

POMIARY CECH STANU TECHNICZNEGO ROZPYLACZY SILNIKÓW OKRĘTOWYCH SPALAJĄCYCH OLEJ NAPEĐOWY*

Czesław JERMAK

Politechnika Poznańska, Instytut Technologii Mechanicznej, Zakład Metrologii i Systemów Pomiarowych
61-542 Poznań, pl. Skłodowskiej-Curie 5 fax. (0-61) 665 35 70, e-mail cz.jermak@interia.pl

Jan MONIETA

Wyższa Szkoła Morska, Instytut Technicznej Eksploatacji siłowni Okrętowych, Zakład Siłowni Okrętowych,
ul. Wały Chrobrego 2, 70-500 Szczecin, fax: (091) 4809 575, email: jmonieta@wsm.szczecin.pl

Streszczenie

Artykuł zawiera wyniki badań cech stanu technicznego rozpylaczy wtryskiwaczy okrętowych silników średnioobrotowych, które zostały wycofane z eksploatacji. Pomiaru wybranych cech stanu dokonano za pomocą badań geometrycznych i przepływowych. Wyniki te dają informacje o zakresach oraz rozkładach zużycia i uszkodzeń rozpylaczy wtryskiwaczy.

Słowa kluczowe: silniki okrętowe, rozpylacze wtryskiwaczy, cechy stanu

Measurements of technical state features of the marine diesel engines injector nozzles combustion diesel oil

Summary

The article contains results of investigations of the technical state features of marine medium-speed engines, which was withdrawing from operational. Measurements of select features of state have been realised geometrical and flow testiness. These results give information about ranges and distributions wear also failures injection nozzles.

Keywords: marine engine, injector nozzles, technical state

1. WSTĘP

Do elementów silnika wysokoprężnego, wykazujących największą zawodność zalicza się wtryskiwacze [2, 4, 7, 11]. Są to jednocześnie elementy mające wpływ na osiągi silnika, zużycie paliwa, toksyczność spalin itp. Najniższą trwałość wtryskiwacza z kolei ma podstawowy jego element – rozpylacz [2].

Stan techniczny rozpylacza określają cechy stanu, których wartości z różną intensywnością wpływają na proces wtrysku paliwa. Rozrzut wartości tych cech na etapie wytwarzania oraz utrudniona kontrola jakości, ze względu na małe rozmiary i dostępność do istotnych parametrów konstrukcyjnych, sprawiają że występuje w nich często początkowa niezdatność [5, 7, 9]. Rozpylacze ulegają intensywnemu zużyciu i uszkodzeniom pod wpływem czynników wymuszających: roboczych, zewnętrznych oraz antropotechnicznych. Podjęto zatem próbę pomiaru istotnych cech makro- i mikrogeometrycznych

rozpylaczy oraz określenia zakresów i rozkładów zużycia, a także ich wpływ na stan techniczny rozpylaczy.

2. ZUŻYCIE I TYPOWE USZKODZENIA ROZPYLACZY

Cechy konstrukcyjne rozpylacza w różnym stopniu wpływają na proces wtrysku paliwa. Do najważniejszych z nich należą (rys. 1) [1, 3, 8]:

- liczba, przekroje i stan powierzchni otworów doprowadzających paliwo;
- kształty i wymiary stożków korpusu i iglicy;
- maksymalny skok iglicy;
- kształty, liczba i średnice otworków rozpylających, ich rozmieszczenie i nachylenie;
- wymiary studzienki rozpylacza;
- luz w części korpusu rozpylacza prowadzącej iglicę.

Ogólnie czynniki wpływające na niezawodne działanie rozpylaczy można podzielić na: konstrukcyjne (rozwiązania konstrukcyjne,

* Praca naukowa finansowana ze środków Komitetu Badań Naukowych w 2003 roku jako projekt badawczy nr 5T12D 00524.

zaprojektowane kształty), technologiczne, produkcyjne (własności fizykochemiczne materiału) i eksploatacyjne [3, 6].

$$S_t = X' \quad (5)$$

następujących cech:

$$S_t = f(\alpha_g, \alpha_i, \mu A_r, h_{max}, i_r, A_{li}, V_s) \quad (6)$$

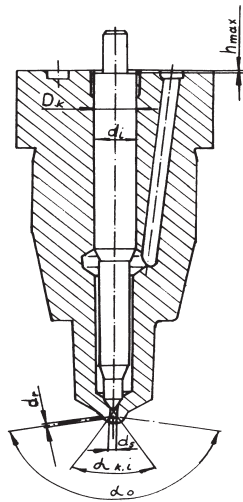
gdzie: A_{li} – powierzchnia luzu pomiędzy częścią prowadzącą korpusu i iglicy rozpylacza, V_s – objętość przestrzeni studzienki rozpylacza, α_g – kąt stożka gniazda uszczelniającego w korpusie rozpylacza, μA_r – czynny przekrój wypływu otworka rozpylającego.

