

Andrzej Adamkiewicz, Cezary Behrendt  
*Akademia Morska w Szczecinie*

## Ocena porównawcza silników dwupaliwowych o zapłonie samoczynnym w układach napędowych zbiornikowców LNG

### Wprowadzenie

Wzrost zapotrzebowania gazu przewożonego drogą morską na przełomie XX i XXI wieku wymusił budowę zbiornikowców do przewozu gazów o wyjątkowo dużych pojemnościach, rzędu 150÷350 tys. m<sup>3</sup>. Konsekwencją tego dla statku stał się wzrost ilości parującego gazu ze zbiorników ładunkowych [2, 5].

Stosunkowo niska sprawność turbinowych napędów parowych do napędu zbiornikowców gazu LNG pierwszej generacji oraz postęp technologiczny w okrętownictwie spowodowały powstanie koncepcji i budowę gazowców napędzanych silnikami o zapłonie samoczynnym, opalanymi różnymi paliwami żeglugowymi: pozostałościowym (RM), olejem napędowym (MD) oraz LNG, przewożonym w charakterze ładunku.

Dzięki rozwojowi technologii regazyfikacji wzrosło zapotrzebowanie na silniki o zapłonie samoczynnym, które mogłyby spalać nadwyżki gazu przy załadowanym statku oraz pracować na paliwie żeglugowym (ciekłym) podczas podróży, przy całkowitym braku gazu w zbiornikach ładunkowych. W ten sposób zwiększono znacznie sprawność układu napędowego i rozwiązano problem odbioru par gazu z przestrzeni ładunkowej [5]. Tym samym narodziła się koncepcja silników dwupaliwowych do napędu statków LNG.

Względy konkurencji, jak również aspekty ekonomiczne, sprawiły, że większość firm produkujących okrętowe silniki spalinowe podjęła produkcję silników przeznaczonych do napędu głównego statków przystosowanych

do zasilania zarówno ciekłym paliwem żeglugowym, jak i gazowym [25]. Zachowano w ten sposób stosunkowo wysoką sprawność układów napędowych z silnikami o zapłonie samoczynnym, równocześnie rozwiązując zadanie odbioru oparów przewożonego gazu.

Ocena poziomu technologicznego współczesnych układów napędowych statków i ich elementów realizowana jest różnymi metodami: z równoczesnym wykorzystaniem wartości wymiarowych i bezwymiarowych, wielkości właściwych (jednostkowych) oraz wskaźników uniwersalnych. Podstawowym sposobem doboru wskaźników i ustanowienia ich znaczenia jest metoda ekspercka, której subiektywizm wynika z konieczności ograniczenia liczności wskaźników i wartościowania przypisywanych im wag. Subiektywizmu tego nie posiada metoda kryterialna, wykorzystująca wskaźniki bezwymiarowe o znacznym stopniu uogólnienia [10]. Stosowane współcześnie wskaźniki do oceny efektywności układów energetycznych statków zdefiniowane zostały przez Międzynarodową Organizację Morską IMO, jak również przez narodowe ośrodki naukowo-badawcze [1, 3, 4, 6, 12, 15, 16].

Możliwość stosowania w układach napędowych gazowców silników tłokowych o zapłonie samoczynnym, zasilanych różnymi paliwami, zainspirowała do zastosowania wskaźników efektywności jako narzędzia do porównania właściwości projektowych i jakości eksploatacji silników w głównych układach napędowych gazowców.

## Wskaźniki efektywności silników okrętowych

Podejmowane decyzje projektowe i eksploatacyjne muszą być właściwie umotywowane. Na etapie projektu ofertowego oraz podczas eksploatacji głównego układu napędowego statku występuje potrzeba analiz, porównywania ich rozwiązań oraz oceny jakości funkcjonowania w systemie utrzymania jednostki. W tym celu stosowane są wskaźniki efektywności na etapie projektowania (DI – *Design Indicators*) oraz wskaźniki efektywności eksploatacji, nazywane również kluczowymi wskaźnikami efektywności (KPI – *Key Performance Indicators*), opisujące wybrane grupy informacji [3, 4]. W okrętownictwie mogą one dotyczyć np.: układu ruchowego statku, układu energetycznego i jego poszczególnych elementów [3]. Każdy z nich charakteryzuje inną grupę cech związanych z wykonywaniem określonych funkcji przez jednostkę tylko pod pewnym względem. Wskaźniki projektowe oraz efektywności utrzymania układu energetycznego statku są klasyfikowane w ramach istniejących norm w trzy kategorie:

- 1) ekonomiczne  $\{Ei\}$  – decydujące w dominującym stopniu o wynikach finansowych statku, kosztach załogowych własnych i podwykonawców, kosztach części zamiennych, kosztach wykonywania obsługi, kosztach środków utrzymania, a przede wszystkim – o kosztach paliwa, oleju smarowego, amortyzacji i innych kosztach materiałowych;
- 2) techniczne  $\{Tj\}$ , np. informacje dotyczące wydajności, osiągnięć, niezawodności, sprawności, jakości:
  - masowo-gabarytowe (projektowe – jednostkowe masy i gabaryty) silników, mechanizmów, urządzeń, instalacji oraz całych siłowni – szczególnie przydatne na etapie projektowania ofertowego,
  - eksploatacyjne – takie jak: niezawodność pracy siłowni, przeciążalność silników napędu głównego, zdolność wykonywania manewrów, rezerwy międzyremontowe,
  - energetyczne – np.: sprawności, jednostkowe zużycie paliwa, moce i momenty obrotowe decydujące o prędkości statku, a tym samym pośrednio – o jego efektach ekonomicznych,
  - energetyczno-ekologiczne, zdeterminowane przez międzynarodowe konwencje dopuszczalnymi poziomami emisji związków toksycznych;
- 3) organizacyjne  $\{Ok\}$ , np.: struktura załóg, przyjęta strategia eksploatacji w podsystemach eksploatacji, struktura maszyn i urządzeń itd., gdzie  $i, j, k$  są licznikami cech w zbiorach rodzajów wskaźników.

