



WYNIKI SYMULACJI NUMERYCZNEJ CYKLU ROBOCZEGO SILNIKA O ZS W PROGRAMIE DIESEL-RK ORAZ OCENA ICH UŻYTECZNOŚCI W PROCESIE PLANOWANIA BADAŃ DIAGNOSTYCZNYCH OKRĘTOWEGO SILNIKA TŁOKOWEGO

Patrycja Puzdrowska

*Politechnika Gdańska
Wydział Inżynierii Mechanicznej i Okrętownictwa
Zakład Siłowni Okrętowych
80-233 Gdańsk ul. G. Narutowicza 11/12
e-mail: patpuzdr@pg.edu.pl*

ABSTRAKT

W artykule przedstawiono wyniki symulacji numerycznej procesu roboczego realizowanego w silniku tłokowym o zapłonie samoczynnym. W zastosowanym programie użytkowym DIESEL-RK zaimplementowano silnik laboratoryjny Farymann Diesel typ D10. Wprowadzono wybraną niesprawność jego układu funkcjonalnego zasilania paliwem - obniżone ciśnienie otwarcia wtryskiwacza p_{wtr} . Wyznaczono wartości adekwatnych parametrów diagnostycznych: temperaturę i ciśnienie gazu roboczego w cylindrze T_{cyl} i p_{cyl} , temperaturę i ciśnienie spalin wylotowych T_{sp} i p_{sp} , temperaturę spalania (płomienia) T_{spal} , prędkość spalin wylotowych v_{sp} oraz stężenie cząsteczek NO_x . Oceniono użyteczność wyników przeprowadzonej symulacji do wyboru analizowanych parametrów struktury konstrukcyjnej silnika oraz do selekcji parametrów, które mogą być wykorzystane w badaniach diagnostycznych silnika laboratoryjnego.

***Słowa kluczowe:** okrętowy silnik o ZS, diagnostyka parametryczna, symulacja numeryczna*

1. Wstęp

Diagnostyka parametryczna okrętowych tłokowych silników spalinowych jest niezbędna do długotrwałego i bezpiecznego działania siłowni i elektrowni na statku. Jest to dziedzina dynamicznie rozwijająca się pod względem stosowanych w systemach diagnozujących czujnikach pomiarowych (np. temperatury czy ciśnienia) [Witkowski, 2005; Korczewski, 2017; Wang and others, 2017]. Istotnym wsparciem dla tychże systemów oraz samych eksploatorów są użytkowe programy komputerowe umożliwiające przeprowadzanie symulacji numerycznej procesów zachodzących w silniku podczas realizowanego cyklu roboczego. Istotnym jest także określenie, na drodze dalszych obliczeń, wartości parametrów diagnostycznych, miarodajnych w przypadku występowania zanieczyszczeń lub niesprawności elementów konstrukcyjnych otaczających komorę spalania, ale także układu zasilania paliwem czy powietrzem dolotowym. Przeprowadzenie symulacji numerycznej procesu roboczego pozwala na wybór adekwatnych parametrów diagnostycznych, które rejestrowane podczas badań eksperymentalnych lub zwyczajnej pracy silnika okrętowego mogą dać najwięcej informacji diagnostycznej na temat analizowanej niesprawności. W niniejszym artykule zaproponowano sposób oceny wpływu wybranej niesprawności układu

funkcjonalnego zasilania paliwem silnika okrętowego o ZS, na jego parametry diagnostyczne, zgodnie z następującymi krokami:

1. Wybór jednego z najczęściej występujących niesprawności w układach funkcyjalnych silników o ZS pracujących na statkach, na podstawie danych literaturowych.

2. Wprowadzenie zmian konstrukcyjnych w programie komputerowym DIESEL-RK i wyznaczenie adekwatnych parametrów diagnostycznych na drodze symulacji numerycznej procesu roboczego zachodzącego w 4-suwowym, okrętowym silniku spalinowym o ZS, dla zaimplementowanego w programie silnika badawczego Farymann Diesel typ D10.

3. Ocena użyteczności zastosowanego programu do oceny wpływu zmian struktury konstrukcyjnej wybranych elementów układów funkcyjalnych silnika na parametry diagnostyczne uzyskanych w wyniku symulacji numerycznej.

4. Ocena użyteczności wyników przeprowadzonej symulacji do wyboru niesprawności wybranych elementów struktury konstrukcyjnej silnika oraz do selekcji adekwatnych parametrów diagnostycznych, które mogą być wykorzystane w badaniach eksperymentalnych silnika laboratoryjnego.

