

CO₂ emission level as a criterion in modern transport ship design

From 2013 onwards Energy Efficiency Design Index (EEDI) for new ships has been in force. The EEDI value for a given ship is calculated according to a standard formula and compared against a ship specific standard by means of a so called reference line which will be gradually changing (decreasing) in subsequent years. The article presents possible ways of increasing ship propulsion efficiency in order to decrease ship propulsion power, EEDI value and CO₂ levels.

Key words: CO₂ emission, ship design, EEDI

Poziom emisji CO₂ jako kryterium projektowe współczesnych statków transportowych

Od roku 2013 obowiązuje projektowy wskaźnik efektywności energetycznej (EEDI) dla nowych statków. Wartość tego wskaźnika dla określonego statku obliczana jest według ustalonego wzoru i porównywana z normą dla tego statku (tzw. linią referencyjną), która będzie zmieniana (obniżana) w następnych latach. W artykule przedstawiono możliwości zwiększenia sprawności napędowej statku, a tym samym obniżenia mocy napędu wskaźnika EEDI i emisji CO₂.

Słowa kluczowe: emisja CO₂, projektowanie statku, wskaźnik EEDI

1. Introduction

The necessity of reduction of the so called greenhouse gases including CO₂ has resulted in the introduction of new criteria and standards, among others pertaining to combustion engine design or entire means of transport. IMO has drawn up Energy Efficiency Design Index (EEDI) for newly built and designed ships, mandatory since 2013, which is generally defined as follows:

$$EEDI = \frac{CO_2 \text{ emission} / \text{emisja}}{\text{transport work} / \text{praca transportowa}} \quad (1)$$

and expresses CO₂ emission (in grammes) per 1 tonne-mile of transported cargo.

Introduction of such criterion is to enforce such ship design and exploitation (together with its propulsion system) as to decrease CO₂ emission (CO₂ emission will be gradually reduced in subsequent years).

Although the main aim of the EEDI is the reduction of the CO₂ emission, still the very structure of this index allows it to be used as yet another design criterion as well as some kind of transport efficiency measure. Proper application of EEDI in ship design can therefore reduce CO₂ emission on the one hand, and lead to optimal choice of technical and service parameters on the other, which in turn maximises economic performance for a shipowner.

2. Energy efficiency design index

Research into EEDI has been carried out for years now. As a vantage point laid the assumption that sea transport of cargo is also associated with CO₂ emission.

After a few years of both research and discussions resulting in numerous amendments and revisions, the current version, used in research, further analyses and also recommended to be used in ship design has the form of:

1. Wstęp

Konieczność ograniczenia emisji tzw. gazów cieplarnianych, w tym CO₂, spowodowała wprowadzenie nowych kryteriów, norm, m.in. w projektowaniu silników spalinowych lub kompletnych środków transportowych. Także dla morskich środków transportowych (statków) Międzynarodowa Organizacja Morska (IMO) opracowała projektowy wskaźnik efektywności energetycznej (EEDI), który obowiązuje od 2013 r. dla nowo projektowanych i budowanych statków. Wskaźnik ten ogólnie definiuje się jako (1) i wyraża on emisję CO₂ w gramach/1 tonomile transportowanego ładunku.

Wprowadzenie tego wskaźnika ma wymusić takie projektowanie i eksploatację statku (w tym i jego napędu), aby ograniczać emisję CO₂ (redukcja CO₂ w latach następnych ma być coraz większa). Wprawdzie nadrzędnym celem wskaźnika EEDI jest ograniczenie emisji CO₂, to jednak struktura tego wskaźnika pozwala na wykorzystanie go jako kolejne kryterium w projektowaniu, a także jako pewnego rodzaju miarę efektywności transportowej. Prawidłowe wykorzystanie wskaźnika EEDI w procesie projektowania statku może z jednej strony zredukować emisję CO₂, a z drugiej strony doprowadzić do bardziej optymalnego doboru parametrów techniczno-eksploatacyjnych statku, maksymalizujących efekty ekonomiczne armatora.

2. Projektowy wskaźnik efektywności energetycznej

Prace nad wskaźnikiem EEDI trwały już od dłuższego czasu. Punktem wyjścia było założenie, że transport ładunku drogą morską jest też związany z emisją CO₂.

Po kilku latach badań i dyskusji oraz wprowadzeniu wielu poprawek i uzupełnień aktualna wersja przeznaczona do dalszych badań i analiz oraz zalecana do stosowania w projektowaniu statków ma postać (2), a szczegółowy opis

$$\frac{\left(\prod_{j=1}^M f_j \right) \left(\sum_{i=1}^{n_{ME}} P_{ME(i)} C_{FME(i)} SFC_{ME(i)} \right) + (P_{AE} C_{FAE} SFC_{AE})}{f_i \cdot Capacity \cdot V_{ref} \cdot f_w} + \frac{\left(\prod_{j=1}^M f_j \right) \left(\sum_{i=1}^{n_{PTI}} P_{PTI(i)} - \sum_{i=1}^{n_{eff}} f_{eff(i)} P_{AEeff(i)} \right) C_{FAE} SFC_{AE}}{f_i \cdot Capacity \cdot V_{ref} \cdot f_w} \quad (2)$$

$$\frac{\left(\sum_{i=1}^{n_{eff}} f_{eff(i)} P_{eff(i)} C_{FME} SFC_{ME} \right)}{f_i \cdot Capacity \cdot V_{ref} \cdot f_w}$$

and the detailed description of individual components can be found in [3].

The EEDI formula is quite a complex one, where two basic groups of parameters can be distinguished:

- 1) the first group, pertaining to the marine power plant, that is main and auxiliary engine(s) power, specific fuel consumption, conversion factors between fuel consumption and CO₂ emission, power of waste heat generators, as well as parameters defining the application and use of innovative technology – given in the formula numerator (2),
- 2) the second group, pertaining to ship exploitation, that is, the capacity, the ship speed on calm sea, the decrease of a ship speed in real-life weather conditions, which can be found in the formula denominator as well as a nominator parameter defining type and specific work conditions eg. sailing through ice.

The EEDI formula has been drawn up mainly for conventional propulsion systems (combustion engines) and does not have to be used in other propulsion systems such as: diesel-electric, turbine or hybrid propulsion types.

The currently binding EEDI version is by no means final, despite the fact that it has been mandatory since 2013. It has been widely discussed, with numerous changes proposed eg. on values or the calculation methods of some parameters (power, speed, capacity) or their coefficients (eg. decrease in ship speed on rough sea).

3. Reference line

In order to establish the expected CO₂ emission a reference line has been drawn up for various types of ships of different sizes. Calculations of the EEDI will be performed for each newly built ship and compared against the appropriate reference line (depending on the ship type and size). If the EEDI value will be equal or smaller than that on the reference line, the ship will be granted International Energy Certificate and fit for exploitation. Examples of reference lines for 2013 are given in Fig. 1 [1].

poszczególnych składowych znajduje się w publikacji [3].

