

## SZACOWANIE DOKŁADNOŚCI DIAGNOZOWANIA KONTROLNEGO PODZESPOŁU SILNIKA OKRĘTOWEGO

Jan MONIETA

Instytut Technicznej Eksploatacji Siłowni Okrętowych, Akademia Morska, ul. Wały Chrobrego 2,  
70-500 Szczecin, fax: (091) 48 09 575, e-mail: jmonieta@wsm.szczecin.pl

### Streszczenie

W referacie przedstawiono metodę określenia błędów systematycznych i niepewności przypadkowych toru pomiarowego diagnostyki kontrolnej na przykładzie wtryskiwacza silnika okrętowego. Uwzględniono w niej wpływ niedokładności pomiaru i regulacji parametrów funkcjonowania systemu wtryskowego na końcowy wynik dokładności symptomu diagnostycznego. Sumaryczne błędy obliczono dla różnych parametrów diagnostycznych w dziedzinie czasu, amplitudy i częstotliwości. Wielkość błędu może być jednym z kryteriów wyboru najbardziej przydatnych parametrów diagnostycznych.

Słowa kluczowe: diagnostyka kontrolna, system wtryskowy, dokładność pomiaru

### VALUE OF CONTROL DIAGNOSIS ACCURACY OF SUB-ASSEMBLES OF THE MARINE DIESEL ENGINES

#### Summary

In the paper introduced methods to qualify of systematic errors and accidental uncertainties of measurement line of the control diagnostic on example injector of marine diesel engines. There have been accounted effect inaccuracy measurement and regulation parameters of order of the injection systems on the final results accuracy of diagnostic symptom. Total errors calculated for different diagnostic parameters in domain time, amplitude and frequency. Quantity of errors may be it in one criterions of selection most suitable of diagnostic parameters.

Keywords: control diagnostic, injection system, measurement accuracy

## 1. WSTĘP

Wielkość zmierzona obarczona jest zawsze błędem, wynikającym między innymi z niedokładności metody i przyrządów pomiarowych, wpływu zewnętrznych czynników (temperatury, ciśnienia, wilgotności) oraz indywidualnych cech mierzącego operatora. Wpływ rozmaitych czynników na wynik pomiaru jest różny, dlatego nie otrzymuje się dokładnej wartości mierzonej wielkości, lecz pewne jej przybliżenie. Wartość rzeczywista wielkości mierzonej jest w praktyce nieosiągalna. Wynik pomiaru podany bez określenia wartości towarzyszącego mu błędu jest bezwartościowy [1, 3, 5].

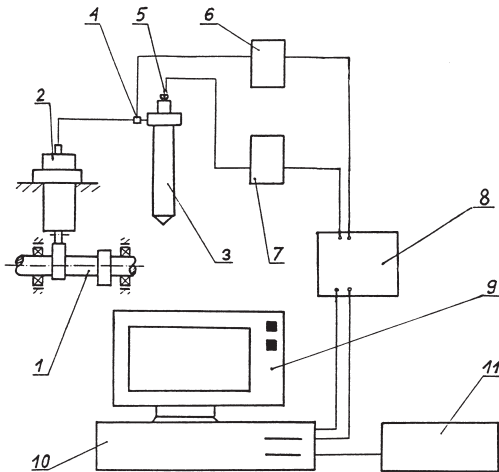
Decyzje diagnostyczne oparte są na pomiarach różnych symptomów i parametrów diagnostycznych, które również obciążone są błędami. W pracy, zatem przedstawiono przykładowe szacowanie błędu średniego kwadratowego metody diagnostycznej.

## 2. OBIEKT BADAŃ

Przykładowy sposób szacowania błędów i niepewności przypadkowych dotyczy stanowiska i metody diagnozowania wtryskiwaczy silników okrętowych na etapie wytwarzania lub obsługiwanego na stanowisku kontrolnym poza silnikiem (rys.1).

W metodzie tej wykorzystuje się tzw. stół probierczy składający się z podzespołów dostarczających paliwo zasilające o temperaturze  $t$ , pod ciśnieniem  $p_z$ , zapewniający napęd wału rozrządu z prędkością obrotową  $n$ . Dawka wtryskiwanego paliwa przez wtryskiwacz o ciśnieniu otwarcia  $p_o$  regulowana jest za pomocą dźwigni paliwowej o nastawie  $N$ . Każdy z wymienionych parametrów regulowany i osiągany jest z określoną dokładnością, co również wpływa na ostateczny błąd wielkości wynikowej, czyli symptomu diagnostycznego.

