

Nr 100/2017, 200–213
ISSN 1644-1818
e-ISSN 2451-2486

ANALIZA EKSPLOATACYJNEGO WSKAŹNIKA EFEKTYWNOŚCI ENERGETYCZNEJ STATKU W ASPEKCIE EKONOMICZNYM I EKOLOGICZNYM

ANALYSIS OF THE ENERGY EFFICIENCY OPERATIONAL INDICATOR IN ECONOMIC AND ECOLOGICAL ASPECT

Jacek Wysocki

Akademia Morska w Gdyni, Morska 81-87, 81-225 Gdynia,
Wydział Mechaniczny, Katedra Siłowni Okrętowych,
e-mail: j.wysocki@wm.am.gdynia.pl

Streszczenie: Artykuł przedstawia wybrane narzędzia do poprawy i oszacowania efektywności energetycznej statku oraz analizę eksploatacyjnego wskaźnika efektywności energetycznej statku (EEOI). Głównym zadaniem rozpatrywanych narzędzi jest ograniczenie emisji gazów cieplarnianych, a w szczególności dwutlenku węgla, do atmosfery podczas eksploatacji statku. Celem przeprowadzonej analizy było wykazanie możliwości stosowania EEOI w czasie eksploatacji statku.

Słowa kluczowe: eksploatacyjny wskaźnik efektywności energetycznej, konstrukcyjny wskaźnik efektywności energetycznej, plan zarządzania efektywnością energetyczną statku.

Abstract: This article presents selected tools for improving and estimating vessel energy efficiency and analysis of energy efficiency operational indicator EEOI. The main task of the tools under consideration is to reduce greenhouse gases emissions and, in particular, emission into the atmosphere during ship operation. The purpose of the study was to demonstrate the applicability of the EEOI during ship operation.

Keywords: energy efficiency operational indicator, energy efficiency design index, energy efficiency management plan.

1. WSTĘP

Transport morski stanowi najbardziej ekonomiczny i efektywny środek transportu. Niezależnie od typu statku, ta forma przewozu towarów pod wieloma względami przewyższa inne, co jest rzadko kwestionowane. Jednakże rosnące ceny ropy naftowej, a co za tym idzie, paliw ropopochodnych, oraz rosnące wymagania ekologiczne zmuszają armatorów do podejmowania działań ograniczających

zużycie paliwa oraz zmniejszających emisję gazów cieplarnianych do atmosfery. Emisja gazów cieplarnianych jest proporcjonalna do zużycia paliwa, stąd im mniejsze zużycie paliwa, tym mniejsza emisja gazów cieplarnianych.

Instytucje międzynarodowe, w tym przede wszystkim Międzynarodowa Organizacja Morska (IMO), poprzez kolejne akty prawne wymuszają nie tylko konieczność bezpiecznej eksploatacji floty, ale także dbałość o środowisko naturalne. Współczesne wymagania dotyczące ochrony środowiska zapisano w odpowiednich załącznikach do Konwencji Marpol, w tym w Załączniku VI odnoszącym się do ochrony atmosfery przed emisją toksycznych składników spalin. Mimo coraz nowocześniejszych konstrukcji i technologii budowy statków ciągle poszukuje się różnych metod zwiększających ich efektywność energetyczną. Poszukiwania te ukierunkowane są na kolejne etapy konstrukcyjno-technologiczne budowy i wyposażania statku, jak i na sferę eksploatacyjną. Wszystkie te działania w ramach ograniczania emisji gazów cieplarnianych, w tym głównie dwutlenku węgla, zmierzają do optymalnego ze względu na to kryterium, projektowania i budowy statków, a następnie ich eksploataowania. Przykładem działań możliwych do zrealizowania na etapie projektowania i budowy są m.in. zabiegi zmniejszające opory kadłuba, co pośrednio może wpłynąć na efektywność energetyczną. W tym celu pokrywa się kadłuby statków farbami antyporostowymi.

Kiedy rozpatruje się emisję gazów cieplarnianych z siłowni okrętowej, należy rozgraniczyć co najmniej dwie strony eksploatacji: w podróży morskiej oraz podczas postoju w porcie. Napęd główny statku podczas podróży emituje największą ilość dwutlenku węgla do atmosfery. Aby ograniczyć emisję gazów toksycznych można np. montować wysokosprawny silnik wolnoobrotowy z optymalnie sterowanym procesem wtrysku i spalania paliwa. Natomiast kiedy silnik lub silniki napędu głównego nie pracują podczas przeładunku w porcie, eksploatuje się głównie zespoły prądotwórcze i kotły opalane – następne największe w kolejności źródła emisji dwutlenku węgla.

