

WYKORZYSTANIE PARAMETRÓW DRGAŃ WZDŁUŻNYCH TULEI CYLINDROWYCH W DIAGNOSTYCE OKRĘTOWYCH TŁOKOWYCH SILNIKÓW SPALINOWYCH

Kazimierz WITKOWSKI

Katedra Siłowni Okrętowych
Akademii Morskiej w Gdyni ul. Morska 83, email: wika@am.pl

Streszczenie

W artykule przedstawiono wyniki badań wstępnych dotyczących możliwości wykorzystania w diagnostyce okrętowych silników tłokowych drgań wzdłużnych tulei cylindrowej. Wyniki badań wykazały, że ten sygnał wibroakustyczny może być przydatny do wykrywania stanów przedzatarciowych układu tłok-cylinder.

Słowa kluczowe: diagnostyka, okrętowe tłokowe silniki spalinowe, układ tłokowo-cylindrowy, procesy tribologiczne, wibroakustyka, drgania wzdłużne.

THE USE OF THE PARAMETERS OF CYLINDRE LINER LONGITUDINAL VIBRATIONS IN MARINE DIESEL ENGINES DIAGNOSTICS

Summary

In the paper the preliminary research results at the possibilities at using cylinder liner longitudinal vibrations in marine diesel engine diagnostics has been presented. The research results have proven that these vibroacoustics signal can be useful to defect the prefriictional states of piston-cylinder liner system.

Keywords: diagnostic, marine diesel engine, piston-cylinder liner system, tribological processes, vibroacoustics, longitudinal vibrations.

1. WSTĘP

W praktyce budowy i eksploatacji okrętowych silników wysokoprężnych bardzo istotnym jest problem zapewnienia niezawodności ich pracy oraz bezdemontażowej kontroli i prognozowania stanu technicznego. Ma to szczególnie ważne znaczenie w odniesieniu do silników napędu głównego statku, gdyż przestoje z powodu niesprawności, a szczególnie na skutek awarii przynoszą duże straty ekonomiczne. Posiadanie efektywnych metod i środków diagnostycznych pozwala na zmianę strategii użytkowania, z dotychczasowej według przepracowanej ilości godzin na strategię według faktycznego stanu technicznego.

W silniku spalinowym ważnym węzłem decydującym o jego osiągnięciach ekonomicznych, stanie technicznym i niezawodności jest układ tłokowo-cylindrowy, który jeśli nie tylko z powodu częstości występowania uszkodzeń, to z uwagi na koszty i czas ich usuwania powinien być skutecznie diagnozowany.

2. PROCESY TRIBOLOGICZNE W UKŁADZIE TŁOKOWO-CYLINDROWYM

Układ tłokowo-cylindrowy wysokoprężnego silnika okrętowego pracuje w bardzo trudnych

warunkach. Spowodowane jest to znacznymi obciążeniami cieplnymi i mechanicznymi oraz kinematyką ruchu posuwisto-zwrotnego tłoka. Te warunki mają łącznie istotny wpływ na proces smarowania układu i w rezultacie na intensywność zużycia skojarzeń ciernych.

W nowoczesnych silnikach ciśnienie czynnika roboczego osiąga wartość maksymalną ponad 15 Mpa, przy czym obciążenia mechaniczne stąd się wywodzące mają charakter dynamiczny o dużej szybkości narastania ciśnienia dp/da .

Na obciążenia cieplne układu tłok-cylinder wpływ mają zarówno wartości absolutne temperatur, jak i ich gradienty. Stan cieplny tego układu wyznaczają:

- procesy cieplne zachodzące w czasie procesu roboczego w cylindrze,
- procesy tribologiczne (tarcie) pomiędzy elementami układu,
- chłodzenie tłoka i tulei cylindrowej.

Stan obciążenia cieplnego układu decyduje o przebiegu procesów tribologicznych – tarcia i zużycia tłoka (pierścieni tłokowych) jak i tulei cylindrowej. Dla omawianego układu szczególnie istotne jest poznanie zjawisk występujących przy zużyciu normalnym i ustalenie stanów granicznych, które wystąpią przy przejściu od zużycia normalnego do zużycia awaryjnego (zacieranie). Pod pojęciem zużycia normalnego wskutek tarcia

rozumie się na ogół proces, w którym dominującą rolę odgrywają zjawiska utleniania ciernego i ścierania, natomiast szepiania adhezyjne charakteryzują się znikomą intensywnością. Dla każdego węzła ciernego istnieje obszar wymuszeń mechanicznych, oddziaływania fizyko-chemicznego otoczenia i wpływu temperatury, gdzie intensywność zużycia i siły tarcia są najmniejsze. Procesy tribologiczne zachodzą głównie w obrębie delikatnych warstewek struktur wtórnych [4], o czym świadczy brak na powierzchni śladów uszkodzeń. Powierzchnia ta wykazuje bardzo wysoką chropowatość, także podczas tarcia technicznie suchego.

Warstwy wierzchnie, w których występują minimalne zużycie i siły tarcia, są stale odtwarzane. Zachowuje się w przybliżeniu stały stosunek pola powierzchni pokrytej błonkami produktów reakcji fizyko-chemicznych spowodowanych tarciami, do pola powierzchni metalicznej. Głębokość uszkodzeń warstwy wierzchniej osiąga wartość minimalną. Zużycie normalne jest typowe dla prawidłowej pracy większości elementów maszyn.