2. Wyniki symulacji numerycznej cyklu roboczego silnika o ZS w programie DIESEL-RK

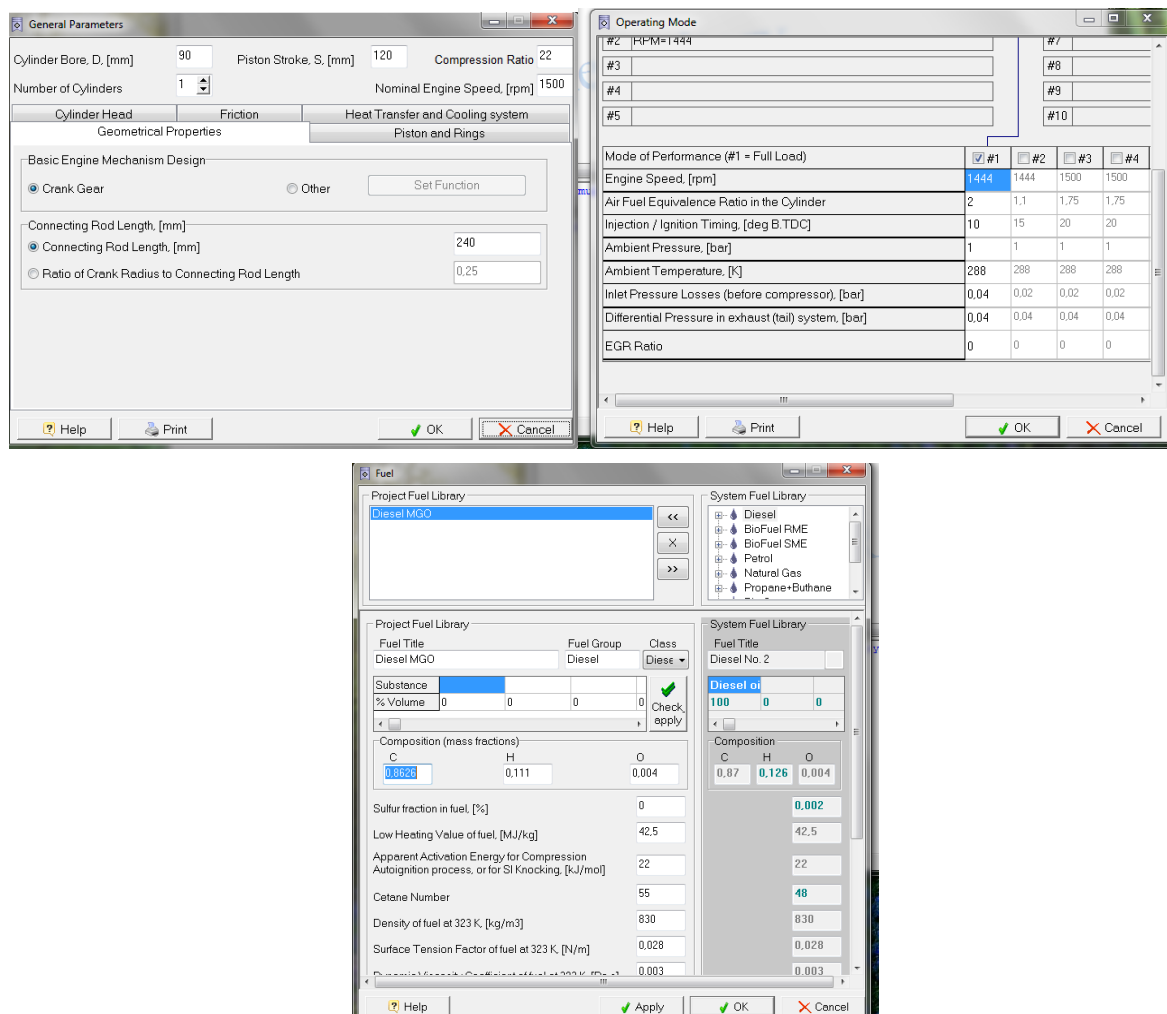
Przeprowadzono symulację numeryczną procesu roboczego silnika laboratoryjnego Farymann Diesel typ D10, którego dane techniczne oraz budowę stanowiska laboratoryjnego zostały szerzej opisane w publikacji [Puzdrowska, 2021]. Podstawowe dane techniczne silnika są następujące: moc nominalna 5,9 kW, prędkość obrotowa nominalna 1500 min⁻¹, moment obrotowy nominalny 38 N·m, średnica cylindra 90 mm, skok tłoka 120 mm, stopień kompresji $\varepsilon=22:1$, ciśnienie otwarcia wtryskiwacza $p_{wtr}=12$ MPa.

Chcąc przystąpić do badań eksperymentalnych mających na celu określenie zbioru powiązań: zmiana wartości parametru struktury konstrukcyjnej silnika – zmiana wartości parametru diagnostycznego, przeprowadzono symulację numeryczną procesu roboczego silnika laboratoryjnego. Wykorzystano program DIESEL-RK służący do symulacji numerycznej procesów termodynamicznych zachodzących w silniku tłokowym [Kuleshov, 2004; Woś i inni, 2013; Pham, 2019; www.diesel-rk.bmstu.ru]. Program komputerowy DIESEL-RK w wersji ogólnodostępnej przeznaczony jest do symulacji i optymalizacji procesów termodynamicznych silników dwusuwowych i czterosuwowych, dla wszystkich rodzajów doładowania oraz dla różnych stosowanych paliw. Możliwości oprogramowania pozwoliły na zaimplementowanie do programu danych konstrukcyjnych (np. średnica tłoka, pojemność komory spalania) i eksploatacyjnych (takich, jak np. prędkość obrotowa wału korbowego czy rodzaj paliwa) silnika laboratoryjnego Farymann Diesel typ D10 – rys. 1. Wprowadzono skład elementarny stosowanego w czasie badań laboratoryjnych paliwa zasilającego typu MGO (ang. *Marine Gas Oil*). Przeprowadzono obliczenia procesu roboczego dla dwóch stanów silnika: referencyjnego oraz dla obniżonego ciśnienia otwarcia wtryskiwacza p_{wtr} (mniejsze o 20 bar).

