby oporu .....	35
7.1.2 Pomiary nominalnego pola prędkości w płaszczyźnie kręgu śruby .....	35
7.1.3 Próby pędników odosobnionych .....	36
7.1.4 Próby napędowe .....	37
<b>7.2 Projekt Optipod.....</b>	<b>38</b>
7.2.1 Wymiary główne badanych statków podowych .....	38
7.2.2 Informacja o badanych kształtach kadłuba.....	39
7.2.4 Struktura pola prędkości w płaszczyźnie kręgu śruby .....	42
7.2.5 Charakterystyki pędników odosobnionych .....	43
7.2.6 Charakterystyki napędowe .....	46
<b>7.3 Projekt Fastpod .....</b>	<b>51</b>
7.3.1 Wymiary główne badanych statków podowych .....	51
7.3.2 Informacja o badanych kształtach kadłuba .....	51
7.3.3 Charakterystyki oporowe – kadłubbez pędników .....	53
7.3.4 Struktura pola prędkości w płaszczyźnie kręgu śruby .....	55
7.3.5 Charakterystyki pędników odosobnionych .....	57
7.3.6 Charakterystyki napędowe .....	67
<b>8. KRYTYCZNA ANALIZA ZASOBÓW I DOBÓR NARZĘDZI NUMERYCZNYCH .....</b>	<b>71</b>
<b>8.1 Identyfikacja głównych grup merytorycznych baz danych.....</b>	<b>71</b>
8.1.1 Wprowadzenie.....	71
8.1.2 Baza wymiarów głównych przebadanych kadłubów statków podowych.....	71
8.1.3 Baza charakterystyk przebadanych odosobnionych śrub podowych .....	72
8.1.4 Baza charakterystyk przebadanych zespołów podowych.....	72
8.1.5 Baza charakterystyk współpracy śruby napędowej z płetwą sterową.....	72
<b>8.2 Ocena kompletności wyników badań jednostek podowych.....</b>	<b>72</b>
<b>8.3 Przegląd narzędzi numerycznych do analiz zasobów baz danych .....</b>	<b>72</b>
<b>9. IDENTYFIKACJA INTERAKCJI HYDRODYNAMICZNYCH .....</b>	<b>73</b>
<b>9.1 Współpraca: kadłub statku – zespół jednostki podowej .....</b>	<b>73</b>

9.1.1	Wzajemne usytuowanie wzdłużne .....	73
9.1.2	Wzajemne usytuowanie pionowe .....	81
<b>9.2</b>	<b>Elementy współdziałania: piasta śruby podowej – bryła podu .....</b>	<b>82</b>
9.2.1	Wprowadzenie .....	82
9.2.2	Wpływ zmian szerokości szczeliny podowej .....	82
<b>9.3</b>	<b>Wpływ geometrii pędnika podowego na charakterystyki podu odosobnionego ...</b>	<b>83</b>
9.3.1	Opis parametryczny geometrii pędnika podowego .....	83
9.3.2	Charakterystyki hydromechaniczne pędnika podowego .....	84
<b>10.</b>	<b>BUDOWA BAZ DANYCH PROJEKTU .....</b>	<b>86</b>
<b>10.1</b>	<b>Określenie formatów finalnych baz danych.....</b>	<b>86</b>
10.1.1	Dane kadłuba statków podowych.....	86
10.1.2	Charakterystyki hydrodynamiczne śrub podowych .....	86
10.1.3	Charakterystyki hydrodynamiczne podów w ujęciu parametrycznym .....	86
10.1.4	Współpraca śruby z elementem płata .....	87
<b>10.2</b>	<b>Przykłady baz danych .....</b>	<b>87</b>
10.2.1	Dane kadłuba statków podowych.....	87
10.2.2	Charakterystyki hydrodynamiczne śrub podowych .....	87
10.2.3	Charakterystyki hydrodynamiczne podów w ujęciu parametrycznym .....	88
10.2.4	Współpraca śruby z elementem płata .....	90
<b>11.</b>	<b>MODELE MATEMATYCZNE INTERAKCJI HYDRODYNAMICZNYCH.....</b>	<b>95</b>
<b>11.1</b>	<b>Wprowadzenie .....</b>	<b>95</b>
<b>11.2</b>	<b>Współpraca: kadłub – pędnik podowy .....</b>	<b>96</b>
<b>11.3</b>	<b>Współpraca: śruba podowa-obudowa podu .....</b>	<b>96</b>
11.3.1	Wprowadzenie .....	96
11.3.2	Relacja pomiędzy charakterystykami śruby podowej i zespołu podowego .....	97
11.3.4	Elementy współpracy śruba – płetwa .....	102
<b>11.4</b>	<b>Wpływ efektu skali obudowy na osiągi pędnika podowego .....</b>	<b>102</b>
<b>12.</b>	<b>METODYKA PROGNOZOWANIA OSIĄGÓW STATKU PODOWEGO .....</b>	<b>104</b>
<b>12.1</b>	<b>Schemat wyjściowy:.....</b>	<b>104</b>
12.1.1	Wyjściowe dane projektowe.....	104
12.1.2	Charakterystyki hydrodynamiczne.....	104
<b>12.2.</b>	<b>Schemat procedury prognozowania .....</b>	<b>104</b>
<b>12.3</b>	<b>Identyfikacja i opracowanie modułów uzupełniających .....</b>	<b>106</b>
<b>13.</b>	<b>WERYFIKACJA PROCEDURY .....</b>	<b>107</b>
<b>13.1</b>	<b>Dane statku wzorcowego.....</b>	<b>107</b>
<b>13.2</b>	<b>Charakterystyki oporowe .....</b>	<b>107</b>
<b>13.3</b>	<b>Charakterystyki podowe.....</b>	<b>108</b>

13.3.1	Charakterystyki śrub podowych .....	108
13.3.2	Charakterystyki odosobnionego pędnika podowego.....	108
13.3.3	Opór obudowy podu .....	109
13.3.4	Charakterystyki pędnika podowego .....	109
<b>13.4</b>	<b>Charakterystyki napędowe statku podowego .....</b>	<b>111</b>
13.4.1	Współczynniki napędowe kadłuba .....	111
13.4.2	Weryfikacja charakterystyk napędowych.....	112
13.4.3	Ocena dokładności prognozowania.....	113
<b>14.</b>	<b>ZAKOŃCZENIE .....</b>	<b>116</b>
14.1	Podsumowanie .....	116
14.2	Wnioski końcowe .....	117
<b>15.</b>	<b>BIBLIOGRAFIA .....</b>	<b>118</b>

## 1. WYKAZ WAŻNIEJSZYCH OZNACZEŃ

- $A_T$  pole powierzchni rzutu nadwodnej części statku na płaszczyznę owręza
- $C_A$  współczynnik korelacyjny oporu lepkości
- $C_{AA}$  współczynnik oporu powietrza
- $C_{AP}$  współczynnik oporu części wystających innych niż zespół podowy
- $C_D$  współczynnik oporu profili śrubowych
- $C_F$  współczynnik oporu tarcia
- $C_{FO}$  współczynnik oporu tarcia płaskiej płyty
- $C_D$  współczynnik oporu obudowy podu
- $\Delta C_F$  dodatek na opór chropowatości
- $\Delta C_{FC}$  współczynnik korekcyjny oporu tarcia na warunki prób na mili
- $C_R$  współczynnik oporu resztkowego gołego kadłuba
- $C_{TB}$  współczynnik oporu całkowitego gołego kadłuba
- $C_V$  współczynnik oporu lepkości
- $c$  długość cięciwy profilu śruby na promieniu  $r/R = 0,75$
- $D$  średnica śruby
- $F_D$  siła podholowująca modelu w próbach napędowych
- $F_n$  liczba Froude'a;  $F_n = \frac{V}{\sqrt{gL_{WL}}}$
- $g$  przyspieszenie ziemskie
- $J$  współczynnik posuwu śruby  $J = \frac{V_A}{Dn}$
- $J_T$  współczynnik posuwu określony z warunku identyczności naporu lub mocy
- $J_V$  pozorny współczynnik posuwu  $J_V = \frac{V}{Dn}$
- $k$  współczynnik kształtu kadłuba
- $K_{Q0}, K_{T0}$  współczynniki momentu i naporu śruby swobodnej
- $K_{QU0}, K_{TPP0}$  współczynniki momentu i naporu śruby pracującej w swobodnym zespole podowym (mierzone na wale śruby)

$K_{QP}, K_{TP}$	współczynniki momentu i naporu śruby pracującej w zespole podowym za kadłubem (mierzone na wale śruby)
$K_{TVO}$	współczynnik naporu swobodnego podowego zespołu napędowego
$K_{QUO}$	współczynnik momentu swobodnego podowego zespołu napędowego
$K_{TU}$	współczynnik naporu podowego zespołu napędowego pracującego za kadłubem
$k_p$	chropowatość skrzydła śruby [m]
$L_{WL}$	długość wodnicy statku
$n$	liczba obrotów śruby
$n_T$	liczba obrotów śruby statku skorygowana na warunki prób na mili
$P_{DS}$	moc doprowadzona do śruby statku
$P_{DT}$	moc doprowadzona do śruby statku skorygowana na warunki prób na mili
$P_E$	moc holowania
$Q_O$	moment śruby swobodnej
$Q_{U0}$	moment śruby pracującej w swobodnym zespole podowym
$Q_P$	moment śruby pracującej w zespole podowym za kadłubem
$R_j$	promień strumienia zaśrubowego w rejonie gondoli podu
$R$	promień śruby
$R_n$	liczba Reynoldsa: $R_n = \frac{V L_{WL}}{\nu}$
$R_B$	opór gołego kadłuba
$R_T$	opór całkowity
$R_G$	promień gondoli podu
$R_h$	promień piasty śruby
$S$	pole powierzchni zwilżonej kadłuba bez części wystających
$S_{BK}$	całkowite pole powierzchni zwilżonej stępek obłowych
$t$	maksymalna grubość profilu skrzydła śruby na promieniu $r/R=0,75$
$t$	współczynnik ssania
$T_O$	napór śruby swobodnej
$T_{PP0}$	napór śruby pracującej w swobodnym zespole podowym
$T_P$	napór śruby pracującej w zespole podowym za kadłubem
$T_U$	napór zespołu podowego mierzony między zespołem i kadłubem
$V$	prędkość
$V_A$	prędkość postępową śruby $V_A = V(1 - w)$

$w_T$	współczynnik strumienia nadażającego
$w_P$	współczynnik strumienia nadażającego podu
$\eta_O$	sprawność śruby swobodnej
$\eta_{U0}$	sprawność swobodnego zespołu podowego
$\eta_D$	ogólna sprawność napędowa $\eta_D = \frac{P_E}{P_D}$
$\eta_H$	sprawność kadłuba $\eta_H = \frac{1-t}{1-w}$
$\eta_R$	względna sprawność rotacyjna
$\lambda$	skala modelu
$\nu$	kinematyczny współczynnik lepkości
$\rho$	gęstość wody

Uwaga: indeks „M” oznacza wielkość dotyczącą modelu

indeks „S” oznacza wielkość dotyczącą statku.



## 2. WSTĘP

### 2.1 Problematyka pracy

Niniejsza praca została zrealizowana w ramach grantu promotorskiego nr N509 04235/3052. Celem jej było opracowanie metodyki przybliżonego prognozowania hydrodynamicznych osiągnięć napędowych statków towarowych z napędem podowym w oparciu o wyniki zrealizowanych projektów badawczych w ramach 5. Programu Ramowego Unii Europejskiej, jak i w oparciu o dostępne dane literaturowe.

Pędniki podowe należą do najbardziej nowatorskich okrętowych układów napędowych ostatnich lat, wyróżniających się zarówno szeroko rozumianymi walorami operacyjnymi, jak i przyjaznym ukierunkowaniem w stronę środowiska naturalnego. Istota ich działania polega na wykorzystaniu silnika elektrycznego dużej mocy, który usytuowany na zewnątrz kadłuba w opływowej gondoli (podzie) i podwieszony na elemencie płata o dostatecznej wytrzymałości, łączy cechy urządzenia sterowego i pędnika okrętowego. Jest to możliwe, gdyż z poziomo usytuowanym silnikiem elektrycznym współpracuje, osadzona na końcówce jego wału, śruba okrętowa o skoku stałym, będąca w układzie ciągnącym lub pchającym względem gondoli.

Ponadto zawieszenie całości w kadłubie na łożysku o osi pionowej, pozwala na skierowanie niemal całego naporu śruby w dowolnie zadanym kierunku, dając siłę poprzeczną do realizacji manewrów. Dzięki takiej konfiguracji napędu istnieje cały szereg korzyści w zakresie podwyższonej sprawności napędowej, lepszych właściwości manewrowych, zwiększonej ładowności, podniesionego bezpieczeństwa żeglugi oraz zminimalizowanych oddziaływań środowiskowych, głównie dzięki zastosowaniu elektrycznych siłowni okrętowych. Układy napędowe tego typu stwarzają duże możliwości wykorzystania odnawialnych źródeł energii.

Jednakże napęd tego rodzaju, wprowadzając ciała obrotowe o dużej objętości, podwieszane pod koszem rufowym statku na elemencie płata, wnosi nową jakość i narzuca określone wymagania w zakresie stosowanych rozwiązań projektowych tego rejonu statku. Zmienia się w sposób istotny pole prędkości wokół kadłuba, wpływając przy tym na punkt pracy śrub podowych. Rodzi to nowe problemy nieznanne dotychczas w eksploatacji statków z napędem konwencjonalnym, jak i wyzwania w aspekcie analiz i badań hydromechanicznych. Jak wiadomo, wprowadzenie tych innowacyjnych napędów szybko wykazało zarówno brak adekwatnych narzędzi do projektowania statków podowych oraz szczupłość bazy wiedzy hydrodynamicznej w aspekcie oceny rzeczywistych osiągnięć takiego rodzaju napędu.

Do wypełnienia tej luki, Komisja Europejska uruchomiła, w ramach 5. Programu Ramowego, takie projekty jak: OPTIPOD oraz FASTPOD w celu gruntownego rozpoznania specyfiki napędu podowego. Jednakże szeroki wachlarz podejść do zagadnienia, jak i złożoność badanych tematów pozwolił, w wielu istotnych aspektach, tylko na wykonanie wstępnych badań rozpoznawczych. Jednocześnie zaobserwowano nowe zjawiska, zarówno w sferze badawczej, jak i eksploatacyjnej tego nowego rodzaju napędu okrętowego, które stały się tematem trwających studiów komitetów ITTC. Wspomniane projekty unijne dały jednak podstawę do przyjęcia hipotezy, iż w oparciu o uzyskaną wiedzę, wzbogaconą publikacjami fachowymi, można dokonać jej integracji i opracować metodyki pozwalające na prognozowanie i ocenę osiągnięć statków podowych na zadowalającym poziomie dokładności. Rysują się przy tym dwa główne, obszerne nurty badań wynikające ze specyfiki napędu podowego, takie jak osiągi napędowe i manewrowe. Te dwie funkcje pędnika i steru mają także istotny wpływ na zagadnienia

projektowe tych układów, skutkując, aktualnie dominującymi, symetrycznymi układami dwu-podowymi. Odsuwając pędniki z najbardziej rozbudowanego rejonu strumienia nadążającego uzyskuje się niemal jednorodny napływ wody do śrub napędowych, dając przy tym możliwość wytworzenia kontrolowanego momentu obrotowego kadłuba statku na potrzeby manewrowania, co nie jest możliwe w takim wymiarze przy użyciu konwencjonalnych układów dwuśrubowych.

## 2.2 Cel i zakres pracy

Przedmiotem niniejszej rozprawy są wyłącznie zagadnienia projektowo - badawcze oraz prognozowanie osiągnięć napędowych nowatorskiego napędu okrętowego, jakim są pędniki podowe. Napęd ten jednak, oprócz wspomnianych zalet, wprowadził szereg interakcji w rejonie rufy statku, nieznanymi w przypadku statków konwencjonalnych, a mających duży wpływ na osiągnięcia statku podowego. Do najważniejszych z nich należą:

- współpraca pędnika podowego z kadłubem statku;
- wzajemne oddziaływania pędników;
- współpraca śruby podowej z jego obudową;
- charakterystyki pracy śruby podowej w danym polu prędkości.

Innowacyjność tego rodzaju napędu wykazała w praktyce istotny brak narzędzi do projektowania takich statków oraz nieprzygotowanie bazy badawczej do szczegółowych badań i analiz, biorąc także pod uwagę, szeroko rozumiane, prognozowanie ich osiągnięć. Zaistniałe w praktyce problemy zmusiły środowiska okrętowe do uruchomienia centralnie finansowanych projektów badawczych oraz do powołania Komitetu Pędników Azymutalnych ITTC.

Dlatego też, celem niniejszej pracy stało się dokonanie krytycznego przeglądu zrealizowanych badań w celu identyfikacji głównych interakcji pomiędzy podstawowymi elementami napędu podowego, uogólnienie dostępnych wyników i opracowanie metodyki badania i prognozowania hydrodynamicznych osiągnięć napędowych statków z napędem podowym w oparciu o dedykowane modele parametryczne. Wszystko przy założeniu minimalizacji wymaganej mocy napędowej oraz utrzymania niezbędnej dokładności prognozowania. Całość wyników pracy pozwoli na opracowanie metod składowania zgromadzonej wiedzy, budowę i dalszą rozbudowę utworzonych struktur otwartych baz danych i metodyk, które będą uaktualniane w miarę wzrostu zasobów pozyskiwanych nowych danych.

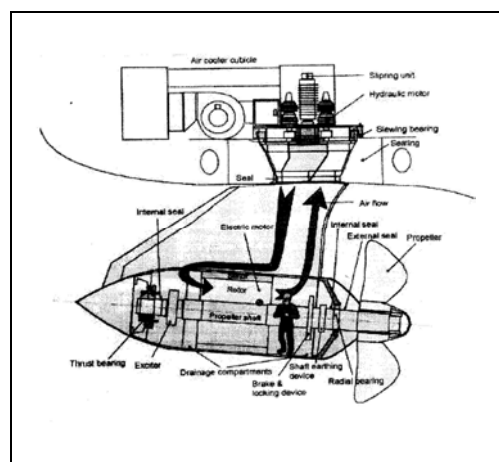
## 3. SFORMUŁOWANIE PROBLEMU

### 3.1. Definicja napędu podowego [27], [35], [36]

Jak wyżej wspomniano, pędniki podowe należą do najbardziej nowatorskich okrętowych układów napędowych ostatnich lat, wprowadzając nową jakość do układów napędowych i sterowych współczesnych statków morskich. Zasada ich działania polega wykorzystaniu silnika elektrycznego dużej mocy, który usytuowany na zewnątrz kadłuba w opływowej gondoli i podwieszony na wsporniku o dostatecznej wytrzymałości, łączy cechy urządzenia sterowego i pędnika okrętowego. Osadzenie całości na łożysku tocznym wewnątrz kadłuba pozwala na generowanie siły naporu w dowolnym kierunku horyzontalnym za pomocą śruby o skoku stałym, dopasowanej gabarytowo do konstrukcji podu. Ponieważ śruba podowa bywa instalowana na wale silnika elektrycznego wychodzącym z dowolnego końca gondoli, może ona pracować w układzie ciągnącym lub pchającym względem gondoli. Obrót podu wokół osi pionowej za pomocą dedykowanego serwomechanizmu, pozwala generować siłę poprzeczną w zadanym położeniu kątowym do realizacji manewrów.



Rys. 3.1 Widok typowego pędnika podowego



Rys. 3.2 Przekrój pędnika podowego

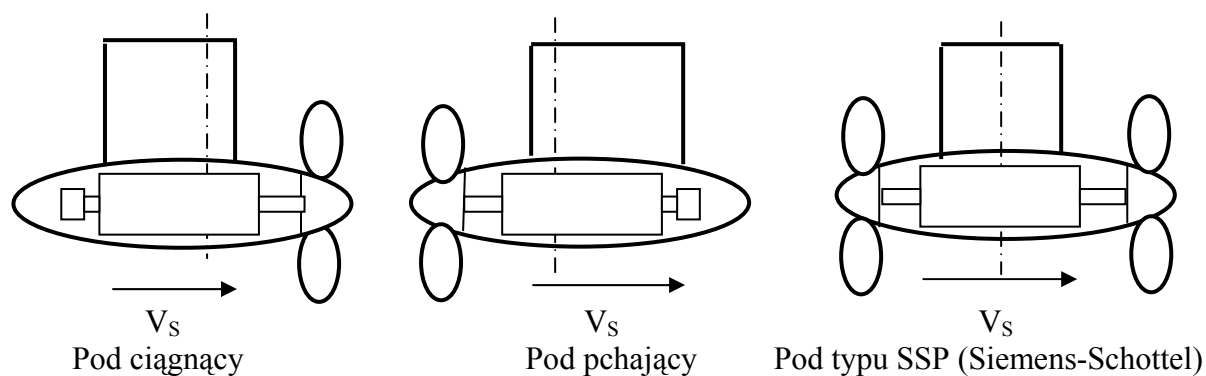
Dzięki takiej konfiguracji napędu istnieje cały szereg korzyści w zakresie jednorodnego napływu wody do śruby podowej, podwyższonej sprawności napędowej, lepszych właściwości manewrowych, zwiększonej ładowności, podniesionego bezpieczeństwa żeglugi oraz zminimalizowanych oddziaływań środowiskowych, głównie dzięki zastosowaniu elektrycznych silników okrętowych. Ponadto, układy napędowe tego typu stwarzają najwyższe szanse dla wykorzystania odnawialnych źródeł energii.

Ze względu na usytuowanie śrub i ich ilość, pędniki podowe można podzielić na:

- Jednośrubowe :
  - typu ciągnącego ze śrubą napędową usytuowaną w przedniej części gondoli;
  - typu pchającego ze śrubą usytuowaną w tylnej części gondoli;
  - typu pchającego ze śrubą w dyszy usytuowaną w tylnej części gondoli.
- Dwuśrubowe, ze śrubami posadzonymi na dwóch końcach wału elektrycznego silnika podowego, tworząc układ typu tandem. Jest to rozwiązanie opatentowane przez spółkę Siemens- Schottel (SSP).

Każde z tych rozwiązań ma możliwość wykonywania ruchów wokół osi pionowej, przy czym ich amplituda jest nie mniejsza niż typowe wychylenia płetw sterowych. Często osiąga wielkość  $180^{\circ}$ , co daje możliwość pełnego obrotu związanego z realizacją manewru „wstecz” bez zmiany kierunku obrotów śrub. Stawia to odpowiednie wymagania dotyczące ukształtowania części dennej kosza rufowego nad podami.

Dodatkowo, pędniki podowe są wyposażane we wzdłużne płetwy, sytuowane na gondoli, mające na celu prostowanie i odzyskiwanie energii strumienia zaśrubowego oraz w pojedyncze lub podwójne płetwy sterowe służące do sterowania statkiem przy dużych prędkościach. Zagadnienie użycia dodatkowych płetw sterowych staje się bardzo ważne przy eksploatacji szybkich statków podwodnych. Współpracując z autopilotem eliminują one myszczowanie całych zespołów podowych, umożliwiając stabilną, bezdrganiową pracę śrub podowych. Dobrze dobrane płetwy mogą spełniać prawie wszystkie wymagania manewrowe IMO.



Rys. 3.3 Podstawowe typy pędników podowych

## 3.2 Światowy rynek pędników podowych

### 3.2.1 Przykład stanu na II połowę roku 2007 [62]

- 1). Azipod, ABB-Azipod  
90 instalacji do max. 20 MW  
47 zamówień  
Kamień milowy: 1. instalacja 1998 Elation
- 2). Mermaid, Rolls Royce-Kamewa  
49 instalacji do max. 21 MW  
2 zamówienia  
Kamień Milowy: Queen Mary II 2003, 4x21 MW
- 3). SSP, Siemens-Schottel  
11 instalacji do 10 MW  
2 zamówienia  
Kamień Milowy: 2002 Peter Pan 2x10 MW
- 4). Dolphin STN-Wartsila (Lips)  
2 instalacje do 7 MW  
Brak zamówień  
Kamień Milowy: 2002 Seven Seas Voyager 2x7 MW
- 5). Compact Pod, Azipod konkurencja dla mechanicznych sterów (rudderpropellers)  
40 instalacji do 5 MW  
3 zamówienia  
Kamień Milowy: 2006, Yantai-Dalian Train Ferry 2x4.1 MW
- 6). SEP, Schottel  
7 instalacji do 5 MW  
Brak zamówień  
Kamień Milowy: 2004 statek badawczy w lodach 2x2 MW

Tabela 3.1 Znaczące statki dla rozwoju napędu podowego:

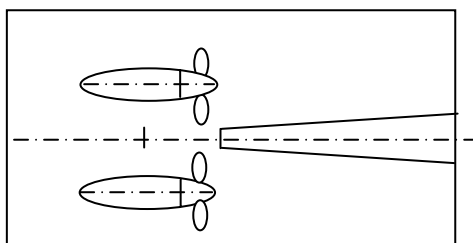
Rok	Projekt	Typ statku	Nazwa	Moc [MW]	Prędkość [knt]
1990	Azipod	Statek pomocniczy	Seili	1 x 1.5	12.0
1993	Azipod	Produktowiec arktyczny	Uikku	1 x 11.4	17.0
1998	Azipod	Wycieczkowiec	Elation	2 x 14.0	22.5
1999	Azipod	Wycieczkowiec	Voyager of the Seas	3 x 14.0	22.0
1999	Azipod	Wycieczkowiec	Costa Atlantica	2 x 17.6	24.0
2000	Mermaid	Wycieczkowiec	Millenium	2 x 20.0	25.0
2001	Azipod	Wycieczkowiec	Radiance of the Seas	2 x 20.0	25.0
2003	Mermaid	Liniowiec ocean.	Queen Mary 2	4 x 21.0	30.0
2006	Azipod	Wycieczkowiec	Freedom of the Seas	3 x 14.0	21.4
2009	Azipod	Wycieczkowiec	Genesis	3 x 20.0	20.4

### 3.2.2 Sytuacja bieżąca

Pomimo nagłaśnianych problemów eksploatacyjnych wycieczkowców podowych z rodziny *Millenium*, rozwój statków podowych nie uległ zahamowaniu. Pomimo kryzysu ekonomicznego, udział statków w całokształcie nowych budów nie uległ zmniejszeniu. Napędy podowe zaczęto stosować także na okrętach wojennych takich jak francuskie lotniskowce helikopterowe. Duży postęp nastąpił w dziedzinie silników elektrycznych wielkiej mocy. Z jednej strony zaczęto stosować wirniki zbudowane z magnesów stałych, a z drugiej strony nastąpił istotny postęp w wykorzystaniu efektu nadprzewodnictwa w uzwojeniach. Dzięki temu został osiągnięto już moc 36 MW z pojedynczego silnika, przy zmniejszeniu jego gabarytów. Daje to większą swobodę w doborze średnicy gondoli podowej, a w efekcie większe pole do zastosowań narzędzi projektowania parametrycznego.

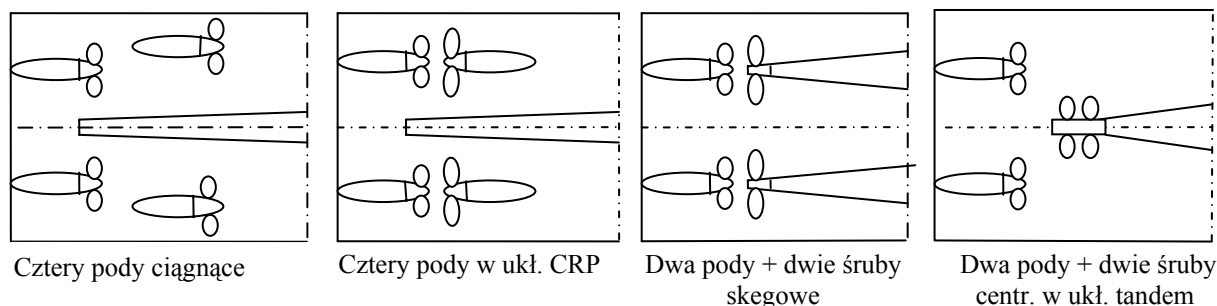
### 3.3 Konfiguracje pędników podowych [27]

Wielopodowe układy napędowe są realizowane głównie, jako układy z dwoma, symetrycznie ustawionymi względem PS, podami ciągnącymi. Wariant taki daje dwojakie korzyści związane z taką konfiguracją względem kadłuba; prowadzi do prawie niezakłóconego dopływu wody do każdej ze śrub w typowych warunkach eksploatacyjnych oraz daje wysoki moment obrotowy ułatwiając manewry.



Rys.3.4. Typowy układ dwupodowy

Układy jednopodowe są stosowane rzadziej, podobnie jak układy podów pchających. Drugi z tych wariantów może być stosowany w rozwiązaniach mieszanych oraz w układach hybrydowych.



Rys.3.5 Przykłady konfiguracji układów wielopodowych

### 3.4 Główne aspekty hydromechaniczne napędu podowego [7],[35],[36],[54],[56]

#### 3.4.1 Wprowadzenie

Napęd podowy powstał jako ucieleśnienie koncepcji połączenia pędnika śrubowego i płetwy sterowej w jednym urządzeniu hydromechanicznym. Oprócz uzyskania wektorowego naporu w zakresie kąta pełnego, wyeliminowano straty i zakłócenia generowane w rejonie takich części wystających jak linie wałów, ich wsporniki i piasty. Pędniki tego rodzaju mają także swoje, znane już dzisiaj wady, z których najważniejsze to wysokie koszty inwestycyjne oraz brak precyzyjnych metod projektowania i do oceny osiązków statków z takim napędem.

Napęd tego rodzaju, wprowadzając ciała obrotowe o dużej objętości pod koszem rufowym statku, zmienia silnie pole prędkości wokół kadłuba w tym rejonie, przedstawiając przy tym punkt pracy śrub podowych. Ponadto wymaga on także jak najbardziej jednorodnego dopływu wody do śruby. Generalnie, zachowanie się pędnika podowego można rozbić na następujące grupy interakcji:

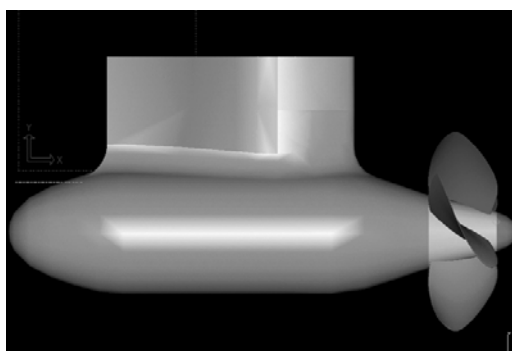
- współdziałanie pędnika podowego z częścią rufową statku;
- współdziałanie gondoli z kadłubem;
- współdziałanie śruby podowej z bryłą podu;
- współdziałanie piasty śruby z gondolą.

#### 3.4.2 Zestawienie głównych problemów napędu statków podowych [7], [35], [36]

Jak to wyżej podano, napęd wielopodowy charakteryzuje się obecnością co najmniej dwóch gondoli (nacelles), podwieszonych pod koszem rufowym na wspornikach (struts), będących elementem pionowego płata. Gabaryty takiego pędnika wynikają z wielkości zastosowanego silnika elektrycznego, konkretnie od objętościowej gęstości mocy, tj. od stosunku mocy silnika do jego objętości. Mając na uwadze aktualnie stosowane silniki prądu zmiennego, współczynniki gęstości mocy oraz zapotrzebowanie mocy napędowej przez typowe statki wycieczkowe oraz statki typu Ropax (Ro-ro Passenger Vessel), pędniki podowe osiągają znaczne objętości w stosunku do dostępnej objętości pod koszem rufowym. Przestrzeń taka jest w praktyce ograniczona płaszczyzną podstawową kadłuba, płaszczyzną burt oraz minimalnymi odległościami śruby podowej od powierzchni kadłuba – jest to wymóg towarzystwa klasyfikacyjnego wg przepisów, którego jest projektowana i budowana taka śruba. Bardzo jest przy tym ważny stosunek średnicy gondoli podowej do średnicy śruby, który się obecnie mieści w przedziale  $D_p/D = 0.5 - 0.6$ . Objętość kilku takich brył, każda o objętości 150–200 m<sup>3</sup>, w istotny sposób wpływa na opływ rejonu rufy, prowadząc do zniwelowania rufowego układu falowego bądź do jego rozbudowy w zależności od wzajemnego położenia pędnika i kosza rufowego.



Obrotowy pod klapkowy



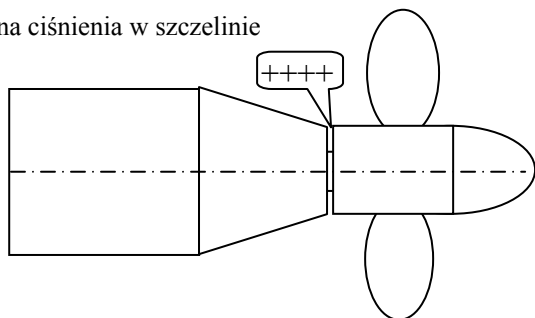
Pod stały bezklapkowy

Rys 3.6. Główne rozwiązania podów ciągnących [26]

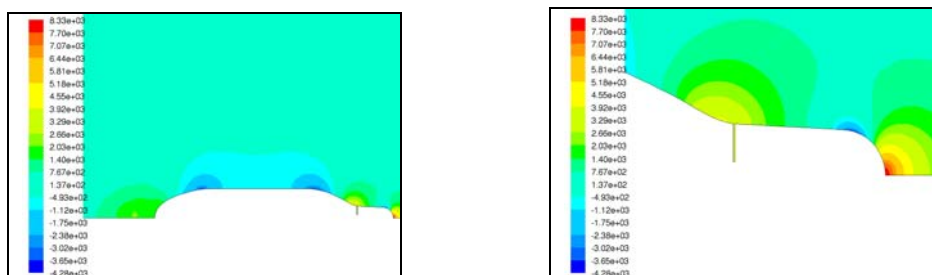
W kontekście powyższych interakcji, bardzo ważna jest struktura nominalnego, wyjściowego pola prędkości w rejonie rufy bez pędników. Kształt tego rejonu jest tak modelowany, by uzyskać jak najbardziej jednorodny dopływ wody do płaszczyzny kręgu każdej ze śrub podowych przy najmniejszym udziale wypornościowego składnika strumienia nadążającego.

Kolejnym zagadnieniem hydromechanicznym jest identyfikacja współpracy śruby podowej z ciałem objętościowym, jakim jest korpus pędnika podowego. Charakter takiego współdziałania jest podobny do interakcji pomiędzy relatywnie grubą płetwą sterową a śruba napędową konwencjonalnym układzie napędowym. Ostatnim czynnikiem wpływającym na osiągi statku podowego jest jakość zastosowanej śruby podowej, która powinna być zaprojektowana na właściwie zinterpretowane pole prędkości w rejonie podu. Bardzo ważnym zagadnieniem, pojawiającym się w badaniach modelowych, jest wpływ szczeliny (Gap effect) pomiędzy piastą śruby podowej a obudową podu, przejawiający się obecnością strefy nad- lub podciśnienia w tym rejonie. Prowadzi do mylnej oceny punktu pracy śruby podowej w napędowych badaniach modelowych z powodu obecności dodatkowej, nieokreślonej siły poosiowej.

Zmiana ciśnienia w szczelinie

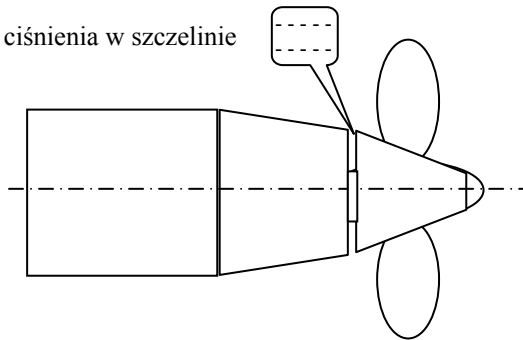


Rys.3.7 Cylindryczna piasta pędnika podowego

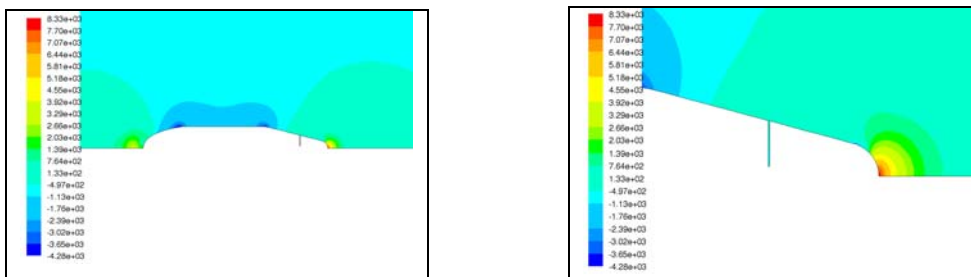


Rys.3.8 Analiza CFD gondoli podowej z piastą cylindryczną

Zmiana ciśnienia w szczelinie



Rys.3.9. Stożkowa piasta śruby podowej



Rys.3.10. Analiza CFD gondoli podowej z piastą stożkową

Całość tych zjawisk wymaga indywidualnej oraz globalnej oceny, co w efekcie doprowadzi do stworzenia kompleksowego modelu pracy pędnika podowego.

### 3.4.3 Zakres prac projektu

#### 3.4.3.1 Wprowadzenie

Jak podano we wstępie, celem niniejszej dysertacji jest opracowanie uniwersalnej metodyki prognozowania osiągow napędowych statków z napędem wielopodowym, opartym na pędnikach typu ciągnącego. Do celu tego wykorzystane będą wyniki projektów unijnych Optipod i Fastpod, wzbogaconych o materiały konferencyjne i dane literaturowe. Dostępne dane będą gromadzone w oparciu o następujące cztery główne grupy tematyczne:

- Charakterystyki hydromechaniczne śrub podowych;
- Elementy geometrii kadłuba statku podowego;
- Elementy hydromechaniczne interakcji pędnik podowy – kadłub statku;
- Elementy hydromechaniczne interakcji korpusu podu – śruba podowa.

W oparciu o specyfikę tych grup zostaną określone indywidualne formaty wybranej komercyjnej bazy danych do której zostaną załadowane elementy w/w czterech grup tematycznych. Następnie dane te będą mogły być pobierane i dalej użyte, do konkretnych zastosowań, w oparciu o indywidualnie opracowywane kwerendy.

Opisane zbiory będą przedmiotem analiz mających na celu rozpoznanie relacji empirycznych w przetworzonych wynikach badań, przy użyciu zaawansowanych, dostępnych na rynku, narzędzi numerycznych. Umożliwi to identyfikację elementów i zależności, istotnych dla specyfiki tego typu napędu. Z drugiej strony, istniejące metodyki do prognozowania osiągow statków konwencjonalnych, zostaną uzupełnione o nowe elementy parametryczne, typowe dla



statków podowych. W przypadku istotnych potrzeb będą użyte także narzędzia numeryczne, we właściwym wymiarze, adresowane do analiz w środowiskach rozmytych. Kompilacja głównych grup analizowanych tematów umożliwi opracowanie metodyki prognozowania dedykowanej napędowi wielopodowemu. Wykonywane obliczenia sprawdzające zastaną zwerifikowane posiadanymi wynikami badań; pozwoli to zarówno na dokonanie oceny niepewności metody, jak i na jej ewentualne dopasowanie do potrzeb basenu modelowego, jakim jest Ośrodek Hydromechaniki okrętu CTO. Dla wybranych statków podowych zostaną określone charakterystyki oporowe i napędowe, w ramach, których zostanie zdefiniowany punkt pracy śruby.

Całość zgromadzonych wyników pozwoli na stworzenie bazowych struktur otwartych metod badawczych dla basenu modelowego CTO, które będą uaktualniane w miarę wzrostu zasobów posiadanych baz danych. Zostaną także opracowane ewentualne uwagi dla właściwego komitetu ITTC oraz zebrane wytyczne do dalszych badań eksperymentalnych.

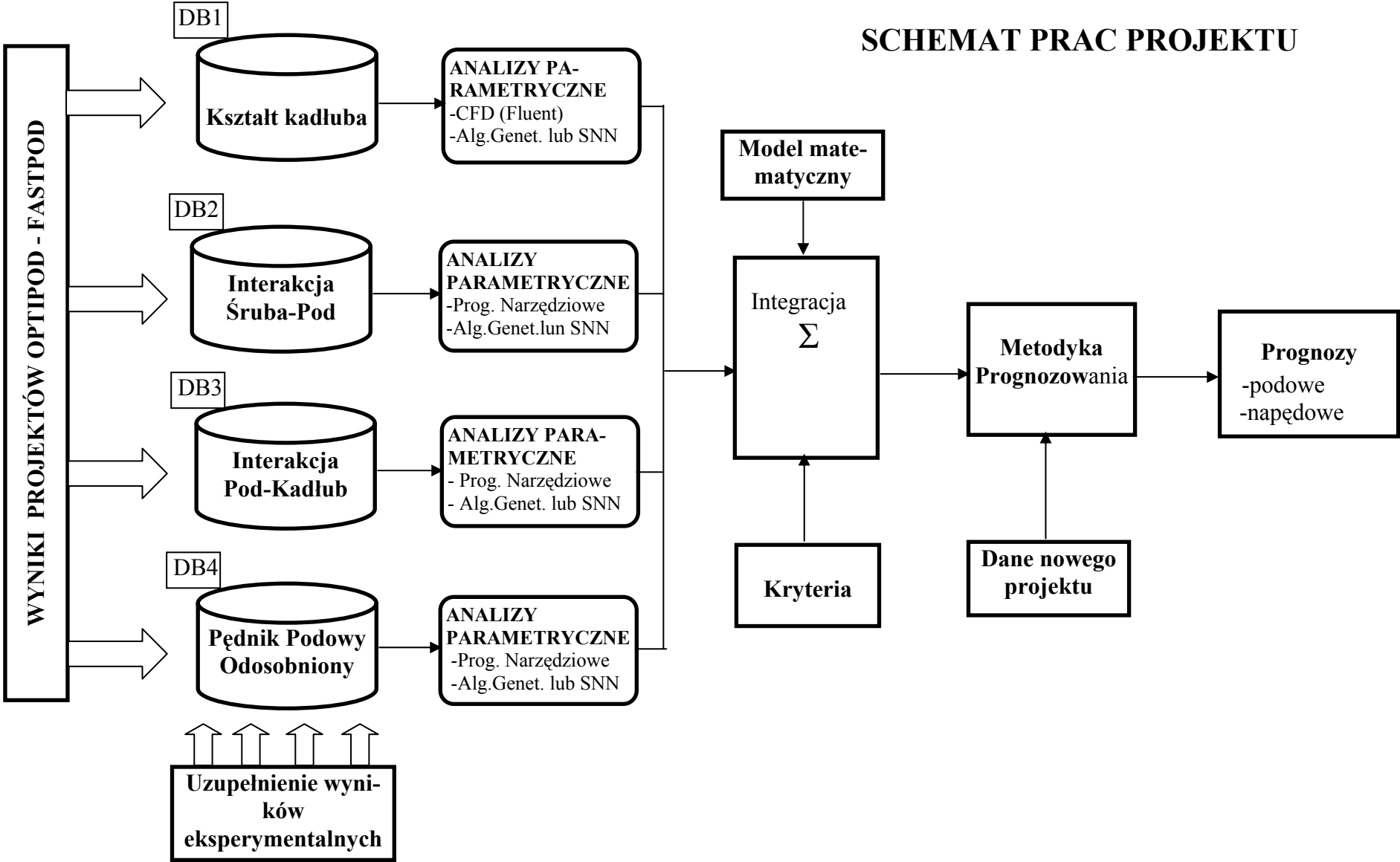
Pomimo wysokiej realności przedstawionego wyżej przedsięwzięcia, istnieje pewne ryzyko nieosiągnięcia, niektórych z założonych celów projektu, jakim może być np. wysoka dokładność prognozowania wybranych osiągnięć hydromechanicznych statków podowych. Do dnia dzisiejszego nie udało się Komitetowi Pędników Podowych ITTC stworzyć w pełni wiarygodnych i spójnych zaleceń do badań tego typu statków. I tak bardzo istotne zagadnienie wzajemnego oddziaływania dwóch pędników podowych wymaga szerokiego cyklu dedykowanych badań eksperymentalnych wspartych analizami numerycznymi, by pozyskać materiał do uogólnień oczekiwanych przez hydromechaników i projektantów.

#### 3.4.3.2 Koncepcja realizacji pracy

Z powodu wspomnianych wcześniej ograniczeń w podaży wiedzy podowej oraz istniejących luk, niezbędnym staje się dokonanie koniecznych wyborów, skrótów oraz uproszczeń, które stworzą warunki do realizacji pracy i umożliwią osiągnięcie głównych celów we właściwym wymiarze czasowym. Niemożliwe jest, bowiem uruchomienie uzupełniających badań modelowych w celu doraźnego rozwiązania zaistniałych problemów. Możliwe jest jedynie użycie narzędzi z dziedziny hydromechaniki numerycznej (CFD) i to w ograniczonym zakresie. Spowodowało to między innymi:

- wykorzystanie istniejących narzędzi numerycznych do prognozowania osiągnięć oporowych statków konwencjonalnych, jak np. Metoda Holtropa;
- wybór statków typu Cruise Vessel, Ropax, Cargo Vessel oraz Fast Ropax, jako typy reprezentatywne do szczegółowych analiz;
- wybór pędnika podowego typu ciągnącego do dalszych analiz jako rozwiązania dominującego i reprezentatywnego;
- przyjęcie standardowej koncepcji pędnika podowego;
- wykorzystanie opublikowanych interakcji pomiędzy elementami układu podowego;
- założenie, iż wiedza literaturowa została pozyskana i opublikowana zgodnie ze stanem sztuki;
- wstrzeżliwie podejście do nowoczesnych narzędzi numerycznych, takich jak, Sieci Neuronowe (ANN) lub Algorytmy Genetyczne (GA) z powodu ich minimalnych wymagań wsadowych. Założono ich użycie tylko w przypadku niezbędnej potrzeby i efektywnego wykorzystania w ramach budżetu projektu;
- bazowanie na tożsamości momentu napędowego z powodu niewiarygodnych pomiarów naporu śruby podowej.

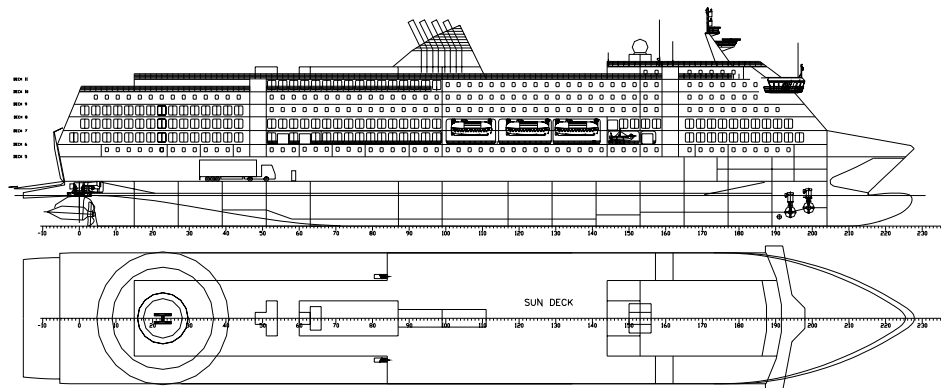
# SCHEMAT PRAC PROJEKTU



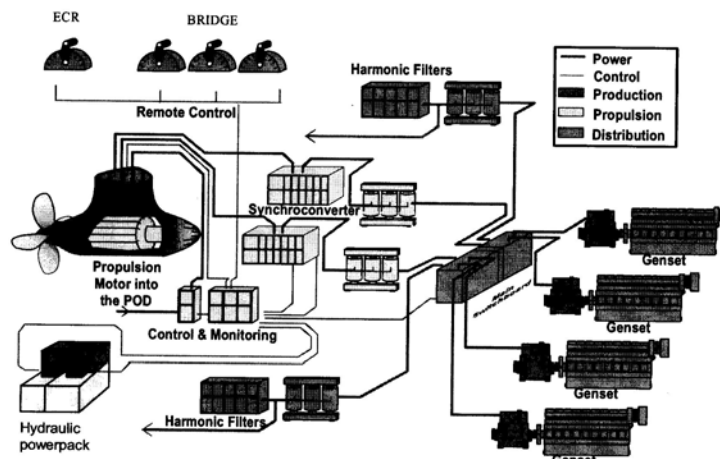
## 4. KRYTYCZNA OCENA STANU SZTUKI W NAPĘDZIE PODOWYM

### 4.1 W fazach projektowania koncepcyjnego

#### 4.1.1 Ogólna koncepcja statku podowego



Rys.4.1. Plan generalny Ropaxa podowego



Rys.4.2. Główne elementy napędu elektrycznego

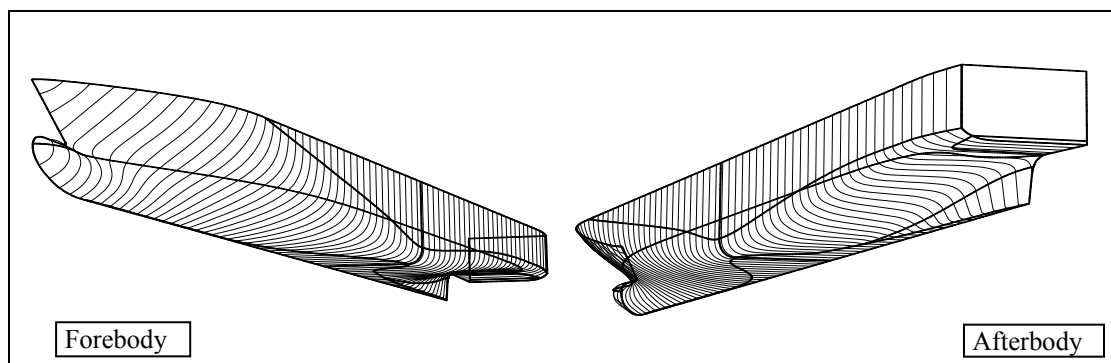
#### 4.1.2. Koncepcja kształtu kadłuba

Ogólna koncepcja kształtu kadłuba statku wielopodowego opiera się na dwóch głównych założeniach związanych z:

- zapewnieniem jednorodnego dopływu wody do śrub podowych w celu minimalizacji drgań w warunkach operacyjnych;
- zamodelowaniem płaskiej, poziomej części kosza rufowego nad pędnikami podowymi przechodzącej w płaski skeg centralny.

