

## STRUCTURAL MODEL OF INJECTOR OF MEDIUM-SPEED MARINE DIESEL ENGINE

Jan Monieta, Sebastian Siedlich

Maritime University Szczecin, Institute of Marine Power Plant Operation  
Waly Chrobrego 2, 70-500 Szczecin, tel.: +48 91 48-09-415  
fax: +48 91 480-95-75, e-mail: jmonieta@am.szczecin.pl

### Abstract

One of main design system affecting work directly of compression ignition engine is injection system. Proper selection of parameter of design this arrangement, system of steering and system of oversight of correctness of work, there is one of basic problem standing before modern project engineers, producers and users of engines and injection equipment.

Complexity of construction of modern injection system it requires proper methods of controls of correct operations, then that substantiates expedience planned and elaborated of models marine diesel engine injectors. It is possible, therefore, accept, that building of reliable structural model of engine diesel engine injector, which would mirror real object and it would take into consideration acquaintance of law ruling phenomenon and perfect other information's process allowing fuel injection.

In this work have been build structural models of marine diesel engine injector type AL20/24, which will allow to restore principles of organizations with definite approximation and localizations geometric, that will lead for obtainment of information of modelled object. In article have been formulate of mathematical dependences and utilization of experimental dates, with enabled calculation of interest parameters and for indexes for simulated process. It takes advantage dependences for it in basic describing work of injection system defining faked process physical equations and dependences complementary and animation of injection processes have been elaborated.

**Keywords:** sea transport, piston marine diesel engines, injector, structural model

## MODEL STRUKTURALNY WTRYSKIWACZA ŚREDNIO-OBROTOWEGO SILNIKA OKRĘTOWEGO

### Streszczenie

Jednym z głównych układów konstrukcyjnych wysokoprężnego silnika spalinowego bezpośrednio oddziałującym na jego pracę, jest system wtryskowy. Odpowiedni dobór parametrów konstrukcyjnych tego układu, systemu jego sterowania oraz systemu nadzoru prawidłowości pracy, jest jednym z podstawowych problemów stojących przed współczesnymi konstruktorami, producentami i użytkownikami silników i aparatury wtryskowej.

Złożoność konstrukcji współczesnych systemów wtrysku wymaga odpowiednich metod kontroli ich poprawnego działania, co z kolei uzasadnia celowość planowania i opracowywania modeli wtryskiwaczy silników okrętowych. Można, zatem przyjąć, że możliwe jest zbudowanie wiarygodnego modelu strukturalnego wtryskiwacza silnika okrętowego, który odzwierciedlałby obiekt rzeczywisty oraz uwzględniałby znajomość praw rządzących zjawiskami i inne informacje pozwalające doskonalić proces wtrysku paliwa.

W pracy tej zbudowano model strukturalny wtryskiwacza silnika okrętowego typu AL20/24, który pozwoli z określonym przybliżeniem odtworzyć zasady organizacji i lokalizację geometryczną, co dalej prowadzić będzie do uzyskania informacji o samym modelowanym obiekcie. W artykule sformułowano zależności matematyczne i wykorzystano dane eksperymentalne, umożliwiające obliczenie interesujących parametrów i wskaźników charakterystycznych dla symulowanego procesu. Wykorzystano do tego zależności opisujące pracę układu wtryskowego w podstawowych równaniach określające symulowane procesy fizyczne oraz zależnościach uzupełniających oraz opracowano animacje procesu wtrysku.

**Słowa kluczowe:** transport morski, okrętowe tłokowe silniki spalinowe, wtryskiwacz, model strukturalny

## 1. Wstęp

Modelowanie stanowi pierwszy etap formalnego ujęcia zagadnień związanych z analizą działania, jak i syntezą obiektów diagnozowania. Modelowanie pozwala z przybliżeniem odtworzyć zasady organizacji, a także zasady funkcjonowania obiektu badań, co w konsekwencji pozwala uzyskać informacje o modelowanym układzie.

Modele diagnostyczne obiektów tworzy się na potrzeby wnioskowania diagnostycznego w badaniach symulacyjnych lub eksperymentalnych [4, 6]. Model obiektu nie jest odbiciem rzeczywistego obiektu, lecz jest tylko odbiciem aktualnie posiadanej wiedzy o nim i dlatego nie może być traktowany jako coś trwałego i nie podlegającego zmianom.