Rozpoczęcie zacierania wiąże się z osiągnięciem przez układ tribologiczny krytycznych wartości nacisków jednostkowych (przy stałej prędkości tarcia) lub krytycznej prędkości tarcia (przy stałych naciskach). Mimo licznych badań i prac teoretycznych nie opisano jednoznacznie procesu zacierania w układzie tłok-cylinder. Najczęściej kojarzy się ono z tworzeniem mostków szepień między współpracującymi elementami i przechodzeniem od tarcia zewnętrznego do tarcia wewnętrznego w warstwie wierzchniej. Przyjmuje się przy tym, że mechanizm powstawania tych mostków może być różny, na przykład adhezyjny, dyfuzyjny lub rekryystalizacyjny [8, 9]. Istnieją także nieliczne koncepcje przedstawiające zacieranie jako efekt współdziałania mechanicznego elementów trących, wyrażonego w postaci plastycznego wyciskania i mikroskrawania materiału [8]. Podaje się szereg czynników charakteryzujących bądź stronę energetyczną procesu tarcia i zużycia (np.: nacisk normalny, prędkość ślizgania, pracę tarcia), bądź niektóre warunki tarcia (np.: krytyczna temperatura w pobliżu styku normalnego) [7].

3. UKŁAD TŁOKOWO-CYLINDROWY JAKO ZESPÓŁ DIAGNOZOWEANYCH WĘZŁÓW TRIBOLOGICZNYCH

W układzie tłokowo-cylindrowym można wyróżnić następujące węzły tribologiczne [9]:

- tłok-tuleja cylindrowa,
- tłok-pierścień tłokowy,
- tuleja cylindrowa-pierścień tłokowy,
- blok cylindrowy-kołnierz tulei cylindrowej,
- głowica cylindrowa-kołnierz tulei cylindrowej,
- tłok-swożeń tłokowy.

Układ tribologiczny tłok-tuleja cylindrowa jest jednym z podstawowych układów, którego poprawna praca stanowi o niezawodności silnika. W praktyce eksploatacyjnej diagnostyka tego układu opiera się głównie o rutynowo mierzone parametry. Dla silników średnio i szybkoobrotowych są to zazwyczaj temperatura i ciśnienie oleju smarowego oraz ciśnienie sprężania jako miernik szczelności komory spalania. Parametry te nie dają jednak możliwości jednoznacznej oceny warunków pracy tego układu. W odniesieniu do wolnoobrotowych silników okrętowych zazwyczaj nie dokonuje się bieżącej oceny warunków pracy układu tłok-cylinder. Okresowy pomiar ciśnienia sprężania daje tylko informacje o stanie szczelności komory spalania, a bardziej szczegółowych informacji dostarcza wykonywany co pewien czas przegląd układu przeprowadzany z wykorzystaniem okien wymiany ładunku.

Pomimo ogólnie niezadowolającego stanu diagnostyki układu tłok-cylinder silników okrętowych, istnieje szereg przykładów wdrażania na statki różnych rozwiązań technicznych, zmierzających do poprawy tego stanu.

Jako najbardziej reprezentatywne i w okrętownictwie znane należy wymienić takie systemy jak:

1. System CC-10 firmy BiW [6], który zbudowano do kontroli stanu technicznego silników napędu głównego. System kontroluje pracę różnych węzłów funkcjonalnych silnika, w tym układu tłokowo-cylindrowego.
2. System SEDS firmy Sulzer [1] powstał w celu kontroli pracy i diagnostyki silników okrętowych napędu głównego. System realizuje pomiary kilkunastu parametrów. Są wśród nich wskaźniki stanu pierścieni tłokowych, temperatury gładzi tulei cylindrowych i zużycia tulei.
3. System MAPEX [2,3] (Monitoring and Maintenance Performance Enhancer with eXport knowledge), w skład którego wchodzi następujące podsystemy:

MAPEX – PR (Piston-runing Reliability) służy do ciągłego monitorowania stanu tulei cylindrowych długoskokowych 2-suwowych silników okrętowych firmy SAULZER. Alarmuje on w przypadku przekroczenia dopuszczalnych temperatur gładzi tulei cylindrowych w wyznaczonych punktach, analizuje zmiany temperatury wody chłodzącej tuleje i temperaturę powietrza doładowującego. Ważnymi danymi ogólnymi niezbędnymi do

prowadzonej kontroli stanu technicznego są informacje o obciążeniu silnika.

SIPWA – TP (Sulzer Integrated Piston-ring Wear-detecting Arrangement with Trend Processing) służy do diagnozowania pierścieni tłokowych. Diagnostyka opiera się o sygnały otrzymywane z magnetycznego czujnika umieszczonego w tulei cylindrowej nieco powyżej okien dolotowych. System umożliwia rozpoznawanie różnych stanów pierścieni tłokowych (pęknięte, zapieczone, zużyte). System jest wykorzystywany do optymalizacji zużycia oleju cylindrowego, co z kolei przyczynia się do obniżenia kosztów eksploatacji, ale także obniżenia emisji toksycznych składników spalin.

W skład systemu wchodzi również MAPEX – CR (Combustion Reliability), MAPEX – TV (Torsional Vibration dedector) i MAPEX – AV (Axial Vibration detektor) których zadania nie mają bezpośredniego związku z omawianym układem tłokowo-cylindrowym. Ich funkcje szczegółowo opisano w [11].