W celu poprawy efektywności energetycznej na etapie projektowania i budowy stosuje się obecnie konstrukcyjny współczynnik efektywności energetycznej statku (EEDI). Wymusza on na producentach statków optymalizację montowanych urządzeń pod kątem emisji gazów cieplarnianych oraz stosowanie nowoczesnych, energooszczędnych rozwiązań technologicznych. Dla statków będących już w eksploatacji wprowadzono w życie konieczność stosowania planu zarządzania efektywnością energetyczną statku (SEEMP), który ma doprowadzić do stworzenia pakietu czynności zwiększających efektywność energetyczną. Obowiązkiem utrzymania planu SEEMP obciążone są załogi statku, pracownicy lądowi armatora, właściciele ładunku i zarządzający portami, natomiast do monitorowania planu SEEMP ma posłużyć eksploatacyjny wskaźnik efektywności energetycznej statku EEOI, którego stosowanie nie jest jeszcze wymagane. Zaproponowana przez IMO postać współczynnika EEOI jest kierowana do dalszych badań w warunkach rzeczywistych.

2. KONSTRUKCYJNY WSKAŹNIK EFEKTYWNOŚCI ENERGII (EEDI)

Narzędziem do pomiaru efektywności energetycznej statku, wprowadzonym przez IMO, jest konstrukcyjny wskaźnik efektywności energetycznej statku (EEDI). Dotyczy on nowo budowanych statków od 1 stycznia 2013 roku oraz statków przebudowywanych. Od tej daty stosowanie wskaźnika jest obowiązkowe na etapie projektowania i konstruowania statku niezależnie od jego typu i klasy. Wynik wskaźnika ma określać masową emisję dwutlenku węgla do atmosfery w stosunku do przebytej drogi statku i masy przewożonego ładunku. Obliczenia na etapie konstrukcyjnym muszą być poddane weryfikacji w czasie prób morskich zbudowanego statku i skierowane do ewentualnych poprawek. Istotną jest linia odniesienia, do której porównywany będzie otrzymany wynik EEDI. Wartość EEDI oblicza się ze wzoru 1 [MEPC Circ.681 EEDI Calculation]:

$$EEDI = \frac{(\prod_{j=1}^M f_j) \cdot (\sum_{i=1}^{nME} P_{ME(i)} \cdot C_{FME(i)} \cdot SFC_{ME(i)}) + (P_{AE} \cdot C_{FAE} \cdot SFC_{AE})}{f_i \cdot Capacity \cdot V_{ref} \cdot f_w} +$$

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

Zawarte w mianowniku współczynniki f_i i f_w są odpowiednio: współczynnikiem korekcyjnym pojemności kadłuba i współczynnikiem pogodowym.

Obliczona wartość masowej emisji dwutlenku węgla do atmosfery w stosunku do przebytej drogi mierzonej w kilometrach lub milach morskich i ilości przewożonego ładunku powinna wynosić jak w równaniu 2 [Załącznik VI do Konwencji MARPOL 73/78]:

$$\text{Osiągnięty EEDI} \leq \text{Wymagany EEDI}, \quad (2)$$

Natomiast wymagany EEDI oblicza się ze wzoru 3 [Załącznik VI do Konwencji MARPOL 73/78]:

$$\text{Wymagany EEDI} = \left(1 - \frac{X}{100}\right) \cdot \text{wartość linii odniesienia}, \quad (3)$$

gdzie X – współczynnik redukcji, którego wartość pokazano w tabeli 1.

Tabela 1. Wartość współczynnika redukcji X dla wybranych rodzajów statków

Table 1. The value of the reduction factor X for selected types of ships

Typ statku	Wielkość statku	Etap 0 01.01.2013- 31.12.2014	Etap 1 01.01.2015- 31.12.2019	Etap 2 01.01.2020- 01.01.2024	Etap 3 01.01.2025 i po tej dacie
Masowiec	20 000 DWT i więcej	0	10	20	30
	10 000-20 000 DWT	nie dotyczy	0-10	0-20	0-30
Gazowiec	10 000 DWT i więcej	0	10	20	30
	2000-10 000 DWT	nie dotyczy	0-10	0-20	0-30
Zbiornikowiec	20 000 DWT i więcej	0	10	20	30
	4000-20 000 DWT	nie dotyczy	0-10	0-20	0-30
Kontenerowiec	15 000 DWT i więcej	0	10	20	30
	1000-15 000 DWT	nie dotyczy	0-10	0-20	0-30
Drobnicowiec	15 000 DWT i więcej	0	10	15	30
	3000-15 000 DWT	nie dotyczy	0-10	0-15	0-30

Współczynnik redukcji X dla danego typu statku dobierany jest zgodnie z danymi zawartymi w tabeli 1. Na przykład dla statku typu masowiec o wyporności 20 tys. DWT i więcej, gdzie jego budowa rozpoczęła się w przedziale czasowym od 01.01.2013 do 31.12.2014 roku współczynnik X przyjmuje wartość 0. Kolejno co 5 lat X będzie wzrastał o 10.