Model diagnostyczny obiektu jest to narzędzie, które pozwala opisać obiekt oraz jego zachowanie w różnych warunkach za pomocą relacji diagnostycznej na zbiorze cech stanu i zbiorze symptomów. Celem modelowania jest uzyskanie wiarygodnego modelu matematycznego, który umożliwia prześledzenie sposobów zachowania się obiektu diagnozowanego w różnych warunkach. Przy budowie modelu korzysta się głównie z praw fizyki, wyrażających równowagę sił, momentów, przepływów, z równań ciągłości i z zależności geometrycznych.

W niniejszym artykule zamierzono przedstawić model strukturalny wtryskiwacza silnika okrętowego, który wchodzi w skład układu zasilania paliwem. Jest to jeden z głównych układów konstrukcyjnych silnika bezpośrednio oddziałujący na jego pracę. Modele strukturalne pokazują powiązania i lokalizację geometryczną wyróżnionych elementów obiektu, wygodne dla analizy organizacji obiektu i zagadnień związanych z kierowaniem i sterowaniem obiektem lub dla analizy jego konstrukcji. Modele te mają zazwyczaj postać opisowo-graficzną [6].

Odpowiedni dobór parametrów konstrukcyjnych tego układu, systemu jego sterowania oraz nadzoru prawidłowości pracy, jest jednym z podstawowych problemów stojących przed współczesnymi konstruktorami, producentami i użytkownikami silników i aparatury wtryskowej. Głównym zadaniem jest opracowanie nowoczesnego, uwzględniającego najnowsze osiągnięcia teoretyczne i numeryczne, modelu wtryskiwacza silnika okrętowego.

## 2. Analiza stanu wiedzy

Każdy model fizyczny ma odpowiadający mu model matematyczny. Modelem matematycznym obiektu mechanicznego jest najczęściej układ równań różniczkowych o pochodnych cząstkowych, a także równania całkowe, które opierają się na bilansie energetycznym, materiałowym lub równaniach procesów fizykochemicznych. Są one trudne do rozwiązania zarówno analitycznego, jak i przybliżonego. W modelach dyskretnych układów występują równania różniczkowe zwyczajne i stąd też są one częściej stosowane w praktyce.

W rzeczywistości istniejącym obiekcie bada się tylko te właściwości, które wyróżniono w modelu. Pominięcie jednych cech, a uwzględnienie innych może spowodować niewłaściwe odwzorowanie elementów lub relacji między nimi. Wówczas model jest nieadekwatny do obiektu, a wyniki badań i diagnozy fałszywe. Dlatego wybór właściwości obiektu, reprezentowanych w modelu, ma istotny wpływ na proces diagnostyczny obiektu i jego eksploatację.

Układ mechaniczny można opisać za pomocą modelu strukturalnego, w którym jego organizacja wewnętrzna jest potrzebna do organizacji wewnętrznej badanego obiektu. Zachodzi także odpowiedzialność elementów modelu i układu oraz zbieżność relacji wejście – wyjście. Model ten przedstawia zależność między masami, elementami sprężystymi, tłumiącymi oraz wymuszeniami. Model ten może być: dyskretny lub ciągły, liniowy i nieliniowy, stacjonarny i niestacjonarny, statyczny i dynamiczny, losowy i zdeterminowany.

Model strukturalny układu mechanicznego jest najczęściej opisany układem równań różniczkowych lub algebraicznych, który można wyprowadzić na podstawie praw dynamiki, zasad wariacyjnych, praw ciągłości itp.

W czasie eksploatacji obiektu technicznego na skutek zużycia: korozyjnego, erozyjnego, zmęczeniowego i ściernego oraz tworzenia osadów, następuje zmiana jego własności dynamicznych, tzn.: bezwładności, odkształcalności, rozproszenia energii. W związku z tym mierząc wartości odpowiednich parametrów układu, można ocenić stan techniczny obiektu.

### 3. Budowa modelu strukturalnego

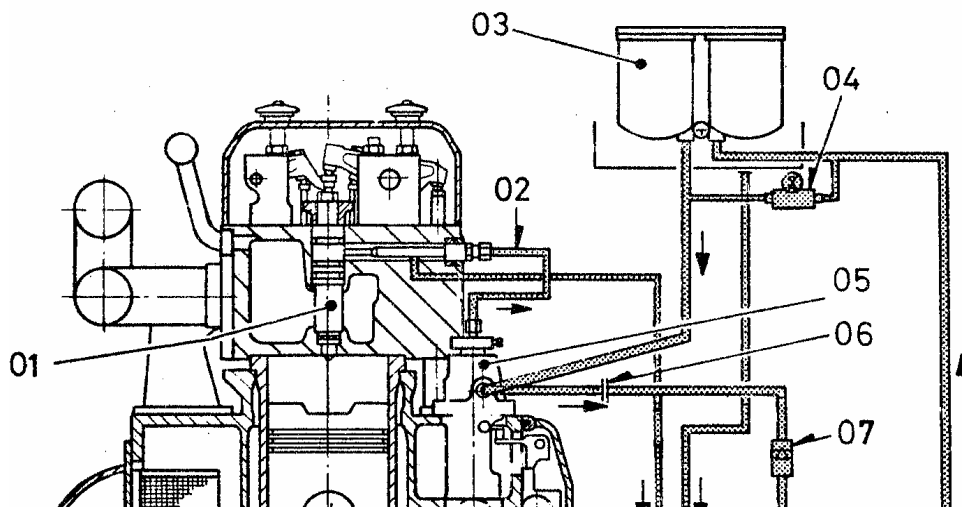
#### 3.1. Ukazanie powiązań wyróżnionych elementów

