

## ZASTOSOWANIE METODY ANALIZY WIDMOWEJ DRGAŃ SKRĘTNYCH WAŁU NAPĘDOWEGO DO IDENTYFIKACJI STANU TECHNICZNEGO ROZPYLACZY PALIWA OKRĘTOWEGO SILNIKA TŁOKOWEGO O ZS

Stanisław BRUSKI

Akademia Marynarki Wojennej, Instytut Podstaw Techniki  
ul. Śmidowicza 69; 81-103 Gdynia, [sbruski@wp.pl](mailto:sbruski@wp.pl)

### Streszczenie

W referacie przedstawiono wytypowane wyniki pomiarów drgań skrętnych wału napędowego średnioobrotowego silnika spalinowego typu Sulzer serii AL. Badanie miało na celu sprawdzenie możliwości wykorzystania analizy widmowej drgań skrętnych do diagnozowania stanu technicznego wtryskiwaczy paliwa silnika w eksploatacji w przypadku, gdy nie jest on standardowo wyposażony w zawory indykatorowe. Dla wyodrębnienia przydatnych parametrów diagnostycznych zasymulowano stan niezdatności wtryskiwacza polegający na wyłączeniu z pracy części otworów rozpylacza. Określono metodę oceny stanu technicznego rozpylacza na podstawie zawartości wyższych harmonicznych w widmie drgań skrętnych wału napędowego transmitującego moment obrotowy z silnika na śrubę napędową okrętu.

Słowa kluczowe: wał napędowy, drgania skrętne, analiza widmowa.

### SPECTRUM ANALYSIS METHODS OF SHAFTINGS TORSIONAL VIBRATION FOR THE INJECTION FUEL VALVES FAILURES IDENTIFICATION OF THE MARINE DIESELS ENGINES

#### Summary

In the paper there are described selected results of torsional vibration measurements carried out on propulsion shafts powered by medium-speed, four-stroke, marine engine Sulzer 6AL20/24. The analysis had to check capabilities of diagnosing injection fuel valve failures within the propulsion system by means of torsional vibration analysis. For separation useful diagnostic parameters there was simulated unserviceability state which was relying on stopping up some openings in injection fuel valve.

Keywords: propulsion shaft, torsional vibration, spectrum analysis.

## 1. WPROWADZENIE

Do napędu większości okrętów będących na wyposażeniu MW RP stosowane są silniki czterosuwowe o zapłonie samoczynnym szybko- lub średnioobrotowe pracujące jako silniki napędu głównego oraz silniki zasilania elektrycznego okrętu.

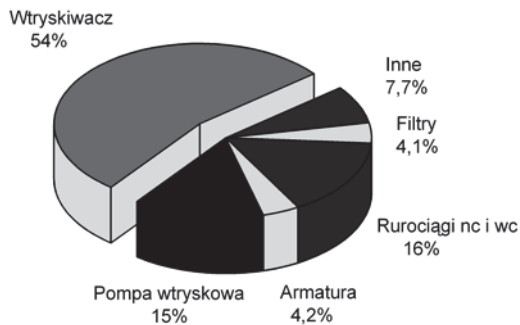
Głównym celem badań aktualnie podejmowanych w Instytucie Konstrukcji i Eksploatacji Okrętów (IKiEO) Akademii Marynarki Wojennej w Gdyni jest dalsze rozwinięcie i udoskonalenie funkcjonującego dotychczas wypróbowanego systemu diagnostycznego o elementy kontroli podstawowych układów konstrukcyjnych silników tłokowych, a w szczególności układu tłokowo-cylindrowego [1]. Systematyczną oceną stanu technicznego elementów komory spalania, realizowaną poprzez analizę przebiegu wartości ciśnienia wewnątrzcyndrowego, poddawane są silniki standardowo wyposażone w zawór indykatorowy. Natomiast silniki nie posiadające

zaworów indykatorowych diagnozowane są na podstawie wyników oglądu wewnętrznego za pomocą endoskopu. Wraz z nowo przejmowanymi okrętami liczba takich silników stale się zwiększa. Przykładem są amerykańskie fregaty typu Oliver Hazard Perry i norweskie okręty podwodne klasy Kobben.