4. CDS [10] (Complex Diagnostic System) służy do diagnostyki silników okrętowych i został podzielony na trzy poziomy robocze [11], z których trzeci PRA (Piston Ring Analysis) odpowiada za diagnostykę pracy pierścieni tłokowych. Opiera się ona o sygnały z czujników umieszczonych w dolnej części tulei cylindrowych mierzących zmianę oporności magnetycznej i czujnika położenia wału korbowego. Układ ten wykrywa między innymi takie uszkodzenia jak: zapieczenie pierścieni w rowkach, wypalenie pierścieni i ich popękanie. Ochronę przed zacieraniem tulei cylindrowych stanowi SAS (Scuffing Alarm System).

Ciekawym podejściem do skutecznego diagnozowania omawianego układu jest wykorzystanie pomiaru sygnałów drganiowych oraz rezystancji filmu olejowego pomiędzy pierścieniami tłokowymi a gładzią tulei cylindrowej.

Drgania poprzeczne tulei cylindrowej mogą być wywołane zmiennymi siłami gazowymi, uderzeniami tłoka o gładź tulei, bądź też spowodowanych siłami tarcia. Istnienie luzu między tłokiem i cylindrem powoduje tzw. przekładanie tłoka z burty na burtę. Przyczyną tego zjawiska są zmiany kierunku działania wypadkowej siły normalnej (bocznej), której wartość zależy od wartości sił gazowych i sił bezwładności pochodzących od mas biorących udział w ruchu posuwisto-zwrotnym. Najsilniejsze uderzenia występują w pobliżu GMP, kiedy to siła normalna zmienia kierunek działania. Zjawisku temu towarzyszy powstawanie impulsu uderzeniowego, będącego źródłem intensywnych drgań. Im większy luz, tym większe są impulsy uderzeniowe. Powyższe stanowić może podstawę do budowania systemu

wibrodiagnostycznego, w którym analiza drgań poprzecznych tulei cylindrowej pozwoli na określanie stopnia zużycia układu (luzu pomiędzy tłokiem i cylindrem). Na poziom rejestrowanych drgań ma jednak wpływ szereg innych czynników spoza układu tłokowo-cylindrowego. Dlatego też badano również przydatność diagnostyczną metody quasi-dynamicznej. Polega ona na wymuszaniu ruchu posuwisto-zwrotnego tłoka cyklicznie zmiennym pod- i nadciśnieniem powietrza. Parametry sygnału wibroakustycznego są wówczas zdeterminowane jedynie procesami przebiegającymi w danym, badanym cylindrze i pozbawione wpływu składowych wynikających z realizacji procesu spalania, wymiany ładunku, pracy innych zespołów silnika itp. Metoda ta jednak nie może być stosowana w bieżącej eksploatacji silnika do ciągłej diagnostyki układu. Na skutek sił tarcia pierścieni tłokowych o gładź cylindra powstają drgania wzdluzne tulei. Parametry tego sygnału mogą być wykorzystane w diagnostyce. Szczególnie przydatne byłyby one do wczesnego wykrywania stanów przedawaryjnych (przedzatarciowych) układu tłok-cylinder.

3.1. Drgania wzdluzne tulei cylindrowej w diagnostyce układu tłok-tuleja

Na tuleję cylindrową działa między innymi zmienna w czasie siła osiowa N , ściskająca i rozciągająca ją, równomiernie rozmieszczona wzdluz warstwy środkowej o promieniu R . Wywoła ona w dowolnym przekroju siłę równą $N/(2 \cdot R)$, która spowoduje powstanie drgań wzdluznych tulei.

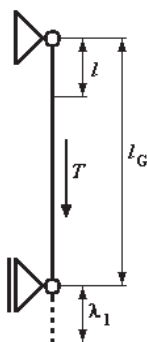
Jako uproszczony model układu, w którym generowane są drgania wzdluzne można przyjąć belkę zamocowaną w podporach jak na rysunku 1. Belka obciążona jest siłą styczną T . Siła ta jest zmienna z okresem wynikającym z prędkości obrotowej silnika. Pod wpływem siły T pręt zaczyna drgać. W okresie występujących częstotliwości mieszczą się również częstotliwości drgań własnych pręta. Równanie ogólne, które opisuje to zjawisko ma postać [12]:

$$\frac{d^2 X}{dl^2} + \frac{\omega^2}{a^2} \cdot X = 0 \quad (1)$$

gdzie:

$$a^2 = \frac{E}{\rho}$$

ω - prędkość kątowna drgań,
 X - funkcja zmiennej l ,
 E - moduł sprężystości Younga,
 ρ - masa właściwa.



Rys.1. Model układu pierścien-tuleja cylindrowa
 λ_1 – wydłużenie tulei cylindrowej w wyniku działania siły tarcia

Proces generowania drgań wzdluznych tulei cylindrowej wynika z warunków pracy układu pierścien-tuleja cylindrowa i jest zdeterminowany przez rodzaje tarcia i zużycia oraz szybkość ślizgania się pierścienia po tulei. Warstwa wierzchnia elementów pary pierścien-tuleja po obróbce mechanicznej posiada chropowatość jak na rysunku 2a.

