

## ZASTOSOWANIE SYGNAŁÓW PRĘDKOŚCI DRGAŃ DO DIAGNOSTYKI WTRYSKIWACZY SILNIKÓW SPALINOWYCH

Jan MONIETA, Przemysław ROKICKI

Akademia Morska, Instytut Technicznej Eksploatacji Siłowni Okrętowych, Zakład Siłowni Okrętowych,  
ul. Wały Chrobrego 2, 70–500 Szczecin, fax: (091) 4809 575, email: jmonieta@am.szczecin.pl

### Streszczenie

Praca stanowi próbę zastosowania sygnałów prędkości drgań do diagnostyki wtryskiwaczy silników okrętowych w fazie eksploatacji. Najpierw przeprowadzono badania wstępne z wykorzystaniem eksperymentu czynnego na stanowisku systemu wtryskowego poza silnikiem. Zbadano wpływ nastawy paliwowej na parametry sygnałów prędkości drgań w dziedzinie amplitudy i częstotliwości przy różnych mocowaniach czujników pomiarowych.

Słowa kluczowe: diagnostyka, silniki okrętowe, wtryskiwacze

### APPLICATION OF SIGNALS OF THE VELOCITY VIBRATION TO DIAGNOSTIC OF DIESEL ENGINE INJECTORS

#### Summary

The work is determining of application of the signals of velocity vibration to diagnostic of marine diesel engine injectors in operating phase. In the first place have been make preliminary investigations with utilisations of active experiment on the state of injection system out engine. There have been investigated influence of fuel setting on parameters of the signals of velocity vibrations in amplitude and spectrum domain at various fastens of measurement sensors.

Keywords: diagnostics, marine diesel engines, injectors

## 1. WSTĘP

W ostatnich latach obserwuje się ogromny postęp technologiczny i rozwój procesów diagnozowania w eksploatacji systemów wtryskowych silników spalinowych [2, 4, 8, 11, 14, 15]. Duży wpływ na tą tendencję mają rygorystyczne konwencje o ochronie środowiska, których to armatorzy są zmuszeni przestrzegać, jak również wysokie koszty nieprawidłowej eksploatacji silników spalinowych [3, 12, 15].

Problem diagnostyki wtryskiwaczy jest godny poświęcenia uwagi ze względu na to, że wtryskiwacz w silniku jest elementem bardzo zawodnym [7] i mającym istotny wpływ na parametry pracy [2, 4]. Obecnie konstruowane silniki muszą spełniać normy dotyczące emisji toksycznych składników i zadymienia spalin, osiągając jednocześnie dużą dynamikę, niskie zużycie paliwa, wysoką trwałość oraz niezawodność [10, 12].

Współczesne wtryskiwacze w zasadzie nie wymagają obsługi bieżącej, a częstość obsług okresowych zależy od konstrukcji rozpylacza, rodzaju stosowanego paliwa, rodzaju regulacji ciśnienia otwarcia oraz warunków i sposobu eksploatacji [2, 9]. Przewidywana trwałość rozpylacza w silniku okrętowym spalającym olej

napędowy A20D, którego badania dotyczą, powinna wynosić od 4 000÷6 000 h pracy, natomiast w silniku spalającym paliwa pozostałościowe A20H – 3 000÷5 000 h. Praktycznie jest ona znacznie niższa [9].

Istnieje również wiele metod diagnozowania układu zasilania i wtrysku paliwa z wykorzystaniem urządzeń stacjonarnych, na których można prowadzić oceny stanu technicznego. Małe jest jednak wdrożenie metod i środków diagnostyki wtryskiwaczy, co sprawia, że celowe jest dalsze poszukiwanie wiarygodnych sposobów diagnozowania wtryskiwaczy. W pracy tej postanowiono zbadać przydatność sygnałów prędkości drgań do oceny stanu technicznego wtryskiwaczy, bowiem dotychczas tylko sporadycznie badano przydatność tych sygnałów [1, 6].