Poza wymienionymi trzema kategoriami kluczowych wskaźników występuje wiele innych dotyczących: stopnia obciążenia silnika, trwałości, niezawodności, żywotności, podatności remontowej, standaryzacji, ergonomiczności, dopuszczalnych poziomów drgań w siłowni, hałasu, mikroklimatu itp. Dla tak złożonych i różnorodnych układów technicznych, jakimi są siłownie okrętowe, wskaźniki te muszą być ściśle zdefiniowane i jednoznacznie interpretowane.

W każdej z tych grup wydzielane są wskaźniki na poziomie ogólnym (armatorskim), pośrednim (układ energetyczny statku) i szczegółowym (elementy takie jak: silniki główne, pomocnicze, kotły główne i pomocnicze). W normach [19] umieszczono wskaźniki uznane przez Komitet Techniczny CEN/TC 319 „Maintenance” za najistotniejsze i zasugerowano ich przypisanie na poziomie decyzyjnym. Nie oznacza to jednak, że na armatorów i instytucje eksploatujące jednostki pływające nakładane są jakiegokolwiek ograniczenia. Wskaźniki efektywności są definiowane i stosowane na indywidualne zapotrzebowanie informacyjne projektantów i armatorów.

### Wskaźniki masowo-gabarytowe

Układ energetyczny statku (zawsze zbyt duży gabarytowo i masowo z punktu widzenia funkcji transportowych) rzutuje ujemnie na nośność statku, a pośrednio nawet na jego prędkość i zasięg pływania. Wskaźniki odnoszone do całego obiektu, np. do wyporności statku, umożliwiają porównanie masy i objętości różnych układów napędowych, jak również różnych typów i wielkości statków, na poziomie ogólnym – armatorskim [3, 4, 17].

Do określenia masowych i objętościowych wskaźników siłowni wygodne jest posługiwanie się wielkościami względnymi, odniesionymi do mocy nominalnej silników napędu głównego statku  $P_n$ . Spośród nich przydatnymi dla porównań i analizy, szczególnie na etapie wstępnego projektowania siłowni, są wskaźniki jej masy jednostkowej (masa siłowni w odniesieniu do mocy napędu głównego) oraz wskaźniki jej objętości. Wskaźniki na poziomie szczegółowym dotyczące silnika głównego definiowane są następująco [3, 17]:

– masa jednostkowa silnika:

$$g_s = \frac{m_s}{P_n} \quad (1)$$

gdzie:

$m_s$  – masa silnika,

$P_n$  – moc nominalna silnika;

- zajmowana przez silnik powierzchnia jednostkowa:

$$a_s = \frac{L_{\max} B_{\max}}{P_n} \quad (2)$$

- objętość jednostkowa silnika:

$$v_s = \frac{L_{\max} H_{\max} B_{\max}}{P_n} \quad (3)$$

gdzie:

$L_{\max}$ ,  $B_{\max}$ ,  $H_{\max}$  – odpowiednio maksymalna długość, szerokość, wysokość silnika bez pomocniczych podzespołów zawieszonych.

Wskaźnik (1) może być obliczany dla silników suchych lub silników z cieciami eksploatacyjnymi. Tradycyjnie dla oceny efektywności przyjętych przy projektowaniu charakterystyk geometrycznych silników o zapłonie samoczynnym stosowany jest wskaźnik zwartości konstrukcji, stanowiący stosunek roboczej objętości silnika do jego gabarytów, definiowany zależnością [6, 17]:

$$\delta = \frac{\pi D^2 S i}{4 L_{\max} B_{\max} H_{\max}} \quad (4)$$

gdzie:

$D$  i  $S$  – odpowiednio średnica cylindra i skok tłoka,

$i$  – liczba cylindrów.

### Wskaźniki energetyczne

Uniwersalną miarą bezwymiarową, a równocześnie miernikiem strat zachodzących w układzie energetycznym bądź w poszczególnych silnikach, uwzględniającą jednocześnie informacje na temat wartości opałowej paliwa, charakteryzującą jego właściwości fizyczne i chemiczne, jest sprawność efektywna silnika  $\eta_e$  definiowana zależnością:

$$\eta_e = \frac{3600}{W_{fu} b_e} \quad (5)$$

gdzie:

$W_{fu}$  – wartość opałowa dolna paliwa [kJ/kg],

$b_e$  – jednostkowe zużycie paliwa [kg/kWh],

$$b_e = \frac{B_h}{P_e} \quad (6)$$

$B_h$  – godzinowe zużycie paliwa [kg/h],

$P_e$  – moc efektywna silnika [kW].