Istotą realizowanych prac badawczych jest m.in. określenie zależności pomiędzy zmianami stanu technicznego układu zasilania silnika paliwem ze szczególnym uwzględnieniem układu wtryskowego oraz jakością dawkowania paliwa, a przebiegiem zmienności momentu obrotowego mierzonego na linii wałów okrętowych.

Z danych eksploatacyjnych dotyczących ponad 40 silników typu AL20/24 i AL25/30, a zebranych w latach 1993-2003 wynotowano ponad dwa tysiące przypadków różnego rodzaju uszkodzeń, w tym ok. 46% uszkodzeń aparatury wtryskowej. Stwierdzono również, iż liczba przypadków uszkodzeń wtryskiwaczy stawia je na pierwszym miejscu pod względem podatności na uszkodzenia (rys. 1) [5, 6].

W procesie eksploatacji silnika okrętowego następuje ciągła degradacja stanu technicznego wtryskiwaczy wywołana szczególnymi warunkami użytkowania, które cechują ciągłe i szybkie zmiany obciążenia.



Rys. 1. Procentowe udziały uszkodzeń poszczególnych elementów układu zasilania silnika paliwem

W konsekwencji dochodzi do przekraczania wartości granicznych wartości współczynnika nadmiaru powietrza oraz niecałkowitego i niezupełnego spalania paliwa a cylindrach. Powstające wówczas nagary i laki skutecznie zmniejszają czynne przekroje przepływu paliwa przez otwory rozpylaczy wtryskiwaczy. Na intensywność tworzenia się nagarów na powierzchni rozpylaczy duży wpływ ma długotrwała praca silnika na niskim obciążeniu, która wynika z charakteru zadań, jakie wykonuje okręt wojenny. W rezultacie powstających osadów zmienia się kształt i wielkość strumienia wtryskiwanego paliwa, powstaje niekorzystne zjawisko dotrysków i wypadania zapłonów, a w krańcowym przypadku – całkowitą utratę drożności i wyłączenie cylindra z pracy. Zdarza się, że dochodzi do zjawiska odpadnięcia osadu, co może być przyczyną poważnych uszkodzeń wtórnych, takich jak uszkodzenia zaworu wydechowego, czy też łopatek turbiny turbosprężarki [4]. Eksploatacja uszkodzonych wtryskiwaczy prowadzi również do rozcieńczania paliwem oleju smarowego, co skutkuje nadmiernym zużyciem łożysk i czopów wału korbowego.

Istnieje duże prawdopodobieństwo, że układy napędowe wyposażone w silniki nie posiadające standardowych zaworów indykatorowych będą narażone na szereg uszkodzeń wtórnych będących następstwem braku możliwości zdiagnozowania przebiegu procesów wewnątrzcyldrowych.

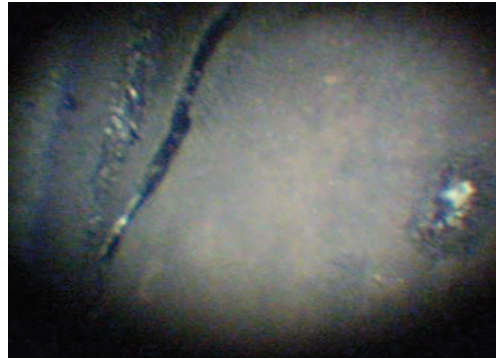
Przykładowe uszkodzenia sprzęgła podatnego typu Vulcan będące konsekwencją nadmiernych drgań skrętnych spowodowanych zaburzeniem procesów wewnątrzcyldrowych prezentuje rys. 2 [6].