W trakcie docierania dochodzi do ścierania wierzchołków nierówności i wygładzania powierzchni styku (rys.2b). Występuje metaliczny styk wierzchołków chropowatości na małej powierzchni (duże naciski jednostkowe). Następuje wyrwanie ściernie przez ziarna umocowane i wykruszone, oraz rozrywanie szczepień adhezyjnych. Po dotarciu dominującą rolę odgrywają zjawiska utleniania ciernego, a szczepianie adhezyjne jest znikome. Następuje poprawa warunków smarowania oraz ilościowe i jakościowe zmniejszenie zużycia. Na podstawie przebiegu procesu docierania i pracy po dotarciu, można określić prawdopodobny obraz drgań wzdluznych tulei cylindrowej:

- dla etapu docierania – generacja drgań o dużej częstotliwości i nie zbyt dużej amplitudzie,
- dla obszaru pracy po dotarciu – widmo drgań w postaci szerokopasmowego szumu losowego.

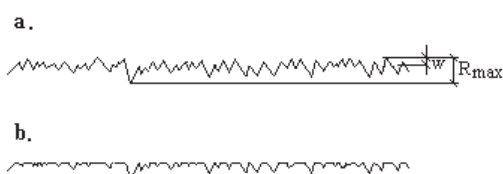
Inny będzie natomiast obraz drgań dla poszczególnych etapów zacierania:

- etap pierwszy – w którym następuje ścieranie i stapienie wierzchołków nierówności wchodzących w styk metaliczny (rys.3), spowodowane miejscowym zerwaniem filmu olejowego – harmoniczne o bardzo wysokiej częstotliwości i niezbyt dużej amplitudzie (hałas na granicy słyszalności, ultradźwięki),
- etap drugi – w którym niedostateczne smarowanie uniemożliwia przywrócenie filmu olejowego, co powoduje odrywanie, stapienie i zgrzewanie całych mikronierówności – harmoniczne o znacznie mniejszej częstotliwości ale większej amplitudzie,
- etap trzeci – w którym wydzielające się ciepło powoduje kasowanie luzów między tłokiem i tuleją i w efekcie następuje zakleszczanie tłoka w tulei –

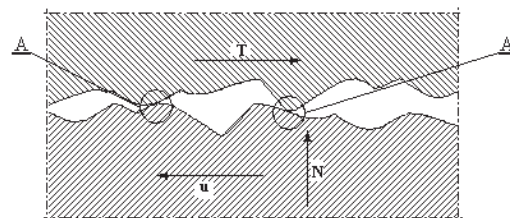
harmoniczne o niskiej częstotliwości ale bardzo wysokiej amplitudzie.

Zgodnie z wynikami badań [5], prawidłowo pracujący węzeł cierny jest źródłem drgań o częstotliwości rzędu 2÷15 kHz, natomiast pojawianiu się oznak szczepiania adhezyjnego towarzyszy spadek częstotliwości drgań do około 200÷500 Hz.

Z powyższych rozważań wynika, że siły tarcia pierścieni o tuleję cylindrową wzbudzają w niej drgania wzdluzne, których amplituda i częstotliwość zależą od wielkości siły tarcia, a więc charakteryzują jakość współpracy tłoka z tuleją. Wydaje się więc, że obok omawianych wyżej metod diagnostycznych układu tłokowo-cylindrowego, szybką i pewną informację o współpracy pierścienia z gładzią tulei (w szczególności do wykrywania stanów przedzatarciowych) może dać pomiar parametrów drgań wzdluznych tulei.



Rys.2. Zmiana chropowatości powierzchni przy docieraniu (na podstawie [7])
 a - chropowatość wyjściowa, b – chropowatość po prawidłowym dotarciu, R_{max} – maksymalna wysokość chropowatości.



Rys.3. Charakter styku powierzchni pierścienia tłokowego i gładzi tulei cylindrowej przy zacieraniu
 u – prędkość ślizgania, T – siła tarcia,
 N – nacisk pierścienia na gładź tulei,
 A – styk metaliczny powierzchni pierścienia i gładzi tulei.

4. WSTĘPNE STANOWISKOWE BADANIA WŁASNE

4.1. Opis stanowiska badawczego

Na stanowisku badawczym, będącym maszyną tribologiczną symulującą współpracę pierścieni tłokowych z tuleją cylindrową przeprowadzono badania rozpoznawcze odnośnie przydatności parametrów drgań wzdluznych tulei cylindrowej do rozpoznawania warunków tribologicznej współpracy tych elementów.