Ze względu na tematykę prowadzonych przez autorkę badań w symulacji skupiono się najbardziej na następujących parametrach wyjściowych, obliczonych w programie DIESEL-RK:

- temperatura i ciśnienie gazu roboczego w cylindrze (T_{cyl} i p_{cyl}),
- temperatura i ciśnienie spalin w kanale wylotowym (T_{sp} i p_{sp}),
- temperatura spalania (płomienia) w cylindrze (T_{spal}),
- prędkość spalin wylotowych (v_{sp}),

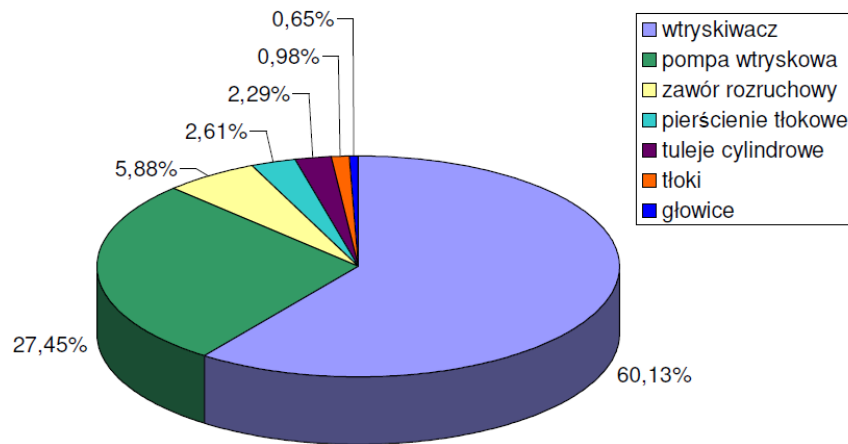
– stężenie cząsteczek tlenków azotu NO_x w spalinach.



Rys. 1. Widok okna programu komputerowego DIESEL-RK, w opcjach: „General parameters”, „Operating mode” i „Fuel”

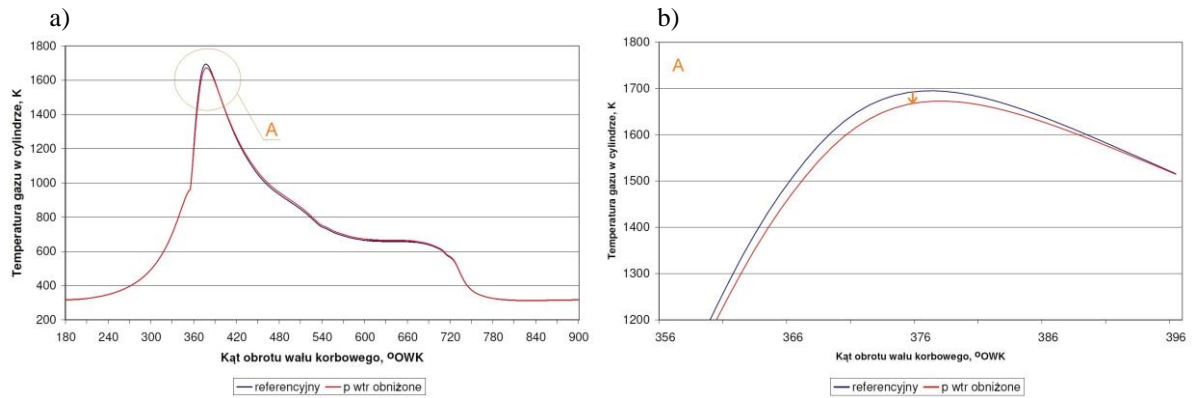
Wybór ciśnienia otwarcia wtryskiwacza wynikało z faktu, że układ zasilania paliwem jest jednym z układów funkcjonalnych okrętowego silnika o ZS, który najczęściej ulega niesprawności [Witkowski, 2005, 2016 i 2017]. Analizując uszkodzalność okrętowych silników tłokowych za najbardziej newralgiczne układy funkcjonalne należy uznać: układ paliwowy (blisko 50% wszystkich uszkodzeń) oraz wymiany czynnika roboczego (24,7%). W wypadku układu zasilania paliwem to wtryskiwacze (41%) oraz pompy wtryskowe (38%) stanowią podzespoły najczęściej ulegające uszkodzeniom [Witkowski, 2016]. W swojej rozprawie doktorskiej dr inż. S. Bruski przedstawił wyniki badań statystycznych dla silników średnioobrotowych eksploatowanych na okrętach Marynarki Wojennej [Bruski, 2005]. Autor wskazuje, że do najczęstszych uszkodzeń dochodziło w układach: zasilania paliwem (72%), rozrzędu (19%) oraz zasilania powietrzem (9%). Przy 54% udziale uszkodzeń wtryskiwaczy w układzie zasilania paliwem, stanowiły one 38,9% wszystkich uszkodzeń silnika w eksploatacji. Zagadnieniem niezawodności okrętowych tłokowych silników spalinowych zajmował się również prof. Z. Czajgucki [Czajgucki, 1984]. Na podstawie zebranych danych statystycznych o ich uszkodzeniach wykazał, że wtryskiwacze są podzespołem badanych silników, który ulega najczęściej uszkodzeniu (ponad 60% wszystkich analizowanych przez autora podzespołów). Udziały uszkodzeń poszczególnych podzespołów silników CEGIELSKI SULZER typu 6RD68 o mocy 5,5 MW przedstawiono na rys. 2. Wykres powstał na

