

## OCENA PARAMETRÓW EKSPLOATACYJNYCH OKRĘTOWEGO TURBINOWEGO SILNIKA SPALINOWEGO W ASPEKTCIE EMISJI ZWIĄZKÓW SZKODLIWYCH SPALIN

*W artykule przedstawiono analizę stosowania turbinowych silników spalinowych w układach napędowych i elektrowniach jednostek pływających z uwzględnieniem aspektów ekologicznych. Zaprezentowane zostały wyniki wstępnych badań emisji związków szkodliwych spalin laboratoryjnego silnika turbinowego. Dokonano również analizy możliwości przeprowadzenia pomiarów stężeń związków szkodliwych w spalinach okrętowego turbinowego silnika spalinowego układu napędowego w warunkach jego eksploatacji na jednostce pływającej.*

### WSTĘP

Zapotrzebowanie energetyczne środków transportu morskiego, wynikające z ich potrzeb eksploatacyjnych związanych z funkcją ruchu statku oraz ich funkcji egzystencjonalnych, od dawna realizuje się z wykorzystaniem głównie tłokowych silników spalinowych.

W przypadku silników turbinowych, w zależności od przeznaczenia statku i zapotrzebowania energetycznego, stosuje się w zespołach napędowych i energetycznych układy z turbinami parowymi w przypadkach wykorzystania siłowni jądrowych oraz układy z tzw. turbinami gazowymi w postaci turbinowych silników spalinowych.

Turbinowe silniki spalinowe o zastosowaniu morskim, ze względu na mniejszą sprawność energetyczną i związane z tym większe zużycie paliwa, ustępują silnikom tłokowym i stanowią zaledwie kilkuprocentowy udział w całej populacji okrętowych silników spalinowych. Silniki turbinowe mają natomiast jedną znaczącą zaletę - charakteryzują się dużą koncentracją mocy wyrażaną jako stosunek uzyskiwanej mocy względem masy silnika. W porównaniach dedykowanych siłowniom okrętowym należy wziąć pod uwagę nie tylko masę silnika ale masę całego zespołu napędowego, ponieważ zastosowanie silnika turbinowego wymaga wykorzystania dodatkowej przekładni redukującej prędkość obrotową wału napędowego silnika do odpowiedniej prędkości obrotowej pędnika statku. W zestawieniu porównawczym parametrów energetycznych, ekonomicznych i technicznych, prowadzonych dla silników tłokowych i turbinowych stosowanych do napędu głównego, uzyskuje się zasadność stosowania silników turbinowych do napędu okrętów wojennych.

W związku ze znaczącą ilościową przewagą okrętowych tłokowych silników spalinowych nad okrętowymi turbinowymi silnikami spalinowymi, obowiązujące regulacje prawne dotyczące emisji związków szkodliwych spalin silników okrętowych dotyczą głównie silników tłokowych (tab. 1). Jednym z takich aktów prawnych jest Międzynarodowa konwencja o zapobieganiu zanieczyszczeniu morza przez statki, 1973 r., sporządzona w Londynie dnia 2 listopada 1973 r., zmieniona Protokołem uzupełniającym sporządzonym w Londynie dnia 17 lutego 1978 r. (Dz. U. z 1987 r. Nr 17, poz. 101) oraz Protokołem uzupełniającym sporządzonym w Londynie dnia 26

września 1997 r. (Dz. U. z 2000 r. Nr 202, poz. 1679), zwana „Konwencją MARPOL”.

Wyłączeniem z przestrzegania norm emisji związków szkodliwych spalin są wszystkie silniki zastosowane na okrętach wojennych. Należy nadmienić, iż procentowa populacja turbinowych silników spalinowych zamontowanych na okrętach wojennych jest kilkakrotnie większa w porównaniu do floty cywilnej. Jednakże rządy państw posiadających floty wojenne dążą w miarę swoich możliwości do wdrażania przepisów dotyczących ochrony środowiska morskiego (np. Konwencji MARPOL) na okrętach wojennych.