Kształt kadłuba jest projektowany zgodnie ze stanem sztuki w oparciu o najlepsze jednostki podobne lub informacje statystyczne. Współczynniki pełnotliwości kadłuba, współrzędne

środka wyboru są dobierane indywidualnie biorąc pod uwagę przeznaczenie statku jak i kontraktowe warunki eksploatacyjne.

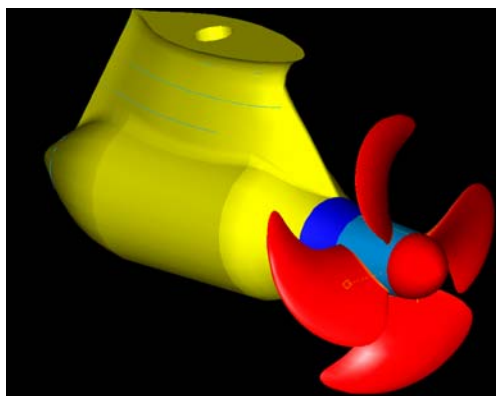


Rys.4.3. Przykład kształtu kadłuba statku podowego

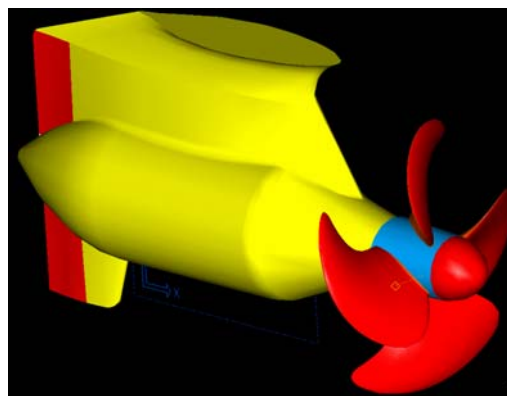
#### 4.1.3 Wybór pędników podowych

##### 4.1.3.1 Informacja ogólna [54]

Pędniki podowe dobiera się indywidualnie dla danego typu statku spośród światowej oferty tego typu rozwiązań. Zwraca się przy tym uwagę na główne parametry techniczne jednostki oraz indywidualne cechy pędnika w kontekście przyszłych zastosowań. W odniesieniu do wspomnianych trzech głównych grup pędników, pody ciągnące są rozwiązaniem najczęściej stosowanym w układach dużych mocy. Podlegają one ciągłym modyfikacjom mającym na celu poprawę ich osiągnięć, i to zarówno napędowych, jak i manewrowych. Dlatego też na korpusach podowych instaluje się pletwy stałe jak i różne rodzaje kłapek sterujących.



Typowy pędnik podowy



Pod kłapkowy

Rys.4.4 Warianty komercyjnego pędnika podowego Mermaid-RR/Kamewa [22],[54]

##### 4.1.3.2 Wymagania techniczne stawiane pędnikom podowym

Specyfika tego nowego rodzaju napędu narzuca szereg nowych wymagań, nieznanych w przypadku statków konwencjonalnych, do których należy:

- minimalizacja oporu hydrodynamicznego jednostki podowej- jako głównego składnika sprawności napędowej;
- projekt asymetrycznej krawędzi natarcia wspornika podowego, dopasowanego do skrócenia strumienia zaśrubowego w celu zminimalizowania kawitacji w trakcie pracy autopilota;

- wystarczająca wytrzymałość konstrukcji podu, jednak przy utrzymaniu hydrodynamicznie opływowego kształtu;
- aplikacja wewnętrznych kanałów, niezbędnych do chłodzenia silnika elektrycznego i dających dostęp załodze w celach kontrolno-serwisowych;
- charakterystyki modalne konstrukcji (sztywność rozkładu mas) korespondujące z wymaganiami lokalnej i globalnej analizy drganiowej;
- adekwatna konstrukcja fundamentu podowego, głównego łożyska oraz serwowalnego azymutalnego z punktu widzenia obciążeń hydrodynamicznych i grawitacyjnych;
- maksymalizacja sił sterujących podu przy jednoczesnej minimalizacji momentu azymutalnego i mocy serwomechanizmu, przy zachowaniu osi pionowej oraz obwiedni przestrzeni ruchów podu (ów) w ramach gabarytów kadłuba bez ryzyka kolizji;
- minimalizacja sił poprzecznych w warunkach „jazda naprzód”;
- minimalizacja ciężaru całego układu podowego, a w szczególności silnika elektrycznego.

#### 4.1.3.3 Określenie wstępnych charakterystyk oporowo-napędowych

Wstępne charakterystyki oporowo – napędowe są określane przez producentów pędników podowych w oparciu o kwestionariusz wypełniany przez projektanta statku podowego. Do głównych pozycji takiego kwestionariusza należą:

- główne dane techniczne statku;
- charakterystyki oporowe statku;
- struktura pola prędkości w rejonie instalacji podów;
- oczekiwane osiągi statku.

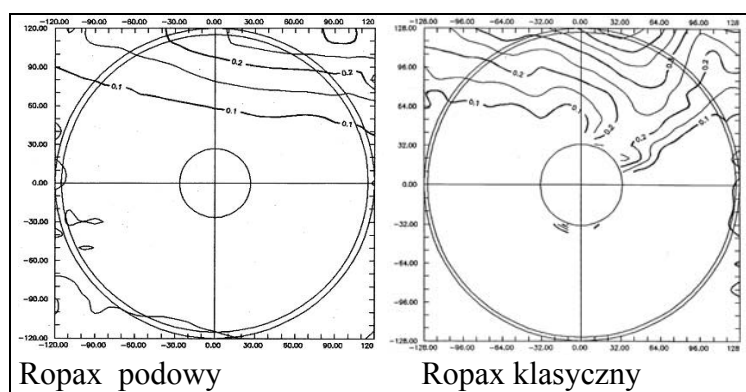
Powyższe dane oraz doświadczenie producenta pozwalają na dobór optymalnego rozwiązania z tzw. „półki” oraz na opracowanie przybliżonych charakterystyk napędowych, co wprowadza element niepewności takiego prognozowania – tym większy, im bardziej projektowana jednostka odbiega od typowych zastosowań pędników danego producenta.

## 4.2 W hydromechanicznych badaniach modelowych

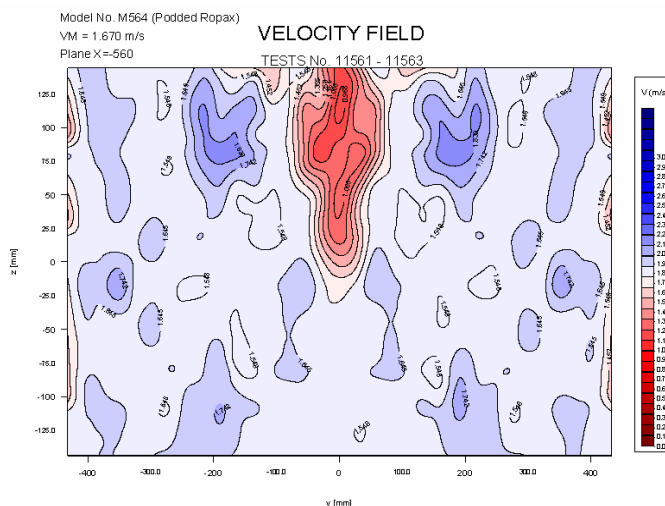
### 4.2.1 Charakterystyki oporowe

Charakterystyki oporowe statków z napędem podowym są badane w opcji „goły kadłub” – bez pędników, tak jak statki konwencjonalne. Istotnym problemem do rozwiązania jest interakcja kadłub statku – obudowa pędnika.

### 4.2.2 Nominalne pole prędkości w kręgu śruby statku podowego[23]



Rys.4.5. Porównanie rozkładu składowej osiowej w kręgu śruby Ropaxa podowego i konwencjonalnego



Rys.4.6 Rozkład składowej  $V_x$  w płaszczyźnie poprzecznej pod koszem rufowym Ropaxa [24]

#### 4.2.3 Prognozowanie osiągow napędowych

Pomimo pewnej odmienności napędu, prognozy napędowe statków z napędem podowym bazują na metodyce ITTC-78, która została opracowana dla statków z konwencjonalnym napędem śrubowym. Istota problemu polega na opracowaniu takich uzupełnień tej metodyki, by w oparciu o przeprowadzone badania modelowe, byłoby możliwe jak najdokładniejsze określenie osiągow statku podowego oraz zaprojektowanie wysokosprawnej śruby napędowej. Komitet Pędników Azymutalnych ITTC monitoruje użycie indywidualnych procedur przez liczące się ośrodki badawcze, mając na celu opracowanie kompleksowych, eksperymentalnie zweryfikowanych, wytycznych do badania statków z napędem podowym.

#### 4.2.4 Procedury badawcze CTO[61]

##### 4.2.4.1 Wprowadzenie

Metoda CTO realizacji badań modelowych statków z napędem podowym bazuje na bieżących zaleceniach oraz procedurze ITTC 78 oraz odwołuje się do własnych doświadczeń firmy. Ujmuję ona dwa warianty podejść, które zależą od możliwości badawczych laboratorium:

- Metoda A – jest stosowana, gdy mierzony jest tylko napór całkowity podowego zespołu napędowego jako siła poosiowa działająca na kadłub statku;
- Metoda B – jest stosowana, gdy dodatkowo mierzony jest napór śruby podowej  $T_{PP}$  za pomocą dynamometru umieszczonego w obudowie podu bezpośrednio za śrubą.

##### 3.2.4.2 Cel i założenia metody

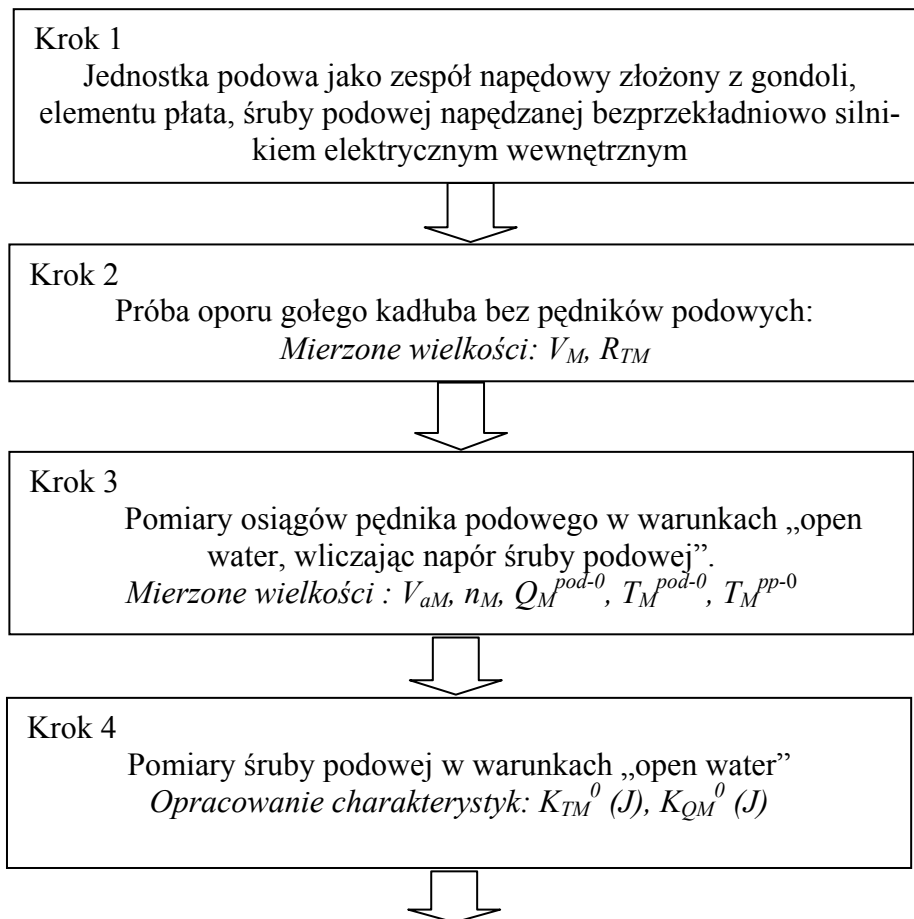
Celem metody jest określenie mocy doprowadzonej i liczby obrotów śruby napędowej w funkcji prędkości statku rzeczywistego w warunkach prób zdawczych lub innych umownych, na podstawie wyników prób modelowych przeprowadzonych według jednolitego schematu. Schemat podstawowych prób modelowych jest następujący:

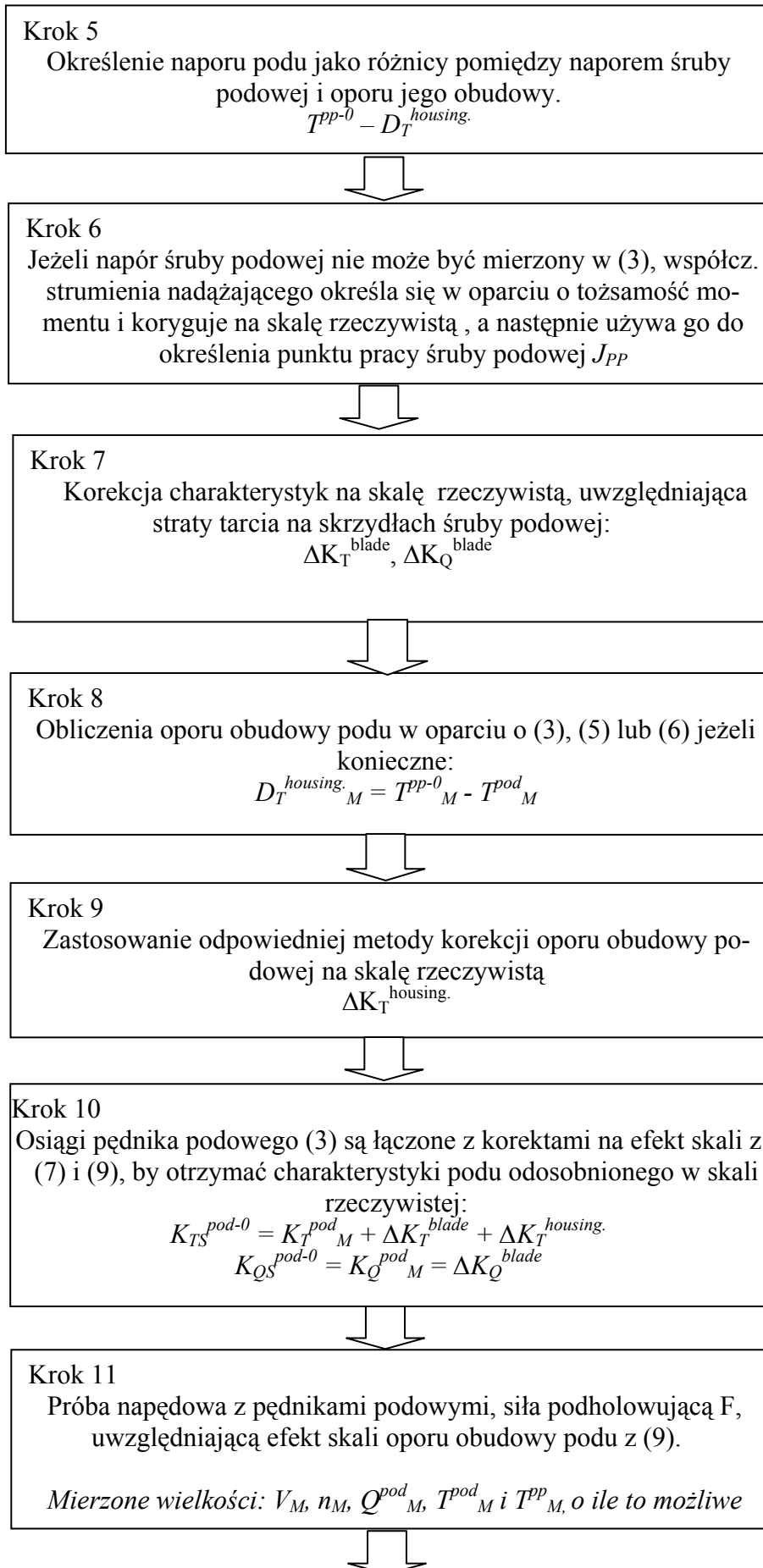
- próba oporu kadłuba statku;
- próba odosobnionej śruby podowej;
- próba odosobnionego pędnika podowego;
- próba napędowa modelu statku z własnym napędem.

### Założenia metody:

- 1) Opór kadłuba dzieli się na dwa składniki: opór resztkowy  $R_R$  zależny tylko od liczby Froude'a i opór lepkości  $R_V$  zależny od liczby Reynoldsa
- 2) Próby modelowe oporu przeprowadza się przy założeniu, że bezwymiarowe współczynniki oporu resztkowego statku i modelu są sobie równe przy takich samych liczbach  $F_n$ .
- 3) Opór lepkości oblicz się analitycznie na podstawie ekstrapolacji trójwymiarowej w oparciu o linię korelacji ITTC-1957 z uwzględnieniem współczynnika kształtu  $k$  określanego indywidualnie, który pozostaje taki sam dla statku i modelu.
- 4) Zakłada się, że kadłub modelu jest idealnie gładki, a kadłub statku chropowaty, w związku z czym opór lepkości koryguje się o poprawkę na chropowatość wg zaleceń ITTC.
- 5) Opór kadłuba statku koryguje się o opór powietrza nadwodnej części kadłuba wraz z nadbudówką przy założeniu bezwietrznej pogody.
- 6) Ze względu na niemożność odtworzenia w próbach modelowych liczb  $R_{nM}$  równych  $R_{nS}$  statku rzeczywistego, charakterystyki hydrodynamiczne modeli śrub swobodnych wymagają korekty na efekt skali.
- 7) Ponieważ opór całkowity modelu nie odwzorowuje się w skali rzeczywistej zgodnie z prawem Froude'a, a napór śruby tak, dla przeprowadzenia prób modelu z własnym napędem, w „punkcie własnego napędu statku”, należy odciążyć śruby modelu o wielkość tzw. „siły podholowującej”  $F_D$ .
- 8) Współczynniki ssania  $t$ , strumienia nadążającego  $w$  i względnej sprawności napędowej  $\eta_R$  modelu i statku są sobie równe i nie podlegają efektowi skali.
- 9) Analiza napędowa jest przeprowadzana przy założeniu identyczności współczynników naporu lub momentu napędowego.

#### 4.2.5 Zalecenia ITTC do realizacji prób modelowych napędów podowych [49]









### Krok 12

Określenie współczynników oddziaływania kadłub-pędnik podowy

$$t_S = t_M = (\sum T^{\text{pod}}_M - R_{TM}) / (\sum T^{\text{pod}}_M)$$

$$w_{TS} = w_{TM} = (J_v - J^{\text{pod}}_T) / J_v$$

Gdzie  $J_v = V_M / (n_M D_M)$  z prób napędowych, oraz

$J^{\text{pod}}_T$ : Z prób podu odosobnionego na bazie tożsamości naporu.

$$w_{QS} = w_{QM} = (J_v - J^{\text{pod}}_Q) / J_v$$

Gdzie  $J^{\text{pod}}_Q$ : Z prób podu odosobnionego w oparciu o tożsamość momentu

$$\eta_H = (1 - t_S) / (1 - w_{TS})$$

$$K_{TS}^{\text{pod}} = K_T^{\text{pod}}_M + \Delta K_T^{\text{housing}} + \Delta K_T^{\text{blade}}$$

$$\eta^{\text{pod-0}}_T = (J^{\text{pod}}_T / 2\pi) (K_T^{\text{pod}} / K_{QT})$$

gdzie  $K_T^{\text{pod}} = K_T^{\text{pod-0}}$  i

$K_{QT}$  z prób podu odosobnionego ( $K_Q$  przy  $J^{\text{pod}}_T$ )

$$\eta_D = P_E / P_D$$

$$\eta_R = \eta_D / (\eta^{\text{pod-0}}_T \eta_H) = K_{QT} / K_Q^{\text{pod}}$$

Gdzie  $K_Q^{\text{pod}}$  wzięte z próby napędowej, a  $K_{QT}$  z prób podu odosobnionego

( $K_Q$  przy  $J^{\text{pod}}_T$ ).



### Krok 13

Określa się prędkość obrotową śruby ( $n_S$ ) i moc doprowadzona ( $P_{DS}$ ) używając współczynnik posuwu w skali rzeczywistej ( $J_{TS}$ ) oraz współczynnik momentu ( $K_{QTS}$ ) odczytany z charakterystyk podu w skali rzeczywistej.

Gdzie ( $J_{TS}$ ) jest określany dla każdego punktu pomiarowego poprzez dodanie wymaganych  $\Delta K_T^{\text{blade}}$ ,  $\Delta K_Q^{\text{blade}}$  i  $\Delta K_T^{\text{pod}}_M$  do  $K_T^{\text{unit}}_M$  i odczyt dla  $K_{TS}^{\text{pod}}$  na wykresie charakterystyk podu w skali rzeczywistej.

$$\eta_S = (1 - w_{TS}) V_S / (J_{TS} D)$$

$$P_{DS} = 2\pi \rho D^5 n^3_S K_{QTS} / \eta_R$$

Dla prognoz na warunki prób odpowiednie korekty  $C_P$ - $C_N$

$$N_{S \text{ trial}} = C_N n_S$$

$$P_{DS \text{ trial}} = C_P P_{DS}$$

## 5. PRZYBLIŻONE METODY PROGNOZOWANIA CHARAKTERYSTYK OPOROWO-NAPĘDOWYCH STATKÓW WYPORNOŚCIOWYCH

### 5.1 Informacja ogólna

W okrętownictwie stosuje się cały szereg procedur przybliżonego prognozowania osiągow wszystkich typów statków pasażerskich i towarowych. Są one opracowywane w oparciu o obróbkę statystyczną posiadanych wyników badań modelowych oraz wyników prób zdawczych i systematycznych analiz eksploatacyjnych. Coraz większą rolę w prognozowaniu zacinają odgrywać narzędzia hydromechaniki numerycznej (CFD). Dokładność istniejących metod zależy od wielkości baz danych, będących do dyspozycji analityków. Jedną z bardziej popularnych metod prognozowania jest tzw. Metoda Holtropa oparta na modelu parametrycz-

nym kadłuba statku i pędnika, bazująca na zasobach badawczych basenu modelowego MARIN w Wageningen.

## 5.2 Metoda Holtropa [14], [16]

Należy ona do metod statystycznych pozwalających na określenie charakterystyk oporowo - napędowych statku we wczesnych etapach projektowania. Została opracowana w oparciu o analizy regresyjne wyników badań modelowych basenu modelowego Marin – Wageningen, jak i w oparciu o wyniki pomiarów w skali rzeczywistej. Metoda ta może być adaptowana do określonych typów statków jak i rozbudowywana w kierunku zupełnie nowych, innowacyjnych układów napędowych. Dlatego też stanowi ona dobrą bazę wyjściową do użycia jej w niniejszym projekcie i rozbudowę w kierunku uwzględnienia specyfiki napędów podowych.

### 5.2.1 Prognozy oporu

Opór całkowity statku został podzielony na następujące składniki:

$$R_{total} = R_F(1 + k_l) + R_{APP} + R_W + R_B + R_{TR} + R_A \quad (5.1)$$

-gdzie:

- $R_F$  opór tarcia zgodnie z linią ITTC-1957
- $1 + k_l$  współczynnik kształtu opisujący opór lepkości kształtu kadłuba w relacji do płyty płaskiej
- $R_{APP}$  opór części wystających
- $R_W$  opór falowy oraz opór łamania fali
- $R_B$  opór ciśnienia gruszki dziobowej w pobliżu powierzchni swobodnej
- $R_{TR}$  opór ciśnienia zanurzonej rufy pawężowej
- $R_A$  korelacja oporu model-statek

Do określenia współczynnika kształtu została użyta następująca formuła:

$$1 + k_l = c_{13} [0.93 + c_{12} (B/L_R)^{0.92497} (0.95 - C_P)^{-0.521448} (1 - C_P + 0.0225 lcb)^{0.6906}] \quad (5.2)$$

-gdzie:

- $C_P$  pryzmatyczny współczynnik pełnotliwości oparty na  $L_{WL}$
- $lcb$  wzdłużne położenie środka wyporu odniesione do długości statku  $L$
- $L_R$  wg wzoru  $L_R/L_{WL} = 1 - C_P + 0.06 C_P lcb / (4C_P - 1)$
- $C_{12} = (T/L)^{0.2228446}$  gdy  $T/L > 0.05$
- $C_{12} = 48.2 (T/L - 0.02)^{2.078} + 0.479948$  gdy  $0.02 < T/L < 0.05$
- $C_{12} = 0.479948$
- $C_{13} = 1 + 0.003C_{stern}$ , gdzie  $C_{stern}$  opisuje specyfikę kształtu rufy wg poniższej tabeli:

Tabela 5.1

Kształt rufy	$C_{stern}$
Pram + gondola	-25
Wręgi w kształcie litery V	-10
Normalny kształt wręgów	0
Rufa Hognera – wręgi w kształcie litery U	+10

Powierzchnia zwilżona kadłuba jest aproksymowana w sposób następujący:

$$S = L(2T+B)C_M^{0.5}(0.453+0.4425C_B-0.2862C_M-0.003467B/T+0.3696C_{WP})+2.38A_{BT}/C_B \quad (5.3)$$

-gdzie:

$C_M$  współcz. pełnotliwości owręża

$C_B$  współcz. pełnotliwości kadłuba w oparciu o  $L_{WL}$

$C_{WP}$  współcz. pełnotliwości wodnicy kontr.

$A_{BT}$  pole przekroju wręgowego gruszki dziobowej w miejscu przecięcia dziobnicy ze statyczną powierzchnią swobodną.

Opór części wystających wylicza się w następujący sposób:

$$R_{APP} = 0.5\rho V^2 S_{APP} (1 + k_2)_{eq} C_F \quad (5.4)$$

-gdzie:

$\rho$  gęstość wody

$V$  prędkość statku

$S_{APP}$  powierzchnia zwilżona części wystających

$1 + k_2$  współcz. oporu części wystających

$C_F$  współcz. oporu tarcia według ITTC 57

W poniższej tabeli podane są wartości  $1+k_2$  dla części wystających ustawionych w linii opływu. Wartości te otrzymano z porównania wyników prób oporu gołego kadłuba i z częściami wystającymi w warunkach opływu turbulentnego.

Tabela 5.2

Przybliżone wartości $1 + k_2$	
Płetwa steru za skegiem	1.5 – 2.0
Płetwa steru za rufą	1.3 – 1.5
Płetwy steru w układzie dwuśrubowym	2.8
Węzłówki linii wału	3.0
Skeg	1.5 – 2.0
Tuleja wsporników wału śrubowego	3.0
Opływki przykadłubowe	2.0
Wały	2.0 – 4.0
Płyty stabilizacyjne	2.8
Kopuła	2.7
Stępki przechyłowe	1.4

Ekwiwalentne wartości  $1 + k_2$  dla kombinacji części wystających mogą być wyliczone zgodnie z :

$$(1 + k_2)_{eq} = \sum(1 + k_2)S_{APP} / \sum S_{APP} \quad (5.5)$$

Opór części wystających może być zwiększony o opór otworów steru strumieniowego zgodnie z :

$$\Delta R_{APP} = \rho V^3 \pi d^3 C_{BTO} \quad (5.6)$$

-gdzie :  $C_{BTO}$  przyjmuje się z przedziału 0.003 – 0.012. Dla otworów w części cylindrycznej gruszki dziobowej – niższe wartości.

Opór falowy jest określany z:

$$R_W = C_1 C_2 C_5 \Delta \rho g \exp [m_1 F_n^d + m_2 \cos (\lambda F_n^{-2})] \quad (5.7)$$

-gdzie:

$$C_1 = 2223105 C_7^{3.78613} (T/B)^{1.07961} (90 - i_E)^{-1.37565}$$

$$C_7 = 0.229577(B/L)^{0.33333} \quad \text{dla} \quad B/L < 0.11$$

$$C_7 = B/L \quad \text{dla} \quad 0.11 < B/L < 0.25$$

$$C_7 = 0.5 - 0.0625 L/B \quad \text{dla} \quad B/L > 0.25$$

$$C_2 = \exp(-1.89 C_3^{0.5})$$

$$C_5 = 1 - 0.8 A_T / (BTC_M)$$

$F_n$  liczba Froude'a oparta na długości wodnicy pływania

$$\lambda = 1.446 C_p - 0.03 L/B \quad \text{dla} \quad L/B < 12$$

$$\lambda = 1.446 C_p - 0.36 \quad \text{dla} \quad L/B > 12$$

$$m_1 = 0.0140407 L/T - 1.75254 \Delta^{1/3} / L - 4.79323 B/L - C_{16}$$

$$C_{16} = 8.07981 C_p - 13.8673 C_p^2 + 6.984388 C_p^3 \quad \text{dla} \quad C_p < 0.80$$

$$C_{16} = 1.73014 - 0.7067 C_p \quad \text{dla} \quad C_p > 0.80$$

$$m_2 = C_{15} C_p^2 \exp(-0.1 F_n^{-2})$$

-gdzie:

$$C_{15} = -1.69385 \quad \text{dla} \quad L^3/\Delta < 512 \quad \text{lub}$$

$$C_{15} = 0.0 \quad \text{dla} \quad L^3/\Delta > 1727$$

$$C_{15} = -1.69385 + (L/\Delta^{1/3} - 8) / 2.36 \quad \text{dla przedziału} \quad 512 < L^3/\Delta < 1727$$

$$d = -0.9$$

$i_E$  = ½ kąta zaostrenia KWL na dziobie z pominięciem lokalnego kształtu wodnicy

Jeżeli  $i_E$  jest nieznane, to można to wyliczyć według:

$$i_E = 1 + 89 \exp[-(L/B)^{0.80856} (1 - C_{WP})^{0.30484} (1 - C_p - 0.02251 C_b)^{0.6367} (L_R/B)^{0.34574} (100 \Delta / L^3)^{0.16302}]$$

$$C_3 = 0.56 A_{BT}^{1.5} / [(BT(0.31A_{BT}^{0.5} + T_F - h_B)] - \text{wpływ gruszki na opór falowy}$$

-gdzie:

$h_B$  rzędna środka pola przekroju poprzecznego  $A_{BT}$

Dodatkowy opór wywołany obecnością gruszki blisko powierzchni wody:

$$R_B = 0.11 \exp(-3P_B^{-2}) F_{ni}^3 A_{BT}^{1.5} \rho g / (1 + F_{ni}^2) \quad (5.8)$$

-gdzie:

$P_B = 0.56 A_{BT}^{0.5} / (T_F - 1.5 h_B)$  jest miarą wynurzenia dziobu

$F_{ni} = V / [g(T_F - h_B - 0.25 A_{BT}^{0.5}) + 0.15 V^2]^{0.5}$  liczba Froude'a oparta na aktualnej wodnicy pływania

Dodatkowy opór ciśnienia związany z zanurzeniem pawęży:

$$R_{TR} = 0.5 \rho V^2 A_T C_6 \quad (5.9)$$

-gdzie:

$C_6 = 0.20(1 - 0.2 F_{nT})$  dla  $F_{nT} < 5$  lub

$C_6 = 0$  dla  $F_{nT} > 5$

$F_{nT} = V / [2gA_T / (B + BC_{WP})]^{0.5}$  -gdzie  $C_{WP}$  - współczynnik pełnotliwości wodnicy

Współczynnik korelacji oporu model – statek:

$R_A = 0.5 \rho V^2 SC_A$  uwzględnia chropowatość kadłuba i opór od wiatru, gdzie :

$$C_A = 0.006(L + 100)^{-0.16} - 0.00205 + 0.003 (L/7.5)^{0.5} C_B^4 C_2(0.04 - C_4) \quad (5.10)$$

-gdzie:  $C_4 = T_F / L$  dla  $T_F/L < 0.04$

$C_4 = 0.04$  dla  $T_F/L > 0.04$

Dodatkowo, dla wyższych wartości chropowatości kadłuba niż  $k_S = 150 \mu m$ , współczynnik  $C_A$  może być zwiększony o:

$$\Delta C_A = (0.105 k_S^{1/3} - 0.005579) / L^{1/3} \quad L \text{ i } k_S \text{ w [m]}$$

### 5.2.3 Prognozy charakterystyk napędowych

Prognoza współczynników napędowych:

Skorygowane wartości  $w_t$ ,  $t$  i względna sprawność napędowa są obliczane następująco:

Współczynnik strumienia nadążającego:

- statki jednośrubowe

$$w_t = C_9 C_V L/T_A (0.066875 + 1.21756 C_{I1} C_V / (1 - C_{P1}) + 0.24558 [B / (L - C_{P1})]^{0.5} - 0.09726 / (0.95 - C_P) + 0.11434 / (0.95 - C_B) + 0.75 C_{stern} C_V + 0.002 C_{stern} \quad (5.11)$$

-gdzie:

$C_8 = BS / (LDT_A)$  dla  $B/T_A < 5$  lub

$$C_8 = S(7B/T_A - 25) / [LD(B/T_A - 3)] \quad \text{dla } B/T_A > 5$$

$$C_9 = C_8 \quad \text{dla } C_8 < 28 \text{ lub}$$

$$C_9 = 32 - 16(C_8 - 24) \quad \text{dla } C_8 > 28$$

$$C_{11} = T_A / D \quad \text{dla } T_A/D < 2 \text{ lub}$$

$$C_{11} = 0.083333(T_A/D)^3 + 1.3333 \quad \text{dla } T_A > 2$$

$$C_V = (1+k) C_F + C_A$$

$$C_{P1} = 1.45C_P - 0.315 - 0.0225 \text{ lcb}$$

Współczynnik ssania:

$$t = 0.001979 L/(B - BC_{P1}) + 1.0585C_{10} - 0.00524 - 0.1418D^2/(BT) + 0.0015C_{stern}$$

-gdzie: (5.12)

$$C_{10} = B/L \quad \text{dla } L/B > 5.2 \text{ lub}$$

$$C_{10} = 0.25 - 0.003328402 / (B/L - 0.134615385) \quad \text{dla } L/B < 5.2$$

Względna sprawność rotacyjna:

$$\eta_R = 0.9922 - 0.05908 A_E/A_O + 0.07424 (C_P - 0.0225 \text{ lcb}) \quad (5.13)$$

Ponieważ powyższe wzory miały zastosowanie dla ruf konwencjonalnych, współczynniki napędowe dla szybkich, jednośrubowych smukłych statków z otwartą rufą, mogą przybrać postać:

$$w_t = 0.3C_B + 10C_V C_B - 0.1 \quad t = 0.1 \quad i \quad \eta_R = 0.98 \quad (5.14)$$

Dla statków dwuśrubowych współczynniki napędowe zostały określone w funkcji pełnotliwości kadłuba:

$$w_t = 0.3095C_B + 10C_V C_B - 0.23D/(BT)^{0.5}$$

$$t = 0.325C_B - 0.1885D/(BT)^{0.5} \quad (5.15)$$

$$\eta_R = 0.9737 + 0.111(C_P - 0.0225 \text{ lcb}) - 0.06325P/D$$

#### 4.2.4 Określenie sprawności śruby napędowej

Charakterystyki hydrodynamiczne śrub napędowych, czy to wzięte z badań modelowych, czy też obliczone w oparciu o serię B- Wageningen, mogą być skorygowane na zadaną liczbę Reynoldsa za pomocą poniższych wzorów opartych na metodzie ITTC-78:

$$K_{T\text{-ship}} = K_{T\text{-Bseries}} + \Delta C_D 0.3 (PC_{0.75}Z) / D^2 \quad (5.16)$$

$$K_{Q\text{-ship}} = K_{Q\text{-Bseries}} - \Delta C_D 0.25 (C_{0.75}Z) / D$$

-gdzie:

P skok śruby na promieniu  $r/R = 0.75$

$C_{0.75}$  długość cięciwy profilu na promieniu  $r/R = 0.75$

$\Delta C_D$  różnica wartości współczynnika oporu profilowego:

$$\Delta C_D = [2 + 4(t/C)_{0.75}] [0.003605 - (1.89 + 1.62 \log(C_{0.75}/k_p))^{-2.5}] \quad (5.17)$$

-gdzie:

t grubość profilu na promieniu  $r/R = 0.75$

$k_p = 0.00003$  m standardowa chropowatość skrzydła

$$C_{0.75} = 2.073(A_E/A_o)D/Z$$

$$(t/C)_{0.75} = (0.0185 - 0.00125Z) D/C_{0.75}$$

Współczynnik powierzchni skrzydeł można określić za pomocą:

$$A_E/A_o = K + (1.3 + 0.3 Z) T / [D^2(p_o + \rho gh - p_v)] \quad (5.18)$$

-gdzie:

$P_v$  ciśnienie pary nasyconej

h zanurzenie osi śruby

$K = 0.0 - 0.1$  dla statków dwuśrubowych

$K = 0.2$  dla statków jednośrubowych

Powyższe równania są spójne ze sprawnością linii wału:

$$\eta_S = P_D/P_S$$

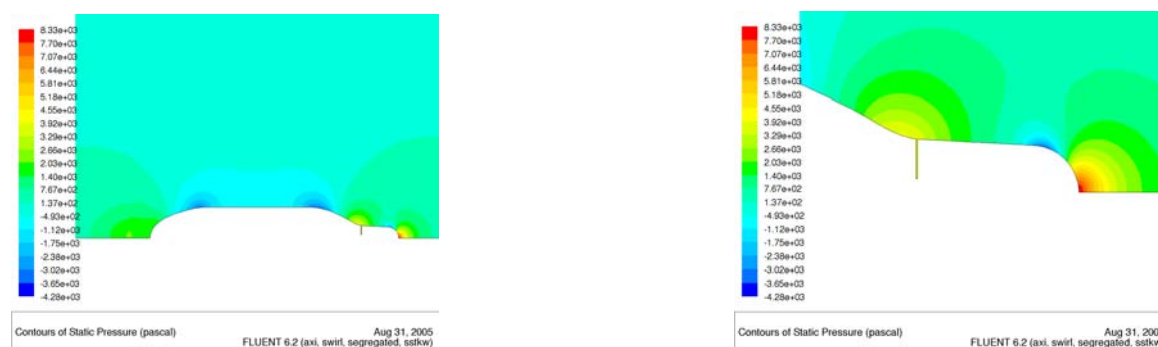
Moc na wale śrubowym może być określona za pomocą:

$$P_S = P_E / (\eta_R \eta_o \eta_S (1 - t)/(1 - w)) \quad (5.19)$$

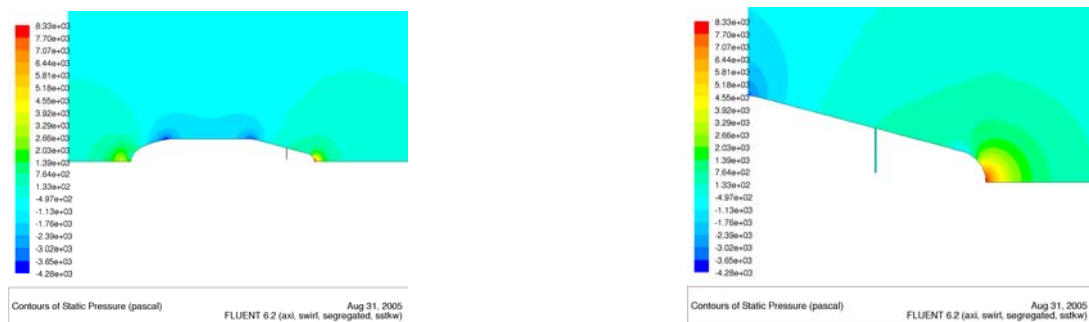
## 6. OGRANICZENIA BADAWCZE NAPĘDU PODOWEGO

### 6.1 Efekt szczeliny pomiędzy piastą śruby i obudową podu [28],[35],[36]

Pojecie efektu szczeliny „Gap effect” zostało niedawno wprowadzone do badań modelowych pędników podowych. Związane jest ono z relacjami zmian przekrojów poprzecznych we wzajemnych konfiguracjach piasty śruby podowej i geometrii przedniej części pędnika podowego typu ciągnącego. W efekcie powoduje to pojawienie nad- lub podciśnienia w szczelinie, które w efekcie wnosi dodatkowy napór przekłamując napór śruby podowej mierzony bezpośrednio za śrubą. Zjawisko to nie ma wpływu na charakterystyki hydrodynamiczne jednostki podowej, jako takie, lecz źle zidentyfikowane może doprowadzić do błędnego określenia punktu pracy podowej, a w efekcie do nietrafionych projektów śrub.



Rys. 6.1. Wpływ piasty cylindrycznej na pole ciśnień wzdłuż gondoli podu [28]



Rys. 6.2 Wpływ piasty stożkowej na pole ciśnień wzdłuż gondoli podu [28]

## 6.2 Efekt skali obudowy podu

### 6.2.1 Wprowadzenie

Ponieważ w badaniach modelowych napędów podowych przyjęto, iż cała obudowa podu należy do pędnika, nie jest ona przedmiotem cyklu badań oporowych kadłuba. Z kolei generuje ona duże straty w postaci oporu tarcia i ciśnienia z powodu rozbudowanej struktury 3D. Taki stan rzeczy wymaga specyficznego, indywidualnego podejścia do ekstrapolacji wyników prób modelowych napędu na skalę rzeczywistą. Główne przeszkody w uwzględnieniu efektu skali w przeliczaniu oporu obudowy podu wynikają z następujących powodów:

- Trudność zmierzenia oporu obudowy podu w skali modelu  
Jest to związane z dużą rozbieżnością pomiędzy wynikami pomiarów oporu odosobnionej obudowy podu a wynikami pomiarów traktujących opór obudowy podu jako różnicę pomiędzy wynikami pomiaru oporu kadłuba z podami jako części wystające, a oporem gołego kadłuba.
- Zależność wielkość oporu obudowy podu od:
  - współczynnika skali modelu;
  - kształtu i wielkości obudowy;
  - usytuowania obudowy względem lokalnego kierunku opływu;
  - pola prędkości indukowanej śrubą podową;
  - prędkości dopływu wody.
- Wpływ obciążenia naporem śruby podowej na wzajemne interakcje pomiędzy elementami pędnika podowego.

### 6.2.2 Metoda SSPA[49]

W tej metodzie korekta naporu pędnika podowego, wynikająca z oporu obudowy, jest określana poprzez porównanie zmierzonego oporu obudowy z oporem wyliczonym w skali rzeczywistej. Metoda obliczeń jest oparta na półempirycznej formule opartej na obliczeniach oporu ciała torpedopodobnego. Nie jest brany pod uwagę efekt pracy śruby ani efekt pracy wspornika, na którym jest zawieszona gondola.

### 6.2.3 Metoda Instytutu Kryłowa [4], [30], [31],[49]

W metodzie tej opór obudowy podu w skali rzeczywistej jest określany w oparciu o opór obudowy podu zmierzony w trakcie prób pędnika odosobnionego. Opór ten jest mnożony przez współczynnik  $\alpha$ , który jest stosunkiem oporu obudowy podu w skali rzeczywistej i oporu modelu podu, obliczonych za pomocą narzędzi numerycznych CFD.



#### 6.2.4 Metoda Sumitomo[49]

Metoda ta jest oparta na przybliżonej formule obliczania oporu obudowy podu w skali rzeczywistej, który rozbija się na opór gondoli, opór wspornika, na którym jest zawieszona gondola oraz uwzględnia się składnik wzajemnych interferencji. Wpływ śruby podowej uwzględnia się jako prędkość dopływu wody do obudowy, co daje efektywną liczbę Reynoldsa a w efekcie rzeczywisty współczynnik oporu tarcia gondoli i wspornika wewnątrz strumienia zaśrubowego. Metoda ta nie uwzględnia wpływu kształtu gondoli, jak i skrócenia strumienia zaśrubowego.

#### 6.2.5 Metoda HSV A[49]

Metoda ta bazuje na przybliżonych obliczeniach oporu tarcia obudowy podu. Obudowa podu jest dzielona na szereg stref, a opór tarcia traktuje się jako sumę sił tarcia każdego paska strefy, zarówno dla modelu jak i w skali rzeczywistej przy użyciu prostych formuł. Wpływ śruby uwzględnia się w postaci prędkości dopływu do stref, które znajdują się w strumieniu zaśrubowym, jako funkcję współczynnika obciążenia śruby podowej naporem. Różnica pomiędzy wyliczonym, bazującym na liczbie Reynoldsa, oporem tarcia w skali modelu i w skali rzeczywistej jest traktowana jako efekt skali obudowy podu. Nie uwzględnia się tutaj także wpływu skrócenia strumienia zaśrubowego oraz wpływu oporu ciśnienia związanego z subtelną kształtu obudowy podu.

#### 6.2.6 Metoda MARIN[49]

Metoda ta opracowana przez Holtropa, wykorzystuje współczynnik kształtu, a obudowa podu jest podzielona na dwa składniki: zależny i niezależny od liczby Reynoldsa. Relacja pomiędzy tymi składnikami jest określana, dla typowych rozwiązań pędników podowych obecnych na rynku, za pomocą obliczeń oporu lepkości w skali modelu i rzeczywistej, wykluczając wpływ wspornika podu, wliczając zaś wpływ śruby podowej zastąpionej odpowiednim dyskiem. Różnica pomiędzy oporem, w skali modelu i w skali rzeczywistej, części zależnej od liczby Reynoldsa, stanowi podstawę do obliczenia efektu skali obudowy podu. Metoda ta nie uwzględnia wpływu skrócenia strumienia zaśrubowego, jak i oddziaływania wspornika gondoli na opór całej obudowy.

#### 6.2.7 Metoda CTO[61]

Ponieważ liczba Reynoldsa w czasie prób śruby swobodnej powinna być wyższa od wartości krytycznej, będąc i tak niższą od swojego ekwiwalentu w skali rzeczywistej, niezbędne są odpowiednie korekty charakterystyk śrubowych. Jest to robione w dwóch krokach: dla skrzydeł śruby zgodnie z metodą ITTC-78 oraz dla obudowy podowej, jak to podano niżej.

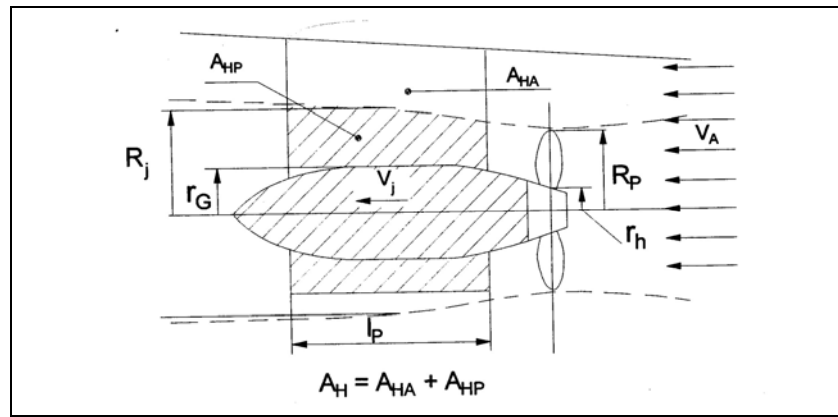
Generalnie, charakterystyki całej jednostki podowej są prezentowane w postaci bezwymiarowej jako ekwiwalentna śruba napędowa  $K_T^{\text{unit}}$ ;  $K_Q^{\text{unit}} = f(J)$  posiadająca rozmiary śruby podowej. Korekty dla skrzydeł są określone jako:  $\Delta K_T^{\text{blades}}$  i  $\Delta K_Q^{\text{blades}}$  w funkcji współczynnika posuwu  $J$ , natomiast wpływ obudowy podu jest uwzględniany jako poprawka  $\Delta K_T^{\text{housing}}$ .