Wzór na EEDI ma dość złożoną strukturę, ale można wyróżnić dwie podstawowe grupy parametrów:

- 1) dotyczących siłowni okrętowej, czyli mocy silników głównych i pomocniczych, jednostkowe zużycie paliwa, współczynniki przeliczające zużycie paliwa na emisję CO₂, moc urządzeń wykorzystujących ciepło odpadowe, parametry określające zastosowanie i wykorzystanie innowacyjnych urządzeń – parametry te są w liczniku wzoru (2),
- 2) eksploatacyjnych statku, tj. nośność, prędkość na wodzie spokojnej, spadek prędkości w rzeczywistych warunkach pogodowych, które znajdują się w mianowniku oraz parametr znajdujący się w liczniku określający typ i specyficzne warunki pracy, np. pływanie w lodach.

Wzór na EEDI został opracowany głównie dla napędów spalinowych i nie musi być stosowany do napędów: spalino-elektrycznych, turbinowych lub hybrydowych.

Aktualnie obowiązujący wzór na EEDI nie jest zapewne ostateczny, mimo że obowiązuje od 2013 roku. Cały czas trwa dyskusja oraz proponowane są różne zmiany np. co do wartości lub sposobu obliczania niektórych wielkości (moc, prędkość, nośność) lub też współczynników (np. spadek prędkości statku podczas pływania po szalowanej wodzie).

3. Linia referencyjna

Aby ustalić dopuszczalny poziom emisji CO₂, opracowano linię referencyjną dla różnych wielkości i typów statków. Dla każdego nowego statku będą wykonywane obliczenia wskaźnika EEDI i porównywane z odpowiednią dla tego statku linią referencyjną. Jeżeli wartość EEDI będzie mniejsza lub równa wartości wynikającej z linii referencyjnej, to taki statek uzyska certyfikat efektywności energetycznej i będzie dopuszczony do eksploatacji. Przykładową linię referencyjną na rok 2013 przedstawiono na rys. 1 [1].

Do określenia pierwszej, na rok 2013, linii referencyjnej (bazowej) wykorzystano dane statków zbudowanych, zgromadzone w bazie Lloyd's Register Fairplay (LRFP). Dane te są niekompletne, stąd też wprowadzono pewne uproszczenia

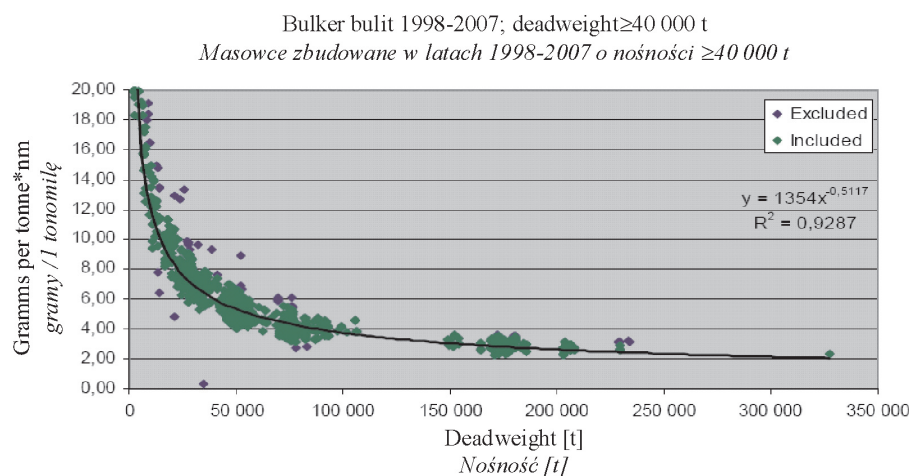


Fig. 1. Reference line for bulk carriers [1]
Rys. 1. Linia referencyjna dla masowców [1]

In order to determine the first reference line (base line) for 2013, Lloyd's Register Fairplay (LRFP) data on existing ships was used. Such data is incomplete, therefore some simplifications had to be made, or some missing data completed using similar ships with regression relationship. For all the ships used, a constant specific fuel consumption (SPF) was assumed, independently from the actual engine type mounted on a ship. The calculations do not include potential shaft generators, although they might have been present on some of the ships. Therefore, the EEDI values as seen on Fig. 1 are above the reference line, which is not necessarily true. However such dissemination of the EEDI values around the reference line, signifies the profound influence of the ship design (mainly hull) on the EEDI value.

In order to facilitate EEDI estimation for a newly built ship and establish whether it meets the CO₂ emission criteria, the reference line has been approximated as follows [4]:

$$L_{ref} = a \cdot b^{(-c)} \quad (3)$$

where a, b, c are parameters, whose values for each ship type are presented in the Table 1.

In subsequent years further reduction in CO₂ emission will be implemented, with the reference line changing accordingly. In the case of tanker ships, the CO₂ emission standard will be subsequently decreasing – from 2015 by 10%, then from 2010 by further 20% to reach the target of 30% reduction from 2025 onwards (Fig. 2). EEDI reduction coefficients for individual ships depending on their capacity in relation to the base reference line for 2013 are presented in [4].

lub niektóre dane uzupełniano na podstawie statków podobnych, wykorzystując zależności regresyjne. Dla wszystkich wykorzystanych statków przyjęto stałe jednostkowe zużycie tego samego paliwa niezależnie od tego, jaki rzeczywisty silnik był zainstalowany na statku. W obliczeniach nie uwzględniono ewentualnych prądnic wałowych, mimo że mogły być na niektórych statkach zainstalowane. Dlatego, co jest widoczne na rys. 1, wskaźniki EEDI dla wielu statków są powyżej linii referencyjnej, a to wcale nie musi odpowiadać rzeczywistości. Jednak duży rozrzut obliczonych wartości EEDI wokół otrzymanej w ten sposób linii referencyjnej świadczy o bardzo dużym wpływie samego projektu statku (głównie kadłuba) na wartość EEDI.

Aby ułatwić ocenę EEDI dla nowego statku i stwierdzić, czy spełnia on normy emisji CO₂ linia referencyjna została także aproksymowana wyrażeniem (3) [4], gdzie a, b, c są parametrami, których wartości dla poszczególnych typów statków przedstawiono w tabeli 1.

W latach następnych mają być dokonywane następne redukcje emisji CO₂. W odniesieniu do zbiornikowców norma emisji CO₂ będzie obniżana już od roku 2015 o 10%, następnie od roku 2020 o kolejne 20%, aż docelowo o 30% od roku 2025 (rys. 2). Współczynniki redukcyjne dla EEDI, dla poszczególnych typów statków w zależności od nośności, względem bazowej (z 2013 r.) linii referencyjnej przedstawiono w pracy [4].