podstawie przebiegów funkcji niezawodności wtryskiwaczy, pomp paliwowych wtryskowych, zaworów rozruchowych, pierścieni tłokowych, tulei cylindrowych, tłoków i głowic silników 6RD68, które przepracowały 1500 godzin.



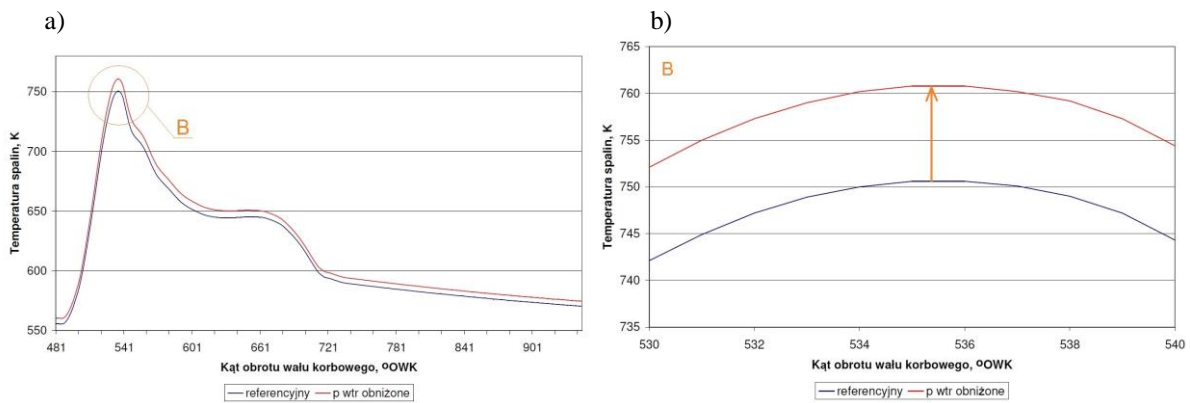
Rys. 2. Procentowe udziały uszkodzeń poszczególnych elementów konstrukcyjnych silników CEGIELSKI SULZER typu 6RD68 o mocy 5,5 MW

Wyniki obliczeń procesu roboczego realizowanego w zaimplementowanym w programie silniku, dla dwóch analizowanych stanów struktury konstrukcyjnej przedstawiono w postaci graficznej na 3 - 9. W przypadku wprowadzonych zmian w strukturze konstrukcyjnej układu wtryskowego paliwa silnika badawczego, ich wpływ na temperaturę gazu roboczego w cylindrze T_{cyl} był najbardziej widoczny w suwie pracy, w obszarze maksymalnej wartości tego parametru pracy silnika – rys. 3a. Wprowadzona zmiana ciśnienia otwarcia wtryskiwacza skutkowała 1,5% spadkiem temperatury gazu roboczego w cylindrze. Największa różnica występowała w maksimum wartości T_{cyl} i wynosiła 25K – rys. 3b. Różnica pomiędzy przebiegami temperatury gazu roboczego w cylindrze dla reszty cyklu roboczego realizowanego w zamodelowanym silniku była znacznie mniejsza lub w ogóle nie występowała. Również w przypadku przebiegu zmian temperatury spalin wylotowych T_{exh} największe różnice w wartościach tego parametru występują w rejonie maksimum – rys. 4a. Obniżone ciśnienie otwarcia wtryskiwacza p_{wtr} skutkowało wzrostem temperatury spalin o około 10K (1,33%) w maksimum wartości T_{exh} – rys. 4b. Różnica wartości temperatury spalin T_{exh} dla obu analizowanych stanów widoczna jest również dla dalszej części cyklu pracy silnika, jednakże jest mniejsza – rys. 4a. Przebieg zmian temperatury spalania (płomienia) gazu w cylindrze T_{spal} w przypadku obniżenia ciśnienia otwarcia wtryskiwacza p_{wtr} wykazał się 0,2% spadkiem - 6K. Różnica ta utrzymywała się na podobnym poziomie podczas całego czasu trwania spalania mieszanki paliwowo-powietrznej – rys. 5a i b. Wszystkie rozpatrywane parametry struktury konstrukcyjnej modelowanego silnika i zmiany ich wartości wpłynęły zatem na zmiany wartości temperatur T_{cyl} , T_{exh} i T_{spal} .