Tak więc:

$$K_T^{\text{unit}} = K_T^{\text{o.w. tests}} - \Delta K_T^{\text{blades}} + \Delta K_T^{\text{housing}} \quad (6.1)$$

$$K_Q^{\text{unit}} = K_Q^{\text{blades}} - \Delta K_Q^{\text{blades}} \quad (6.2)$$

Korekta uwzględniająca obecność obudowy podu jest ograniczona do paska powierzchni podu znajdującego się wewnątrz strumienia zaśrubowego – jak na Rys. 6.3 poniżej.



Rys.6.3. Schemat opływu zespołu podowego

Podane niżej wzory pozwalają obliczyć powierzchnię w/w paska obudowy, jak i prędkości lokalne:

- współczynnik tarcia zgodnie z wzorem ITTC-57 :

$$C_F = 0.075 / (\log Re - 2)^2 \quad (6.3)$$

- poprawka  $\Delta K_T^{\text{housing}}$  :

$$\Delta K_T^{\text{housing}} = (C_{FOHM} - C_{FOHS}) [Kb + (1-b)] A_{HM} J^2 / 2D_M^2 \quad (6.4)$$

-gdzie:

$C_{FOHM}$  i  $C_{FOHS}$  są współczynnikami tarcia dla obudowy podowej dla liczb Reynoldsa określonych według wzoru:

$$R_{nH} = l_p V_A K^{0.5} / \nu \quad (6.5)$$

$A_{HM}$  - całkowita powierzchnia obudowy podu

$A_{HPM}$  - powierzchnia zwilżona obudowy podu leżąca w strumieniu zaśrubowym

$b = A_{HPM} / A_{HM}$  - relacja powierzchni zwilżonych podu

$D_M$  - Średnica modelu śruby podowej

$K = (V_{jM} / V_{AM})^2$  współczynnik określany eksperymentalnie

$$V_{jM} = V_{AM} (1 + C_{TM})^{0.5} - \text{prędkość strumienia zaśrubowego} \quad (6.6)$$

$$C_{TM} = T_{UM} / (1/2 \rho_M V_{AM}^2 \pi R_{PM}^2) - \text{współcz. obciążenia kręgu śruby naporem} \quad (6.7)$$

$$R_{jM}^2 = 1/2 [1 / (1 + C_{TM})^{0.5} + 1] (R_{PM}^2 - r_{hM}^2) + r_{GM}^2 - \text{średni promień strumienia zaśrubowego} \quad (6.8)$$

### 6.2.8 Zastosowanie kodu RANS (Reynolds Averaged Navier-Stokes Solver)[12], [49]

Metoda ta bazuje na obliczeniach wykorzystujących zaawansowane narzędzia hydromechaniki numerycznej (CFD). Śruba podowa jest zastępowana odpowiednim dyskiem, który generuje napór i moment na poziomie zmierzonym w trakcie badań modelowych. Skalowanie numeryczne stosuje się do obudowy podu, a nie do współczynników hydromechanicznych śruby

napędowej utrzymanych na poziomie wielkości modelowych. Tworzy się sieć około  $0.6 \times 10^6$  komórek wokół obudowy podu, w skali modelu i rzeczywistej oraz uwzględnia wpływ ścian. Model turbulencji: *k-epsilon*. Metoda ekstrapolacji na skalę rzeczywistą jest identyczna z procedurą Instytutu Kryłowa:

$$K_{P+S}^{ship} = K_{P+S}^{model} (K_{P+S}^{ship} / K_{P+S}^{model}) \quad (6.9)$$

### 6.2.9 Technika symulacji zadanych warunków eksploatacyjnych

Zadane warunki eksploatacyjne są symulowane w badaniach modelowych poprzez użycie, w trakcie próby modelowej napędu, odpowiednio obliczonej tzw. „siły podholowującej”.

$$F_D = 0.5 \rho_M V_M^2 S_M [(1+k)(C_{FOM} - C_{FOS}) - \Delta C_F] \quad (6.10)$$

W praktyce sprowadza się to do obliczenia współczynnika oporu statku w zadanych warunkach eksploatacyjnych, które są opisane jako względny wzrost oporu statku lub mocy dostarczonej do pędników, w stosunku do warunków prób zdawczych traktowanych jako układ odniesienia. Efekt skali oporu tarcia obudowy podu uwzględnia się jako współczynnik korygujący współczynnik oporu tarcia statku:

$$\Delta K_T^S = F_D^{housing} / (\rho n_s^2 D^4) \quad (6.11)$$

## 7. ZESTAWIENIE WYJŚCIOWYCH ZBIORÓW DANYCH

### 7.1 Zastosowane procedury [2], [3]

#### 7.1.1 Próby oporu

Opór gołego kadłuba statku podowego jest rozumiany jako opór kadłuba bez zespołów podowych, ale z innymi częściami wystającymi, o ile takie występują, lecz bez stępek przechyłowych. Opór ten oblicza się jak dla statku wypornościowego z napędem śrubowym metodą ITTC-78. W efekcie obliczeń otrzymuje się:

**Współczynnik oporu całkowitego statku rzeczywistego:**

$$C_{TS} = C_R + (S_S + S_{BKS}) [C_{FOS} (1+k) + \Delta C_F] / S_S + C_{AA} + C_{APS} \quad (7.1)$$

**Wielkość oporu statku:**

$$R_{TS} = C_{TS} 0.5 \rho_S V^2 S \quad (7.2)$$

**Moc holowania**

$$P_{ES} = R_{TS} V_S \quad (7.3)$$

#### 7.1.2 Pomiary nominalnego pola prędkości w płaszczyźnie kręgu śruby

Pole prędkości w kręgu śruby podowej mierzone jest analogicznie, jak to ma miejsce w przypadku modeli statków z napędem konwencjonalnym. Używane do tego celu są takie same przyrządy, do których należą sondy Pitota, sterowane ręcznie lub automatycznie oraz procedury obliczeniowe. Pomiarów prędkości dokonuje się w punktach o zdefiniowanych współ-

rzędnych, należących do kręgu śruby. W trakcie tych pomiarów nie ma na kadłubie zainstalowanych jednostek podowych.

$V_x, V_y, V_z = f(x, y, z)$  - mierzone składowe pola prędkości

$w_x(r, \varphi) = 1 - V_x / V_m$  - wartość składowej osiowej strumienia w zadanym punkcie  
 $A(r, \varphi)$  (7.4)

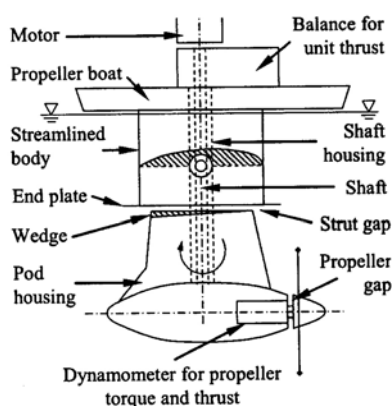
$w_x(\varphi) = 1 - V_x / V_m$  - rozkład strumienia dla  $r = \text{const.}$  (7.5)

$w_r(r) = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} w_x(r, \varphi) d\varphi$  - średnia wartość strumienia na danym promieniu (7.6)

$w_n(r_i) = \frac{2}{r_i^2 - r_h^2} \int_{r_h}^{r_i} r w_r(r) dr$  - średnia wartość strumienia w rejonie pracy skrzydeł śruby (7.7)

### 7.1.3 Próby pędników odosobnionych [49]

Odosobnione pędniki podowe są badane w większości basenów modelowych oraz CTO zgodnie z zaleceniami Komitetu Pędników Azymutalnych ITTC.



Rys.7.1 Schemat stanowiska pomiarowego pędnika podowego

System pomiaru charakterystyk podów odosobnionych, przedstawiony na Rys. 7.1 został zaprojektowany i zmontowany w taki sposób by zminimalizować wpływ układu napędowego na badane charakterystyki. Chociaż napęd i moment śruby podowej są mierzone przez układ dynamometryczny bezpośrednio za śrubą, istnieje duża niepewność odnośnie mierzonego naporu, co jest spowodowane wystąpieniem tzw. „efektu szczeliny” pomiędzy piastą śruby podowej i obudową podu. Przejawia się on pojawieniem dodatkowego, indukowanego naporu, wywołanego zmianami ciśnienia w szczelinie. Znak i wielkość tego dodatkowego naporu zależy od wzajemnej konfiguracji kształtu piasty śruby i przedniej części obudowy podu.

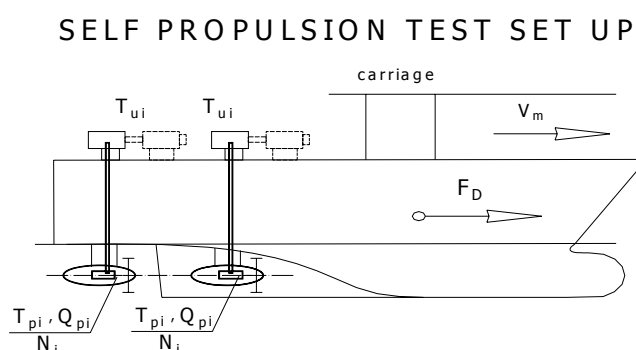
Wypadkowy napór jednostki podowej nie zależy od efektu szczeliny i jest mierzony przez dynamometr, na którym jest zawieszony cały pędnik. Moment śruby podowej jest traktowany jako moment całego pędnika podowego i jest brany do obliczeń jego charakterystyk. Napór i moment śruby podowej, skorygowane o efekt szczeliny, są podstawą do obliczenia współ-

czynników wpływu niezbędnych do poprawnego zaprojektowania śruby rzeczywistej. Odosobnione śruby podowe są badane w sposób typowy jak to określa procedura oparta na zaleceniach ITTC-78.

#### 7.1.4 Próby napędowe [27],[49]

W zdecydowanej większości prób modelowych z napędem podowym, silnik elektryczny jest umieszczany w modelu kadłuba, a moment napędowy i obroty śrub są przekazywane za pomocą przekładni typu „Z”.

Moment i napór śruby są mierzone, zaraz za śrubą podową, przy użyciu dedykowanego dynamometru śrubowego. Napór obudowy podu jest mierzony dynamometrem podowym, usytuowanym wewnątrz kadłuba, na którym wisi model pędnika. Obroty śruby kontrolowane są w sposób pośredni, poprzez pomiar obrotów silnika i uwzględnienie przełożenia przekładni napędowej. Ostatnio pojawiają się modele pędników podowych posiadające małowabarytowy silnik elektryczny, usytuowany wewnątrz gondoli podu, co wydatnie zmniejsza straty transmisji mocy.



Rys.5.5. Schemat pomiarowy w próbie napędowej [27]

#### Sila podholowująca:

$$F_D = 0.5 \rho_M V_M^2 S_M [(1+k)(C_{FOM} - C_{FOS}) - \Delta C_F] \quad (7.8)$$

#### Współczynniki napędowe:

$$t_M = t_S = t \quad \eta_{RUM} = \eta_{RUS} = \eta_{RU} \quad w_{TM} = w_{TS} = w_T \quad (7.9)$$

#### Moc holowania:

$$P_E = 0.5 C_{TS} \rho_S V_S^3 S_S \quad (7.10)$$

#### Obroty śruby:

$$n_S = (1 - w_T) V_S / (J_{TS} D_S) \quad (7.11)$$

#### Moc doprowadzona:

$$P_{DS} = 2\pi \rho_S D_S^5 n_S^3 K_{QUOS} / \eta_{RU} \quad (7.12)$$

#### Ogólna sprawność napędowa:

$$\eta_{UD} = P_E / P_{DS} \quad (7.13)$$

**Sprawność kadłuba:**

$$\eta_{UH} = (1 - t) / (1 - w_T) \quad (7.14)$$

**Napór zespołu podowego:**

$$T_{US} = (K_{TUS} / J_{TS}^2) J_{TS}^2 \rho_S D_S^4 n_S^2 \quad (7.15)$$

**Moment śruby w zespole podowym:**

$$Q_{US} = K_{QUOS} \rho_S D_S^5 n_S^2 \quad (7.16)$$

## 7.2 Projekt Optipod

Projekt Optipod był jednym z pierwszych projektów unijnych ukierunkowanych na rozpoznanie specyfiki napędu podowego. W zakres jego prac wchodziły cztery typy statków podowych, takich, jak: Cruise vessel, Ropax, Cargo oraz Auxiliary vessel. Ponieważ dwa pierwsze typy statków miały wyraźnie szerszy program badań, ich wyniki zostały wybrane do dalszych analiz jako bardziej reprezentatywne.

### 7.2.1 Wymiary główne badanych statków podowych [22],[23],[24],[51],[52]

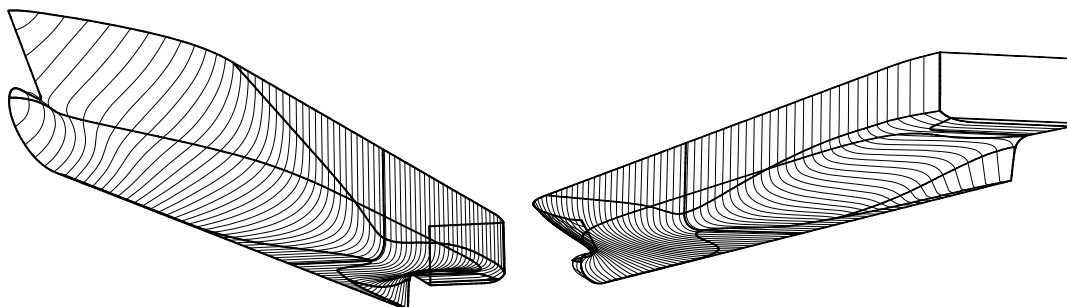
W ramach projektu Optipod przedmiotem badań były cztery reprezentatywne typy statków: Cruise (Wycieczkowiec), Ropax (RO-Ro Passenger), Cargo (Kontenerowiec) and Auxiliary (Statek Pomocniczy) Vessels. Ich wymiary były reprezentatywne dla swoich grup w wymiarze przynajmniej europejskim. Biorąc pod uwagę ilość wdrożeń oraz złożoność problemów projektowo – badawczych, Cruise Vessel oraz Ropax miały znacznie szerszy program badawczy w stosunku do pozostałych typów statków podowych. Ze względu na ilość zbudowanych statków, miały one najlepiej dopasowane układy podowe, chociaż dochodzące z morza wieści o wadach statków podowych serii Millennium, sugerowały potrzebę dalszych badań poprawiających kwestionowane osiągi tych statków. Wtedy to pojawiła się koncepcja podu klapkowego, mająca na celu poprawę stosunkowo słabej stateczności kursowej tych statków.

Drugim aspektem szeroko dyskutowanym w konsorcjum była ilość pędników podowych na statku. Tutaj przewagę uzyskały statki z napędem dwupodowym. Rozwiązanie to w widoczny sposób eksponowało, wcześniej wspomniane, zalety napędu podowego. W przypadku statków jednopodowych trudno było się uwolnić od wpływu rozwiązań stosowanych na konwencjonalnych statkach jednośrubowych. Praktycznie niemożliwy do uzyskania był kompromis dobrych własności napędowych i manewrowych.

Tabela 7.1 Wymiary główne badanych statków

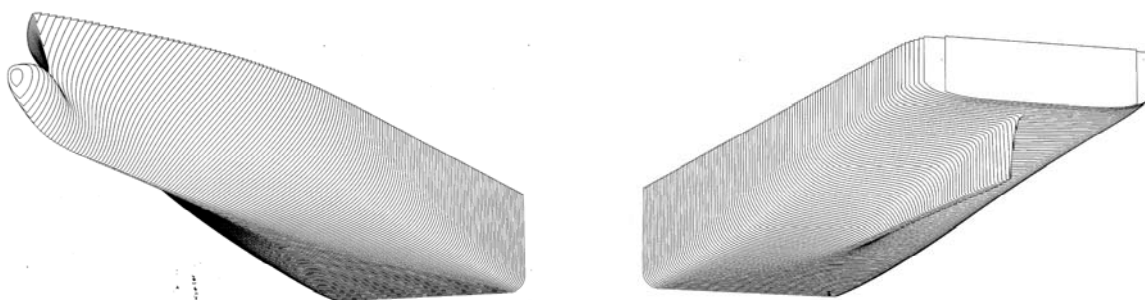
TypStatku	Lpp	B	T	Wyp.	Pzwilż	Cb	Cm	Cp	Cw	i <sub>E</sub>	LCB	SB	zanSB	hB
	[m]	[m]	[m]	[m <sup>3</sup> ]	[m <sup>2</sup> ]	[-]	[-]	[-]	[-]	[deg]	[%]	[m]	[m]	[m]
Ropax	172.20	28.40	6.60	19716	5740	0.611	0.986	0.620	0.901	7.20	-2.80	27.0	27.0	3.6
Cruise Vessel	272.00	32.20	8.00	43990	10360	0.628	0.991	0.634	0.876	8.30	-4.33	32.0	32.0	5.2

7.2.2 Informacja o badanych kształtach kadłuba  
- Ropax [21]:



Rys.7.1. Widok od strony dziobu i rufy

- Cruise Vessel [51]



Rys.7.2. Widok od strony dziobu i rufy

## 7.2.3 Charakterystyki oporowe – kadłub bez pędników podowych (przykład wydruków)

### -Ropax [23]:

#### SHIP DATA:

LENGTH LWL 193.97 M  
 DRAUGHT TF/TA 6.60 6.60 M  
 DISPLACEMENT 19589.50 M3  
 WETTED SURFACE 5815.00 M2  
 BILGE KEEL AREA 90.00 M2  
 PR.AREA ABOV.WL 740.00 M2  
 FORM FACTOR .190  
 ROUGH.ALLOWANCE•10••3 .202  
 AIR RESIS.COEF. •10••3 .127  
 APPENDAGES NONE

#### MODEL AND TEST DATA:

SHIP MODEL M563  
 TEST NUMBER ----  
 SCALE FACTOR 23.00  
 WATER: SEA TANK  
 TEMPERATURE [CEL] 15.0 14.5  
 MASS DENSITY [KG/M3] 1025.9 999.1  
 VISC.KIN. •10••6 [M2/S] 1.18827 1.15410

VALUES FOR THE MODEL							
VS	VM	RTM	CTM	RNM	CFM	CR	FN
			10 <sup>3</sup>	10 <sup>-6</sup>	10 <sup>3</sup>	10 <sup>3</sup>	
[knt]	[m/s]	[N]	-	-	-	-	-
21.0	2.25	99.8	3.582	16.460	2.756	0.302	0.248
22.0	2.36	110.1	3.602	17.243	2.735	0.347	0.260
23.0	2.47	122.6	3.669	18.027	2.715	0.439	0.271
24.0	2.57	137.4	3.775	18.811	2.696	0.567	0.283
25.0	2.68	151.9	3.848	19.595	2.678	0.661	0.295
26.0	2.79	166.7	3.903	20.379	2.661	0.737	0.307
27.0	2.90	182.4	3.961	21.162	2.644	0.814	0.318
28.0	3.00	200.6	4.051	21.946	2.629	0.922	0.330
29.0	3.11	223.8	4.213	22.730	2.614	1.102	0.342
30.0	3.22	251.1	4.417	23.514	2.600	1.323	0.354

VALUES FOR THE SHIP - TRIAL CONDITIONS							
VS	RTS	PE	CTS	RN	CFS	CTV	FNV
			10 <sup>3</sup>	10 <sup>-8</sup>	10 <sup>3</sup>	10 <sup>3</sup>	
[knt]	[kN]	[kW]	-	-	-	-	-
21.0	822	8875	2.360	17.634	1.428	18.889	0.664
22.0	915	10358	2.396	18.473	1.420	19.172	0.696
23.0	1035	12242	2.478	19.313	1.413	19.831	0.728
24.0	1181	14582	2.598	20.153	1.406	20.791	0.759
25.0	1324	17027	2.684	20.992	1.399	21.478	0.791
26.0	1468	19637	2.752	21.832	1.392	22.021	0.823
27.0	1624	22549	2.822	22.672	1.386	22.580	0.854
28.0	1808	26047	2.923	23.511	1.380	23.387	0.886
29.0	2055	30650	3.095	24.351	1.375	24.770	0.918
30.0	2351	36285	3.310	25.191	1.369	26.488	0.949



## Cruise vessel [52]:

### SHIP DATA:

LENGTH LWL 288.55 M  
 DRAFT TF/TA 8.0/8.0 M  
 DISPLACEMENT 43990.00 M3  
 WETTED SURFACE 10360.00 M2  
 BILGE KEEL AREA 200.00 M2  
 PR.AREA ABOV.WL 1020.00 M2  
 FORM FACTOR 0.0  
 ROUGH.ALLOWANCE•10••3 .201  
 AIR RESIS.COEF. •10••3 .091  
 APPENDAGES NONE

### MODEL AND TEST DATA:

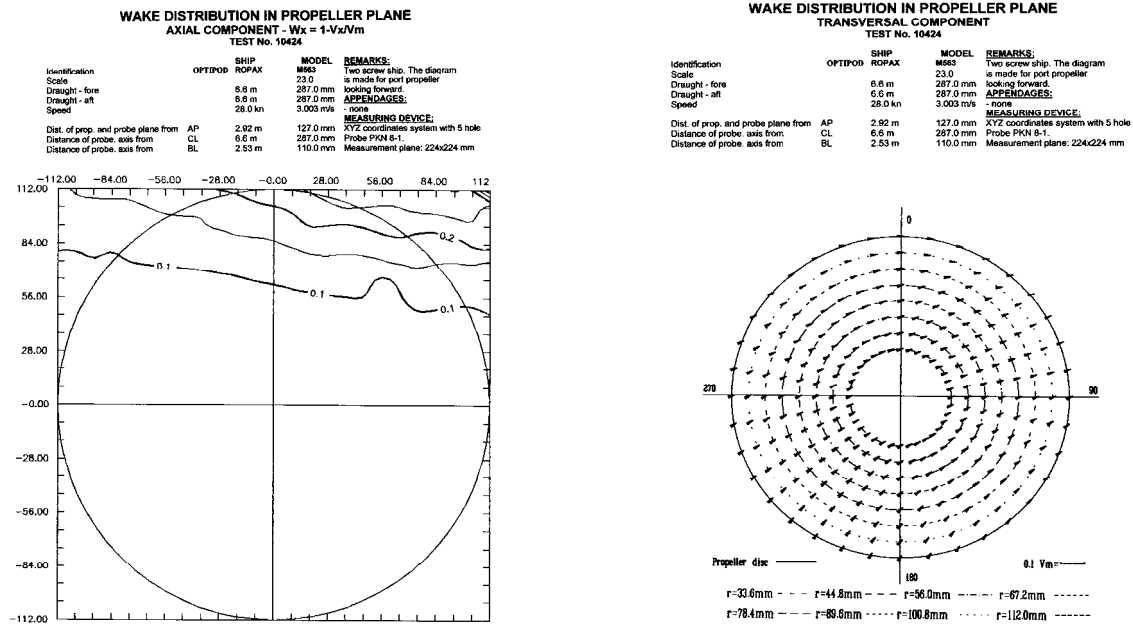
SHIP MODEL MO4265-1001  
 TEST NUMBER -----  
 SCALE FACTOR 25.111  
 WATER: SEA TANK  
 TEMPERATURE [CEL] 15.0 17.4  
 MASS DENSITY [KG/M3] 1025.9 998.6  
 VISC.KIN. •10••6 [M2/S] 1.18827 1.18219

VALUES FOR THE MODEL							
VS	VM	RTM	CTM	RNM	CFM	CR	FN
			10••3	10^-6	10^3	10^3	
[knt]	[m/s]	[ N]	-	-	-	-	-
16.0	1.64	76.2	3.444	17.597	2.726	0.751	0.154
17.0	1.75	83.2	3.332	18.697	2.699	0.665	0.163
18.0	1.85	90.8	3.244	19.796	2.673	0.603	0.173
19.0	1.95	99.0	3.173	20.986	2.648	0.557	0.182
20.0	2.05	108.1	3.126	21.996	2.628	0.530	0.192
21.0	2.16	117.9	3.095	23.096	2.607	0.520	0.202
22.0	2.26	128.7	3.076	24.196	2.588	0.520	0.211
23.0	2.36	140.2	3.067	25.295	2.569	0.530	0.221
24.0	2.46	152.3	3.059	26.395	2.552	0.540	0.230
25.0	2.57	165.1	3.057	27.495	2.535	0.554	0.240
26.0	2.67	179.1	3.066	28.595	2.519	0.578	0.250

VALUES FOR THE SHIP- TRIAL CONDITIONS							
VS	RTS	PE	CTS	RN	CFS	CTV	FNV
			10^3	10^-8	10^3		
[knt]	[kN]	[kW]	-	-	-	-	-
16.0	884	7274	2.524	20.258	1.405	0.020	0.443
17.0	956	8363	2.418	21.524	1.395	0.019	0.470
18.0	1037	9606	2.339	22.791	1.385	0.019	0.498
19.0	1129	11034	2.286	24.057	1.377	0.018	0.525
20.0	1233	12686	2.253	25.323	1.368	0.018	0.553
21.0	1350	14587	2.237	26.589	1.361	0.018	0.581
22.0	1480	16750	2.235	27.855	1.353	0.018	0.608
23.0	1623	19203	2.242	29.121	1.346	0.018	0.636
24.0	1778	21949	2.256	30.387	1.340	0.018	0.664
25.0	1946	25023	2.276	31.654	1.333	0.018	0.691
26.0	2127	28450	2.300	32.920	1.327	0.019	0.719

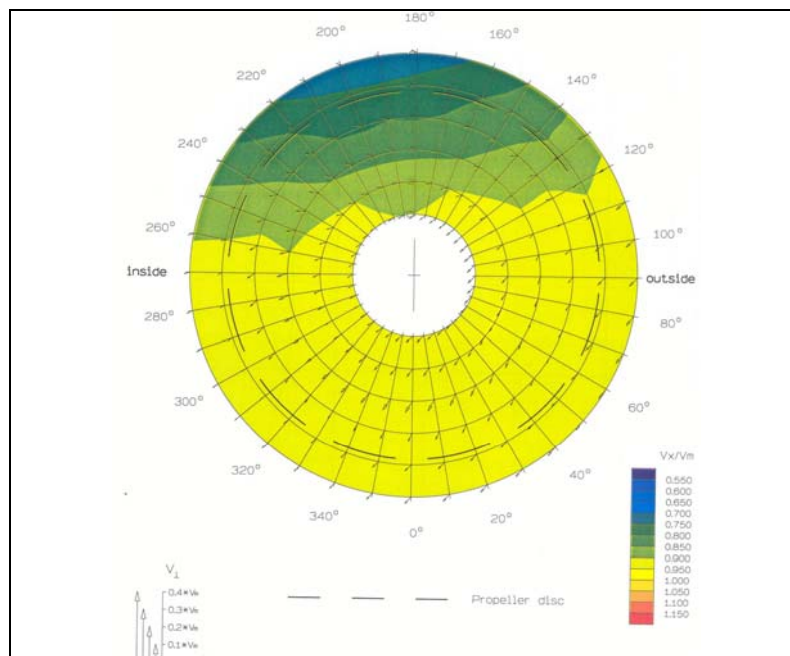
## 7.2.4 Struktura pola prędkości w płaszczyźnie kręgu śruby (przykłady wydruków)

- Ropax [23]:



Rys.7.3. Rozkład pola prędkości w płaszczyźnie kręgu śruby

- Cruise Vessel [51]:



Rys.7.4. Cruise Vessel -Rozkład pola prędkości w płaszczyźnie kręgu śruby

## 7.2.5 Charakterystyki pędników odosobnionych [22],[23],[47],[48]

### 7.2.5.1 Charakterystyki śrub podowych

Tabela 6.2 Dane użytych modeli śrub podowych:

Model śruby	D [mm]	P/D [-]	$A_E/A_o$ [-]	d/D [-]	Z [-]
P2581/82	229.0	1.005	0.753	0.250	4
P2621/22	229.0	1.012	0.686	0.247	4
P458/59	230.0	1.421	0.755	0.231	4

-Ropax [22]:

Tabela 7.3 Charakterystyki śruby podowej nr P458/59

J	$K_{T0}$	10 $K_{Q0}$	$\eta_0$
0.00	0.7927	1.5410	0.000
0.10	0.7384	1.4294	0.082
0.20	0.6816	1.3215	0.164
0.30	0.6242	1.2190	0.244
0.40	0.5676	1.1227	0.322
0.50	0.5128	1.0328	0.395
0.60	0.4606	0.9492	0.463
0.70	0.4111	0.8710	0.526
0.80	0.3642	0.7967	0.582
0.90	0.3192	0.7245	0.631
1.00	0.2752	0.6518	0.672
1.10	0.2307	0.5754	0.702
1.20	0.1838	0.4916	0.714
1.30	0.1323	0.3961	0.691
1.40	0.0736	0.2841	0.577

-Cruise Vessel [48]:

Tabela 7.4 Charakterystyki śruby podowej nr P2581/82

J	$K_{T0}$	10 $K_{Q0}$	$\eta_0$
0.00	0.564	0.808	0.000
0.10	0.516	0.748	0.110
0.20	0.465	0.686	0.216
0.30	0.414	0.623	0.317
0.40	0.361	0.561	0.410
0.50	0.309	0.498	0.494
0.60	0.258	0.436	0.566
0.70	0.209	0.374	0.624
0.80	0.161	0.308	0.665
0.90	0.109	0.237	0.660
1.00	0.053	0.157	0.532

### 7.2.5.2 Charakterystyki hydrodynamiczne podu odosobnionego

Charakterystyki podu odosobnionego określa się w oparciu o wyniki badań modelu swobodnego składającego się ze śruby napędowej oraz obudowy, w skład, której wchodzi: gondola, wspornik górny oraz sporadycznie płetwa dolna. W przypadku podów klapkowych, sterowane niezależnie klapki mogą być zawieszane na krawędzi spływu wspornika oraz płetwy dolnej będąc ich płynnym przedłużeniem. Celem tych prób jest:

- określenie charakterystyk hydrodynamicznych zespołu podu swobodnego do użycia w próbach napędowych i określenia prognoz napędowych;
- określenie interakcji pomiędzy śrubą podową i jego obudową;
- optymalizacja zespołu napędowego.

#### ***Obudowa podu***

Pędnik podowy łączy w swojej zwartej konstrukcji zarówno funkcje napędowe, jak i sterujące statku. Wielkość i kształt jednostki podowej jest kompromisem pomiędzy głównymi, często sprzecznymi, wymaganiami dotyczącymi:

- maksymalizacji sprawności napędowej poprzez zmniejszenie oporów hydrodynamicznych pędnika;
- zachowania wytrzymałości konstrukcji bez wprowadzania niekorzystnych oporowo elementów konstrukcyjnych;
- minimalizacji ciężaru i utrzymania takiego rozkładu mas i sztywności konstrukcji spełniających wymagania drganiowe;
- maksymalizacji sił sterujących przy jednoczesnej minimalizacji momentu sterującego na trzonie podu;
- zabezpieczenia funkcjonowania istotnych zespołów pędnika oraz łatwego do nich dostępu w celach serwisowych;
- minimalizacji kosztów kapitałowych i operacyjnych.

Podobnie, jak w przypadku konwencjonalnych jednostek pływających, opór jednostki podowej, odniesiony do oporu całego kadłuba lub jednostek podobnych, jest miernikiem strat napędowych oraz głównym kryterium oceny poprawności jego zaprojektowania w kontekście aktualnie dostępnych zespołów i elementów. Jest w dużym stopniu pochodna aktualnego stanu techniki w wielu dziedzinach.

Opór jednostki podowej jest trudny do zmierzenia w skali modelowej w warunkach pracy za kadłubem statku. Jego wielkość zależy od współczynnika skali, kształtu i wielkości, indukowanego pola prędkości obudowy, ustawienia względem kierunku napływu wody oraz od prędkości tego napływu. Obciążenie śruby naporem wywołuje indukowane pole prędkości o nieznanej wielkości z powodu rozbudowanych interakcji z obudową podu.

#### ***Charakterystyki podów odosobnionych***

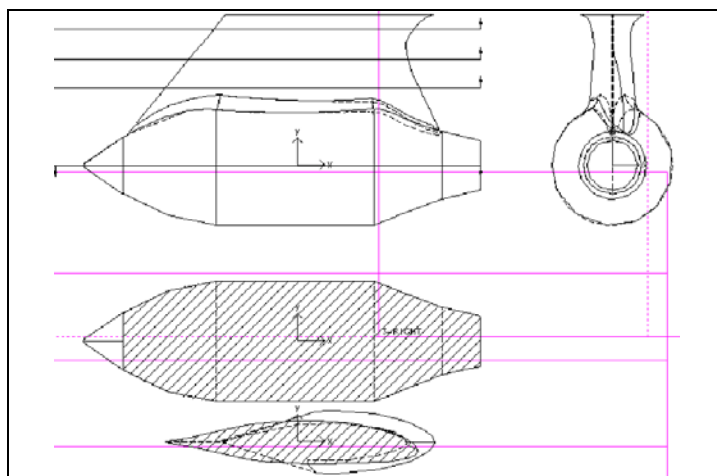
Charakterystyki podów odosobnionych zostały obliczone według poniższego schematu:

$$K_{TU} = T_U / \rho D^4 n^2 \quad (7.17)$$

$$K_{QU} = Q_U / \rho D^5 n^2 \quad (7.18)$$

$$\eta_{0U} = J K_{TU} / (2\pi K_{QU}) \quad (7.19)$$

- Ropax [21]:

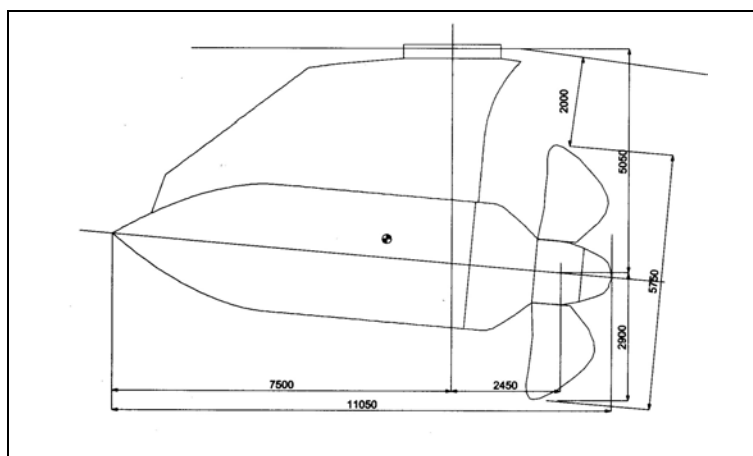


Rys.7.5. Geometria obudowy pędnika podowego bezklapkowego

Tabela 7.5 Charakterystyki pędnika podowego MP07 z modelami śrub nr P458/59

J	$K_{TU0}$	$10K_{QU0}$	$\eta_0$
0.0	0.763	1.513	0.000
0.1	0.724	1.426	0.081
0.2	0.679	1.332	0.162
0.3	0.630	1.243	0.242
0.4	0.580	1.161	0.318
0.5	0.529	1.083	0.389
0.6	0.479	1.013	0.452
0.7	0.431	0.939	0.512
0.8	0.384	0.875	0.559
0.9	0.339	0.809	0.600
1.0	0.294	0.740	0.632
1.1	0.248	0.673	0.645
1.2	0.199	0.600	0.635
1.3	0.146	0.513	0.588
1.4	0.085	0.430	0.438

- Cruise Vessel [33]:



Rys.7.6. Geometria zespołu podowego MM7

Tabela 7.6 Charakterystyki pędnika podowego MM7-  
modele śrub nr 2581/82

J	$K_{TU0}$	$10K_{QU0}$	$\eta_{U0}$
0.0	0.5613	0.7920	0.0000
0.1	0.5102	0.7370	0.1102
0.2	0.4586	0.6815	0.2143
0.3	0.4071	0.6256	0.3109
0.4	0.3562	0.5698	0.3982
0.5	0.3065	0.5138	0.4749
0.6	0.2580	0.4572	0.5391
0.7	0.2102	0.3990	0.5872
0.8	0.1625	0.3385	0.6115
0.9	0.1127	0.2739	0.5897
1.0	0.0586	0.2018	0.4624
1.1	-0.0001	0.1217	-0.0014

### 7.2.6 Charakterystyki napędowe

Charakterystyki napędowe statku z napędem podowym określa się w oparciu o odpowiednie wyniki prób oporu, podu odosobnionego oraz prób napędowych. Pozwalają one na określenie krzywych zapotrzebowania mocy, na zadane warunki serwisowe, oraz obrotów śrub podowych w funkcji prędkości statku. Dostarczają one także danych, niezbędnych do poprawnego zaprojektowania śrub podowych. Są one także ważnym kryterium oceny poprawności współpracy kadłuba statku z układem napędowym.

**-Ropax (przykład wydruków) [21] :**

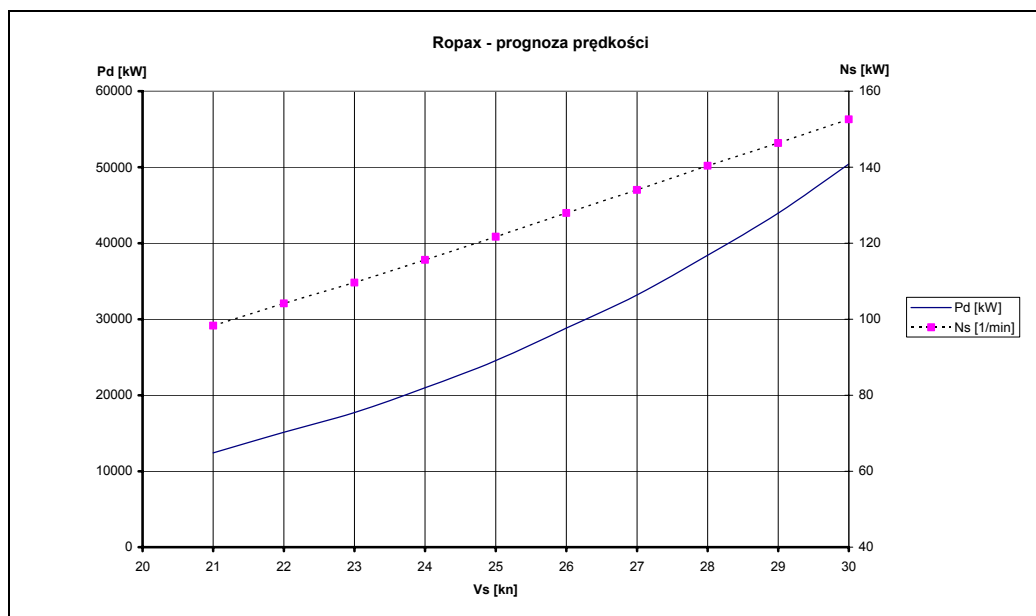
<b>SHIP MODEL</b>	M563-D	<b>SHIP</b>	
PROPELLER MODEL	PODS	LENGTH WL	193.97 M
TEST NUMBER	-----	DRAUGHT TF	6.60 M
SCALE FACTOR	23.00	DRAUGHT TA	6.60 M
		BREADTH	28.40 M
PROPELLER		WETTED SURFACE	5740. M2
NUMBER OF PROPELLERS	2	DISPLACEMENT	19820. M3
NUMBER OF BLADES	4	BILGE KEEL AREA	90.0 M2
DIAMETER	5.267 M	PROJ.AREA ABOVE WL.	740. M2
PITCH RATIO AT 0.7 R	1.3890	HULL ROUGHN. •10••6	100. M
PROP.ROUGHN. •10••6	30. M		
		FORM FACTOR	.200
WATER	SEA	TANK	
TEMPERATURE [CEL]	15.0	15.5	
MASS DENSITY [KG/M3]	1025.89	998.95	

<b>VALUES FOR THE MODEL</b>						
<b>VS</b>	<b>VM</b>	<b>RT</b>	<b>FD</b>	<b>TM</b>	<b>QM</b>	<b>NM</b>
[knt]	[m/s]	[N]	[N]	[N]	[Nm]	[RPS]
21.0	2.25	92.2	33.5	31.5	2.13	7.84
22.0	2.36	105.0	36.3	36.3	2.45	8.26
23.0	2.47	116.2	39.2	41.1	2.73	8.73
24.0	2.57	129.5	42.2	46.8	3.06	9.22
25.0	2.68	144.9	45.2	52.4	3.40	9.66
26.0	2.79	161.3	48.4	59.0	3.79	10.15
27.0	2.90	177.9	51.6	66.0	4.17	10.63
28.0	3.00	197.0	55.0	73.6	4.60	11.11
29.0	3.11	216.8	58.4	82.2	5.04	11.57
30.0	3.22	238.7	61.9	91.9	5.54	12.05

<b>PROPULSIVE FACTORS FOR THE MODEL</b>						
<b>VS</b>	<b>VM</b>	<b>THD</b>	<b>WTM</b>	<b>ETARTM</b>	<b>IOT</b>	<b>ETA0TM</b>
[knt]	[m/s]	-	-	-	-	-
21.0	2.25	0.067	0.120	0.950	1.103	0.625
22.0	2.36	0.053	0.128	0.942	1.088	0.624
23.0	2.47	0.063	0.123	0.953	1.082	0.624
24.0	2.57	0.066	0.119	0.959	1.074	0.623
25.0	2.68	0.048	0.122	0.960	1.065	0.623
26.0	2.79	0.044	0.120	0.963	1.055	0.622
27.0	2.90	0.043	0.120	0.974	1.046	0.620
28.0	3.00	0.035	0.122	0.977	1.037	0.619
29.0	3.11	0.037	0.130	0.986	1.022	0.616
30.0	3.22	0.038	0.137	0.993	1.006	0.612

<b>SHIP MODEL</b>	M563-D	<b>SHIP</b>	
PROPELLER MODEL	PODS	LENGTH WL	193.97 M
TEST NUMBER	-----	DRAUGHT TF	6.60 M
SCALE FACTOR	23.00	DRAUGHT TA	6.60 M
		BREADTH	28.40 M
PROPELLER		WETTED SURFACE	5740. M2
NUMBER OF PROPELLERS	2	DISPLACEMENT	19820. M3
NUMBER OF BLADES	4	BILGE KEEL AREA	90.0 M2
DIAMETER	5.267 M	PROJ.AREA ABOVE WL.	740. M2
PITCH RATIO AT 0.7 R	1.3890	HULL ROUGHN. •10••6	100. M
PROP.ROUGHN. •10••6	30. M		
		FORM FACTOR	.200
WATER	SEA	TANK	
TEMPERATURE [CEL]	15.0	15.5	
MASS DENSITY [KG/M3]	1025.89	998.95	

SHIP RESULTS AND PREDICTIONS - TRIAL CONDITIONS									
VS	PE	PD	N	T	Q	ETAD	ETA0	ETAH	WTS
[knt]	[kW]	[kW]	[RPM]	[kN]	[kNm]	-	-	-	-
21.0	7929	12396	98.3	787	1204	0.640	0.638	1.054	0.115
22.0	9714	15140	104.2	907	1388	0.642	0.638	1.068	0.114
23.0	11381	17712	109.7	1028	1543	0.643	0.638	1.058	0.115
24.0	13473	20973	115.6	1170	1732	0.642	0.637	1.054	0.114
25.0	16014	24557	121.7	1308	1927	0.652	0.636	1.067	0.108
26.0	18862	28827	128.0	1475	2152	0.654	0.635	1.069	0.105
27.0	21916	33192	134.0	1649	2365	0.660	0.634	1.069	0.105
28.0	25550	38422	140.4	1838	2614	0.665	0.633	1.075	0.103
29.0	29515	43960	146.4	2054	2869	0.671	0.631	1.080	0.108
30.0	34090	50403	152.6	2295	3154	0.676	0.627	1.085	0.113



Rys.7.7. Ropax - prognoza prędkości



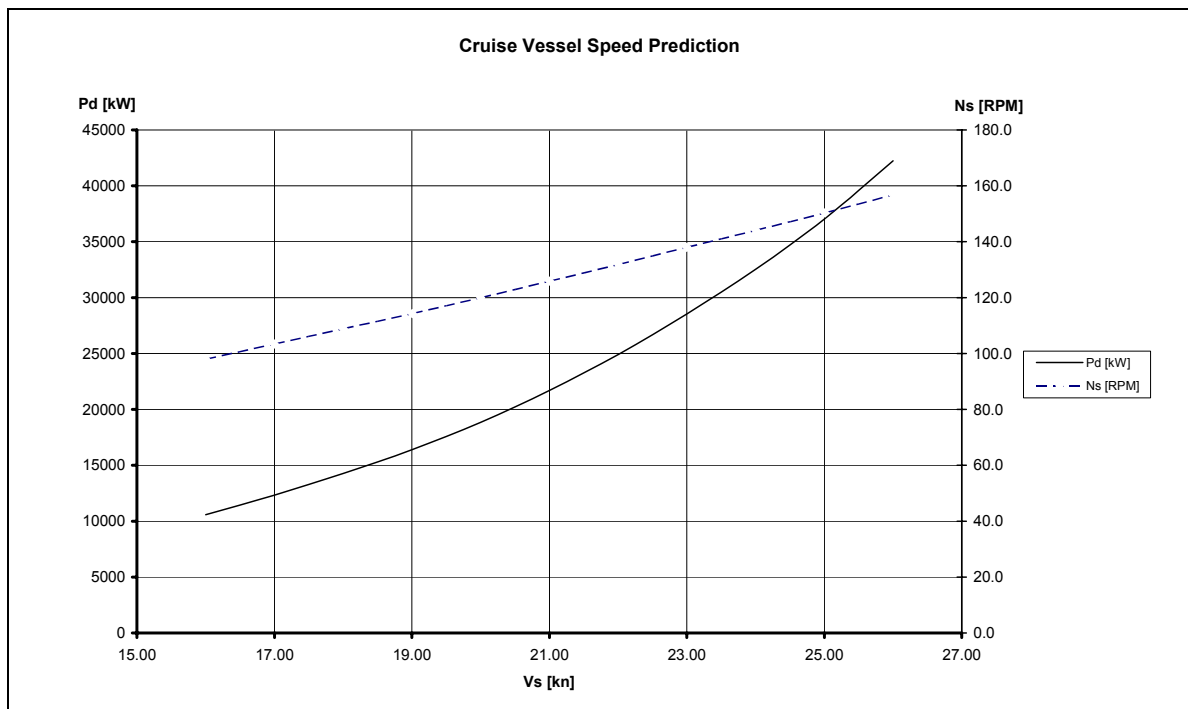
- Cruise vessel (przykład wydruków) [51]:

<b>SHIP MODEL</b>	<b>MO4147-1001</b>	LENGTH LWL	288.55	M
PROPELLER MODELS:	2581/82	DRAUGHT TF/TA	8.0/8.0	M
TEST NUMBER	-----	DISPLACEMENT	44100.00	M
SCALE FACTOR	22.71			
BREADTH	32.20	M		
WETTED SURFACE	10360.00	M <sup>2</sup>		
BILGE KEEL AREA	200.00	M <sup>2</sup>		
PROJ.AREA ABOVE WL.	1020.00	M <sup>2</sup>		
WATER:			SEA	TANK
TEMPERATURE [CEL]			15.0	9.6
MASS DENSITY [KG/M3]	1025.9	998.2		
VISC.KIN. • 10 •• 6 [M2/S]	1.18827	1.0137		

CRUISE VESSEL – MODEL TESTS RESULTS							
VS	VM	RTM	FD	TW	QW	NW	FN
[knt]	[m/s]	[N]	[N]	[N]	[Nm]	[RPS]	-
16.00	1.643	76.19	29.42	24.11	1.2302	7.99	0.1537
17.00	1.745	83.21	32.80	26.31	1.3557	8.43	0.1633
18.00	1.848	90.83	36.34	28.62	1.4883	8.87	0.1729
19.00	1.951	98.99	40.04	31.06	1.6274	9.31	0.1825
20.00	2.053	108.05	43.90	33.80	1.7817	9.77	0.1921
21.00	2.156	117.94	47.92	36.93	1.9569	10.26	0.2017
22.00	2.259	128.65	52.10	40.50	2.1473	10.75	0.2113
23.00	2.361	140.22	56.43	44.52	2.3513	11.24	0.2209
24.00	2.464	152.27	60.92	48.80	2.5697	11.74	0.2306
25.00	2.567	165.12	6	53.41	2.8073	12.25	0.2402
26.00	2.669	179.07	70.36	58.57	3.0699	12.79	0.2498
VS	THD	JW	KTW	KQW	WW	ETA0	ETAD
[knt]	-	-	-	-	-	-	-
16.00	0.0300	0.8980	0.1377	0.0307	0.053	0.608	0.622
17.00	0.0420	0.9043	0.1349	0.0304	0.053	0.607	0.613
18.00	0.0480	0.9098	0.1325	0.0301	0.054	0.606	0.607
19.00	0.0510	0.9147	0.1305	0.0299	0.054	0.605	0.604
20.00	0.0510	0.9175	0.1289	0.0297	0.054	0.604	0.602
21.00	0.0520	0.9178	0.1279	0.0296	0.052	0.603	0.599
22.00	0.0550	0.9177	0.1277	0.0296	0.052	0.603	0.597
23.00	0.0590	0.9172	0.1283	0.0296	0.052	0.603	0.595
24.00	0.0640	0.9164	0.1289	0.0297	0.053	0.604	0.594
25.00	0.0680	0.9147	0.1296	0.0298	0.053	0.604	0.591
26.00	0.0720	0.9114	0.1304	0.0299	0.051	0.605	0.589