4. Certyfikat efektywności energetycznej statku

Obliczenia wartości EEDI i certyfikat efektywności energetycznej dla nowego statku będzie wydawany przez Administrację Morską państwa, pod którego banderą pływa

Table 1. Parameters for determining the reference line values for different ship types [4]

Tabela 1. Parametry do określenia linii referencyjnej dla różnych typów statków [4]

Ship type/ <i>typy statków</i>	a	b	c
Dry bulk carrier/ <i>masowiec</i>	1354.0	DWT of the ship/ <i>nośność statku</i>	0.5117
Gas carrier/ <i>gazowiec</i>	1252.60	DWT of the ship/ <i>nośność statku</i>	0.4597
Tanker/ <i>zbiornikowiec</i>	1950.70	DWT of the ship/ <i>nośność statku</i>	0.5337
Container ship/ <i>kontenerowiec</i>	139.38	DWT of the ship/ <i>nośność statku</i>	0.2166
General cargo ship/ <i>drobnicowiec</i>	290.28	DWT of the ship/ <i>nośność statku</i>	0.3300
Refrigerated cargo carrier/ <i>chłodniowiec</i>	227.01	DWT of the ship/ <i>nośność statku</i>	0.244
Combination carrier/ <i>wielozadaniowe drobnicowce</i>	1219.00	DWT of the ship/ <i>nośność statku</i>	0.488

4. International Energy Certificate of a ship

EEDI value calculation and International Energy Certificate for a new ship will be issued by the state Marine Administration on the basis of approved ship design documentation. It means that the subsequent ship exploitation together with changeable sailing conditions (shipping routes, weather) will have no influence on the EEDI value.

The EEDI certificate is therefore valid throughout the life of the ship, unless the ship under-goes a major conversion so as it is regarded as a new ship. The certificate loses its validity when the ship is withdrawn from the service or transferred

statek, na podstawie zatwierdzonej dokumentacji projektowej statku. Oznacza to, że późniejsza eksploatacja statku oraz zmienne warunki pływania (trasy żeglugi, pogoda itp.) nie będą miały już wpływu na wartość EEDI.

Certyfikat EEDI jest więc ważny przez cały okres eksploatacji statku [4], chyba że będzie poddany gruntownej przebudowie i wtedy będzie traktowany jako nowy statek. Certyfikat traci ważność, gdy statek będzie wycofany z eksploatacji lub przechodzi pod banderę innego państwa (sprzedaż, dzierżawa). Możliwe jest też, że Administracje Morskie obu państw dojdą do porozumienia i kopie do-

to the flag of another state (sold, hired). It is possible however, that the marine administration of both contracting states, reach the agreement and transmit the certificate together with the copies of the relevant survey reports to the new ship's operator. Subject to specified conditions the certificate is deemed valid.

In some documents and publications it is emphasized that in order to reduce CO₂ emission, the shipping routes must be optimized, or – during ship exploitation the service speed of the ship decreased or better quality fuel used. According to the currently binding criteria, such activities – although environmentally friendly – will not affect the already calculated EEDI value, and hence be decisive in meeting the required standards for the international energy certificate.

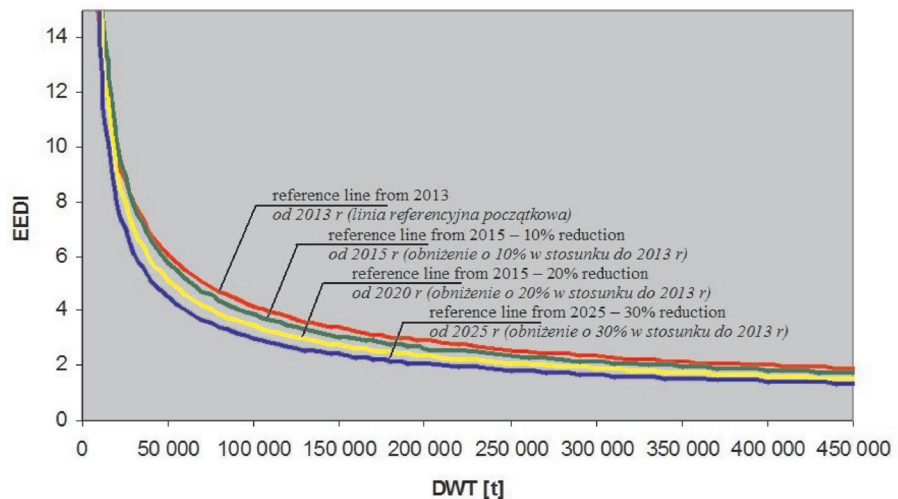
5. Possible ways of decreasing CO₂ emission and EEDI for new ships

Various parameters and technologies resulting in reduction of the CO₂ emission, can be divided into two groups:

1. Parameters connected to the propulsion engine and marine power plant:
 - more efficient propulsion engine with lower specific fuel consumption,
 - better quality fuel, with a lower CO₂ content or transition from diesel oil to natural gas,
 - application of the new technologies in a marine power plant, e.g. better waste heat recovery system,
 - energy saving machine consumption and more efficient ship power plant.
2. Hull-related parameters:
 - increasing ship propulsion efficiency (optimisation of hull, propeller and plane rudder design) resulting in decrease of required propulsion power,
 - decreasing ship speed – however such decrease cannot result in impairing its safety, especially in adverse (e.g. stormy) weather conditions,
 - increasing ship capacity – construction of larger vessels, however restricted by both a limited amount of dedicated deep-water ports as well as limited amount of some cargo goods.

Other factors, which also play a role in the ship CO₂ emission, e.g. optimisation of the sea route, maintenance and modernisation work of the marine power plant during ship exploitation, are not yet taken into account while calculating the EEDI and issuing international energy certificate.

From the experimental data of numerous scientific and design centres focusing their research activities on decreasing



Rys. 2. Reference line for reduction in CO₂ emission for tanker ships

Rys. 2. Linia referencyjna dla obniżonych norm emisji CO₂ dla zbiornikowców

kumentów, na podstawie których wydano Certyfikat będą przekazane nowemu armatorowi. W takiej sytuacji Certyfikat zachowuje swoją ważność.

W niektórych dokumentach i opracowaniach podkreśla się, że w celu obniżenia emisji CO₂ należy optymalizować trasę żeglugi statku lub podczas eksploatacji redukować prędkość, albo stosować lepszej jakości paliwa. Według aktualnie obowiązujących przepisów takie działania, wprowadzone korzystne dla środowiska, nie będą miały wpływu na obliczoną wcześniej wartość wskaźnika EEDI, a tym samym na spełnianie norm i uzyskanie Certyfikatu.