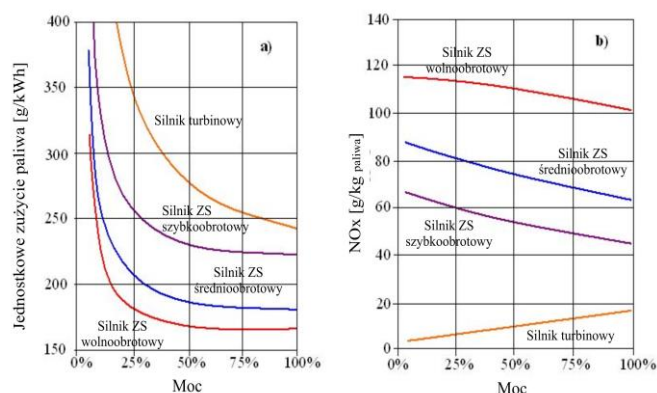
**Tab. 1.** Dopuszczalne wartości emisji jednostkowej NO<sub>x</sub> dla okrętowych silników spalinowych o zapłonie samoczynnym o mocy powyżej 130 kW wg Załącznika VI do Konwencji MARPOL 73/78 [10]

Poziom emisji	Rok obowiązywania	Dopuszczalne normy emisji NO <sub>x</sub> [g/(kWh)] w zależności od prędkości nominalnej silnika n [obr/min]		
		silniki wolnoobrotowe n < 130	silniki średnioobrotowe n ≤ 130 < 2000	silniki szybkoobrotowe n ≥ 2000
I	2000	17,0 *	45,0 · n <sup>-0,2</sup> *	9,8 *
II	2011	14,4 **	44,0 · n <sup>-0,23</sup> **	7,7 **
III	2016	3,4 ***	9,0 · n <sup>-0,2</sup> ***	2,0 ***

\* podane wartości dotyczą statków zbudowanych, albo tych, które przeszły modernizację po 1 stycznia 2000 r. a przed 1 stycznia 2011 r.,  
\*\* podane wartości dotyczą statków zbudowanych po 1 stycznia 2011 r.,  
\*\*\* podane wartości dotyczą statków zbudowanych po 1 stycznia 2016 r. i uprawiających żeglugę w Północnoamerykańskim Obszarze Kontroli Emisji lub w Obszarze Morza Karaibskiego Stanów Zjednoczonych.

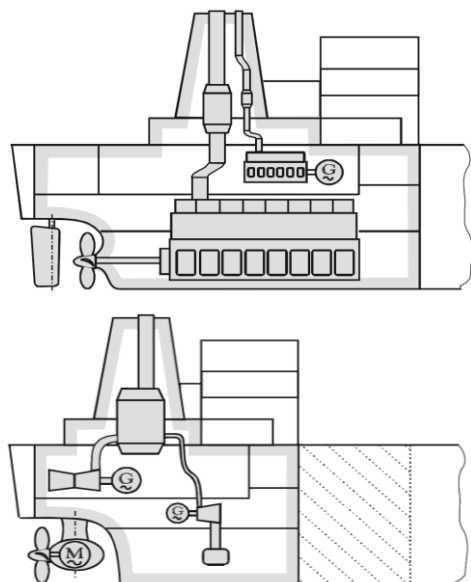
Wprowadzane coraz większe ograniczenia emisji zanieczyszczeń spalin z silników okrętowych wymuszają opracowywanie nowych koncepcji budowy siłowni statków cywilnych i okrętów. Coraz częściej rozważa się zastosowanie silników turbinowych w układach energetycznych siłowni ukierunkowanej na wytwarzanie energii elektrycznej, wykorzystywanej przez silniki elektryczne pędników statków. W przypadku silników turbinowych wadą jest mniejsza sprawność generowanej energii, o czym świadczy duża wartość jednostkowego zużycia paliwa (rys. 1), ale istotną zaletą jest duża

koncentracja generowanej energii w zajmowanej przez zespół spaliny objętości siłowni. Zaletą stosowania systemów turbinowych jest możliwość zasilania tych silników tzw. paliwami lekkimi, o małej zawartości związków siarki, paliw alternatywnych takich jak estry olejów roślinnych, metanolu, etanolu, oraz paliw gazowych metanu jako gazu ziemnego oraz propan-butanu.