Wartość linii odniesienia oblicza się według wzoru 4 [Załącznik VI do Konwencji MARPOL 73/78]:

$$\text{Wartość linii odniesienia} = a \cdot b^{-c} \quad (4)$$

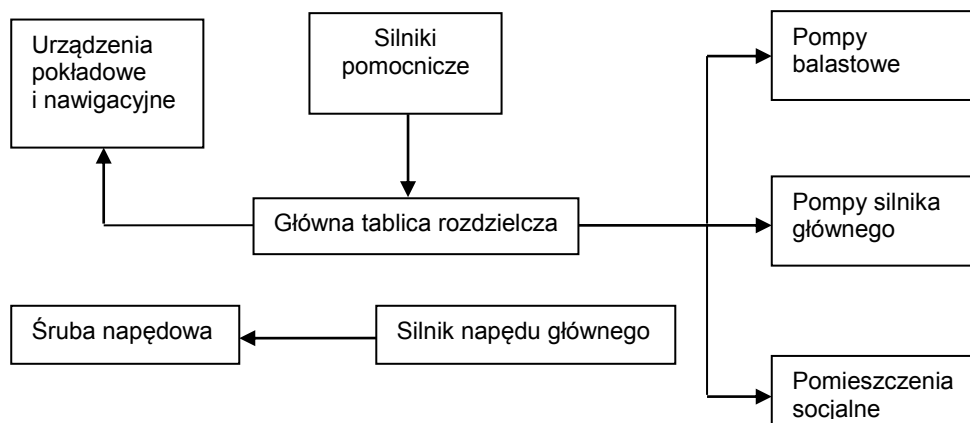
gdzie a, b, c – współczynniki, których wartości podano w tabeli 2.

Tabela 2. Wartości współczynników a, b, c do obliczenia linii odniesienia dla wybranych typów statków

Table 2. Values of coefficients a, b, c for calculating reference lines for selected types of ships

Typ statku	a	b	c
Masowiec	961,79	DWT statku	0,477
Gazowiec	1120,00	DWT statku	0,456
Zbiornikowiec	1218,80	DWT statku	0,488
Kontenerowiec	174,22	DWT statku	0,201
Drobnicowiec	107,48	DWT statku	0,216
Chłodniowiec	227,01	DWT statku	0,244
Statek kombinowany	1219,00	DWT statku	0,488
Statek towarowy ro-ro (do przewozu pojazdów)	$(DWT/GT)^{-0,7} \cdot 780,36$ jeżeli $DWT/GT < 0,3$ 1812,63 Jeżeli $DWT/GT \geq 0,3$	DWT statku	0,471
Statek towarowy ro-ro	1405,15	DWT statku	0,498
Statek pasażerski ro-ro	752,16	DWT statku	0,381
Zbiornikowiec LNG	2253,7	DWT statku	0,474
Statek wycieczkowy pasażerski z napędem niekonwencjonalnym	170,84	GT statku	0,214

Na rysunku 1 pokazano przykładowy układ energetyczny statku, który składa się z napędu głównego, gdzie silnik wolnoobrotowy napędza śrubę o skoku stałym. Agregaty prądotwórcze wytwarzają energię elektryczną, która poprzez główną tablicę rozdzielczą przekazywana jest do urządzeń okrętowych.



Rys. 1. Schemat blokowy energetycznego układu zasilania statku [opracowanie własne]

Fig. 1. Block diagram of the power supply system of the ship [own elaboration]

Do obliczeń EEDI nie bierze się pod uwagę energii zużytej na cele grzewcze. Wzór na obliczenie konstrukcyjnego wskaźnika efektywności energetycznej statku przyjmuje następującą postać (5):

$$EEDI = \frac{1 \cdot (\sum_{i=1}^{n_{ME}} P_{ME(i)} \cdot C_{FME(i)} \cdot SFC_{ME(i)}) + (P_{AE} \cdot C_{FAE} \cdot SFC_{AE}) + 0 - 0}{f_i \cdot Capacity \cdot V_{ref} \cdot f_w} \quad (5)$$

gdzie:

- P – moc silnika,
- C_F – współczynnik emisji dwutlenku węgla z silnika w zależności od użytego paliwa (tab. 3),
- SFC – jednostkowe zużycie paliwa silnika,
- V_{ref} – prędkość referencyjna statku,
- Capacity – objętość statku,
- f_i – współczynnik korekcyjny kadłuba,
- f_w – korekcyjny pogodowy,
- indeksy $_{AE}$ i $_{ME}$ – dotyczą odpowiednio agregatów prądotwórczych i silnika lub silników głównych.

