

Kamila TURZYŃSKA

## OKREŚLENIE OBCIĄŻENIA MECHANICZNEGO I CIEPLNEGO SILNIKA OKRĘTOWEGO PRACUJĄCEGO Z WYBRANYMI NIESPRAWNOŚCIAMI, W STOSUNKU DO POZIOMU TYCH OBCIĄŻEŃ DLA SILNIKA TECHNICZNIE SPRAWNEGO

### Streszczenie

W artykule omówione zostały sposoby określenia obciążenia cieplnego i mechanicznego silnika okrętowego pracującego w normalnych warunkach oraz z wybranymi niesprawnościami. Badanie polegało na pomiarze parametrów pracy silnika z symulowaną uszkodzoną turbosprężarką oraz symulowaną nieszczelną pompą wtryskową i porównanie ich do parametrów pracy silnika technicznie sprawnego. Badania zostały przeprowadzone w warunkach laboratoryjnych na silniku SULZER 3AL25/30.

### WSTĘP

Dotychczasowe doświadczenia wykazują, że obciążenia cieplne mogą wzrastać wtedy, gdy dochodzi do zakłóceń w przebiegu procesu roboczego. Wszystkie niesprawności, które pogarszają stan techniczny silnika lub/i instalacji z nim współpracujących, a wpływających na proces roboczy mogą prowadzić do przeciążenia cieplnego silnika.

W silniku tłokowym podczas procesów zamiany energii dochodzi do bardzo niekorzystnych dla silnika oddziaływań – obciążeń cieplnych i mechanicznych. Pierwsze z nich obejmuje ciepłe oddziaływanie gorącego medium (strumień cieplny, gazy spalinowe, powietrze doładowania i czynnik chłodzący) oraz wynik tych oddziaływań na poziom temperatury, odkształcenia i naprężenia. Najbardziej obciążonym cieplnie układem silnika jest układ tłok-cylinder. Wpływ na wielkość tych zjawisk mają:

- parametry procesu roboczego,
- prędkość obrotowa,
- stan techniczny silnika,
- czynniki konstrukcyjne
- czynniki eksploatacyjne.

Aby zmniejszyć obciążenia cieplne elementów układu tłokowo-cylindrowego, powietrze przed podaniem do cylindra zostaje schłodzone.

Obciążenia mechaniczne określa się jako wielokierunkowy stan naprężeń, wywołany siłami ciśnienia czynnika roboczego i siłami bezwładności mas. Elementy silnika, najczęściej narażone na naprężenia mechaniczne to:

- głowica cylindra
- śruby mocujące głowicę
- ściągi kotwiczne
- denko tłoka
- tuleja cylindrowa
- elementy kadłuba silnika
- łożyska układu korbowego
- wał korbowy

Należy mieć jednak na uwadze, że w czasie eksploatacji warunki współpracy poszczególnych elementów silnika ulegają zmianie pod wpływem odkształceń silnika i kadłuba statku pracującego na fali oraz zużycia elementów silnika.

### 1. UKŁAD EKSPERYMENTALNY I PRZEPROWADZENIE BADAŃ

#### 1.1. Cel i plan badań

Badania wykonane zostały w warunkach laboratoryjnych na silniku SULZER 3AL25/30 (rysunek 1), który obciążony został mocą elektryczną w zakresie od 50 kW do 250 kW. Zmiany obciążenia zadawane były pięciokrotnie co 50 kW.



**Rys. 1.** Silnik SULZER 3AL 25/30. Dane silnika: czterosurowy, stałobrotowy, średnica cylindra  $D=250$  mm, ilość cylindrów  $z=3$ , skok tłoka  $S=300$  mm, moc nominalna  $N_n=408$  kW, moc znamionowa (na jeden cylinder) 136KM [źródło własne]

Badania zostały przeprowadzone w trzech cyklach pomiarowych:

- 1) badanie silnika technicznie sprawnego,
- 2) badanie silnika z symulowanym uszkodzeniem turbosprężarki,
- 3) badanie silnika z symulowanym uszkodzeniem pompy wtryskowej.