**Rys. 1.** Jednostkowe zużycie paliwa (a) i emisja NO<sub>x</sub> (b) jako funkcje mocy dla stosowanych do napędu jednostek pływających rodzajów silników o zapłonie samoczynnym i turbinowym [7]

Zastosowanie gazu ziemnego do zasilania układów energetycznych i napędowych szczególnie może być korzystne w przypadku gazowców transportujących tego typu paliwo. Argumentem za stosowaniem systemów turbinowych generatorów energii elektrycznej jest możliwość zwiększenia przestrzeni ładunkowej (rys. 2), co poprawia wskaźnik ekonomiczności przewozowej statku, niwelując fakt mniejszej sprawności ogólnej silników turbinowych. Jest to szczególnie korzystne rozwiązanie przy zastosowaniu paliw lekkich i alternatywnych takich jak gaz ziemny, propan-butan, estry olejów roślinnych, metanol czy etanol.



**Rys. 2.** Porównanie układu napędowego z turbinowymi generatorami energii w planowanym zbiornikowcu LNG w stosunku do tradycyjnego napędu bezpośredniego z wolnoobrotowym silnikiem o zapłonie samoczynnym [1]

Koncepcje stosowania silników turbinowych wiążą się z koniecznością akceptacji większego jednostkowego zużycia paliwa wynikającego z mniejszej sprawności silnika, ale jednocześnie mają przyczynić się do uzyskania poprawy wskaźników ekologicznych

w postaci mniejszej emisji związków szkodliwych spalin. Ocena realnych zysków zastosowania silników turbinowych do napędu jednostek pływających, wynikających z uzyskiwanych parametrów eksploatacyjnych i ekologicznych, wymaga przeprowadzenia szeregu badań i analiz, które częściowo przedstawione zostały w niniejszym artykule.

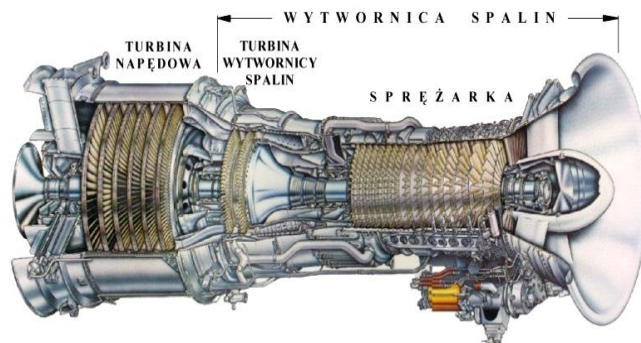
## 1. CHARAKTERYSTYKA OBIEKTU

Autorzy niniejszej pracy podejmują się próby określenia emisji związków szkodliwych w spalinach okrętowego turbinowego silnika spaliny, zastosowanego w układzie napędowym okrętu wojennego klasy fregata raketowa (rys. 3).



**Rys. 3.** Fregata raketowa klasy Oliver Hazard Perry [11]

Układ napędowy jednostki składa się z zespołu napędowego wyposażonego w dwa turbinowe silniki spaliny firmy General Electric typu LM 2500 (rys. 4), jednej zbiorczej przekładni redukcyjnej o przełożeniu 1/20, jednej linii wałów oraz śruby nastawnej. Moc układu napędowego wynosi około 30 000 kW przy maksymalnej prędkości obrotowej turbin napędowych wynoszącej  $n_{TN} = 3600$  obr/min.



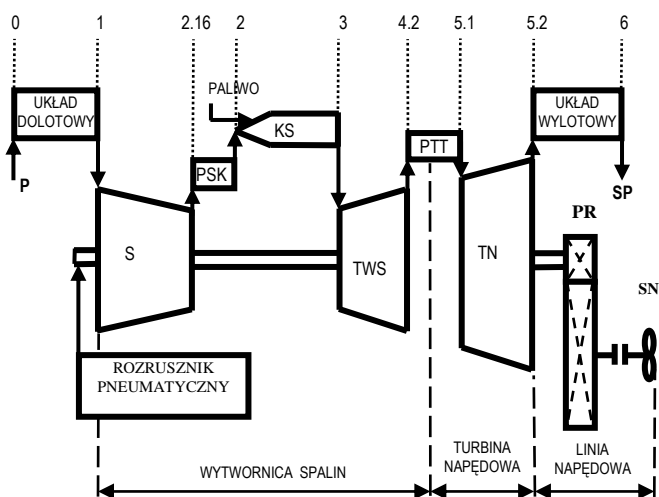
**Rys. 4.** Okrętowy turbinowy silnik spaliny typu LM 2500