Obiektem modelowania jest układ wtryskowy czterosuwowego silnika okrętowego. System ten składa się z następujących elementów [2, 3]:

- pompy wtryskowej o krawędziowym sterowaniu dawki systemu Bosch,
- przewodu wtryskowego,
- wtryskiwacza z rozpylaczem wielootworkowym.

Powiązania wyróżnionych elementów pokazano na Rys. 1. Na rysunku tym liczby oznaczają: 1 – wtryskiwacz, 2 – przewód wysokiego ciśnienia, 3 – filtr paliwa (podwójny), 4 – różnicowy wskaźnik ciśnienia, 5 – pompa wtryskowa, 6 – tuleja dławiąca, 7 – zawór zwrotny.

Mimo że wtryskiwacz jest obiektem badań, to funkcje prędkości przepływu na wyjściu z zespołu pompy wtryskowej i wejściu do zespołu wtryskiwacza, stanowią jednocześnie warunki brzegowe dla obliczeń zjawisk falowych w przewodzie wtryskowym. Na wtryskiwacz z kolei oddziałują wymuszenia procesów w komorze spalania.

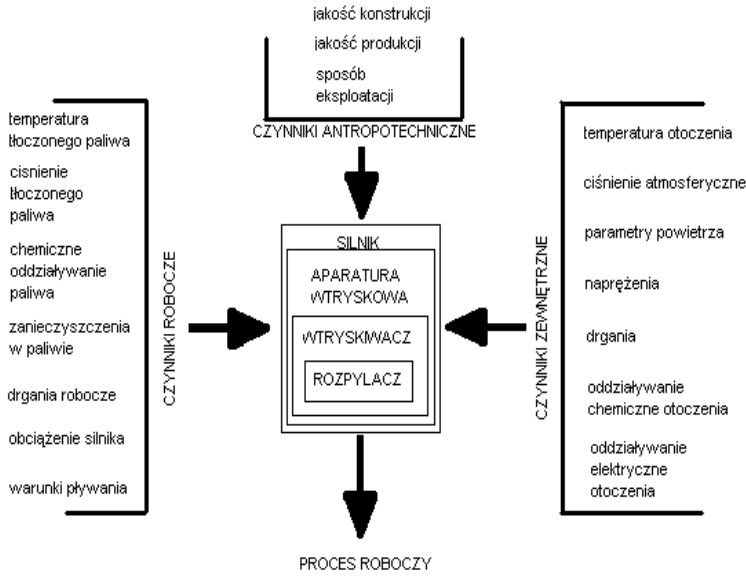


Rys. 1. Przekrój częściowy silnika okrętowego przez aparaturę wtryskową;  
Fig. 1. Part section of marine diesel engine by injection apparatus

Model ma za zadanie przedstawić wpływ wyróżnionych elementów obiektu na poszczególne funkcje wykonywane przez obiekt. Zachodzące w badanym obiekcie zmiany fizyczne są odzwierciedlone w modelu (rys. 2), który ujmuje te procesy w całym cyklu istnienia.

#### 3.2. Wykonanie lokalizacji geometrycznych elementów i podstawowe równania modelu matematycznego

Matematyczny opis zjawisk występujących w układzie wtryskowym przedstawia się w trzech grupach równań, odpowiadających przyjętemu podziałowi układu na trzy zespoły: pompę wtryskową, przewód wtryskowy i zespół wtryskiwacza.