Tor pomiarowy składa się z przyrządów pomiarowych o określonych klasach dokładności, wpływając na ostateczny błąd pomiaru wielkości wynikowej.



Rys. 1. Schemat diagnostycznego stanowiska badawczego układu wtryskowego: 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

### 3. ANALIZA BŁĘDÓW

#### 3.1. Metoda szacowania systematycznych błędów względnych maksymalnych parametrów funkcjonowania układu wtryskowego

Błędy maksymalne popełnione w badaniach diagnostycznych wtryskiwaczy silników okrętowych oceniano na podstawie największego uchybu odczytu, zależnego od klasy dokładności przyrządu oraz od przedziału wielkości mierzonych wartości [1, 3, 5]. Poniżej zaprezentowano tok szacowania wielkości błędów względnych pomiarów.

Błąd względny maksymalny pomiaru temperatury paliwa zasilającego można określić zależnością:

$$\delta(t_p) = \frac{\Delta t_p}{t_p} 100\% = 100\% \sqrt{\left(\frac{\Delta t}{t}\right)^2 + \left(\frac{\Delta t_{zn}}{t_{zn}}\right)^2}$$

(1)

gdzie:

- $\Delta t$  – działka elementarna na skali termometru,
- $t$  – zakres pomiarowy termometru,
- $\Delta t_{zn}$  – nieczułość znamionowa ultratermostatu (zbiornika paliwa),
- $t_{zn}$  – zakres ultratermostatu.

Błąd względny maksymalny pomiaru ciśnienia zasilania pompy wtryskowej wyznaczono z wzoru:

$$\delta(p_z) = \frac{\Delta p_z}{p_z} 100\% \quad (2)$$

gdzie:

- $\Delta p_z$  – graniczny dopuszczalny błąd bezwzględny manometru,
- $p_z$  – zakres pomiarowy manometru.

Błąd względny maksymalny nastawy paliwowej:

$$\delta(N) = \frac{\Delta N}{N} 100\% \quad (3)$$

gdzie:

- $\Delta N$  – działka elementarna głębokościomierza suwmiarkowego regulacji dawki,
- $N$  – zakres regulacji nastawy paliwowej pompy wtryskowej

Błąd względny maksymalny pomiaru prędkości obrotowej wału rozrządu:

$$\delta(n) = \frac{\Delta n}{n} 100\% = \sqrt{\left(\frac{\Delta n_o}{n_o}\right)^2 + \left(\frac{\Delta n_n}{n_n}\right)^2} \quad (4)$$

gdzie:

- $\Delta n_o$  – uchyb pomiaru prędkości obrotowej,
- $n_o$  – zakres pomiarowy obrotomierza,
- $\Delta n_n$  – założone dopuszczalne odchylenie prędkości obrotowej,
- $n_n$  – zakres zmian prędkości obrotowej.

Błąd względny maksymalny regulacji ciśnienia otwarcia wtryskiwacza można obliczyć

$$\text{następująco: } \delta(p_o) = \frac{\Delta p_o}{p_{o \max}} 100\% \quad (5)$$

gdzie:

- $\Delta p_o$  – graniczny dopuszczalny błąd bezwzględny manometru,
- $p_{o \max}$  – zakres pomiarowy manometru.

Wynikowy błąd względny maksymalny parametrów wtrysku paliwa  $C_w$  określono:

$$\delta(C_w) = 100\% \left\{ \left(\frac{\Delta t_p}{t_p}\right)^2 + \left(\frac{\Delta p_z}{p_z}\right)^2 + \left(\frac{\Delta N}{N}\right)^2 + \left(\frac{\Delta n}{n}\right)^2 + \left(\frac{\Delta p_o}{p_o}\right)^2 \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (6)$$

W dalszej kolejności oszacowano sumaryczne błędy torów pomiarowych parametrów diagnostycznych.

### 3.2. Metoda szacowania sumarycznych błędów systematycznych sygnałów pomiarowych

Oszacowano jakościowo sumaryczne błędy toru przetwarzania sygnałów, a następnie wyznaczania poszczególnych parametrów diagnostycznych.

Błąd względny maksymalny filtra dolnoprzepustowego wynosi:

$$\delta(F_d) = 100\% \sqrt{\left(\frac{\Delta F_d}{F_d}\right)^2} \quad (7)$$

gdzie:

$\Delta F_d$  – sumaryczny bezwzględny uchyb tłumienia filtra dolnoprzepustowego,  
 $F_d$  – napięcie odniesienia.