**SHIP MODEL** MO4147-1001 LENGTH LWL 288.55 M  
 PROPELLER MODELS: 2581/82 RAUGHT TF/TA 8.0/8.0 M  
 TEST NUMBER ----- DISPLACEMENT 44100.00 M  
 SCALE FACTOR 25.11  
 BREADTH 32.20 M  
 WETTED SURFACE 10360.00 M<sup>2</sup>  
 BILGE KEEL AREA 200.00 M<sup>2</sup>  
 PROJ.AREA ABOVE WL. 1020.00 M<sup>2</sup>  
 WATER: SEA TANK  
 TEMPERATURE [CEL] 15.0 19.6  
 MASS DENSITY [KG/M3] 1025.9 998.2  
 VISC.KIN. •10••6 [M2/S] 1.18827 1.0137

SHIP RESULTS AND PREDICTIONS – TRIAL CONDITIONS							
VS	RTS	PE	N W	T W	QW	ETAD	PD
[knt]	[kN]	[kW]	[RPM]	[kN]	[kNm]	-	[kW]
16.00	884	7274	98.3	903	1031	0.686	10599
17.00	956	8363	103.6	991	1139	0.678	12334
18.00	1037	9606	109.1	1083	1252	0.673	14267
19.00	1129	11034	114.6	1179	1371	0.670	16459
20.00	1233	12686	120.4	1285	1500	0.668	18993
21.00	1350	14587	126.3	1404	1647	0.665	21933
22.00	1480	16750	132.5	1539	1806	0.661	25352
23.00	1623	19203	138.8	1690	1976	0.656	29254
24.00	1778	21949	145.2	1849	2158	0.652	33646
25.00	1946	25023	151.9	2020	2356	0.648	38615
26.00	2127	28450	158.6	2210	2574	0.644	44199



Rys.7.8. Cruise Vessel - prognoza prędkości

## 7.3 Projekt Fastpod

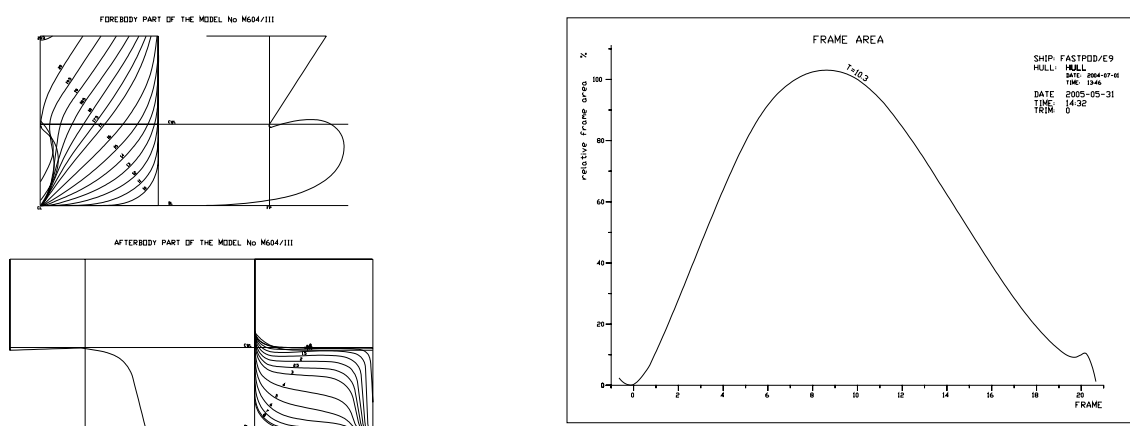
### 7.3.1 Wymiary główne badanych statków podowych [25],[50]

Tabela 7.7

TypStatku	Lpp	B	T	Wyp.	Pzwilż	Cb	Cm	Cp	Cw	$i_E$	LCB	SB	zanSB	hB
	[m]	[m]	[m]	[m <sup>3</sup> ]	[m <sup>2</sup> ]	[-]	[-]	[-]	[-]	[deg]	[%]	[m]	[m]	[m]
Fast Cargo	275.00	30.00	10.30	48338	10750	0.554	0.950	0.583	0.868	6.80	-2.60	30.0	30.0	5.8
Fast Ropax	219.64	29.30	6.50	15709	6331	0.376	0.642	0.585	0.757	5.70	-1.94	26.0	26.0	3.3

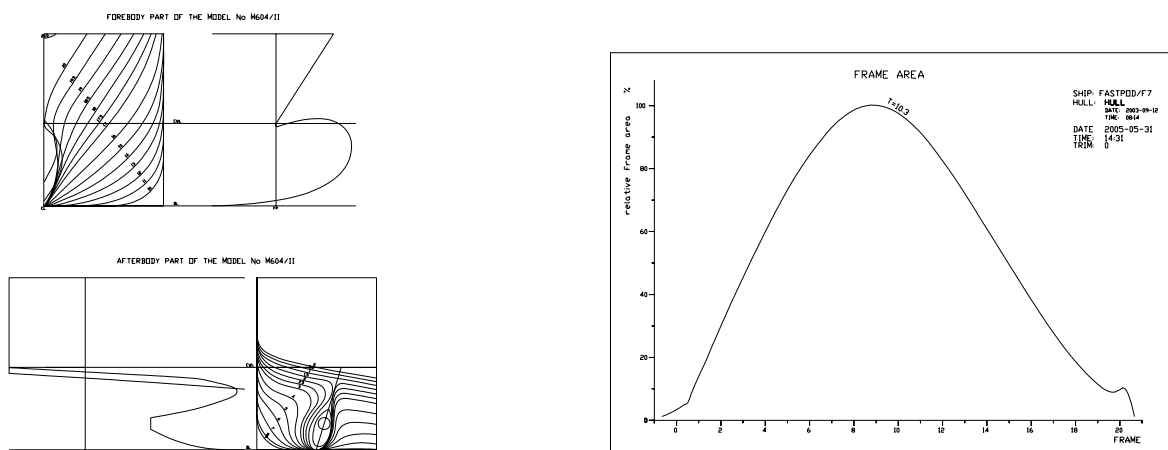
### 7.3.2 Informacja o badanych kształtach kadłuba [25]

- Fast Cargo Vessel:



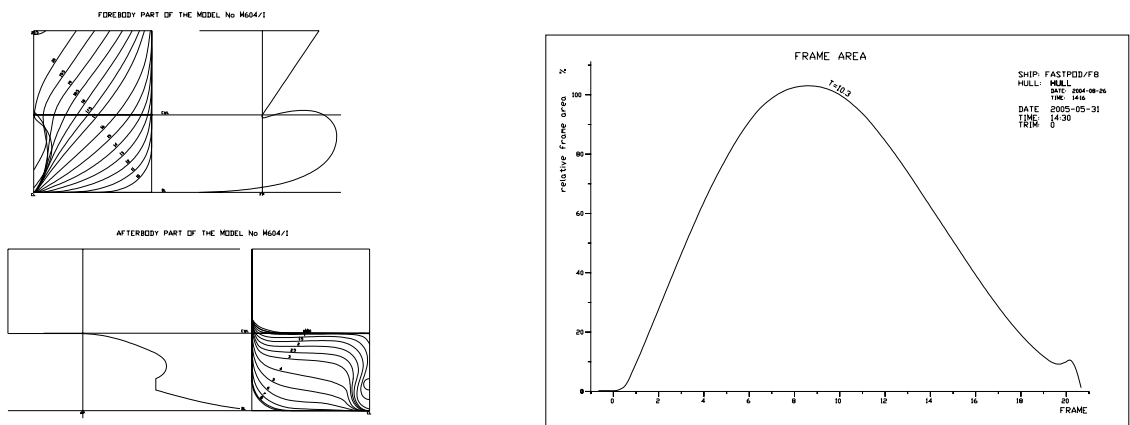
Układ czteropodowy

Rys.7.8. Kształt bazowy oraz krzywa pól wręgowych



Układ hybrydowy 2 skegi + 2 pody

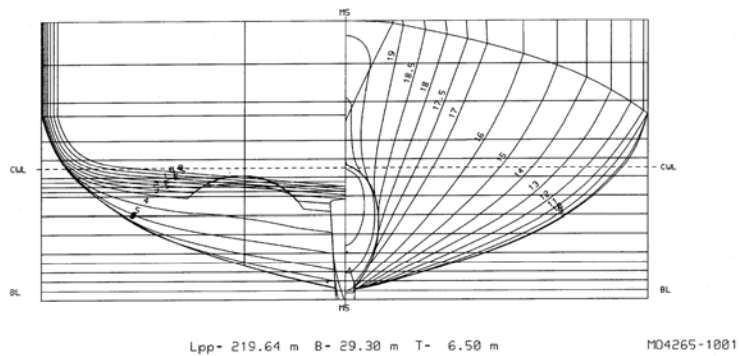
Rys.7.9. Kształt bazowy oraz krzywa pól wręgowych



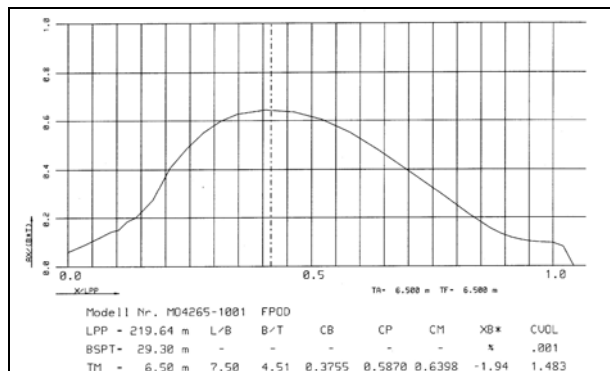
Centralny układ śrub tandem plus 2 pody

Rys.7.10. Kształt bazowy oraz krzywa pól wręgowych

- Fast Ropax [50]:



Rys.7.11. Fast Ropax - owrężenie



Rys.7.12. Fast Ropax – krzywa pól wręgowych

### 7.3.3 Charakterystyki oporowe – kadłub bez pędników

- Fast Cargo Vessel - układ czteropodowy (przykład wydruków) [26]:

**SHIP DATA:**

LENGTH LWL	292.37 M		
DRAFT TF/TA	10.30 10.30 M	MODEL AND TEST DATA:	
DISPLACEMENT	48338.00 M3	SHIP MODEL	M604/III
WETTED SURFACE	10750.00 M2	TEST NUMBER	----
BILGE KEEL AREA	200.00 M2	SCALE FACTOR	28.30
PR.AREA ABOV.WL	1020.00 M2	WATER:	SEA TANK
FORM FACTOR	.080	TEMPERATURE [CEL]	15.0 13.6
ROUGH.ALLOWANCE•10••3	.201	MASS DENSITY [KG/M3]	1025.9 999.2
AIR RESIS.COEF. •10••3	.095	VISC.KIN. •10••6 [M2/S]	1.18827 1.18219
APPENDAGES	NONE		

VALUES FOR THE MODEL							
VS	VM	RTM	CTM	RNM	CFM	CR	FN
			10 <sup>3</sup>	10 <sup>-6</sup>	10 <sup>3</sup>	10 <sup>3</sup>	
[knt]	[m/s]	[N]	-	-	-	-	-
22.0	2.13	90.7	2.989	18.590	2.701	0.072	0.211
23.0	2.22	99.2	2.992	19.435	2.682	0.096	0.221
24.0	2.32	107.7	2.981	20.280	2.663	0.106	0.231
25.0	2.42	117.5	2.998	21.125	2.645	0.142	0.240
26.0	2.51	127.6	3.011	21.971	2.628	0.173	0.250
27.0	2.61	139.2	3.045	22.816	2.612	0.223	0.259
28.0	2.71	152.5	3.102	23.661	2.597	0.297	0.269
29.0	2.80	165.9	3.147	24.506	2.582	0.358	0.279
30.0	2.90	180.0	3.189	25.351	2.568	0.415	0.288
31.0	3.00	194.2	3.223	26.196	2.555	0.464	0.298
32.0	3.09	207.7	3.235	27.041	2.542	0.490	0.307
33.0	3.19	222.0	3.251	27.886	2.529	0.519	0.317
34.0	3.29	238.7	3.293	28.731	2.517	0.574	0.327
35.0	3.38	258.1	3.361	29.576	2.506	0.655	0.336
36.0	3.48	283.6	3.490	30.421	2.495	0.795	0.346

VALUES FOR THE SHIP HULL - TRIAL CONDITIONS							
VS	RTS	PE	CTS	RN	CFS	CTV	FNV
			10 <sup>3</sup>	10 <sup>-8</sup>	10 <sup>3</sup>		
[knt]	[kN]	[kW]	-		-	-	-
22.0	1313	14863	1.860	27.845	1.353	15.067	0.599
23.0	1448	17133	1.876	29.110	1.346	15.199	0.626
24.0	1579	19489	1.878	30.376	1.340	15.217	0.653
25.0	1739	22369	1.907	31.642	1.333	15.453	0.680
26.0	1905	25483	1.932	32.907	1.327	15.650	0.708
27.0	2102	29194	1.976	34.173	1.321	16.009	0.735
28.0	2338	33680	2.044	35.439	1.316	16.560	0.762
29.0	2575	38415	2.099	36.704	1.311	17.001	0.789
30.0	2824	43582	2.151	37.970	1.306	17.423	0.817
31.0	3076	49048	2.194	39.236	1.301	17.771	0.844
32.0	3309	54475	2.215	40.501	1.296	17.944	0.871
33.0	3557	60386	2.239	41.767	1.291	18.137	0.898
34.0	3862	67538	2.289	43.032	1.287	18.547	0.925
35.0	4227	76099	2.365	44.298	1.283	19.158	0.953
36.0	4730	87589	2.501	45.564	1.279	20.263	0.980

**- Fast Ropax - układ czteropodowy (przykład wydruków) [50]:**

**SHIP DATA:**

LENGTH LWL 227.78 M  
 DRAFT TF/TA 6.5/6.5 M  
 DISPLACEMENT 16106.00 M3  
 WETTED SURFACE 6331.00 M2  
 BILGE KEEL AREA 200.00 M2  
 PR.AREA ABOV.WL 1020.00 M2  
 FORM FACTOR 0.0  
 ROUGH.ALLOWANCE•10••3 .201  
 AIR RESIS.COEF.•10••3 .091  
 APPENDAGES NONE

**MODEL AND TEST DATA:**

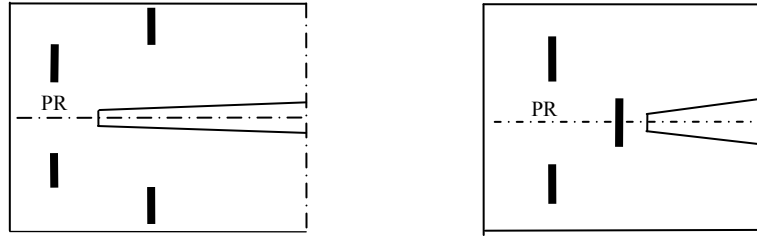
SHIP MODEL MO4265-1001  
 TEST NUMBER -----  
 SCALE FACTOR 22.71  
 WATER: SEA TANK  
 TEMPERATURE [CEL] 15.0 17.4  
 MASS DENSITY [KG/M3] 1025.9 998.6  
 VISC.KIN.•10••6 [M2/S] 1.18827 1.18219

VALUES FOR THE MODEL							
VS	VM	RTM	CTM	RNM	CFM	CR	FN
			10 <sup>3</sup>	10 <sup>6</sup>	10 <sup>3</sup>	10 <sup>3</sup>	
[knt]	[m/s]	[N]	-	-	-	-	-
20.0	2.16	97.1	3.394	20.35	2.661	0.748	0.217
25.0	2.71	143.7	3.199	25.50	2.566	0.648	0.272
30.0	3.24	206.4	3.202	30.54	2.493	0.724	0.326
35.0	3.78	306.2	3.497	35.60	2.433	1.078	0.380
38.0	4.10	393.5	3.810	38.66	2.403	1.422	0.413
45.0	4.87	605.6	4.171	45.83	2.340	1.846	0.489

VALUES FOR THE SHIP- TRIAL CONDITIONS							
VS	RTS	PE	CTS	RNS	CFS	CTV	FNV
			10 <sup>3</sup>	10 <sup>8</sup>	10 <sup>3</sup>		
[knt]	[kN]	[kW]	-	-	-	-	-
20.0	780	8030	2.266	19.85	1.408	0.023	0.655
25.0	1151	14846	2.129	24.87	1.371	0.021	0.821
30.0	1687	26065	2.176	29.78	1.343	0.022	0.983
35.0	2640	47548	2.507	34.71	1.319	0.025	1.146
38.0	3526	68959	2.838	37.70	1.307	0.028	1.245
45.0	5654	13108	3.238	44.70	1.281	0.032	1.475

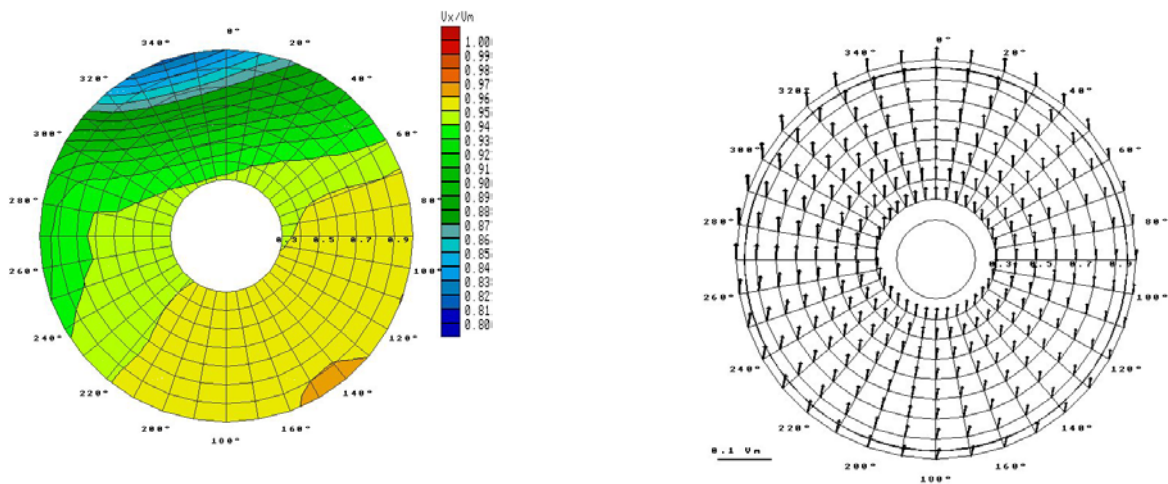
### 7.3.4 Struktura pola prędkości w płaszczyźnie kręgu śruby

- Fast Cargo Vessel [25]:

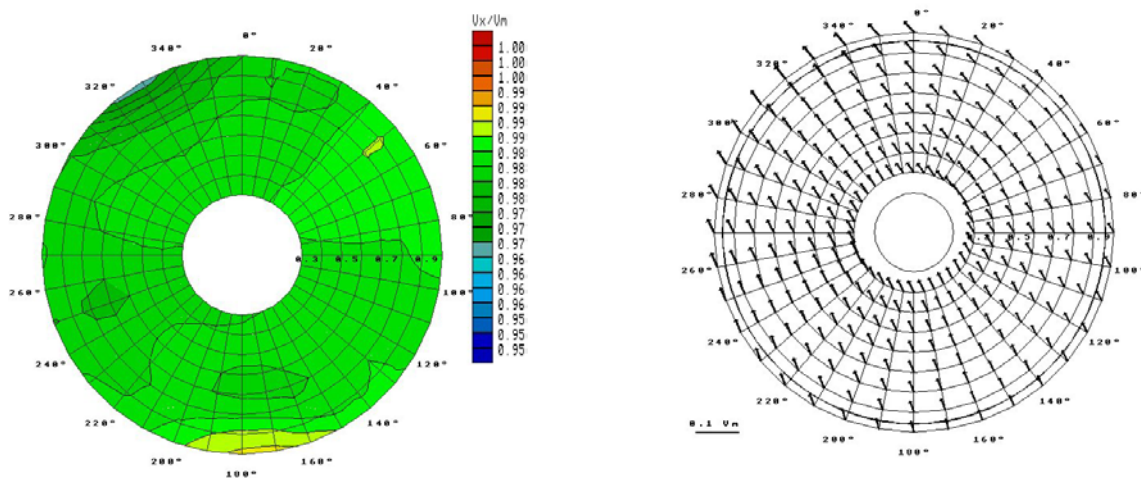


Rys.7.13. Usytuowanie płaszczyzn pomiarowych składowych pola prędkości

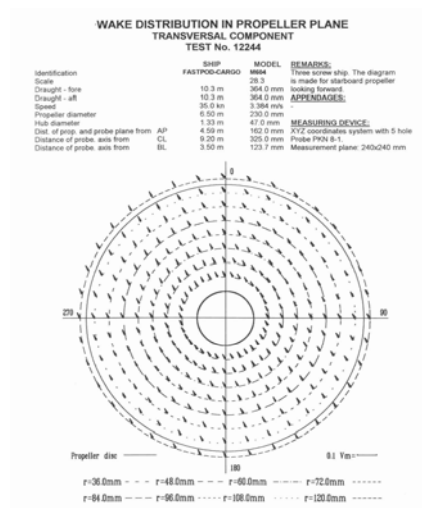
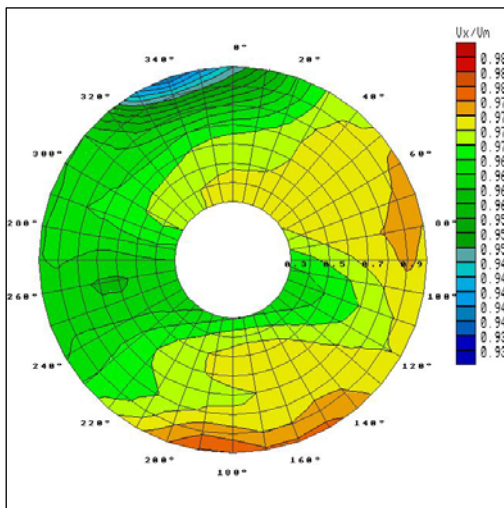
Rozkłady pola prędkości – układ czteropodowy



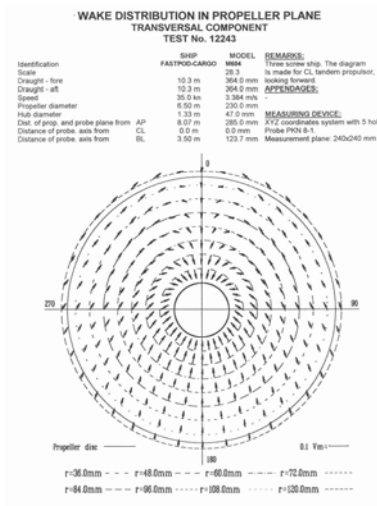
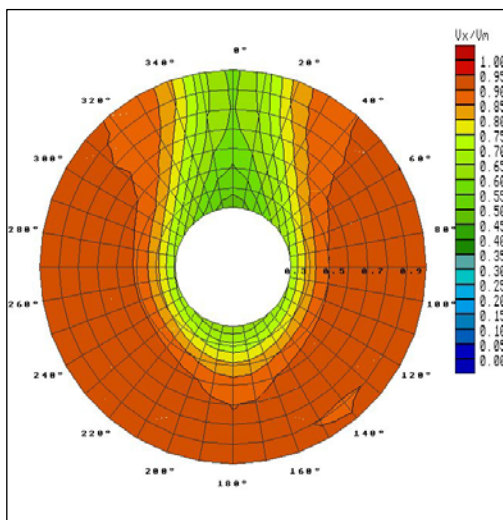
Rys.7.14. Rozkład pola prędkości w płaszczyźnie kręgu śrub podów przypawęczowych



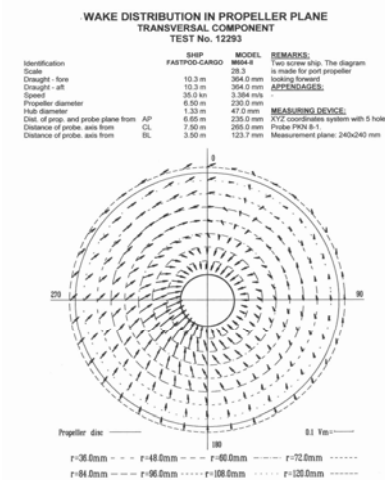
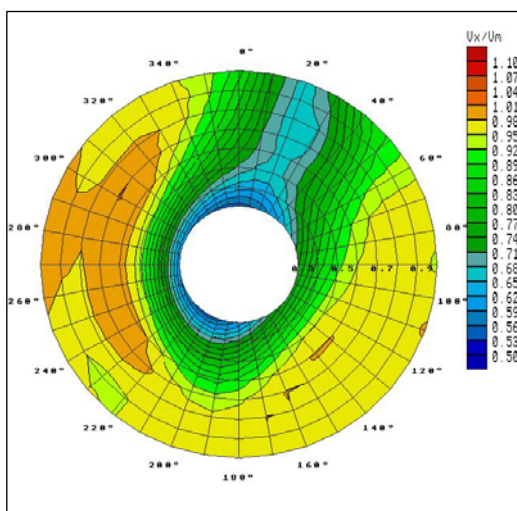
Rys.7.15. Rozkład pola prędkości w płaszczyźnie kręgu śruby podów przednich



Rys.7.16. Rozkład prędkości w płaszczyźnie kręgu śrub podowych w układzie tandem



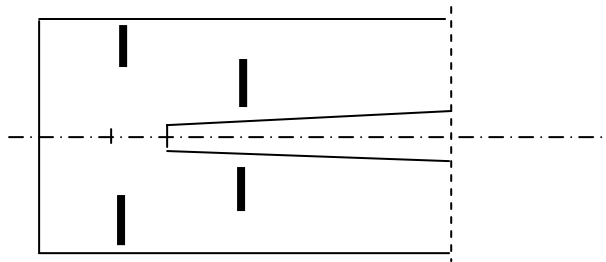
Rys.7.17. Rozkład pola prędkości za skegiem centralnym w układzie tandem



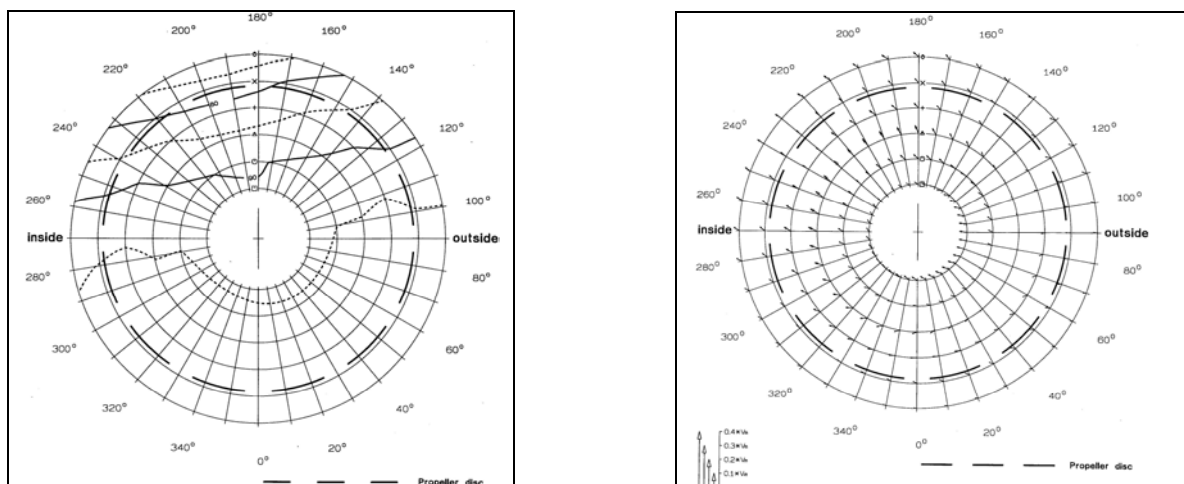
Rys.7.18. Rozkład pola prędkości za skegiem lewoburtowym w układzie CRP



**-Fast Ropax [50]:**



Rys.7.19. Usytuowanie płaszczyzn pomiarowych składowych pola prędkości



Rys.7 20. Rozkład pola prędkości w płaszczyźnie kręgu śruby podowej

### 7.3.5 Charakterystyki pędników odosobnionych

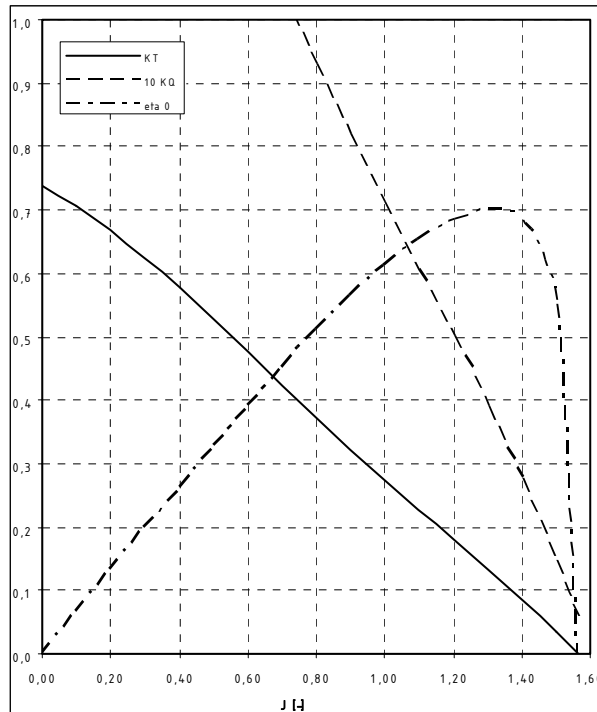
#### 7.3.5.1 Śruby podowe [25], [32]

Tabela 7.7 Dane użytych do badań śrub podowych

Model śruby	D [mm]	P/D [-]	$A_E/A_o$ [-]	d/D [-]	Z [-]
P2714/15	229.0	1.401	0.869	0.338	5
P2716/17	229.0	1.401	0.869	0.338	5
P458/59	230.0	1.421	0.755	0.231	4
CP440/41	230.0	1.423	0.688	0.283	4
P477/78	230.0	1.650	0.815	0.231	4
P479/80	239.0	1.714	0.815	0.231	4

Tabela 7.8 Charakterystyki modeli śrub  
nr P477 /78

J	$K_{T0}$	$10 K_{Q0}$	$\eta_0$
0.00	0.737	1.761	0.000
0.10	0.707	1.695	0.066
0.20	0.669	1.608	0.132
0.30	0.625	1.506	0.198
0.40	0.577	1.396	0.263
0.50	0.526	1.280	0.327
0.60	0.475	1.162	0.390
0.70	0.424	1.045	0.451
0.80	0.373	0.931	0.510
0.90	0.323	0.820	0.564
1.00	0.274	0.712	0.613
1.10	0.226	0.606	0.654
1.20	0.180	0.500	0.686
1.30	0.133	0.391	0.701
1.40	0.085	0.276	0.683
1.50	0.035	0.150	0.551
1.57	-0.003	0.051	-0.132



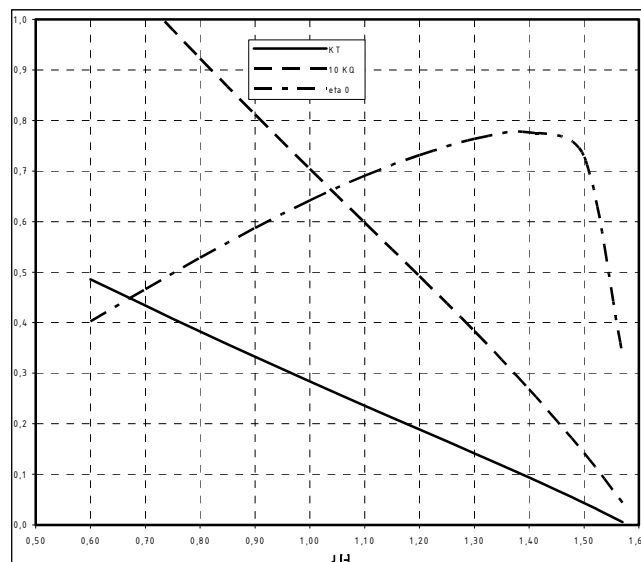
Rys.7.14. Charakterystyki śrub odosobnionych nr P477/78

Tabela 7.9 Charakterystyki śrub nr P477/78  
-skorygowane na efekt tarcia skrzydeł

J	$K_{T0}$	10 $K_{Q0}$	$\eta_0$
0.00	0.738	1.753	0.000
0.10	0.708	1.687	0.067
0.20	0.670	1.600	0.133
0.30	0.626	1.498	0.200
0.40	0.578	1.388	0.265
0.50	0.528	1.272	0.330
0.60	0.477	1.154	0.394
0.70	0.425	1.037	0.457
0.80	0.374	0.923	0.516
0.90	0.324	0.812	0.572
1.00	0.276	0.704	0.623
1.10	0.228	0.598	0.668
1.20	0.181	0.492	0.703
1.30	0.134	0.383	0.724
1.40	0.086	0.268	0.717
1.50	0.036	0.142	0.609
1.57	-0.001	0.043	-0.065

Tabela 7.10 Charakterystyki śrub nr P477/78  
w skali rzeczywistej

J	$K_{T0}$	10 $K_{Q0}$	$\eta_0$
0.60	0.486	1.154	0.402
0.70	0.434	1.037	0.466
0.80	0.383	0.923	0.528
0.90	0.333	0.812	0.587
1.00	0.284	0.704	0.641
1.10	0.236	0.598	0.690
1.20	0.189	0.492	0.732
1.30	0.141	0.383	0.764
1.40	0.093	0.268	0.777
1.50	0.043	0.142	0.728
1.57	0.006	0.043	0.335



Rys.7.15. Charakterystyki śrub nr P477/78 w skali rzeczywistej skorygowane o efekt tarcia skrzydeł i obudowy podu

### 7.3.5.2 Odosobnione pędniki podowe [48]

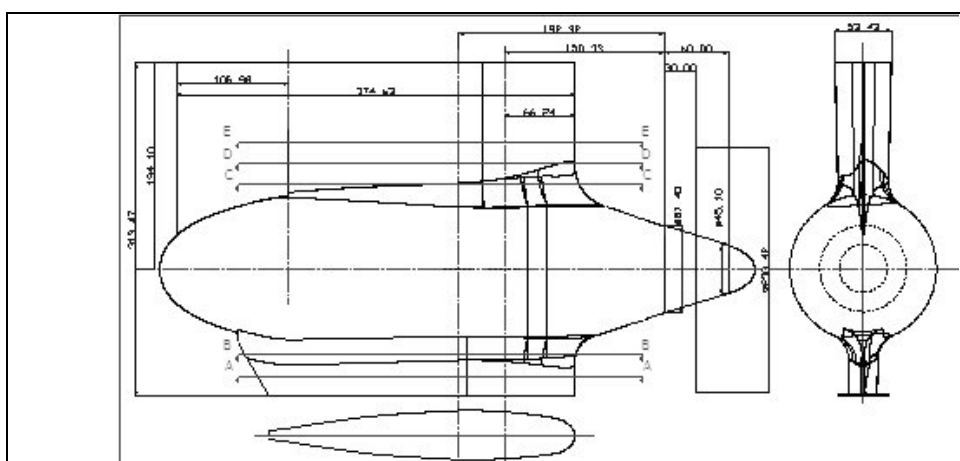
Charakterystyki podów odosobnionych zostały obliczone według poniższego schematu:

$$K_{TU} = T_U / \rho D^4 n^2 \quad (7.20)$$

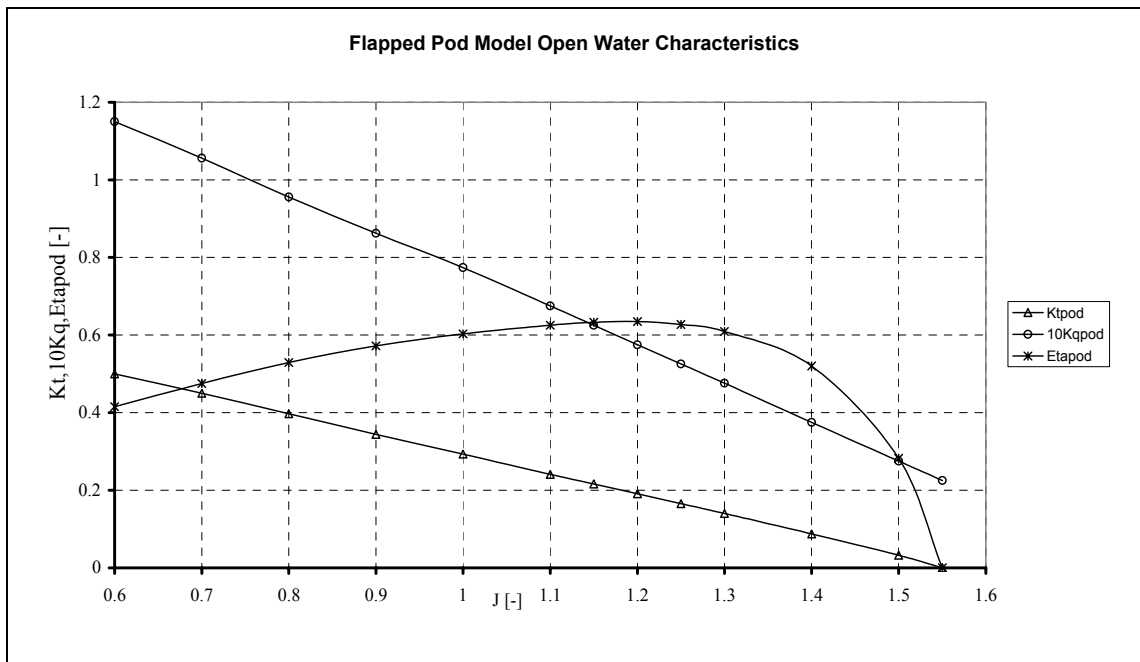
$$K_{QU} = Q_U / \rho D^5 n^2 \quad (7.21)$$

$$\eta_{0U} = J K_{TU} / (2\pi K_Q) \quad (7.22)$$

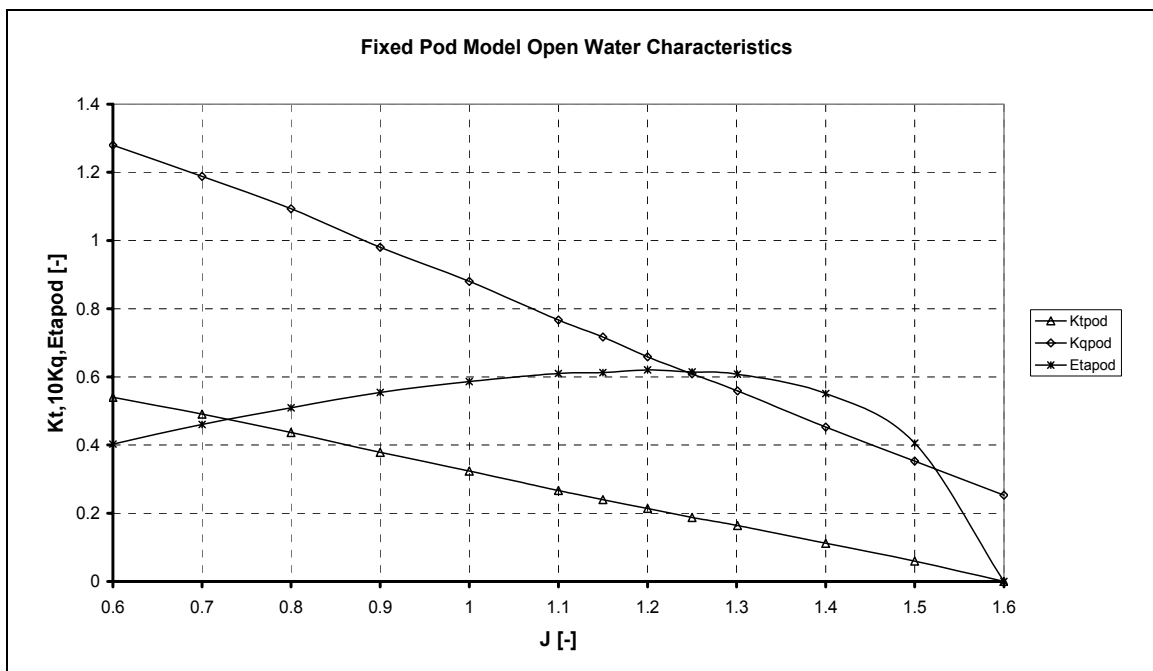
- **Fast Cargo Vessel [26]:**



Rys.7.16. Fast Cargo Vessel - geometria podu kłapkowego

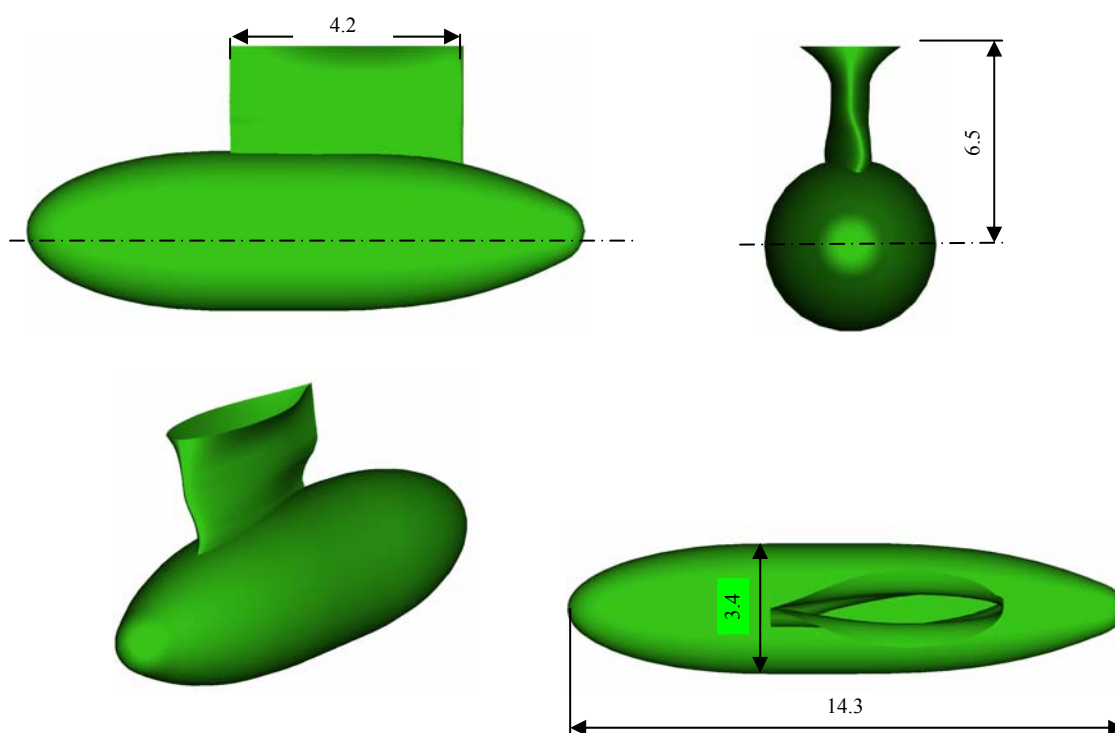


Rys.7.17. Charakterystyki podu bezklapkowego MP7 [26]



Rys.7.18. Charakterystyki podu klapkowego MP8 [26]

- Szybki Ropax [32]:



Rys.7.19. Geometria pędnika podowego typu DCN

Tabela 7.11 Pody DCN - modele śrub nr 2581/82  
- warunki basenowe

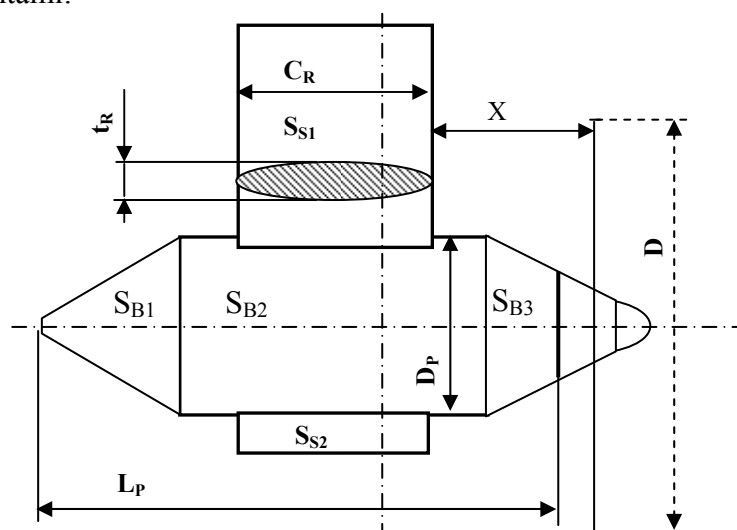
J	$K_{TU0}$	$10K_{QU0}$	$\eta_{U0}$
0.00	0.5447	0.8074	0.0000
0.10	0.4980	0.7523	0.1054
0.20	0.4465	0.6951	0.2046
0.30	0.3923	0.6379	0.2938
0.40	0.3401	0.5809	0.3729
0.50	0.2884	0.5240	0.4382
0.60	0.2383	0.4673	0.4872
0.70	0.1920	0.4096	0.5225
0.80	0.1486	0.3503	0.5404
0.90	0.1059	0.2852	0.5321
1.00	0.0592	0.2092	0.4506
1.10	0.0065	0.1430	0.0796

Tabela 7.12. Pody DCN - modele śrub nr 2581/82  
-skala rzeczywista

J	$K_{Tu0}$	$10K_{Qu0}$	$\eta_{u0}$
0.00	0.5553	0.7873	0.0000
0.10	0.5084	0.7321	0.1106
0.20	0.4564	0.6750	0.2153
0.30	0.4019	0.6178	0.3108
0.40	0.3495	0.5608	0.3970
0.50	0.2979	0.5035	0.4711
0.60	0.2481	0.4464	0.5310
0.70	0.2022	0.3879	0.5810
0.80	0.1594	0.3281	0.6189
0.90	0.1173	0.2623	0.6409
1.00	0.0714	0.1853	0.6136
1.10	0.0192	0.1183	0.2843

### 7.3.5.3 Opór obudowy podu w strumieniu jednorodnym [1],[5],[13],[47]

Analiza opływu symetrycznej obudowy podu, bez śruby w strumieniu jednorodnym, jest dużym uproszczeniem z powodu pominięcia takiego zjawiska, jakim jest obecność skręconego strumienia zaśrubowego, zależnego od obciążenia pędnika. Daje ona jednak pewien obraz o jakości kształtu pędnika podowego i jej wyniki mogą być użyte do celów porównawczych. Zakłada się przy tym, iż w oporze całkowitym podu nie ma składnika oporu falowego z powodu dość głębokiego zanurzenia takiej jednostki. Pozostałe składniki oporu można podzielić na zależne od liczby Reynoldsa – jest to opór lepkościowy bryły podu oraz na niezależne od tej liczby, jak opór ciśnienia. W celach praktycznych oddzielnie analizuje się opór poszczególnych elementów składowych konstrukcji bryły podu, biorąc pod uwagę interakcje pomiędzy tymi elementami:



$$S_{BODY} = S_{B1} + S_{B2} + S_{B3} \quad (7.23)$$

$$S_{STRUT} = S_{S1} + S_{S2} \quad (7.24)$$

$$R_{POD} = R_{BODY} + R_{STRUT} + R_{INT} + R_{LIFT} \quad \text{- całkowity opór podu} \quad (7.25)$$

$$R_{BODY} = (1 + k_{BODY}) R_{f_{BODY}} \quad \text{- opór gondoli podu} \quad (7.26)$$

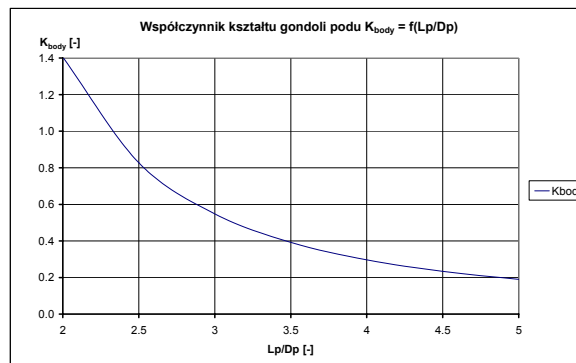
$$R_{STRUT} = (1 + k_{STRUT}) R_{f_{STRUT}} \quad \text{- opór wspornika podu (płetwy)} \quad (7.27)$$

$$R_{INT} = \frac{1}{2} \rho V^2 t^2 f\left(\frac{t_{root}}{C_{root}}\right) \quad \text{- współczynnik interakcji: gondola} \quad (7.28)$$

$$f\left(\frac{t_{root}}{C_{root}}\right) = C_{ROUND} \left( 17 \left( \frac{t_{root}}{C_{root}} \right)^2 - 0.05 \right) \quad \text{- funkcja pomocnicza} \quad (7.29)$$

$$R_{BODY} = (1 + k_{BODY}) \left( \frac{1}{2} C_F \rho V^2 S \right) \quad \text{- opór gondoli podu} \quad (7.30)$$