Zmierzone zostały następujące parametry silnika:

1. moc elektryczna silnika.
2. czas zużycia paliwa
3. ciśnienie powietrza doładowującego,
4. temperatura doładowania,
5. prędkość obrotowa turbosprężarki,
6. prędkość obrotowa silnika,
7. temperatura spalin,

8. temperatura gazów przed turbiną,
9. temperatura gazów za turbiną,
10. średnie ciśnienie indykowane,
11. moc indykowana,
12. maksymalne ciśnienie spalania,
13. wskaźnik obciążenia,
14. kąt maksymalnego ciśnienia spalania względem GMP,
15. ciśnienie rozprężania,
16. maksymalne ciśnienie wtrysku,
17. spadek ciśnienia powietrza na wlocie do lemniskaty (1 otwór),
18. spadek ciśnienia powietrza na wlocie do lemniskaty (7 otworów).

Zmierzone parametry pracy silnika pozwoliły na określenie obciążenia mechanicznego w oparciu o moment obrotowy, średnie ciśnienie użyteczne, ciśnienie maksymalne i wskaźnik obciążenia oraz obciążenia cieplnego w oparciu o temperaturę spalin za cylindrem.

## 2. PRZEBIEG BADAŃ, WYNIKI I ANALIZA BADAŃ

### 2.1. Badanie silnika technicznie sprawnego

Silnik technicznie sprawny pracujący ze stałą prędkością obrotową  $n = 750$  obr/min został obciążony mocą elektryczną w zakresie od 50 kW do 250 kW. Pomiary parametrów pracy silnika dokonano przy zmieniającym się obciążeniu co 50 kW, przy temperaturze otoczenia równej  $23,15$  °C oraz ciśnieniu otoczenia równym 1017 hPa. Wybrane parametry zestawiono w tabeli 1.

Przykłady wartości wielkości obliczonych:

- podciśnienie powietrza na wlocie lemniskatowym

$$\Delta p = \frac{7 \cdot p_{7otw} + p_{1otw}}{8} \quad [-] \quad (1)$$

$$\Delta p = \frac{7 \cdot (25 \cdot 9.81) + (27 \cdot 9.81)}{8} = 247,47 \quad [-]$$

- teoretyczne masowe natężenie przepływu powietrza

$$m_t = 4,85675 \cdot \psi_S \quad [\text{kg}] \quad (2)$$

$$m_t = 4,85675 \cdot 0,0284 = 0,1380 \quad [\text{kg}]$$

- stosunek ciśnień

$$\Pi_S = \frac{p_{ot}}{p_{ot} + \Delta p} \quad [-]$$

gdzie:  $p_{ot} = 1017$  [hPa] = 101700 [Pa]

$$\Pi_S = \frac{101700}{101700 + 247,47} = 0,9976 \quad [-]$$

$$\Pi_1 = \Pi_S^{\frac{2}{\chi}} \quad [-]$$

gdzie:  $\chi = 1,4$  [-]

$$\Pi_1 = 0,997^{\frac{2}{1,4}} = 0,9965 \quad [-]$$

$$\Pi_2 = \Pi_S^{\frac{\chi+1}{\chi}}$$

$$\Pi_2 = 0,997^{\frac{1,4+1}{1,4}} = 0,9958 \quad [-]$$

- liczba przepływu

$$\psi_S = \sqrt{2 \cdot \frac{\chi}{\chi+1} \cdot (\Pi_1 - \Pi_2)} \quad [-] \quad (4)$$

$$\psi_S = \sqrt{2 \cdot \frac{1,4}{1,4+1} \cdot (0,9965 - 0,9958)} = 0,0284 \quad [-]$$