5. Możliwości obniżenia emisji CO₂ i wskaźnika EEDI dla nowych statków

Na obniżenie emisji CO₂, a tym samym zmniejszenie wartości wskaźnika EEDI, mają wpływ różne parametry czy technologie, które można podzielić na dwie grupy:

1. Parametry związane z silnikiem napędowym i siłownią okrętową:
 - bardziej wydajny silnik napędowy o mniejszym jednostkowym zużyciu paliwa,
 - lepszej jakości paliwa o mniejszej zawartości CO₂ w spalinach lub przejście z oleju napędowego na gaz ziemny,
 - stosowanie nowych technologii w siłowni okrętowej, np. lepsze odzyskiwanie i wykorzystanie ciepła odpadowego,
 - bardziej energooszczędne odbiory elektryczne i o wyższej sprawności elektrownie okrętowe.
2. Parametry związane z kadłubem statku:
 - poprawa sprawności napędowej statku (optymalizacja kadłuba, śruby napędowej i steru płetwowego), co spowoduje zmniejszenie mocy napędu,
 - zmniejszenie prędkości statku – jednak zmniejszenie prędkości statku nie może pogorszyć jego bezpieczeństwa, szczególnie podczas rejsu w trudnych (sztormowych) warunkach pogodowych,
 - zwiększenie nośności statku – budowa większych statków, jednak ograniczeniem wielkości statków jest mała liczba dużych głębokowodnych portów przeładunkowych oraz

the EEDI value (with subsequent decreased standard from 2015 onwards [4]) it can be concluded that:

- 1) it is possible to decrease the EEDI parameters in the first group (marine power plant) however it is not to play any significant role though; with the exception of possible replacement of diesel oil with liquefied natural gas, this however would necessitate major changes not only to the marine power plant (propulsion engine) but also to the ship construction (suitable LNG tanks);
- 2) the EEDI for the parameters in the latter group (ship hull) may have indeed a profound influence largely by decreasing ship speed (within safety limits and restricted to some types of the ships only) and also by increasing their propulsion efficiency. The authors of recently published papers presenting research outcomes in this area, claim, that by increasing propulsion efficiency alone, it is possible to decrease propulsion power and hence fuel consumption by 20% without any difficulty, maintaining speed and capacity of a ship at the same time [5].

6. Initial research into potential ways of increasing propulsion efficiency of a transport ship

In order to increase ship propulsion efficiency, and thus reduce propulsion power, optimisation of the hull and propeller design should be carried in the following stages:

1. Global optimisation of main design parameters aiming at the maximum reduction of ship resistance (and at the same time propulsion efficiency) for a given ship capacity and service speed, taking into consideration all other requirements e.g. technical.
2. Local optimisation – changes in ship hull geometry, e.g. in the stern section in order to facilitate water inflow to the ship propeller.
3. Propeller efficiency optimisation for the modified stern section design.
4. Optimisation of the plane rudder geometric parameters, with the rudder located behind the propeller to increase propeller and rudder efficiency.

There are various possibilities to achieve the above goals by:

- carrying out optimisation with the use of approximate methods (approximate formulas based on systematic ship model experiment data – however such formulas do not contain a number of detailed geometrical parameters, hence their limited application in this respect, or even lack of possible application for the local optimisation);
- searching for the optimal hull design based on ship model research – numerous hull models should be constructed, which is both expensive and time consuming – as such it is not used in practice;
- applying CFD (*Computational Fluid Dynamics*) methods and software, which allow us to complete fully such design task (in the example of calculations below, such calculation technique has been used).

ograniczone ilości niektórych transportowanych towarów.

Inne czynniki, które wprowadzicie mają wpływ na poziom emisji CO₂, jak np. optymalizacja trasy żeglugi, stosowanie przeglądów, remontów lub unowocześnienia siłowni okrętowej w czasie eksploatacji statku, nie są obecnie uwzględniane przy obliczaniu wartości wskaźnika EEDI i uzyskiwaniu certyfikatu efektywności energetycznej statku.

Z prowadzonych, w różnych ośrodkach naukowych i projektowych, analiz i badań nad możliwością obniżenia wartości wskaźnika EEDI (kolejna obniżona norma będzie obowiązywała już od roku 2015 [4]) wynika, że:

- 1) obniżenie wartości EEDI dla parametrów w pierwszej grupie (siłownia okrętowa) jest wprowadzicie możliwe, ale nie należy spodziewać się dużych efektów z wyjątkiem ewentualnego zastąpienia oleju napędowego gazem ziemnym skroplonym – wymaga to jednak bardzo dużych zmian nie tylko w siłowni okrętowej (silnik napędowy), ale również w konstrukcji statku – odpowiednie zbiorniki na skroplony gaz ziemny;
- 2) obniżenie wartości EEDI dla parametrów w drugiej grupie (kadłub statku) ma potencjalnie duże możliwości, głównie przez obniżenie prędkości eksploatacyjnej statku, ale do bezpiecznej granicy i tylko dla niektórych typów statków oraz przez podnoszenie sprawności napędowej. Autorzy ostatnio publikowanych wyników takich badań [5] postulują, że można, przez zwiększenie sprawności napędowej, obniżyć moc napędu, a tym samym zużycie paliwa o 20% przy zachowaniu prędkości i nośności statku.

6. Wstępne badania nad możliwością zwiększenia sprawności napędowej statku transportowego

W celu zwiększenia sprawności napędowej statku, a tym samym zmniejszenia mocy napędu należy przeprowadzić optymalizację kadłuba statku i śruby napędowej w następujących etapach:

1. Optymalizacja globalna dla głównych parametrów projektowych statku, której celem jest maksymalne zmniejszenie oporu (a tym samym mocy napędu) dla założonej prędkości eksploatacyjnej i nośności statku, z uwzględnieniem innych wymagań, np. technicznych.
2. Optymalizacja lokalna, która polega na miejscowej zmianie geometrii kadłuba statku, np. w rejonie rufy, tak aby poprawić dopływ wody do śruby napędowej.
3. Optymalizacja sprawności śruby napędowej dla zmodyfikowanego kształtu rufowej części kadłuba statku.
4. Optymalizacja parametrów geometrycznych steru płetwowego umieszczonego za śrubą napędową w celu poprawy sprawności śruby i efektywności steru.

Możliwości realizacji powyższego zadania mogą być następujące:

- prowadzenie optymalizacji na podstawie przybliżonych metod (przybliżone wzory opracowane na podstawie wyników systematycznych badań modelowych – jednak te wzory nie zawierają wielu szczegółowych parametrów geometrycznych, stąd ich zastosowanie do powyższego

General ship propulsion efficiency equals the relationship of the ship towing power (PE) to the power on the main propulsion engine (PB) at the clutch point:

$$\eta = \frac{P_E}{P_B} \quad (4)$$

where towing power equals:

$$P_E = R \cdot V \quad (5)$$

where: R – ship's total resistance, V – ship velocity.

Ship propulsion efficiency can also be presented as a product of efficiency components:

$$\eta = \eta_{HT} \cdot \eta_0 \cdot \eta_{RT} \cdot \eta_S \cdot \eta_G \quad (6)$$

where: η_{HT} – „efficiency” of the ship's hull, η_0 – efficiency of open-water propeller, η_{RT} – rotational „efficiency”, η_S – shaft line efficiency, η_G – gear efficiency (if gear is used).

Two last components are mechanical efficiencies, while three first – hydrodynamic efficiencies. Then, that there are two tasks to be met by the design and optimisation of a ship hull: on the one hand decreasing resistance R, so that with the same velocity V values, the propulsion power will be lower, or on the other hand such stream wake distribution and propeller geometry so as to maximise the subsequent η_{HT} , η_0 , η_{RT} efficiency.