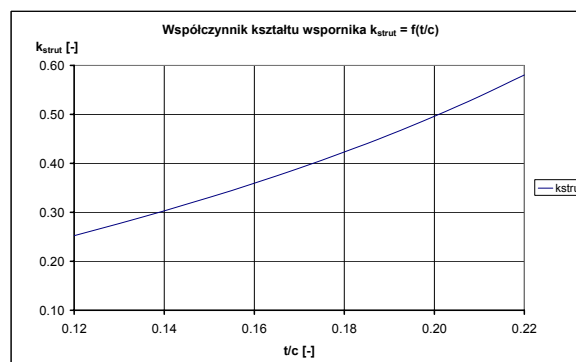
$$k_{BODY} = 1.5 \left( \frac{D}{L} \right)^{\frac{3}{2}} + 7 \left( \frac{D}{L} \right)^3 \quad \text{- współczynnik kształtu gondoli} \quad (7.31)$$



Rys.7.20. Współczynnik kształtu gondoli podu  $k_{BODY} = f(L_P/D_P)$

$$R_{STRUT} = (1 + k_{STRUT}) \left( \frac{1}{2} C_F \rho V^2 S \right) \quad \text{- opór wspornika} \quad (7.32)$$

$$k_{STRUT} = 2\delta_S + 60(\delta_S)^4 \quad \delta_S = t/c \quad \text{- współczynnik kształtu wspornika} \quad (7.33)$$



Rys.7.21. Współczynnik kształtu wspornika podowego  $k_{STRUT} = f(t/c)$



$$V_{INFLOW} = V_A (1 + C_T)^{0.5} \quad - \text{ prędkość indukowana w kręgu śruby} \quad (7.34)$$

$$C_T = \frac{T}{0.5 \rho V_A^2 A_p} \quad - \text{ współcz. obciążenia kręgu śruby naporem} \quad (7.35)$$

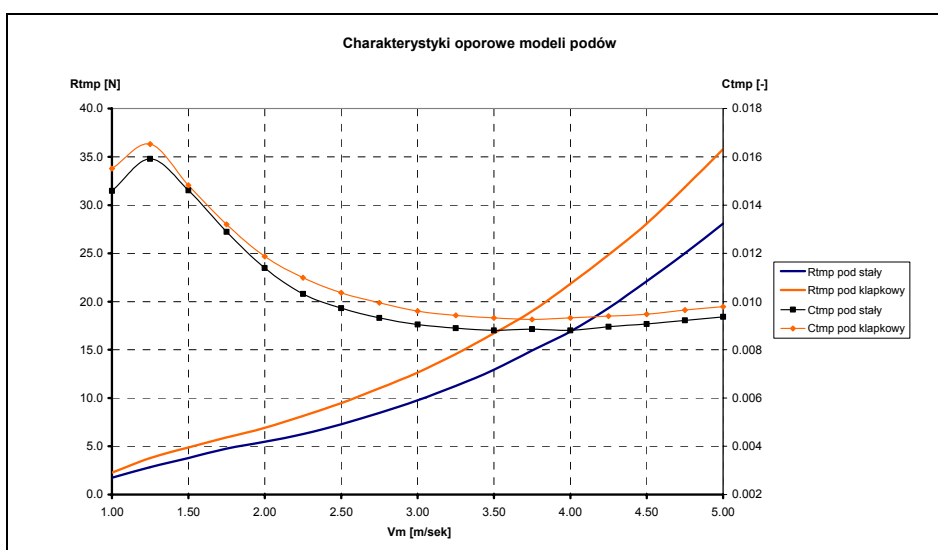
Wyniki pomiarów oporu zespołów podowych w projektach Optipod i Fastpod:

Tabela 7.13 Wymiary badanych modeli obudów podowych [26], [32]

Model podu	Lpm	Spm	Sb	Lp/D	Sst	t <sub>R</sub> /C <sub>R</sub>
	[m]	[m <sup>2</sup> ]	[m <sup>2</sup> ]	[-]	[m <sup>2</sup> ]	[-]
MM5	0.370	0.155	0.113	1.615	0.042	0.18
MM7	0.370	0.177	0.121	1.615	0.056	0.18
DCN	0.630	0.293	0.235	2.751	0.058	0.16
MP7	0.517	0.240	0.173	2.248	0.067	0.18
MP8	0.517	0.293	0.168	2.248	0.125	0.12

Tabela 7.14 Charakterystyki oporowe modeli podów Cargo Vessel [26]

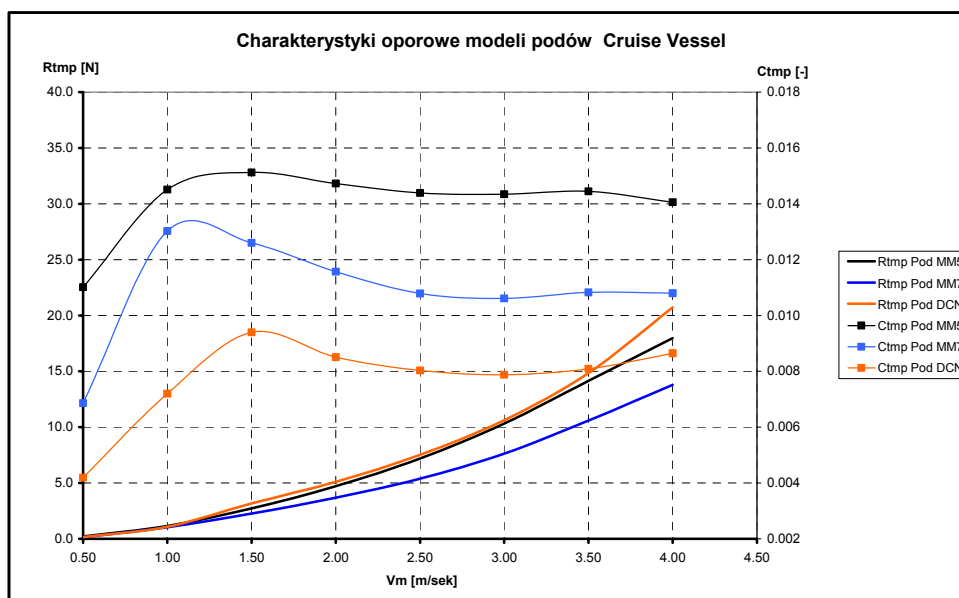
Pod bezklapkowy MP7			Pod klapkowy MP8		
Vm [m/s]	Rtm [N]	Ctmp [-]	Vm [m/s]	Rtm [N]	Ctmp [-]
1.0	1.75	0.0146	1.0	2.27	0.0155
1.5	3.78	0.0146	1.5	4.88	0.0148
2.0	5.46	0.0114	2.0	6.91	0.0119
2.5	7.29	0.0097	2.5	9.48	0.0104
3.0	9.76	0.0091	3.0	12.65	0.0096
3.5	12.94	0.0088	3.5	16.72	0.0093
4.0	16.90	0.0088	4.0	21.83	0.0093
4.5	22.12	0.0091	4.5	28.07	0.0095
5.0	28.07	0.0094	5.0	35.80	0.0098



Rys.7.22. Charakterystyki oporowe modeli podów MP7 i MP8

Tabela 7.15 Charakterystyki oporowe modeli podów – CruiseVessel [32],[50],[52]

$V_M$ [m/s]	Pod MM5		Pod MM7		Pod DCN	
	$R_{TUM}$ [N]	$C_{TUM}$ [-]	$R_{TUM}$ [N]	$C_{TUM}$ [-]	$R_{TUM}$ [N]	$C_{TUM}$ [-]
0.5	0.22	0.0110	0.14	0.0069	0.16	0.0042
1.0	1.16	0.0145	1.04	0.0130	1.08	0.0072
1.5	2.72	0.0151	2.27	0.0126	3.17	0.0094
2.0	4.71	0.0147	3.70	0.0116	5.10	0.0085
2.5	7.19	0.0144	5.38	0.0108	7.52	0.0080
3.0	10.32	0.0143	7.63	0.0106	10.62	0.0079
3.5	14.15	0.0145	10.59	0.0108	14.85	0.0081
4.0	17.98	0.0141	13.80	0.0108	20.73	0.0086



Rys.7.23. Charakterystyki oporowe modeli podów MM5, MM7 i DCN

### 6.3.6 Charakterystyki napędowe

#### - Fast Cargo Vessel (przykład wydruków) [26]

**SHIP MODEL** M604/III  
 PROPELLER MODEL P477&478&479&480  
 TEST NUMBER -----  
 SCALE FACTOR 28.30  
 WETTED SURFACE 10725.00 M2  
 BILGE KEEL AREA  
 ROJ. AREA ABOVE WL. ---- M2  
**WATER:** SEA TANK  
 TEMPERATURE [CEL] 15.0 13.6  
 MASS DENSITY [KG/M3] 1025.9 999.2  
 VISC.KIN. •10••6 [M2/S] 1.18827 1.18219

#### SHIP DATA:

LENGTH LWL 292.41 M  
 DRAUGHT TF/TA 10.30/10.30 M  
 DISPLACEMENT 48371.00 M3  
 BREADTH 30.00 M

Vs	Vm	Rtm	Fd	Tpod fl	Tpod fix	Qpod fl	Qpod fix	Npod fl	Npod fix	Fnm
[knt]	[m/s]	[N]	[N]	[N]	[N]	[Nm]	[Nm]	[RPS]	[RPS]	-
22.0	2.127	90.72	33.27	34.30	33.10	2.920	2.988	6.90	6.75	0.211
24.0	2.321	107.68	38.67	42.00	40.50	3.390	3.500	7.54	7.37	0.231
26.0	2.514	127.63	44.40	50.40	48.60	4.105	4.205	8.22	8.04	0.250
28.0	2.707	152.50	50.47	60.60	58.60	4.903	5.050	8.89	8.70	0.269
30.0	2.901	179.96	56.86	72.80	69.60	5.920	6.040	9.62	9.43	0.288
32.0	3.094	207.73	63.57	83.70	80.80	6.750	6.920	10.30	10.07	0.307
34.0	3.288	238.70	70.59	99.40	96.50	7.780	7.960	11.00	10.82	0.327
36.0	3.481	283.58	77.92	120.40	117.60	9.360	9.560	11.83	11.57	0.346
Vs	Thd	Jpod fl	Ktpod fl	Kqpod fl	Jpod fix	Ktpod fix	Kqpod fix	Wtpod fl	Wtpod fix	Etad
[knt]	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
22.0	0.030	1.340	0.129	0.048	1.370	0.130	0.051	0.015	0.007	0.482
24.0	0.031	1.338	0.132	0.046	1.369	0.133	0.050	0.014	0.009	0.482
26.0	0.030	1.330	0.133	0.047	1.360	0.134	0.051	0.011	0.005	0.484
28.0	0.023	1.324	0.137	0.048	1.353	0.138	0.052	0.011	0.009	0.490
30.0	0.021	1.311	0.141	0.050	1.338	0.140	0.053	0.007	0.003	0.499
32.0	0.020	1.306	0.141	0.049	1.336	0.142	0.053	0.008	0.007	0.507
34.0	0.021	1.300	0.147	0.050	1.321	0.147	0.053	0.009	0.002	0.512
36.0	0.023	1.280	0.154	0.052	1.308	0.157	0.056	0.003	0.003	0.515

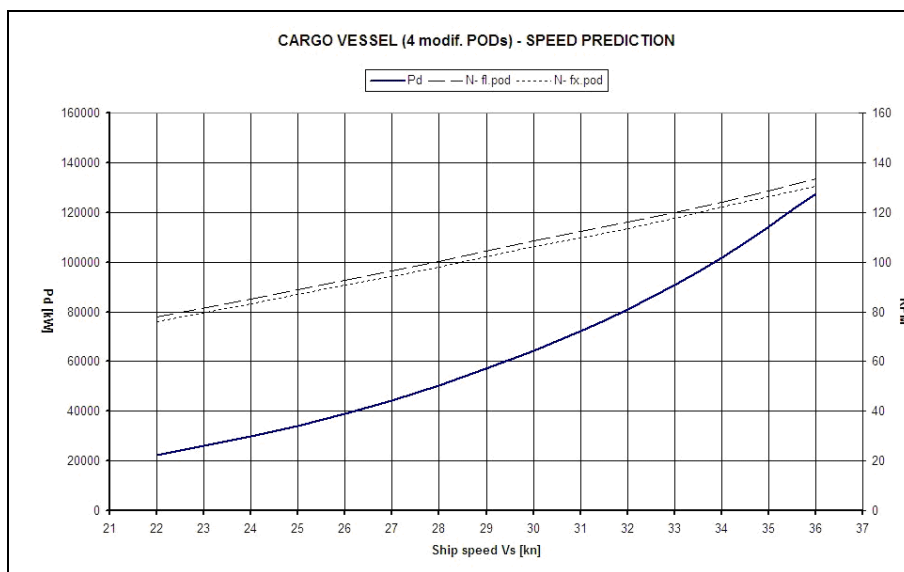
**SHIP MODEL** M604/III  
 PROPELLER MODEL P477&478&479&480  
 TEST NUMBER -----  
 SCALE FACTOR 28.30  
 WETTED SURFACE 10725.00 M2  
 BILGE KEEL AREA  
 PROJ. AREA ABOVE WL. ----- M2

**SHIP DATA:**

LENGTH LWL 292.41 M  
 DRAUGHT TF/TA 10.30/10.30 M  
 DISPLACEMENT 48371.00 M3  
 BREADTH 30.00 M

**WATER:** SEA TANK  
 TEMPERATURE [CEL] 15.0 13.6  
 MASS DENSITY [KG/M3] 1025.9 999.2  
 VISC.KIN. •10••6 [M2/S] 1.18827 1.18219

SHIP RESULTS AND PREDICTIONS										
Vs	Rts	Pe	Npd fl	Npd fix	Tpd fl	Tpd fix	Qpd fl	Qpd fix	Etad	Pd tot
[knt]	[kN]	[kW]	[RPM]	[RPM]	[kN]	[kN]	[kNm]	[kNm]	-	[kW]
22.0	1242	14050	77.82	76.13	798.2	770.3	1373.5	1405.5	0.627	22409
24.0	1523	18808	85.04	83.12	977.4	942.5	1675.5	1729.8	0.627	29992
26.0	1834	24529	92.71	90.68	1172.8	1131.0	2004.0	2052.8	0.629	38968
28.0	2220	31964	100.27	98.12	1410.2	1363.7	2378.4	2449.7	0.637	50169
30.0	2707	41768	108.50	106.36	1694.1	1619.6	2834.7	2892.2	0.648	64452
32.0	3237	53279	116.17	113.58	1947.8	1880.3	3317.7	3401.2	0.659	80852
34.0	3869	67673	124.07	122.04	2313.1	2245.6	3900.1	3990.3	0.665	101712
36.0	4604	85265	133.37	130.49	2801.8	2736.6	4556.7	4654.1	0.670	127301



Rys.7.24. Fast Cargo Vessel (4 pody) – prognoza prędkości

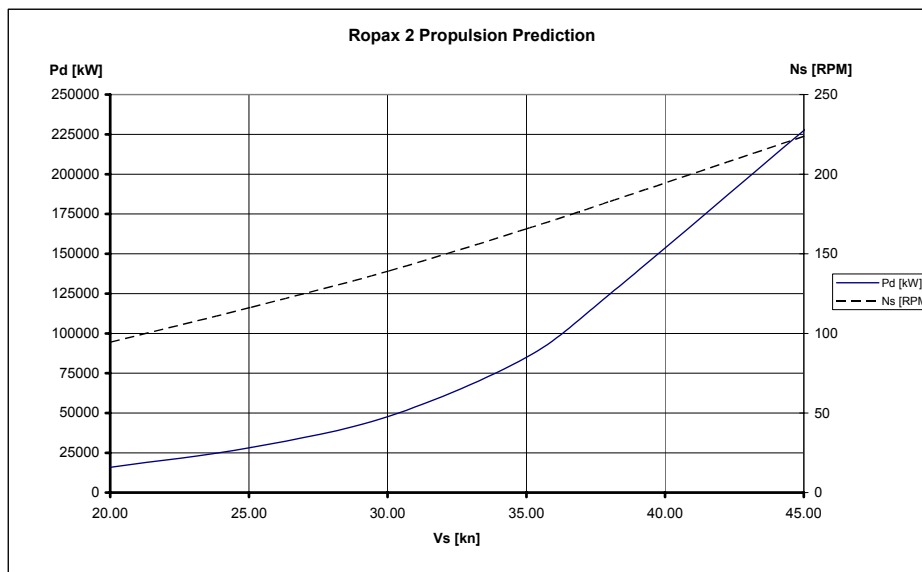
**- Fast Ropax (przykład wydruków) [52]:**

<b>SHIP MODEL</b>	<b>MO4265-1001</b>	LENGTH LWL	227.78 M
PROPELLER MODELS:2714/2715/2716/2717		DRAUGHT TF/TA	6.5/6.5 M
TEST NUMBER	-----	DISPLACEMENT	16106.00 M
SCALE FACTOR	22.71		
BREADTH	29.30 M		
WETTED SURFACE	6331.00 M <sup>2</sup>		
BILGE KEEL AREA	0.00 M <sup>2</sup>		
PROJ.AREA ABOVE WL. 1020.00 M <sup>2</sup>			
WATER:		SEA	TANK
TEMPERATURE [CEL]		15.0	15.7
MASS DENSITY [KG/M3]	1025.9	998.9	
VISC.KIN. •10••6 [M2/S]	1.18827	1.1183	

<b>MODEL TEST RESULTS</b>										
<b>Vs</b>	<b>Vm</b>	<b>Rtm</b>	<b>Fd</b>	<b>Tw</b>	<b>Tc</b>	<b>Qw</b>	<b>Qc</b>	<b>Nw</b>	<b>Nc</b>	<b>Fn</b>
[knt]	[m/s]	[N]	[N]	[N]	[N]	[Nm]	[Nm]	[RPS]	[RPS]	-
20.00	2.160	97.1	32.7	17.2	17.4	1.585	1.753	7.65	7.52	0.2172
25.00	2.707	143.7	48.7	22.8	26.9	2.249	2.631	9.35	9.35	0.2722
30.00	3.242	206.4	67.0	41.2	29.5	3.699	3.222	11.51	10.86	0.326
35.00	3.779	306.2	87.9	59.3	51.9	5.231	5.037	13.54	13.12	0.38
38.00	4.104	393.5	101.8	61.7	86.8	5.792	7.634	14.58	15.16	0.4127
45.00	4.866	605.7	137.7	105.8	122.2	9.419	10.897	17.94	18.17	0.4893
<b>Vs</b>	<b>thd</b>	<b>Jw</b>	<b>Ktw</b>	<b>Kqw</b>	<b>Jc</b>	<b>Kt c</b>	<b>Kq c</b>	<b>Ww</b>	<b>Wc</b>	<b>Etad</b>
[knt]	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
20.00	0.0686	1.2335	0.1070	0.0431	1.2542	0.1120	0.0493	-0.002	0.029	0.440
25.00	0.0427	1.2643	0.0948	0.0409	1.2646	0.1120	0.0479	0.005	0.033	0.452
30.00	0.0145	1.2303	0.1133	0.0444	1.3033	0.0911	0.0434	0.009	0.029	0.466
35.00	0.0185	1.2188	0.1178	0.0454	1.2575	0.1098	0.0465	0.007	0.024	0.482
38.00	0.0181	1.2291	0.1057	0.0433	1.1825	0.1377	0.0529	-0.005	0.011	0.478
45.00	0.0262	1.1843	0.1198	0.0466	1.1694	0.1348	0.0525	-0.018	-0.006	0.496

<b>SHIP MODEL</b>	<b>MO4265-1001</b>	LENGTH LWL	227.78 M
PROPELLER MODELS:2714/2715/2716/2717		DRAUGHT TF/TA	6.5/6.5 M
TEST NUMBER	-----	DISPLACEMENT	16106.00 M
SCALE FACTOR	2.71		
BREADTH	29.30 M		
WETTED SURFACE	6331.00 M <sup>2</sup>		
BILGE KEEL AREA	200.00 M <sup>2</sup>		
PROJ.AREA ABOVE WL. 1020.00 M <sup>2</sup>			
WATER:		SEA	TANK
TEMPERATURE [CEL]		15.0	15.7
MASS DENSITY [KG/M3]	1025.9	998.9	
VISC.KIN.·10 <sup>••6</sup> [M2/S]	1.18827	1.1183	

SHIP RESULTS AND PREDICTIONS										
Vs	Rts	Pe	N w	N c	T w	T c	Qw	Qc	Etad	Pd tot
[knt]	[kN]	[kW]	[RPM]	[RPM]	[kN]	[kN]	[kNm]	[kNm]	-	[kW]
20.0	852	8768	95.3	93.7	451	457	763	842	0.552	15874
25.0	1256	16206	116.3	116.5	598	706	1063	1263	0.572	28335
30.0	1832	28299	143.4	134.9	1076	771	1790	1491	0.591	47914
35.0	2830	50972	168.5	163.0	1529	1339	2522	2380	0.599	85069
38.0	3747	73274	181.0	188.6	1577	2221	2729	3708	0.587	124884
45.0	5954	138058	222.7	225.7	2682	3097	4491	5239	0.604	228455



Rys.7.25. Fast Ropax – prognoza prędkości

## 8. KRYTYCZNA ANALIZA ZASOBÓW I DOBÓR NARZĘDZI NUMERYCZNYCH

### 8.1 Identyfikacja głównych grup merytorycznych baz danych

#### 8.1.1 Wprowadzenie

Do celów projektu postanowiono wykorzystać wyniki dwóch projektów 5. Programu Ramowego Unii Europejskiej. Były to projekty Optipod oraz Fastpod, z których pierwszy pn. „*Optymalne Projektowanie i Implementacja Azymutalnych Pędników Podowych dla Bezpiecznego i Efektywnego Napędu Statków*” stawiał sobie za cel szerokie rozpoznanie osiągow czterech typów statków mogących być wyposażonymi w pędniki podowe. Były to: prom pasażersko - towarowy typu Ropax, Wycieczkowiec (Cruise Vessel), typowy statek towarowy średniej wielkości oraz mała jednostka pomocnicza posiadająca klasę lodową.

Drugi z projektów – Fastpod pn. „*Zastosowanie Napędu Podowego na Szybkich Statkach*” - był ukierunkowany na badania dwóch jednostek z napędem podowym typu szybki Ropax (Fast Ropax) ( $V_s = 40$  węzłów) oraz szybki Kontenerowiec typu Panamax ( $V_s = 35$  węzłów). Niezależnie od wyników w/w projektów unijnych realizowanych w CTO, dokonano przeglądu literatury fachowej pod kątem pozyskania dodatkowych wyników badań, pasujących do celów niniejszego projektu. W całokształcie analizowanych jednostek skoncentrowano się na:

- Geometrii kształtu kadłuba;
- Charakterystykach oporowych;
- Charakterystykach napędowych;
- Hydrodynamice podów i śrub podowych odosobnionych;
- Wynikach pomiarów pola prędkości;
- Właściwościach morskich i manewrowych.

Pozyskiwane dane były wstępnie przetwarzane pod kątem formatu planowanych baz danych, jak i kompatybilności z używanymi narzędziami do przybliżonego prognozowania osiągow statku. Zgromadzone i przetworzone wyniki zostały w jednolity sposób zapisane w tabelach systemu MS Excel co pozwoliło na wyznaczenie współczynników bezwymiarowych korepondujących z formatem budowanej bazy danych opartej na MS Access. Oprócz w/w wyników eksperymentalnych, budowana baza wyników została uzupełniona przetworzonymi, adekwatnymi wynikami wziętymi z literatury fachowej.

#### 8.1.2 Baza wymiarów głównych przebadanych kadłubów statków podowych

Do głównych zalet pędników podowych należy możliwość połączenia w jednym zespole funkcji pędnika generującego napór w dowolnym kierunku, w przedziale  $0^\circ - 360^\circ$  oraz funkcję urządzenia sterowego posiadającego szerokie możliwości generowania siły poprzecznej w części rufowej kadłuba statku. Pociąga to za sobą takie ukształtowania rufy, które umożliwi efektywną pracę zespołu podowego w zakresie wszystkich położen kątowych. Efektem spełniania tych wymogów jest prawie płaska dolna część kosza rufowego, płynnie przechodząca w śródkręcie, tak jednak zaprojektowana by zminimalizować ryzyko slemingu rufowego.

Istotnym elementem rejonu rufy jest centralny sleg poprawiający stateczność kursową – nie jest to jednak element związany tylko z kadłubami statków podowych. Baza danych kadłubów statków podowych tworzy znakomity układ odniesienia przy projektowaniu nowych jednostek.

### *8.1.3 Baza charakterystyk przebadanych odosobnionych śrub podowych*

Wysoka sprawność napędowa jednostek podowych wynika głównie ze stosunkowo jednorodnego, niezakłóconego napływu wody do kręgu śruby podowej. Wysoka prędkość postępową śruby skutkuje relatywnie wysokim współczynnikiem skoku śruby optymalnej. Z drugiej zaś strony bryła jednostki podowej, o zminimalizowanym efekcie szczeliny, musi spełniać wymogi ciała dobrze opływanego o niskim oporze lepkościowym. Spełnienie tych wymagań prowadzi do stożkowego kształtu piasty śrubowej o wysokim współczynniku  $d_H/D$ . Jednakże śruby podowe o takich kształtach posiadają specyficzne charakterystyki hydrodynamiczne w warunkach „open water”, co pociąga za sobą wykonanie stosunkowo trudnych badań modelowych. Baza danych zawierająca charakterystyki hydrodynamiczne dedykowanych śrub podowych może być istotnym ułatwieniem przy projektowaniu jednostek podowych i ocenie ich osiągnięć operacyjnych.

### *8.1.4 Baza charakterystyk przebadanych zespołów podowych*

Baza danych, zawierająca charakterystyki hydrodynamiczne odosobnionych zespołów podowych jest „esencją wiedzy” o takich zespołach i to z wielu powodów. Jednym z nich jest ograniczona informacja o osiągnięciach statków podowych, nie mówiąc o szczegółowych aspektach pracy ich zespołów i podzespołów. Ponadto szczegółowa wiedza jest dość kosztowna z powodu trudności w jej pozyskaniu. Właściwa obróbka zasobów takich baz może radykalnie przyspieszyć projektowanie wysokosprawnych zespołów podowych na zadane warunki techniczno eksploatacyjne.

### *8.1.5 Baza charakterystyk współpracy śruby napędowej z płetwą sterową*

Dobrze zaprojektowany zespół śruba napędowa – płetwa sterowa jest gwarantem uzyskania wysokiej sprawności napędowej prawie każdego statku oraz dobrych własności manewrowych. Ponadto parametrycznie ujęta wiedza o hydrodynamicznych interakcjach tych elementów może być wykorzystana do zamodelowania pracy wspornika podowego o kształcie zbliżonym do płetwy, w strumieniu zaśrubowym śruby podowej. Zasadniczym efektem takiego podejścia może być precyzyjne ujęcie charakterystyk oporowych tego elementu zespołu podowego w dowolnych wzajemnych konfiguracjach względem śruby oraz określenie zmian sprawności napędowej w takich konfiguracjach.

## **8.2 Ocena kompletności wyników badań jednostek podowych**

Podaż kompletnych badań wyników badań jednostek podowych jest bardzo ograniczona i to praktycznie we wszystkich aspektach. Wynika to przede wszystkim z szeroko rozumianych, wysokich kosztów pozyskania takiej wiedzy. Dlatego też głównym źródłem takiej wiedzy są projekty badawcze finansowane ze środków publicznych, zarówno krajowych, jak i europejskich. Pomimo wielorakich korzyści, napęd podowy nie uzyskał jeszcze takiego wsparcia badawczego, które byłoby adekwatne dla jego walorów ekonomicznych i ochrony środowiska. Dlatego też, tworzone dzisiaj bazy danych, zawierające wiedzę o takich jednostkach, są bardzo ograniczone, nie mówiąc o braku jakiegokolwiek uporządkowania ich zasobów.

## **8.3 Przegląd narzędzi numerycznych do analiz zasobów baz danych [9],[38],[44]**

Zasoby budowanych i uzupełnianych w ramach rozprawy baz danych będą głównym źródłem informacji o szeroko rozumianej specyfice okrętowego napędu podowego. Posłużą one do realizacji głównych celów projektu w oparciu o indywidualnie opracowane modele matematyczne.



Wymagają one do tego celu odpowiedniej obróbki numerycznej w celu dokonania niezbędnych uogólnień i określenia funkcji celu adekwatnych do zgromadzonych zasobów. Jest to dość trudne przedsięwzięcie, ponieważ zgromadzone dane nie mają charakteru wyników badań systematycznych. Badania przeprowadzone w ramach wspomnianych projektów unijnych, miały na celu rozpoznanie określonych zagadnień w ujęciu standardowym. Nie było ani możliwości czasowych, ani finansowych, które umożliwiłyby rozszerzenie zakresu prowadzonych badań. Dlatego też bardzo ważnym staje się dobór właściwych narzędzi komercyjnych do obróbki i analizy zgromadzonych zasobów. Pod uwagę brane są dostępne narzędzia do analiz statystycznych, algorytmy genetyczne (GA) oraz sztuczne sieci neuronowe (ANN). Kryterium doboru jest ich przydatność do celów pracy oraz dostępność na rynku w ramach posiadanych środków. Niezależnie od doboru narzędzi, należy tak dobierać elementy modelu matematycznego, by opisywały główne grupy zdefiniowanych interakcji hydrodynamicznych.

Dobór narzędzi w relacji do dostępnych źródeł danych pozwoli na szczegółowe określenie funkcji celu. Istotnym zagadnieniem jest globalna integracja zasobów baz danych z dobieranymi narzędziami z dziedziny systemów eksperckich. Wymaga to opisu parametrycznego interakcji pomiędzy głównymi elementami napędu podowego. Od początku pracy zarysowały się następujące grupy interakcji:

- Współdziałanie: kadłub statku podowego – bryła optymalnej jednostki podowej;
- Elementy współdziałania: piasta śruby podowej – bryła podu;
- Wpływ elementów geometrii pędnika podowego na charakterystyki pędnika swobodnego „open water (OW)”;
- Współpraca śruby z elementem płata (płetwą sterową).

## 9. IDENTYFIKACJA INTERAKCJI HYDRODYNAMICZNYCH

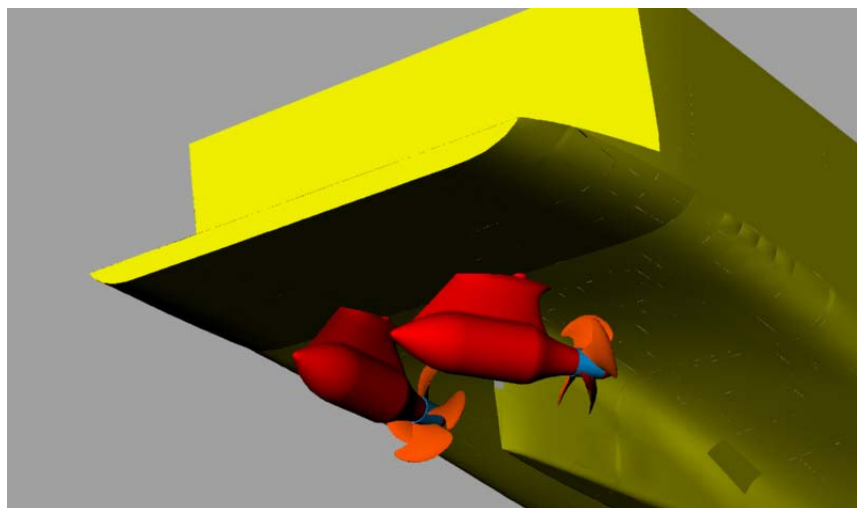
### 9.1 Współpraca: kadłub statku – zespół jednostki podowej [10],[11],[23],[47],[54]

#### 9.1.1 Wzajemne usytuowanie wzdłużne [27], [28]

W dwupodowych i bardziej rozbudowanych układach napędowych statków typu Ropax, ze względu na wielkości stosowanych silników elektrycznych, pędniki te wprowadzają pod kosa rufowy dość dużą wyporność, rzędu  $2 \times 100 \text{ m}^3$ , przy długościach jednostek podowych niewiele krótszych niż połowa szerokości statku. Wpływa to dość istotnie na specyfikę opływu tego rejonu zmieniając pole ciśnień w tym rejonie oraz długość falotwórczą kadłuba, a w efekcie i sposób współdziałania z dziobowym układem falowym. Ponieważ długości generowanych fal mogą być krótsze niż gondola podu, jest możliwym znalezienie takiego wzdłużnego usytuowania podów, przy którym występuje minimalizacja oporu falowego przy prędkości eksploatacyjnej statku. Skutkuje to wyraźnym zmniejszeniem oporu kadłuba przy takiej konfiguracji.

W powyższych uwarunkowaniach, bardzo ważnym krokiem jest właściwe zaprojektowanie wyjściowego kształtu kadłuba, tak, by spełniał główne wymagania stawiane napędowi podowego. Do najważniejszych z nich należą:

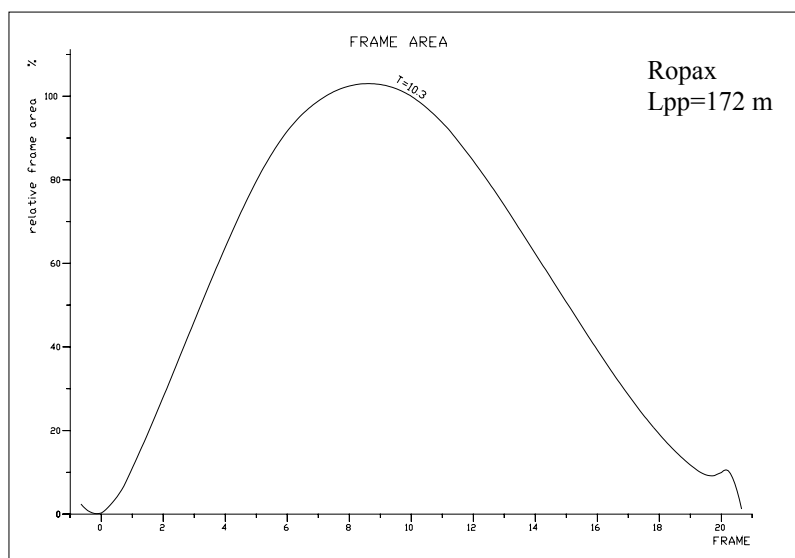
- lokalizacja w ramach gabarytu:  $L_C$ ,  $B$ ,  $T$ ;
- wykluczenie kolizji między podami w trakcie pracy w zakresie  $0^0 - 360^0$ ;
- minimalizacja szczeliny między wspornikiem podu i kadłubem w powyższym zakresie;
- uzyskanie w miarę jednorodne pole prędkości w rejonie sytuowania podów, jak najmniej zakłócone obecnością kadłuba;
- wprowadzenie rozwiązań poprawiających stateczność kursową statku.



Rys. 9.1 Przykład typowego układu: kadłub – 2 pody

Powyższe wymagania mogą być spełnione w oparciu o przeprowadzone dedykowane badania modelowe lub poprzez analizy numeryczne CFD, pozwalające na analizę opływu dowolnej kombinacji: kadłub – pędniki podowe. Podejście analityczne pozwala określić osiągi napędowe z mniejszą dokładnością niż eksperyment, lecz w sposób zadowalający podaje relacje pomiędzy analizowanymi wariantami projektowymi. Szczególnie w przypadku porównawczych analiz oporowych.

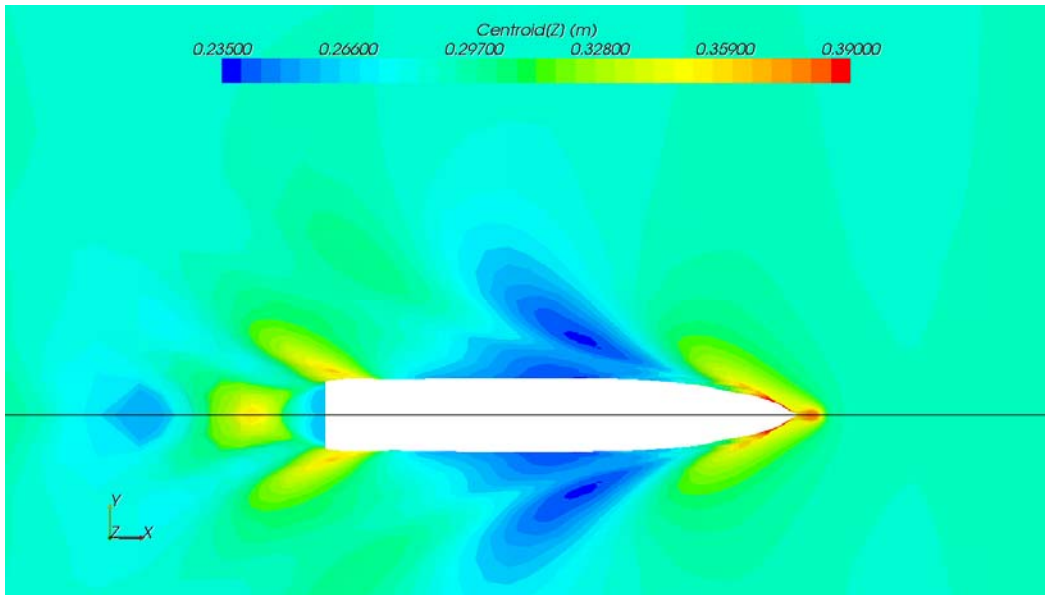
I. Kadłub bez pędników podowych:



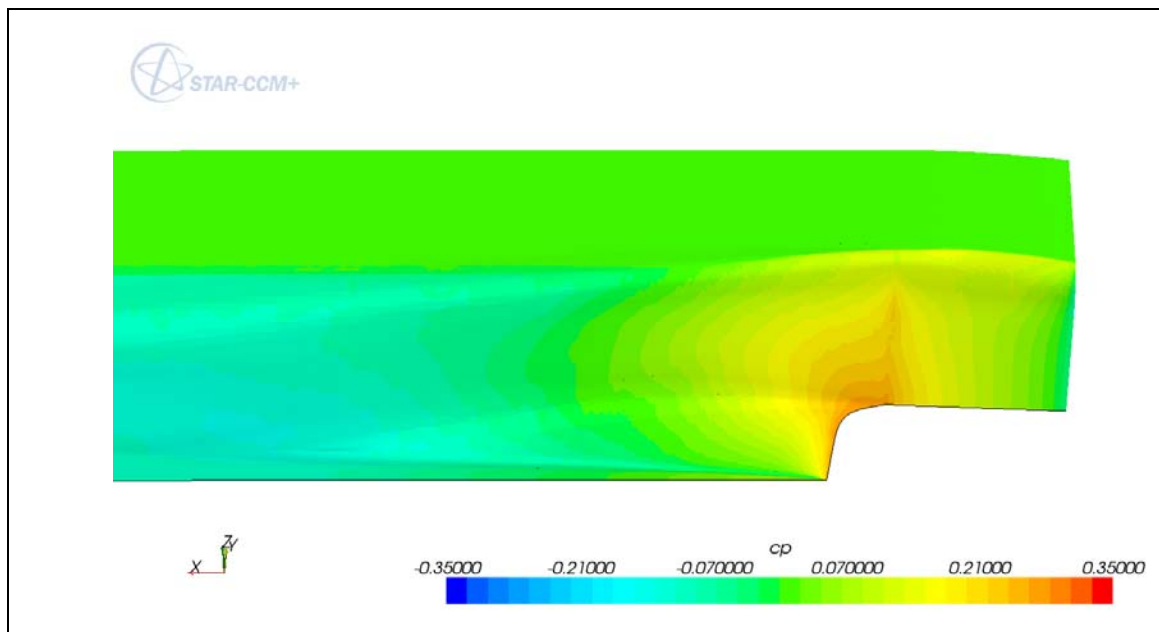
Rys.9.2. Krzywa pól wręgowych- Ropax

$L_{pp}=172.2$  m,  $B=28.4$  m,  $T=6.60$  m,  $LCB= 80.1$  m

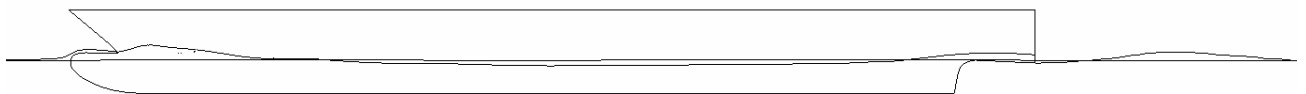
$V_s = 28.0$  knt



Rys.9.3. Układ falowy [28]

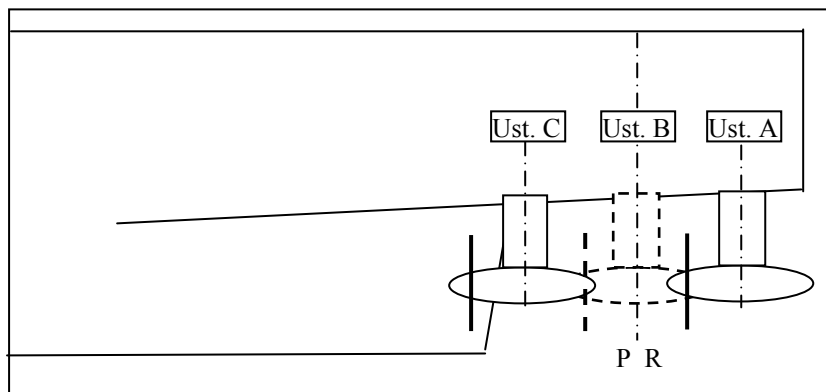


Rys.9.4. Rozkład ciśnień na kadłubie [28]



Rys.9.5. Profil fali wzdłuż kadłuba [28]

## II. Analizowane wzdłużne usytuowania pędników podowych:



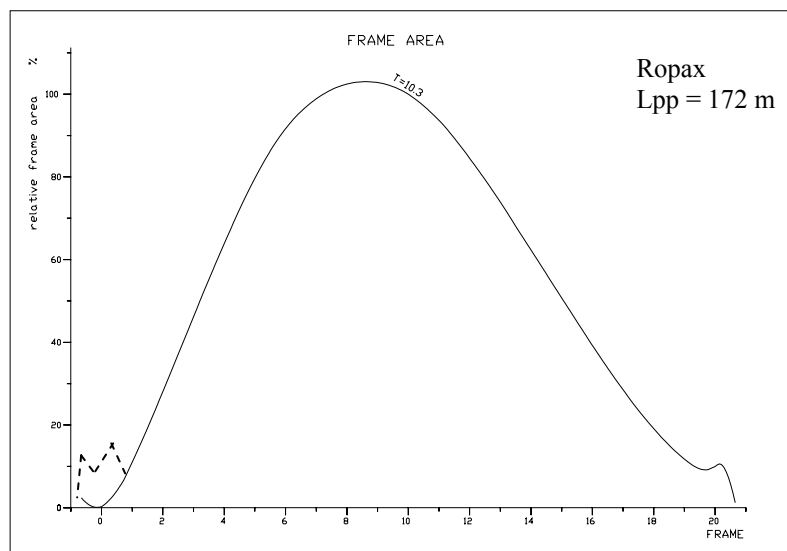
Rys.9.6. Schemat usytuowania pędników podowych

### Położenie pędników:

- Wariant A:  $x = -4.5$  m;  $y = \pm 7.1$  m
- Wariant B:  $x = 0.0$  m;  $y = \pm 7.1$  m
- Wariant C:  $x = +5.5$  m;  $y = \pm 7.1$  m

### III. Położenie pędników podowych – wariant A: $x = -4.5$ m $y = \pm 7.1$ m

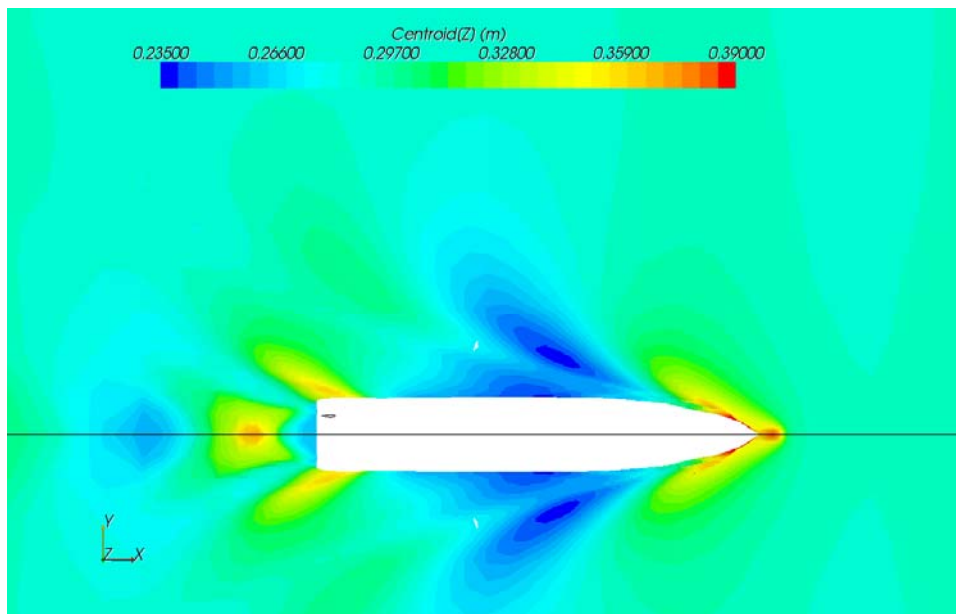
#### - Krzywa pól wręgowych:



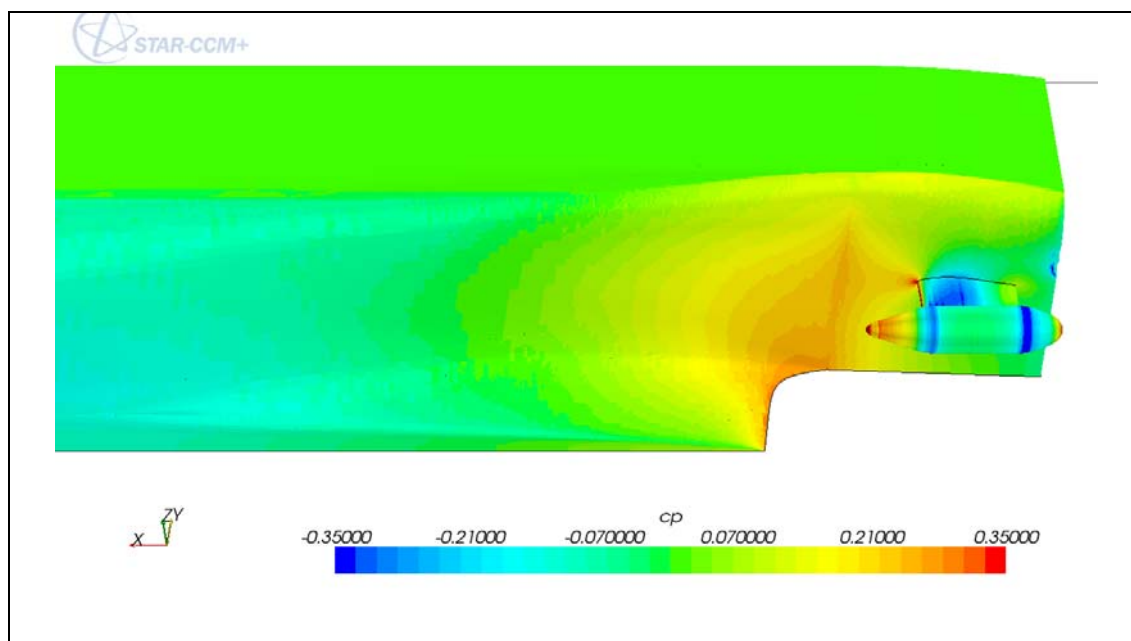
Rys.9.7. Krzywa pól wręgowych - wariant A

$L_{pp} = 172.2$  m  $B = 28.4$  m  $T = 6.60$  m  $LCB = -2.2\%$

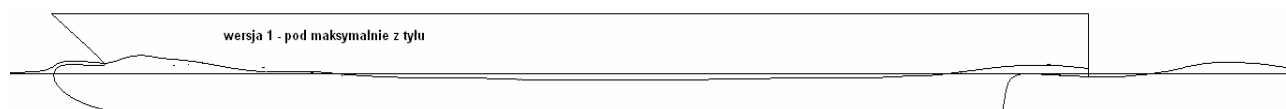
$V_s = 28.0$  knt



Rys.9.8. Układ falowy - wariant A [28]