Analizowany statek nie posiada klasy lodowej, więc współczynnik klasy lodowej wynosi 1. Statek nie jest wyposażony w elektryczny silnik wałowy oraz urządzenia wykorzystujące siłę wiatru i energię słoneczną, dlatego składowe te wynoszą 0.

3. PLAN ZARZĄDZANIA EFEKTYWNOŚCIĄ ENERGETYCZNĄ STATKU (SEEMP)

Wytyczne, które mają określać wprowadzanie i utrzymanie planu zarządzania efektywnością energetyczną statku, zostały zawarte w Załączniku VI Konwencji MARPOL podczas 62. sesji MEPC w lipcu 2011 roku. Obowiązki odnośnie do SEEMP dotyczą wszystkich nowo budowanych statków od pierwszego stycznia 2013 roku o pojemności brutto powyżej 400 ton, jak również statków znacznie przebudowywanych. Założenia planu kierowane są do armatorów, osób zarządzających flotą, pionu eksploatacyjnego, załóg statku, właścicieli ładunków, czarterujących statki, a także zarządzających przeładunkiem w porcie. Aby SEEMP funkcjonował, konieczna jest pewnego rodzaju korelacja między poszczególnymi pionami całego zespołu zarządzającego flotą. SEEMP może być włączony do kodeksu ISM jako integralna część zarządzania bezpieczną eksploatacją statku i ochrony środowiska. Efektem wprowadzenia planu ma być zmniejszenie zużycia paliwa i zmniejszenie emisji gazów cieplarnianych. Jednakże zachowanie bezpieczeństwa żeglugi pozostaje rzeczą najważniejszą.

SEEMP składa się z czterech części [MEPC Circ.683 SEEMP]:

- 1) planowanie,
- 2) wdrożenie założeń planu,
- 3) monitorowanie,
- 4) ocena wyników realizacji.

Planowanie SEEMP jest obowiązkiem armatora. W czasie planowania należy wziąć pod uwagę aktualne zużycie energii, czyli zużycie paliwa oraz aktualne wskazania oszczędności energii. Ważnym aspektem podczas planowania jest przepływ informacji między załogą statku a armatorem. Planowanie ma określić pewien pakiet środków (np. optymalizacja prędkości, monitorowanie stanu kadłuba, nawigacja meteorologiczna), które będą wykorzystywane przez załogę w celu zmniejszenia zużycia paliwa. Stosowane środki będą uzależnione od typu statku i od zadań, do jakich dana jednostka jest przeznaczona. Również stan eksploatacyjny statku ma wpływ na realizację założeń SEEMP, ponieważ inne czynności będą podejmowane, jeśli statek znajduje się w podróży morskiej, a inne, gdy statek stoi w porcie (np. w czasie przeładunku, gdy wyłączony jest napęd główny).

Po procesie planowania należy przystąpić do wdrożenia założeń planu SEEMP. Wdrożenie zaplanowanych operacji do eksploatacji statku leży w gestii pracowników lądowych i załóg statku, a w szczególności pracowników poziomów zarządzających i operacyjnych. Istotną sprawą w trakcie wdrażania jest komunikacja pomiędzy zarządzającymi w pionie lądowym a załogą statku. Brak kontaktu i współpracy między personelem lądowym a załogą statku może bowiem doprowadzić do problemów w realizacji planu (np. opóźnienie w dostarczeniu zamawianych części zapasowych na statek uniemożliwi utrzymanie właściwego stanu technicznego maszyn i urządzeń). Podstawowe czynności, które mogą wpłynąć na zmniejszenie zużycia paliwa, a, co za tym idzie, zwiększenie efektywności energetycznej statku, można podzielić na cztery poziomy działania. Do tych czynności należą m.in.:

- a) na poziomie konstrukcyjno-produkcyjnym:
 - dobór pędnika,
 - dobór silników głównych,
 - optymalna pod kątem oporów pływania konstrukcja kadłuba i jego chropowatość,
 - dobór silników pomocniczych i kotłów,
 - odpowiedni dobór urządzeń wykorzystujących ciepło odpadowe (utyliczacja ciepła),
 - zastosowanie elektronicznych urządzeń sterujących podziałem mocy zespołów prądotwórczych (PMS),
 - wykorzystanie alternatywnych źródeł energii (ogniwa fotowoltaiczne, wykorzystanie siły wiatru);
 -