Do badań diagnostycznych dokonano wstępnej klasyfikacji stanów technicznych rozpylaczy:

- stan A – rozpylacz sprawny o nominalnej powierzchni czynnej otworów wtryskowych,
- stan B – rozpylacz w stanie częściowej zdadności z dużą ilością nagaru i utratą drożności 2 z 7 otworów wtryskowych, co daje

71.4% nominalnej powierzchni czynnej otworów wtryskowych,

- stan C – rozpylacz niezdatny. Został specjalnie przygotowany do badań porównawczych na stanowisku laboratoryjnym – zaślepiono 50% powierzchni czynnej otworów wtryskowych.



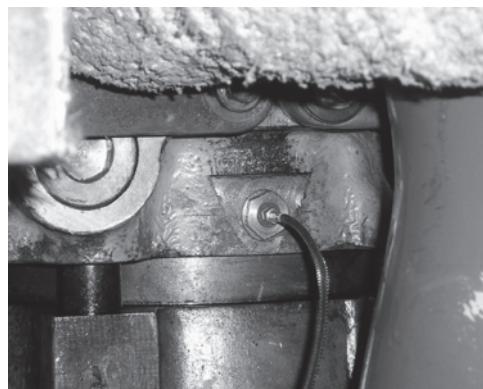
Rys. 2. Pęknięcie elementu podatnego sprzęgła typu Vulcan

## 2. OBIEKT BADAŃ

Obiektem badania był powszechnie używany w silnikach Sulzer typu AL20/24 rozpylacz typu HCPx330 posiadający 7 otworów wtryskowych o średnicy 0.29 mm i kącie wtrysku równym 159 stopni. Rozpylacz będące w różnych stanach technicznych instalowano we wtryskiwaczu wybranego cylindra czterosurowego, sześciocyldrowego silnika stanowiskowego 6AL20/24 o kolejności wtrysku paliwa 1-4-2-6-3-5. Moc nominalna silnika wynosi 420 kW przy prędkości nominalnej wału korbowego 750 min<sup>-1</sup>. Silnik napędza poprzez wał pośredni hamulec wodny Froude'a typu DPY7D.

## 3. APARATURA POMIAROWA

Do indykowania ciśnienia wewnątrzcyldrowego wykonano specjalny kanał pomiarowy do komory spalania cylindra nr 6, w którym zamontowano światłowodowy czujnik ciśnienia firmy OPTRAND typu C31294-Q o zakresie pomiarowym 0 – 20 MPa i klasie dokładności 1.0 (rys. 3).



Rys. 3. Sposób zamontowania przetworników ciśnienia wewnątrzcyldrowego

Do pomiaru ciśnienia paliwa w przewodzie wysokiego ciśnienia użyto czujnika ciśnienia firmy KISTLER typu 7316B o zakresie pomiarowym 0 – 200 MPa i klasie dokładności 1.5.

Pomiar kąta chwilowego skręcenia wału napędzającego hamulec hydrauliczny zrealizowano za pomocą mostkowego tensometru firmy TENMEX typu TFRx-6 oraz bezprzewodowego systemu transmisji danych firmy PHILIPS.

Do zapisu danych szybkozmiennych zastosowano rejestrator cyfrowy typu SEFRAM 8416c, dający możliwość jednoczesnego pomiaru i automatycznej rejestracji 16 parametrów kontrolnych z częstotliwością próbkowania do 250 kHz.

Wszystkie pomiary zostały wykonane w dziedzinie czasu.

#### 4. PRZEBIEG BADANIA

Celem badań było dokonanie jakościowej i ilościowej oceny wpływu zmian stanu technicznego rozpylacza wtryskiwacza na drgania skrętne linii wału, a dokładniej – na widmo tych drgań.