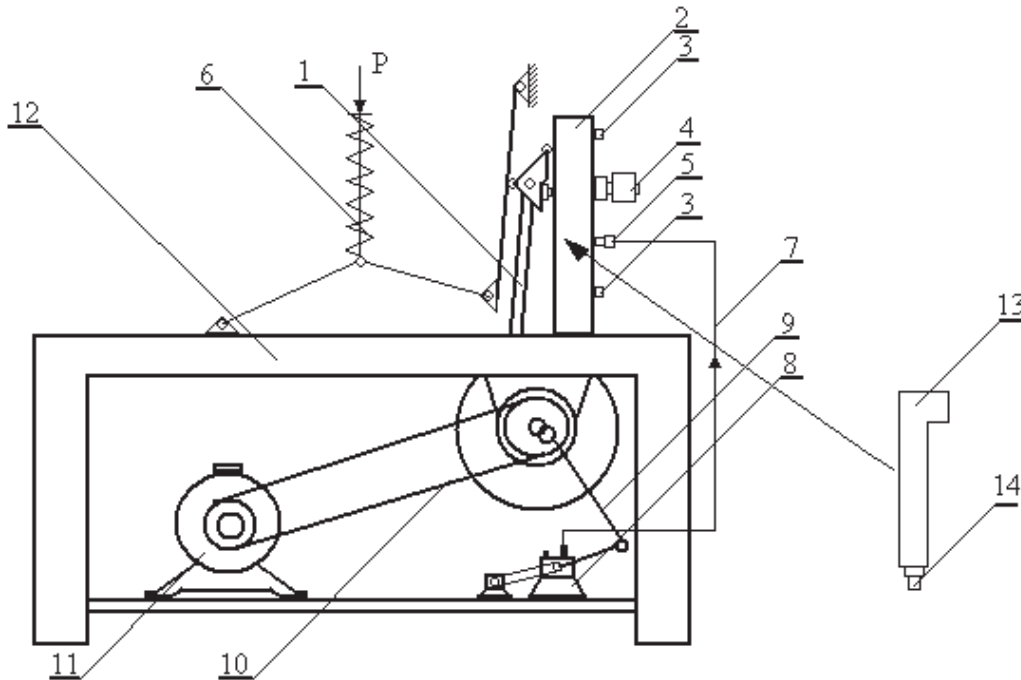
Odwzorowanie warunków pracy uzyskano poprzez:

- dobór materiału próbki (pierścien tłokowy),

- dobór materiału przeciwpróbki (tuleja cylindrowa),
- dobór oleju cylindrowego,
- dobór parametrów pracy układu, w tym siły docisku pierścienia do gładzi tulei cylindrowej,

średniej prędkości ruchu pierścienia względem tulei oraz temperatury pracy.

Schemat stanowiska pokazano na rysunku 4.



Rys. 4. Schemat maszyny tribologicznej "Trybometr"

- 1 - układ korbowy z uchwytem wycinka pierścienia tłokowego, 2 - uchwyt wycinka tulei cylindrowej, 3 - termopary, 4 - grzałka, 5 - króciec smarny, 6 - mechanizm dociskowy, 7 - przewód olejowy, 8 - lubrykator, 9 - napęd lubrykatora, 10 - przekładnia pasowa napędu, 11 - silnik prądu stałego, 12 - rama nośna., 13 - wycinek tulei cylindrowej, 14 - czujnik przyspieszeń.

Stanowisko badawcze wyposażone jest w układ korbowo – tłokowy napędzany przez silnik elektryczny prądu stałego 11 poprzez przekładnię pasową 10. Fragment pierścienia tłokowego (wycinek) umieszczono w specjalnym uchwycie pełniącym rolę tłoka, który wykonuje ruch posuwisto-zwrotny po wycinku tulei cylindrowej (osadzona w uchwycie 2). Uchwyt z pierścieniem, za pomocą mechanizmu dociskowego 6 dopychany jest do gładzi tulei cylindrowej. Uchwyt wykonano w postaci specjalnej głowicy oklejonej tensometrami co pozwala na pomiar i rejestrację siły docisku i siły tarcia. Olej na powierzchnię tulei cylindrowej doprowadzany jest przez przewód olejowy 7 i króciec smarny 5 z lubrykatora 8. Grzałka 4 wykorzystywana jest do symulowania temperatury pracy a poziom temperatur kontrolowany jest termoparami 3. Na dolnym, wolnym końcu tulei cylindrowej umieszczono czujnik przyspieszeń 4332 firmy Brüel i Kjaer do pomiaru drgań wzdłużnych.

4.2. Plan badań wstępnych, przebieg badań

Badania wstępne przeprowadzono według następującego schematu;

- przygotowanie stanowiska badawczego, w tym fragmentu pierścienia i tulei cylindrowej,

cechowanie termopar, tensometrycznego uchwytu pierścienia i lubrykatora,

- wyznaczenie częstotliwości drgań własnych tulei cylindrowej,
- przeprowadzenie badań w warunkach poprawnego smarowania gładzi tulei cylindrowej,
- przeprowadzenie badań w warunkach złego smarowania gładzi tulei cylindrowej – zacieranie układu.

4.2.1. Przygotowanie stanowiska badawczego

Do badań przygotowano fragment pierścienia tłokowego i tulei cylindrowej. Wykonano je z elementów rzeczywistych stosowanych w silnikach okrętowych., wycinając fragmenty i nadając im ostateczny kształt użytkowy. Pozwoliło to na uzyskanie skojarzenia materiałowego typowego dla okrętowego silnika tłokowego. Fragment pierścienia ma następujące podstawowe właściwości:

- twardość HB 1900÷2300 N/mm²,
- moduł Younga $E = 11 \cdot 10^4$ N/mm²,
- wytrzymałość na zginanie $R_g = 550$ N/mm²,
- powierzchnia robocza $F = 7,5 \cdot 10^{-5}$ m²,
- struktura: płatki grafitu, cienka warstwa perlitu i sorbitu, siatkowa eutektyka fosforowa.

Fragment tulei cylindrowej ma następujące podstawowe właściwości:

- twardość HB 235 N/mm²,
- wytrzymałość na zginanie $R_g = 450 \text{ N/mm}^2$,
- wytrzymałość na rozciąganie $R_r = 588 \text{ N/mm}^2$,
- powierzchnia robocza $F = 4,72 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2$,
- struktura perlityczno-ferrytyczna, grafit drobnoziarnisty.

Przygotowanie stanowiska obejmowało również cechowanie wszystkich układów pomiarowych.