Turbinowe silniki spaliny zastosowane w układzie napędowym fregaty są zespołami dwuwirnikowymi. Podstawę konstrukcji silnika stanowi wytwornica spalin, w której szesnastostopniowa sprężarka osiowa napędzana jest przez dwustopniową turbinę wysokiego ciśnienia. Pierwszych sześć stopni sprężarki wyposażono w regulowane łopatki kierownic, pracujące w zakresie zmian położenia kąтового  $-30^{\circ} - +30^{\circ}$  z dokładnością  $10'$ . Nastawa kierownic uzależniona jest od wartości ciśnienia paliwa podawanego do wtryskiwaczy, prędkości obrotowej wirnika wytwornicy spalin oraz temperatury powietrza w przekroju wlotowym silnika. Rozwiązanie to umożliwia rozszerzenie zakresu statecznej pracy sprężarki, szczególnie w procesach przejściowych. Proces ciągłego spalania odbywa się w pierścieniowej komorze spalania zasilanej paliwem przez trzydzieści dwa wtryskiwacze. Z wytwornicą spalin współpra-

kuje sześciostopniowa oddzielna turbina napędowa stanowiąca źródło energii mechanicznej dla okrętowego układu napędowego. Silnik w całości znajduje się w zabudowie izolującej go od pozostałej części siłowni. Rozwiązanie to przyjęto ze względów bezpieczeństwa pożarowego i ograniczenia propagacji hałasu wewnątrz siłowni. Układ wylotu spalin posiada kilkunastometrowej długości pionowy kanał o średnicy dwóch metrów, kończący się zwężeniem do średnicy około metra.

## 2. PARAMETRY EKSPLOATACYJNE SILNIKA LM2500

Pomiary parametrów termogazodynamicznych czynnika roboczego, dokonane w charakterystycznych przekrojach kontrolnych silnika, są istotnym źródłem informacji diagnostycznej o stanie struktury konstrukcyjnej jego części przepływowej. Przedstawiony schemat ideowy silnika LM 2500 (rys. 5), z zaznaczonymi przekrojami kontrolnymi części przepływowej, umożliwi zobrazowanie rozmieszczenia punktów pomiarowych. Wartości mierzone i obliczeniowe poszczególnych parametrów silnika wraz zakresem pomiarowym wyrażonym w jednostkach obowiązujących w siłowni okrętu zestawiono w tabeli 2.



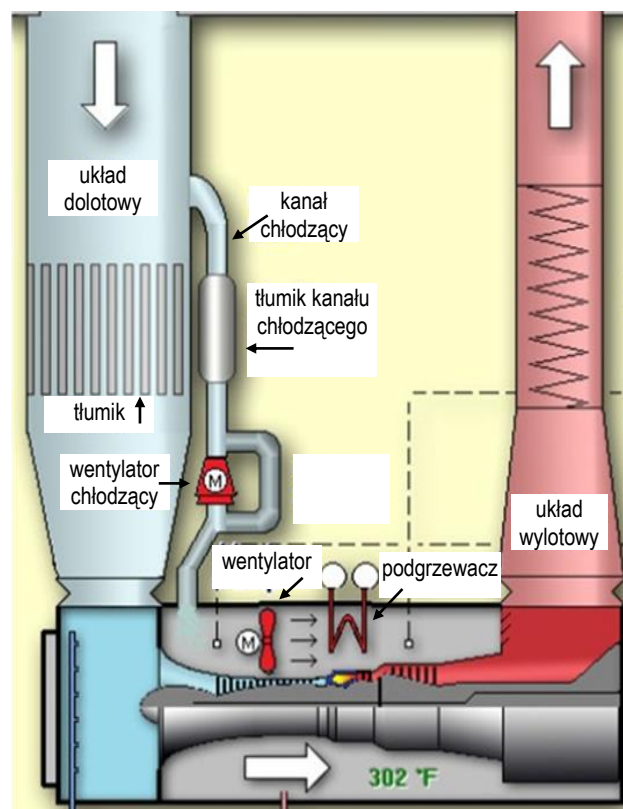
**Rys. 5.** Schemat ideowy silnika LM 2500; P - powietrze, S - sprężarka, KS - komora spalania, TWS - turbina wytwornicy spalin, TN - turbina napędowa, SP - spaliny, PR - przekładnia redukcyjna, SN - śruba napędowa, PSK - przestrzeń między S a KS, PTT - przestrzeń między TWS a TN