- b) na poziomie eksploatacyjnym załogi pokładowej:
 - odpowiednio dopasowany balast w zależności od stanu eksploatacyjnego statku,
 - prawidłowy trym statku,
 - optymalne ze względu na opory pływania wykorzystanie steru i autopilota podczas manewrowania statkiem,
 - nawigacja meteorologiczna,
 - optymalna ze względu na zużycie paliwa prędkość statku,
 - planowanie podróży morskiej;
- c) na poziomie eksploatacyjnym załogi maszynowej:
 - optymalna pod kątem efektywności energetycznej regulacja silników głównych, agregatów prądotwórczych, kotłów,
 - utrzymywanie urządzeń eksploatacyjnych w należyтым stanie technicznym,
 - monitorowanie parametrów pracy urządzeń zwłaszcza zużycia paliwa,
 - optymalne wykorzystanie ciepła odpadowego,
 - optymalne wykorzystanie dostępnych narzędzi do oszczędzania energii;
- d) na poziomie eksploatacyjnym pracowników lądowych zarządzających flotą:
 - kontrolowanie stanu chropowatości kadłuba i pędnika,
 - optymalne planowanie podróży morskiej,
 - odpowiednia gospodarka paliwowa,
 - zapewnienie załogom statku środków i narzędzi umożliwiających odpowiednie gospodarowanie energią, itp.

Kolejne składowe planu SEEMP dotyczą jego monitorowania i oceny. Narzędziem do monitorowania i oceny efektywności energetycznej, zaproponowanym przez Komitet Ochrony Środowiska Morskiego (MEPC Circ.684 EEOI) w sierpniu 2009 roku, jest eksploatacyjny wskaźnik efektywności energetycznej statku (EEOI). Jest to wskaźnik międzynarodowy, ale jego stosowanie nie jest obowiązkowe. Postać współczynnika umożliwia wykorzystanie go do obliczenia emisji dwutlenku węgla ze statku będącego w eksploatacji. Wyniki obliczeń mogą dotyczyć pojedynczych podróży morskich, postoiu w porcie, jak również tygodniowych, miesięcznych czy rocznych emisji spalin ze statku dla pojedynczego statku lub całej floty armatora. EEOI może być stosowany praktycznie dla każdego rodzaju i typu statku. Wyjątkiem są jednostki biorące udział w akcjach ratunkowych i statki specjalistyczne wykonujące zadania, wpływające bezpośrednio na bezpieczeństwo żeglugi. Wytyczne IMO nie wykluczają rozwinięcia współczynnika oszczędzania energii w dowolny sposób i używania innych metod pomiaru efektywności oszczędzania energii, dlatego istotne są dokładniejsze rozważania przydatności i stosowalności EEOI.

4. EKSPLOATACYJNY WSKAŹNIK EFEKTYWNOŚCI ENERGETYCZNEJ STATKU (EEOI)

Eksploatacyjny wskaźnik efektywności energetycznej (EEOI) statku służy do obliczenia efektywności energetycznej pojedynczych statków lub całej floty armatora w eksploatacji. EEOI określa stosunek masy emisji dwutlenku węgla z silników napędu głównego, silników elektrowni okrętowej, kotłów i spalarek, do przebytej drogi i ilości przewożonego ładunku. W porównaniu z EEDI, (będącym miarą emisji dwutlenku węgla statku nowo budowanego) EEOI uwzględnia aktualne zużycie paliwa statku wykonującego swoje zadania. Ponieważ zużycie paliwa zależy od stanu technicznego wszystkich urządzeń okrętowych i kadłuba, to EEOI jest wskaźnikiem uwzględniającym rzeczywiste warunki eksploatacyjne. Na zużycie paliwa mają wpływ np. czynniki otoczenia, które oddziałują na kadłub często niekorzystnie. Niższa wartość EEOI oznacza, że statek jest bardziej energooszczędny i jednocześnie emituje mniej szkodliwych związków do środowiska naturalnego. Statek energooszczędny oznacza, że staje się bardziej ekonomiczny, zużywa mniej paliwa podczas wykonywania swoich zadań. Dla niektórych typów statków szacuje się, że koszty paliwa mogą stanowić nawet 90% całkowitych kosztów eksploatacyjnych statku. Według wytycznych IMO wzór na obliczenie EEOI przyjmuje ogólną postać (6):

$$EEOI = \frac{\text{całkowita ilość emitowanego dwutlenku węgla ze statku}}{\text{praca transportu}} \quad (6)$$

Szczegółowe obliczenie EEOI przedstawia równanie 7 [MEPC Circ.684 EEOI]. Indeks „i” odnosi się do liczby podróży, a indeks „j” – do rodzaju paliwa.

$$EEOI = \frac{\sum_i \sum_j (FC_{ij} \cdot C_{Fj})}{\sum_i (m_i \cdot D_i)} \left[\frac{\text{g CO}_2}{\text{t} \cdot \text{Nm}} \right] \text{ lub } \left[\frac{\text{g CO}_2}{\text{t} \cdot \text{km}} \right] \quad (7)$$

gdzie:

- i – numer podróży morskiej [-],
- j – rodzaj stosowanego paliwa [-],
- FC – zużycie paliwa podczas podróży i [g],
- C_F – współczynnik emisji CO₂ paliwa w zależności od rodzaju (tab. 6),
- m_i – masa przewożonego ładunku [t],
- D_i – dystans pokonany przez statek podczas podróży [km] lub [Nm].