W zależności od zakresu, charakteru, potrzeb i fizyki wyodrębnianych strat sprawność może być rozpatrywana

jako efektywna, użyteczna, wewnętrzna, wolumetryczna, mechaniczna, ogólna itp. [3, 17].

Poziom rozwoju technologicznego silnika określa nie tylko jego ekonomiczność, ale także wielkości odzwierciedlające emisję toksycznych składników w spalinach wylotowych.

Oprócz paliwa, źródłem substancji szkodliwych w spalinach jest olej silnikowy. Jego proste frakcje są zazwyczaj całkowicie utleniane w komorach spalania do  $\text{CO}_2$  i pary wodnej.

Wielocząsteczkowe węglowodory ciężkich frakcji ropy naftowej w warunkach wysokich temperatur w komorze spalania są narażone na pirolizy z tworzeniem stałych cząstek pyłu węglowego, w którym są adsorbowane rakotwórcze wielopierścieniowe węglowodory aromatyczne. Cząstki stałe są najważniejszym szkodliwym produktem spalania oleju w silniku. Same dodatki stosowane w olejach silnikowych (antyoksydacyjny, myjący, dyspergujący, przeciwkorozyjny, wielofunkcyjne itp.), których ilość może osiągać 25÷30%, mogą być substancjami toksycznymi. W związku z tym, zużycie oleju w silniku jest ważne nie tylko z punktu widzenia ekonomiczności, ale również z powodu jego wpływu na toksyczność spalin.

Dlatego do oceny efektywności energetycznej silników o zapłonie samoczynnym jest stosowana bardziej dokładna średnia sprawność efektywna  $\eta_{e, fu, oil}$ , uwzględniająca sumaryczny efekt cieplny spalania paliwa i oleju silnikowego definiowana zależnością [6]:

$$\eta_{e, fu, oil} = \frac{3600}{W_{fu} b_e + W_{oil} b_{oil}} \quad (7)$$

gdzie:

$W_{oil}$  – wartość opałowa dolna oleju,

$b_{oil}$  – jednostkowe zużycie oleju silnikowego (produkty niepełnego spalania).

Ze względu na niską kaloryczność, niewielkie zużycie oleju nie może zasadniczo wpłynąć na wartość wskaźnika opłacalności. Jednakże skumulowany wpływ szeregu drobnych czynników może zasadniczo zmienić ocenę poziomu technologicznego i jakości silnika spalinowego obliczonego wyłącznie na podstawie ograniczonego zbioru wskaźników.

Sprawność jest wskaźnikiem energetycznym, a równocześnie eksploatacyjnym i ekonomicznym, ponieważ stopień wykorzystania energii świadczy o własnościach eksploatacyjnych maszyny, a pośrednio o stopniu jej degradacji eksploatacyjnej w stosunku do stanu projektowego na początku eksploatacji, jak również o kosztach jej eksploatacji.

Ekonomiczna efektywność utrzymania silnika (poziom szczegółowy) w układzie energetycznym statku (poziom pośredni) w znacznym stopniu zależy od poziomu technologicznego i jakości całego układu ruchowego statku (poziom ogólny – armatorski).

Na poziomie szczegółowym o ekonomicznej efektywności utrzymania silników o zapłonie samoczynnym decydują zasadniczo koszty wynikające z ich pracy, stanowiące do 50% udziału kosztów całkowitych. Są to przede wszystkim koszty spalane paliwa i oleju silnikowego. Tak więc przekształceniu energii chemicznej paliwa w pracę efektywną, a także zużyciu oleju w cylindrach w wyniku jego spalania towarzyszy nieuniknione powstawanie produktów spalania paliwa węglowodorowego, w znacznej mierze szkodliwych i toksycznych, co łączy te wskaźniki z innymi wskaźnikami technicznymi, między innymi ekologicznymi.

**Wskaźniki energetyczno-ekologiczne**

Do oceny jakości współczesnych silników spalinowych należy zaliczyć parametry odzwierciedlające emisję toksycznych składników spalin. Spaliny stanowią heterogeniczną mieszaninę substancji o różnych właściwościach fizycznych i chemicznych, klasyfikowanych w siedmiu grupach [10, 11]:

- azotu, tlenu, dwutlenku węgla, pary wodnej, wodoru,
- tlenku węgla,
- tlenków azotu,
- tlenków siarki,
- węglowodorów (przede wszystkim wielopierścieniowych węglowodorów aromatycznych, np. benzopiren),
- aldehydów,
- pyłu węglowego i cząstek stałych adsorbujących substancje rakotwórcze.

Z wyjątkiem pierwszej grupy substancji, pozostałe są toksyczne i mają negatywny wpływ na zdrowie człowieka i środowisko. Dwutlenek węgla, mimo iż znajduje się w pierwszej grupie, powoduje występowanie tzw. „efektu cieplarnianego” i zmiany klimatu na Ziemi.

Emisję szkodliwych składników spalin charakteryzuje:

- skład emisji gazów  $C_i$  [%],
- prędkość emisji  $E_i$  [kg/h],
- emisja jednostkowa  $e_i$  [kg/kWh],
- emisja szkodliwego składnika na 1 kg paliwa  $e_i$  [kg/kg<sub>pal</sub>].