- rzeczywiste masowe natężenie przepływu powietrza

$$m_{pow} = m_t \cdot \frac{p_{ot}}{10^5} \cdot \sqrt{\frac{293}{T_{ot}}} \quad [\text{kg}]$$

gdzie:  $T_{ot}$  - temperatura otoczenia = 296,15 [K] (5)

$$m_{pow} = 0,1380 \cdot \frac{101700}{10^5} \cdot \sqrt{\frac{293}{296,15}} = 0,1396 \quad [\text{kg}]$$

- masa paliwa dostarczonego do silnika w czasie

$$m_{pal} = \rho_{pal} \cdot V$$

gdzie:  $\rho_{pal}$  - gęstość paliwa = 834,23 [kg/m<sup>3</sup>]

$V$  - objętość zużytego paliwa = 4,06 [dm<sup>3</sup>] = 0,00406 [m<sup>3</sup>]

$$m_{pal} = 832,23 \cdot 0,00406 = 3,387 \quad [\text{kg}]$$

- sprawność prądnicy

$$\eta_{pr} = \frac{1}{0,09688 \cdot \frac{N_n}{N_{el}} + 0,7967 + 0,1731 \cdot \frac{N_{el}}{N_n}} \quad [-]$$

gdzie:  $N_n$  - moc nominalna silnika = 408 kW

$N_{el}$  - moc wytwarzana przez prądnicę

$$\eta_{pr} = \frac{1}{0,0968 \cdot \frac{408}{50} + 0,7967 + 0,1731 \cdot \frac{50}{408}} = 0,622 \quad [-] \quad (7)$$

- moc efektywna

$$N_e = \frac{N_{el}}{\eta_{pr}} \quad [\text{kW}]$$

$$N_e = \frac{50}{0,622} = 80,423 \quad [\text{kW}]$$

- ciśnienie efektywne

$$p_e = \frac{N_e \cdot 10^3 \cdot 60}{V_s \cdot i \cdot n \cdot k} \quad [\text{MPa}]$$

gdzie:  $i$  - liczba cylindrów = 3

$k$  - liczba zapłonów w cylindrze na jeden obrót wału = 0,5

$n$  - prędkość obrotowa = 750 [obr/min]

$V_s$  - objętość komory spalania

$$V_s = \frac{\pi \cdot D^2}{4} \cdot S \quad (9)$$

gdzie:  $D$  - średnica tłoka = 0,25 [m]

$S$  - skok tłoka = 0,30 [m]

$$V_s = \frac{3,14 \cdot 0,25^2}{4} \cdot 0,30 = 0,01472$$

$$p_e = \frac{80,423 \cdot 10^3 \cdot 60}{0,01472 \cdot 3 \cdot 750 \cdot 0,5} = 291402,89 \quad [\text{Pa}] = 0,2914 \quad [\text{MPa}]$$