7. Computer simulations of a ship hull, propeller and rudder to increase propulsion efficiency – an example

Computer simulations to increase propulsion efficiency have been performed for the ship B 573 (Table 3) built in the Szczecin Shipyard, with the full design documentation, model data and delivery and acceptance tests of the vessel.

Ship body plans, dimensions and propeller geometry as well as location and dimensions of the actual ship (shown in Fig. 3 and Fig. 4) have been here accepted as entry data for further modifications in the ship geometry. EEDI = 5.6308 of a ship designed and built in the Szczecin Shipyard was calculated using the (2) formula.

Prior to ship hull modifications, two basic assumptions were made, namely that after the modification both the ship deadweight and its service speed would remain unchanged.

celu jest bardzo ograniczone, a do optymalizacji lokalnej jest wręcz niemożliwe);

- poszukiwanie optymalnego kształtu kadłuba statku na podstawie badań modelowych – w tym rozwiązaniu należałoby wykonać wiele wersji modelu kształtu kadłuba statku, co jest bardzo drogie i w praktyce niestosowane;
- zastosowanie metody i programów obliczeniowej mechaniki płynów (CFD), które mają pełne możliwości zrealizowania w całości powyższego zadania projektowego (w przedstawionym niżej przykładzie obliczeniowym zastosowano tę technikę obliczeniową).

Ogólna sprawność napędowa statku to stosunek mocy holowania statku (PE) do mocy na sprzęgle silnika napędu głównego (PB), wyrażona wzorem (4), gdzie moc holowania jest równa (5), gdzie: R – opór całkowity statku, V – prędkość statku.

Sprawność napędową statku przedstawia się także jako iloczyn składników sprawności (6), gdzie: η_{HT} – „sprawność” kadłuba statku, η_0 – sprawność odosobnionej śruby napędowej, η_{RT} – „sprawność” rotacyjna, η_S – sprawność linii wałów, η_G – sprawność przekładni (o ile jest zastosowana).

Dwa ostatnie składniki są sprawnościami mechanicznymi, a trzy pierwsze są sprawnościami hydrodynamicznymi. Modelowanie i optymalizacja kadłuba statku ma więc za zadanie z jednej strony zmniejszenie oporu R, wtedy przy tej samej prędkości V moc napędu PB będzie mniejsza, a z drugiej strony taką zmianę rozkładu strumienia nadążającego i geometrii śruby napędowej, aby sprawności η_{HT} , η_0 , η_{RT} były jak największe.

7. Przykład komputerowego modelowania kształtu kadłuba statku, śruby i steru w celu zwiększenia sprawności napędowej

Modelowanie komputerowe w celu zwiększenia sprawności napędowej wykonano dla statku B 573 (tab. 2) zbudowanego w Stoczni Szczecińskiej, dla którego istniał pełny zakres dokumentacji projektowej, wyniki badań modelowych i prób zdawczo-odbiorczych.

Linie teoretyczne kadłuba, wymiary i geometria śruby oraz położenie i wymiary steru statku zbudowanego (pokazane na rys. 3 i 4) były traktowane jako wyjściowe do dalszych modyfikacji geometrii. Obliczony, ze wzoru (2), wskaźnik dla statku zaprojektowanego i zbudowanego w Stoczni Szczecińskiej wyniósł EEDI = 5,6308.

Przed rozpoczęciem modyfikacji kadłuba statku przyjęto dwa podstawowe założenia, że po modyfikacji nośność

Table 2. Basic B 573ship parameters

Tabela 2. Podstawowe parametry statku B 573

Ship length between perpendiculars/długość pomiędzy pionami	L_{pp}	172 m	Ship length at the waterline/długość na wodnicy	L_{WL}	176.41 m
Hull widths/szerokość kadłuba	B	32.2 m	Draught/zanurzenie	T	11.0 m
Deadweight/nośność	P_N	45000 t	Displacement/objętość podwodzia	∇	50500 m ³
Block coefficient/współczynnik pełno-tliwości	C_B	0.807	Wetted area/powierzchnia zwilżona	S	8200 m ²
Speed/prędkość	V	14.5 w			

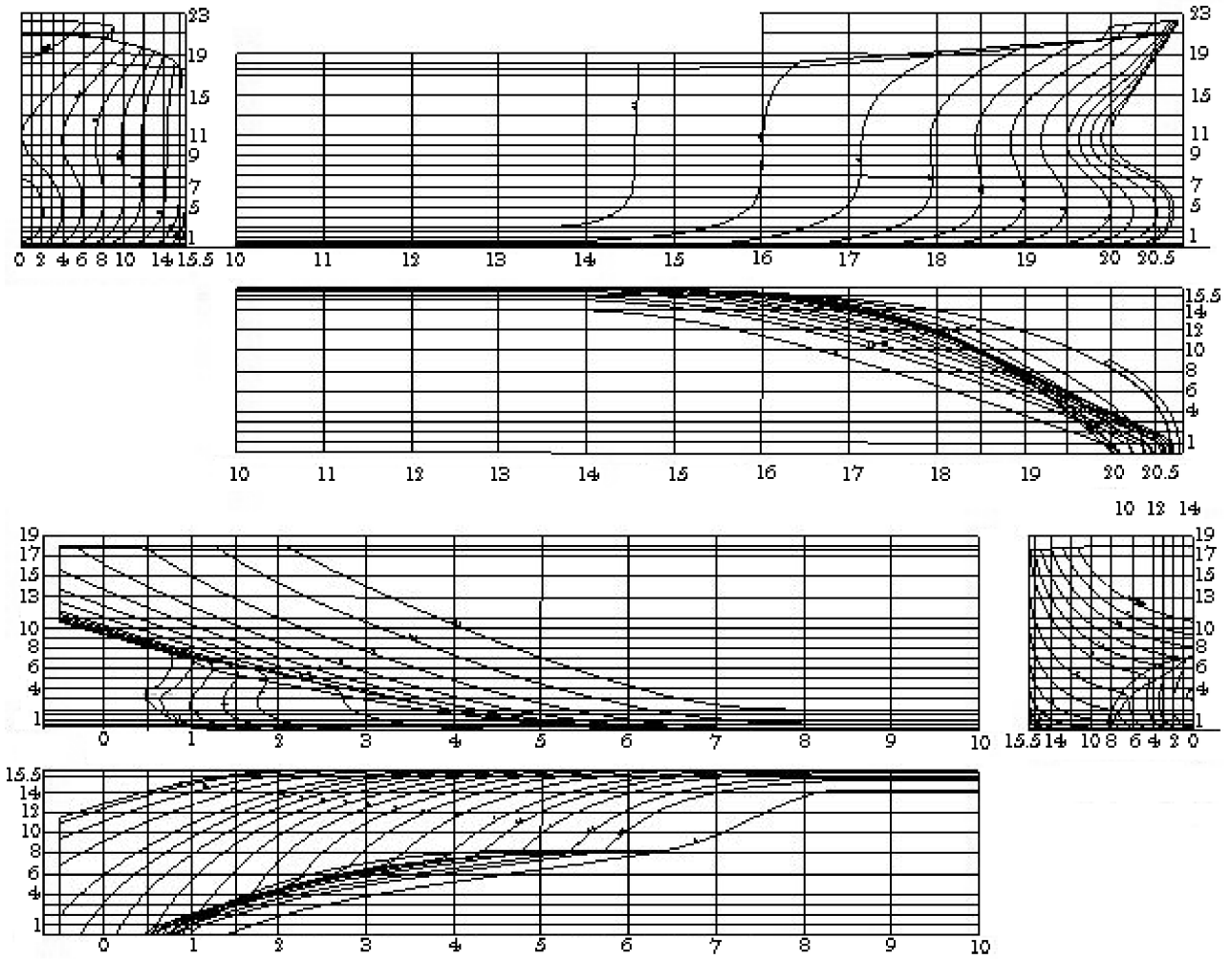


Fig. 3. Body plans of the B 573 ship hull analysed here
 Rys. 3. Linie teoretyczne analizowanego kadłuba statku B 573