Błąd względny maksymalny przetwornika analogowo-cyfrowego obliczono następująco:

$$\delta(AC) = 100\% \sqrt{\left(\frac{\Delta AC}{AC}\right)^2} \quad (8)$$

gdzie:

$\Delta AC$  – błąd bezwzględny przetwornika analogowo-cyfrowego,  
 $AC$  – liczba wszystkich bitów.

Błędy względne maksymalne poszczególnych członów przetwarzających  $C_p$  określono wzorem:

$$\delta(C_p) = 100\% \sqrt{\left(\frac{\Delta_{gc}}{x_{gc} - x_{dc}}\right)^2 + \left(\frac{\Delta_{gw}}{x_{gw} - x_{dw}}\right)^2} \quad (9)$$

gdzie:

$\Delta_{gc}$  i  $\Delta_{gw}$  – graniczny dopuszczalny błąd bezwzględny czujnika i wzmacniacza,  
 $(x_{gc} - x_{dc})$  i  $(x_{gw} - x_{dw})$  – zakres pomiarowy czujnika i wzmacniacza.

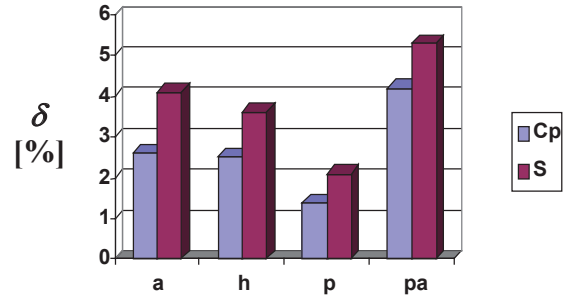
Błąd względny maksymalny poszczególnych torów pomiarowych sygnałów diagnostycznych  $S$ :

$$\delta(S) = \sqrt{[\delta(C_w)]^2 + \delta(C_p)^2} \quad (10)$$

Wartości błędów względnych maksymalnych poszczególnych członów przetwarzających oraz sygnałów diagnostycznych przedstawiono na rys 2.

Otrzymane systematyczne błędy maksymalne poszczególnych członów przetwarzających

i sygnałów diagnostycznych są istotnie zróżnicowane. Wyniki oszacowania błędów posłużyły również do odrzucenia sygnałów ciśnienia akustycznego po badaniach wstępnych, jako najmniej przydatnych.



Rys. 2. Wartości systematycznych błędów względnych maksymalnych  $\delta$  poszczególnych członów przetwarzających  $C_p$  i sygnałów diagnostycznych  $S$ : ciśnienia akustycznego  $p_a$ , ciśnienia w przewodzie wtryskowym  $p$ , przemieszczeń  $h$  i przyspieszeń iglicy rozpylacza  $a$

### 3.3. Metoda szacowania niepewności przypadkowych parametrów diagnostycznych

Błąd średni kwadratowy (odchylenie standardowe) parametru diagnostycznego oblicza się z zależności:

$$\sigma(S_p) = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (S_{pi} - \bar{S}_p)^2} \quad (11)$$

gdzie:

$S_p$  – parametr diagnostyczny,  
 $S_{pi}$  –  $i$ -ta wartość parametru diagnostycznego,  
 $\bar{S}_p$  – wartość średnia parametru.

Błąd bezwzględny średni kwadratowy średniej arytmetycznej parametru diagnostycznego, na który duży wpływ wywiera liczba powtórzonych pomiarów może mieć postać:

$$\sigma_s(S_p) = \frac{\sigma(S_p)}{\sqrt{n}} \quad (12)$$

Błąd względny średni kwadratowy średniej arytmetycznej parametru diagnostycznego wynosi:

$$\bar{\sigma}_s(S_p) = \frac{\sigma_s(S_p)}{\bar{S}_p} 100\% \quad (13)$$

Dla większej pewności ostatecznego wyniku pomiaru można przyjąć wartość  $2\bar{\sigma}_s(S_p)$  z prawdopodobieństwem 95,4% lub  $3\bar{\sigma}_s(S_p)$  z

prawdopodobieństwem 99,7%, jako niepewność oznaczenia wielkości  $S_p$  [1, 3].