- moment obrotowy

$$M_o = 9550 \cdot \frac{N_e}{n} \quad [\text{Nm}] \quad (10)$$

$$M_o = 9550 \cdot \frac{80,423}{750} = 1025,05 \text{ [Nm]}$$

– godzinowe zużycie paliwa

$$G_h = \frac{m_{pal}}{\tau_{pal}} \text{ [kg/h]}$$

$$G_h = \frac{3,387}{\frac{475}{3600}} = 26,670 \text{ [kg/h]} \quad (11)$$

– jednostkowe zużycie paliwa

$$g_e = \frac{G_h}{N_e} \text{ [kg/kWh]} \quad (12)$$

$$g_e = \frac{26,670}{80,423} = 0,319 \text{ [kg/kWh]}$$

## 2.2. Badanie silnika z symulowanym uszkodzeniem turbosprężarki

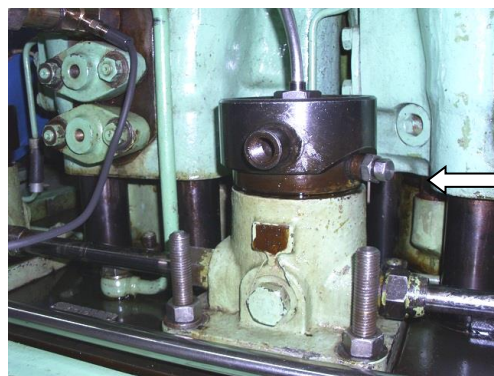
Silnik, w którym dokonano upustu powietrza doładowującego na zaworze za sprężarką (rysunek 2), pracujący ze stałą prędkością obrotową  $n = 750 \text{ obr/min}$  został obciążony mocą elektryczną w zakresie od 50 kW do 250 kW. Pomiary parametrów pracy silnika dokonano przy zmieniającym się obciążeniu co 50 kW, przy temperaturze otoczenia równej  $23,25 \text{ }^\circ\text{C}$  oraz ciśnieniu otoczenia równym  $1032,8 \text{ hPa}$ . Wybrane parametry zestawiono w tabeli 2 i 4.



Rys. 2. Zawór upustowy powietrza pomiędzy sprężarką a chłodnicą [źródło własne]

## 2.3. Badanie silnika z symulowanym uszkodzeniem pompy wtryskowej

Silnik, z symulowaną niesprawnością pary precyzyjnej pompy wtryskowej cylindra numer 2 (rysunek 3), pracujący ze stałą prędkością obrotową  $n = 750 \text{ obr/min}$  został obciążony mocą elektryczną w zakresie od 50 kW do 250 kW. Pomiary parametrów pracy silnika dokonano przy zmieniającym się obciążeniu co 50 kW, przy temperaturze otoczenia równej  $22,8 \text{ }^\circ\text{C}$  oraz ciśnieniu otoczenia równym  $1027,8 \text{ hPa}$ . Wybrane parametry zestawiono w tabeli 3.



Rys. 3. Miejsce uchylenia zaworu łączącego przestrzeń tłoczną pompy wtryskowej cylindra nr 2 z jej przelewem [źródło własne]

Tab. 2. Wybrane parametry silnika SULZER 3AL25/30 z uszkodzoną turbosprężarką – wielkości zmierzone

Nr	$T_{pal}$ [s]	$p_{i\text{ }sr}$ [MPa]	$N_{i\text{ }sr}$ [kW]	$p_{max\text{ }sr}$ [MPa]	$w_0$ [-]	$n_{ts}$ [obr/min]	$p_{1\text{ }otw}$ [mmH <sub>2</sub> O]
1	465	0,52	47,8	5,03	3	14490	28
2	345	0,69	63,3	5,86	4	18510	39
3	256	0,892	81,7	6,66	5,1	23310	56
4	207	1,058	99,3	7,32	6	27000	71
5	172	1,241	116,3	8,05	6,9	31110	91

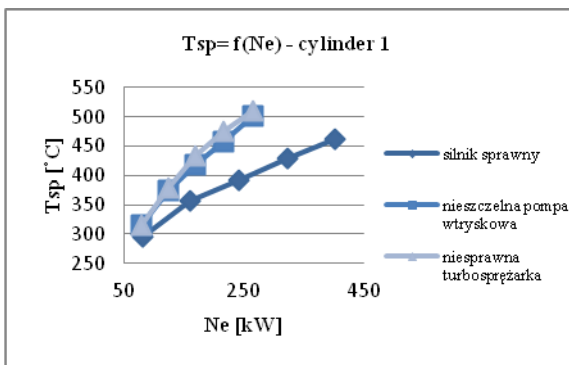
Tab. 3. Wybrane parametry silnika SULZER 3AL25/30 z uszkodzoną pompą wtryskową cylindra nr 2 – wielkości zmierzone