The scope of modifications covered:

- 1) working out 17 variants (one of them presented in Fig. 5) of the ship's hull, such variants resulted from the changes to the basic geometrical parameters of the hull (global optimisation), with the hull design of the lowest resistance as the ultimate goal of such numerical analyses;
- 2) for the best ship hull design (lowest resistance value) at the first stage of optimisation, two further variants including shape modification only in stern part (local optimisation) were prepared. Asymmetrical stern design – in the latter variant of such local optimisation, was to optimise the stream wake flowing from the hull for an increased propeller efficiency;
- 3) 2 versions of the propeller geometry were worked out and checked against propeller efficiency for stream wakes at modified versions of the ship hull design;
- 4) 5 versions of plane rudder located behind the propeller were drawn and tested for their in-fluence on propeller efficiency.

Full description of geometrical features for each variant of ship hull, propeller and plane rudder can be found in [6].

statku i jego prędkość eksploatacyjna (tab. 2) nie ulegną zmianie.

Zakres modyfikacji polegał na:

1. Opracowaniu 17. wariantów (jeden z wariantów

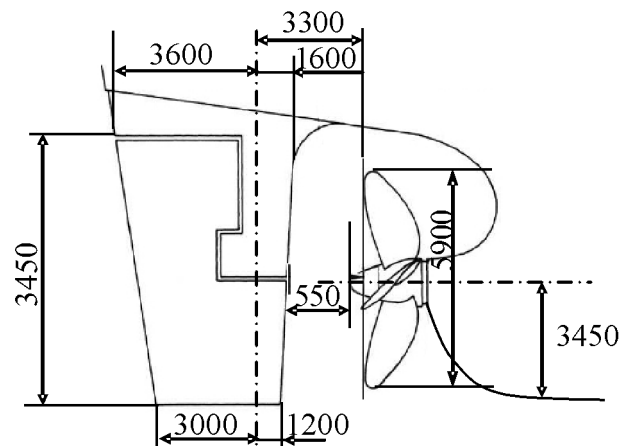


Fig. 4. Plane rudder located behind a propeller (B 573 ship) [7]
 Rys. 4. Ster płetwowy umieszczony za śrubą napędową (statek B 573) [7]

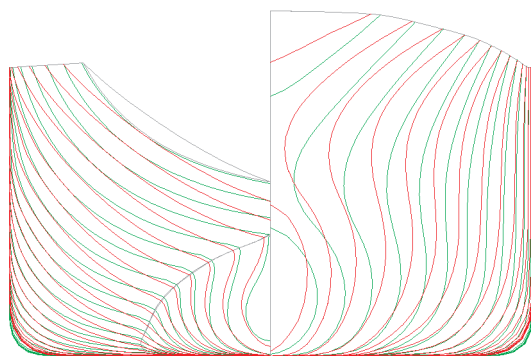


Fig. 5. Variant 1 – green colour – original shape; red colour – modified shape

Rys. 5. Wariant 1 – kolor zielony – kształt oryginalny; kolor czerwony – modyfikacja kształtu

8. Method of numerical calculations of the water flow around the hull, propeller and plane rudder

All numerical calculations have been performed using the FLUENT system on the NEPTUN computer cluster (installed in the Chair of Ocean Engineering and Marine Systems Design, Faculty of Maritime Technology and Transport at the West Pomeranian University of Technology in Szczecin). The numerical calculations have been performed for a ship in the model scale, for which earlier model tests have been carried out (scale ratio 1:25).

Computational domains have been defined for a ship model together with an unstructured numerical grid with prismatic cells in boundary layer, which has subsequently been converted into polyhedral cells. The unstructured grid has been generated by the Gambit programme, and conversion using the FLUENT CFD solver. Conversion of the unstructured grids to polyhedra type allows the 3 to 5 fold reduction of the grid elements as well as improvement of grid parameters, the skewness parameter of a cell in particular. Ultimately the total number of grid cells in all calculations for separate draughts lay in between 650 000 and 750 000.

For each type of calculations, the convergence of the iterative process for the remnant values of all equations and force coefficient on the hull have been controlled.

Mesh description and the results of the detailed calculations have been given in [6, 8–10]. Final calculation results have been verified against model B 573 ship tests [2].

9. Concluding remarks resulting from numerical analyses

On the basis of 19 analyses of the ship's hull, only the versions with lower resistance values were chosen (Fig. 6). Then for each of the stream wakes resulting from the hull version, the propeller efficiency of the B 573 was calculated – the results of these computations (Fig. 7) are of much interest, since they indicate that local change in the ship hull geometry in the stern region may play a major part in overall ship's propulsion efficiency. Subsequently the propeller and the plane rudder located behind the propeller were modified

przedstawiono na rys. 5) wersji kadłuba statku; warianty te powstały w wyniku zmian podstawowych parametrów geometrycznych kadłuba (optymalizacja globalna), a celem tego zakresu analiz numerycznych było opracowanie wersji kadłuba statku o najniższym oporze.

2. Dla najlepszej wersji kadłuba statku (najniższy opór), po pierwszym etapie optymalizacji, opracowano 2 warianty z modyfikacją kształtu tylko w części rufowej (optymalizacja lokalna) – drugi wariant optymalizacji lokalnej zawierał niesymetryczną rufę – celem tego etapu modyfikacji było otrzymanie takiego kształtu rufy statku, przy którym strumień nadążający spływający z kadłuba będzie najbardziej korzystny dla sprawności śruby napędowej (otrzymuje się wtedy większą sprawność śruby).
3. Opracowano 2 wersje geometrii śruby napędowej i sprawdzano ich sprawność dla strumieni nadążających dla modyfikowanych wersji kadłubów statku.
4. Opracowano 5 wersji sterów płetwowych umieszczonych za śrubą napędową i sprawdzono ich wpływ na sprawność śruby.

Pełny opis geometrii wszystkich wariantów kadłuba statku, śruby napędowej i steru płetwowego znajduje się w projekcie [6].