Realizacja eksperymentu polegała na rejestracji parametrów kontrolnych silnika z zamontowanymi rozpylaczami, będącymi w różnym stanie technicznym. Rozpylacze sprawdzano na stanowisku próbnym mierząc ciśnienie otwarcia i rejestrując obraz wtrysku paliwa dla którego określano pole powierzchni zwilżonej wtrysniętym paliwem. W ten sposób symulowano pracę silnika w warunkach częściowej zdadności technicznej rozpylacza. Zapis parametrów kontrolnych silnika wykonano zmieniając obciążenie od biegu jałowego do stanu przeciążenia silnika momentem obrotowym z krokiem około 1 kNm dla ustalonych prędkości obrotowej wału korbowego silnika. Miało to na celu uzyskanie całego spektrum warunków pracy jak najbardziej zbliżonych do warunków eksploatacyjnych. Jednocześnie z częstotliwością próbkowania 50 kHz dokonywano pomiarów i rejestracji następujących parametrów:

- ciśnienia wewnątrzcyldrowego układu cylindrowego nr 6,
- ciśnienia paliwa w przewodzie wysokiego ciśnienia bezpośrednio przed wtryskiwaczem,
- momentu skręcającego wał napędzający hamulec hydrauliczny.

##### 4.1. Analiza diagnostyczna zarejestrowanych wyników badania silnika

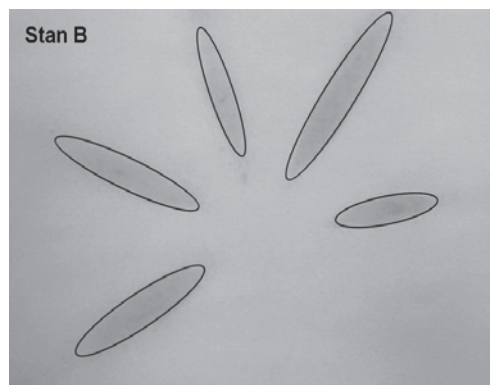
W wyniku przeprowadzonych badań uzyskano przebiegi zmian wartości ciśnienia wewnątrzcyldrowego, ciśnienia w przewodzie wtryskowym oraz wartości momentu obrotowego wału napędowego jako odpowiedź na wprowadzone zakłócenie funkcjonowania silnika – zmianę drożności otworków rozpylających paliwo uzyskaną poprzez wyłączenie z pracy określonej ich liczby.

W celu usunięcia losowych zakłóceń wartości mierzonych parametrów wykonano uśrednianie synchroniczne w dziedzinie kąta obrotu wału korbowego, polegające na utworzeniu z dowolnej liczby kolejnych cykli pracy silnika (cykl dla silnika 4-suwowego obejmuje dwa obroty wału korbowego) jednego przebiegu uśrednionego, stanowiącego podstawę do dalszej obróbki matematycznej.

Skutkiem deformacji przebiegu zmienności wartości ciśnienia wewnątrzcyldrowego jest zmiana sił gazowych (stycznych), co jednoznacznie przekłada się na zmiany wartości momentu wymuszającego drgania skrętne wału napędowego. Z zarejestrowanych przebiegów wynika, że istnieje korelacja pomiędzy drożnością otworów wtryskowych rozpylacza, maksymalnym ciśnieniem wewnątrzcyldrowym spalania.

W wyniku analizy parametrów struktury (min. określenie pola powierzchni zwilżonej – rys. 4) oraz zarejestrowanych wartości parametrów kontrolnych silnika przyjęto następujące definicje stanów technicznych rozpylaczy paliwa:

- **zdatny** – charakteryzujący się polem powierzchni zwilżonej wtryskiwanym paliwem uzyskanym w ściśle określonych warunkach na stanowisku do prób wtryskiwaczy w zakresie od wartości nominalnej 24500 mm<sup>2</sup> do wartości dopuszczalnej 21000 mm<sup>2</sup>. Wartość dopuszczalna odpowiada



Rys. 4. Obraz wtrysku i określenie pola powierzchni zwilżonej paliwem na ekranie stanowiska do badań wtryskiwaczy dla rozpylacza paliwa w zdefiniowanym stanie technicznym **B**

utracie drożności jednego z siedmiu otworów wtryskowych, co skutkuje:

- ok. 7% obniżeniem wartości MIP,
- ok. 50% wzrostem wartości amplitudy podstawowej harmonicznej w widmie drgań skrętnych wału napędowego, co powoduje wzrost wartości obciążenia konstrukcji silnika o charakterze drganiowym oraz zmniejszenie możliwej liczby cykli pracy wynikające z reguł wytrzymałości zmęczeniowej.
- **zdatny częściowo** – charakteryzujący się polem powierzchni zwilżonej wtryskiwanym paliwem w zakresie od wartości dopuszczalnej 21000 mm<sup>2</sup> do wartości granicznej 17500 mm<sup>2</sup>.