4.2.2. Wyznaczenie częstotliwości drgań własnych tulei cylindrowej

Częstotliwość drgań własnych tulei cylindrowej wyznaczono dwoma metodami:

- poprzez pomiar pobudzonego do drgań elementu nieobciążonego wymuszeniami,
- na drodze obliczeniowej.

W pierwszym przypadku drgania zmierzono pobudzając tuleję impulsem, który w momencie pomiaru zredukowany jest do zera. Pomiar wykonano dla tulei swobodnie zwisającej oraz zamocowanej w uchwycie stanowiska badawczego otrzymując następujące rezultaty:

$\omega_1 = 4000 \text{ s}^{-1}$ – tuleja swobodna,

$\omega_2 = 5000 \text{ s}^{-1}$ – tuleja zamocowana.

Częstotliwość drgań własnych wzdluznych wyznaczono także obliczeniowo, korzystając z zależności [12]:

$$\omega_n = \frac{(2n-1) \cdot \pi}{2 \cdot l} \cdot \sqrt{\frac{E}{\rho}}$$

gdzie:

l – długość tulei cylindrowej,

E – moduł sprężystości Younga,

ρ – masa właściwa.

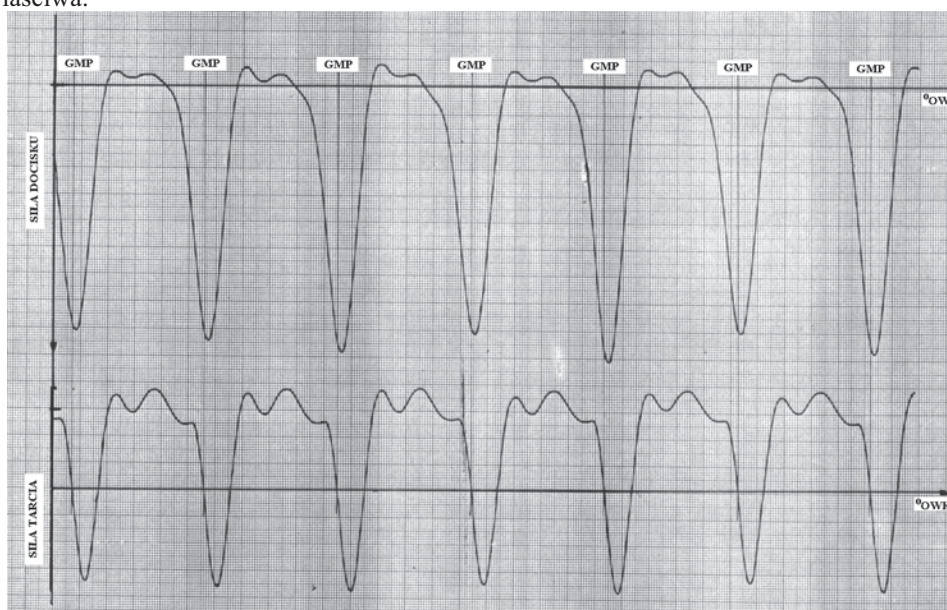
Otrzymano następujące wartości:

$$\omega_1 = 4598 \text{ s}^{-1} \quad \omega_2 = 12577 \text{ s}^{-1} \quad \omega_3 = 20962 \text{ s}^{-1} \\ \omega_4 = 29347 \text{ s}^{-1}$$