Rozpylacz znajduje się w stanie zdatności, gdy wszystkie cechy stanu zawarte są w polu tolerancji stanu zdatności.

3. OBIEKT BADAŃ

Badaniom poddano rozpylacze produkcji krajowej oznaczane 7 x 0,26 R i 7 x 0,28 R, układów wtryskowych okrętowych silników typu 6AL20/24 napędu prądnic, eksploatowane w rzeczywistych warunkach. Były to rozpylacze siedmiotworkowe o średnicy nominalnej otworka 0,26 i 0,28 mm z elektroerozyjnym zaokrągleniem krawędzi otworków. Wymienione rozpylacze zostały wyłączone z eksploatacji po stwierdzeniu niewłaściwego ich działania lub wymieniono je profilaktycznie.

Przekrój rozpylacza silnika okrętowego typu AL20/24 z zaznaczonymi, istotnymi cechami konstrukcyjnymi przedstawiono na rys. 1.



Rys. 1. Przekrój rozpylacza silnika okrętowego typu AL20/24: d_{ip} – średnica części prowadzącej iglicy, D_k – średnica części korpusu rozpylacza prowadzącej iglicę, d_r – średnica otworka rozpylającego, d_s – średnica studzienki, h_{max} – maksymalny skok iglicy, α_g – kąt stożka gniazda uszczelniającego w korpusie rozpylacza, α_i – kąt wierzchołkowy stożka iglicy, α_o – kąt rozmieszczenia otworków rozpylających

Kadłuby rozpylaczy wykonane są ze stali WCLVŻ ulepszone cieplnie do twardości 37÷42 HRC oraz azotowane. Iglice wykonane są ze stali szybko tnącej SW7M o twardości 62÷64 HRC.

Stan techniczny S_t rozpylaczy uwarunkowany jest wartościami wyselekcjonowanych ze zbioru wektora cech obiektu X' :

4. METODA POMIARU OCENY CECH MAKRO- I MIKROGEOMETRYCZNYCH ROZPYLACZY

4.1. Pomiary geometryczne

Zasadniczym celem tych badań było określenie zakresu zmian cech konstrukcyjnych rozpylaczy. Nie badano zużycia w czasie, bowiem wstępne badania wykazały, że zależy ono w małym stopniu od czasu [7, 9]. Istotniej na stan cech makro- i mikrogeometrycznych rozpylaczy wpływa jakość wytwarzania, jakość stosowanych paliw, warunki eksploatacji, obciążenia itp.

Pomiary geometryczne średnicy i skoku iglicy wykonywane były wysokościomierzem Abbego PO1, firmy Carl Zeiss Jena. Średnicę części korpusu rozpylacza, prowadzącej iglicę, mierzono średnicówką czujnikową z końcówką pomiarową rozprężną. Czujnik posiadał działkę elementarna 0,001 mm.

Średnicę części prowadzącej korpusu i iglicy mierzono w trzech płaszczyznach (I–III), prostopadłych do osi podłużnych oraz dla każdej płaszczyzny w czterech przekrojach, przechodzących przez ich osie co 45° (płaszczyzny IV–VII rys. 2). Na podstawie średnic zewnętrznych iglicy i otworu korpusu w części prowadzącej iglicę, mierzonych w czterech przekrojach, obliczono luz poprzeczny minimalny oraz luz poprzeczny maksymalny według zależności:

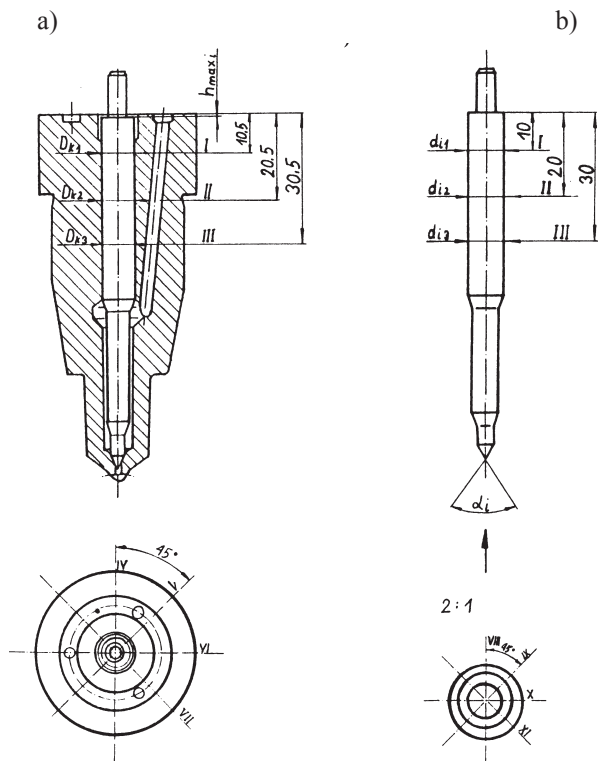
$$L_{min} = D_{k min} - d_{ip max} \quad (1)$$

$$L_{max} = D_{k max} - d_{ip min} \quad (2)$$

Pomiary kąta wierzchołkowego stożka iglicy wykonano mikroskopem warsztatowym. Na każdej iglicy przeprowadzono pomiar w 4. płaszczyznach, przechodzących przez jej oś co 45°. Ostateczny wynik stanowiła średnia arytmetyczna z czterech pomiarów (płaszczyzny VIII–XI na rys. 2b).

Pomiar maksymalnego skoku iglicy prowadzono w czterech płaszczyznach,

przechodzących przez jej oś co 45°, jako różnice powierzchni przylgowej korpusu rozpylacza ioporowej iglicy, przy niezmiennym położeniu iglicy. Za ostateczną wartość maksymalnego skoku przyjmowano najniższą wartość z czterech pomiarów (rys. 2a).



Rys. 2. Schematy przeprowadzania pomiarów: a) średnic korpusu prowadzących iglicę $D_{k1}...D_{k3}$ i maksymalnego skoku iglicy $h_{max1}...h_{max4}$, b) kąta stożka wierzchołkowego iglicy $\alpha_{i1}... \alpha_{i4}$

Za miarę stanu otworków rozpylających przyjęto strumień masy przepływu oleju ze względu na elektroerozyjne zaokrąglenie krawędzi otworków rozpylających i odchylenie od kształtu kołowego, na długości otworków, oraz wpływ chropowatości powierzchni [10]. Pomiary optyczne otworków miały sens dla rozpylaczy bez elektroerozyjnego zaokrąglenia krawędzi otworków wtryskowych w czasie wytwarzania [2]. Próby pomiarów średnic otworów rozpylających za pomocą mikroskopu uniwersalnego, przy powiększeniu obrazu 50x, nie przyniosły rozwiązania z powodu trudności ustalenia zarysu krawędzi tych otworków. Z takim samym skutkiem zakończyły się próby zastosowania mikroskopu warsztatowego z powiększeniem 100 x, we współpracy z kamerą wideo oraz komputerem. Pomiary optyczne otworków rozpylających okazały się nieprzydatne ze względu na brak dostatecznej ostrości krawędzi. Dlatego ostatecznie stan otworków rozpylających określono metodą przepływową.

Pomiary geometryczne okazały się pracochłonne i w znacznym stopniu ograniczone możliwościami przyrządów pomiarowych.

4.2. Wykorzystanie strumienia przepływu paliwa do oceny cech makro- i mikrogeometrycznych rozpylaczy

Za miarę cech otworków rozpylających przyjęto czas wypływu masy 5 kg oleju Shell Calibration Fluid B pod stałym ciśnieniem $10 \pm 0,05$ MPa i o temperaturze $35 \pm 2^\circ\text{C}$. Rozpylacze badano przy maksymalnym skoku iglicy, więc dławienie następowało tylko w otworkach rozpylających. Strumień masy wypływu q_m określono według zależności:

$$q_m = \frac{m}{\tau} \quad (3)$$

gdzie:

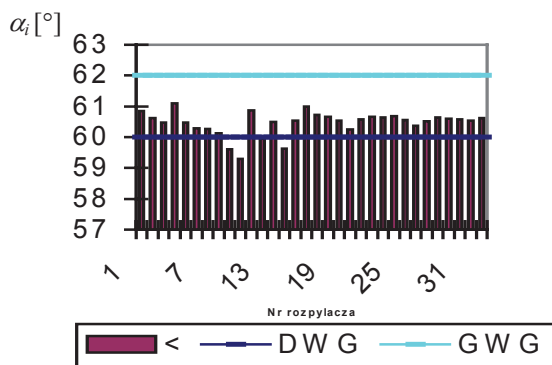
m – masa czynnika [kg],

τ – czas wypływu czynnika [s].