Analizując mianownik równania 7, łatwo zauważyć, że jego wzrost będzie pomniejszał wartość EEOI. Mianownik, czyli praca transportu, składa się z iloczynów dwóch składowych: przebytego dystansu i masy przewożonego ładunku. Przy zwiększaniu dystansu podróży morskiej proporcjonalnie wzrastać będzie zużycie paliwa w liczniku. Jeśli zwiększy się masę przewożonego ładunku, można założyć, że w większości przypadków zużycie paliwa również wzrośnie, ale w zdecydowanie mniejszym stopniu.

Z punktu widzenia EEOI statek przewożący większą masę towaru jest bardziej energooszczędny. Aby transport morski był ekonomiczny i efektywny, unika się podróży statku częściowo załadowanego, czy podróży statku pod balastem. Ze względu na różnorodność ładunków pod kątem masy i objętości konieczne jest funkcjonowanie statków małych, średnich i dużych.

Z kolei w liczniku wzoru 7 występuje iloczyn zużycia paliwa FC i współczynnika emisji dwutlenku węgla C_F . Współczynnik emisji dwutlenku węgla ma wartość stałą dla stosowanego rodzaju paliwa (tab. 3). Drugą wartością jest masowe zużycie paliwa, które ma znaczący wpływ na EEOI. Spadek zużycia paliwa przy tej samej odległości, jaką pokona statek, i przy tej samej masie ładunku powoduje obniżenie współczynnika efektywności energetycznej statku, na co mają wpływ czynniki zewnętrzne i wewnętrzne.

Tabela 3. Wartości współczynnika emisji spalin C_F

Table 3. Emission factor values C_F

Typ paliwa	Rodzaj paliwa	Zawartość węgla	C_F [t CO_2 /t paliwa]
Paliwo lekkie destylowane (MDO/MGO)	ISO 8217 od DMX do DMC	0,875	3,2060
Paliwo pozostałościowe lekkie (LFO)	ISO 8217 od RMA do RMD	0,86	3,151040
Paliwo pozostałościowe ciężkie (HFO)	ISO 8217 od RME do RMK	0,85	3,1144
Paliwo gazowe (LPG)	Propan	0,819	3,0000
Paliwo gazowe (LPG)	Butan	0,827	3,0300
Gaz ziemny naturalny (LNG)	Metan	0,75	2,7500

W celu wykazania wpływu na obliczone wartości EEOI różnych czynników przyjęto następujące dane wejściowe:

- a) statek typu masowiec,
- b) ładowność statku 25 000 ton (DWT),
- c) dystans (przebyta droga morska) 300 mil,
- d) zużycie rodzajów paliw (paliwo ciężkie HFO i paliwo lekkie MDO)
 - podróż statku z pełnym ładunkiem (300 mil i 25 000 ton) : 30 ton HFO i 5 ton MDO,
 - załadunek 25 000 ton w porcie 4 tony MDO,
 - rozładunek 25 000 ton w porcie 4 tony MDO.

Obliczenie EEOI dotyczy trzech podróży morskich w dwóch przypadkach:

- a) statek pokonuje drugą podróż bez ładunku,
- b) statek pokonuje drugą podróż częściowo załadowany.

Wartości współczynnika emisji dwutlenku węgla C_F pobrano z tabeli 3.

W tabeli 4 zestawiono przyjęte dane i obliczony EEOI dla kolejnych podróży, w tym drugiej bez ładunku. EEOI_C dotyczy całkowitej pracy transportu wykonanej przez statek w określonym czasie, czyli od wyjścia z portu A z ładunkiem do końca rozładunku w porcie B, co obliczono następująco:

$$EEOI_C = \frac{\sum_i \sum_j (FC_{ij} \cdot C_{Fj})}{\sum_i (m_i \cdot D_i)} = \frac{80 \cdot 3,1144 + 27 \cdot 3,206}{25\ 000 \cdot 300 + 0 \cdot 300 + 25\ 000 \cdot 300} = 22,38 \cdot 10^{-6} \text{ [ton CO}_2\text{/tonomile]}$$

Tabela 4. Dane do obliczeń i obliczone wartości EEOI dla statku bez ładunku podczas podróży drugiej

Table 4. Data to calculate and calculated EEOI values for unladen vessel during second trip

Podróż		Rodzaj zużytego paliwa		Masa ładunku	Dystans	EEOI	EEOI _C
		HFO [t]	MDO _{M+P} [t]	[t]	[mile]	[tonCO ₂ /tonomile]·10 ⁻⁶	
1	Z A do B	30	9	25 000	300	16,30	22,38
2	Z B do A	20	9	0	300	0	
3	Z A do B	30	9	25 000	300	16,30	

W tabeli 5 zestawiono dane dla wariantu, gdy druga podróż odbywa się z ładunkiem częściowym:

- masa przewożonego ładunku wynosi 15 000 ton,
- napęd główny zużywa 25 ton paliwa HFO,
- z powodu dodatkowego załadunku zużycie MDO wzrosło o 3 tony w porównaniu do wariantu pierwszego.