## 2. OBIEKT BADAŃ

Obiektem badań był wtryskiwacz silnika okrętowego firmy Sulzer typu AL20/24. Silnik ten jest rzędowym, nienawrotnym, chłodzonym wodą, 4-suwowym silnikiem wysokoprężnym z bezpośrednim wtryskiem paliwa, doładowaniem przy pomocy turbosprężarki i chłodzeniem powietrza doładowującego.

Przyczyną, dla której został wybrany ten typ silnika okrętowego jest jego dostępność oraz fakt, że najbardziej zawodnym układem funkcjonalnym okazał się układ zasilania silnika paliwem a podzespołem wtryskiwacz [7]. Największą liczbę uszkodzeń stwierdzono w pierwszym okresie eksploatacji wtryskiwaczy (7,9% w przedziale 0 ÷ 100 h pracy, a 20,8% w przedziale 0 ÷ 300 h pracy) [7].

### 3. STANOWISKO BADAWCZE

Przed przystąpieniem do badań zasadniczych wtryskiwaczy, zamontowanych w silniku Sulzer AL 20/24, wykonano wstępne badania rozpoznawcze na stanowisku modelowym laboratoryjnym. Stanowisko laboratoryjne składa się z następujących podzespołów (rys. 1):

- zbiornika z olejem kalibracyjnym (olej kalibracyjny zapobiega ewentualnej korozji wewnątrz przewodów paliwowych),
- przewodów paliwowych wraz z manometrem ciśnienia,
- filtrów,
- wału rozrządu,
- pompy wtryskowej,
- wtryskiwacza wraz z zamontowanym czujnikiem przyspieszeń,
- naczynia szklanego na rozpylany olej,
- komputera stacjonarnego do rejestracji pomiarów i analizy sygnałów,
- wzmacniacza,
- czujnika fotooptycznego akwizycji początku sygnałów,
- silnika prądu stałego.

Stanowisko jest napędzane silnikiem prądu stałego, który jest połączony z wałem rozrządu za pomocą przekładni pasowej. W przewodach paliwowych, przed pompą wtryskową, wytwarzane było ciśnienie 2 bary, które było sprawdzane za pomocą manometru. Przy przewodach przelewowych zamontowany jest zawór dławiący, skąd olej jest kierowany dalej do zbiornika. Za pomocą naczynia, do którego następował wtrysk paliwa, można było zmierzyć dawkę wtryskiwanego paliwa.

Badania przeprowadzono dla jednego wtryskiwacza, w stanie zdatności, przy ciśnieniu otwarcia 40 MPa. Stan zdatności został ustalony na podstawie pomiaru wartości cech stanu technicznego.

Do obróbki wyników został wykorzystany system analizy sygnałów PC ver. 2.1, który pozwala na wykonywanie podstawowych analiz sygnałów w dziedzinie:

- czasu,
- amplitudy,
- częstotliwości.

Wzmocnienia wykorzystywane w programie podawane są w odstępach 10 dB oraz istnieje możliwość płynnej regulacji wzmocnienia. Przyjęto

wzmocnienie stosownie do czułości czujników oraz wybranego kanału wejściowego. Wartości odpowiadają pełnemu zakresowi pomiarowemu danej wielkości. Program ukazuje również zakres częstotliwości wykonywanej rejestracji/analizy sygnału.



Rys. 1. Widok stanowiska badawczego

Program automatycznie rejestruje 1024 próbki, lecz standardowo ustawione jest 512 próbek. Automatyczne ustawienie liczby próbek na wartość 1024 umożliwia zmiany tego parametru bez ponownego wczytywania sygnału. Możliwe było dokonywanie rejestracji i analizy sygnałów chwilowych, jak i kilku jego sekwencji.

### 4. METODY BADAŃ

W badaniach został wykorzystany czujnik przyspieszeń drgań, który został zamontowany w różnych miejscach oraz przy różnych mocowaniach. Mocowano go na nakrętce przewodu wysokiego ciśnienia (przy pompie wtryskowej i wtryskiwaczu) (rys. 2) i na śrubie regulacyjnej za pomocą magnesu oraz za pomocą gwintu na śrubie regulacyjnej, a także na przedłużeniu trzpienia iglicy za pomocą gwintu. Przetworzone przez czujnik sygnały całkowano we wzmacniaczu, co zamieniło sygnały przyspieszeń na sygnały prędkości drgań.