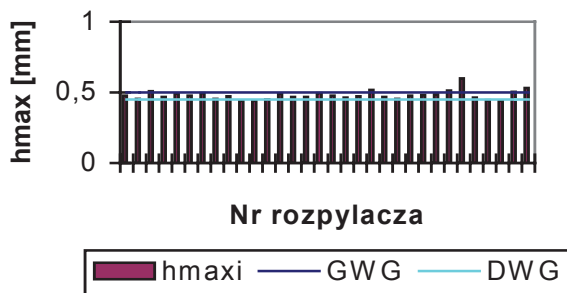
Badania przeprowadzono na zbudowanym do tego celu stanowisku badawczym [10].

5. Wyniki pomiarów cech makro- i mikrogeometrycznych rozpylaczy

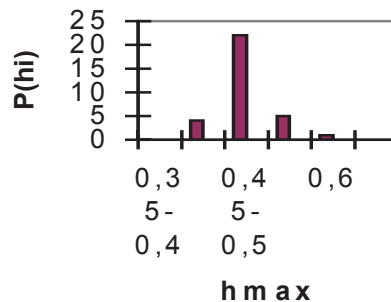
Posługując się wieloma przyrządami pomiarowymi, dokonano pomiarów geometrycznych podstawowych cech konstrukcyjnych rozpylaczy silników okrętowych typu AL20/24. Rozpylacze były przeznaczone do wtrysku oleju napędowego. Nie mierzone wielkości geometrycznych, których małą istotność bądź wątpliwą dokładność wykazali autorzy innych prac [2, 3, 6]. Wyniki pomiarów wybranych wielkości geometrycznych wraz zaznaczeniem poziomów granicznych eksploatowanych, przykładowych rozpylaczy silników typu AL20/24, zamieszczono na rys. 3 do 7.



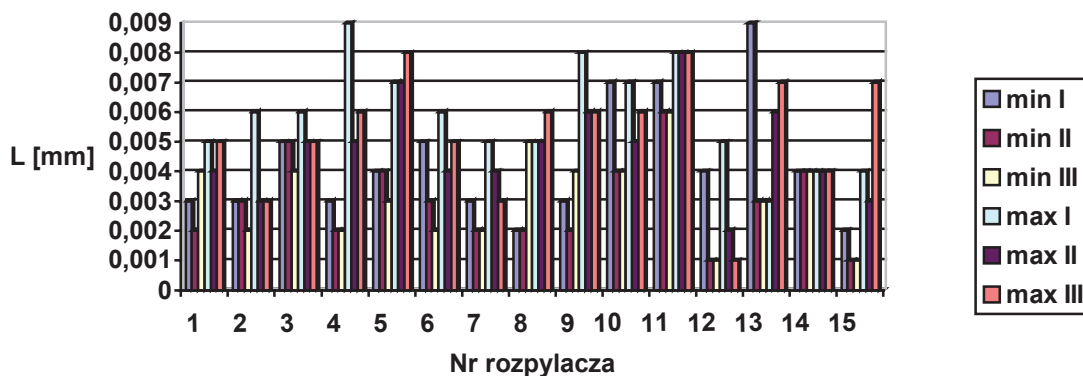
Rys. 3. Przykładowe wyniki pomiarów kąta wierzchołkowego stożka iglicy α_i badanych rozpylaczy: DWG – dolny wymiar graniczny, GWG – górny wymiar graniczny



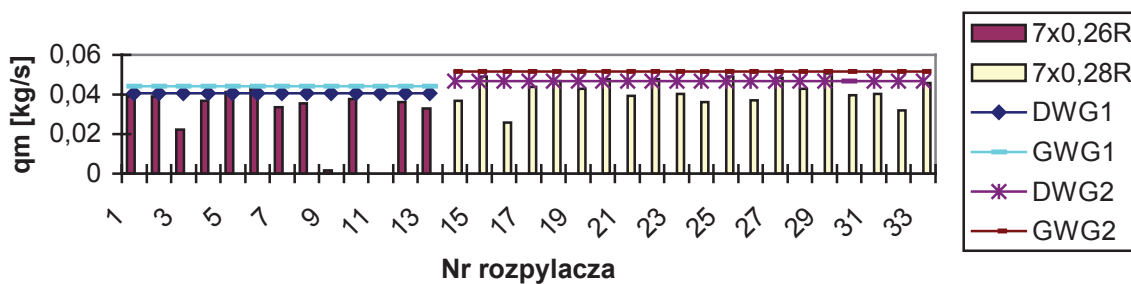
Rys. 4. Przykładowe wyniki pomiarów maksymalnego skoku iglicy h_{max} badanych rozpylaczy