Nr	$\alpha_p \text{ max } sr$ [°OWK]	$p_{exp\text{ }sr}$ [MPa]	$p_{max\text{ }wtr\text{ }sr}$ [MPa]	$p_{max\text{ }sr}$ [MPa]	$w_0$ [-]	$n_{ts}$ [obr/min]	$p_{1\text{ }otw}$ [mmH <sub>2</sub> O]
	1	9,8	2,24	52,2	5,14	3,1	15720
2	11,3	2,67	58,8	5,8	4,1	19440	35
3	11,1	3,34	66,4	6,6	5,2	24450	53
4	11,5	3,87	69,9	7,43	6,2	28890	73
5	11,4	4,57	74	8,23	7,2	33360	99
Nr	$t_{sp}$ [°C]			$p_{max}$ [MPa]			$p_d$ [kPa]
	1	2	3	1	2	3	
	1	314,3	260	301,7	5,38	4,83	
2	375,4	321,2	365,6	6,16	5,33	5,91	21,9
3	418,6	350,3	405,9	7,08	6,01	6,7	39,5
4	457,5	379,6	436,4	7,87	6,73	7,69	59,6
5	502,3	412,2	468,8	8,78	7,41	8,51	82,4

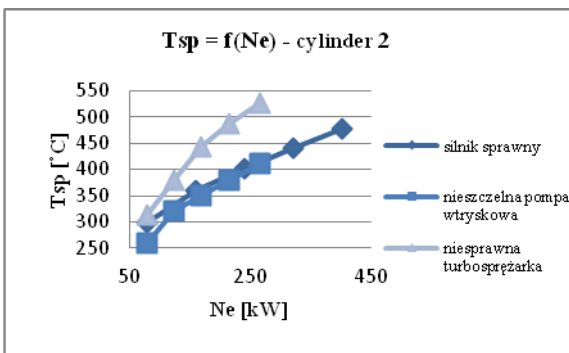
W przypadku silnika pracującego z uszkodzoną turbosprężarką następuje wzrost temperatury spalin od  $5 \div 12 \%$ , w przypadku silnika pracującego z nieszczelną pompą wtryskową od  $1 \div 3\%$  (1 i 3 cylinder), co przedstawiają rysunki 4, 5 i 6.

Tab. 1. Wybrane parametry sprawnego technicznie silnika SULZER 3AL25/30 – wielkości zmierzone

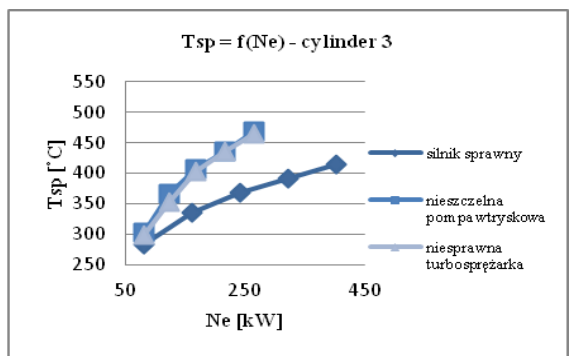
Nr	$p_{max}$ [MPa]			$p_d$ [kPa]	$t_d$ [°C]	$w_0$	$p_{i\text{ }sr}$ [MPa]	$n_{ts}$ [obr/min]	$t_p \text{ tur}$ [°C]	$t_{sp}$ [°C]			$t_z \text{ tur}$ [°C]
	1	2	3							1	2	3	
	1	5,16	5,19							5	11,8657	16	
2	5,95	6,07	5,8	21,4648	18	4	0,691	19410	371,9	356,2	360,1	334,8	308,1
3	6,83	6,95	6,57	37,9968	21	5	0,874	24150	425,9	392,5	401,7	367,7	344,6
4	7,71	7,74	7,45	57,3285	25	5,9	1,078	28800	482,5	429,4	439,5	390,4	381,5
5	8,5	8,58	8,27	80,2598	31	6,9	1,264	32820	531,8	463	478,2	414,4	411,7



