

## DIAGNOSTYKA WIBROAKUSTYCZNA UKŁADÓW WTRYSKOWYCH SILNIKÓW OKRĘTOWYCH

Jan MONIETA

Wyższa Szkoła Morska w Szczecinie, Zakład Siłowni Okrętowych, ul. Wały Chrobrego  
2, 70-500 Szczecin, tel.: (091) 4344 226 w. 415 lub 479, fax: (091) 4338 123

### 1. Wstęp

Diagnostyka znalazła zastosowanie w następujących fazach istnienia obiektu: wartościowania, konstruowania, wytwarzania i eksploatacji [1, 12].

W wymienionych fazach zastosowanie diagnostyki wynika z występowania rozrzutu technologicznego wytwarzanych elementów silników okrętowych i intensywnego ich zużycie w czasie eksploatacji.

Większość współczesnych jednostek pływających wyposażona jest w siłownię ze spalinowymi silnikami tłokowymi napędu głównego i napędów pomocniczych [9]. Elementem tych silników o największej częstości uszkodzeń jest wtryskiwacz [5, 8, 11]. Jest to jednocześnie element silnika mający wpływ na jego osiągi, zużycie paliwa oraz skład spalin [2, 3, 5, 9].

W referacie przedstawiono sposób oceny stanu technicznego tego słabego elementu silnika okrętowego na etapie wytwarzania i obsługiwanego poza silnikiem.

### 2. Zjawiska drganiowe podczas wtrysku paliwa

W układzie wtryskowym, składającym się z pompy wtryskowej, przewodu wysokiego ciśnienia oraz wtryskiwacza występują liczne mechaniczne i hydrodynamiczne źródła generacji energii wibroakustycznej (WA).

W procesie wtrysku paliwa można wyróżnić zjawiska dotyczące przepływu paliwa oraz zachowania się elementów wtryskiwacza.

Zjawiska związane z dynamiką elementów mechanicznych układu wtryskowego dotyczą tłoka i zaworu tłoczego pompy wtryskowej oraz iglicy i sprężyny wtryskiwacza. Równania opisujące ruch tych elementów mają ogólną postać:

$$m \frac{du}{d\tau} = \sum F \quad (1)$$

gdzie:

- $m$  – masa danego elementu,
- $u$  – prędkość,
- $\sum F$  – suma sił działających na element układu wtryskowego,
- $\tau$  – czas.

Suma sił, działających na element w ogólnym przypadku, obejmuje następujące siły:

$F_1 = Ap$  – siłę wywołaną działaniem ciśnienia ( $p$ ) na powierzchnię elementu ( $A$ ),

$F_2 = F_o$  – siłę wstępnego napięcia sprężyny,

$F_3 = k_w \Delta h$  – siłę ugięcia  $\Delta h$  sprężyny o stałej  $k_w$ ,

$F_4 = \nu u$  – siłę oporu wiskotycznego, proporcjonalną do prędkości elementu ( $u$ ) i lepkości kinematycznej ( $\nu$ ),

$F_5 = \Phi \Delta h$  – siły dynamicznego oddziaływania gniazda i zderzaka na element mechaniczny, wynikające ze sprężystości ( $\Phi$ ) i chwilowego odkształcenia ( $\Delta h$ ).

W czasie ruchu iglicy rozpylacza występują jej zderzenia z gniazdem w korpusie rozpylacza oraz przy unoszeniu z korpusem wtryskiwacza. Maksymalne odkształcenie  $l_{o\max}$  występuje w chwili, gdy

względna prędkość zbliżania się elementów  $\frac{dl_o}{dt}$  jest równa zeru [2]

$$l_{o\max} = \left( \frac{5 m_r}{4 k_s} \right)^{\frac{2}{5}} u_z^{\frac{4}{5}} \quad (2)$$

gdzie:

$k_s$  – stała zależna od geometrii stykających się powierzchni i właściwości sprężystych materiału,

$m_r$  – masa zredukowana zderzających się elementów wtryskiwacza,

$u_z$  – prędkość iglicy w chwili zderzenia.