Rys. 5. Częstość występowania wartości maksymalnego skoku iglicy w poszczególnych przedziałach



Rys. 6. Przykładowe wyniki pomiarów luzu minimalnego L_{min} i maksymalnego L_{max} badanych rozpylaczy eksploatowanych, wyznaczonego w płaszczyznach od I do III



Rys. 7. Wyniki pomiaru strumienia przepływu oleju przez otworki rozpylające

Do jakościowej analizy wyników pomiarów cech stanu rozpylaczy posłużono się udziałem procentowym U_p cech, które znalazły się w polu

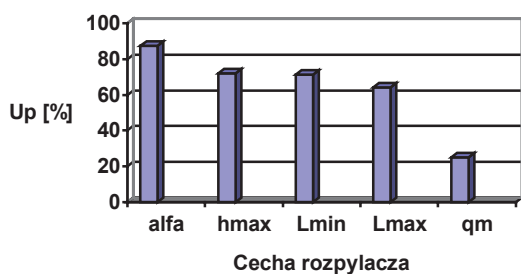
$$U_p = \frac{\sum_{i=1}^{i=l} C_{wi}}{\sum_{i=1}^{i=l} C_{wi} + \sum_{j=1}^{j=m} C_{pj}} \cdot 100\% \quad (6)$$

tolerancji stanu zdatności obliczony według zależności:

gdzie:

C_{wi} – i -ta cecha stanu znajdująca się w polu stanu zdatności,

C_{pj} – j -ta cecha stanu znajdująca się poza polem tolerancji stanu zdatności.



Rys. 8. Udział U_p cech rozpylaczy silników okrętowych typu AL20/24, które mieszczą się w polu tolerancji wytwarzania

Na rys. 8 przedstawiono udział cech stanu technicznego rozpylaczy, które mieszczą się w polu tolerancji stanu zdadności poszerzonym o błędy pomiarów.

Z rys. 8 wynika, że najwięcej stanów niezdatności rozpylaczy spowodowanych było niewłaściwymi wartościami strumienia przepływu oleju przez otworki rozpylające, wywołanym ich zużyciem przez koksowanie oraz ubytki erozyjne, kawitacyjne i korozyjne. Drugą najliczniejszą cechą powodującą stan niezdatności okazał się maksymalny luz pomiędzy luz pomiędzy częścią prowadzącą korpusu rozpylacza i iglicy, determinujący przecieki paliwa i przedmuch spalin.

Na podstawie uzyskanych wyników wykonano także macierz niezdatności binarnie (tabela 1).

Tabela 1. Fragment macierzy stanów technicznych poszczególnych rozpylaczy ze względu na cechy stanu: 1 – stan zdadności, 0 – stan niezdatności

Nr rozpylacza	α_i	h_{max}	L_{min}	L_{max}	q_m
1	1	1	1	1	0
2	1	1	1	1	1
3	1	1	1	1	0
4	1	1	1	0	0
5	1	1	1	0	0
6	1	1	1	1	0
7	1	1	1	1	1
8	1	1	1	1	0
9	0	1	1	0	0
10	0	0	0	1	0
11	1	0	0	0	0
12	0	1	0	0	0
13	1	1	0	1	0
14	0	1	1	1	0

Zgodnie z kryterium zdadności rozpylaczy zawartym w rozdz. 3 tylko 6,25% badanych rozpylaczy znajduje się w stanie zdadności. Tak więc w eksploatacji podjęto decyzje trafnie w 94% przypadków przy uwzględnieniu tylko wymienionych cech stanu technicznego.

6. UWAGI KOŃCOWE

Przeprowadzenie pomiarów geometrycznych okazało się bardzo czasochłonne i pracochłonne co wynikało m. in. z utrudnionego dostępu do małych kanałów rozpylacza i ograniczenia od strony środków pomiarowych.