Próbowano również dobrać najodpowiedniejsze pasmo analizy sygnałów. Badania wskazały, że najbardziej przydatne okazały się pasma do 1 i 2,5 kHz.

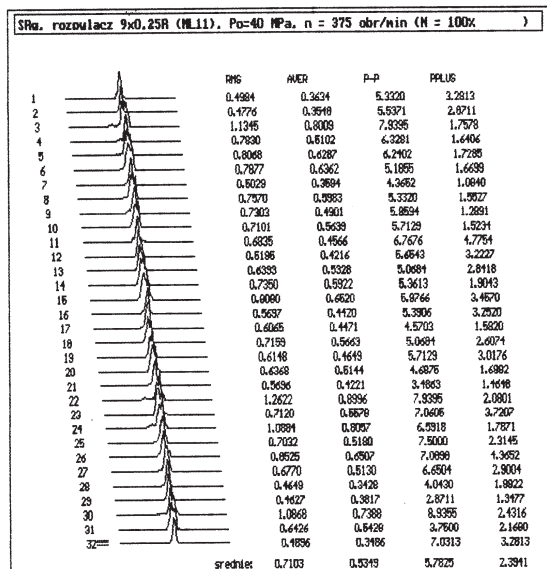
Były to wstępne badania mające na celu zaplanowanie badań zasadniczych. W czasie badań zmieniano stopniowo nastawę paliwową, co 10% od 50 ÷ 100% i badano jej wpływ na wartość parametrów diagnostycznych.

W badaniach wykorzystywano eksperyment czynny, który polegał na zmianie jednej wielkości wejściowej (nastawy paliwowej), na wartości parametrów diagnostycznych [13], przy utrzymywaniu na stałym poziomie pozostałych wielkości wejściowych [16, 17].



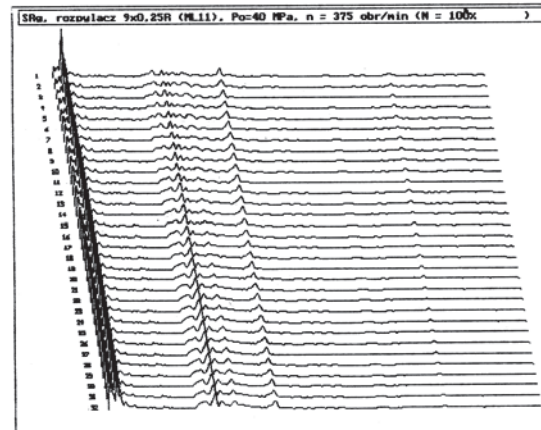
Rys. 2. Przykład mocowania czujnika na przewodzie wysokiego ciśnienia za pomocą magnesu

Wykorzystano analizę w dziedzinie amplitud, w której estymaty, prezentowane są pierwotnie w postaci kaskadowej (rys. 3). W tej opcji analizy wyznaczano 4 estymaty amplitudowe.

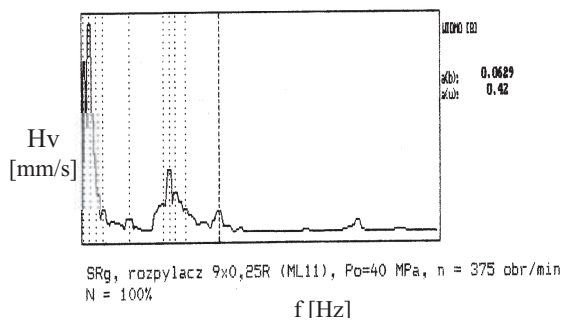


Rys. 3. Przykładowa analiza w dziedzinie amplitudy: RMS – wartość skuteczna, AVER – wartość średnia, P-P – wartość międzyszczytowa, PPLUS – wartość szczytowa dodatnia

Podczas analizy w dziedzinie częstotliwości analizowano sekwencje sygnałów, gdzie widma prezentowane były pierwotnie w postaci kaskadowej (rys. 4). W tej opcji możliwe było analizowanie widma ostatnio wczytanego sygnału, widma wzorcowego i widma wynikowego amplitudy (b) – wartości bezwzględne, amplitudy (u) – wartości unormowane, częstotliwości (b) – częstotliwość w Hz, częstotliwości (u) – numer próbki (rys. 5). Podana jest również rozdzielczość widma i zakres analizy.