Metoda polega na określeniu średniego względnego błędu kwadratowego  $\bar{\sigma}_c(S_p)$ , na który składa się błąd przypadkowy obliczany ze wzoru (13) oraz błąd systematyczny obliczany ze wzoru (10). Obydwa rodzaje błędów dodaje się dla pomiarów bezpośrednich według wzoru [5/52]:

$$\bar{\sigma}_c(S_p) = \sqrt{[\bar{\sigma}(S_p)]^2 + \frac{1}{3}[\delta(S_p)]^2} \quad (14)$$

Błąd wynikowy względny średni kwadratowy średniej arytmetycznej pomiaru, będącego funkcją pomiarów bezpośrednich, gdy parametr wynikowy jest funkcją wartości średnich arytmetycznych parametrów mierzonych bezpośrednio  $S_{pw} = f(S_{pxs}, S_{pys}, S_{pzs} \dots)$ , obliczono ze wzoru:

$$\bar{\sigma}_c(S_{pw}) = 100\% \left\{ \left[ \frac{\partial S_{pw}}{\partial x} \frac{\sigma_s(S_{px})}{S_{pw}} \right]^2 + \left[ \frac{\partial S_{pw}}{\partial y} \frac{\sigma_s(S_{yy})}{S_{yw}} \right]^2 + \left[ \frac{\partial S_{pw}}{\partial z} \frac{\sigma_s(S_{pz})}{S_{pw}} \right]^2 \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (15)$$

Oszacowane przykładowe wartości sumarycznych względnych błędów względnych obwiedni pierwszych sześciu składowych widm, dla sygnałów ciśnienia w przewodzie wtryskowym i przemieszczenia iglicy, zestawiono w tabeli 1.

Tabela 1. Zestawienie wartości sumarycznych błędów względnych pierwszych sześciu amplitud obwiedni składowych widm  $H$  sygnałów ciśnienia  $p$  i przemieszczeń iglicy  $h$

Rodzaj błędu	Jednostka	Sygnał diagnostyczny	
		$p$	$h$
$\bar{\sigma}_c(H_1)$	[%]	$\pm 2,2$	$\pm 3,6$
$\bar{\sigma}_c(H_2)$	[%]	$\pm 2,2$	$\pm 3,7$
$\bar{\sigma}_c(H_3)$	[%]	$\pm 2,2$	$\pm 3,6$
$\bar{\sigma}_c(H_4)$	[%]	$\pm 3,5$	$\pm 3,5$
$\bar{\sigma}_c(H_5)$	[%]	$\pm 2,7$	$\pm 3,5$
$\bar{\sigma}_c(H_6)$	[%]	$\pm 2,9$	$\pm 3,6$

Jeżeli badana wielkość obarczona jest w głównej mierze błędem przypadkowym, to wynik średniej podaje się wraz z odpowiednim przedziałem ufności [2, 3, 4, 5]. Jeśli prawdopodobieństwo ma wynosić 99,7%, wówczas szerokość przedziału ufności będzie równa  $\pm 3 \bar{\sigma}_s$ .

#### 4. PODSUMOWANIE

Z zamieszczonych przykładowo wyników w tabeli 1 wynika, że wartości błędów i niepewności symptomów i parametrów diagnostycznych nie przekraczają  $\pm 5\%$ .

Sumaryczny błąd metody można zmniejszyć stosując przyrządy pomiarowe o wyższych klasach dokładności. Wiąże się to z większymi kosztami poniesionymi na zakup dokładniejszych przyrządów.

Stosowane metody są wystarczająco dokładne, ponieważ sumaryczny błąd metody nie powinien przekroczyć 5% w technice cieplnej oraz 10% w badaniach silników spalinowych [1, 3].

Można stwierdzić również, że uśrednianie wyników wpływa na zmniejszenie wartości sumarycznych błędów względnych parametrów diagnostycznych. Przy wyborze najbardziej przydatnych symptomów diagnostycznych istotnym kryterium może być dokładność wyznaczania danego symptomu.

W badaniach oszacowano również dokładności oszacowania błędów i niepewności dawkowania paliwa oraz pomiaru cech stanu technicznego.

#### LITERATURA

- [1] Bogusławski L. [red.]: Ćwiczenia laboratoryjne z mechaniki płynów. Wyd. Politechniki Poznańskiej, Poznań 1999.
- [2] Cempel. C.: Wibroakustyka stosowana. PWN, Warszawa 1989.
- [3] Serdecki W.: Badania silników spalinowych. Laboratorium. Wyd. Politechniki Poznańskiej, Poznań 1998.
- [4] Strzałkowski A., Śliżyński A.; Matematyczne metody opracowania wyników pomiarów. Wyd. 3 PWN, Warszawa 1978.
- [5] Szydłowski H.: Pracownia fizyczna. PWN, Warszawa 1989.

Praca naukowa finansowana ze środków Komitetu Badań Naukowych w 2003/2004 roku jako projekt badawczy nr 5T12D 00524.



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 ponad 60 publikacji i referatów.