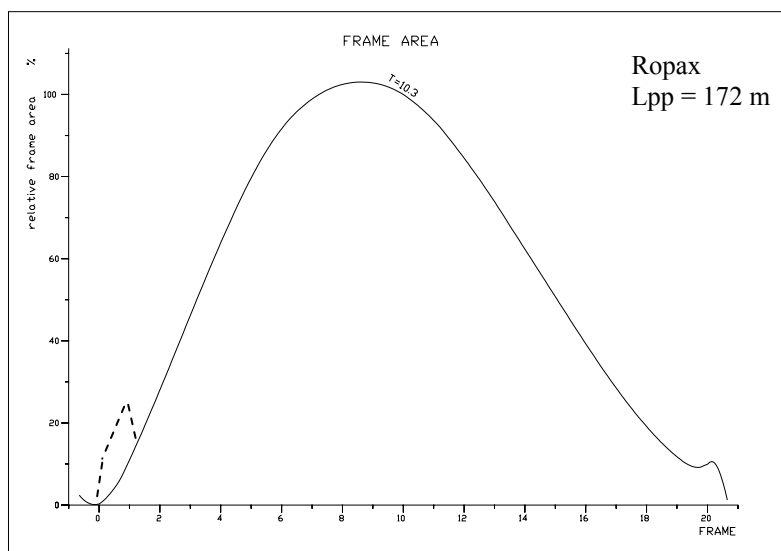


Rys.9.9. Rozkład ciśnień na kadłubie - wariant A [28]



Rys.9.10. Profil układu falowego wzdłuż kadłuba – wariant A [28]

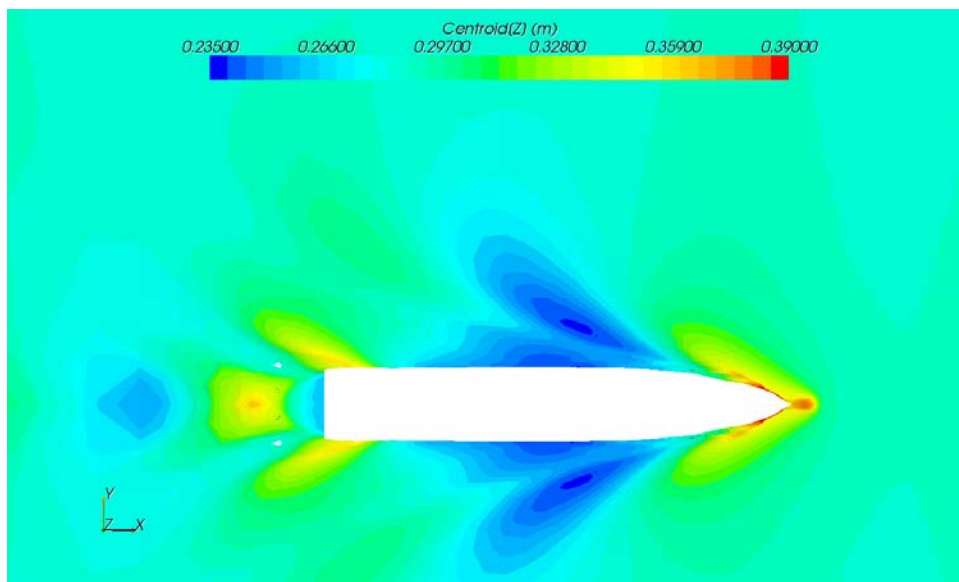
IV. Położenie pędników podowych – wariant B :  $x = 0.0$  m  
 $y = \pm 7.1$  m



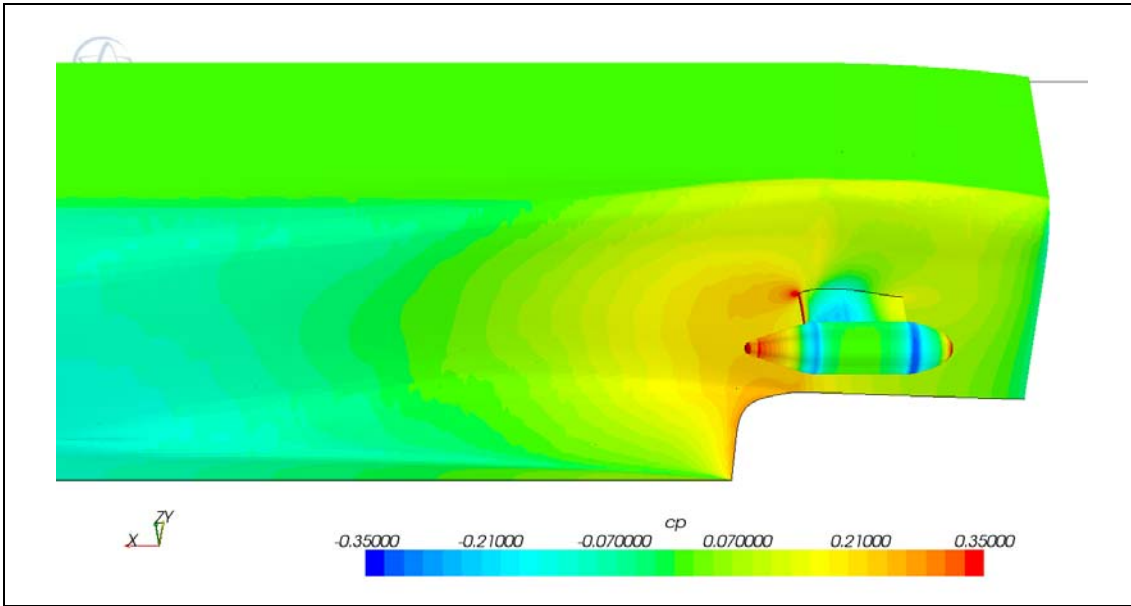
Rys.9.11. Krzywa pól węgowych – wariant B

$L_{pp} = 172.2$  m  $B = 28.4$  m  $T = 6.60$  m  $LCB = -2.2\%$

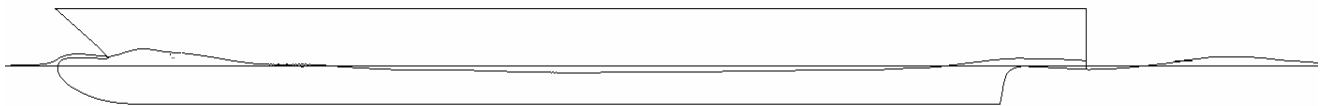
$V_s = 28.0$  knt



Rys.9.12. Układ falowy – wariant B [28]

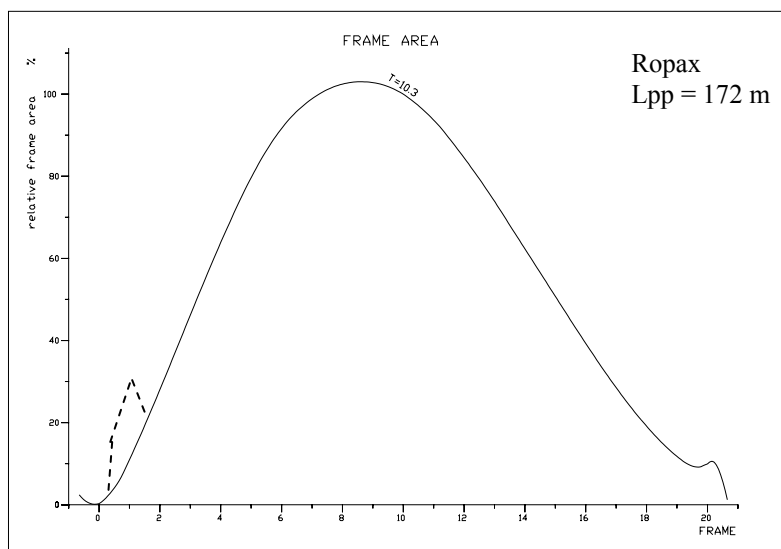


Rys.9.13. Rozkład ciśnień na kadłubie – wariant B [28]



Rys.9.14. Profil rufowego układu falowego wzdłuż kadłuba – wariant B [28]

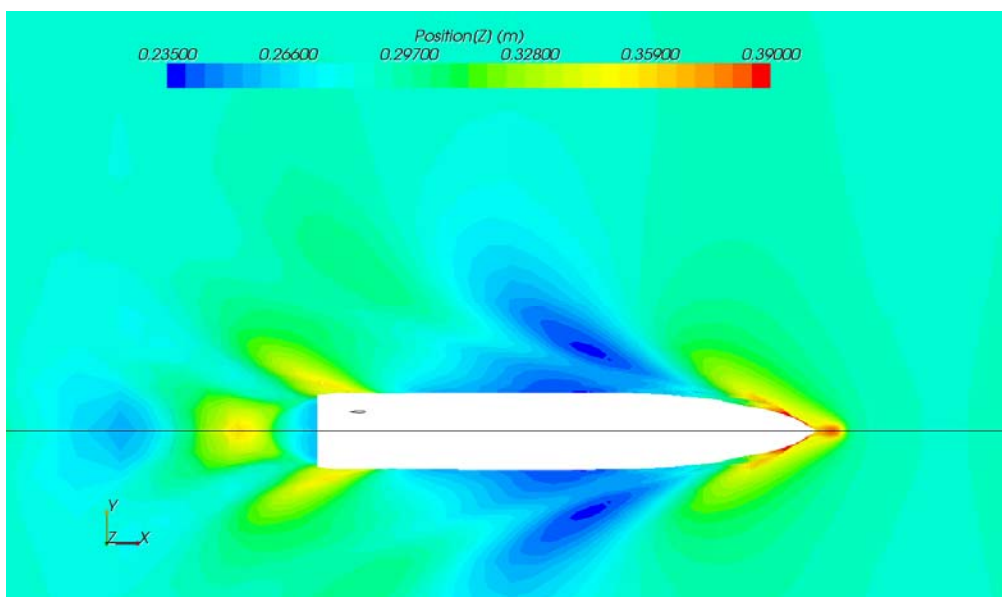
V. Położenie pędników podowych – wariant C:  $x = + 5.5 \text{ m}$   
 $y = \pm 7.1 \text{ m}$



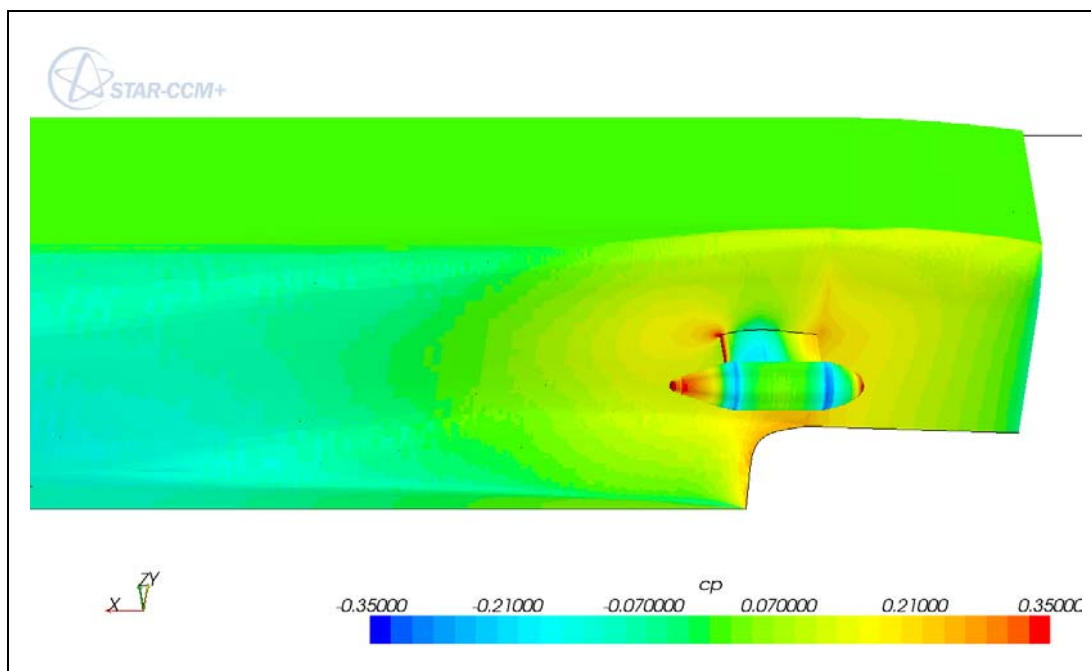
Rys.9.15. Krzywa pól wręgowych – wariant C

$L_{pp} = 172.2 \text{ m}$   $B = 28.4 \text{ m}$   $T = 6.60 \text{ m}$   $LCB = -2.2\%$

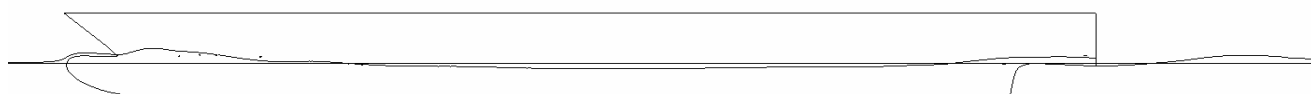
$V_s = 28.0 \text{ knt}$



Rys.9.16. Układ falowy – wariant C [28]



Rys.9.17. Rozkład ciśnień na kadłubie – wariant C [28]



Rys.9.18. Profil rufowego układu falowego na kadłubie – wariant C [28]



## VI. Różnice w oporze dla poszczególnych wersji:

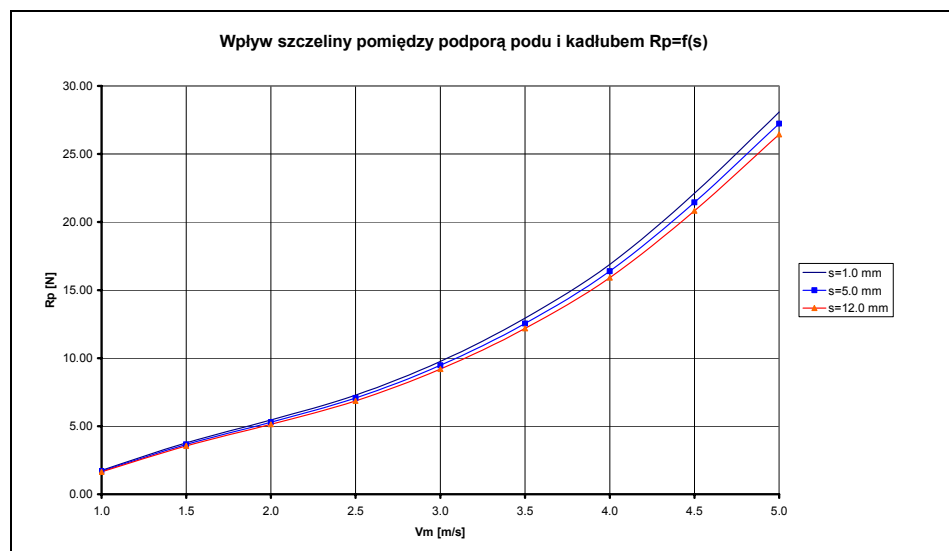
Przeprowadzona analiza numeryczna, oprócz oceny jakościowej skutków poszczególnych usytuowań pędników podowych bez śrub, pozwoliła na obliczenie oporu każdej wersji kadłuba w skali modelu oraz udziału oporu jednostki podowej bez śruby, w oporze całkowitym.

Tabela 9.1 Porównanie wielkości oporu przy prognozowanej prędkości  $V_S = 28$  knt:

Wersje:	goły kadłub	kadłub + pody
1- goły kadłub	-----	100.0 %
2 - pod z tyłu ( $x = - 4.5\text{m}$ )	13.0 %	107.3 %
3 - pośrednia ( $x = 0.0$ m)	10.4 %	104.6 %
4 - pod z przodu ( $x = +5.5\text{m}$ )	4.1 %	104.5 %

### 9.1.2 Wzajemne usytuowanie pionowe [24]

Istotnym problemem we wzajemnym usytuowaniu kosza rufowego i zespołu podowego jest obecność szczeliny pomiędzy górną krawędzią wspornika zespołu podowego i koszem rufowym, Jest to pochodną nachylenia dolnej krawędzi kosza rufowego w rejonie podu. Przeprowadzone badania modelowe wskazują jednak minimalny wpływ szczeliny na sprawność napędową takiego statku. Poza tym brak dostatecznej ilości wiarygodnych danych by ująć taki wpływ w sposób algorytmiczny.



Rys.9.19. Wpływ szczeliny na opór zespołu

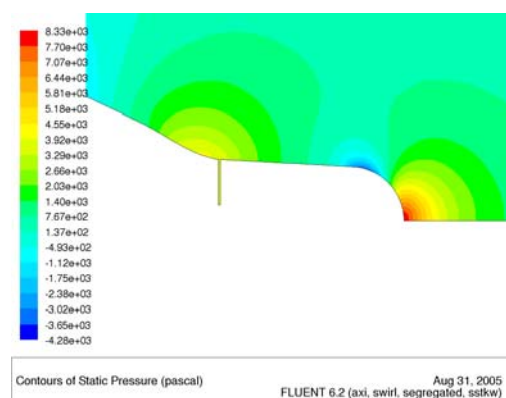
## 9.2 Elementy współdziałania: piasta śruby podowej – bryła podu [28],[36],[37]

### 9.2.1 Wprowadzenie [1]

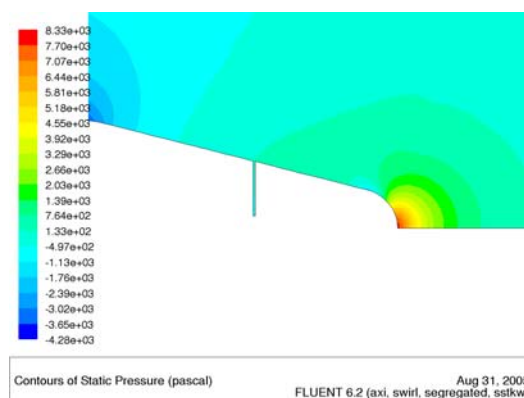
Pojęcie efektu szczeliny w pędniku podowym tzw. „Gap effect” zostało niedawno wprowadzone do badań modelowych pędników podowych. Była to reperkusja intensywnych badań odosobnionych pędników podowych w trakcie, których stosowano modele śrub podowych o różnorodnych geometriach skrzydeł i piast tych śrub. Jednocześnie projektowano gondole podowe tak, by najtańszym kosztem obudować zastosowany silnik elektryczny. W efekcie pojawiały się pędniki podowe charakteryzujące się rozbudowanymi zmianami przekrojów poprzecznych we wzajemnych konfiguracjach piasty śruby podowej i geometrii przedniej części pędnika podowego, szczególnie typu ciągnącego. Powoduje to pojawienie nad- lub podciśnienia w szczelinie, które w efekcie wnosi dodatkowy, niezbyt dokładnie określony napór, przekłamując napór śruby podowej mierzony bezpośrednio za śrubą.

Przeprowadzono liczne badania modelowe oraz analizy narzędziami CFD, lecz nie udało jednoznacznie zidentyfikować wszystkich zjawisk pojawiających się w szczelinie pomiędzy obudową podu i piastą śruby przy różnych wzajemnych konfiguracjach geometrycznych, szczególnie piasty śruby podowej. Badania potwierdziły natomiast brak wpływu takiej szczeliny na charakterystyki hydrodynamiczne podu, gdy próby napędowe realizowane są zgodnie z wytycznymi procedury ITTC 78. Wykonana wtedy kalibracja układu napędowego, przy użyciu ekwiwalentnej piasty zastępczej bez skrzydeł, pozwala na wyeliminowanie tego wpływu. Jednakże, gdy ten wpływ jest źle zidentyfikowany, można to doprowadzić do błędnego określenia punktu pracy śruby podowej, a w efekcie do projektów śrub niespełniających założenia projektowe.

Ponieważ źródła danych literaturowych z badań pędników podowych nie podają takich szczegółów, jak wielkość szczeliny pomiędzy piastą śruby i przednią częścią obudowy podowej, niezbędnym staje się oszacowanie wpływu typowej szczeliny na sprawność śruby. Wiedza taka pozwoli to na wstępną ocenę niepewności pozyskanych danych literaturowych.



Rys.9.20. Piasta cylindryczna podu [28]



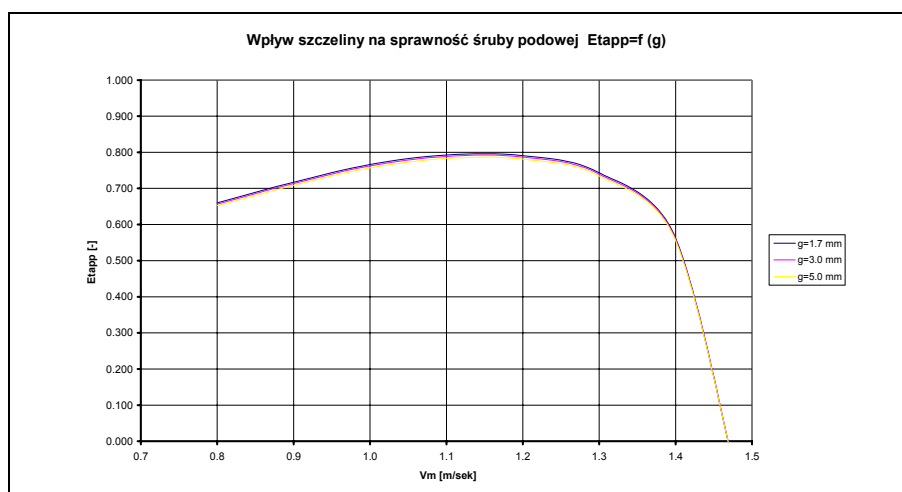
Rys.9.21. Piasta stożkowa podu [28]

### 9.2.2 Wpływ zmian szerokości szczeliny podowej [26],[49]

Zmiany wielkości szczeliny pomiędzy obudową podu i piastą śruby podowej, w przypadku tego samego podu, nie mają w praktyce istotnego wpływu na sprawność pędnika podowego przy zmianach na poziomie pojedynczych milimetrów; różnice w sprawności leżą w zakresie poniżej niepewności pomiarowych.

W przypadku piast stożkowych zaleca się, by odosobnione śruby podowe były badane przy użyciu sztucznie wydłużonych piast, w taki sposób, by szczelina pomiędzy modelem śruby i obudową dynamometru śrubowego wypadła w rejonie cylindrycznym takiej piasty.

Powyższe interakcje, jak również trudności związane z pomiarem naporu śruby podowej, powodują, iż ITTC odradza wykorzystanie tożsamości naporu pędnika podowego i odosobnionej śruby podowej do określania współczynników współdziałania. Zamiast tego zaleca bazowanie na tożsamości momentów napędowych.

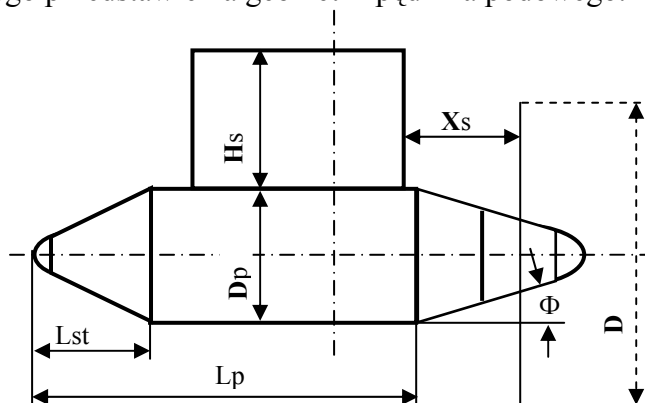


Rys.9.22. Wpływ szczeliny na sprawność typowego pędnika podowego

### 9.3 Wpływ geometrii pędnika podowego na charakterystyki podu odosobnionego

#### 9.3.1 Opis parametryczny geometrii pędnika podowego [17], [18], [19], [41], [42]

W geometrii bryły pędnika podowego, bez względu na miejsce instalacji śruby, można wyodrębnić trzy główne części: gondola z silnikiem elektrycznym, wspornik trwale związany z gondolą i łączący ją z kadłubem oraz śruba podowa. Każdy z tych elementów, jak również relacje między nimi, mogą być opisane w sposób parametryczny, najczęściej w relacji do średnicy śruby podowej. Tutaj głównym wymogiem jest użycie, jak najmniejszej ilości parametrów do jednoznacznego przedstawienia geometrii pędnika podowego.



Rys.9.23. Opis parametryczny geometrii zespołu podowego

Tabela 9.2 Dane przebadanych modeli podów [17],[25],[27],[46]

Model śruby	D [mm]	P/D [-]	$A_E/A_o$ [-]	d/D [-]	Z [-]
literatura	270.0	1.000	0.600	0.260	4
P2581/82	229.0	1.006	0.753	0.250	4
P2621/22	229.0	1.012	0.686	0.247	4
P458/59	230.0	1.421	0.755	0.231	4
P2714/15	229.0	1.401	0.869	0.338	5
P2716/17	229.0	1.401	0.869	0.338	5
P458/59	230.0	1.421	0.755	0.231	4
CP440/41	230.0	1.423	0.688	0.283	4
P477/78	230.0	1.650	0.815	0.231	4
P479/80	239.0	1.714	0.815	0.231	4

### 9.3.2 Charakterystyki hydromechaniczne pędnika podowego [17],[18],[19],[24],[41],[42]

Charakterystyki hydrodynamiczne pędnika zależą głównie od jego geometrii oraz założonych warunków operacyjnych. Opis parametryczny kształtu ułatwia określenie zależności osiągow napędowych pędnika od poszczególnych parametrów w przypadku badań systematycznych. W oparciu o wyniki takich badań i opracowane algorytmy można dokonać optymalizacji, pozwalających na opracowanie koncepcji pędnika podowego zgodnego z założeniami. Istotne jest tutaj użycie niezbędnej ilości parametrów opisujących podstawowe relacje wymiarowe i mające największy wpływ na osiągi.

Tabela 9.3 Kombinacje wymiarów badanych podów wg Rys. 9.23

POD No	$A=Dp/D$	$B=Lp/D$	$C=Lst/D$	$D=Xs/D$	$E=\Phi^\circ$
P1	0.474	1.593	0.256	0.370	15
P2	0.474	1.593	0.256	0.489	20
P3	0.474	1.593	0.556	0.489	15
P4	0.474	1.593	0.556	0.370	20
P5	0.474	1.941	0.256	0.370	20
P6	0.474	1.941	0.256	0.489	15
P7	0.474	1.941	0.556	0.370	15
P8	0.474	1.941	0.556	0.489	20
P9	0.615	1.593	0.256	0.370	15
P10	0.615	1.593	0.256	0.489	20
P11	0.615	1.593	0.556	0.370	20
P12	0.615	1.593	0.556	0.489	15
P13	0.615	1.941	0.256	0.370	20
P14	0.615	1.941	0.256	0.489	15
P15	0.615	1.941	0.556	0.370	15
P16	0.615	1.941	0.556	0.489	20
P17	0.500	1.724	0.448	0.482	19
P18	0.500	1.632	0.425	0.313	17
P19	0.500	1.724	0.448	0.482	19
P20	0.651	2.430	0.734	0.390	19
P21	0.651	2.430	0.734	0.390	19
P22	0.600	2.064	0.528	0.272	26
P23	0.600	2.064	0.528	0.272	26
P24	0.600	2.064	0.528	0.272	26

Tabela 9.3 zawiera opisy parametryczne dwudziestu czterech pędników podowych pozyskanych wraz z charakterystykami hydrodynamicznymi do celów rozprawy. Opisy geometrii tych pędników są oparte tylko na pięciu parametrach mających największy wpływ na ich osiągi. Są to relacje:  $A = D_p/D$ ,  $B = L_p/D$ ,  $C = L_{st}/D$ ,  $D = X_s/D$  oraz kąt piasty  $E = \Phi [^\circ]$

Charakterystyki hydrodynamiczne badanych podów są określane w oparciu o pomiary:

- Naporu śruby podowej  $T_{PP}$ ;
- Obrotów śruby podowej  $n$ ;
- Momentu śruby podowej  $Q_U$ ;
- Naporu zespołu podowego  $T_U$ .

Współczynniki wpływu określane są następująco:

$$K_{T_{PP}} = T_{PP} / (\rho n^2 D^4) \quad (9.1)$$

$$K_{Q_U} = Q_U / (\rho n^2 D^5) \quad (9.2)$$

$$K_{T_U} = T_U / (\rho n^2 D^4) \quad (9.3)$$

$$\eta_{PP} = (J/2\pi) \times (K_{T_{PP}} / K_Q) \quad (9.4)$$

$$\eta_{U0} = (J/2\pi) \times (K_{T_U} / K_Q) \quad (9.5)$$

$$K_{R_U} = (K_{T_{PP}} - K_{T_U}) / (\rho n^2 D^4) \quad (9.6)$$

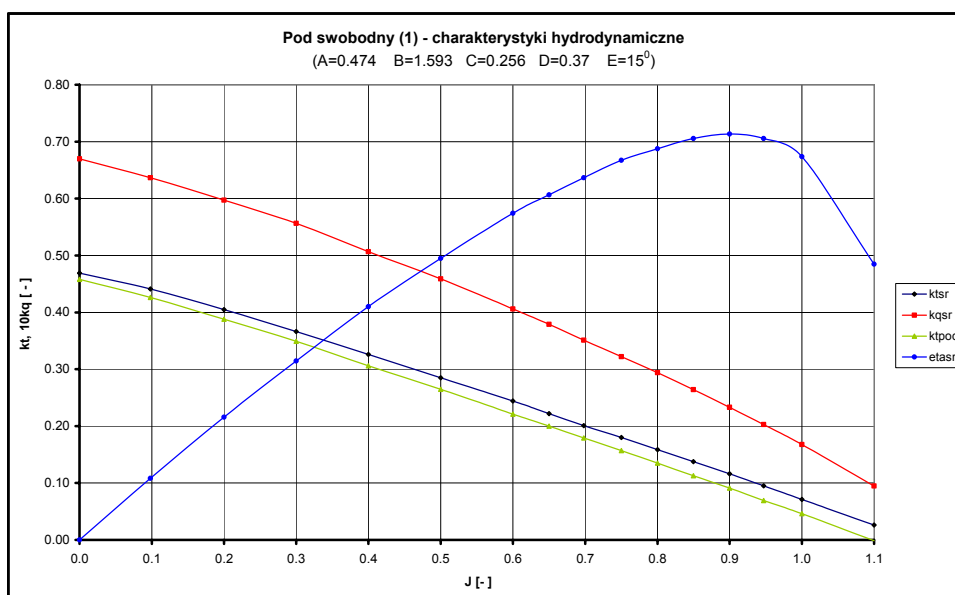
$w_{QU}$  wsp. strumienia nadążającego podu z tożsamości momentu

$K_{T_{PU}} / J^2$  współcz. obciążenia kręgu śruby podowej naporem

Przykłady charakterystyk:

Tabela 9.4 Pod swobodny P1 [17]:

J	$K_{T_{PP}}$	$10K_{Q_{U0}}$	$K_{T_{U0}}$	$\eta_{PP}$	$\eta_{U0}$	$K_{R_U}$	$w_{QU}$	$K_{T_{PU}}/J^2$
-	-	-	-	-	-	-	-	-
0.100	0.441	0.637	0.426	0.108	0.107	0.015	-1.438	44.100
0.200	0.405	0.597	0.388	0.216	0.207	0.017	-0.153	10.120
0.300	0.366	0.556	0.349	0.314	0.300	0.017	0.009	4.070
0.400	0.326	0.507	0.306	0.410	0.385	0.020	0.018	2.038
0.500	0.285	0.459	0.265	0.495	0.459	0.021	0.066	1.140
0.600	0.244	0.406	0.221	0.574	0.521	0.023	0.065	0.678
0.700	0.201	0.351	0.179	0.636	0.567	0.022	0.074	0.413
0.800	0.159	0.296	0.135	0.684	0.582	0.024	0.066	0.248
0.900	0.115	0.233	0.091	0.707	0.560	0.024	0.061	0.142
1.000	0.071	0.168	0.046	0.674	0.438	0.025	0.059	0.071
1.100	0.026	0.095	-0.001	0.485	-0.024	0.028	0.043	0.022



Rys.9.23. Pod1- charakterystyki hydrodynamiczne podu swobodnego

Charakterystyki hydrodynamiczne podów swobodnych Pod1 – Pod 24, o parametrach geometrycznych podanych w Tabeli 9.3, zostały zawarte w bazie danych **Db3**.

## 10. BUDOWA BAZ DANYCH PROJEKTU

### 10.1 Określenie formatów finalnych baz danych

#### 10.1.1 Dane kadłuba statków podowych

Baza danych kadłuba przebadanych statków z napędem podowym powinna zawierać całościowo współczynniki bezwymiarowe opisujące geometrię kadłuba takiego statku. O ile to możliwe, powinna zawierać także krzywą pól wręgowych opisaną w sposób bezwymiarowy w odniesieniu do przekroju kadłuba na śródkrećciu.

#### 10.1.2 Charakterystyki hydrodynamiczne śrub podowych

Charakterystyki hydrodynamiczne śrub podowych powinny być przedstawiane w sposób standardowy, tak, jak śruby konwencjonalnych układów napędowych. Współczynniki opisujące geometrię śruby powinny być rozszerzone o kąt zbieżności piasty, a współczynnik  $d_H/D$  określony w oparciu o średnią wartość średnicy piasty.

#### 10.1.3 Charakterystyki hydrodynamiczne podów w ujęciu parametrycznym

Charakterystyki hydrodynamiczne podów odosobnionych powinny być określone także w funkcji współczynnika posuwu i zawierać współczynniki naporu śruby i jednostki podowej, współczynnik momentu napędowego śruby, współczynnik oporu dynamicznego obudowy podu oraz współczynnik strumienia nadążającego podu wyliczony z tożsamości momentu.

### 10.1.4 Współpraca śruby z elementem płata

Charakterystyki opisujące współpracę śruby z płatem (płetwą steru) w sposób parametryczny, mogą być przydatne do zamodelowania charakterystyk hydrodynamicznych wspornika oraz płetwy podowej znajdujących się w strumieniu zaśrubowym.

## 10.2 Przykłady baz danych

### 10.2.1 Dane kadłuba statków podowych

Poniższa tabela jest przykładem opisu, w sposób wymiarowy i bezwymiarowy, geometrii kadłuba badanych statków podowych:

Tabela 10.1 Dane kadłubów statków podowych

Typ-Statku	Lpp	B	T	$\Delta$	$S_w$	$C_b$	$C_m$	$C_p$	$C_w$	$i_E$	LCB	SB	$SB_{sub}$	hB
	[m]	[m]	[m]	[m <sup>3</sup> ]	[m <sup>2</sup> ]	[-]	[-]	[-]	[-]	[deg]	[%]	[m]	[m]	[m]
Ropax	172.20	28.40	6.60	19716	5740	0.611	0.986	0.620	0.901	7.20	-2.80	27.0	27.0	3.6
Cruise Vessel	272.00	32.20	8.00	43990	10360	0.628	0.991	0.634	0.876	8.30	-4.33	32.0	32.0	5.2
Fast Cargo	275.00	30.00	10.30	48338	10750	0.554	0.950	0.583	0.868	6.80	-2.60	30.0	30.0	5.8
Fast Ropax	219.64	29.30	6.50	15709	6331	0.376	0.642	0.585	0.757	5.70	-1.94	26.0	26.0	3.3

Do celów praktycznych lepsze jest przedstawianie geometrii kadłuba za pomocą współczynników będących relacjami wymiarów głównych oraz za pomocą współczynników pełnotliwości:

$L/B$ ;  $B/T$ ;  $(L/\Delta^{1/3})$ ;  $(S_w/\Delta^{2/3})$ ;  $C_B$ ;  $C_P$ ;  $C_M$ ;  $i_E$ ; LCB;  $SB/S_M$ ;  $hB / T$



Rys.10.1. Panel przełączania bazy danych analizowanych statków

### 10.2.2 Charakterystyki hydrodynamiczne śrub podowych [2]

Charakterystyki hydrodynamiczne śrub podowych są gromadzone w bazach danych, w sposób podobny jak śruby konwencjonalne, poprzez podanie współczynników hydrodynamicznych  $K_{T0}$  i  $K_{Q0}$  w funkcji współczynnika posuwu  $J_0$  oraz współczynników opisujących geometrię śruby:

$K_{T0} = T_0 / (\rho n^2 D^4)$	– współczynnik naporu śruby
$K_{Q0} = Q_0 / (\rho n^2 D^5)$	– współczynnik momentu
$\eta_0 = (J/2\pi) (K_{T0} / K_{Q0})$	– współczynnik sprawności śruby
$P/D$	– współczynnik skoku śruby
$A_E / A_0$	– współczynnik powierzchni
$d_H / D$	– współczynnik średnicy piasty
$z$	– liczba skrzydeł

Dla większej precyzji można załączać temperaturę wody i obroty modelu śruby w trakcie próby.



Rys.10.2. Panel przełączania bazy charakterystyk śrub podowych

### 10.2.3 Charakterystyki hydrodynamiczne podów w ujęciu parametrycznym

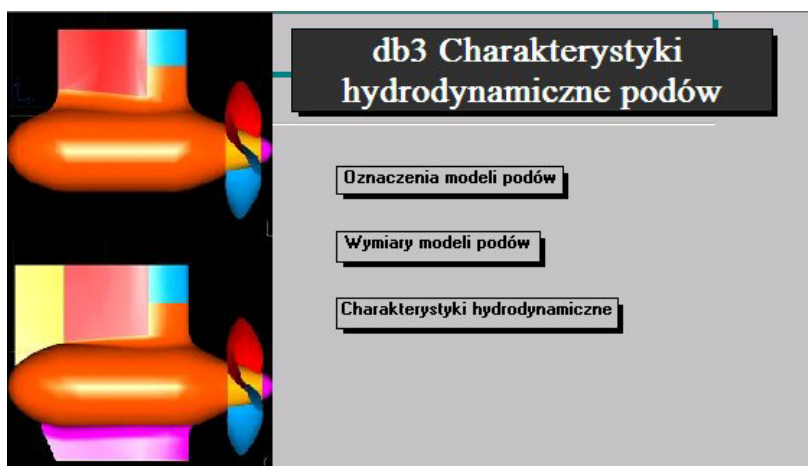
Charakterystyki hydrodynamiczne podów odosobnionych ujmują standardowe charakterystyki podowe w funkcji głównych parametrów jednostki podowej oraz parametrów śruby podowej:

$K_{TPP0} = T_{PP0} / (\rho n^2 D^4)$	– współczynnik naporu śruby podowej
$K_{Q0} = Q_0 / (\rho n^2 D^5)$	– współczynnik momentu napędowego
$K_{TU0} = T_{U0} / (\rho n^2 D^4)$	– współczynnik naporu pednika podowego
$\eta_{PP0} = (J/2\pi) (K_{TPP} / K_Q)$	– współczynnik sprawności śruby podowej
$\eta_{U0} = (J/2\pi) (K_{TU0} / K_{Q0})$	– współczynnik sprawności pędnika podowego
$C_{DU} = (K_{TPP0} - K_{TU0}) / (\rho n^2 D^4)$	– współczynnik oporu pednika podowego
$W_{QP}$	– wsp. strumienia nadążającego podu z tożsamości momentu
$K_{TProp} / J^2$	– współcz. obciążenia kręgu śruby podowej naporem

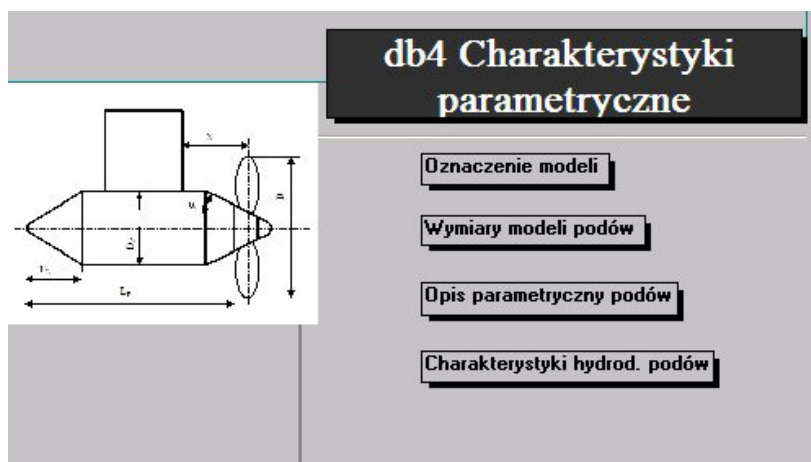
Proporcje wymiarów:

$Dp/D, P/D, A_E/A_0, d_H/D, Lst/D, Lp/D, Xs/D, Dp/D, \Phi$



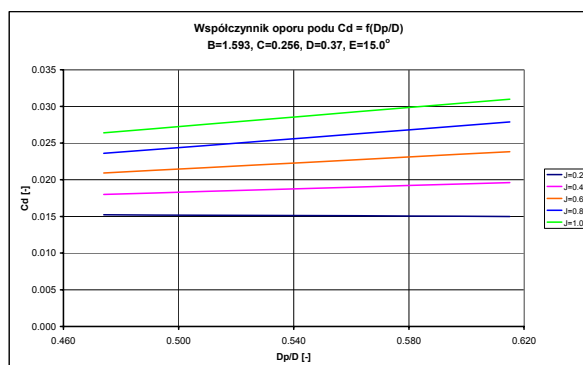


Rys.10.3. Panel przełączania bazy typowych charakterystyk hydrodynamicznych podów

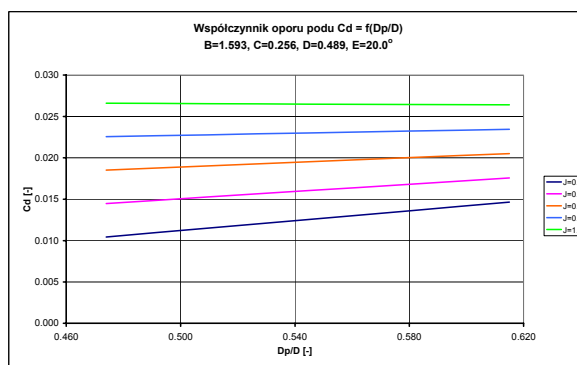


Rys.10.4 Panel przełączania bazy charakterystyk parametrycznych zespołu podowego

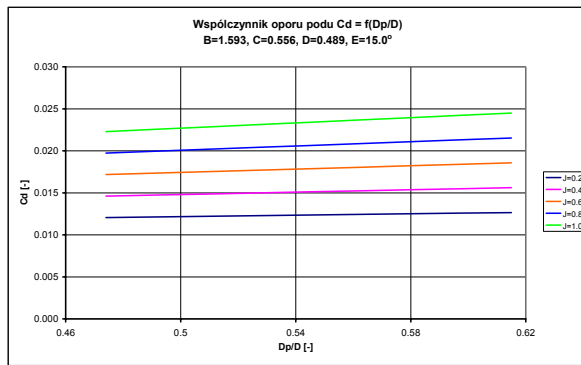
– Wpływ średnicy gondoli podowej na opór podu  $C_D = f(D_p/D)$  [17], [18], [19]:



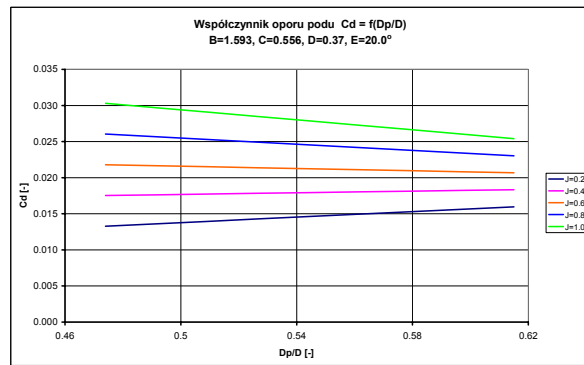
Rys.10.5.  $B=1.593 C=0.256 D=0.37 E=15.0^0$



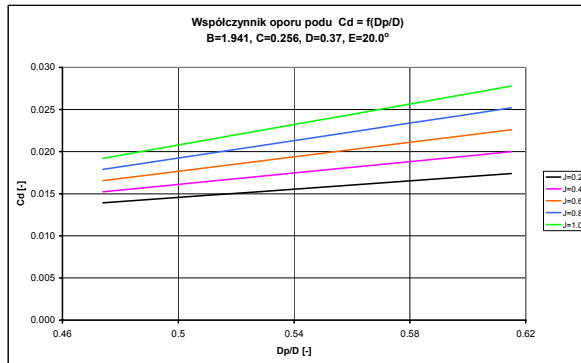
Rys.10.6.  $B=1.593 C=0.256 D=0.37 E=20.0^0$



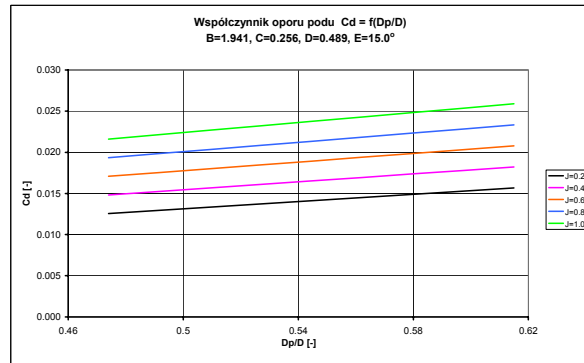
Rys.10.7. B=1.593 C=0.556 D=0.489 E=15.0<sup>0</sup>



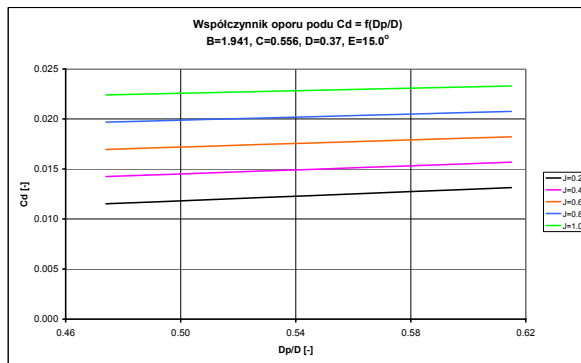
Rys.10.8. B=1.593 C=0.556 D=0.37 E=20.0<sup>0</sup>



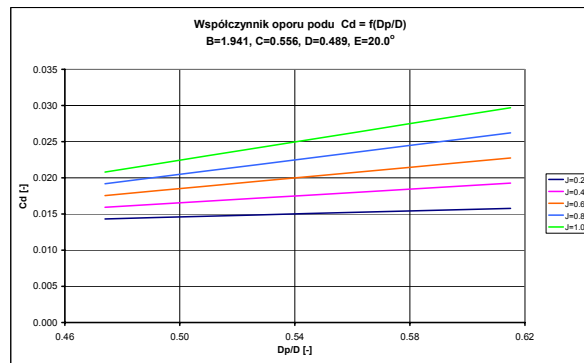
Rys.10.9. B=1.941 C=0.256 D=0.37 E=20.0<sup>0</sup>



Rys.10.10. B=1.941 C=0.256 D=0.489 E=15.0<sup>0</sup>



Rys.10.11. B=1.941 C=0.556 D=0.37 E=15.0<sup>0</sup>



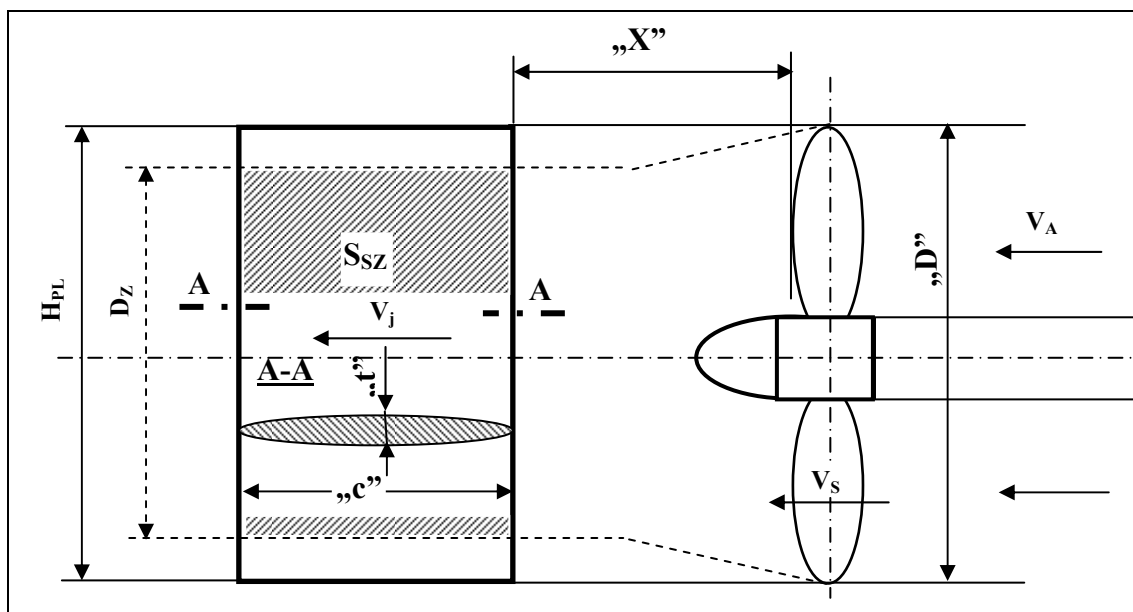
Rys.10.12. B=1.941 C=0.556 D=0.489 E=20.0<sup>0</sup>

Na wykresach przedstawionych na Rys. 10.5 – 10.12 przedstawiono, wybrane z bazy danych, przykłady zależności współczynnika oporu pędnika podowego  $C_D = f(D_p/D)$  przy niezmiennych relacjach  $B=L_p/D$ ,  $C=L_{st}/D$ ,  $D=X_s/D$  oraz  $E=\Phi$ , dla wybranych wartości współczynnika posuwu  $J$ . Taki zestaw informacji pozwala na dobór proporcji wymiarowych bryły podu, charakteryzującej się najmniejszym oporem dynamicznym dla zadanego obciążenia śruby podowej. Określenie zależności współczynnika oporu od innych parametrów wymaga istotnego rozszerzenia zakresu zebranych danych.

