

ZNACZENIE POMIARU MASOWEGO NATĘŻENIA PRZEPŁYWU POWIETRZA PRZEZ SPRĘŻARKĘ W DIAGNOSTYCE UKŁADU DOŁADOWANIA SILNIKA OKRĘTOWEGO

Kazimierz WITKOWSKI

Akademia Morska w Gdyni, Katedra Siłowni Okrętowych
ul. Morska 83, 81-225 Gdynia
tel. (081) 690 13 32; e-mail: wika@am.gdynia.pl

Streszczenie

W referacie przeanalizowano możliwość diagnozowania elementów turbosprężarkowego układu doładowania okrętowego silnika o zapłonie samoczynnym. Omówiono znaczenie diagnostyki tego układu wskazując najważniejsze konsekwencje wynikające z zakłócenia procesu wymiany ładunku spowodowane pogorszeniem pracy układu doładowania.

Omówiono problem oceny w warunkach eksploatacyjnych stanu technicznego filtra powietrza, sprężarki ładującej chłodnicy powietrza oraz turbiny. Wykazano istotne znaczenie pomiaru masowego natężenia przepływu powietrza przez sprężarkę w diagnostyce parametrycznej układu doładowania. W oparciu o wyniki badań własnych wykazano możliwość wykorzystania w praktyce eksploatacyjnej, do pomiaru masowego natężenia przepływu powietrza, pomiaru spadku ciśnienia na konfuzorze sprężarki.

Słowa kluczowe: diagnostyka, silnik okrętowy, układ doładowania, sprężarka powietrza.

MEASUREMENT MEANING MASS INTENSITY OF AIR FLOWING THROUGH THE COMPRESSOR IN DIAGNOSTIC TURBOCHARGER SYSTEM OF SHIP'S ENGINE

Summary

The aim of the following paper is to analyze diagnostic possibilities concerning the elements of turbocharger system in ship's diesel engine. Demeaning of diagnostics of this system has also been discussed pointing out the most important consequences resulting from disturbances taking place in the process of gas charge exchange caused by deterioration of supercharger system activity. Evaluation problem concerning technical condition of air filter, supercharger, air cooler and turbine during exploitation process, has also been taken into consideration.

Mass intensity of air flowing through the compressor and the importance of its measurement has been pointer out in parameter diagnostic of turbocharger system. Basing also on own research work it was possible to show a chance of using it in exploitation practice. To measure mass intensity of air flow, it is advised to measure pressure drop on the confusor of the compressor.

Keywords: diagnostics, marine diesel engines, turbocharger system, air compressor.

1. WSTĘP

Silniki okrętowe zarówno napędu głównego jak i pomocnicze są doładowane turbosprężarkami. Układ ładujący, obok układu wtryskowego, ma zasadniczy wpływ na jakość przebiegu procesu roboczego, na ekonomikę i niezawodność pracy silnika.

Zastosowanie do doładowania turbosprężarek umożliwia wykorzystanie energii zawartej w spalinach. Pomiędzy silnikiem a turbosprężarką istnieje tylko połączenie gazodynamiczne: od strony turbiny strumieniem spalin i od strony sprężarki strumieniem powietrza. Z bilansu mocy rozwijanej przez turbinę i zapotrzebowanej przez sprężarkę wynika ilość energii wykorzystanej do sprężania powietrza w układzie doładowującym.

Struktura układu mechaniczno-przepływowego turbosprężarki i jego jakość jest kształtowana na etapie projektowania [14, 15]. Strukturę tą opisuje zbiór wartości cech konstrukcyjnych, w tym:

- połączenie turbosprężarki z silnikiem (fundament),
- kolektor dolotowy,
- sprężarka,
- kolektor wylotowy,
- turbina,
- wał turbosprężarki,
- łożyska wału turbosprężarki.

Pogorszenie się stanu technicznego układu doładowania jest jednoznaczne z pogorszeniem się przebiegu procesu roboczego silnika, lecz nie zawsze musi bezpośrednio i natychmiast wpływać na osiągi i parametry silnika.