Umieszczenie silnika turbinowego w siłowni okrętowej wymaga zapewnienia doprowadzenia do jego wlotu odpowiedniego strumienia masy powietrza i wyprowadzenia generowanej masy spalin z układu wylotowego silnika. Dla fregaty raketowej klasy Oliver Hazard Perry, wyposażonej w dwa silniki turbinowe LM 2500, zaprojektowano pionowe kanały dolotowe powietrza i kanały wylotowe spalin (rys. 6) o długości około 15 m. Powietrze z kanału dolotowego kierowane jest w większości do wlotu silnika. Niewielka część powietrza z kanału dolotowego pobierana jest kanałem bocznym i doprowadzana jest do wnętrza kontenerowej zabudowy silnika w celu zapewnienia wymiany powietrza i właściwej temperatury wokół pracującego silnika. Powietrze opływające zewnętrzne elementy silnika znajdującego się w obudowie kontenerowej ostatecznie kierowane jest do kanału wylotowego, gdzie miesza się ze spalinami generowanymi przez silnik turbinowy. W zależności od konieczności zapewnienia odpowiednich parametrów powietrze opływające z zewnątrz silnik jest odpowiednio przygotowywane pod względem odpowiedniej temperatury z wykorzystaniem systemu chłodzenia i nagrzewnic, jak i odpowiedniej prędkości przepływu

wewnątrz zabudowy kontenerowej, sterowanej z wykorzystaniem wentylatorów.

**Tab. 2.** Parametry eksploatacyjne silnika LM 2500

Parametr	Zakres pomiarowy
Ciśnienie barometryczne $p_0$ [hPa]	800 - 1040
Temperatura otoczenia $t_0$ [°C]	-40 - +40
Prędkość obrotowa wimika wytwornicy spalin $n_{GG}$ [obr/min]	0 - 12000
Prędkość obrotowa wimika turbiny napędowej $n_{PT}$ [obr/min]	0 - 5000
Temperatura powietrza na wlocie do silnika $t_1$ [°F]	-40 - +150
Ciśnienie całkowite powietrza na wlocie do silnika $p^*$ [psig]	0 - 16
Ciśnienie powietrza za sprężarką $p_2$ [psig]	0 - 300
Temperatura strumienia spalin przed turbiną napędową $t_{4.2}$ [°F]	0 - 2000
Ciśnienie całkowite strumienia spalin przed turbiną napędową $p^{*4.2}$ [psig]	0 - 75
Temperatura spalin wylotowych $T_6$ [°F]	0 - 1000
Temperatura paliwa przed silnikiem $T_f$ [°F]	0 - 100
Ciśnienie paliwa przed wtyskiwaczami $p_f$ [psig]	0 - 1500
Moment obrotowy (obliczeniowy) na wale turbiny napędowej $M_{PT}$ [LB FT]	0 - 50000
Moc na wale turbiny napędowej $P_{TN}$ [KM]	0 - 25000



**Rys. 6** Układ dolotowy powietrza i wylotowy spalin silnika LM 2500 zamontowanego na fregacie raketowej klasy Oliver Hazard Perry