Uderzenia hydrauliczne w przewodzie paliwowym wywołane są gwałtowną zmianą ciśnienia, pompowanego paliwa przy podnoszeniu i opuszczaniu iglicy rozpylacza. Zjawisko to powoduje drgania przewodu paliwowego o częstotliwości [6]:

$$f_{pp} = k_i n i_w \text{ [Hz]} \quad k_i = 1, 2, \dots \quad (3)$$

gdzie:

- $k_i$  – kolejna harmoniczna,
- $n$  – prędkość obrotowa wału rozrządu [1/s],
- $i_w$  – liczba wtryskiwaczy.

W drganiach podczas wtrysku paliwa występują charakterystyczne częstotliwości, których obliczenie jest pomocne przy identyfikacji składowych w widmach ciśnienia w przewodzie wtryskowym i przemieszczeń oraz przyspieszeń iglicy wtryskiwacza.

### 3. Generacja efektów akustycznych podczas wtrysku paliwa

Podczas wtrysku paliwa można wyróżnić źródła efektów akustycznych, czyli procesów towarzyszących. Ograniczając się do przewodu wysokiego ciśnienia, wtryskiwacza oraz komory, do której odbywa się wtrysk paliwa, można wyróżnić następujące typy źródeł efektów akustycznych:

- źródła powierzchniowe,
- źródła przepływowe,
- źródła wybuchowe.

Padanie fali dźwiękowej na granicy dwóch środków wywołuje zjawiska odbicia, załamania, pochłaniania i przenikania. Bilans intensywności dźwięku padającego  $I_{pad}$ , odbitego  $I_{odb}$ , pochłoniętego  $I_{poch}$  oraz przenikającego  $I_{przen}$  ma postać:

$$I_{pad} = I_{odb} + I_{poch} + I_{przen} \quad (4)$$

W przykładowych równaniach opisujących procesy zachodzące podczas wtrysku paliwa, występują związki pomiędzy parametrami tych zjawisk a cechami stanu technicznego wtryskiwaczy. Pozwala to na wstępny wybór sygnałów diagnostycznych.

### 4. Proponowane stanowisko badawcze

Zbudowano modelowe stanowisko badawcze, złożone z elementów okrętowego silnika typu AL20/24. Ostateczną, uproszczoną postać stanowiska badawczego przedstawiono na rys. 2. Analiza sygnałów dokonywana była za pomocą komputera i programu analizy sygnałów SAS. Stosowano obróbkę wstępną sygnałów przez selekcję czasową, filtrowanie, uśrednianie synchroniczne itp. [1]. Analizę prowadzono w dziedzinie czasu, amplitudy i częstotliwości. Racjonalnie wybierano pasma częstotliwości analizy sygnałów, które bardzo istotnie wpływały na wartości parametrów diagnostycznych.

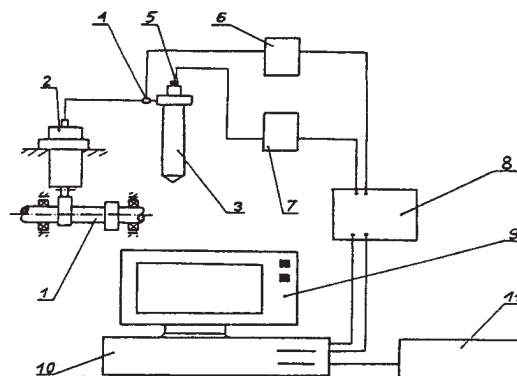
W dziedzinie częstotliwości wybrano w badaniach wtryskiwaczy analizę ilościową amplitud składowych widm, przy zmianach wielkości wejściowych. Dla sygnałów ciśnienia akustycznego dokonano dekompozycji widm na oktawy, a dla przyspieszeń drgań na tercje (rys. 3), w których wyznaczano moc harmoniki  $N_H$  według zależności:

$$\tilde{H}_{ai} = \sqrt{N_H} = \left[ \sum_{i=1}^n \frac{H_i^2}{2} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (5)$$