Emisja szkodliwych składników spalin, przede wszystkim substancji stałych, powinna być odniesiona do sumarycznego zużycia paliwa i oleju. W tabelicy 1 zamieszczono szacunkowe wartości emisji szkodliwych składników spalin z silników o zapłonie samoczynnym na jednostkę spalane paliwa [kg/kg<sub>pal</sub>], [11, 13].

Przepisy o zapobieganiu zanieczyszczania powietrza przez statki sformułowano w Załączniku VI do Konwencji MARPOL 73/78 Nr 10.16-1/1007. Przewiduje on kontrolę substancji niszczących warstwę ozonową. Zalicza się do nich: halony, freony, tlenki siarki (SO<sub>x</sub>), tlenki azotu (NO<sub>x</sub>), lotne związki organiczne (VOC<sub>s</sub>) oraz podaje średnie ważone dopuszczalnych wartości innych produktów spalania paliw na statku. Załącznik określa limity tlenków siarki i azotu emitowanych ze statkowych instalacji wylotu spalin i zakazuje umyślnej emisji szkodliwych substancji niszczących warstwę ozonową, znajdujących się w instalacjach przeciwpożarowych oraz chłodniczych na statkach [12, 15].

W pracy [6] zaproponowano wskaźnik toksyczności stanowiący stosunek jednostkowego zużycia paliwa do sumy zużycia paliwa i dwóch toksycznych składników spalin w postaci:

$$K_1 = \frac{b_e}{b_e + \sqrt{e_{NOx} + e_{CO}}} \quad (8)$$

Jednakże nie obejmuje on szeregu innych znormalizowanych składowych, jest mało wrażliwy na zmiany emisji toksycznych składników spalin, a poza tym – nie jest bezwymiarowy.

Otrzymanie wskaźnika bezwymiarowego wymaga tradycyjnej metody różnicowej [10]. Przy stosowaniu tej metody, wartości poszczególnych wskaźników (w tym przypadku efektywności energetyczno-ekologicznej) są konfrontowane z granicznie dopuszczalną wartością znormalizowanych składników toksycznych:

$$K_2 = \sum_i^n \frac{e_i^{lim}}{e_i^r} \quad (9)$$

gdzie:

- $e_i^{lim}$  – graniczna wartość średniej ważonej emisji jednostkowej i-tego składnika spalin,
- $e_i^r$  – średnia ważona rzeczywista emisja jednostkowa i-tego składnika spalin,

Tablica 1. Szacunkowe wartości jednostkowych emisji szkodliwych składników spalin silników o zapłonie samoczynnym na jednostkę spalane paliwa [11]

Emisja jednostkowa składnika spalin wylotowych	Tlenek azotu $e_{NOx}$	Dwutlenek węgla $e_{CO}$	Węglowodory CH $e_{CH}$	Tlenki siarki $e_{SOx}$	Cząstki stałe PM $e_{PM}$
kg/kg <sub>paliwa</sub>	~ 0,05	~ 0,027	~ 0,005	~ 0,005	~ 0,007

$n$  – liczba toksycznych składników uwzględnianych w analizie.

Jednak i ten wskaźnik nie może być uznany za zadowalający, chociażby w przypadku dwukrotnej redukcji emisji tlenków azotu. Jest to całkowicie realne przy optymalnej regulacji, przy emulsjach wodno-paliwowych oraz recyrkulacji spalin. Wówczas wskaźnik poziomu technologicznego i oceny ekologiczności pracy silnika również wzrośnie praktycznie dwukrotnie, co będzie wskaźnikiem zawyżonym.

Ponieważ emisja składników toksycznych w spalinach jest wynikiem spalania paliwa i oleju, wskaźnik energetyczno-ekologicznej doskonałości silnika może być definiowany jako bezwymiarowy stosunek jednostkowych średnich ważonych emisji składników toksycznych spalin do odpowiedniego jednostkowego zużycia paliwa i oleju:

$$K = \frac{\sum_i^n e_i^r}{b_e + b_{oil}} \quad (10)$$

Uwzględniając rozważania związane z definiowaniem zależności (8), (9), (10) do szacowania poziomu technologicznego i jakości silników okrętowych, proponuje się wskaźnik ich efektywności ekologicznej jako różnicę jedności i stosunków jednostkowych poziomów emisji toksycznych składników spalin, z uwzględnieniem współczynników wagowych do sumy zużycia paliwa i oleju zużytego na wytworzenie mocy efektywnej:

$$K_3 = 1 - \frac{\sum_i^n w_i (e_i^r - e_i^{\lim})}{b_e + w_{oil} b_{oil}} \quad (11)$$

gdzie:

$w_i$  – współczynniki wagowe składników spalin,

$w_{oil}$  – współczynnik wagowy, uwzględniający zwiększenie udziału oleju smarowego w generowaniu składników toksycznych w porównaniu z paliwowym.