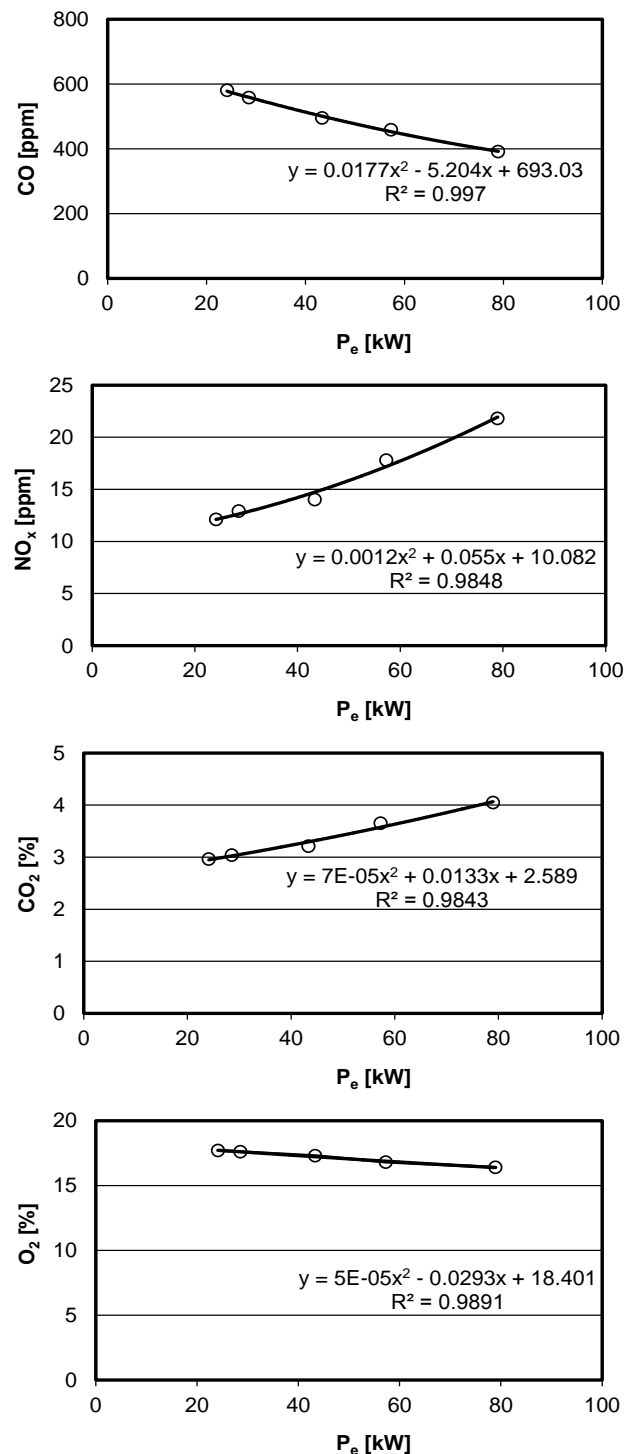
## 3. PARAMETRY EKSPLOATACYJNE A EMISJA ZWIĄZKÓW SZKODLIWYCH W SPALINACH SILNIKA TURBINOWEGO

Idea pracy silnika spalinowego ukierunkowana jest na uzyskanie parametrów eksploatacyjnych przekładających się na pracę napędową. Dla turbinowych silników wałowych istotne znaczenie ma wpływ strumienia spalin generujący moment obrotowy turbiny napędowej, który ostatecznie przekłada się na napęd wału odbioru energii z silnika. W silniku turbinowym wałowym za parametry eksploatacyjne uzyskiwane z wału napędowego odpowiedzialne są

wartości parametrów spalin generowanych przez tzw. generator spalin – część silnika turbinowego wytwarzająca spaliny. Do tych parametrów należą strumień masy spalin oraz jej energia opisywana temperaturą i prędkością przepływu na poszczególnych stopniach turbiny. Uzyskiwane parametry termodynamiczne spalin jako czynnika roboczego zależą bezpośrednio od warunków występujących w komorze spalania, które ściśle są związane z parametrami eksploatacyjnymi wynikającymi z zapotrzebowania energetycznego. W związku z tym istnieje powiązanie pomiędzy parametrami eksploatacyjnymi a warunkami procesu spalania paliwa występującymi w komorze spalania i emisją zanieczyszczeń zawartych w spalinach, które wygenerowano na potrzeby uzyskania wymaganych wartości energii mechanicznej na wale napędowym silnika.

Zgodnie z tymi wzajemnymi zależnościami można dokonać oceny emisji zanieczyszczeń zawartych w spalinach generowanych w zależności od obciążenia energetycznego silnika. W tym celu konieczne jest określenie strumienia masy generowanych spalin jako funkcja obciążenia silnika i zawartych w nich stężeń związków szkodliwych. Należy uzyskać charakterystykę emisyjną silnika jako funkcję obciążenia. Zagadnienie znane i przedstawiane w wielu pracach [3,4,6,9], jednak w badaniach silników turbinowych dużych mocy wymagające indywidualnego podejścia. Tym bardziej, że zagadnienie oceny emisji zanieczyszczeń spalin z silników turbinowych realizuje się w warunkach statycznych w kilku wybranych punktach pracy i na potrzeby certyfikacji silnika. Natomiast podjęta przez autorów ocena emisji zanieczyszczeń w spalinach silnika turbinowego wałowego o zastosowaniu morskim ukierunkowana jest na ocenę w warunkach eksploatacji jednostki pływającej podczas wykonywanego rejsu.