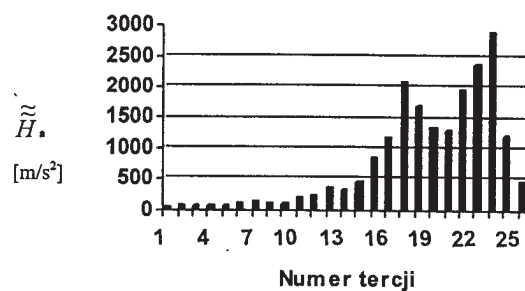
gdzie:

$\tilde{H}_{ai}$  – cząstkowa wartość skuteczna w  $i$ -tym paśmie tercjowym przyspieszeń iglicy,

$H_i$  – amplituda składowej widma amplitudowego.



Rys. 2. Schemat diagnostycznego stanowiska badawczego układu wtryskowego silnika typu AL20/24: 1 – wał rozrządu, 2 – pompa wtryskowa, 3 – wtryskiwacz, 4 – czujnik ciśnienia w przewodzie wtryskowym, 5 – czujnik drgań iglicy, 6 – wzmacniacz ciśnienia, 7 – wzmacniacz drgań, 8 – przetwornik analogowo-cyfrowy, 9 – monitor, 10 – komputer, 11 – drukarka

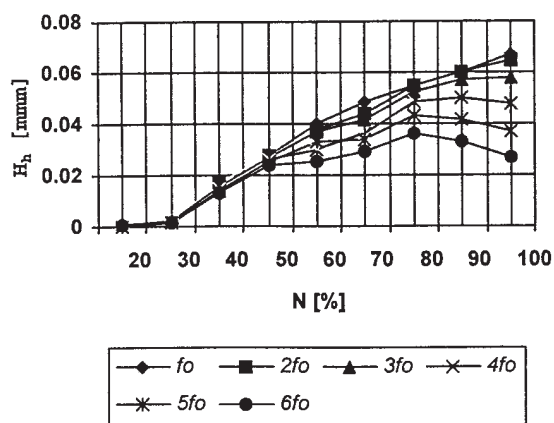


Rys. 3. Przykładowe uśrednione wartości skuteczne amplitud widm przyspieszeń iglicy  $\tilde{H}_a$  w pasmach tercjowych: rozpylacz 7 x 0,26R, ciśnienie otwarcia wtryskiwacza 25 MPa,  $n = 375$  obr/min, nastawa paliwowa 58%

## 5. Przebieg badań

Badania prowadzono w dwóch etapach. Badania wstępne miały na celu zawężenie i racjonalizację badań zasadniczych oraz określenie wpływu wielkości wejściowych na wartości parametrów diagnostycznych. Polegały one na badaniu jednego układu wtryskowego i określaniu wpływu wielkości wejściowych, stanowiących zasilanie i sterowanie oraz warunki badań, na wartości parametrów diagnostycznych. Sprawdzano wpływ miejsca odbioru sygnału, ciśnienia zasilania pompy wtryskowej, prędkości obrotowej wału rozrządu  $n$  i temperatury paliwa, w połączeniu z wpływem nastawy paliwowej  $N$ . Badano istotność wpływu nastawy paliwowej  $N$  na wartości parametrów diagnostycznych oraz ustalono przydatności wybranych sygnałów diagnostycznych i ich miar, na podstawie zgodności ich trendu z trendami dawek wtryskiwanego paliwa (rys. 4). Z rysunku wynika, iż są na nim linie parametrów diagnostycznych współzależne z dawką wtryskiwanego paliwa, co upoważniło do twierdzenia, że będą one również skorelowane z cechami stanu technicznego. Dla oceny wyników pomiarów stosowano współczynnik korelacji współczynnik wrażliwości oraz testowano hipotezę o braku korelacji między wartościami parametrów diagnostycznych a dawką wtryskiwanego paliwa [5, 6, 10].

Analiza warunków diagnozowania wtryskiwaczy upoważniła do wyboru do dalszego stosowania w badaniach zasadniczych sygnałów ciśnienia w przewodzie wtryskowym oraz przemieszczeń i przyspieszeń iglicy rozpylacza.