Z uwagi na istotny wpływ układu doładowującego na pracę silnika, wzajemne relacje między przebiegiem procesu roboczego a pracą tego układu, należy w eksploatacji na bieżąco diagnozować jego stan, w tym turbosprężarki i chłodnicy powietrza. Istnieje ścisła zależność i wzajemne oddziaływanie (sprężenie zwrotne) pomiędzy zespołem powietrza ładującego (sprężarki, chłodnicy), procesem roboczym, turbiną napędzającą sprężarkę i sprężarką.

Złożoność konstrukcji współczesnych turbosprężarek i odpowiedzialność za jakość realizowanych zadań powoduje konieczność zapewnienia użytkownikowi szybkiej i wiarygodnej informacji o ich aktualnym stanie technicznym. Umożliwiają to różnorodne metody diagnostyczne [1, 2, 3, 4, 5, 6, 7], wykorzystujące generowane przez maszynę procesy, parametry i inne wielkości zawierające informacje diagnostyczne.

Ocenę pracy zespołu ładującego dokonuje się zazwyczaj na podstawie następujących parametrów:

- temperatury i ciśnienia powietrza ładującego w zasobniku powietrza t_d, p_d ,
- spadku ciśnienia na filtrze i chłodnicy powietrza $\Delta p_f, \Delta p_{ch}$,
- temperatury spalin przed i za turbiną t_{wyl1}, t_{wyl2} ,
- temperatury wody zaburtowej przed i za chłodnicą t_{chl1}, t_{chl2} ,
- prędkości obrotowej turbosprężarki n_{TS} ,
- spadku ciśnienia na kotle utylizacyjnym Δp_{ku} – przeciwiśnienie wydechu.

W praktyce eksploatacyjnej w diagnostyce układu ładującego nie wykorzystuje się masowego natężenia przepływu powietrza przez sprężarkę \dot{m}_s i nie jest niestety realizowany pomiar tej wielkości. W diagnostyce sprężarki jest to jednak podstawowy parametr wyjściowy, a dla pozostałych elementów układu wejściowy.

2. OCENA STANU TECHNICZNEGO FILTRA POWIETRZA

Postępujące zanieczyszczenie filtra powietrza powoduje zmniejszenie jego przekroju czynnego wywołane odkładaniem się osadów na wkładzie filtracyjnym. Wzrastają opory przepływu i spada skuteczność filtracji. Po osiągnięciu granicznej wartości siły przyczepności aglomeratów do włókien filtracyjnych, kończy się zakres stabilnej pracy filtra. Wzrastają siły aerodynamiczne i aglomeraty odrywane są od włókien. Wzrost oporów przepływu na filtrze objawia się zakłóceniem przepływu strumienia zasysanego powietrza i pogorszeniem pracy sprężarki.

Spada ciśnienie na dolocie do sprężarki o wartość spadku ciśnienia na filtrze Δp_f . Jednocześnie przy zachowaniu niezmiennego sprężu sprężarki π_s spada ciśnienie powietrza za sprężarką p_k , następuje zmniejszenie masowego natężenia

przepływu powietrza \dot{m}_s , oraz współczynnik nadmiaru powietrza λ [11].

W konsekwencji dojdzie między innymi do spadku ciśnienia doładowania p_d , wzrostu temperatury spalin T_g i prędkości obrotowej turbosprężarki n_{TS} oraz spadku maksymalnego ciśnienia spalania p_{max} . Może to doprowadzić również do wzrostu jednostkowego zużycia paliwa. Jak z powyższych rozważań wynika, konsekwencją zanieczyszczenia filtra powietrza sprężarki jest:

$$Z_f \Rightarrow (\Delta p_f \uparrow; p_k \downarrow; p_d \downarrow; \dot{m}_s \downarrow) \Rightarrow (g_c \uparrow; T_g \uparrow; \lambda \downarrow; p_{max} \downarrow)$$