Rys. 4. Uśrednienie synchroniczne widm prędkości drgań



Rys. 5. Przykładowe uśrednione widmo prędkości drgań: Hv – amplituda składowej widma, f – częstotliwość

Z rysunku 5 wynika, że składowe o znaczących wartościach amplitud znajdują się w niskim paśmie częstotliwości.

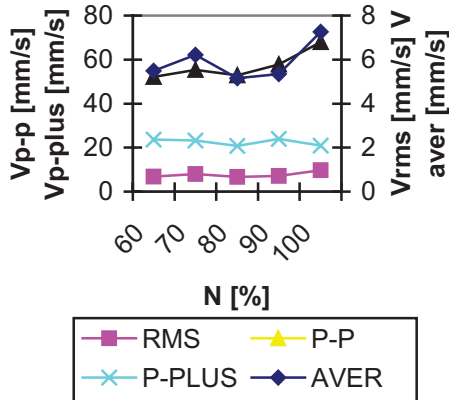
## 5. WYBRANE WYNIKI BADAŃ

Przy zestawieniu wyników w dziedzinie amplitudy badano wpływ nastawy paliwowej na wartości estymat amplitudowych przy różnych mocowaniach i lokalizacjach czujników pomiarowych. Przykładowe przebiegi estymat, dla przeprowadzonych badań i czujnika zamocowanego na śrubie regulacyjnej za pomocą gwintu, zostały przedstawione na rysunku 6.

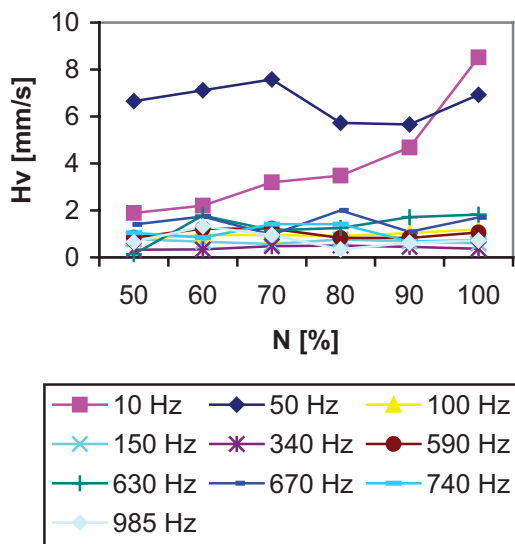
Z rysunku 6 wynika raczej niezbyt wyraźna współzmienniczość estymat amplitudowych z nastawą paliwową. Estymaty te są mało wrażliwe na zmiany nastawy paliwowej, odzwierciedlającej zmiany stanu technicznego wtryskiwaczy.

Na rysunku 7 natomiast przedstawiono wpływ nastawy paliwowej na wartości amplitud składowych widm prędkości drgań przy czujniku mocowanych za pomocą gwintu na śrubie regulacyjnej. Tutaj jednoznaczny trend z nastawą paliwową wykazały amplitudy przy częstotliwości 10 Hz, czyli drugiej obrotowej przy tej

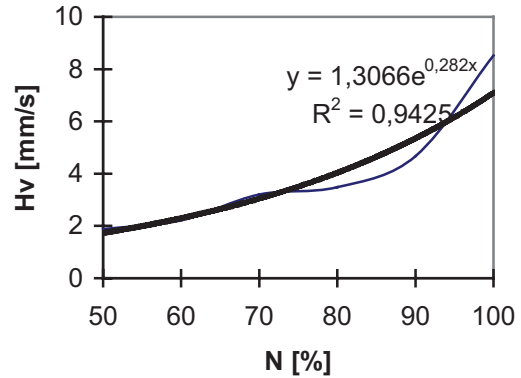
rozdzielczości. Przebieg ten przedstawiono na rysunku 8, aproksymując go krzywą wykładniczą wraz z podaniem równania linii trendu. Wystąpiła tutaj zależność nieliniowa pomiędzy zmiennymi zależnymi i niezależnymi.