Rys. 4. Wpływ nastawy paliwowej  $N$  na wartości amplitud widm przemieszczeń iglicy  $H_h$  przy częstotliwości wtrysku  $n = 375$  obr/min;  $f_0$  – częstotliwość obrotowa

Sygnały ciśnienia akustycznego okazały się najmniej współzmiennicze z dawką wtryskiwanego paliwa, zwłaszcza przy wyższych prędkościach obrotowych wału rozrządu, zbliżonych do znamio-

nowych [4]. Należy to tłumaczyć powstawaniem przepływu burzliwego i chaosu, przy wyższych prędkościach obrotowych.

W badaniach zasadniczych analizowano wpływ zmiennych niezależnych cech stanu technicznego na wartości parametrów diagnostycznych, dla ustalonych warunków badań.

## 6. Wybrane wyniki badań

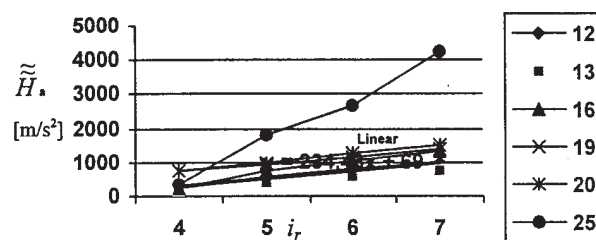
Opracowano model diagnostyczny: symptom diagnostyczny  $y$  – cecha stanu  $x$  wykorzystując liniową funkcję regresji w postaci:

$$y = ax + b \quad (6)$$

gdzie:

$a$  i  $b$  są estymatorami parametrów równania regresji wyznaczonymi z próby.

Przykładowe wyniki badań wpływu liczby otworków rozpylających na wartości miar widmowych przyspieszeń iglicy przedstawia rys. 5.



Rys. 5. Wpływ liczby otworków rozpylających  $i_r$  na wartości skuteczne amplitud w pasmach tercjowych widm przyspieszeń iglicy rozpylacza  $\tilde{H}_a$  dla wybranych składników nr 12, 13, 16, 19, 20

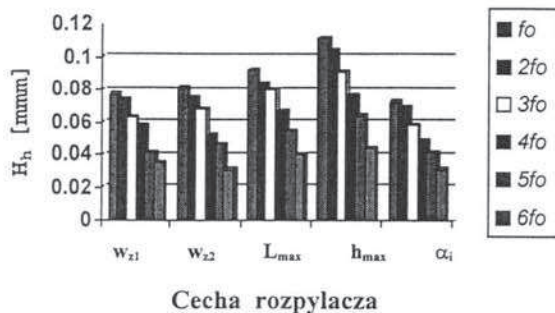
Z rysunku wynika, iż niektóre wartości skuteczne amplitud przyspieszeń iglicy tworzą liniowy trend z liczbą otworków czynnych rozpylacza.

W badaniach zasadniczych wykonywano porównania przebiegów czasowych bieżących z wzorcowymi, wraz z wyznaczeniem współczynnika korelacji między nimi [5, 6]. Badano również wpływ pojedynczych cech stanu technicznego rozpylaczy na wartości parametrów diagnostycznych. Pojedyncze cechy stanu technicznego rozpylaczy w stanach niezdatności, stosownie do zużyć i uszkodzeń występujących w eksploatacji, stanowiły:

- zwiększony luz pomiędzy częścią prowadzącą korpusu a iglicą rozpylacza  $L_{max}$ ,
- zwiększony maksymalny skok iglicy  $h_{max}$ ,
- zmniejszony kąt stożka wierzchołkowego

iglicy  $\alpha_i$ .

Wyniki badań wtryskiwaczy z wymienionymi powyżej rozpylaczami, odniesiono do wtryskiwacza z rozpylaczem wzorcowym ( $w_{z1}$ ) i nowym ( $w_{z2}$ ) oraz zilustrowano na rys. 6.