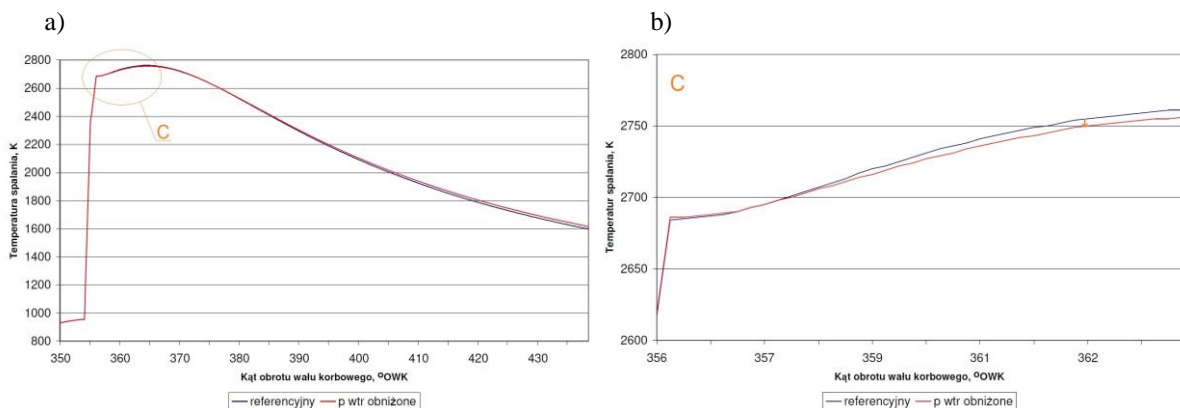
Rys. 3. Przebiegi zmian temperatury gazu roboczego w cylindrze T_{cyl} jako funkcja kąta obrotu wału korbowego, dla całego cyklu roboczego silnika (a) oraz dla zakresu występowania maksymalnej wartości temperatury w cylindrze (b), uzyskane w wyniku symulacji numerycznej procesu roboczego silnika w programie DIESEL-RK w warunkach wprowadzonych zmian ciśnienia otwarcia wtryskiwacza p_{wtr}

$$\left| \frac{T_{cyl}(ref) - T_{cyl}(p_{wtr})}{T_{cyl}(ref)} \right| \cong 1,5\%$$



Rys. 4. Przebiegi zmian temperatury spalin wylotowych T_{exh} jako funkcja kąta obrotu wału korbowego, dla części cyklu roboczego silnika (a) oraz dla zakresu występowania maksymalnej wartości temperatury spalin wylotowych (b), uzyskane w wyniku symulacji numerycznej procesu roboczego silnika w programie DIESEL-RK w warunkach wprowadzonych zmian ciśnienia otwarcia wtryskiwacza p_{wtr}

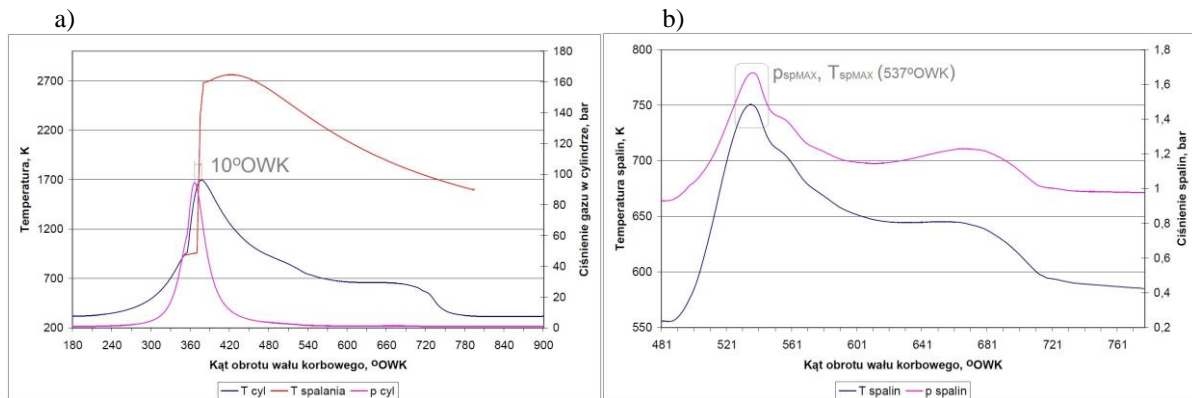
$$\left| \frac{T_{sp}(ref) - T_{sp}(p_{wtr})}{T_{sp}(ref)} \right| \cong 1,33\%$$