Rys. 6. Wykres zależności estymat amplitudowych prędkości drgań  $v$  od nastawy listwy paliwowej dla czujnika zamocowanego na śrubie regulacyjnej:  
 $N$  – nastawa paliwowa

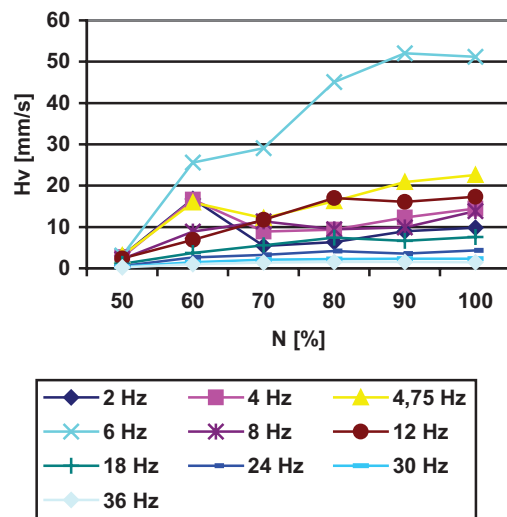


Rys. 7. Wykres zależności wartości amplitud składowych widm prędkości drgań  $H_v$  od nastawy listwy paliwowej przy czujniku zamocowanego za pomocą gwintu na śrubie regulacyjnej



Rys. 8. Przebieg amplitud widm prędkości drgań  $H_v$  o  $f= 10$  Hz w zależności od zmian nastawy paliwowej składowej przy czujniku zamocowanym na śrubie regulacyjnej wraz z linią trendu oraz wartością współczynnika determinacji  $R^2$

Na rys. 9 przedstawiono wpływ nastawy paliwowej na wartości amplitud widm prędkości drgań przy czujniku zamocowanym na drążku trzpienia iglicy. Tutaj pierwsza obrotowa tworzy jednostajny trend z nastawą paliwową. Problemem jednak może być w stosowaniu w eksploatacji tego sposobu mocowania czujnika, ponieważ wymaga on ingerencji w konstrukcję wtryskiwacza. Jest to jednak sposób lokalizacji czujnika, w którym jest on związany z elementami ruchomymi wtryskiwacza.



Rys. 9. Wpływ nastawy paliwowej na wartości amplitud obwodni widm prędkości drgań przy czujniku mocowanym na gwint na drążku trzpienia iglicy w paśmie  $f$  do 1 kHz

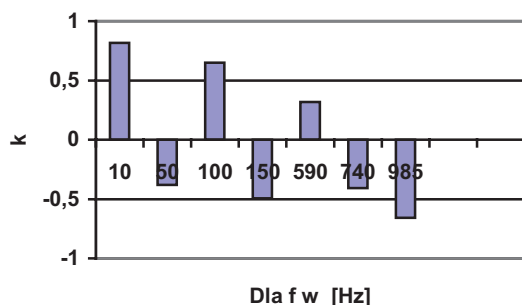
O przydatności parametrów diagnostycznych świadczą między innymi wartości współczynnika korelacji pomiędzy zmiennymi:

$$k = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (1)$$

gdzie:

- $i$  – kolejny numer składowej widma i nastawy paliwowej,
- $x_i$  –  $i$ -ta wartość nastawy paliwowej,
- $\bar{x}$  – wartość średnia nastawy paliwowej,
- $y_i$  –  $i$ -ta wartość parametru diagnostycznego,
- $\bar{y}$  – wartość średnia parametru diagnostycznego.