3. OCENA STANU TECHNICZNEGO SPRĘŻARKI POWIETRZA

W kanałach przepływowych sprężarki powietrza, pomimo zabezpieczenia filtrem, odkładają się zanieczyszczenia. Jest to przede wszystkim lepka oleista masa, słabo związana z powierzchnią elementów. W turbosprężarkach, które zasysają powietrze z siłowni okrętowej przekrój dyfuzora sprężarki po około 2000 godzin pracy może zmniejszyć się od 10 do 20 % [16]. Osady na ściankach kanałów przepływowych oraz erozyjne oddziaływanie aerozolu morskiego powodują wzrost strat tarcia i zmianę kątów natarcia i spływu łopatek oraz aerodynamikę przepływu. W skutek tego wystąpi zmniejszenie sprawności sprężarki η_s i ilości powietrza dostarczanego do silnika. Wpływa to na przebieg procesu roboczego, spadek ilości gazów dochodzących do turbiny, a więc i na spadek prędkości obrotowej turbosprężarki. Spadek ilości powietrza dostarczanego do silnika może spowodować pogorszenie przepłukania cylindra, wzrost obciążeń cieplnych elementów komory spalania oraz wzrost temperatury gazów wylotowych [12]. Jak z powyższego wynika, konsekwencją zanieczyszczenia sprężarki jest:

$$Z_s \Rightarrow (\eta_s \downarrow; \pi_s \downarrow; p_k \downarrow; p_d \downarrow; \dot{m}_s \downarrow) \Rightarrow (g_c \uparrow; T_g \uparrow; \lambda \downarrow; p_{max} \downarrow)$$

4. OCENA STANU TECHNICZNEGO TURBINY UKŁADU ŁADUJĄCEGO

We współczesnych układach ładujących sprężarka napędzana jest najczęściej osiową turbiną (rzadziej stosuje się turbiny zasilane promieniowo). Podczas pracy turbina ulega zanieczyszczeniu. Mogą również wystąpić uszkodzenia mechaniczne łopatek spowodowane przez różne ciała stałe np. fragmenty uszkodzonych elementów silnika i twardego koksu, których nie zatrzymała siatka ochronna turbiny. cylindrowych.

Producenci silników okrętowych przewidując możliwość postępującego zanieczyszczenia turbiny wyposażają silnik w instalację do mycia turbiny wodą, wodą z dodatkiem środków powierzchniowo

czynnych [1] lub jej czyszczenia na sucho (granulatami). Czynności te powinny być wykonywane okresowo, zgodnie z zaleceniami producenta, co pozwala przywracać turbinie dobry stan techniczny (utrzymywać turbinę w czystości). Osady na powierzchniach przepływowych powodują zmianę ich profilu, zmniejszenie przekroju czynnego, wzrost oporów przepływu gazów, co wywołuje następujące skutki w pracy układu ładującego:

$$Z_T \Rightarrow (\pi_T \uparrow; \eta_T \downarrow; p_{wp} \uparrow; \dot{m}_s \downarrow) \Rightarrow (g_c \uparrow; T_g \uparrow; \lambda \downarrow)$$

5. MOŻLIWOŚCI I ZNACZENIE POMIARU WYDAJNOŚCI SPRĘŻARKI W DIAGNOSTYCE UKŁADU ŁADUJĄCEGO SILNIKA OKRĘTOWEGO

5.1. Natężenie przepływu powietrza przez sprężarkę

Jak wynika z wcześniejszych rozważań, a także wielu innych analiz [8, 9, 13], natężenie przepływu czynnika przez układ ładujący powinno odgrywać w jego diagnostyce rolę podstawową. Wynika to między innymi z faktu, że w bilansie tego układu jednym z najważniejszych warunków jest bilans ciągłości przepływu masy, tj.:

$$\dot{m}_s = \dot{m}_c \quad \text{i} \quad \beta \cdot \dot{m}_c = \dot{m}_T \quad (5.1)$$

gdzie:

\dot{m}_s - masowe natężenie przepływu powietrza przez sprężarkę [kg/s],

\dot{m}_c - masowe natężenie przepływu powietrza przez cylindry [kg/s],

\dot{m}_T - masowe natężenie przepływu gazów przez turbinę [kg/s],

β - współczynnik uwzględniający wzrost masy gazów w stosunku masy powietrza, na skutek dostarczonej do cylindrów dawki paliwa.