Wartość graniczna odpowiada utracie drożności dwóch z siedmiu otworów wtryskowych,

- niezdatny – charakteryzujący się polem powierzchni zwilżonej wtryskiwanym paliwem w zakresie poniżej wartości granicznej  $17500 \text{ mm}^2$ , co odpowiada utracie drożności więcej niż dwóch z siedmiu otworów wtryskowych.

#### 4.2. Analiza widmowa zarejestrowanych przebiegów czasowych

Jak wykazały badania wystarczająca okazała się analiza widmowa sygnału momentu obrotowego wału napędowego wykonana za pomocą szybkiej transformaty Fouriera (FFT). Opracowanie charakterystyk częstotliwościowych z zastosowaniem FFT [1] szeroko przedstawiono w publikacjach [2, 3]. Zarejestrowane przebiegi czasowe zmian momentu obrotowego wału napędowego poddano analizie częstotliwościowej. Dało to możliwość wyznaczenia wartości selektywnego współczynnika zawartości harmonicznym  $SW_H$ , zdefiniowanego jako wartość ilorazu:

$$SW_H = H_0 / H_i \quad (1)$$

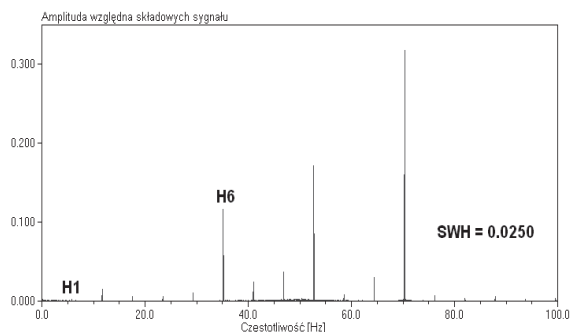
gdzie:

$SW_H$  – selektywny współczynnik zawartości harmonicznym w częstotliwościowym widmie zmienności momentu obrotowego 4-suwowego  $i$ -cylindrowego silnika spalinowego,

$H_0$  – wartość amplitudy częstotliwości podstawowej,

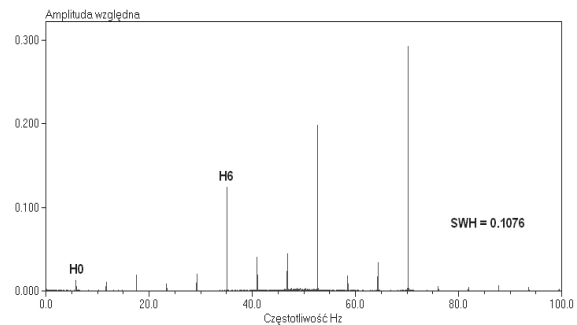
$H_i$  – wartość amplitudy  $i$ -tej harmonicznej.

Analiza, której przykładowe rezultaty pokazano na rys. 5 i rys. 6, umożliwia określenie relacji defekt  $\rightarrow$  symptom. Dla uzupełnienia obrazu tej relacji zaznaczono prążki odpowiadające pierwszej harmonicznej  $H_0$ , szóstej harmonicznej  $H_6$  oraz podano wartość selektywnego współczynnika zawartości harmonicznym  $SW_H$ .