Tabela 5. Dane do obliczeń i obliczone wartości EEOI dla statku przewożącego niepełny ładunek

Table 5. Data to calculate and calculated EEOI values for a ship carrying incomplete cargo

Podróż		Rodzaj zużytego paliwa		Masa ładunku	Dystans	EEOI	EEOI _C
		HFO [t]	MDO _{M+P} [t]	[t]	[Nm]	[tonCO ₂ /tonomile]·10 ⁻⁶	
1	Z A do B	30	9	25 000	300	16,30	18,50
2	Z B do A	25	12	15 000	300	25,85	
3	Z A do B	30	9	25 000	300	16,30	

Jak wynika z obliczeń, zdecydowany wpływ na całkowitą wartość EEOI_C ma masa przewożonego ładunku. Brak ładunku w podróży drugiej powoduje wzrost emisji dwutlenku węgla do atmosfery i zmniejszenie efektywności energetycznej statku mimo mniejszego zużycia paliwa. W rozpatrywanym przykładzie zużycie paliwa MDO_P w porcie podczas załadunku lub rozładunku sumowane jest z zużyciem MDO_M podczas podróży.

Tabele 6 i 7 przedstawiają wartość EEOI_C i EEOI tylko dla podróży morskiej bez uwzględnienia zużycia paliwa podczas postoju w porcie (podczas załadunku i rozładunku).

Tabela 6. Dane do obliczeń i obliczone wartości EEOI dla przypadku, gdy zużycie MDO w porcie nie jest brane pod uwagę i podróż druga odbywa się bez ładunku

Table 6. Data to calculate and calculated EEOI values for cases where MDO consumption in port is not taken into account and the second trip takes place unloaded

Podróż	Rodzaj zużytego paliwa			Masa ładunku	Dystans	EEOI	EEOI _c	
	HFO[t]	MDO _P [t]	MDO _M [t]	[t]	[mile]	[tonCO ₂ /tonomile]·10 ⁻⁶		
1	Z A do B	30	4	5	25 000	300	14,59	19,81
2	Z B do A	20	4	5	0	300	0	
3	Z A do B	30	4	5	25 000	300	14,59	

Tabela 7. Dane do obliczeń i obliczone wartości EEOI dla przypadku, gdy zużycie MDO w porcie nie jest brane pod uwagę i masa przewożonego ładunku w podróży drugiej jest niepełna

Table 7. Data to calculate and calculated EEOI values for cases where MDO consumption at port is not taken into account and mass of carried cargo on second trip is incomplete

Podróż	Rodzaj zużytego paliwa			Masa ładunku	Dystans	EEOI	EEOI _c	
	HFO[t]	MDO _P [t]	MDO _M [t]	[t]	[mile]	[tonCO ₂ /tonomile]·10 ⁻⁶		
1	Z A do B	30	4	5	25000	300	14,59	16,04
2	Z B do A	25	7	5	15000	300	20,86	
3	Z A do B	30	4	5	25000	300	14,59	

Analizując zaproponowany przez IMO wskaźnik, można zauważyć, że jego postać nie pozwala obliczyć efektywności energetycznej statku w porcie jako odrębnego stanu eksploatacyjnego, ponieważ przebyty dystans wynosi zero.

Rozpatrywany EEOI dla podróży drugiej (tab. 4 i 6) przyjmuje wartość zero, ponieważ przyjęta masa przewożonego ładunku wynosi zero. W rzeczywistości statek, który nie przewozi ładunku, musi zostać odpowiednio zabalastowany. Jest to istotne przede wszystkim ze względu na utrzymanie stateczności statku. Każdy zaprojektowany kadłub statku ma określoną pojemność zbiorników balastowych. Dla obliczeń EEOI przyjęto, że rozpatrywany statek posiada 9000 ton wód balastowych. Ma to znaczący wpływ na efektywność energetyczną, ponieważ zmienia się zanurzenie kadłuba statku i w związku z tym zwiększają się opory pływania.

Obliczenia EEOI z uwzględnieniem wód balastowych podczas podróży drugiej przedstawia tabela 8. Dla tej podróży przyjęto, że statek zużył 22 tony HFO.