5.2. Sposoby wyznaczania natężenia przepływu powietrza przez sprężarkę

W warunkach laboratoryjnych czy hamownianych najczęściej wykorzystywanym sposobem wyznaczania masowego natężenia przepływu powietrza \dot{m}_s przez sprężarkę jest pomiar za pomocą tzw. leminiskaty. Bezpośrednio mierzoną wielkością jest spadek ciśnienia na leminiskacie. Następnie w oparciu o właściwe zależności matematyczne wylicza się \dot{m}_s . Jest to wprawdzie metoda bardzo dokładna, ale w praktyce eksploatacyjnej nie wykorzystywana.

Inną wskazywaną metodą jest pomiar spadku ciśnienia na konfuzorze dolotowym sprężarki [13] i wykorzystanie zależności:

$$\dot{m}_s = k \cdot \sqrt{\Delta p_{konf}} \quad (5.2)$$

gdzie:

\dot{m}_s - masowe natężenie przepływu powietrza [kg/s],
 k - stała, charakterystyczna dla danego układu doładowania [-],

Δp_{konf} - spadek ciśnienia na konfuzorze sprężarki [mmH₂O].

Z uwagi na prostotę wskazanej metody powinna być ona stosowana powszechnie. Autorowi nie jest jednak znany przypadek praktycznego wykorzystywania tej metody i dlatego postanowiono sprawdzić, czy jest ona skuteczna i dostatecznie dokładna. W tym celu przeprowadzono badania laboratoryjne na silniku okrętowym, w celu wyznaczenia dla danego układu ładującego stałej „k” oraz sprawdzając czy współczynnik ten nie ulega zmianie podczas zmiany stanów eksploatacyjnych silnika.

5.3. Badania laboratoryjne

Badania przeprowadzono na okrętowym czterosuwowym silniku SULZER 3AL25/30, doładowanym turbosprężarką VTR160N. Ich celem było sprawdzenie skuteczności metody wyznaczania masowego natężenia przepływu powietrza przez sprężarkę w oparciu o pomiar spadku ciśnienia na jej konfuzorze (Δp_{konf}). Korzystając z możliwości wyznaczania \dot{m}_s przy pomocy leminiskaty, oraz mierząc Δp_{konf} , wyznaczano współczynnik „k” występujący w zależności 5.2. Pomiaru wykonywano wielokrotnie – dla różnych obciążeń silnika i temperatur powietrza na dolocie do silnika. Badania przeprowadzono w zakresie obciążeń silnika od 200 do 280 kW, oraz dla temperatur powietrza ładującego 45, 50, 55, 60 i 65 °C. Dla każdego ze stanów wyznaczano masowe natężenie przepływu powietrza przez sprężarkę w oparciu o leminiskatę, oraz mierzono spadek ciśnienia na konfuzorze sprężarki. Pozwoliło to każdorazowo wyliczyć wartość współczynnika k . Uzyskane wyniki zestawiono w tabeli 5.1. Niezależnie od obciążenia silnika oraz temperatury powietrza ładującego, współczynnik k , każdorazowo wyliczany w oparciu o wyznaczone \dot{m}_s i pomierzone Δp_{konf} , ma wartość stałą w przybliżeniu równą 0,18. Średnia wartość k dla całego cyklu pomiarowego tj, z 75 pomiarów (25 stanów, na każdym z nich 3 pomiary równoległe) wynosi 0,179.

6. WNIOSKI

Wśród wielu wielkości mających istotne znaczenie w diagnostyce układu ładującego, bardzo ważnym parametrem jest natężenie przepływu powietrza przez sprężarkę.

W diagnostyce sprężarki jest to podstawowy parametr wyjściowy, a dla pozostałych elementów układu wejściowy.

Wyznaczanie tej wielkości w praktyce eksploatacyjnej powinno być powszechne, a metoda oparta o spadek ciśnienia powietrza na konfuzorze sprężarki jest na tyle prosta, a jednocześnie dostatecznie dokładna, aby poważnie ją rozważyć w zastosowaniu do eksploatacji silników okrętowych.

Wyznaczenie stałej k charakterystycznej dla danego układu ładującego powinien wykonać producent silnika, po zakończeniu procedur doboru turbosprężarki i wpisać wartość k do dokumentacji turbosprężarki.