Rys. 5. Przykładowe widmo drgań skrętnych wału napędowego dla będącego w stanie zdadności technicznej rozpylacza paliwa silnika Sulzer 6AL20/2424 dla względnego obciążenia ok. 60% i prędkości obrotowej wału korbowego  $700 \text{ min}^{-1}$

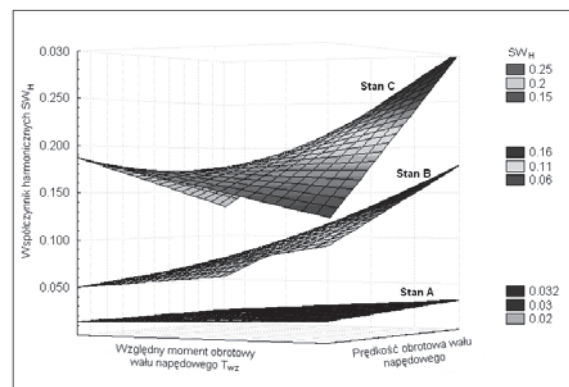
Stwierdzono, że współczynnik  $SW_H$  jest funkcją nie tylko stanu technicznego układu zasilania silnika paliwem, ale także funkcją obciążenia silnika i prędkości obrotowej wału korbowego. W związku z powyższym wnioskowanie diagnostyczne na podstawie współczynnika  $SW_H$  można by przeprowadzać dokonując pomiarów diagnostycznych w tym samym punkcie charakterystyki silnika, w którym dokonano pomiarów odniesieniowych.



Rys. 6. Przykładowe widmo drgań skrętnych wału napędowego dla będącego w stanie niezdatności technicznej rozpylacza paliwa silnika Sulzer 6AL20/24 dla względnego obciążenia ok. 60% i prędkości obrotowej wału korbowego  $700 \text{ min}^{-1}$

W warunkach eksploatacyjnych, szczególnie w przypadku zespołu napędowego ze śrubą stałą, uzyskanie powtarzalnych warunków pomiarowych jest prawie niemożliwe. Niezbędnym okazało się określenie granic stanów technicznych rozpylacza paliwa dla całego spektrum obciążeń i prędkości obrotowej silnika. Dokonano tego wykonując aproksymacje wyznaczonych w pomierzonych punktach wartości współczynnika zawartości harmonicznym  $SW_H$  dla stanów technicznych rozpylacza paliwa uznanych jako graniczne (rys. 7).

Wynikiem aproksymacji są dwie formuły określające granice stanów technicznych rozpylacza paliwa:



Rys. 7. Zależność zmienności współczynnika  $SW_H$  dla rozpatrywanych technicznych A-C jako funkcji prędkości obrotowej i względnego momentu obrotowego wału napędowego

1. Formuła określająca wartości  $SW_H$  odpowiadająca zdadności rozpylacza stanowi:

$$SW_{HZ} < -0,0817 + 0,0003 n + 0,113 \cdot \frac{T}{T_{nom}} - 0,0003 n \cdot \frac{T}{T_{nom}} \quad (2)$$

2. Formuła określająca wartości  $SW_H$  odpowiadające niezdatności rozpylacza:

$$SW_{HN} > -0,1329 + 0,0005 n + 0,2122 \cdot \frac{T}{T_{nom}} - 0,00055 n \cdot \frac{T}{T_{nom}} \quad (3)$$

gdzie:

$T$  – moment obrotowy wału korbowego,

$T_{nom}$  – nominalny moment obrotowy transmitowany przez wał napędowy,

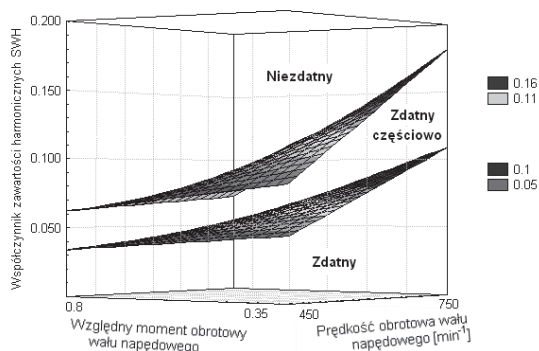
$n$  – prędkość obrotowa wału napędowego

Z dotychczas przeprowadzonych badań wynika, że współczynnik  $SW_H$  stanowić może adekwatny parametr diagnostyczny silnika o znacznej informacyjności odnośnie stanu technicznego rozpylaczy paliwa.