Rys. 4. Temperatura spalin na cylindrze 1

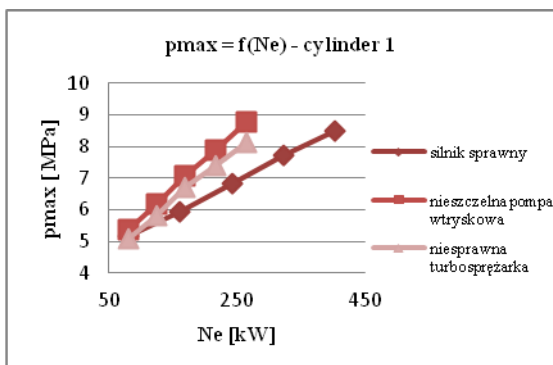


Rys. 5. Temperatura spalin na cylindrze 2

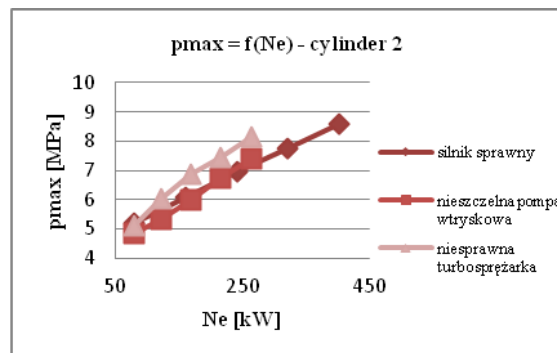


Rys. 6. Temperatura spalin na cylindrze 3

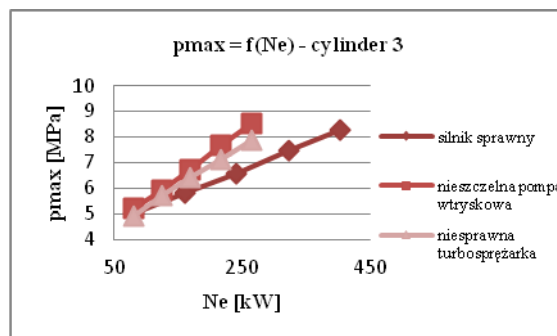
Wzrasta również ciśnienie maksymalne w przypadku silnika pracującego z uszkodzoną turbosprężarką od 1÷5% i nieszczelną pompą wtryskową od 2÷4% (1 i 3 cylinder) (rysunek 7, rysunek 8 i rysunek 9).



Rys. 7. Ciśnienie maksymalne na cylindrze 1

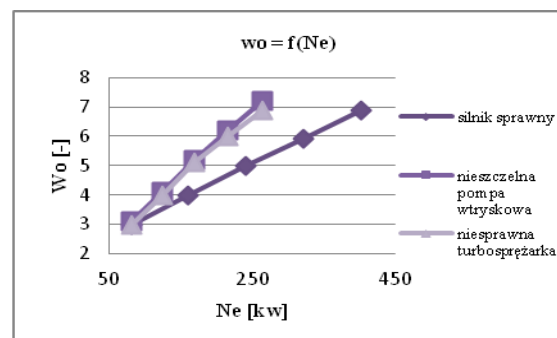


Rys. 8. Ciśnienie maksymalne na cylindrze 2



Rys. 9. Ciśnienie maksymalne na cylindrze 3

Zmianie uległ wskaźnik obciążenia (rysunek 10).



Rys. 10. Wartość wskaźnika obciążenia

W przypadku silnika pracującego z niesprawną turbosprężarką i nieszczelną pompą wtryskową, następuje spadek mocy efektywnej we wszystkich cylindrach w stosunku do wartości mocy efektywnej silnika technicznie sprawnego. Wartość momentu obrotowego spada w obu przypadkach niesprawności od 23 ÷ 34% w stosunku do tych wartości silnika technicznie sprawnego. Wzrosło uległo również godzinowe i jednostkowe zużycie paliwa co ma bezpośredni wpływ na zwiększone koszty eksploatacyjne statku. Wyżej wymienione parametry przedstawiono w tabeli 5.

Zmianom ulegają również inne parametry, pośrednio wpływające na stan obciążeń cieplnych silnika.