Tabela 5.1. Wyniki pomiarów

t_k [°C]	N_e [kW]	Δp_{konf} [mmH ₂ O]	\dot{m}_s [kg/h]	k [-]
45	200	9	0,5452	0,1868
	220	10	0,5853	
	240	10	0,6169	
	260	12	0,6519	
	280	14	0,6885	
50	200	9	0,5445	0,1804
	220	10	0,5776	
	240	12	0,6152	
	260	12	0,6404	
	280	15	0,6809	
55	200	10	0,5446	0,1752
	220	11	0,5534	
	240	12	0,6179	
	260	13	0,6092	
	280	15	0,6769	
60	200	9	0,5404	0,1761
	220	11	0,5718	
	240	12	0,6092	
	260	13	0,6408	
	280	15	0,6769	
65	200	8	0,5376	0,1805
	220	10	0,5676	
	240	11	0,6052	
	260	13	0,6399	
	280	15	0,6708	
Wartość średnia k :				0,179

Literatura.

- [1]. Charchalis A.: *Diagnozowanie okrętowych silników turbinowych*. AMW, Gdynia 1991.
- [2]. Charchalis A.: *Diagnozowanie zanieczyszczeń kanału przepływowego turbinowych silników spalinowych na podstawie wielkości opisujących ruchy*. Zagadnienia Eksploatacji Maszyn, PAN nr1-2, 1993.
- [3]. Charchalis A.: *Komputerowy system pomiarowy dla oceny charakterystyk napędowych oraz stanu technicznego siłowni kombinowanych*. Wydawnictwo politechniki Szczecińskiej, Szczecin 1995.
- [4]. Charchalis A.: *System diagnozowania okrętowych układów napędowych z turbino-*

wymi silnikami spalinowymi. Problemy eksploatacji, 4/97 (27).

- [5]. Charchalis A., Korczewski Z.: *Metody diagnozowania okrętowych turbinowych silników spalinowych*. Przegląd mechaniczny. Z. 3-4, 1997.
- [6]. Cholewa W., Drobniak S., Elsner W., Kiciński J.: *Zintegrowany system nadzoru diagnostycznego turbosprężarki*. ZN WSI, Opole, 1996.
- [7]. Dąbrowski Z.: *Wykorzystanie efektu rezonansu nieliniowego jako symptomu w diagnozowaniu silników turbinowych*. III Sympozjum Naukowo-Techniczne „Silniki spalinowe w zastosowaniach wojskowych”, Jurata, 1997.
- [8]. Włodarski J. K.: *Okrętowe silniki spalinowe. Podstawy teoretyczne*. Wydawnictwo WSM, Gdynia 1996.
- [9]. Włodarski J. K.: *Stany eksploatacyjne okrętowych silników spalinowych*. Fundacja Rozwoju WSM, Gdynia 2001.
- [10]. Witkowski K., Piotrowski I.: *Eksploatacja okrętowych silników spalinowych*. Fundacja Rozwoju WSM, Gdynia 2001.
- [11]. Witkowski K.: *Wpływ zanieczyszczenia filtra powietrza na parametry procesu roboczego*. Budownictwo Okrętowe 5/1989.
- [12]. Witkowski K.: *Wpływ niesprawności sprężarki i chłodnicy powietrza na parametry procesu roboczego silnika spalinowego*. Budownictwo Okrętowe 9/1989.
- [13]. Woznickij I. W., inni: *Raboczije procesy sudowych dizjelej*. Transport, Moskwa 1979.
- [14]. Żółtowski B.: *Identyfikacja diagnostyczna obiektów technicznych*. Zagadnienia Eksploatacji maszyn. Z.1(105) PAN, 1996.
- [15]. Żółtowski B., Ćwik. Z.: *Methoden der technischen Identifikation der Objekte*. IV Kolloquium Technische Diagnostik. Technische Universität Dresden, 1966 (s.98-116).
- [16]. *Turbocharger compressors – the phenomenon of surfing*. Turbo Magazine, 1995. ABB Turbo Systems Ltd., Switzerland.



Kazimierz WITKOWSKI

ur. w 1955 r. Doktor nauk technicznych, adiunkt w Katedrze Siłowni Okrętowych Akademii Morskiej w Gdyni. Jego zainteresowania obejmują zagadnienia z zakresu eksploatacji i diagnostyki okrętowych silników spalinowych.