Współczynniki wagowe składników spalin mogą być przyjęte jako stosunek granicznego stężenia danego składnika do granicznego stężenia tlenu azotu. Do określenia wartości współczynnika wagowego  $w_{oil}$  niezbędne jest przeprowadzenie zróżnicowanych badań wpływu składu chemicznego oleju silnikowego na emisję poszczególnych składników spalin. Różnica ( $e_i^r - e_i^{\lim}$ ) w liczniku wyrażenia (11) wykazuje o ile rzeczywista emisja toksycznego składnika różni się od wartości dopuszczalnych. W przypadku gdy wartości są takie same, a stan techniczny silnika całkowicie odpowiada obowiązującym wymaganiom, wskaźnik ekologiczny będzie równy jeden. Jeśli emisje

będą mniejsze niż wartości znormalizowane, wskaźnik będzie większy od jedności, a w przeciwnym wypadku – będzie mniejszy. Przy tym, zmniejszenie godzinowego zużycia paliwa generalnie zmniejszy ilość produktów ich utlenienia, a tym samym zmniejszy się emisja toksycznych składników spalin.

Bezwymiarowy wskaźnik charakteryzujący ekonomiczność zużycia paliwa i oleju, z uwzględnieniem wpływu toksyczności spalin na poziom energetyczno-ekologiczny okrętowego silnika o zapłonie samoczynnym, oceniany jest za pomocą zależności [6]:

$$K_{ee} = \eta_{e\ fu\ oil} K_3 \quad (12)$$

a po podstawieniu zależności (7) i (11) do (12) w postaci ostatecznej:

$$K_{ee} = \frac{3600}{W_{fu} b_e + W_{oil} b_{oil}} \left[ 1 - \frac{\sum_i^n w_i (e_i^r - e_i^{\lim})}{b_e + w_{oil} b_{oil}} \right]^z \quad (13)$$

gdzie:

$z$  – współczynnik wagowy, uwzględniający zróżnicowany wpływ ekonomiczności paliwowej i emisji toksycznych składników spalin na uniwersalny wskaźnik efektywności energetyczno-ekologicznej.

Rozpoznanie stopnia wpływu ekonomiczności paliwowej i wskaźników ekologicznych na poziom rozwoju technicznego silników jest trudne, a ich wpływ niejednoznaczny.

Współcześnie stosowane są dwa rodzaje regulacji oceny efektywności pracy silnika: pierwszy – według kryterium minimalnego zużycia paliwa, drugi – według kryterium minimalnej emisji związków toksycznych w spalinach. Obliczenia uniwersalnego wskaźnika efektywności energetyczno-ekologicznej [6] wykonane dla modelu 3512B silnika firmy Caterpillar na podstawie danych pracy [8] wykazały, iż dla każdego obciążenia silnika spalinowego, przy średnim efektywnym ciśnieniu spalania, efektywne jednostkowe zużycie paliwa, przy minimalnym poziomie emisji tlenków azotu, jest 1,03 razy większe niż przy minimalnym zużyciu paliwa. Natomiast stosunek sprawności efektywnej obliczanej z uwzględnieniem całkowitego efektu cieplnego, ze względu na spalanie paliwa i oleju na wszystkich zakresach pracy, wynosi 0,97 [13].

W artykule, do porównania własności silnika dwupaliwowego z jednopaliwowym, rozpatrzono wskaźniki: masowo-gabarytowe na etapie projektowania, energetyczne oraz energetyczno-ekologiczne. Do egzemplifikacji cech analizowanych silników posłużono się wynikami obliczeń wykonanych w oparciu o dostępne dane techniczne dotyczące wybranych silników [7, 14, 20, 21, 22, 23, 24].

### Silniki dwupaliwowe współczesnych gazowców

Silniki dwupaliwowe DF mogą być zasilane paliwem destylacyjnym (MDO), pozostałościowym (HFO) oraz gazem ziemnym, a zmiana paliwa z destylacyjnego na pozostałościowe i na odwrót przepływa płynnie podczas pracy silnika. Aby silnik mógł spalać paliwo gazowe, będąc jednocześnie silnikiem o zapłonie samoczynnym, zapłon mieszanki gazowej inicjuje mała dawka pilotowa paliwa ciekłego MDO bądź HFO, wtryskiwana do komory spalania. Silnik może pracować, będąc zasilany z dodatkiem gazu bądź tylko i wyłącznie paliwem płynnym. Wtrysk gazu oraz paliwa jest w pełni sterowany przez układ sterowania silnikiem (ECS), zapewniając maksymalną moc oraz niską emisję NO<sub>x</sub> [9]. Dla potrzeb pracy rozpatrzono własności silników dwupaliwowych dwóch wytwórców silników, firm: Wärtsilä, oferującej dwupaliwowe średnio obrotowe silniki spalinowe o zakresach mocy od 2500 do 18000 kW, oraz MAN Diesel.

Firma Wärtsilä wprowadziła na rynek dwa typy czterosurowych wielopaliwowych silników o zapłonie samoczynnym, przeznaczonych do pracy w układach energetycznych jednostek pływających, w szczególności zbiornikowców LNG. Mniejszy z rodziny silnik typu 34DF, występujący w konfiguracjach 6L, 18V i 24V, może być stosowany jako napęd główny oraz jako silnik pomocniczy na mniejszych jednostkach. Większy to 50DF w konfiguracji 18V i o mocy do 17 550 kW. W tabelicy 2 przedstawiono silniki dwupaliwowe firmy Wärtsilä, przeznaczone do napędu głównego zbiornikowców LNG [9, 23]. Oprócz przedstawionych powyżej silników firma Wärtsilä posiada w swojej ofercie silniki z rodziny 20DF, które występują w konfiguracjach: 6L, 8L oraz 9L. Jednak ze względu na mniejsze moce są one stosowane jedynie w zespołach prądotwórczych.