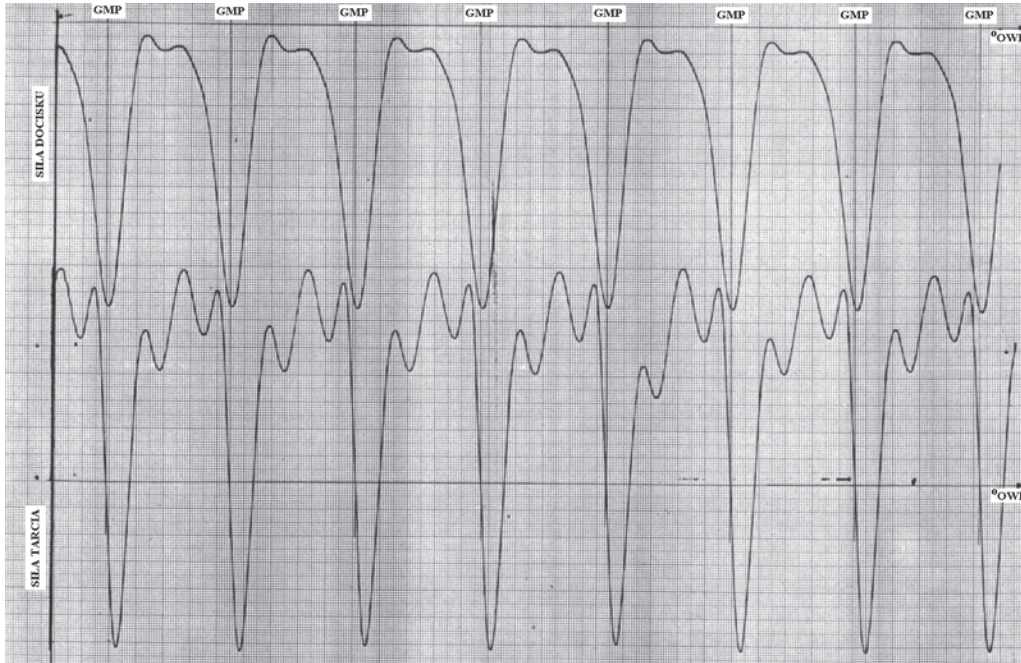
4.2.3. Przebieg badań i wyniki

Badania przeprowadzono w ustalonych, tych samych warunkach (prędkość obrotowa i obciążenie), zarówno podczas normalnej współpracy pierścienia z tuleją cylindrową (właściwe smarowanie), jak i podczas zacierania układu. Podstawowe parametry rejestrowane to: drgania wzdluzne tulei cylindrowej, siła docisku pierścienia do tulei i siła tarcia. Na tym, wstępnym etapie badań obserwowano sygnał drganiowy na oscyloskopie oraz wykonano wstępną analizę widmową sygnałów drganiowych, traktowaną jako analiza porównawcza, bez określania wartości szczegółowych.

Obserwacja oscyloskopowa daje wiele interesujących spostrzeżeń. Podczas normalnej pracy poprawnie smarowanego skojarzenia pierścień-tuleja cylindrowa obwiednia sygnałów drganiowych przypomina swoim charakterem połówkę sinusoidy, o bardzo regularnym, powtarzalnym kształcie. W trakcie zacierania, w pierwszej fazie, występuje zwiększona stromość narastania sygnału z tendencją do logarytmicznego opadania. Z upływem czasu następuje wypełnienie sygnału szumem oraz jego znaczny wzrost w przestrzeniach między „sinusoidami”. Wejście pary pierścień-tłokowy-tuleja cylindrowa w fazę zacierania spowodował wyraźny wzrost wartości siły tarcia pomiędzy pierścieniem i tuleją, a brak istotnych zmian w przebiegu siły docisku pierścienia do gładzi tulei cylindrowej (rysunki 5 i 6).



Rys. 5. Przebieg zmian siły nacisku pierścienia na tuleję cylindrową i siły tarcia w układzie podczas prawidłowego smarowania



Rys. 6. Przebieg zmian siły nacisku pierścienia na tuleję cylindrową i siły tarcia w układzie podczas zacierania

Analizy zarejestrowanych sygnałów drgań wzdłużnych tulei cylindrowej poddano wstępnej obróbce. Nie stwierdzono sygnałów zafałszowanych na przykład zanikiem lub zbytym tłumieniem. Stwierdzono również, że sygnał zarejestrowany podczas prawidłowej współpracy pierścienia z tuleją cylindrową jest losowy, normalny i stacjonarny. Nie zawiera więc przebiegów okresowych. Przy zacieraniu wzrasta wartość skuteczna sygnału drganiowego, a więc naruszony zostaje warunek stacjonarności.

W celu zestawienia wyników na jednym wykresie, wyznaczono wspólny poziom zerowy. Na rysunku 7 zestawiono przebieg widma podczas pracy poprawnej oraz w trakcie zacierania układu.

Przeprowadzona analiza wykazuje wyraźny wzrost (ponad 10 dB) amplitudy widma w zakresie częstotliwości 4500÷5500 Hz oraz 9000÷10000 Hz. Przeprowadzono również analizę sygnału w niższych pasmach częstotliwości do 2500 Hz, która wykazała że zachodzące zmiany mają charakter wąskopasmowego szumu losowego.

5. WNIOSKI

1. Układ tłokowo-cylindrowy wysokoprężnego silnika okrętowego funkcjonuje w bardzo trudnych warunkach, które związane są ze znacznymi obciążeniami cieplnymi i mechanicznymi oraz kinematyką ruchu posuwisto-zwrotnego. Ma to łącznie istotny wpływ na warunki smarowania układu.