#### 10.2.4 Współpraca śruby z elementem płata [20],[39],[40],[41],[45],[46],[54],

Współpraca śruby napędowej z płetwą steru może być modelem współpracy śruby podowej ze wspornikiem lub płetwą podową leżącymi w strumieniu zaśrubowym. Przebadany i opublikowany zestaw kombinacji zmiennych parametrów śruby, płetwy sterowej oraz odległości pomiędzy tymi urządzeniami tworzy bazę danych do uniwersalnego wykorzystania. Zwłaszcza, gdy wartości tych parametrów przyjmują typowe wielkości, takie jak,  $P/D = 1.4, 1.0$  i  $0.6$ ,  $x/D = 0.5, 0.3$  i  $0.1$  oraz  $t/c = 0.18$  i  $0.12$ . Współczynnik powierzchni skrzydeł śruby wy-

nosi  $A_E/A_0 = 0.70$ . Również relacja średnicy śruby do wysokości płetwy przyjmuje typową wartość  $D/H_{PL} = 0.92$ .



Rys.10.13. Schemat pomiarowy opływu płata w strumieniu zaśrubowym

$$C_T = \frac{T}{0.5\rho\pi\left(\frac{D}{2}\right)^2 V_A^2} \quad (10.1)$$

$$V_S = \frac{1}{2} V_A \left[ (1 + C_T)^{0.5} + 1 \right] \quad (10.2)$$

$$V_j = V_A \left[ (1 + C_T)^{0.5} - 1 \right] \quad (10.3)$$

$$V_i = V_A (1 + C_T)^{0.5} \quad (10.4)$$

$$Q_S = Q_j$$

$$Q_S = V_S \pi \left[ \left(\frac{D}{2}\right)^2 - \left(\frac{d_h}{2}\right)^2 \right] \quad (10.5)$$

$$Q_j = V_j \pi \left(\frac{D_Z}{2}\right)^2 \quad (10.6)$$

$$\left(\frac{D_Z}{2}\right)^2 = 0.5 \left[ \left(\frac{D}{2}\right)^2 - \left(\frac{d_h}{2}\right)^2 \right] \left[ \frac{1}{(1 + C_T)^{0.5}} + 1 \right] \quad (10.7)$$

$$S_{SZ} = 2D_Z C \quad (10.8)$$

$$K_R \rho D^4 n^2 = 0.5 \rho V^2 S_{SZ} C_F X$$

$$X = \frac{K_R D^2}{J^2 \left[ (1 + C_T)^{0.5} - 1 \right]^2 C_F D_Z C} \quad (10.9)$$

### Zakres badań przy $n = 1100$ 1/min

$$0 < J < 1.4$$

#### - Dane modelu śruby:

$$D = 240 \text{ [mm]}, A_E/A_0 = 0.70 \text{ [-]}, P/D = 0.6, 1.0, 1.4 \text{ [-]}, Z = 4 \text{ [-]}$$

#### - Dane płyta (pletwy steru):

$$h = 260.0 \text{ [mm]}, c = 192.0 \text{ [mm]}, t/c = 0.12, 0.18 \text{ [-]}$$

#### - Odległość modelu skrzydła śruby od płyty:

$$x/D = 0.10 \text{ [-]}, 0.30 \text{ [-]}, 0.50 \text{ [-]}$$

Tabela 10.1 Zestawienie badanych parametrów śruby i płyta [55]

P/D	t/c	x/D	P/D	t/c	x/D	P/D	t/c	x/D
-	-	-	-	-	-	-	-	-
1.4	0.17	0.5	1.0	0.17	0.5	0.6	0.17	0.5
1.4	0.17	0.3	1.0	0.17	0.3	0.6	0.17	0.3
1.4	0.17	0.1	1.0	0.17	0.1	0.6	0.17	0.1
1.4	0.13	0.5	1.0	0.13	0.5	0.6	0.13	0.5
1.4	0.13	0.3	1.0	0.13	0.3	0.6	0.13	0.3
1.4	0.13	0.1	1.0	0.13	0.1	0.6	0.13	0.1
1.4	0.18	0.5	1.0	0.18	0.5	0.6	0.18	0.5
1.4	0.18	0.3	1.0	0.18	0.3	0.6	0.18	0.3
1.4	0.18	0.1	1.0	0.18	0.1	0.6	0.18	0.1
1.4	0.12	0.5	1.0	0.12	0.5	0.6	0.12	0.5
1.4	0.12	0.3	1.0	0.12	0.3	0.6	0.12	0.3
1.4	0.12	0.1	1.0	0.12	0.1	0.6	0.12	0.1
1.4	0.16	0.5	1.0	0.16	0.5	0.6	0.16	0.5
1.4	0.16	0.3	1.0	0.16	0.3	0.6	0.16	0.3
1.4	0.16	0.1	1.0	0.16	0.1	0.6	0.16	0.1
1.4	0.14	0.5	1.0	0.14	0.5	0.6	0.14	0.5
1.4	0.14	0.3	1.0	0.14	0.3	0.6	0.14	0.3
1.4	0.14	0.1	1.0	0.14	0.1	0.6	0.14	0.1
1.4	0.15	0.5	1.0	0.15	0.5	0.6	0.15	0.5
1.4	0.15	0.3	1.0	0.15	0.3	0.6	0.15	0.3
1.4	0.15	0.1	1.0	0.15	0.1	0.6	0.15	0.1

### Charakterystyki hydrodynamiczne śruby 4.70 przy wybranych wartościach P/D:

Tabele 10.2- 10.4

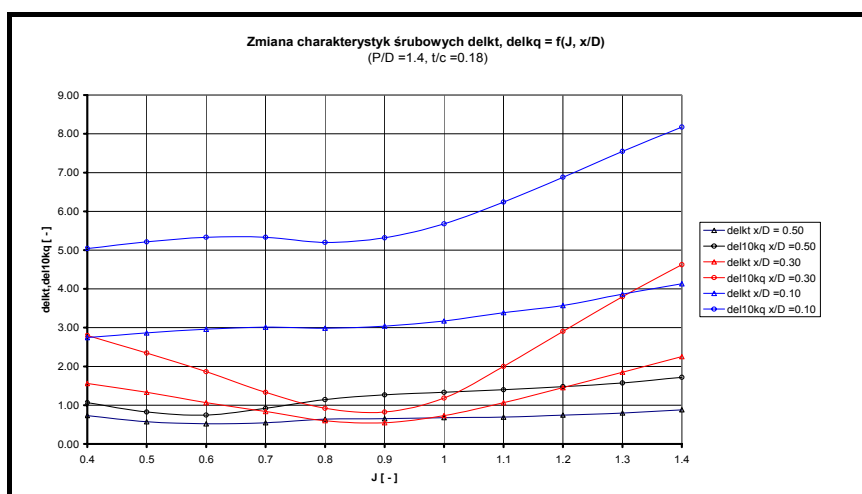
P/D=0.6			
J	kt	kq	eta0
0.0	0.2500	0.0248	0
0.1	0.2209	0.0226	0.1556
0.2	0.1876	0.0199	0.3002
0.3	0.1508	0.0170	0.4238
0.4	0.1107	0.0137	0.5147
0.5	0.0681	0.0103	0.5264
0.6	0.0233	0.0066	0.3373

P/D=1.0			
J	kt	kq	eta0
0.0	0.4547	0.0675	0.0000
0.1	0.4254	0.0638	0.1062
0.2	0.3919	0.0594	0.2101
0.3	0.3547	0.0546	0.3103
0.4	0.3142	0.0492	0.4068
0.5	0.2710	0.0434	0.4972
0.6	0.2256	0.0373	0.5779
0.7	0.1783	0.0308	0.6453
0.8	0.1297	0.0240	0.6884
0.9	0.0804	0.0169	0.6818
1.0	0.0307	0.0097	0.5040

P/D=1.4			
J	kt	kq	eta0
0.0	0.6244	0.1283	0.0000
0.1	0.6003	0.1234	0.0775
0.2	0.5717	0.1179	0.1544
0.3	0.5389	0.1116	0.2307
0.4	0.5025	0.1048	0.3054
0.5	0.4629	0.0974	0.3784
0.6	0.4206	0.0895	0.4490
0.7	0.3761	0.0811	0.5169
0.8	0.3299	0.0723	0.5813
0.9	0.2823	0.0632	0.6401
1.0	0.2339	0.0539	0.6910
1.1	0.1851	0.0443	0.7319
1.2	0.1364	0.0345	0.7555
1.3	0.0883	0.0246	0.7430
1.4	0.0412	0.0147	0.6248

Tabela 10.5 Wpływ konfiguracji śruby- płetwa na charakterystyki śrubowe ( $\Delta kt$ ,  $10\Delta kQ$ ) [55]

t/c = 0.18	P/D=1.4	x/D= 0.50	P/D=1.4	x/D= 0.30	P/D=1.4	x/D=0.10
J	$\Delta kt$	$10\Delta kQ$	$\Delta kt$	$10\Delta kQ$	$\Delta kt$	$10\Delta kQ$
0.40	0.73	1.07	1.56	2.80	2.75	5.04
0.50	0.57	0.83	1.33	2.35	2.87	5.21
0.60	0.52	0.75	1.07	1.87	2.96	5.33
0.70	0.55	0.92	0.84	1.33	3.01	5.33
0.80	0.64	1.15	0.60	0.92	2.99	5.20
0.90	0.65	1.27	0.55	0.83	3.04	5.32
1.00	0.68	1.33	0.73	1.19	3.17	5.68
1.10	0.69	1.40	1.07	2.00	3.39	6.24
1.20	0.75	1.48	1.45	2.91	3.57	6.88
1.30	0.80	1.57	1.85	3.80	3.87	7.55
1.40	0.88	1.72	2.25	4.63	4.13	8.17

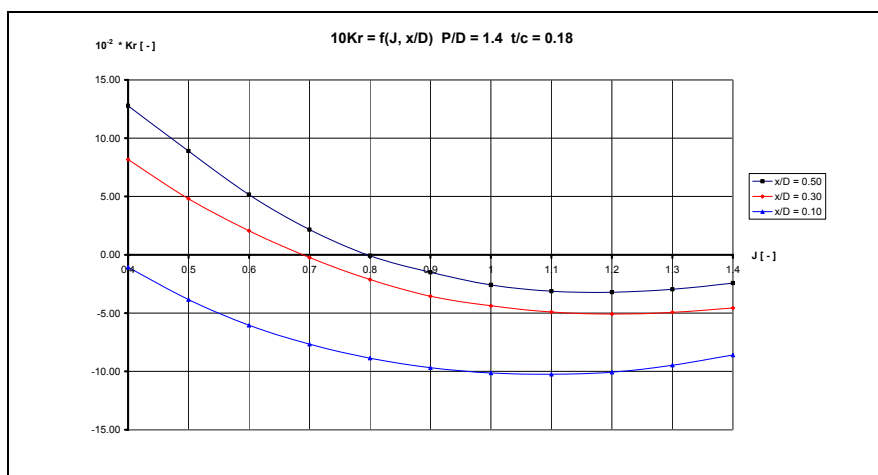


Rys. 10.13. Wpływ płata na charakterystyki śruby  $delK_Q=f(J, x/D)$

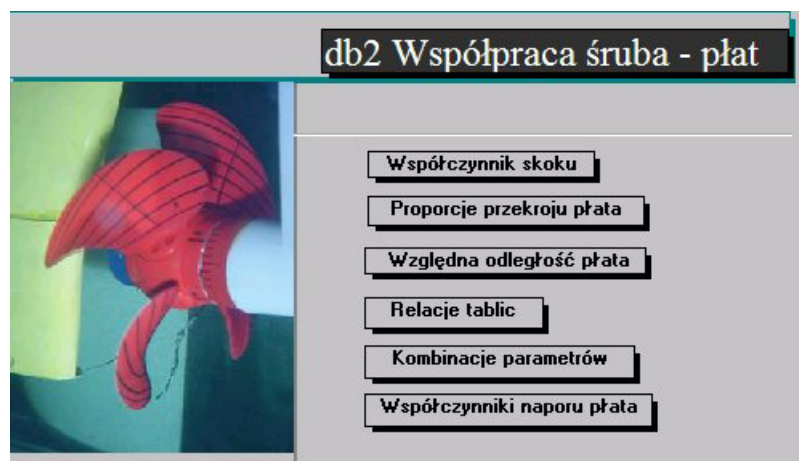
- wpływ konfiguracji śruby - pletwa na współczynnik naporu pletwy  $Kr = f(J, x/D)$  [55]:

Tabela 10.6 Współczynniki naporu płata  
-przykład zależności

P/D = 1.4 t/c = 0.18			
	x/D=0.50	x/D=0.30	x/D=0.10
J	$10^3 Kr$	$10^3 Kr$	$10^3 Kr$
0.4	12.77	8.17	-1.07
0.5	8.89	4.8	-3.84
0.6	5.16	2.07	-6.04
0.7	2.16	-0.24	-7.67
0.8	-0.08	-2.12	-8.87
0.9	-1.49	-3.56	-9.68
1.0	-2.59	-4.37	-10.13
1.1	-3.12	-4.91	-10.24
1.2	-3.21	-5.08	-10.07
1.3	-2.96	-4.93	-9.47
1.4	-2.43	-4.56	-8.60



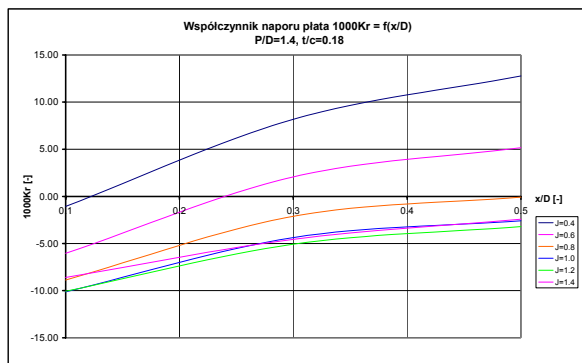
Rys.10.14. Współczynniki naporu płata  $Kr=f(J,x/D)$



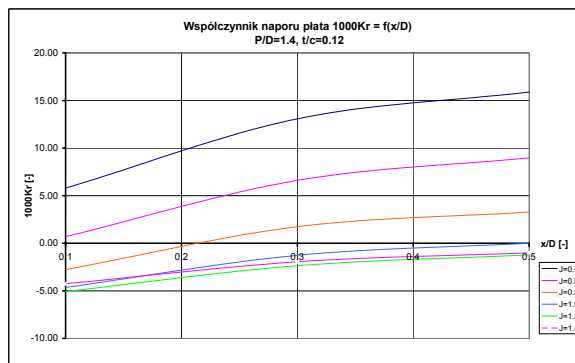
Rys.10.15. Panel przełączania bazy danych współpracy śruby - płat

- przykłady współpracy śruba – płat:

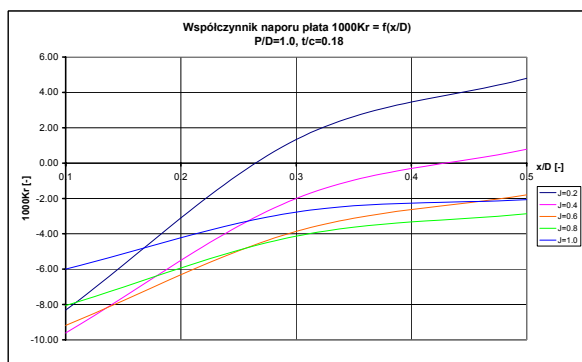
$1000Kr=f(J,x/D)$ ,  $P/D=const.$   $t/c=const.$  :



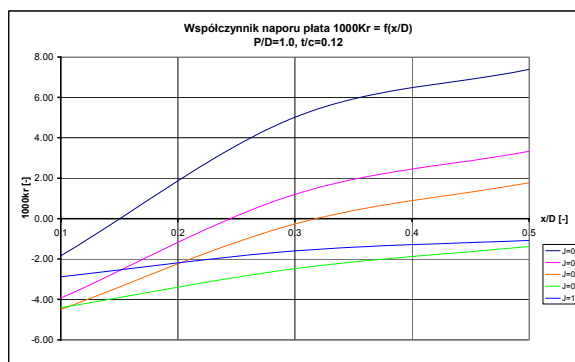
Rys. 10.16.  $P/D=1.4$   $t/c=0.18$



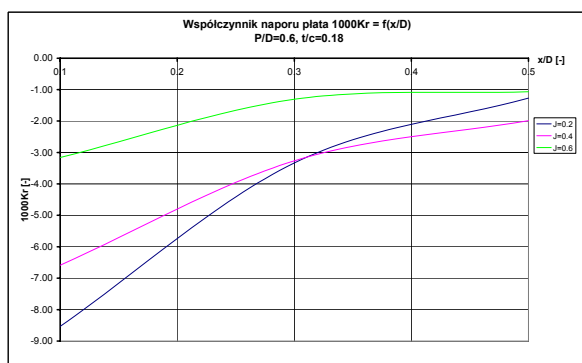
Rys. 10.17.  $P/D=1.4$   $t/c=0.12$



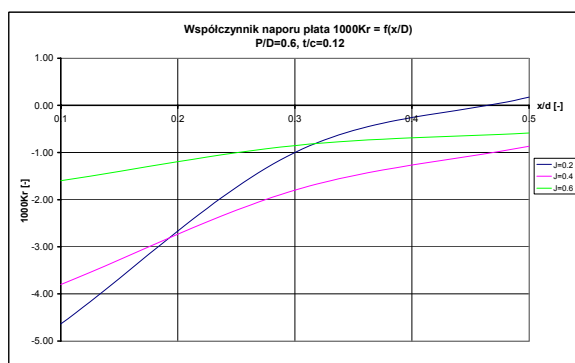
Rys.10.18.  $P/D=1.0$   $t/c=0.18$



Rys.10.19.  $P/D=1.0$   $t/c=0.12$



Rys.10.20.  $P/D=0.6$   $t/c=0.18$



Rys.10.21.  $P/D=0.6$   $t/c=0.12$

Zawartość bazy danych pozwala wybrać taką relację pomiędzy parametrami śruby i płata, która daje największy napór płata – najmniejszy opór, przy zadanym obciążeniu śruby.

## 11. MODELE MATEMATYCZNE INTERAKCJI HYDRODYNAMICZNYCH

### 11.1 Wprowadzenie [5],[7],[15],[20]

Matematyczny opis interakcji hydrodynamicznych pomiędzy elementami statku podowego bazuje w dużej mierze na informacji literaturowej, opracowanej przez ośrodki badawcze w oparciu o przebadane liczne modele statków podowych. Do najpoważniejszych źródeł informacji należy ośrodek badawczy Marin, Wageningen oraz Komitet pędników azymutalnych ITTC.

## 11.2 Współpraca: kadłub – pędnik podowy [7],[14],[16]

Współczynniki napędowe są określone dla zespołu podowego w oparciu o wyniki przeprowadzonych badań modelowych. Zależą one od relacji geometrycznych rufowej części kadłuba odniesionej do średnicy śruby podowej. Współczynnik ssania zależy w dużej mierze od nachylenia kosza rufowego i może być z pewnym przybliżeniem traktowany, jako pochodna współczynnika pełnotliwości kadłuba  $C_B$ , oraz jest zależny od udziału średnicy śruby w przekroju poprzecznym zanurzonej rufowej części kadłuba. Można go obliczyć w oparciu o metodę Holtropa:

$$t_u = 0.21593 + 0.099768 C_B - 0.56056 D / (BT)^{0.5} \quad (11.1)$$

Współczynnik strumienia nadażającego pędnika podowego zależy w pewnym stopniu także od warstwy przyściennej kadłuba i usytuowania śruby względem kadłuba. Można go wyznaczyć podobnie:

$$w_u = -0.21035 + 0.18053 C_B + 56.724 C_B C_V - 0.18566 D / (BT)^{0.5} + 0.090198 C_{tip} / D \quad (11.2)$$

Sprawność rotacyjna zależy w większym stopniu od smukłości części rufowej, która jest opisana przez współczynnik pryzmatycznej pełnotliwości kadłuba  $C_P$  i względną położenie środka wyporu LCB; zależy także od momentu na wale śrubowym, który jest pochodną współczynnika skoku śruby podowej  $P/D$ :

$$\eta_{Ru} = 1.493 - 0.18425 C_P - 0.4278 LCB - 0.33804 P/D \quad (11.3)$$

## 11.3 Współpraca: śruba podowa-obudowa podu

### 11.3.1 Wprowadzenie [1],[29]

Na interakcję pomiędzy śrubą podową a obudową składają się dwa wzajemne oddziaływania: podu na śrubę podową i odwrotnie: śruby podowej na obudowę podu. Oddziaływanie podu na śrubę jest dwojakie:

- Prędkość dopływu wody do śruby jest pod działaniem obecności bryły podu;
- Wspornik podu wpływa na napór i moment śruby podowej.

Powyższe wzajemne oddziaływania zostały już wcześniej zaobserwowane i zmierzone w trakcie badań interakcji śruba – płetwa steru [29]. Pozwala to użyć wyniki takich badań do analiz interakcji podowych.

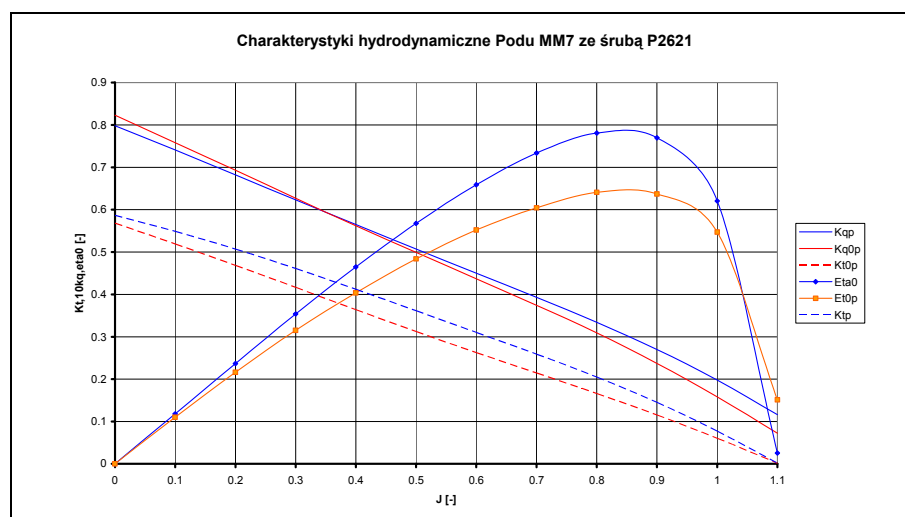
Szczegółowych informacji ilościowych dostarczają badania modelowe podów odosobnionych w trakcie których zauważono, iż tym samym wartościom współczynnika  $K_{T0}$  i  $K_{TU}$  lub  $K_{Q0}$  i  $K_{Qu}$  odpowiadają różne wartości współczynników posuwu  $J_0$  i  $J_S$ . Wskazuje to na obecność strumienia nadażającego podu, podobnie do strumienia nadażającego w kadłubie z napędem konwencjonalnym. Ponieważ tożsamość naporu daje z reguły inne wartości strumienia podowego niż tożsamość momentu, to tożsamość momentu należy przyjmować jako dokładniejszą. Pomiar momentu podowego są dokładniejsze, będąc nieobciążone oddziaływaniem wspornika podowego.



### 11.3.2 Relacja pomiędzy charakterystykami śruby podowej i zespołu podowego [8],[60]

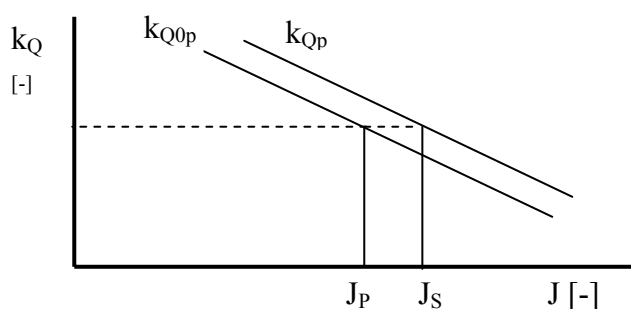
#### 11.3.2.1 Wprowadzenie

Pewna ilość przebadanych zespołów podowych pozwala na przeprowadzenie szeregu analiz otrzymanych charakterystyk hydrodynamicznych oraz na dokonanie pewnych uogólnień, których wiarygodność zależy od ilości badanych próbek.



Rys.11.1. Przykładowa charakterystyka zespołu podowego

W przypadku wszystkich przebadanych zespołów podowych widać podniesienie krzywych naporu i momentu podowego w stosunku do odpowiednich charakterystyk śruby odosobnionej. Z tej zmiany wynika wzrost sprawności zespołu podowego. Jest to jednak pozorny wzrost sprawności, ponieważ wynika to z faktu przesunięcia przez bryłę podu punktu pracy śruby w stronę mniejszych wartości współczynnika posuwu. Sytuacja taka potwierdza istnienie strumienia nadążającego zespołu podowego, który może być podobnie określony, jak strumień nadążający kadłuba z pracującą śrubą. W przypadku podów bazuje się jednak na tożsamości momentu, a nie naporu, który jest trudniej mierzalny w badaniach zespołów podowych.

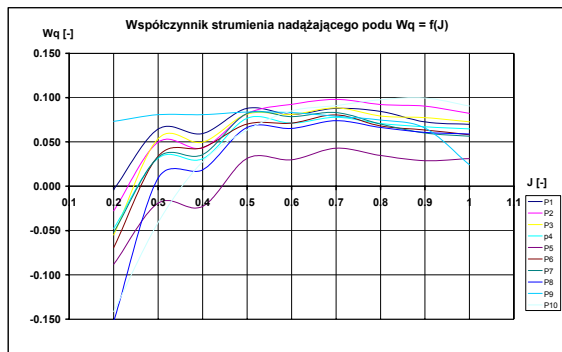


Rys. 11.2. Określenie współczynnika strumienia nadążającego podu  
 $w_p = 1 - J_p / J_s$

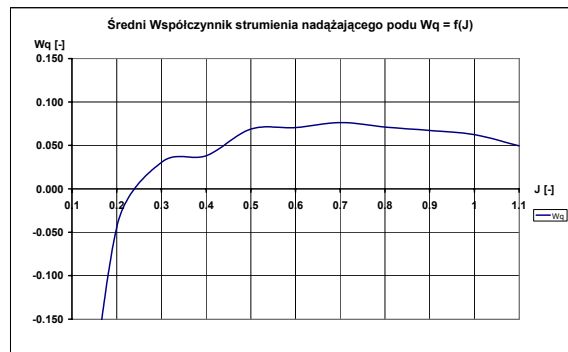
Przeprowadzone analizy pokazują, iż współczynnik strumienia nadążającego podu zależy od:

- Współczynnika skoku śruby podowej  $P/D$ ;
- Stosunku długości podu do jego średnicy;
- Kąta zaostrenia piasty podowej  $\Phi$ ;
- Stosunku średnicy podu do średnicy śruby podowej  $D_p/D$ .

Także pomiary przeprowadzone za pomocą technik laserowych LDV i PIV wskazują na wyraźny wpływ obecności bryły na prędkość napływu wody.



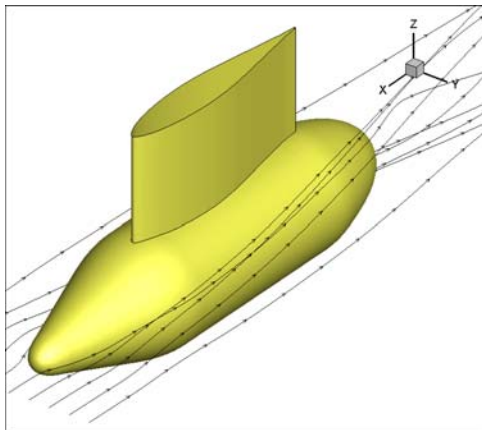
Rys.11.3. Współcz. strum. podu  $W_q=f(J)$



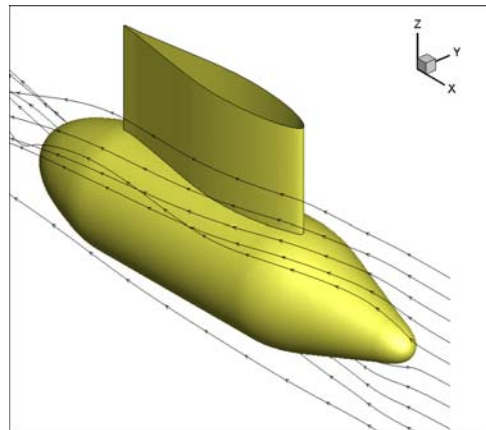
Rys.11.4. Średni wsp. strum. podu  $W_q=f(J)$

Na Rys.11.3 można zobaczyć, iż większość charakterystyk strumienia nadążającego przebadanych pędników podowych, układa się w dość wąskim przedziale pomiędzy wartościami  $0.06 < W_q < 0.09$ , spadając poniżej zera dla wartości  $J < 0.26$ . Nasuwa się tu wniosek, iż dla dużych obciążeń kręgu śruby naporem następuje przyspieszenie napływu wody do kręgu śruby. Dla wartości  $0.4 < J$  wartość współczynnika nadążającego podu utrzymuje się mniej, więcej na stałym poziomie, niezależnym od obciążenia - Rys.11.4.

**- przykłady symulacji CFD (Fluent 6.2) opływu bryły podu:**

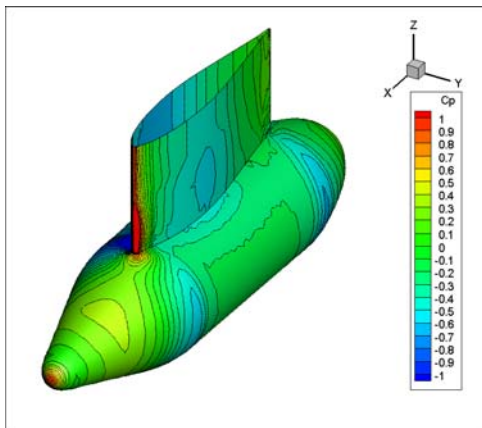


Rys.11.5

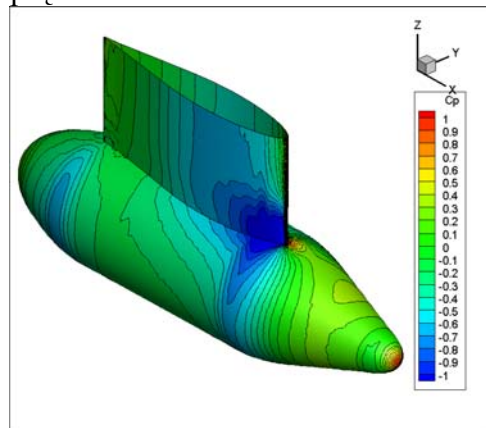


Rys.11.6

**Obraz linii prądu**

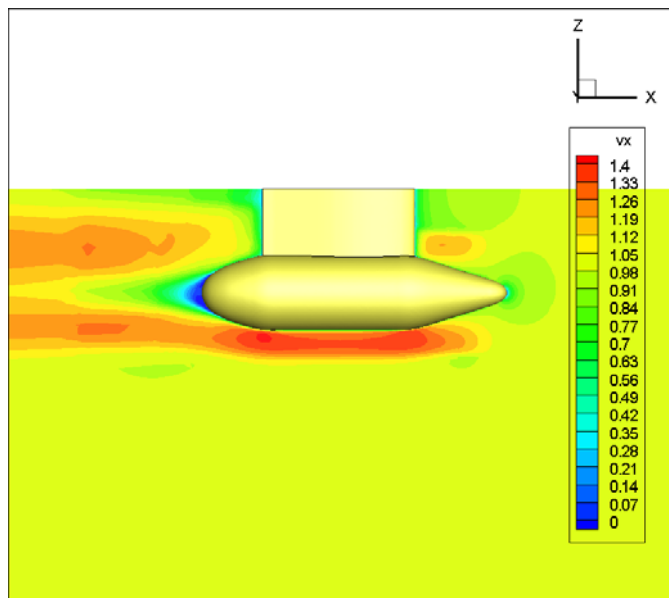


Rys.11.7

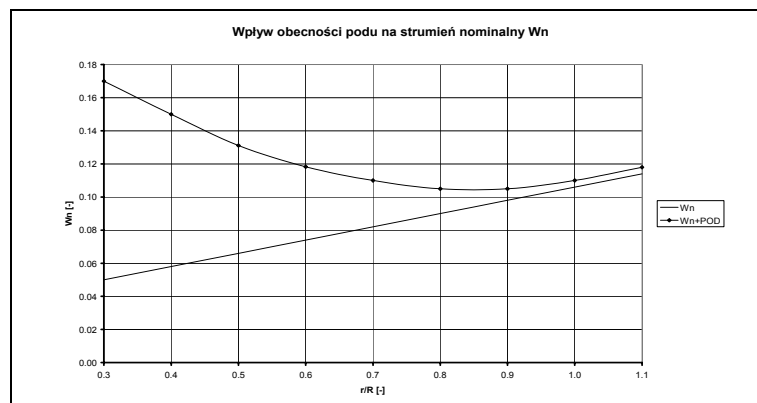


Rys.11.8

**Obraz rozkładu ciśnienia na powierzchni bryły podu**



Rys.11.9. Rozkład prędkości w płaszczyźnie symetrii bryły podu



Rys.11.10. Wpływ obecności podu na strumień nominalny [60]

### 11.3.2.2 Relacje pomiędzy charakterystykami podu i śruby podowej [8]

Mając do dyspozycji bazy danych przebadanych modeli śrub podowych oraz zespołów podowych można określić i uogólnić relacje pomiędzy odpowiadającymi sobie charakterystykami hydrodynamicznymi. Jako pierwsze przybliżenie, można założyć relację liniową:

$$K_{TU}(J) / K_{T0} = A \cdot J + B \quad (11.4)$$

$$K_{QU}(J) / K_{Q0} = C \cdot J + D \quad (11.5)$$

Posiadane dane pozwoliły na określenie metodą regresji następujące relacje pomiędzy charakterystykami:

- współczynnik naporu śruby podowej  $K_{TU} = f(J)$ :

$$0.3 < J < 1.0$$

$$1.0 < P/D < 1.6$$

$$0.9 < J < 1.1$$

$$K_{TU} = 0.446 \cdot J + 0.932$$

$$K_{TU} = 2.83 \cdot J - 1.54$$

$$0.3 < J < 0.9$$

$$K_{TU} = 0.545 \cdot J + 0.881$$

$$0.8 < P/D < 1.0$$

$$0.9 < J < 1.1$$

$$K_{TU} = 3.386 \cdot J - 2.047$$

- współczynnik momentu śruby podowej  $K_{QU} = f(J)$ :

$$0.3 < J < 1.2$$

$$K_{QU} = 0.180 \cdot J + 0.95$$

$$1.2 < P/D < 1.6$$

$$1.1 < J < 1.4$$

$$K_{QU} = 1.972 \cdot J - 1.184$$

$$1.0 < P/D < 1.2$$

$$0.3 < J < 1.0$$

$$K_{QU} = 0.249 \cdot J + 0.950$$

$$0.9 < J < 1.1$$

$$K_{QU} = 2.225 \cdot J - 0.863$$

$$0.3 < J < 0.9$$

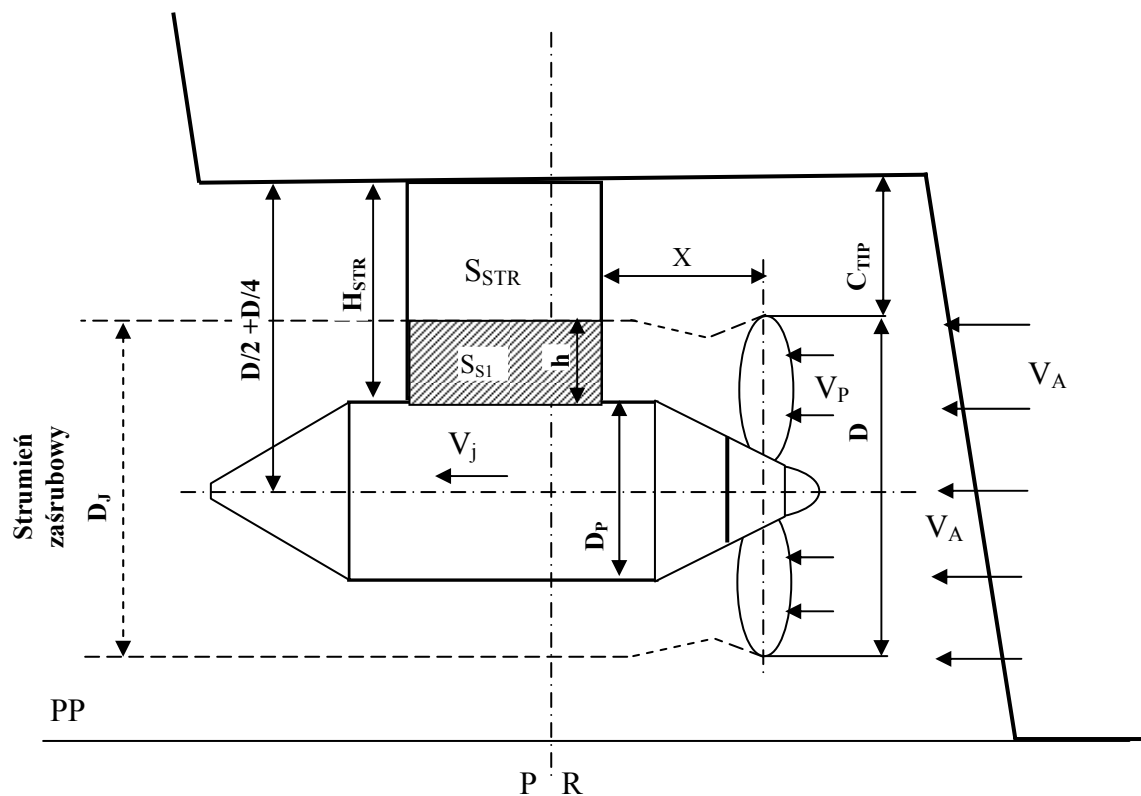
$$K_{QU} = 0.243 \cdot J + 0.940$$

$$0.8 < P/D < 1.0$$

$$0.8 < J < 1.0$$

$$K_{QU} = 3.882 \cdot J - 2.362$$

### 11.3.3 Opór obudowy podu w strumieniu zaśrubowym



Rys. 11.11. Opływ bryły podu strumieniem zaśrubowym

- prędkość  $V_A$ :

$$V_A = V_S (1 - w_U) \quad (11.6)$$

- **prędkość  $V_P$ :**

$$V_P = V_A (1 - w_P) \quad (11.7)$$

- **prędkość w kręgu śruby:**

$$V_{SR} = V_P + \frac{V_i}{2} \quad (11.8)$$

- **prędkość indukowana przez śrubę podową  $V_i$ :**

$$V_i = V_P (1 + C_T)^{0.5} - V_P = V_P [(1 + C_T)^{0.5} - 1] \quad (11.9)$$

$$\text{gdzie: } C_T = \frac{T}{\frac{1}{2} V_A^2 \pi R_P^2} \quad (11.10)$$

- **prędkość wody w strumieniu zaśrubowym  $V_j$ :**

$$V_j = V_P (1 + C_T)^{0.5} \quad (11.11)$$

- **po podstawieniu, warunek ciągłości przyjmuje postać:**

$$V_{SR} \pi (R_P^2 - r_h^2) = V_j \pi (R_j^2 - r_G^2), \text{ gdzie: } D_P = 2 r_G \\ V_P [(1 + C_T)^{0.5} + 1] (R_P^2 - r_h^2) = V_P (1 + C_T)^{0.5} (R_j^2 - r_G^2) \quad (11.12)$$

- **promień strumienia zaśrubowego:**

$$R_j^2 = \frac{1}{2} \left[ \frac{1}{(1 + C_T)^{0.5}} + 1 \right] \left[ \left( \frac{D_P}{2} \right)^2 - r_h^2 \right] + \left( \frac{D_P}{2} \right)^2 \quad (11.13)$$

$$S_{S1} = \frac{h}{H_{STR}} S_{STR}, \text{ gdzie: } H_{STR} = 0.75 D - \frac{D_P}{2} - \text{przy } C_{TIP} = 0.25 D; \quad h = R_j - \frac{D_P}{2}$$

$$S_{S1} = \frac{2R_j - D_P}{1.5D - D_P} S_{STR} \quad (11.14)$$

- **współczynniki oporu tarcia (wg. ITTC 2008):**

- poza strumieniem zaśrubowym

$$\underline{Rn < 5.25 \cdot 10^4} \quad C_F = \frac{1.327}{Rn^{0.5}}$$

$$\underline{5.25 \cdot 10^4 \leq Rn \leq 2.0 \cdot 10^6} \quad C_F = C_F^* \cdot 10^{0.117 \cdot f(Rn)}$$

$$f(Rn) = [LOG Rn - LOG(2.0 \cdot 10^6)]^2 \\ C_F^* = \frac{1}{[3.46 LOG(2.0 \cdot 10^6) - 5.6]^2} - \frac{1700}{2.0 \cdot 10^6}$$

- wewnątrz strumienia zaśrubowego:

$$\underline{10^4 < Rn} \quad C_F = \frac{1}{(3.46 LOG Rn - 5.6)^2} - \frac{1700}{Rn}$$

### 11.3.4 Elementy współpracy śruba – płetwa

Współpraca śruby napędowej z płetwą steru może być modelem współpracy śruby podowej ze wspornikiem lub płetwą podową leżącymi w strumieniu zaśrubowym. Przebadany zestaw kombinacji zmiennych parametrów śruby, płetwy sterowej oraz odległości pomiędzy tymi urządzeniami tworzy bazę danych do uniwersalnego wykorzystania. Zwłaszcza, gdy wartości tych parametrów przyjmują typowe wielkości.

- wpływ konfiguracji śruba - płetwa na charakterystyki naporu płetwy [12],[55]:

$$Kr = Rd/(\rho D^4 n^2) \quad (11.15)$$

gdzie: Rd – napór płetwy

Tabela 11.1 Współczynnik Kr płetwy

P/D = 1.4 t/c = 0.18			
	x/D=0.50	x/D=0.30	x/D=0.10
J	10 <sup>3</sup> Kr	10 <sup>3</sup> Kr	10 <sup>3</sup> Kr
0.40	12.77	8.17	-1.07
0.50	8.89	4.80	-3.84
0.60	5.16	2.07	-6.04
0.70	2.16	-0.24	-7.67
0.80	-0.08	-2.12	-8.87
0.90	-1.49	-3.56	-9.68
1.00	-2.59	-4.37	-10.13
1.10	-3.12	-4.91	-10.24
1.20	-3.21	-5.08	-10.07
1.30	-2.96	-4.93	-9.47
1.40	-2.43	-4.56	-8.60

- zmiana sprawności śruby pod wpływem obecności płetwy:

$$k = \frac{\eta_{Sys}}{\eta_0} = \frac{J * (Kt + \Delta kt) / 2\pi * (Kq + \Delta kq)}{J * Kt / 2\pi * Kq} = \frac{1 + \Delta Kt / kt}{1 + \Delta Kq / kq} \quad (11.16)$$

-gdzie:

- $\eta_{Sys}$  - sprawność śruby we współpracy z płetwą
- $\eta_0$  - sprawność śruby odosobnionej

### 11.4 Wpływ efektu skali obudowy na osiągi pędnika podowego [1],[13]

W badaniach napędu podowego, cały zespół podowy tzn. śruba napędowa i obudowa (gondola, wspornik, płetwy) są traktowane jako zintegrowany pędnik o określonych charakterystykach hydrodynamicznych  $K_{TUOM}$  i  $K_{QUOM} = f(J)$ . Jednakże duża powierzchnia zwilżona zespołu podowego wywołuje potrzebę specyficznego uwzględniania oporu lepkościowego całej obudowy przy przeliczaniu na skalę rzeczywistą. Sprowadza się to do wprowadzenia dodatkowej poprawki do współczynnika naporu podu w skali statku, oznaczanej jako  $\Delta K_{T2}$ .

$$K_{TUOS} = K_{TUOM} - \Delta K_{T1} + \Delta K_{T2} \quad (11.17)$$

$$K_{QUOS} = K_{QUOS} - \Delta K_{Q1} \quad (11.18)$$

Poprawki dla samej śruby są określone w postaci porówek  $\Delta K_{T1}$  i  $\Delta K_{Q1}$  wyznaczanych tak, jak w metodzie ITTC-78.

Poprawki dla obudowy podu wynikają z różnicy liczb Reynoldsa modelu podu i podu rzeczywistego, a więc i różnicy współczynników tarcia, więc mogą być obliczone analogicznie do efektu skali na kadłubie statku. Zgodnie z powyższym „przyrost” naporu podu wynikający ze zmniejszenia oporu obudowy, jest równy:

$$\Delta T_2 = \Delta R_{Pod} = 0.5(C_{FUOM} - C_{FUOS})V_F^2 S_{UNIT} \rho \quad (11.19)$$

$$S_{UNIT} = S_{BODY} + S_{STRUT} \quad (11.20)$$

$$\Delta K_{T2} = \Delta T_2 / (\rho n^2 D^4) \quad (11.21)$$

Biorąc pod uwagę, że obudowa podu jest złożona z dwóch głównych elementów, o zróżnicowanych kształtach, korektę oporów obudowy podu oblicza się oddzielnie dla gondoli i wspornika:

$$\Delta T_2 = \Delta R_2 = \Delta R_{BODY} + \Delta R_{STRUT} \quad (11.22)$$

- gdzie:

$$\Delta R_{BODY} = (1 + k_{BODY}) \left( \frac{1}{2} \rho V_j^2 S_{BODY} \right) [C_{FBM} - C_{FBS}] \quad (11.23)$$

$$k_{BODY} = 1.5 \left( \frac{D}{L} \right)^{\frac{3}{2}} + 7 \left( \frac{D}{L} \right)^3$$

- oraz:

$$\Delta R_{STRUT} = (1 + k_{STRUT}) \left( \frac{1}{2} \rho V_j^2 S_{S1} + \frac{1}{2} \rho V_P^2 S_{S2} \right) [C_{FSM} - C_{FSS}] \quad (11.24)$$

$$k_{STRUT} = 2\delta_s + 60(\delta_s)^4 \quad \delta_s = t/c \quad (11.25)$$

Ponieważ tylko część obudowy podu ciągnącego o powierzchni zwilżonej  $S_{S1}$  jest opływana z prędkością  $V_j$ , a część o powierzchni zwilżonej  $(S_{STRUT} - S_{S1}) = S_{S2}$  z prędkością  $V_P$ , wzór  $\Delta T_2$  przybierze postać:

$$\begin{aligned} \Delta T_2 = & (1 + k_{STRUT}) \left( \frac{1}{2} \rho [V_j^2 S_{S1} + V_P^2 S_{S2}] \right) [C_{FSM} - C_{FSS}] + \\ & + (1 + k_{BODY}) \left( \frac{1}{2} \rho V_j^2 S_{BODY} \right) [C_{FBM} - C_{FBS}] \end{aligned} \quad (11.26)$$

- gdzie:

$C_{FSM}, C_{FBM}$  - współcz. tarcia wg ITTC-57 dla liczby  $R_{num}$  elementów obudowy modelu podu

$C_{FSS}, C_{FBS}$  - współcz. tarcia wg ITTC-57 dla liczby  $R_{nus}$  elementów obudowy podu rzeczywistego

$$R_{nu} = \frac{l_p V_P}{\nu} \quad \text{- odpowiednio dla modelu i statku.}$$

Reasumując, uwzględnienie efektu skali obudowy podu sprowadza się do korekty sprawności napędowej statku podowego:

$$\eta_D = \eta_H \eta_R \eta_O$$

$$\eta_0 = J K_{TUOS} / (2\pi K_Q) \quad - \text{gdzie: } K_{TUOS} = K_{TUOM} - \Delta K_{T1} + \Delta K_{T2} \quad (11.27)$$

## 12. METODYKA PROGNOZOWANIA OSIĄGÓW STATKU PODOWEGO

### 12.1 Schemat wyjściowy:

#### 12.1.1 Wyjściowe dane projektowe

##### Dane kadłuba:

Wymiary główne, współczynniki pełnotliwości, części wystające

##### Śruby podowe:

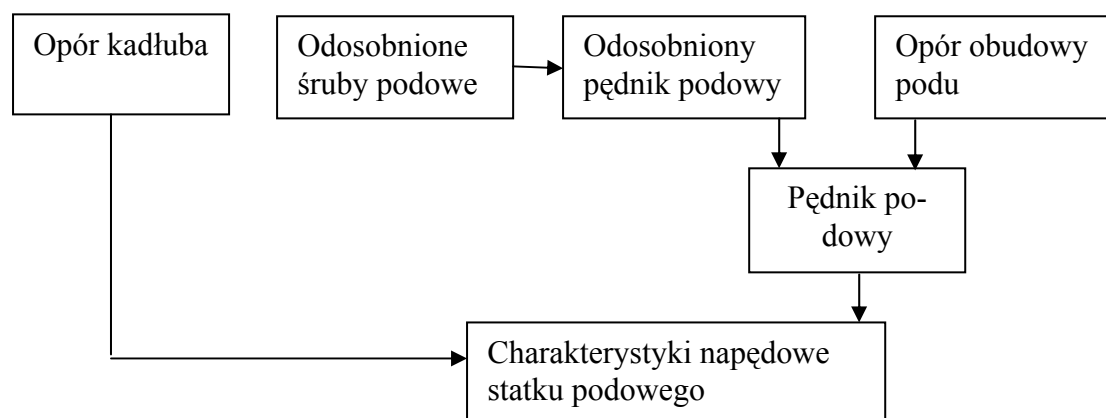
Średnica, współczynnik skoku, współczynnik powierzchni, średnica piasty, liczba skrzydeł

##### Pędnik podowy:

Długość obudowy, średnica obudowy, powierzchnia gondoli, powierzchnia wspornika, kąt zaostrenia gondoli

#### 12.1.2 Charakterystyki hydrodynamiczne

Charakterystyki hydrodynamiczne wchodzące w skład prognozy napędowej uwzględniają charakterystyki oporowe gołego kadłuba, bez pędników podowych oraz charakterystyki napędowe pędników podowych przeliczone na skalę statku. Charakterystyki naporu pędnika podowego wyznacza się poprzez odjęcie, od charakterystyk naporu śruby podowej, oporu dynamicznego obudowy podowej. Charakterystyki momentu pędnika podowego pozostają takie same, jak w badaniach podu swobodnego. Charakterystyki naporu są przedmiotem przeliczenia na skalę rzeczywistą z uwzględnieniem efektu skali. Moment jest przeliczany, podobnie, jak przy napędzie konwencjonalnym.