Proces zużycia rozpylaczy ma charakter złożony i przebiega z różną intensywnością w poszczególnych węzłach konstrukcyjnych. Jedne z badanych cech nie ulegają praktycznie zmianom, inne zaś zmieniają się w miarę upływu czasu eksploatacji pod wpływem czynników wymuszających roboczych i zewnętrznych.

Dominującym sposobem zużycia i uszkodzeń rozpylaczy jest zmiana wymiarów ich otworków rozpylających, wpływających na jakość dawkowania i wtrysku paliwa. Zmiana przekrojów czynnych otworków rozpylających polegała w głównej mierze na zmniejszeniu przekrojów, spowodowanych koksowaniem i tworzeniem osadów z paliwa. Przeprowadzone badania pozwoliły również na wyjaśnienie związków pomiędzy zmianami cech rozpylaczy spowodowanymi ich zużyciem, a ich własnościami funkcjonalnymi – przepływowymi.

Za osiągnięcie przedstawionych badań należy uznać pomiar większej liczby cech makro- i mikrogeometrycznych wtryskiwaczy, niż to czynili inni autorzy, którzy ograniczyli się zazwyczaj do wybranych cech, czy węzłów konstrukcyjnych wtryskiwaczy. Powinno się to przyczynić do zwiększenia wiarygodności badań.

Wyniki badań mogą być przydatne na etapie konstrukcyjnych, wytwarzania i eksploatacji w działaniach zmierzających do zmniejszenia zużycia i uszkodzeń tego słabego elementu, a zarazem istotnego ogniwa silnika spalinowego. Wyniki również powinny być przydatne przy symulacji zużycia i uszkodzeń rozpylaczy w diagnostyce kontrolnej i eksploatacyjnej.

LITERATURA

- [1] Baloiu S. i in.: Cercetări experimentale privind coleratia dintre jetul de combustibil, arhitectura camerei de ardere divicate cu functionare intermientă si miscarea de rotatie a fluidului motor. *Constructia di masini* 1988 no 2, s. 65–70.
- [2] Drozdowski J.: Studium obciążeń cieplnych, kawitacji i niezawodności rozpylaczy silników okrętowych. Wyd. Wyższej Szkoły Morskiej, Szczecin 1998.
- [3] Gąsowski W.: Wpływ zużycia na charakterystyki hydrauliczne i wzrost koksowania rozpylaczy silników wysokoprężnych. *Zagadnienia Eksploatacji Maszyn* 1986 nr 3–4, s. 527–537.
- [4] Gondal A. K., Nautiyal P. C.: Wear investigations of injector nozzle using

- radionuclide technique. *Wear* 1990 no 2, s. 375–384.
- [5] ISO 8984. Diesel engines. Testing of fuel injectors.
- [6] Krasowski E.: Wpływ zużycia par precyzyjnych na parametry pracy silnika wysokoprężnego. Praca naukowa Politechniki Lubelskiej. Mechanika, Lublin 1990 nr 45.
- [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., Wasilewski M.: *Wykorzystanie strumienia przepływu do oceny zużycia otworków rozpylających silników okrętowych*. *Tribologia* 2001 nr 5, s. 947–961.
- [11] Sizov A. G., Ragozin A. V., Makarov A. V.: *Rasčet processa iznašivanija precizjonnych detalej toplivnoj apparatury avtotraktornych dizelej*. NPO „CNITA”. 1990, s. 192–196.



Dr inż. Czesław Janusz Jermak jest absolwentem Wydziału Mechaniczno-Technologicznego Politechniki Poznańskiej w 1974 roku. Tytuł doktora nauk technicznych uzyskał w 1983 roku. Od początku działalności zawodowej zajmował się problematyką pneumatycznych pomiarów długości. Kierował tematami badawczymi w ramach programów: resortowych R07, badań podstawowych CPBP 02-20 oraz grantów w 1996 i 2000 roku. Twórca lub współtwórca ponad 20 opatentowanych konstrukcji z dziedziny pneumatyki pomiarowej, sensoryki i metrologii długości. Jest autorem 23 publikacji i 30 referatów.



Dr inż. Jan Monieta jest absolwentem wydziału Maszyn Roboczych i Pojazdów Politechniki Poznańskiej. Pracuje na stanowisku adiunkta w Zakładzie Siłowni Okrętowych Wyższej Szkoły Morskiej w Szczecinie. W pracy naukowej zajmuje się problemami eksploatacji siłowni okrętowych, a zwłaszcza silników spalinowych. Jest autorem i współautorem 57 publikacji i referatów.