Uzyskane wartości współczynnika  $SW_H$  wyznaczone dla analizowanych stanów technicznych rozpylaczy (Stan A – Stan C) przedstawiono na rys. 7.

Na rys. 8 przedstawiono granice tolerancji eksploatacyjnej dla rozpatrywanych w badaniach stanów technicznych rozpylaczy paliwa.

Z danych liczbowych przedstawionych na rys. 7 i 8 wynika, że zakłócenie funkcjonowania silnika polegające na utracie drożności otworów rozpylacza powoduje zmianę wartości  $SW_H$ , przy czym charakter tej zmiany jest taki sam niezależnie od wartości prędkości obrotowej wału korbowego i obciążenia silnika.

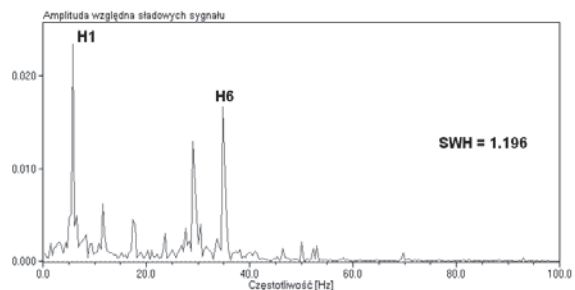


Rys. 8. Granice tolerancji eksploatacyjnej stanów technicznych rozpylaczy paliwa jako funkcja prędkości obrotowej i względnego momentu obrotowego wału napędowego

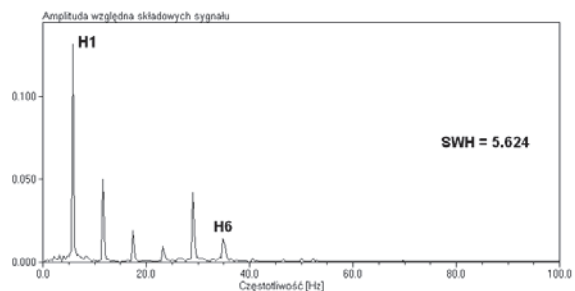
Konstrukcja zespołu napędowego eksploatowanego na jednostce pomocniczej (holowniku) różni się zasadniczo od konstrukcji zespołu laboratoryjnego m.in. zastosowaniem sprzęgła podatnego, mechanicznej przekładni redukcyjnej i śruby napędowej o zmiennym skoku. Rzeczą oczywistą jest, że w wyniku zastosowania opracowanych „narzędzi” diagnostycznych do

przetworzenia zarejestrowanych przebiegów parametrów zespołu napędowego w eksploatacji otrzymano inną przestrzeń parametrów wyjściowych (diagnostycznych), co do ich ilości i wartości. Przyczyną takiego stanu rzeczy jest inny charakter transmisji informacji na drodze defekt → symptom. Analizując wpływ sprzęgła elastycznego i mechanicznej przekładni redukcyjnej na charakter zmienności momentu obrotowego i jego widma można wnioskować, że przebieg wartości momentu obrotowego zawiera wystarczającą ilość informacji do określenia wartości poszczególnych harmonicznych, a w konsekwencji – wartości współczynnika zawartości harmonicznych  $SW_H$ .

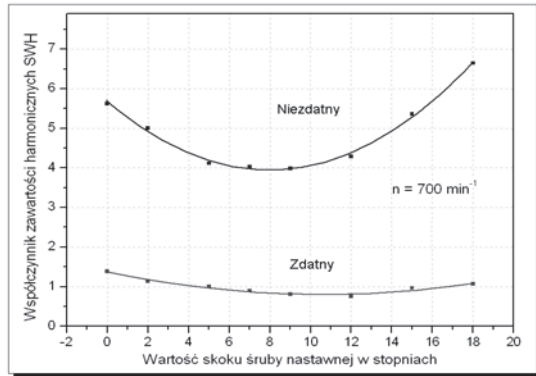
Rezultat analizy widmowej zmienności momentu obrotowego wału napędowego dla dwóch różnych stanów technicznych rozpylacza paliwa i dla takiej samej wartości prędkości obrotowej wału napędowego i wartości nastawy skoku śruby napędowej przedstawia rys. 9, 10 i 11.