Firma MAN Diesel oferuje wolnoobrotowe dwusuwowe silniki dwupaliwowe typu ME-GI z technologią wtrysku gazu przy pomocy wielostopniowej sprężarki (30,0 MPa) lub za pomocą wysokociśnieniowej pompy LNG (25,0 MPa) i parownika gazu o mocach tych silników 11.900÷26.160 kW [7]. W tabelicy 3 przedstawiono silniki

dwupaliwowe firmy MAN Diesel przeznaczone do napędu głównego zbiornikowców LNG [24].

Praktyczne zastosowanie do napędów okrętowych znalazły średnio obrotowe silniki czterosuwowe. W silnikach dwusuwowych podczas wymiany ładunku w komorze spalania przy przepłukaniu wzdłużnym tracona jest część mieszanki powietrzno-gazowej, co zwiększa straty i tym samym koszty ich eksploatacji.

Tablica 2. Silniki dwupaliwowe napędu głównego zbiornikowców LNG firmy Wärtsilä [9, 23]

Model silnika	Prędkość obrotowa [obr/min]	Średnie ciśnienie efektywne [MPa]	Moc [kW]
W 6L34DF	750	2,0	2 700
W 9L34DF	750	2,0	4 050
W 12V34DF	750	2,0	5 400
W 16V34DF	750	2,0	7 200
W 6L50DF	514	2,0	5 850
W 8L50DF	514	2,0	7 800
W 9L50DF	514	2,0	8 775
W 12V50DF	514	2,0	11 700
W 16V50DF	514	2,0	15 600
W 18V50DF	514	2,0	17 550

Tablica 3. Silniki dwupaliwowe firmy MAN Diesel napędu głównego zbiornikowców LNG [24]

Model silnika	Prędkość obrotowa [obr/min]	Średnie ciśnienie efektywne [MPa]	Moc [kW]
6L51/60DF	500	1,905	6 000
7L51/60DF	500	1,905	7 000
8L51/60DF	500	1,905	8 000
9L51/60DF	500	1,905	9 000
12V51/60DF	500	1,905	12 000
14V51/60DF	500	1,905	14 000
16V51/60DF	500	1,905	16 000
18V51/60DF	500	1,905	18 000

### Wybór silników do analizy porównawczej

Wybór silników do badań porównawczych przeprowadzono pod kątem zapewnienia porównywalności wyników badań. Wybrano trzy silniki o zapłonie samoczynnym, o możliwie najbliższych parametrach techniczno-konstrukcyjnych.

W charakterze modelowego silnika dwupaliwowego przyjęto jeden z najczęściej stosowanych silników, reprezentatywny dla napędu głównego zbiornikowców do przewozu LNG, silnik firmy Wärtsilä, model 9L50DF. Jest to silnik czterosuwowy, nienawrotny, turbodołado-

wany, z bezpośrednim wtryskiem paliwa płynnego oraz wtryskiem pośrednim paliwa gazowego. Właściwości tego silnika porównano z silnikami jednopaliwowymi dwóch producentów: Wärtsilä 9L46 i MAN Diesel 9L48/60B. Obydwa silniki są czterosuwowe, nienawrotne, z chłó-

dzeniem międzystopniowym, turbodoładowane z bezpośrednim wtryskiem paliwa. W tabelicy 4 przedstawiono podstawowe dane techniczne silników, uznane jako kryterialne dla zapewnienia porównywalności wyników [20, 21, 22].

Tabela 4. Dane techniczne silników wybranych do analizy

Parametr	Oznaczenie	Jednostka	Silnik dwupaliwowy 9L50DF	Silnik jednopaliwowy Wärtsilä 9L46	Silnik jednopaliwowy MAN B&W 9L48/60B
Moc z cylindra	$P_1$	[kW]	950/975	975	1150
Średnie ciśnienie efektywne	$p_e$	[MPa]	2,0	2,43	2,58/2,65
Średnica cylindra	$D$	[mm]	500	460	480
Skok tłoka	$S$	[mm]	0,443	0,481	0,476
Prędkość obrotowa	$n$	[obr/min]	500/514	500/514	514/500
Średnia prędkość tłoka	$v_s$	[m/s]	9,7/9,9	9,7/9,9	b.d.
Moc efektywna	$P_e$	[kW]	8550	8775	10.350

### Analiza wyników obliczeń wskaźników efektywności

Egzemplifikację wartości wybranych wskaźników masowo-gabarytowych, energetycznych oraz energetyczno-ekologicznych przeprowadzono wyłącznie w oparciu o wiarygodne i kompletne dane literaturowe, szczególnie dla wskaźników energetyczno-ekologicznych [20, 21, 22]. W tabelicy 5 przedstawiono wartości obliczonych wskaźników.

Otrzymane wartości bezwzględne wskaźników wykazują, że silniki dwupaliwowe w porównaniu z jednopaliwowymi mają następujące parametry:

- większą masę jednostkową – według wzoru (1),

- zajmują większą powierzchnię i więcej przestrzeni – według wzorów (2) i (3),
- są mniej zwarte (4), co wiąże się z bardziej rozbudowaną strukturą instalacji obsługujących silniki dwupaliwowe w samym przedziale maszynowym,
- są mniej sprawne – wzory (5) i (7).