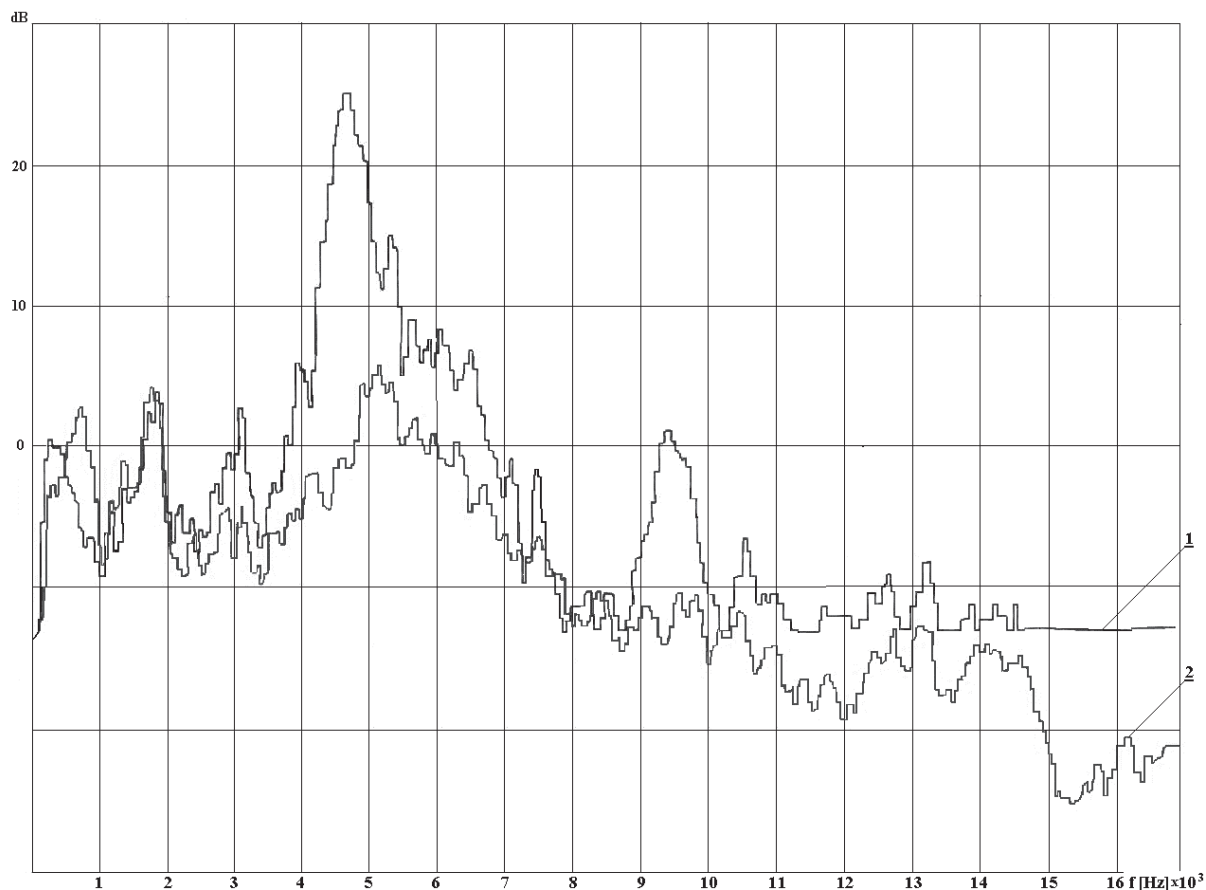
2. Ogólny stan diagnostyki układu tłok-cylinder silników okrętowych jest niezadawalający, chociaż istnieje szereg przykładów wdrażania na statki rozwiązań technicznych, zmierzających do poprawy tego stanu.

3. Jedną z metod która mogłaby skutecznie wspomóc diagnostykę tego układu jest wibrodiagnostyka wykorzystująca analizę drgań wzdłużnych tulei cylindrowych.

4. Wyniki badań wstępnych przeprowadzonych na stanowisku pozwalają stwierdzić, że drgania wzdłużne tulei cylindrowej mogą być wykorzystywane w diagnostyce układu tłokowo-cylindrowego okrętowego silnika spalinowego i służyć do wczesnego wykrywania stanów przedzatarciowych.

5. Wystarczającym warunkiem uzyskania właściwej informacji diagnostycznej jest przeprowadzenie analizy widmowej w określonym paśmie częstotliwości. Należy jednak pamiętać, że omawiane badania nie były przeprowadzone na obiekcie rzeczywistym – okrętowym silniku tłokowym, ale na stanowisku stanowiącym jedynie możliwie wierne odwzorowanie układu tłokowo-cylindrowego. W eksperymencie nie występowało więc szereg zakłóceń dodatkowych pochodzących od innych elementów silnika i jego węzłów funkcjonalnych.

6. Dopiero po przeprowadzeniu kompleksowych badań na obiekcie rzeczywistym i uzyskaniu wiarygodnych danych z pomiaru drgań wzdłużnych tulei cylindrowej silnika okrętowego można będzie mówić o przydatności tej metody w diagnostyce.



Rys. 7. Zmiany widma sygnału wibroakustycznego w warunkach prawidłowego smarowania (krzywa 2) i podczas zacierania (krzywa 1)

LITERATURA

- [1] Berle M.: *Diagnostic system for diesel engines*. Sulzer Technical Review, No 7, 1976
- [2] Fankhauser S., Svimbersky K., Węgle M., Oderbolz S.: *Advances in Engine Management Systems*, biuletyn firmy SULZER 1994 r.
- [3] Geist M.: Sulzer RTA-8T engines: compact two-strokes for tankers and bulk carriers, Technology Review, Wärtsilä NSD Switzerland Ltd, 1998 r.
- [4] Kosteckij B.I.: *Strukturo-energeticzeskaja teoria trenija i iznosa*. Tribologia i efektiwnost na proizvodstwo. Sofia 1977.
- [5] Kosteckij B.I., Zaporozec W.W.: *Analiza spektra kolebani pri wniesnijem trenii*. Teoria trenija i iznosa, Nauka, Moskwa 1965.
- [6] Ostergard A., Fisher P.: *B&W condition check system CC-10 for 2-storke K-GF diesel engines*. Proceeding of 2-nd IFAC/IFIP Symposium, Washington 1976.
- [7] Sadowski J.: *Kryterium zacierania adhezyjnego powierzchni metali*. Zagadnienia eksploatacji maszyn, 3/1980.

- [8] Solski T., Ziomba S.: *Zagadnienia tarcia suchego*. PWN, W-wa 1965.
- [9] Włodarski J.K.: *Tłokowe silniki spalinowe – procesy tribologiczne*. WKiŁ, W-wa 1982.
- [10] Prospekt firmy JOWA i EUB Institut CDS – *Diagnostic Systems*.
- [11] Witkowski K.: Stan diagnostyki okrętowych silników tłokowych. *Diagnostyka'34*, 2005 r, str. 85-92.
- [12] Walczak J., Piszczek K.: *Drgania w budowie maszyn*. PWN, W-wa 1982 r.



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.