Rys. 6. Wpływ cech rozpylaczy na wartości amplitud składowych widm sygnału przemieszczeń  $H_h$ ; rozpylacz 7 x 0,26 R, ciśnienie otwarcia wtryskiwacza 25 MPa, nastawa paliwowa  $N = 100\%$

Generalnie widoczny jest istotny wpływ zwiększonego maksymalnego skoku i zwiększonego luzu iglicy na wartości parametrów diagnostycznych przemieszczeń iglicy.

## 7. Wnioski

W zakresie opracowanej metody można sformułować następujące wnioski:

- Zastosowanie amplitud składowych widm sygnału drganiowego jest nową metodą diagnozowania wtryskiwaczy silników wysoko-prężnych.
- Wykazano małą przydatność badanych parametrów diagnostycznych ciśnienia w przewodzie wtryskowym, powszechnie stosowanego do diagnozowania wtryskiwaczy, oraz ciśnienia akustycznego w porównaniu z symptomami drganiowymi.
- Badania diagnostyczne wtryskiwaczy silników w warunkach laboratoryjnych, umożliwiły budowę procedury diagnozowania w warunkach kontroli jakości i weryfikacji.
- Zaproponowana metoda może być stosowana do oceny wtryskiwaczy innych silników oraz w fazie eksploatacji silnika.
- Wybrano jeden punkt pomiarowy i jeden czujnik drgań do prowadzenia kompleksowej oceny stanu technicznego, co skróci czas kontroli wtryskiwaczy.

- Wyselekcjonowano symptomy drganiowe o bardzo silnym skorelowaniu z cechami stanu (współczynnik korelacji  $\geq 0,95$ ) oraz o dużej wrażliwości na zmiany stanu technicznego.
- Metoda ta jest dokładna. Błąd względny całego toru pomiarowego wybranych symptomów diagnostycznych nie przekracza  $\pm 3,5\%$ .
- Istnieje możliwość wdrożenia tej metody przez producenta i eksploataatorów wtryskiwaczy.

## Literatura

1. Cempel C.: „Diagnostyka wibroakustyczna maszyn”. Wyd. Politechniki Poznańskiej, Poznań 1985.
2. Hebda M., Niziński S., Pelc H.: „Podstawy diagnostyki pojazdów mechanicznych”. WKiŁ, Warszawa 1984
3. „Injection developments target reduced emission”. *Motor Ship* 1992, no 859.
4. Monieta J.: Zastosowanie sygnałów ciśnienia akustycznego do diagnostyki procesu wtrysku paliwa. II krajowa konferencja „Diagnostyka techniczna urządzeń i systemów”, Szczyrk 1995, tom 3, s. 191–198.
5. Monieta J.: „Diagnostyka kontrolna wtryskiwaczy silników okrętowych z wykorzystaniem sygnału drganiowego iglicy rozpylacza. KO-NES'99, Zakopane 1999, s. 154–159.
6. Monieta J.: „Metoda diagnozowania wtryskiwaczy silników wysokoprężnych z wykorzystaniem analizy widmowej sygnałów ciśnienia w przewodzie wtryskowym”, *Problemy Eksploatacji* 1997 nr 4.
7. Morel J.: „Vibrations des machines et diagnostic de leur état mécanique”. Direction des Etudes et Recherches D'électricité de France, Paris 1992.
8. Piaseczny L.: „Technologia napraw okrętowych silników spalinowych”. WM, Gdańsk 1992.
9. Piotrowski I., Witkowski W.: „Okrętowe silniki spalinowe”. Wyd. Trademar, Gdynia 1996.
10. Tomaszewski F.: Zagadnienia wyznaczania stanu technicznego złożonego obiektu mechanicznego za pomocą sygnału wibroakustycznego. Rozprawy. Politechnika Poznańska, Poznań 1998 nr 337.
11. Zbierski K.: „Beurteilung des Einspritzbeginns bei Dieselmotoren”. *Motor-technische Zeitschrift*. 1986 nr 4.
11. Żółtowski B.: „Podstawy diagnostyki maszyn”. Wyd. Akademii Techniczno-Rolniczej w Bydgoszczy, Bydgoszcz 1996.