Tabela 8. Dane do obliczeń i obliczone wartości EEOI z uwzględnieniem wód balastowych

Table 8. Data to calculate and calculated EEOI values including ballast water

Podróż	Rodzaj paliwa		Masa ładunku	Dystans	EEOI	EEOI _c	
	HFO [t]	MDO _{M+P} [t]	[t]	[mile]	[tonCO ₂ /tonomile]·10 ⁻⁶		
1	Z A do B	30	9	25 000	300	16,30	19,31
2	Z B do A	22	9	9000	300	36,06	
3	Z A do B	30	9		300	16,30	

Obliczony EEOI (tab. 8) z uwzględnieniem wód balastowych wykazuje największy współczynnik emisji dla podróży drugiej spośród badanych przypadków. Natomiast wartość współczynnika $EEOI_C$ jest mniejsza niż dla statku, w którym w podróży drugiej nie uwzględniono ładunku i balastu.

Największy wpływ na badany EEOI ma ilość przewożonego ładunku. Zużycie paliwa również wpływa na wartość EEOI, lecz w mniejszym stopniu. Ponadto zużycie paliwa zależne jest od sprawności technicznej układu napędowego i elektrowni statku, a także od stanu powierzchni podwodnych statku oraz warunków pogodowych. Oznacza to, że EEOI można odnieść do warunków eksploatacyjnych podczas pomiaru efektywności energetycznej.

5. WNIOSKI

Wskaźnik efektywności energetycznej statku EEOI może posłużyć do obliczania i kontrolowania efektywności energetycznej statku, będącego w eksploatacji. Uwzględnia w sposób pośredni aktualny wpływ czynników zewnętrznych i wewnętrznych. Do czynników zewnętrznych można m.in. zaliczyć:

- a) kierunek i siłę wiatru, wpływające na opory ruchu statku,
- b) wielkość i kierunek falowania, który ma negatywny wpływ na efektywność energetyczną statku,
- c) temperaturę powietrza i morza,
- d) załadowanie,
- e) kształt dna morskiego,
- f) głębokość akwenu itp.

Większość czynników zewnętrznych jest odczytywana i zapisywana przez załogę pokładową w dzienniku pokładowym, co stanowi rutynowe czynności podczas pełnienia wacht przez oficerów.

Czynniki wewnętrzne, mające wpływ na efektywność energetyczną, obejmują m.in.:

- a) prędkość statku – wzrost prędkości powoduje zwiększenie zużycia paliwa,
- b) stan techniczny napędu głównego,
- c) stan techniczny zespołów prądotwórczych,
- d) stan techniczny palników kotłów i innych urządzeń zużywających paliwo,
- e) chropowatość kadłuba statku,
- f) chropowatość pędnika lub pędników,
- g) ilość i sposób załadowania statku,
- h) sposób balastowania, trym statku itp.

Wdrożenie do eksploatacji założeń SEEMP oraz kontrolowanie efektywności energetycznej za pomocą EEOI może doprowadzić do wzrostu efektywności energetycznej statku. Oznacza to, że statek, wykonując swoje zadania, staje się oszczędniejszy z ekonomicznego punktu widzenia. Zużywa mniej paliwa, jedno-

częściej emituje do atmosfery mniej szkodliwych związków, w tym dwutlenku węgla, co sprawia, że staje się bardziej ekologiczny.

W odróżnieniu od EEDI EEOI uwzględnia stan techniczny silnika napędu głównego czy stan powierzchni kadłuba statku i pędnika.

Ponieważ IMO pozostawia dowolność stosowania EEOI i kieruje EEOI do dalszych badań i rozważań, warto zastanowić się nad stworzeniem technicznego wskaźnika efektywności energetycznej statku na bazie EEOI i EEDI. Techniczny wskaźnik efektywności energetycznej (EEDI) mógłby stanowić narzędzie do pomiaru chwilowej efektywności energetycznej w warunkach eksploatacyjnych. Uwzględniałby on czynniki wewnętrzne i zewnętrzne w sposób bezpośredni. Mógłby także odnosić chwilową emisję dwutlenku węgla do ciśnienia indykowanego, momentu obrotowego czy mocy na wale. Mogłoby to dać wskazówki dla eksploatatora, jaka powinna być prędkość statku w danej chwili, aby statek stał się bardziej energooszczędny w aktualnie panujących warunkach pływania. Aby tego rodzaju zależność mogłaby wystąpić, konieczne jest montowanie na statkach urządzeń do monitorowania: chwilowego zużycia paliwa i momentu obrotowego na wale.

LITERATURA

MEPC Circ.681 EEDI Calculation.

MEPC Circ.684 EEOI.

MEPC Circ.683 SEEMP.

Załącznik VI do Konwencji MARPOL 73/78, *Przepisy o zapobieganiu zanieczyszczeniu powietrza przez statki*, Prawidło 20.

Załącznik VI do Konwencji MARPOL 73/78, *Przepisy o zapobieganiu zanieczyszczeniu powietrza przez statki*, Prawidło 21.