Aby wyznaczyć charakterystykę emisyjną silnika LM 2500 konieczne jest oszacowanie generowanego strumienia masy spalin. Strumień masy spalin to łączny strumień powietrza i paliwa dostarczanego do silnika. Dlatego konieczne jest wyznaczenie strumienia masy powietrza i strumienia masy paliwa. Przy dostępnych możliwych mierzonych wartościach parametrów pracy silnika LM 2500 może być to kłopotliwe. W związku z tym warunkiem koniecznym jest wyznaczenie jednej z tych wartości oraz dokonanie pomiaru współczynnika nadmiaru powietrza dla realizowanego w silniku procesu spalania paliwa, z zastosowaniem szerokopasmowego czujnika tlenu. Znając stosunek udziału powietrza do paliwa można ustalić zużycie powietrza lub paliwa przez silnik w zależności od tego, którą wartość uzyskamy z pomiaru. Ustalając masę spalin można ją powiązać z wartością stężeń związków szkodliwych, uzyskując w ten sposób wartości emisji zanieczyszczeń w spalinach. Wykonując charakterystyki emisyjne silnika jako funkcja obciążenia należy uzyskać równania zależności, które można wykorzystać w algorytmie wyznaczania emisji chwilowej silnika w warunkach eksploatacji. Przykładowe charakterystyki emisyjne autorzy opracowali na podstawie badań dla silnika turbinowego wałowego GTD-350 [7] a uzyskane równania opisują zależność zmian stężenia poszczególnych związków jako funkcja obciążenia (rys. 7). Uzyskane rozkłady wartości i ich zależności należy traktować jako przykład a uzyskane rozkłady wartości opisane równaniami stanowią cechę własną silnika. Dlatego charakterystyki emisyjne należy wyznaczyć dla wybranego silnika, dla którego w kolejnym kroku będzie prowadzona ocena emisji zanieczyszczeń spalin w warunkach eksploatacyjnych. Aby taką ocenę przeprowadzić należy powiązać uzyskane zależności z parametrami eksploatacyjnymi silnika tj. generowaną mocą silnika, prędkością obrotową wału wytwornicy spalin, prędkością obrotową wału turbiny napędowej, prędkością obrotową i nastawami śruby napędowej okrętu, a także w dalszym kroku z prędkością pływania okrętu i parametrami kursu.



**Rys. 7** Przykładowe zależności stężenia wybranych składników spalin jako funkcja generowanej mocy silnika turbinowego GTD-350

Biorąc pod uwagę dostępne wielkości monitorowane w siłowni okrętowej można wykorzystać następujące z nich:

- prędkość obrotowa wirnika wytwornicy spalin,
- prędkość obrotowa oddzielnej turbiny napędowej,
- temperatura powietrza na wlocie do silnika,
- ciśnienie całkowite powietrza na wlocie do silnika,
- temperatura strumienia spalin przed turbiną napędową,
- ciśnienie całkowite strumienia spalin przed turbiną napędową,
- moment obrotowy na wale turbiny napędowej,
- moc na wale turbiny napędowej.

Pozostałe informacje należy uzyskać z wykorzystaniem układu pomiaru współczynnika nadmiaru powietrza, oraz z zastosowaniem aparatury do badania stężenia zanieczyszczeń w spalinach.