Odróżniają się one natomiast od silników jednopaliwowych lepszymi własnościami ekologicznymi – według wzoru (8). W tabelicy 6 zamieszczono wartości wskaźników silników jednopaliwowych odniesione do wartości wskaźników silnika dwupaliwowego.

Tabela 5. Zestawienie obliczonych wartości wskaźników efektywności

Wskaźnik	Oznaczenie	Wzór	Jednostka	Silnik dwupaliwowy 9L50DF	Silnik jednopaliwowy Wärtsilä 9L46	Silnik jednopaliwowy MAN B&W 9L48/60B
Masa jednostkowa	$g_s$	1	[kg/kW]	21,64	15,157	14,106
Zajmowana powierzchnia jednostkowa	$a_s$	2	[m <sup>2</sup> /kW]	$4,446 \cdot 10^{-3}$	$4,015 \cdot 10^{-3}$	$3,670 \cdot 10^{-3}$
Objętość jednostkowa	$v_s$	3	[m <sup>3</sup> /kW]	0,0243	0,0203	0,0197
Wskaźnik zwartości konstrukcji	$d$	4	[–]	$4,0934 \cdot 10^{-3}$	$4,8676 \cdot 10^{-3}$	$4,7990 \cdot 10^{-3}$
Sprawność efektywna (paliwo ciekłe)	$\eta_e$	5	[–]	0,443	0,481	0,476
Sprawność efektywna (paliwo gazowe)	$\eta_{e\ gas}$	5	[–]	0,442	–	–
Sprawność efektywna (plus straty olejowe)	$\eta_{e\ fu\ burn}$	7	[–]	0,442	0,48	0,474
Energetyczno-ekologiczny wskaźnik toksyczności	$K_1$	8	[–]	0,003	0,04	0,04

Tablica 6. Wartości ilorazów wskaźników silników jednopaliwowych odniesionych do wartości wskaźników silnika dwupaliwowego 9L50DF

Wskaźnik odniesiony	9L46/9L50DF	9L48/60B/9L50DF
Masa jednostkowa	0,7004	0,6518
Zajmowana powierzchnia jednostkowa	0,9031	0,8250
Objętość jednostkowa	0,8354	0,8107
Wskaźnik zwartości konstrukcji	0,9865	0,9726
Sprawność efektywna	1,0858	1,0745
Energetyczno-ekologiczny wskaźnik toksyczności spalin	13,33	13,33

### Podsumowanie

Rozwój układów napędowych gazowców zmierza w kierunku stosowania silników tłokowych, zmniejszając tym samym udział napędów turbinowych. Dlatego też istnieje potrzeba zasilania silników o zapłonie samoczynnym różnymi rodzajami paliwa. Modyfikacja dotychczas stosowanych jednostek napędowych do zasilania paliwem gazowym wymaga tak dużych zmian w konstrukcjach silników oraz ich systemów pomocniczych, iż producenci nie oferują tego rodzaju postępowania. Fakt ten uzasadnia potrzebę stworzenia aparatu matematycznego umożliwiającego wartościującą ocenę własności silników tłokowych w układach napędowych gazowców.

Miarą taką mogą być wskaźniki efektywności, dobrane, definiowane i stosowane w każdym przypadku specjalnie na indywidualne zapotrzebowanie informacyjne w zależności od:

- wykonywanej funkcji przez jednostkę,
- etapu życia statku (projektowania, budowy, eksploatacji – utrzymania, modernizacji – naprawy głównej),
- poziomu niesionej informacji: (ogólnego – armatorskiego), pośredniego (układ energetyczny statku) i szczegółowego (silniki, kotły, pompy).

Spośród możliwych kategorii wskaźników efektywności rozpatrzono reprezentatywne dla kategorii wskaźniki techniczne dla potrzeb projektowania wstępnego i doboru

silników w układach napędowych. Postępowanie takie podyktował cel pracy i ograniczona dostępność informacji do oszacowania wartości wskaźników. Zdefiniowane w artykule wskaźniki ujawniły zakres zapotrzebowanej informacji szczegółowej, nie zawsze dostępnej w sposób bezpośredni, dzięki czemu wskazały kierunki dalszych badań w zakresie rozpatrywanego zagadnienia.

Porównanie sprawności energetycznych silników jednopaliwowych z dwupaliwowymi wskazuje na niższą sprawność silników dwupaliwowych. Wniosek ten wymaga dalszej analizy od strony fizyki procesu spalania. Wartości energetyczno-ekologicznego wskaźnika toksyczności spalin wskazują, iż silniki dwupaliwowe są bardzo przyjazne dla środowiska, co daje im znaczącą przewagę nad silnikami jednopaliwowymi.

Zużycie paliwa i oleju silnikowego oraz emisja szkodliwych substancji w spalinach, zależące od jakości procesu spalania stosowanych rodzajów paliw oraz olejów smarowych, może być oszacowane przez jeden uniwersalny, bezwymiarowy wskaźnik efektywności charakteryzujący ekonomiczność zużycia paliwa i oleju, z uwzględnieniem wpływu toksyczności spalin – wzór (13). Jednak zależność pomiędzy ekonomicznością paliwową i emisją związków toksycznych w spalinach jest niezwykle złożona i wymagać będzie szczegółowych badań.