Rys. 9. Obiekt rzeczywisty – silnik Sulzer 6AL25/30. Przykładowe widmo drgań skrętnych wału napędowego dla rozpylacza paliwa będącego w stanie zdadności technicznej



Rys. 10. Obiekt rzeczywisty – silnik Sulzer 6AL25/30. Przykładowe widmo drgań skrętnych wału napędowego dla rozpylacza paliwa będącego w stanie niezdatności technicznej



Rys. 11. Wartość współczynnika zawartości harmonicznych  $SW_H$  stanów technicznych rozpylacza paliwa jako funkcja wartości nastawy skoku śruby napędowej

Analiza porównawcza zmian  $SW_H$  wskazuje, że wartość  $SW_H$  dla określonego stanu obciążenia śruby napędową oraz prędkości obrotowej wału korbowego silnika jest adekwatna do stopnia degradacji stanu technicznego rozpylacza paliwa.

Można stwierdzić, że transmisja informacji o defekcie rozpylacza ulega niewielkim zmniejszalnemu, które są możliwe do usunięcia metodami cyfrowej „obróbki” sygnału.

## 5. WNIOSKI

Na podstawie wyników badania eksperymentalnego zmian momentu obrotowego wału transmitującego moment obrotowy od okrętowego czterosuwowego tłokowego silnika spalinowego do hamulca hydraulicznego, w oparciu o analizę widmową zarejestrowanych przebiegów czasowych i częstotliwościowych, dokonano, w sposób pośredni, oceny wpływu stanu technicznego otworów rozpylacza wtryskiwacza paliwa na przebieg procesu spalania w cylindrach.

W przypadku braku możliwości bezpośredniego pomiaru ciśnień wewnątrz cylindrowych (braku zaworów indykatorowych) do oceny stanu technicznego rozpylacza wtryskiwacza autor proponuje stosowanie selektywnego współczynnika zawartości harmonicznych  $SW_H$ , stanowiącego adekwatny parametr diagnostyczny silnika.

## 6. LITERATURA

- [1] Beauchamp K.G.: *Przetwarzanie sygnałów metodami analogowymi i cyfrowymi*. WNT, Warszawa 1978 r.
- [2] Bruski S., Korczewski Z.: *Wyniki badań stanowiskowych wpływu wybranych uszkodzeń eksploatacyjnych układzie paliwowym okrętowego tłokowego silnika spalinowego na widmo drgań skrętnych linii wałów*. Zeszyty Naukowe AMW 2/2003.
- [3] Bruski S., Korczewski Z., Lus T., Łutowicz M.: *Badania energetyczne okrętowych*

*zespołów napędowych z tłokowymi silnikami spalinowymi*. SYMSO 2002.

- [4] Bruski S., Korczewski Z.: *Metoda diagnozowania uszkodzeń wtryskiwacza OTSS w eksploatacji*” Zeszyty Naukowe Politechniki Gdańskiej nr 65 str.15-20B.
- [5] Instrukcja techniczno-ruchowa silnika okrętowego H. Cegielski-Sulzer typu AL20/24. H. Cegielski - Poznań SA, Poznań 1985 r.
- [6] Sprawozdania z prac badawczo-rozwojowych i badawczo-usługowych dotyczących diagnostyki silników spalinowych eksploatowanych na okrętach MW RP - prace badawcze AMW. Gdynia 1986-2005.



Dr inż. **Stanisław BRUSKI** (1947r.) jest absolwentem Wydziału Budowy Okrętów Politechniki Gdańskiej (1971r.). Obecnie pracuje w Instytucie Podstaw Techniki Akademii Marynarki Wojennej w Gdyni. Specjalizuje się

w szeroko pojętej diagnostyce okrętowych układów napędowych ze szczególnym uwzględnieniem okrętowych tłokowych silników spalinowych. Jest autorem wielu publikacji krajowych i zagranicznych.