8. Metoda obliczeń numerycznych opływu kadłuba, śruby napędowej i steru płetwowego

Wszystkie obliczenia numeryczne wykonano za pomocą systemu FLUENT na klastrze komputerowym NEPTUN (zainstalowanym w Katedrze Oceanotechniki i Projektowania Systemów Morskich Zachodniopomorskiego Uniwersytetu Technologicznego w Szczecinie). Obliczenia numeryczne wykonano dla statku w skali modelu, dla którego były przeprowadzone badania modelowe (współczynnik skali 1:25).

Dla modelu statku określono dziedziny obliczeniowe i wykonano numeryczną siatkę typu niestrukturalnego z elementami pryzmatycznymi w warstwie przyściennej, na której następnie wykonano konwersję do elementów typu polyhedra. Siatkę niestrukturalną wykonano w systemie Gambit, konwersję przeprowadzono w systemie Fluent. Konwersja siatek niestrukturalnych do siatek typu polyhedra umożliwia zmniejszenie liczby elementów siatki od 3 do 5 razy oraz poprawę jej parametrów, w szczególności parametru skośności elementu. Ostatecznie całkowita liczba elementów we wszystkich przypadkach obliczeń dla poszczególnych zanurzeń statku wahała się od 650 tys. do 750 tys. elementów.

Dla wszystkich przypadków obliczeń kontrolowano zbieżność procesu iteracyjnego, zarówno dla wartości resztowych wszystkich równań, jak i dla współczynników sił na kadłubie.

Opis siatek obliczeniowych oraz wyniki szczegółowych obliczeń przedstawiono w publikacjach [6, 8–10]. Końcowe wyniki obliczeń były weryfikowane z badaniami modelowymi statku B 573 [2].

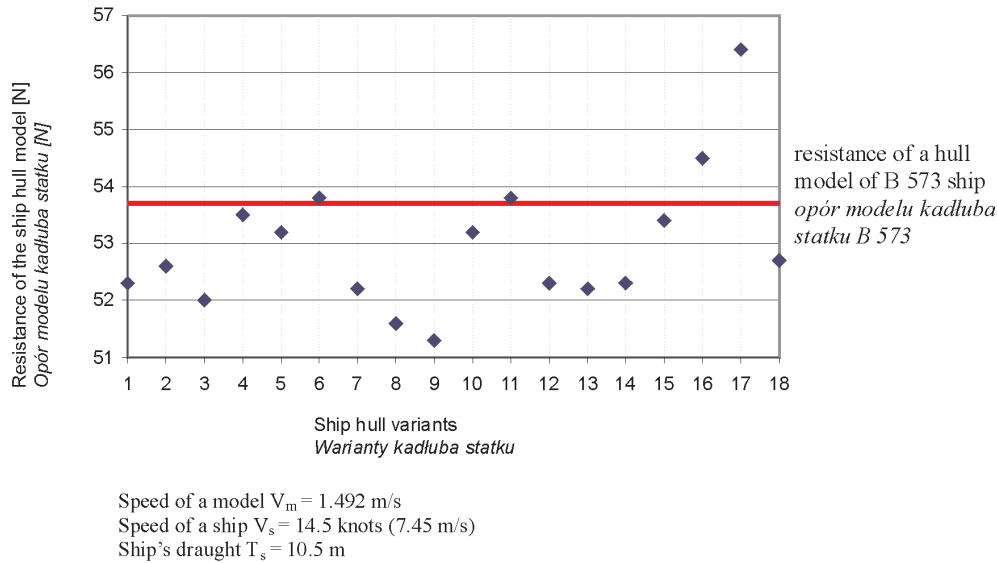


Fig. 6. Resistance of the tested ship hull models
 Rys. 6. Opór badanych wersji modeli kadłuba statku

(since rudder geometry and location may facilitate propeller efficiency). The influence of the plane rudder located behind a propeller on its efficiency is presented in Table 3.

Finally, having analysed all the calculation variants we have obtained:

- decrease in the ship's hull resistance by 2%,
- increase in propeller efficiency (better stream wake distribution) by 4.5%,
- additional increase in propeller efficiency resulting from rudder plane shape and location (in relation to propeller) by 2%.

We have also subsequently checked the influence of the best calculation results (based on numerical analyses) on the EEDI values of the actual ship:

- EEDI for the B 573 ship before modifications: EEDI = 5.6308
- with modifications: EEDI_{max} = 5.1803 (8% decrease).

The results presented here are preliminary and do not cover all possible hull-propeller-rudder relations. It can be concluded on the basis of the results obtained here, that the highest propulsion ef-

na ogólną sprawność napędową statku. Następnie modyfikowana była śruba napędowa oraz ster płetwowy umieszczony za śrubą (geometria steru i jego położenie mają także korzystny wpływ na sprawność śruby). Wpływ steru płetwowego umieszczonego za śrubą na jej sprawność przedstawiono w tabeli 3.

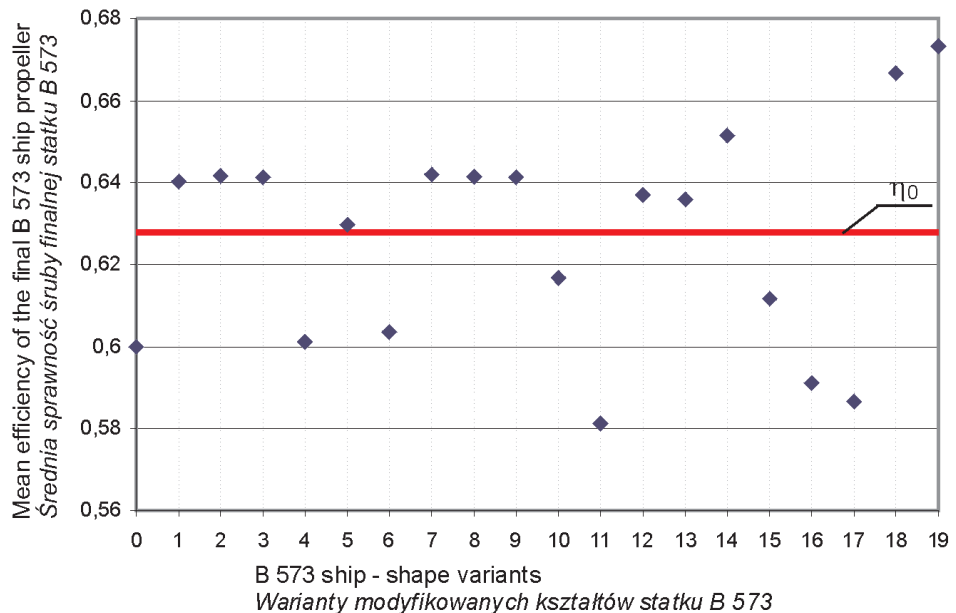


Fig. 7. Mean efficiency of the final B 573 ship propeller working in heterogeneous velocity area of the stream wake; η_0 – maximum efficiency of the final propeller in homogenous velocity area, variant 0 – original hull (no modifications) the stream wake velocity area measured during tank tests, variant 18 – manual modification of the stern part of the ship – symmetrical hull, variant 19 – manual modification of the stern part of the ship – asymmetrical hull