Przykładowe wartości współczynnika korelacji wraz z nastawą paliwową przedstawiono na rysunku 10. Związki ściśle zachodzą pomiędzy zmiennymi przy wartości  $k = 0,71 - 0,9$ , co spełnia składowa o częstotliwości 10 Hz. Wartości współczynnika około 0,8, uzyskano dla kilku parametrów diagnostycznych przy różnych wariantach badań. Związek bardzo ścisły uzyskano dla składowej o  $f = 6$  Hz przy mocowaniu czujnika na trzpieniu wtryskiwacza, gdzie wartość współczynnika korelacji wyniosła 0,948.



Rys. 10. Wartość współczynnika korelacji amplitud widm, w zależności od nastawy paliwowej, dla mocowania czujnika na śrubie regulacyjnej za pomocą gwintu

Z rysunku wynika, że niektóre z parametrów diagnostycznych były wręcz odwrotnie zależne od zmian nastawy paliwowej, przyjmując ujemne wartości współczynników korelacji.

W badaniach wykorzystywano również analizę jakościową porównania widm odniesienia (dla nastawy paliwowej 100%) z widmami bieżącymi, wraz z wyznaczaniem współczynników korelacji. Dla niektórych mocowań uzyskano jednoznaczny trend.

## 6. PODSUMOWANIE UZYSKANYCH WYNIKÓW

Na podstawie uzyskanych wyników można stwierdzić, że większość parametrów diagnostycznych nie jest współzmiennicza z nastawą paliwową. Nie tworzą one jednoznacznych trendów i posiadają ekstrema [5]. Znacznie lepsze związki uzyskano dla sygnałów przemieszczeń drgań w niskim paśmie częstotliwości [8]. Znalazło się tutaj jednak kilka parametrów, współzmiennicznych z nastawą paliwową bez ekstremum, które mogą być wykorzystane do diagnostyki wtryskiwaczy.

Można zaobserwować, że dla poszczególnych typów mocowań czujnika, zastosowanie może mieć inna częstotliwość do diagnozowania wtryskiwaczy podczas eksploatacji.

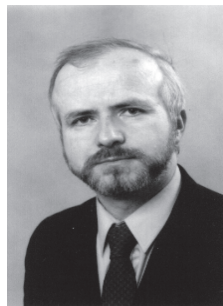
Przeprowadzone badania diagnostyczne wtryskiwaczy z wykorzystaniem czujnika przyspieszeń drgań, pozwalają na sformułowanie następujących wniosków:

- do diagnozowania wtryskiwaczy podczas eksploatacji, najłatwiej jest mocować czujniki na magnes;
- czujnik z mocowaniem za pomocą gwintu może mieć mniejsze zastosowanie, z tego względu, że konieczne jest wiercenie oraz gwintowanie otworka w śrubie regulacyjnej;
- dla silnika AL 20, miejscem najbardziej dostępnym do zamocowania czujnika jest przewód wysokiego ciśnienia, z tego względu, że śruba regulacyjna jak i cała głowica znajdują się pod pokrywą głowicy;
- przy zastosowaniu czujnika przyspieszeń drgań nie jest możliwe precyzyjne ustalenie stanu technicznego wtryskiwacza;
- wykorzystanie czujnika jest możliwe tylko w określonym paśmie częstotliwości oraz nie dla wszystkich pasm częstotliwości;
- w przypadku diagnostyki wtryskiwaczy na statku, problemem może się okazać likwidacja zakłóceń od innych pracujących maszyn, ponieważ na stanowisku badawczym już pojawiały się zakłócenia.

Wykonano tutaj fragment badań z wykorzystaniem czujników piezoelektrycznych przyspieszeń drgań, przy zastosowaniu wybranych sposobów mocowania czujników pomiarowych oraz wybranych sposobów analizy sygnałów i pasm częstotliwości. Możliwe jest uzyskanie bardziej przydatnych wyników przy zastosowaniu czujnika prędkości drgań oraz przeprowadzeniu badań w dalszych obszarach. Celowe wydaje się, zatem dalsze kontynuowanie badań.