## PODSUMOWANIE

Przeprowadzona analiza monitorowanych parametrów eksploatacyjnych w silowni okrętowej fregaty raketowej klasy Oliver Hazard Perry, będącej w służbie Marynarki Wojennej Rzeczypospolitej Polskiej, wskazuje na konieczność zastosowania dodatkowych urządzeń i algorytmów matematycznych w celu wyznaczenia wartości parametrów eksploatacyjnych niezbędnych do oceny zanieczyszczeń spalin generowanych przez silnik turbinowy wałowy napędu głównego. Ocena ta wymaga wcześniejszych badań związanych z uzyskaniem charakterystyki emisyjnej silnika w całym zakresie jego eksploatacji. Natomiast uzupełnione charakterystyki o algorytm wyznaczenia strumienia masy spalin umożliwią uzyskanie wartości emisji związków szkodliwych w warunkach eksploatacyjnych okrętu

## BIBLIOGRAFIA

1. Giernalczyk M., Górski Z., *Siłownie okrętowe, Część I, Podstawy napędu i energetyki okrętowej*, Wydawnictwo Akademii Morskiej w Gdyni, Gdynia 2011.
2. Głowacki P., Szczeciński S., *Turbinowy silnik odrzutowy jako źródło zagrożeń ekologicznych*, Prace Instytutu Lotnictwa nr 213, Warszawa 2011.
3. Kniaziewicz T., *Modelowanie procesów emisji spalin okrętowych tłokowych silników spalinowych napędu głównego w rzeczywistych warunkach eksploatacji*, Wydawnictwo Akademickie AMW, Gdynia 2013.
4. Kotlarz W. red., praca zbiorowa, *Turbinowe zespoły napędowe źródłem skażeń powietrza na lotniskach wojskowych*, Wydawnictwo WSOSP, Dęblin 2003.
5. Kowalewicz A., *Podstawy procesów spalania*, WN-T, Warszawa 2000.
6. Markowski J., *Emisja gazowych związków szkodliwych spalin z lotniczych silników tłokowych*, Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, Poznań 2013.
7. Markowski J., Pielecha J., Jasiński R., Ślusarz G., Wirkowski P., *Evaluation of relations operating and ecological parameters of turbine engines*, Journal of Polish CIMEEAC vol. 10 nr 1, Wydawnictwo PG, Gdańsk 2015.
8. Merkisz J., Markowski J., Ślusarz G., Galant M., Karpiński D., Wirkowski P., *Analiza porównawcza testów emisji związków szkodliwych spalin silnika turbinowego*, Combustion Engines nr 162, Wydawnictwo PTNSS, Bielsko Biała 2015.
9. Merkisz J., Piaseczny L., Kniaziewicz T., *Zagadnienia emisji spalin silników okrętowych*, Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, Poznań 2016.
10. *Międzynarodowa konwencja o zapobieganiu zanieczyszczeniu morza przez statki, 1973/1978 MARPOL*, Wydawnictwo PRS, Gdańsk 2015.
11. <https://www.google.pl/search?q=fregata+273>

### Evaluation of marine gas turbine engine parameters in terms of issue of emissions of exhaust toxic fumes

*The article presents an analysis of the use of gas turbine engines drive systems and power boats, taking into account environmental aspects. Presented preliminary results of emission of harmful exhaust of laboratory turbine engine. Also examined the possibility of carrying out measurements of concentrations of pollutants in the exhaust marine gas turbine engine propulsion system in terms of its operation on the vessel.*

Autorzy:

mgr inż. **Paweł Wirkowski** - Akademia Marynarki Wojennej, Wydział Mechaniczno-Elektryczny, Instytut Budowy i Eksploatacji Okrętów, ul. Śmidowicza 69, 81-127 Gdynia, Polska, tel. +48 261 26 27 56, e-mail: [p.wirkowski@amw.gdynia.pl](mailto:p.wirkowski@amw.gdynia.pl)

dr hab. inż. **Tomasz Kniaziewicz** - Akademia Marynarki Wojennej, Wydział Mechaniczno-Elektryczny, Instytut Budowy i Eksploatacji Okrętów, ul. Śmidowicza 69, 81-127 Gdynia, Polska, tel. +48 261 26 28 51, e-mail: [t.kniaziewicz@amw.gdynia.pl](mailto:t.kniaziewicz@amw.gdynia.pl)

dr hab. inż. **Jarosław Markowski** - Politechnika Poznańska, Wydział Maszyn Roboczych i transportu, Instytut Silników Spalinowych i Transportu, ul. Piotrowo 3, 60-965 Poznań, Polska, tel. +48 61 665 27 05, e-mail: [jaroslaw.markowski@put.poznan.pl](mailto:jaroslaw.markowski@put.poznan.pl)