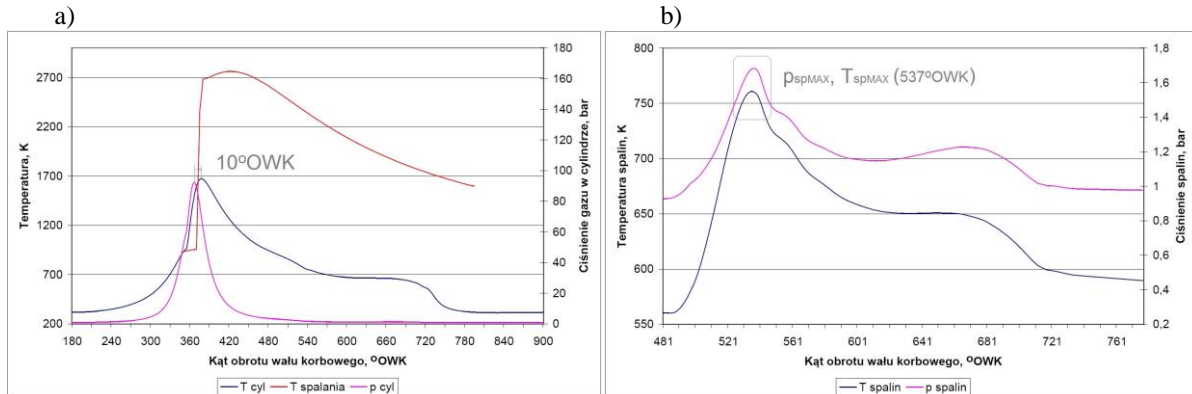
Rys. 5. Przebiegi zmian temperatury spalania (płomienia) w cylindrze T_{spal} jako funkcja kąta obrotu wału korbowego, dla suwu pracy silnika (a) oraz dla zakresu występowania największych różnic temperatury spalania dla rozpatrywanych stanów (b), uzyskany dzięki symulacji numerycznej procesu roboczego silnika w programie DIESEL-RK w warunkach wprowadzonych zmian ciśnienia otwarcia wtryskiwacza p_{wtr}

$$\left| \frac{T_{spal}(ref) - T_{spal}(p_{wtr})}{T_{spal}(ref)} \right| \cong 0,2\%$$

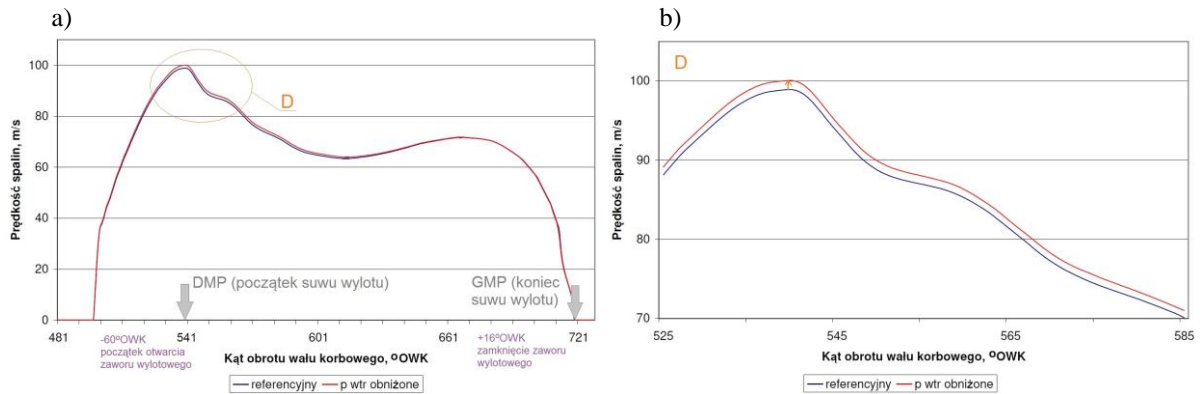
Program symulacyjny DIESEL-RK pozwolił także na jednoczesne wyznaczenie przebiegów temperatur i ciśnień, zarówno w cylindrze, jak i kanale spalin wylotowych. Poddano analizie ich maksymalne wartości dla obu stanów eksploatacyjnych – rys. 6-7. Symulacja w programie wykazała przesunięcie maksymalnej wartości temperatury w cylindrze T_{cyl} względem maksymalnej wartości ciśnienia w cylindrze p_{cyl} średnio o $10^{\circ}OWK$, dla obu analizowanych stanów struktury konstrukcyjnej silnika – rys. 6a i 7a. Nie występuje natomiast takie przesunięcie w przypadku ciśnienia i temperatury spalin wylotowych p_{sp} i T_{sp} – rys. 6b i 7b. Oznacza to, że model procesów termodynamicznych zachodzących w silniku jest opracowany zgodnie z powszechną wiedzą na ten temat.