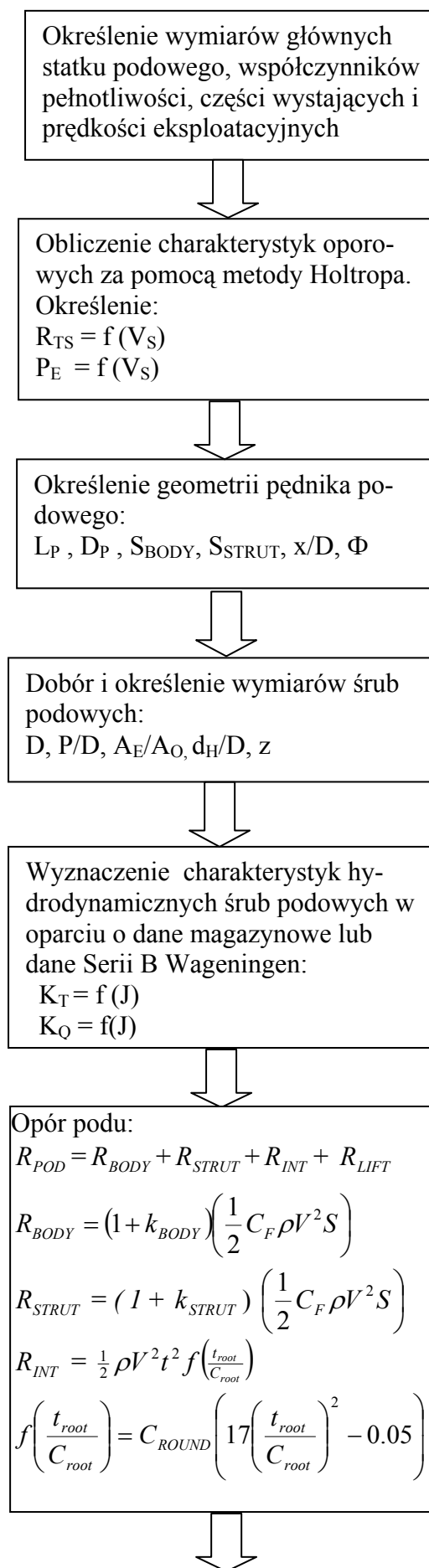


Rys. 12.1 Schemat metodyki

### 12.2 Schemat procedury prognozowania

W poniższym diagramie przedstawiono fazy prognozowania przybliżonego charakterystyk napędowych statku z napędem wielopodowym w oparciu o wyniki otrzymane z wcześniejszych badań eksperymentalnych.





↓

Wyznaczenie charakterystyk hydrodynamicznych podu odosobnionego:

$$K_{TUO}(J_i) = K_T(J_i) (A J_i + B)$$

$$K_{QUO}(J_i) = K_Q(J_i)(C J_i + D)$$

↓

Efekt skali podowego:

$$\Delta K_{T_2} = \Delta T_2 / (\rho n^2 D^4)$$

$$\Delta T_2 = \Delta R_2 = \Delta R_{BODY} + \Delta R_{STRUT}$$

$$\Delta R_{BODY} = (1 + k_{BODY}) \left( \frac{1}{2} \rho V_{PS}^2 S_{BODY} \right) [C_{FM} - C_{FS}]$$

$$\Delta R_{STRUT} = (1 + k_{STRUT}) \left( \frac{1}{2} \rho V_{PS}^2 S_{STRUT} \right) [C_{FM} - C_{FS}]$$

↓

Charakterystyki napędowe statku podowego:

$\eta_D = \eta_H \eta_R \eta_O$  gdzie:  $\eta_O = J K_{TUOS} / (2\pi K_Q)$

$t_M = t_S = t$ ;  $\eta_{RPM} = \eta_{RPS} = \eta_{RP}$ ;  $w_{TM} = w_{TS} = w_T$

$$\frac{K_{TPS}}{J_{TS}^2} = \frac{S_S}{2D_S^2} \cdot \frac{C_{TS}}{(1-t)(1-w_T)^2}; \quad n_S = \frac{(1-w_T)V_S}{J_{TS} D_S}$$

$$P_{DS} = 2\pi \rho_S D_S^5 n_S^3 K_{QPOS} / \eta_{RP} \cdot 10^{-3} \quad [kW]$$

$$T_{PS} = \left( \frac{K_{TPS}}{J_{TS}^2} \right) J_{TS}^2 \rho_S D_S^4 n_S^2 \cdot 10^{-3} \quad [kN]$$

### 12.3 Identyfikacja i opracowanie modułów uzupełniających [1],[45]

Z szeregu uwzględnianych składników oporu zespołu podowego, opór wspornika stwarza największe problemy w jego określeniu. Wynika to z faktu, iż pracuje on w skróconym strumieniu zaśrubowym, co pociąga za sobą generowanie, oprócz oporu interakcji, także siły nośnej. Może mieć ona kierunek zwiększający lub zmniejszający napór podu.

$$R_{POD} = R_{BODY} + R_{STRUT} + R_{INT} + R_{LIFT} \quad (12.1)$$

$$R_{BODY} = (1 + k_{BODY}) \left( \frac{1}{2} C_F \rho V^2 S \right) = (1 + k_{BODY}) \left( \frac{1}{2} c_{FBODY} \rho V_j^2 S_{BODY} \right)$$

$$R_{STRUT} = (1 + k_{STRUT}) \left( \frac{1}{2} C_F \rho V^2 S \right) = (1 + k_{STRUT}) \left( \frac{1}{2} \rho [C_{FST1} V_j^2 S_{S1} + C_{FST2} V_P^2 S_{S2}] \right) \quad (12.2)$$

$$R_{INT} = \frac{1}{2} \rho V_j^2 t^2 f\left(\frac{t_R}{C_R}\right), \quad \text{gdzie: } f\left(\frac{t_R}{C_R}\right) = C_{ROUND} \left(17 \left(\frac{t_R}{C_R}\right)^2 - 0.05\right) \quad (12.3)$$

Obydwa człony dotyczące współnika  $R_{STRUT}$  oraz  $R_{LIFT}$ , związane ze skreconym strumieniem zašrubowym, można połączyć i zastąpić elementami interakcji śruba - płyt o odpowiadającej względnej grubości, odległości i współczynnika skoku;

$$K_R \rho D^4 n^2 = \frac{1}{2} \rho V^2 S_{pl} C_{FPL} X$$

$$X = 2 \frac{K_R D^4 n^2}{C_{FPL} V^2 S_{PL}} = \frac{2 K_R D^2}{C_{FPL} J^2 S_{PL}} \quad (12.4)$$

$$R_{STRUT} + R_{LIFT} = (1 + k_{STRUT}) \left(\frac{1}{2} C_{FPL} \rho V_j^2 S_{STR}\right) = (1 + k_{STRUT}) \left(\frac{1}{2} X C_{FSTR} \rho V_j^2 S_{STR}\right) \quad (12.5)$$

### 13. WERYFIKACJA PROCEDURY

#### 13.1 Dane statku wzorcowego

Do celów sprawdzenia dokładności prognozowania wybrano przebadany basenowo Wycieczkowiec. Jego wymiary główne podano poniżej:

Tabela 13.1 Wymiary analizowanego statku

TypStatku	Lpp	B	T	Wyp.	Pzwiłż	Cb	Cm	Cp	Cw	i <sub>E</sub>	LCB	SB	zanSB	hB
	[m]	[m]	[m]	[m <sup>3</sup> ]	[m <sup>2</sup> ]	[-]	[-]	[-]	[-]	[deg]	[%]	[m]	[m]	[m]
Wycieczkowiec	272.00	32.20	8.00	43990	10360	0.628	0.991	0.634	0.876	8.30	-4.33	32.0	32.0	5.2

#### 13.2 Charakterystyki oporowe [14],[16]

Charakterystyki oporowe obliczono w oparciu o procedurę Holtrop 84 przy założeniu kształtu rufy typu Pram+gondola. Ponieważ powyższa procedura w sposób przewymiarowany uwzględnia wpływ gruszki dziobowej na osiągi oporowe, do obliczeń wprowadzono zmniejszony o połowę przekrój gruszki.

WSTEPNA PROGNOZA NApEDOWA - METODA HOLTROP84

STATEK: Wycieczkowiec

Tabela 13.2

Vs	Vs	Rts	Pe
[knt]	[m/s]	[kN]	[kW]
16	8.23	881	7249
18	9.26	1087	10062
20	10.29	1320	13579
22	11.32	1583	17912
24	12.35	1875	23149
26	13.38	2208	29535

### 13.3 Charakterystyki podowe

#### 13.3.1 Charakterystyki śrub podowych

- dane przyjętego modelu śruby podowej:

$$D = 229.0 \text{ [mm]}, P/D = 1.055 \text{ [-]}, A_E/A_0 = 0.753 \text{ [-]}, d_H/D = 0.25 \text{ [-]}$$

- charakterystyki hydrodynamiczne śruby podowej – warunki basenowe:

Tabela 13.3 Charakterystyki śruby podowej

J	$K_{T0}$	$10K_{Q0}$	$\eta_0$
0.00	0.564	0.808	0.000
0.10	0.516	0.748	0.110
0.20	0.465	0.686	0.216
0.30	0.414	0.623	0.317
0.40	0.361	0.561	0.410
0.50	0.309	0.498	0.494
0.60	0.258	0.436	0.566
0.70	0.209	0.374	0.624
0.80	0.161	0.308	0.665
0.90	0.109	0.237	0.660
1.00	0.053	0.157	0.532

Tabela 13.4 Charakterystyki śruby podowej skorygowane o efekt tarcia skrzydeł

J	$K_{T0} + \Delta K_{T1}$	$10K_{T1} + \Delta K_{Q1}$	$\eta_0$
0.00	0.566	0.800	0.000
0.10	0.518	0.740	0.111
0.20	0.467	0.678	0.219
0.30	0.416	0.615	0.323
0.40	0.363	0.553	0.418
0.50	0.311	0.490	0.505
0.60	0.260	0.428	0.579
0.70	0.211	0.366	0.641
0.80	0.163	0.300	0.690
0.90	0.111	0.229	0.692
1.00	0.055	0.149	0.584

#### 13.3.2 Charakterystyki odosobnionego pędnika podowego

- wymiary modelu pędnika podowego:

$$L_{PM} = 0.370 \text{ m}$$

$$L_{STM} = 0.290 \text{ m}$$

$$D_{BODY} = 0.115 \text{ m}$$

$$S_{BODY} = 0.121 \text{ m}^2$$

$$S_{STRUT} = 0.056 \text{ m}^2$$

$$t_R / c_R = 0.18 \text{ -}$$

- przybliżone charakterystyki hydrodynamiczne modelu podu [8]:

$$K_{TU0}(J_i) = K_{T0}(J_i) \cdot (A \cdot J_i + B) \quad A=0.446 \quad B=0.932 \quad (13.1)$$

$$K_{QU0}(J_i) = K_{Q0}(J_i) \cdot (C \cdot J_i + D) \quad C=0.249 \quad D=0.950 \quad (13.2)$$

Tabela 13.5 Charakterystyki zespołu podowego

J	$K_{TPP0}'$	$10K_{QU0}'$	$\eta_0$
[-]	[-]	[-]	[-]
0.00	0.526	0.768	0.000
0.10	0.504	0.729	0.110
0.20	0.475	0.686	0.220
0.30	0.441	0.638	0.330
0.40	0.401	0.589	0.434
0.50	0.357	0.535	0.531
0.60	0.309	0.479	0.617
0.70	0.260	0.420	0.689
0.80	0.207	0.354	0.747
0.90	0.145	0.278	0.749
1.00	0.073	0.188	0.618

### 13.3.3 Opór obudowy podu [1]

$$R_{POD} = R_{BODY} + R_{STRUT} + R_{INT} + R_{LIFT} \quad (13.3)$$

$$R_{POD} = (1 + k_{BODY}) \left( \frac{1}{2} c_{FBODY} \rho V_j^2 S_{BODY} \right) + (1 + k_{STRUT}) \left( \frac{1}{2} \rho [X C_{FST1} V_j^2 S_{S1} + C_{FST2} V_P^2 S_{S2}] \right) + \frac{1}{2} \rho V^2 t^2 f \left( \frac{t_{root}}{C_{root}} \right) \quad (13.4)$$

- gdzie:

$$f \left( \frac{t_{root}}{C_{root}} \right) = C_{ROUND} \left( 17 \left( \frac{t_{root}}{C_{root}} \right)^2 - 0.05 \right), \quad C_{ROUND} - \text{z przedziału } 0.6 - 1.0, \quad (13.5)$$

$$C_{FST} = 0.075 / (\log R_{nST} - 2)^{0.5}, \quad R_{nST} = V_{ST} C_{ST} / \nu$$

### 13.3.4 Charakterystyki pędnika podowego [1]

Charakterystyki naporu pędnika podowego wyznacza się poprzez odjęcie charakterystyk oporowych podu od charakterystyk naporu rury podowej; pozostaje on przeliczony na skalę rzeczywistą przy uwzględnieniu efektu skali. Moment pędnika pozostaje niezmienny i pozostaje taki sam, jak dla zespołu; przelicza się go na skalę rzeczywistą podobnie, jak w przypadku napędu konwencjonalnego.

Tabela 13.5 Charakterystyki obliczeniowe pędnika podowego

J	R <sub>STRUT</sub>	R <sub>BODY</sub>	R <sub>INT</sub>	R <sub>UNIT</sub>	K <sub>R</sub>	K <sub>TPP'</sub>	K <sub>TU0'</sub>	10K <sub>QU0'</sub>
[-]	[N]	[N]	[N]	[N]	[-]	[-]	[-]	[-]
0.10	0.731	8.331	15.88	24.31	0.0270	0.504	0.477	0.729
0.20	2.049	7.765	14.68	22.65	0.0265	0.475	0.448	0.686
0.30	3.099	7.309	13.72	21.33	0.0261	0.441	0.415	0.638
0.40	4.039	6.936	12.94	20.28	0.0259	0.401	0.375	0.589
0.50	4.905	6.691	12.44	19.63	0.0260	0.357	0.331	0.535
0.60	5.749	6.575	12.20	19.37	0.0266	0.309	0.282	0.479
0.70	6.725	6.605	12.26	19.56	0.0277	0.260	0.232	0.420
0.8	8.005	6.765	12.59	20.16	0.0296	0.207	0.177	0.354
0.90	9.711	6.982	13.04	20.92	0.0322	0.145	0.113	0.278
1.00	15.078	7.253	13.61	21.86	0.0389	0.073	0.034	0.188

-gdzie:

R<sub>STRUT</sub> – opór wspornika podu

R<sub>BODY</sub> – opór gondoli

R<sub>INT</sub> – opór interakcji wspornik-gondola

R<sub>U</sub> – opór całkowity podu

K<sub>R</sub> – współczynnik oporu podu

- skorygowane charakterystyki pędnika podowego:

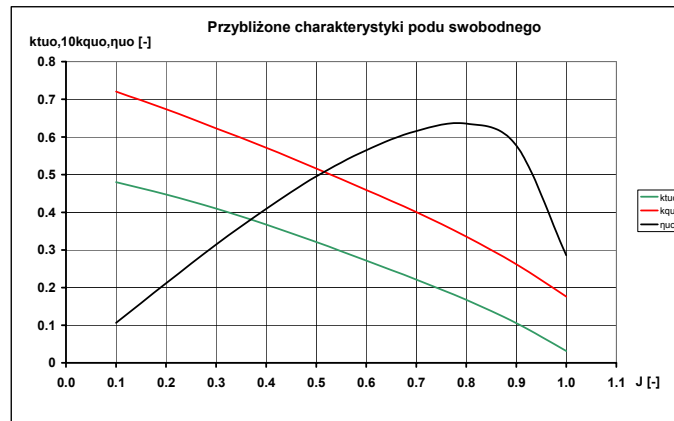
Obliczeniowe charakterystyki pędnika podowego zostały skorygowane w oparciu o statystycznie określoną formułę:

$$K_{TU0} = K_{TU0}' / (0.0943 \cdot J + 0.984) \quad (13.6)$$

$$K_{QU0} = K_{QU0}' / (0.0615 \cdot J + 1.0058) \quad (13.7)$$

Tabela 13.6 Skorygowane charakterystyki modelu pędnika podowego

J	K <sub>TU0</sub>	10K <sub>QU0</sub>	η <sub>U0</sub>	K <sub>TU0</sub> /J <sup>2</sup>
[-]	[-]	[-]	[-]	[-]
0.10	0.480	0.720	0.106	48.013
0.20	0.447	0.674	0.211	11.180
0.30	0.410	0.623	0.314	4.554
0.40	0.367	0.572	0.409	2.294
0.50	0.321	0.516	0.495	1.284
0.60	0.271	0.459	0.564	0.754
0.70	0.221	0.400	0.616	0.451
0.80	0.167	0.336	0.636	0.262
0.90	0.106	0.262	0.577	0.130
1.00	0.032	0.176	0.286	0.032



Rys.13.1. Charakterystyki pędnika podowego

-wpływ efekty skali obudowy pędnika podowego:

Wpływ efektu skali obudowy pędnika podowego jest uwzględniany poprzez określenie i wprowadzenia współczynnika korekcyjnego  $\Delta K_{T2}$  zgodnie z wzorami (11.19) i (11.21)

Tabela 13.7 Charakterystyki pędnika podowego-skala statku

J	$K_{TU0M}$	$10K_{QU0}$	$\Delta K_{T2}$	$K_{TU0S}$	$K_{TU0M}/K_{T0}$
[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]
0.1	0.480	0.720	0.0054	0.486	1.011
0.2	0.447	0.674	0.0059	0.453	1.013
0.3	0.410	0.623	0.0063	0.416	1.015
0.4	0.367	0.572	0.0067	0.374	1.018
0.5	0.321	0.516	0.0072	0.328	1.022
0.6	0.271	0.459	0.0077	0.279	1.028
0.7	0.221	0.400	0.0084	0.230	1.038
0.8	0.167	0.336	0.0094	0.177	1.056
0.9	0.106	0.262	0.0109	0.116	1.103
1.0	0.032	0.176	0.0207	0.052	1.655

## 13.4 Charakterystyki napędowe statku podowego [7]

### 13.4.1 Współczynniki napędowe kadłuba

- współczynnik ssania kadłuba:

$$t_u = 0.21593 + 0.099768 C_B - 0.56056 D / (BT)^{0.5} = 0.0481 \quad (13.8)$$

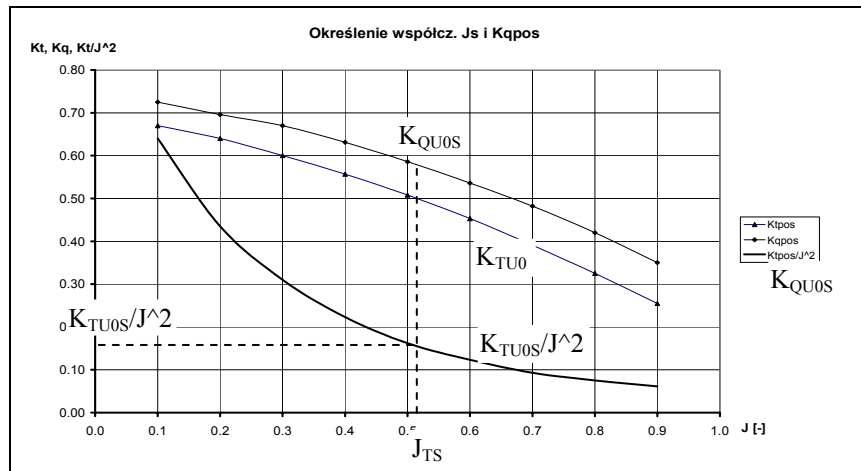
-współczynnik strumienia nadążającego kadłuba:

$$w_u = -0.21035 + 0.18053 C_B + 56.724 C_B C_V + 0.18566 D / (BT)^{0.5} + 0.090198 C_{tip}/D = 0.0744 \quad (13.9)$$

-sprawność rotacyjna kadłuba:

$$\eta_{RU} = 1.493 - 0.18425C_p - 0.4278LCB - 0.33804P/D = 1.02 \quad (13.10)$$

### 13.4.2 Weryfikacja charakterystyk napędowych



Rys. 13.2. Przykład określania współczynników napędowych [61]

Charakterystyki napędowe określa się wychodząc z tożsamości obciążenia kręgu śruby naporem, zarówno śruby podu odosobnionego, jak i w warunkach pracy pędnika za kadłubem.

$$\frac{K_{TUS}}{J_{TS}^2} = \frac{S_S}{2D_S^2} \cdot \frac{C_{TS}}{(1-t)(1-w_T)^2} \quad (13.11)$$

Wchodząc z wyliczoną wartością współczynnika  $K_{TUS}/J_{TS}^2$  na krzywą funkcji pomocniczej odczytuje się odpowiadającą wartość  $J_{TS}$ , a następnie z charakterystyki hydrodynamicznej swobodnego zespołu podowego w skali rzeczywistej znajduje się odpowiadającą wartość współczynnika momentu  $K_{QUOS}$ . Przedstawiono to na Rys.13.2.

W oparciu o odczytane współczynniki można obliczyć charakterystyki napędowe statku:

– liczbę obrotów śruby:

$$n_S = \frac{(1-w_T)V_S}{J_{TS} D_S} \quad (13.12)$$

– moc doprowadzoną:

$$P_{DS} = 2\pi\rho_S D_S^5 n_S^3 K_{QUOS} / \eta_{RU} \cdot 10^{-3} \quad (13.13)$$

– ogólną sprawność napędową:

$$\eta_{UD} = \frac{P_E}{P_{DS}} \quad (13.14)$$



Tabela 13.8 Przybliżone charakterystyki napędowe Wycieczkowca:

Vs	R <sub>TS</sub>	P <sub>E</sub>	10 <sup>3</sup> C <sub>TS</sub>	K <sub>TS</sub> /J <sub>TS</sub> <sup>2</sup>	J <sub>TS</sub>	K <sub>TU0S</sub>	K <sub>QU0S</sub>	N <sub>S</sub>	P <sub>DS</sub>	η <sub>DU</sub>
[knt]	[kN]	[kW]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[1/s]	[kW]	[-]
16	881	7249	2.446	0.266	0.803	0.178	0.0335	1.551	10122	0.716
18	1087	10062	2.384	0.259	0.805	0.176	0.0333	1.740	14219	0.708
20	1320	13579	2.346	0.255	0.809	0.174	0.0330	1.924	19044	0.713
22	1583	17912	2.325	0.253	0.812	0.173	0.0328	2.109	24916	0.719
24	1875	23149	2.314	0.252	0.814	0.172	0.0327	2.295	32012	0.723
26	2208	29535	2.322	0.252	0.812	0.173	0.0328	2.492	41127	0.718

### 13.4.3 Ocena dokładności prognozowania

#### 13.4.3.1 Wprowadzenie

Z tytułu przyjętych założeń nie było możliwe określenie niepewności prognozowania wykorzystując informacje o błędach systematycznych i przypadkowych, które były związane z wynikami źródłowymi, wykorzystanymi do opracowania metody prognozowania. Jednak, przy założeniu, mniej-więcej, zbliżonej jakości prac eksperymentalnych, można było scalić i obrabiać łącznie wyniki pozyskane z różnych źródeł. Przy takich uwarunkowaniach można porównać i ocenić jakość wyników prognoz określonych przy użyciu opracowanej metody poprzez wyliczenie błędu względnego dla wybranych parametrów.

$$\sigma^2 = \frac{1}{N} \frac{\sum_{i=1}^N (X_i - X_{Ri})^2}{X_{Ri}^2} \quad (13.15)$$

-gdzie:

X<sub>i</sub> – wielkość obliczona

X<sub>Ri</sub> – wielkość referencyjna

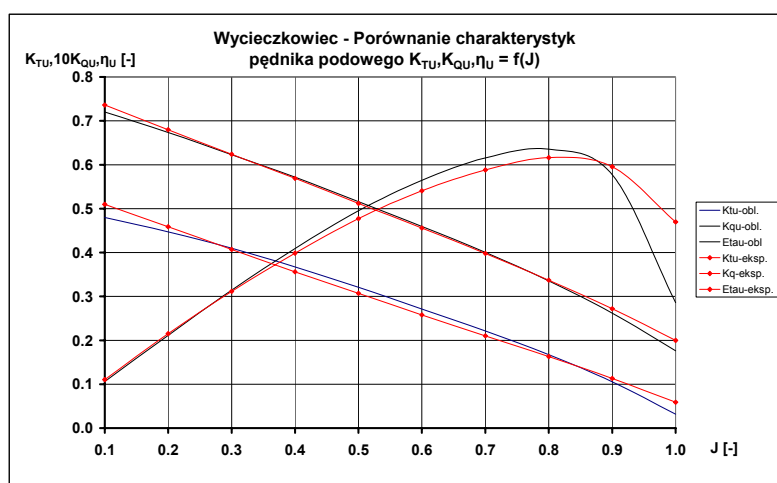
N – ilość porównywanych wielkości

#### 13.4.3.2 Pędnik podowy

Geometria pędników podowych, użytych do analiz, była opisana przy użyciu pięciu współczynników odnoszonych do średnicy użytej śruby podowej. Pewne charakterystyki hydrodynamiczne pędnika podowego nie są określane w sposób bezpośredni, lecz są różnicą pomiędzy charakterystykami śruby podowej i oporem obudowy podu lub naporem pędnika podowego. W przypadku opracowanej metodyki, napór pędnika podowego jest wyliczany jako różnica pomiędzy naporem śruby podowej i oporem bryły podu. Wynika to z faktu, iż charakterystyki oporowe pędników podowych można łatwiej uogólniać niż ich charakterystyki napędowe. Ponadto, napory pędnika i śruby podowej są mierzone bezpośrednio w badaniach modelowych, co powoduje, iż różnica między tymi wielkościami jest stosunkowo stabilna. Przeprowadzone analizy pozwoliły na określenie prognoz dla zdefiniowanego statku i odniesienie ich do wyników adekwatnego eksperymentu.

Tabela 13.9 Porównanie charakterystyk pędnika podowego

J	Charakterystyki obliczeniowe				Eksperyment		
	$K_{TU0}$	$10K_{QU0}$	$\eta_{U0}$	$K_{TU0}/J_T^2$	$K_{TU0}$	$K_{QU0}$	$\eta_{U0}$
[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]
0.10	0.480	0.720	0.106	48.013	0.510	0.736	0.110
0.20	0.447	0.674	0.211	11.180	0.459	0.680	0.215
0.30	0.410	0.623	0.314	4.554	0.407	0.624	0.312
0.40	0.367	0.572	0.409	2.294	0.356	0.569	0.399
0.50	0.321	0.516	0.495	1.284	0.307	0.512	0.477
0.60	0.271	0.459	0.564	0.754	0.258	0.456	0.541
0.70	0.221	0.400	0.616	0.451	0.210	0.398	0.588
0.80	0.167	0.336	0.636	0.262	0.163	0.337	0.616
0.90	0.106	0.262	0.577	0.130	0.113	0.272	0.595
1.00	0.032	0.176	0.286	0.032	0.059	0.200	0.470



Rys.13.3. Porównanie charakterystyk pędnika podowego

- błąd względny współczynnika  $K_{TU0}$ :

$$\sigma_{K_{TU0}} = 15.3 \% \text{ dla } 0.1 < J < 1.0 \text{ oraz } 4.45 \% \text{ dla } 0.1 < J < 0.9$$

- błąd względny współczynnika  $10K_{QU0}$ :

$$\sigma_{K_{QU0}} = 4.04 \% \text{ dla } 0.1 < J < 1.0$$

- błąd względny współczynnika obrotów  $N_U$ :

$$\sigma_{N_U} = 12.8 \% \text{ dla } 0.1 < J < 1.0 \text{ oraz } 3.33 \% \text{ dla } 0.1 < J < 0.9$$

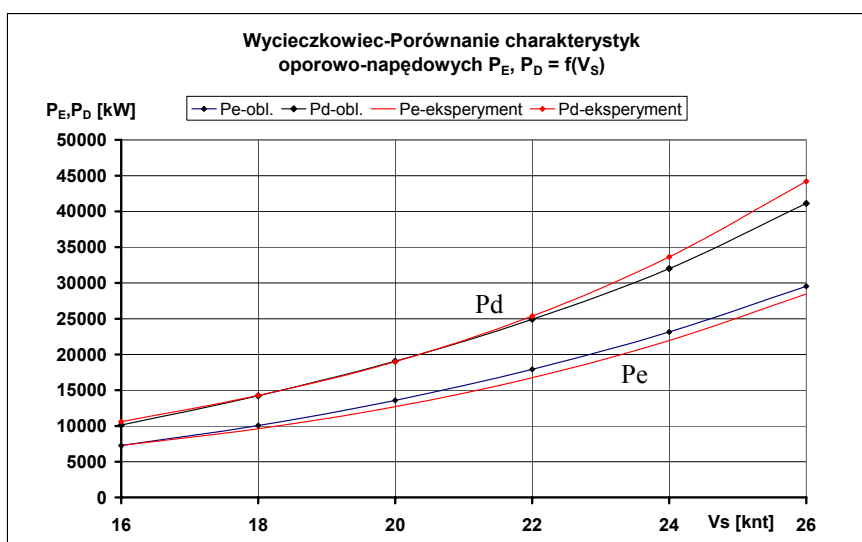
#### 13.4.3.3 Charakterystyki napędowe

Prognozy charakterystyk napędowych bazują, w zakresie obliczeń oporowych, w głównej mierze na powszechnie znanej metodzie Holtropa [14], [16] oraz na metodzie ITTC -78 [2] dla określenia relacji model – statek. Wnosi to, już na starcie, określone niepewności do opra-

cowanej metodyki. Tak, jak powyżej, przeprowadzone analizy pozwoliły na określenie prognoz dla zdefiniowanego statku i odniesienie ich do wyników adekwatnego eksperymentu.

Tabela 13.10 Porównanie charakterystyk

Charakterystyki obliczeniowe					Eksperyment			
<b>Vs</b>	<b>R<sub>TS</sub></b>	<b>P<sub>E</sub></b>	<b>N<sub>s</sub></b>	<b>P<sub>DS</sub></b>	<b>R<sub>ts</sub></b>	<b>P<sub>E</sub></b>	<b>N<sub>s</sub></b>	<b>P<sub>DS</sub></b>
[knt]	[kN]	[kW]	RPM	[kW]	[kN]	[kW]	RPM	kW
16	881	7249	93.1	10122	884	7274	98.3	10599
18	1087	10062	104.4	14219	1037	9606	109.1	14267
20	1320	13579	115.4	19044	1233	12686	120.4	18993
22	1583	17912	126.5	24916	1480	16750	132.5	25352
24	1875	23149	137.7	32012	1778	21949	145.2	33646
26	2208	29535	149.5	41127	2127	28450	158.6	44199



Rys.13.4. Porównanie charakterystyk oporowo-napędowych

Przeprowadzone analizy pozwoliły na określenie prognoz dla zdefiniowanego statku i odniesienie ich do wyników adekwatnego eksperymentu.

- błąd względny w określeniu mocy holowania  $P_E$  :

$$\sigma_{PE} = 5.2 \%$$

- błąd względny w określeniu mocy dostarczonej  $P_{DS}$  :

$$\sigma_{PDS} = 4.0 \%$$

- błąd względny w określeniu obrotów śruby podowej  $N_s$  :

$$\sigma_{NS} = 4.9 \%$$

## 14. ZAKOŃCZENIE

### 14.1 Podsumowanie

W ramach zrealizowanej pracy dokonałem krytycznego przeglądu dostępnych wyników badań statków z napędem podowym oraz zapoznałem się z literaturą fachową opisującą zagadnienia pokrewne. W realnych uwarunkowaniach, głównym źródłem wiedzy projektowej i hydromechanicznej o pędnikach podowych stały się projekty unijne Optipod i Fastpod oraz publikowane prace własne niektórych ośrodków badawczych. Istotną rolę integracyjną oraz informacyjną odegrały opracowania Komitetu Pędników Azymutalnych ITTC, a także dwie konferencje międzynarodowe poświęcone tej tematyce: T-POD 2004 w Newcastle upon Tyne oraz T-POD 2006 w Breście. Bardzo pomocne były także materiały z cyklicznych konferencji poświęconych tematyce projektowej, takich jak PRADS i FAST. Zebrane materiały pozwoliły na wybór, identyfikację i hierarchizację problemów dotyczących istotnych zagadnień badawczych i napędowych statków podowych. Można było z nich wyłowić aktualnie podnoszone problemy badawcze i eksploatacyjne.

Szczupłość dostępnej wiedzy narzucała potrzebę właściwego jej segregowania i wykorzystania. Dlatego dokonałem wstępnego przeglądu i oceny dostępnych komercyjnych baz danych, takich jak Oracle, SQL, Postgre oraz Access. Ważnym kryterium wyboru były: koszty zakupu i wdrożenia, oceniane w kontekście budżetu grantu promotorskiego. W kontekście tych kryteriów, Access okazał się optymalnym narzędziem do celów projektu

Niezależnie od baz danych, istotnym zagadnieniem był przegląd i dobór zaawansowanych narzędzi numerycznych do obróbki ich zasobów. Tutaj istotnym ograniczeniem, oprócz wspomnianych kosztów zakupu i wdrożenia, była mała ilość posiadanych, w miarę kompletnych, zestawów danych. Fakt ten, w wielu przypadkach, uniemożliwiał ich wykorzystanie. Dlatego też, oprócz narzędzi do obróbki statystycznej, zapoznałem się z narzędziami z grupy „sztucznej inteligencji”, takimi jak algorytmy genetyczne (GA), sztuczne sieci neuronowe (SNN) oraz logika rozmyta. Tutaj jednak przeszkodą niemożliwą do pokonania okazały się takie ograniczenia, jak małe rozpowszechnienie oraz stosunkowo wysokie koszty zakupu i wdrożenia, co zmusiło mnie do pewnych rezygnacji i skorzystania z prostszych narzędzi. Tam, gdzie wystąpiły istotne braki wyników badań modelowych, posłużyłem się komercyjnymi narzędziami CFD.

Przegląd dostępnych publikacji oraz posiadane wyniki wskazały szereg interakcji jako tematy do szczegółowych analiz oraz ewentualnie do dalszych badań. Dzięki temu mogłem wstępnie ocenić ich udział w osiągnięciach napędowych, co pozwoliło na, w miarę dokładne, określenie funkcji celu. Wziąłem pod uwagę fakt, iż jednym z głównych celów działalności projektowej jest minimalizacja zapotrzebowania mocy napędowej i oszczędzanie środowiska naturalnego. Istotną wiedzę związaną z napędem podowym gromadziłem według poniższego schematu:

- współpraca pędnika podowego z kadłubem statku;
- wzajemne oddziaływanie pędników podowych;
- współpraca śruby podowej z obudową pędnika;
- charakterystyka pracy śruby podowej w danym polu prędkości;
- inne dostępne charakterystyki hydrodynamiczne opisujące elementy współpracy; śruby podowej z obudową.

W efekcie zgromadziłem niezbędny zakres wiedzy podowej, o masie krytycznej niezbędnej dla dokonania analiz i uogólnień w kierunku typowych oczekiwań projektowo-optymalizacyjnych w branży okrętowej. Pozwoliło mi to na opracowanie zarysu metodyki o konkretnych walorach użytkowych. Może ona skrócić drogę do opracowania wstępnej koncepcji napędu

statku podowego dzięki możliwości podejścia wielokierunkowego, pozwalając na szybką ocenę osiągnięć analizowanej wersji.

Całokształt przeglądu dostępności narzędzi do analiz parametrycznych doprowadził do opracowania metodyki opartej na popularnej metodzie Holtropa w zakresie charakterystyk oporowych, do której opracowałem moduły przetwarzające charakterystyki napędowe podu swobodnego i kadłuba w oparciu o analizy parametryczne. Istotnym novum było wykorzystanie wyników badań z dziedzin pokrewnych, do których należy szeroko rozumiana współpraca śruby napędowej z płetwą sterowa. Do określenia osiągnięć napędowych w skali rzeczywistej wykorzystałem elementy procedury ITTC 78, która jest powszechnie znana i stosowana.

Opracowana metodyka była przedmiotem weryfikacji poprzez opracowanie prognoz dla reprezentatywnego statku podowego. Takim statkiem był wycieczkowiec charakteryzujący się typowymi proporcjami wymiarów głównych i prędkością serwisową na poziomie 25 kn. Porównanie wykazało stosunkowo dużą zbieżność z wynikami eksperymentalnymi, średnio o, około 5%, co jest dość dobrą dokładnością dla prognozowania analitycznego. Dzięki temu, można założyć, iż podniesie ona jakość prognozowania osiągnięć statków podowych na poziomie nie gorszy w stosunku do statków konwencjonalnych. Istotnym osiągnięciem będzie także możliwość poprawy jakości badań modelowych statków z napędem podowym.

## 14.2 Wnioski końcowe

Niniejsza rozprawa posiada, oprócz wspomnianego systematycznego podejścia numerycznego w oparciu o bazy danych, inną ważną cechę, którą jest parametryczne ujęcie całości tematu. Bardzo istotnym novum rozprawy jest wykorzystanie szeroko dostępnych wyników badań parametrycznych współdziałania śruby napędowej z płetwą steru, które modeluje współpracę śruby ze wspornikiem podu.

Ma ona także szereg innych walorów, do których należy:

- zaawansowany charakter poznawczy w zakresie nowatorskich pędników okrętowych;
- szerokie możliwości użytkowe w kierunku wykorzystania jej jako algorytmu do opracowania narzędzia numerycznego.

Postawione na początku oczekiwania zostały całkowicie spełnione w realnych uwarunkowaniach. Praca umożliwiła systematyczne podejście do zagadnień napędu podowego, rozpoznanie rangi zagadnień i opracowanie metodyki prognozowania osiągnięć napędowych statku podowego. Istotne było przy tym określenie znikomego wpływu analizowanych szczelin, tj. szczeliny-pomiędzy piastą śruby i podem oraz pomiędzy wspornikiem podu i kadłubem statku, na prognozowane osiągnięcia napędowe. Uprościło to znacznie podejście do tematu i zmniejszyło zapotrzebowanie na określone charakterystyki, które wymagają kosztownych badań modelowych.

Określone względne błędy prognozowania są na poziomie 4–5 % w zakresie użytkowym. Jedynie na krańcach analizowanych przedziałów błędy są większe, co wynika z przyjętych w trakcie aproksymacji liniowych.

Dlatego też głównym zaleceniem na przyszłość może być:

- dalsza rozbudowa baz danych i zwiększanie ich zasobów;
- konsekwentne strojenie metodyki do określonych zastosowań;
- taki dobór narzędzi numerycznych, w miarę wzrostu zasobów, by można było stworzyć w pełni zgodny ze sztuką „data mining”.

## 15. BIBLIOGRAFIA

1. Azimuthing Podded Propulsion Committee of ITTC: *Final report and recommendations to the 25th ITTC*, ITTC 2008 Conference, Fukuoka.
2. Report of Performance Committee, 15<sup>th</sup> ITTC, Haga 1978.
3. Bech T., Kanar J.: *Instrukcja prognozowania charakterystyk napędowych statków wypornościowych metoda ITTC 78*, T-POD 2006 Conference, Brest.
4. Chicherin I. A. et al.: *On a prediction procedure for ship with podded propulsors usings RANS code analysis*, T-POD 2004 Conference, Newcastle
5. Dudziak J.: *Teoria okrętu*, Fundacja Promocji Przemysłu Okrętowego i Gospodarki Morskiej, Gdańsk 2009 r.
6. Felli M., et al.: *Experimental analysis of the propeller rudder interaction*, T-POD 2006 Conference, Brest.
7. Flikkema M. B. Holtrop J. Van Terwisga T. J. C.: *A parametric power prediction model for tractor PODs*, T-POD 2006 Conference, Brest.
8. Funeno I.: *Hydrodynamic development and propeller design method of azimuthing podded propulsion system*, PRADS 1998 Conference-Hague.
9. Gwiazda T., D.: *Algorytmy genetyczne - kompedium*, Wydawnictwo Naukowe PWN SA, 2007r.
10. Hamalainen R., van Heerd J.: *Triple POD propulsion in the world's largest ever Cruise liner*, SNAME 2003.
11. Hämäläinen R., van Heerd J.: *Wave damping afterbody with hybrid podded propulsors*, Transaction SNAME Vol.111, 2003.
12. Han K. J., Larsson L., Regnström B.: *A RANS study on the interaction between a propeller and a rudder in open water*, Ship Technology Research, Vol.53-2006.
13. Hoerner S.F.: *Fluid dynamic drag*, Published by the author 1965 r.
14. Holtrop J.: *A statistical re-analysis of resistance and propulsion data*, Marine Technology, Vol.38, No3, July 2001.
15. Holtrop J.: *Extrapolation of propulsion tests for ship with appendages and complex propulsors*, International Shipbuild. Progress, Vol.29. No335, July 1982.
16. Holtrop J., Mennen G.G.J.: *An approximate power prediction method*, International Shipbuilding Progress, Vol. 29, July 1982.
17. Islam M. F., Molloy S., He M., Veitch B., Bose N., Liu P.: *Effect of geometry variations of the performance of podded propulsors*, T-POD 2006 Conference, Brest.
18. Islam M. F., Molloy S., He M., Veitch B., Bose N., Liu P.: *Hydrodynamic study of podded propulsors with systematically varied geometry*, T-POD 2004 Conference, Newcastle.
19. Islam M., Taylor R., Quinton J., Veitch B., Bose N., Colbourne B., Liu P.: *Numerical investigation on hydrodynamic performance of podded propeller*, T-POD 2006 Conference, Brest.
20. Junglewitz A., el Moctar O., Frank S.: *Podded rudders*, T-POD 2006 Conference, Brest.
21. Kanar J.: *Ropax vessel. Results of propulsive model tests. Podded Hull version*. Report of CTO No RH-2000/T-176E.
22. Kanar J.: *Optipod. Podded Ropax vessel. Results of model tests with final hull form and designed propellers*. Report of CTO No RH-2001/T-061E.
23. Kanar J.: *Ro-Ro passenger vessel. Optimization and model tank tests*. Report of CTO No RH-2001/T-066E.
24. Kanar J.: *Optipod. Guidelines for podded Ropax hull design*. Report of CTO No RH-2002/T-024E.
25. Kanar J.: *Fastpod. Results of initial pods investigations*. Report of CTO No RH-2004/T-159E.
26. Kanar J.: *Fastpod. Results of model tests with designed pods. Hull model m604/ III*.

RH-2005/T-100E.

27. Kanar J.: *Improvement of multipropulsor systems performances by POD unit applications*. T-POD 2006 Conference, Brest.
28. Kanar J., Kraskowski M.: *Azipilot.CFD analyses of POD propulsion*. Raport techniczny CTO nr RH-2009/T-88E.
29. Koronowicz T., Krzemianowski Z.: *Numerical determination of the propeller design velocity field including scale effect and ruder influence*. NuTTS 2008 Conference Nantes.
30. Krasilnikov V., Ponkratov D., Achkinadze A., Berg A., Ying, S.J.: *Possibilities of a viscous/potential coupled method to study scale effects on open-water characteristics of podded propulsors*, PRADS 1998 Conference-Hague.
31. Lobachev M. P., Tchitcherin A.: *The full-scale resistance estimation for podded propulsion system by RANS metho*. HSVA Report WP 10/03.
32. Lücke T.: *Propeller open water test for a Ropax vessel*. T-POD 2006 Conference, Brest.
33. Lücke T.: *Propeller open water test for EU project "Optipod"*. HSVA Report PF 22/02.
34. Lücke T.: *Pod open water tests for the project "Fastpod"*. HSVA Report PF 23-04.
35. Mewis F.: *POD drives – pros and cons*. Hadmar 2001 Conference, Varna.
36. Mewis F.: *The efficiency of POD propulsion*. RINA 1996.
37. Michalewicz Z.: *Algorytmy genetyczne + struktury danych*. WNT 1999r.
38. Michalski J., P.: *Metody wyznaczania oporu i mas uogólnionych kadłuba przydatne w projektowaniu wstępnym statków dwukadłubowych o malej wodnicy pływania*. Politechnika Gdańska, Gdańsk 2002 r.
39. Molland A.F., Turnock S.R.: *A compact computational method for predicting forces on a rudder in a propeller slipstream*, International Shipbuild. Progress, 49, no 3 (2002).
40. Molland A.F., Turnock S.R.: *Flow straightening effects on a ship rudder due to upstream propeller and hull*, RINA 1992.
41. Molland A.F., Turnock S.R.: *Wind tunnel investigations of the influence of propeller loading on ship rudder performance*, PRADS 1998 Conference-Hague.
42. Molloy S., Bose N.: *Ship powering prediction from self propulsion load varying tests*, T-POD 2004 Conference, Newcastle.
43. Molloy S., Bose N., Veitch B., Taylor R.: *Systematic geometric variation of podded propulsor models*, T-POD 2004 Conference, Newcastle.
44. Osowski S.: *Sieci neuronowe w ujęciu algorytmicznym*, WNT 2007r.
45. Pawłowski M.: *Badania modelowe i projektowanie śrub*, Raport techniczny nr 50, PRS , maj 2006.
46. Pawłowski M.: *Teoria śruby okretowej*, SNAME 2003.
47. Praefke E.: *Multi-component propulsors for merchant ships – design considerations and model test results*, HANSA, No 11 2001.
48. Proefke E.: *Propeller and Pod open water tests*, HSVA report No WP38/01.
49. Propulsion Committee of ITTC: *Recommendations to the 23th ITTC*, ITTC web page.
50. Richards J.: *Self-propulsion test with stock propellers for the Fastpod Ropax vessel*, HSVA report No WP25/04.
51. Richards J.: *Resistance and self-propulsion tests for the Cruise vessel. Optimised hull form*, HSVA report No WP88/01.
52. Richards J.: *Self-propulsion test with design propellers for the Fastpod Ropax vessel*, HSVA report No WP91/04.
53. Richards J.: *Cruise vessel; Optimisation and model tank tests*, HSVA report No WP69/02
54. Seil G.J.: *Optipod. Improvement of the shape of a Kamewa Mermaid pod body using CFD*, Raport Rolls-Royce Kamewa 2002r.
55. Stierman E.J.: *The influence of the rudder on the propulsive performance of ships*, HYDRONAV 2003 Conference, Gdańsk.

56. Streckwall H.: *A complete numerical model for podded propulsion*, HYDRONAV 2007 Conference, Polanica.
57. Szantyr J.: A., *2001a, Hydrodynamic model experiments with POD propulsors*, Archives of Civil and Mechanical Engineering 2007, Vol. VII, No 3.
58. The Specialist Committee on Azimuthing podded propulsion: *Final report and recommendations to the 25th ITTC*.
59. Ukon T., Sasaki N., Fujisawa J., Nishimura E.: *The propulsive performance of podded propulsion ships with different shape of stern hull*, T-POD 2004 Conference, Newcastle.
60. Wang D., Atlar M., Glover E.J., Paterson I.: *Experimental investigation of flow field around a podded propulsor using LDA*. T-POD 2004 Conference, Newcastle.
61. Wełnicki W.: *Instrukcja prognozowania charakterystyk napędowych statków wypornościowych z napędem podowym*, Raport techniczny CTO nr RH-2003/R-043.
62. Mewis F.: *Pod drives – quo vadis?*, Hansa, No 10. 2007