Rys. 7. Średnia sprawność finalnej śruby napędowej statku B 573 pracującej w niejednorodnym polu prędkości strumienia nadążającego; η_0 – maksymalna sprawność śruby finalnej w jednorodnym polu prędkości, wariant 0 – kadłub wyjściowy (bez modyfikacji), pole strumienia nadążającego zmierzone podczas badań modelowych, wariant 18 – ręczna modyfikacja rufowej części statku – kadłub symetryczny, wariant 19 – ręczna modyfikacja rufowej części statku – kadłub niesymetryczny

9. Wnioski końcowe ze wstępnych analiz numerycznych

Na podstawie numerycznych analiz 19 wersji kadłuba statku wybrano te wersje, dla których przy danych założeniach uzyskano mniejszy opór (rys. 6). Następnie dla strumieni nadążających otrzymanych dla każdej wersji kadłuba obliczono sprawność śruby napędowej zastosowanej na statku B 573 – wyniki tych obliczeń (rys. 7) są bardzo interesujące i świadczą o tym, że lokalna zmiana geometrii kadłuba statku w rejonie rufy może mieć bardzo korzystny wpływ

Tabela 3. The influence of the plane rudder located behind a propeller on its efficiency

Tabela 3. Wpływ steru płetwowego na sprawność śruby napędowej

Efficiency of an open-water propeller η_0 [-]/sprawność śruby napędowej η_0 [-]				
Lp.	Advance ratio J [-]/ współczynnik posuwu J [-]	Open-water propeller/ śruba swobodna	Propeller with rudder/ śruba ze sterem	Propeller with rudder at 150/śruba ze sterem wychylonym
1	0.1	0.161	0.154	0.156
2	0.2	0.306	0.303	0.311
3	0.7	0.658	0.781	0.795

efficiency of the whole hull-propeller-plane rudder system is not always achieved for the ship hull of the lowest resistance and open-water propeller – since stream wake from the hull plays a decisive role in the resulting propulsion efficiency. Still the results are very encouraging, therefore further research in this area is continued, as numerical analyses of this type (improving hull hydrodynamic efficiency) promise the largest advantages in decreasing propulsion power as to reduce CO₂ emission, and thus help us obtain the lowest EEDI value for the new ships.

Bibliography/Literatura

- [1] GHG-WG 2/2/7 – Consideration of the energy efficiency design index for new ships, 2010.
- [2] Jaworski S., Syrocki W.: Ship B 573: Results of Model Tests-Resistance, Wake Measurements, Technical Report No RH-95/T-041A, Ship Design and Research Centre, Gdańsk 1995.
- [3] MEPC.1/Circ.681 (2009) – Interim Guidelines on the Method of Calculation of the Energy Efficiency Design Index for New Ship's.
- [4] MEPC 62/24/Add. 1, Annex19, Resolution MEPC.203(62), 2011.
- [5] Prpić-Oršić J., Faltinsen O.M.: Estimation of ship speed loss and associated CO₂ emission in a seaway, Ocean Engineering 44, 2012.
- [6] Projekt Badawczy Rozwojowy nr R1000801. Numeryczne badania współdziałania steru, śruby i rufy statku zmierzające do poprawy właściwości napędowych i manewrowych statku transportowego, kierownik projektu: prof. dr hab. inż. Tadeusz Szelangiewicz, Szczecin 2009.
- [7] Syrocki W.: Ship B 573 Results of the Model Tests, Ship Design and Research Centre, Technical Report No. RH-96/T-023A, Gdańsk 1995.
- [8] Szelangiewicz T., Abramowski T.: Numerical analysis of influence of ship hull form modification on ship resistance and propulsion characteristics. Part I: Influence of hull form modification on ship resistance characteristics, Polish Maritime Research, No. 4(62), Vol. 16, Gdańsk 2009.
- [9] Szelangiewicz T., Abramowski T.: Numerical analysis of influence of ship hull form modification on ship resistance and propulsion characteristics. Part II: Influence of hull form modification on wake current behind the ship, Polish Maritime Research, No. 1(63), Vol. 17, Gdańsk 2010.
- [10] Szelangiewicz T., Abramowski T., Żelazny K.: Numerical analysis of influence of ship hull form modification on ship resistance and propulsion characteristics. Part III: Influence of modifications on screw propeller efficiency, Polish Maritime Research, No. 1(63), Vol. 17, Gdańsk 2010.

Ostatecznie, po przeanalizowaniu wszystkich wariantów obliczeń, udało się uzyskać:

- zmniejszenie oporu kadłuba statku o 2% (punkty procentowe),
- zwiększenie sprawności śruby (lepszy rozkład strumienia nadążającego) o 4,5%,
- dodatkowe zwiększenie

sprawności śruby napędowej w wyniku odpowiedniego profilu i położenia steru płetwowego względem śruby o 2%.

Następnie sprawdzono, jaki wpływ na wskaźnik EEDI miały najbardziej korzystne wyniki analiz numerycznych w stosunku do wskaźnika EEDI statku zbudowanego:

- wskaźnik EEDI dla statku B 573 przed modyfikacjami: EEDI = 5,6308
- a po modyfikacjach: $EEDI_{max} = 5,1803$ (zmniejszenie o 8%).

Przedstawione wyniki są wstępnymi i nie obejmują wszystkich możliwych zależności pomiędzy parametrami układu kadłub–śruba–ster. Z analizy otrzymanych wyników można podać wniosek, że najwyższa sprawność napędowa całego układu kadłub–śruba–ster płetwowy nie zawsze jest osiągnięta dla kadłuba statku o najniższym oporze i odosobnionej (bez kadłuba statku) śrubie – o wynikowej sprawności napędowej decyduje strumień nadążający wpływający z rufy statku. Jednak otrzymane wyniki bardzo zachęcają do dalszych badań, stąd prace badawcze w tym zakresie są kontynuowane, ponieważ tego typu analizy numeryczne (poprawa sprawności hydrodynamicznej kadłuba) dają największe korzyści w celu obniżenia mocy napędu oraz emisji CO₂, a tym samym uzyskania najniższej wartości wskaźnika EEDI dla nowych statków.

Tadeusz Szelangiewicz, DSc., DEng. – professor in the Faculty of Marine Technology and Transport at West Pomeranian University of Technology in Szczecin.

Prof. dr hab. inż. Tadeusz Szelangiewicz – profesor na Wydziale Techniki Morskiej i Transportu Zachodniopomorskiego Uniwersytetu Technologicznego w Szczecinie.

e-mail: tadeusz.szelangiewicz@zut.edu.pl



Katarzyna Żelazny, DEng. – doctor in the Faculty of Marine Technology and Transport at West Pomeranian University of Technology in Szczecin.

Dr inż. Katarzyna Żelazny – adiunkt na Wydziale Techniki Morskiej i Transportu Zachodniopomorskiego Uniwersytetu Technologicznego w Szczecinie.

e-mail: katarzyna.zelazny@zut.edu.pl