Rys. 6. Przebiegi zmian temperatury gazu roboczego w cylindrze T_{cyl} , temperatury spalania T_{spal} oraz ciśnienia w cylindrze p_{cyl} (a) oraz przebieg zmian temperatury i ciśnienia spalin wylotowych T_{sp} i p_{sp} (b) jako funkcje kąta obrotu wału korbowego, dla stanu referencyjnego silnika, uzyskane dzięki symulacji numerycznej procesu roboczego silnika w programie DIESEL-RK; maksymalne wartości: $T_{spal}=2762K$, $T_{cyl}=1694,8K$ (w $377^{\circ}OWK$), $p_{cyl}=94,5$ bar (w $367^{\circ}OWK$), $T_{sp}=750,6K$ i $p_{sp}=1,668$ bar (w $537^{\circ}OWK$)

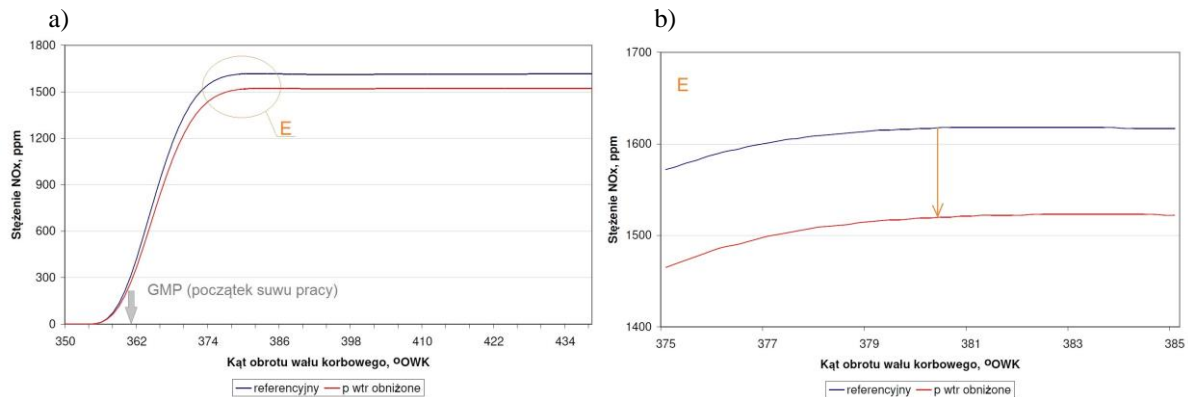


Rys. 7. Przebiegi zmian temperatury gazu roboczego w cylindrze T_{cyl} , temperatury spalania T_{spal} oraz ciśnienia w cylindrze p_{cyl} (a) oraz przebieg zmian temperatury i ciśnienia spalin wylotowych T_{sp} i p_{sp} (b) jako funkcje kąta obrotu wału korbowego, dla obniżonego o 20 bar ciśnienia otwarcia wtryskiwacza paliwa do silnika, uzyskane dzięki symulacji numerycznej procesu roboczego silnika w programie DIESEL-RK; maksymalne wartości: $T_{spal}=2757$ K, $T_{cyl}=1672,3$ K (w $377^{\circ}OWK$), $p_{cyl}=92,3$ bar (w $367^{\circ}OWK$), $T_{sp}=760,8$ K i $p_{sp}=1,68$ bar (w $537^{\circ}OWK$)



Rys. 8. Przebiegi zmian prędkości spalin v_{sp} wylotowych jako funkcja kąta obrotu wału korbowego, dla suwu wylotu spalin z cylindra silnika (a) oraz dla zakresu występowania wartości maksymalnej prędkości spalin wylotowych (b), uzyskany dzięki symulacji numerycznej procesu roboczego silnika w programie DIESEL-RK

$$\left| \frac{v_{sp}(ref) - v_{sp}(p_{wtr})}{v_{sp}(ref)} \right| \cong 1,15\%$$



Rys. 9. Przebiegi zmian stężenia cząsteczek NO_x w spalinach jako funkcja kąta obrotu wału korbowego, dla suwu pracy silnika (a) oraz dla zakresu występowania wartości maksymalnej stężenia cząsteczek NO_x (b), uzyskany dzięki symulacji numerycznej procesu roboczego silnika w programie DIESEL-RK

$$\left| \frac{NO_x(ref) - NO_x(p_{wtr})}{NO_x(ref)} \right| \cong 6\%$$

Zaobserwowano także wpływ wprowadzanych w strukturze konstrukcyjnej silnika zmian na wartości prędkości spalin wylotowych v_{sp} – rys. 8a. Wzrost wartości tego parametru o 1,15% względem stanu referencyjnego odnotowano dla obniżonego ciśnienia otwarcia wtryskiwacza p_{wtr} – rys. 8b. Program symulacyjny DIESEL-RK pozwolił także na wywnioskowanie, że dla obniżonego ciśnienia otwarcia wtryskiwacza mamy do czynienia ze znacznym wpływem na wartość stężenia cząsteczek tlenków azotu NO_x w spalinach – obniżenie p_{wtr} skutkowało 6% spadkiem stężenia cząsteczek tlenków azotu w spalinach – rys. 9a i b. Od chwili początku spalania (powstania spalin) różnica stężeń NO_x pomiędzy stanem referencyjnym, a tym dla obniżonego ciśnienia otwarcia wtryskiwacza wynosiła około 98 ppm.