Tab. 4. Wybrane parametry silnika SULZER 3AL25/30 z uszkodzoną turbosprężarką – wielkości zmierzone

Nr	t <sub>sp</sub>			p <sub>max</sub>			p <sub>d</sub>
	[°C]			[MPa]			
	1	2	3	1	2	3	
1	315,2	314,4	297,8	5,1	5,09	4,91	8,26
2	378,2	379,3	352,3	5,83	6,03	5,71	15,73
3	433,2	443,3	402,9	6,72	6,85	6,42	29,46
4	476	486,4	435,6	7,41	7,45	7,1	45,2
5	510,4	526,2	464,6	8,13	8,14	7,87	63,19

Tab. 5. Parametry silnika – wielkości obliczone

	$N_e$	$M_o$	$G_h$	$g_e$
	[kW]	[Nm]	[kg/h]	[kg/kWh]
Silnik technicznie sprawny – wielkości obliczone	80,51	1025	25,670	0,31884
	161,03	2050	34,837	0,21634
	241,54	3075	45,328	0,18766
	322,06	4100	57,515	0,17858
	402,57	5126	69,675	0,17308
Niesprawna turbosprężarka – wielkości obliczone	80,4227	1024,05	26,221	0,32605
	123,440	1571,80	35,342	0,28631
	168,578	2146,56	47,629	0,28254
	215,838	2748,33	58,904	0,27291
	265,219	3377,12	70,890	0,26729
Nieszczelna pompa wtryskowa – wielkości obliczone	80,423	1024,05	26,109	0,32466
	123,440	1571,8	34,738	0,28142
	168,578	2146,56	45,667	0,27090
	215,838	2748,33	58,340	0,27030
	265,219	3377,12	71,305	0,26885

W przypadku silnika pracującego z uszkodzoną turbosprężarką następuje spadek wartości ciśnienia powietrza doładowującego od 21 ÷ 31%. W przypadku nieszczelnej pompy wtryskowej następuje wzrost wartości ciśnienia powietrza doładowującego od 2 ÷ 5%.

## PODSUMOWANIE

Na podstawie przeprowadzonych badań, można stwierdzić, że zmiana parametrów pracy silnika w przypadku symulowanej nieszczelności pompy wtryskowej oraz symulowanego uszkodzenia turbosprężarki ma wpływ na wielkość obciążeń cieplnych i mechanicznych silnika. Badania dowiodły, że dane niesprawności prowadzą do zmiany parametrów pracy, w wyniku czego następuje pogorszenie się warunków procesu roboczego, a w konsekwencji wzrostu obciążeń silnika.

Parametry pracy silnika technicznie sprawnego, zarówno te zmierzone jak i obliczone, mieszczą się w zakresie wartości dopuszczalnych. Nieustanna dbałość o sprawny i prawidłowy przebieg zjawisk zachodzących w silniku, kontrola parametrów pracy silnika i stanu technicznego urządzeń, daje gwarancje bezpiecznej eksploatacji statku.

## BIBLIOGRAFIA

1. Piotrowski I., Witkowski K., Eksploatacja okrętowych silników tłokowych. Baltic Surveyors Group Ltd. Sp. z o.o., Gdynia 2012.
2. Wiśniewski S., Obciążenia cieplne silników tłokowych. Wydawnictwa Komunikacji i Łączności, Warszawa 1972.
3. Piotrowski I., Witkowski K., Okrętowe silniki spalinowe. Wydawnictwo TRADEMAR, Gdynia 1996.

## DEFINITION OF THE MECHANICAL AND THERMAL LOADS ON THE MARINE ENGINE WORKING WITH SELECTED TECHNICAL FAILURES IN COMPARISON TO THE LOADS LEVEL OF THE ENGINE WORKING WITH THE PROPER TECHNICAL CONDITION

### Abstract

*The article explains how to determine the thermal and mechanical loads on the marine engine working with normal operating conditions and with selected technical failures. The survey has been based on comparison between the parameters of the engine operating with simulated damaged turbocharger and leaking simulated injection pump, and the engine working in a proper technical condition. The research has been conducted SULZER 3AL25/30 engine, under laboratory conditions.*

Autor:

mgr inż. **Kamila Turzyńska** – Akademia Morska w Szczecinie, Wydział Mechaniczny, e-mail: turzynskakamila@gmail.com