### Literatura

- [1] *6 International Regulation News Update, Marine Environment Protection Committee's. 57<sup>th</sup> Session* (31.03–4.04.2008). ABS, również: [www.eagle.org/News and Events/Regulatory Information](http://www.eagle.org/News and Events/Regulatory Information).
- [2] Adamkiewicz A., Behrendt C.: *Ocena efektywności turbo-parowego układu energetycznego gazowca LNG*. „Rynek Energii” 2010, nr 3 (88), s. 63–67.
- [3] Adamkiewicz A., Burnos A.: *Kluczowe wskaźniki efektywności w utrzymaniu silników spalinowych w układach energetycznych jednostek pływających*. VII Sympozjum Naukowo-Techniczne SILWOJ 2010. Wojskowa Akademia Techniczna Warszawa. Akademia Marynarki Wojennej Gdynia. Czernica 17–20.10.2010.
- [4] Adamkiewicz A., Burnos A.: *The maintenance of the ship turbines with the application of the key performance indicators*. Journal of POLISH CIMAC „Diagnosis, reliability and safety”, vol. 5, No. 2, Gdańsk 2010.
- [5] Behrendt C., Adamkiewicz A.: *Układy napędowe statków do przewozu gazu LNG*. „Rynek Energii” 2010, nr 3 (88), s. 55–62.

- [6] Bieziukov O.K.: *Kriterii dla oceny naukowo-technicznej i poziomu sudowych gizelej*. Trudy międzynarodowego naukowo-technicznego seminarium „Isslevovanij projektivovane u eksploatacija sudovych” DVS. Zbiór prac „Parkom” 2006, s. 16–19.
- [7] *Guide for propulsion system for LNG carriers*. American Bureau of Shipping ABS. Houston 2005.
- [8] Konks G.A.: *Mirowoje sudowoje dizelstroene. Koncepcji konstruirowania, analiz międzynarodowego opyta*. „Maszynostroenie”. Moskwa 2005, s. 512.
- [9] Kubiak J., Romanowski Cz.: *Polskie zbiornikowce LNG*. „Miesięcznik Nasze Morze” 3/2006.
- [10] Kuzniecov A.G.: *Analiz kriteriev ekonomičnosti i toksyczności raboty transportnych dvigatielej*. „Dvigateliostroenie” 1996, nr 2, s. 67–68.
- [11] Likhanov V.A.: *Toxicity decrease and improvement of operational indexes of tractor diesel engines by means of methanol use*. Vjatskayza GSHA. Kirov 2001, s. 212.
- [12] *Marine Environment Protection Committee*. 58<sup>th</sup> session. Agenda item 5. Draft amendments to MARPOL Annex VI. Draft amendments to the NO<sub>x</sub> Technical Code MEPC 58/5, 4 July 2008.
- [13] Meljnik G.V.: *Control of emissions of engines of off-road application: the point of view of engine manufacturers*. „Engines manufacturing” 2008, nr 2, s. 50–56.
- [14] Nippon K.K.: *Guidelines for Dual Fuel Diesel Engines*. ClassNK. 2005.
- [15] *Report of the Marine Environment Protection Committee On Its Fifty-Ninth Session*. International Maritime Organization. Marine Environment Protection Committee 59<sup>th</sup> session. Agenda item 24. MEPC 59/24/Add.1, 28 July 2009.
- [16] *Report of the Marine Environment Protection Committee*. International Maritime Organization. Marine Environment Protection Committee 57<sup>th</sup> session. MEPC 57/21/Add.1, 11 April 2008.
- [17] Wojnowski W.: *Okrętowe silownie spalinowe*. Cz. I. AMW. Gdynia 1998.
- [18] Woodyard D.: *Pounders Marine Diesel Engines and Gas Turbines*. Elsevier Ltd. Burlington. MA 01803, Ninth edition 2009.

#### Normy, źródła firmowe i internetowe

- [19] PN-EN 15341
- [20] Wärtsilä 50DF Product Guide-2/2012, Vaasa, June 2010
- [21] Wärtsilä 46 Product Guide-3/2007, Vaasa, March 2007
- [22] MAN B&W Marine Engine IMO Tier II, Programme 2<sup>nd</sup> edition 2011
- [23] [www.wartsila.com](http://www.wartsila.com)
- [24] [www.mandieselturbo.com](http://www.mandieselturbo.com)
- [25] [www.gazeo.pl](http://www.gazeo.pl)

---

Prof. nadzw. dr hab. inż. Andrzej ADAMKIEWICZ – pracownik Akademii Morskiej w Szczecinie; kierownik Katedry Diagnostyki i Remontów Maszyn. Członek Rady Technicznej Polskiego Rejestru Statków – przewodniczący Zespołu Jednostek Specjalnych, przewodniczący Komisji Eksploatacji Obiektów Oceanotechnicznych i Portów Morskich Polskiego Naukowo-Technicznego Towarzystwa Eksploatacyjnego w Szczecinie.

---

Prof. nadzw. dr hab. inż. Cezary BEHRENDT – dziekan Wydziału Mechanicznego Akademii Morskiej w Szczecinie. Reprezentowane specjalności: kotły i turbiny okrętowe. Przewodniczący Zachodniopomorskiego Zespołu Środowiskowego Sekcji Podstaw Eksploatacji KBM PAN oraz m.in. członek Zespołu Techniki Morskiej Sekcji Technicznych Środków Transportu Komitetu Transportu PAN.