5. Wnioski i podsumowanie

Programy symulujące procesy termodynamiczne zachodzące w silnikach tłokowych takie, jak przedstawiony DIESEL-RK, można uznać za użyteczne na etapie wyboru analizowanych parametrów struktury konstrukcyjnej silnika oraz adekwatnych parametrów diagnostycznych, które najsilniej będą reagowały na wprowadzane zmiany, zanim przystąpi się do badań na silniku laboratoryjnym lub w warunkach eksploatacji na statku. Jednak uzyskane wartości

wybranych parametrów diagnostycznych oraz charakter i wielkość ich zmian względem stanu referencyjnego, mogą się różnić, gdy zestawimy ze sobą wartości uzyskane na drodze symulacji numerycznej w programie DIESEL-RK oraz dla badania eksperymentalnego. Przyczyn tych różnic może być wiele, jednak za najważniejsze należy uznać następujące:

1. Uproszczenia stosowane w algorytmach obliczeniowych programu komputerowego, np. nie uwzględniające rzeczywistych zjawisk zachodzących w silniku spalinowym i kanale spalin wylotowych czy traktowanie czynnika roboczego jako gazu doskonałego.

2. Obecność wielu źródeł niepewności pomiarowej podczas badania eksperymentalnego, m. in. wpływ czynników zewnętrznych na proces roboczy silnika oraz tor pomiarowy [EA-4/02 M:2022]. Tego czynnika nie uwzględnia w żadnym stopniu symulacja numeryczna w programie komputerowym.

3. Zjawiska zachodzące w kanale spalin wylotowych, takie jak: wydzielanie ciepła w procesie rozprężania, opóźnienie i deformacje rejestrowanych sygnałów, opory przepływu w kanale spalin wylotowych w zależności od jego formy konstrukcyjnej, stan techniczny powierzchni wewnętrznej itp., zjawiska falowe zachodzące w kanale (interferencja i odbicia fal ciśnienia), sprężanie adiabatyczne słupa gazu znajdującego się przed kolejnymi impulsami spalin opuszczających cylindry silnika [Korczewski, 2017].

Jak widać jest to zagadnienie bardzo złożone i wymagające dalszych badań i analiz, także popartych wynikami badań eksperymentalnych.

Bibliografia

- [1] Bruski S. (2005), Zastosowanie metod analizy częstotliwościowej drgań skrętnych wału napędowego do identyfikacji stanu technicznego wtryskiwaczy paliwa średnioobrotowego silnika okrętowego w eksploatacji. *Praca doktorska. Politechnika Gdańska*.
- [2] Czajgucki J. Z. (1984), Niezawodność spalinowych siłowni okrętowych. Wydawnictwo Morskie. Gdańsk.
- [3] Korczewski Z. (2017), Diagnostyka eksploatacyjna okrętowych silników spalinowych – tłokowych i turbinowych. Wybrane zagadnienia. *Wydawnictwo Politechniki Gdańskiej*.
- [4] Kuleshov A. S., (2004), DIESEL-RK Engine Simulation Software User Manual. Moscow.
- [5] Pham V. V. (2019), Research on the application of diesel-RK in the calculation and evaluation of technical and economic criteria of marine diesel engines using the unified ULSD and biodiesel blended fuel, *Journal of Mechanical Engineering Research and Developments*.
- [6] Puzdrowska, P. (2021). Diagnostic information analysis of quickly changing temperature of exhaust gas from marine diesel engine. Part I single factor analysis. *Polish Maritime Research*, 28, 97-106. <https://doi.org/10.2478/pomr-2021-0052>
- [7] Wang G., Zhou Y., Zhang Q., Wang S. (2017), The small sample failure distribution model of diesel engine component parts using FMECA approach. *International Journal of Modeling and Optimization*, Vol. 7, No. 1, str. 19-23.
- [8] Witkowski K. (2005), Stan diagnostyki technicznej okrętowych silników tłokowych. *Diagnostyka*. Vol. 34, str. 85-92.
- [9] Witkowski K. (2016), Badania wpływu wybranych uszkodzeń silników okrętowych na parametry pracy silnika i skład spalin. *Autobusy: technika, eksploatacja, systemy transportowe*, nr 2016/17/4, str. 95-101.
- [10] Witkowski K. (2017), The Increase of Operational Safety of Ships by Improving Diagnostic Methods for Marine Diesel Engine, *Transnav the International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation*, vol. 11, no 2.

- [11] Woś P., Jaworski A., Kuszewski H., Lejda K., Ustrzycki A. (2016), Technical and operating problems yielded from setting up the optimum value of geometric compression ratio in piston engines, *Spalustion Engines, Vol. 164, 1/2016, s. 3-14.*
- [12] www.diesel-rk.bmstu.ru/Eng/index.php dostęp 2.04.2022
- [13] Dokument EA-4/02 M:2022 (2022), Ocena niepewności pomiaru przy wzorcowaniu. *Polskie Centrum Akredytacji.*