## LITERATURA

- [1] Borisenko A. N. i in.: *Ustrojstwo dlja opredelenija forsunki dizelja. Patent SSSR* 1984, no 1160263.
- [2] Kordos P., Piernikarski D.: *Wpływ stanu technicznego wtryskiwaczy na powtarzalność pracy silnika 4C90*. KONES 2002, Warszawa – Gdańsk 2002, s. 95–103.
- [3] Kowalski J.: *Wpływ stanu technicznego wtryskiwaczy na emisję tlenków azotu ze spalowego silnika okrętowego*. Zeszyty Naukowe. Wyższa Szkoła Morska w Szczecinie 2003 nr 71 s. 213–223.
- [4] Kuzemko J., Głogowski A., Matecki P.: *Wpływ usterek aparatury wtryskowej na parametry pracy wysokoprężnego silnika doładowanego*. Silniki Spalinowe nr 1–2 1983, s. 9–20.
- [5] Gołąbek A.: *Niezawodność autobusów*. Wyd. Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 1993.
- [6] Lejda K., Ustrzycki A.: *Skomputeryzowane stanowisko badawcze do analizy przebiegu wtrysku w aparaturze wtryskowej silników wysokoprężnych*. AUTOMA-SIL'96, Poznań 1996, s. 37–42.
- [7] Monieta J.: *Choice of most deceptive functional system and sub-assembly of marine diesel engines*. Povyšenje Effektivnosti Raboty Energetičeskich Ustanovok. Meždunarodnyj Sbornik Nayčnych Trudov. Kaliningrad 2002, s. 141–146.
- [8] Monieta J.: *Diagnostyka kontrolna wtryskiwaczy silników okrętowych z zastosowaniem parametrów procesów roboczych i towarzyszących*. Zagadnienia Eksploatacji Maszyn 2001 nr 4, s. 167–179.
- [9] Monieta J.: *Estimation of reliability of injectors of marine diesel engines type 6AL20/24*. Eksploatacja i Niezawodność 2003 nr 4, s. 47–55.
- [10] Monieta J.: *Zastosowanie składników emisji spalin wylotowych do oceny stanu technicznego wtryskiwaczy silników okrętowych*. Journal of KONES 2004 vol. 11, no. 3–4, s. 75–82.
- [11] Monieta J., Dyba K.: *Diagnostyka eksploatacyjna wtryskiwaczy silników okrętowych z wykorzystaniem analizy widmowej sygnałów ciśnienia*. Zeszyty Naukowe. Wyższa Szkoła Morska w Szczecinie 2003 nr 71 s. 327–335.
- [12] Piotrowski I., Witkowski K.: *Eksploatacja okrętowych silników spalinowych*. Wyd. Fundacja Rozwoju Wyższej Szkoły Morskiej w Gdyni, Gdynia 2002.
- [13] PN – 90/N – 04002. *Diagnostyka techniczna. Terminologia ogólna*.
- [14] Polanowski S., Łutowicz M., Bruski S., Wontka L.: *Diagnostic and monitoring system of cylinder balancing and technical state control of marine diesel engines*. Explo-Diesel & Gas Turbine'01, Gdańsk – Międzyzdroje – Kopenhaga 2001, s. 249–257.
- [15] Wisłocki K., Kozak W.: *Numerical analysis of injection and combustion processes endoscopic observations*. KONES 2002, Warszawa – Gdańsk 2002, s. 283–290.
- [16] Żółtowski B.: *Podstawy diagnostyki Maszyn*. Wyd. AT – R, Bydgoszcz 1996.
- [17] Żółtowski B., Cempel C.: *Inżynieria diagnostyki Maszyn*. Wyd. Instytutu Technologii Eksploatacji, Warszawa, Bydgoszcz, Radom 2004.



Dr inż. Jan Monieta jest absolwentem Wydziału Maszyn Roboczych i Pojazdów Politechniki Poznańskiej. Pracuje na stanowisku adiunkta w Zakładzie Siłowni Okrętowych Akademii Morskiej w Szczecinie. W pracy naukowej zajmuje się problemami eksploatacji siłowni okrętowych, a zwłaszcza silników spalinowych. Jest autorem i współautorem 70 referatów i publikacji.