Rys. 2. Model czynników wpływających na stan techniczny wtryskiwacza silnika okrętowego  
 Fig. 2. Model of factor effecting on technical state of marine diesel engine injector

Schemat przestrzeni wtryskiwacza, wykorzystywany w modelu matematycznym, przedstawia rys 3. Konstrukcja układu wtryskowego oraz zróżnicowanie założeń dla poszczególnych elementów tego układu narzuca konieczność podzielenia go na trzy zespoły konstrukcyjne i odpowiadające im trzy podukłady równań opisujących występujące procesy. Ze względu na ograniczoną objętość tego artykułu, ograniczono się tylko do wtryskiwacza.

Równania ciągłości dla komory wtryskiwacza i studzienki rozpylacza przedstawiają odpowiednio równania (1) i (2) [4, 5]:

$$\frac{V_w}{E_{pw}} \frac{dp_w}{d\tau} = A_w u_i - \text{sign}(p_w - p_s) \mu A_g \sqrt{\frac{2}{\rho_w} |p_w - p_s|} - \frac{dV_i}{d\tau} - (A_p - A_i) \frac{dh}{d\tau}, \quad (1)$$

$$\frac{V_s}{E_{ps}} \frac{dp_s}{d\tau} = \text{sign}(p_w - p_s) \mu A_g \sqrt{\frac{2}{\rho_s} |p_w - p_s|} - \varepsilon_s \mu A_s \sqrt{\frac{2}{\rho_s} |p_s - p_k|} - \frac{dV_g}{d\tau}, \quad (2)$$

gdzie:

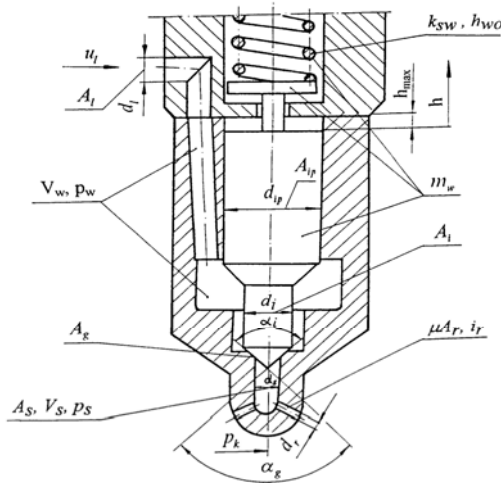
- $p_k$  – ciśnienie w komorze do której odbywa się wtrysk paliwa,
- $\varepsilon_s$  – wskaźnik sterujący, przyjmujący wartości 1 (gdy  $p_s \geq p_k$ ) lub 0 (gdy  $p_s < p_k$ ),
- $\rho$  – gęstość paliwa,
- $\tau$  – czas.

Równanie dynamiki ruchu iglicy można zapisać w postaci:

$$m_w \frac{d^2 h}{d\tau^2} + f_w \frac{dh}{d\tau} + k_{sw} (h + h_{wo}) - p_w (A_p - A_i) - p_s A_i = 0, \quad (3)$$

gdzie:

- $f_w$  – współczynnik oporu viskozycznego w komorze rozpylacza.



Rys. 3. Schemat przestrzeni wtryskiwacza

Fig. 3. Scheme of injector space

Na Rys. 3  $A_g$  – powierzchnia przepływu przez gniazdo iglicy,  $A_i$  – powierzchnia przekroju iglicy,  $A_{ip}$  – powierzchnia przekroju części prowadzącej iglicy,  $A_1$  – powierzchnia przekroju przewodu wtryskowego,  $A_s$  – powierzchnia przekroju studzienki,  $\mu A_r$  – czynny przekrój wypływu otworka rozpylającego,  $d_i$  – średnica iglicy,  $d_{ip}$  – średnica części prowadzącej iglicy,  $d_i$  – średnica wewnętrzna przewodu wtryskowego,  $d_r$  – średnica otworka rozpylającego,  $d_s$  – średnica studzienki rozpylacza,  $h$  – chwilowy skok iglicy rozpylacza,  $h_{max}$  – maksymalny skok iglicy,  $h_{wo}$  – wstępne napięcie sprężyny wtryskiwacza,  $i_r$  – liczba otworków rozpylających,  $k_{sw}$  – stała sprężyny wtryskiwacza,  $m_w$  – masa części ruchomych wtryskiwacza,  $p_k$  – ciśnienie w przestrzeni, do której odbywa się wtrysk paliwa,  $p_s$  – ciśnienie w studzienki,  $p_w$  – ciśnienie w komorze wtryskiwacza,  $u_i$  – prędkość paliwa na wyjściu z przewodu wtryskowego,  $V_s$  – objętość przestrzeni studzienki,  $V_w$  – objętość przestrzeni komory wtryskiwacza,  $\alpha_g$  – kąt stożka gniazda uszczelniającego w korpusie rozpylacza,  $\alpha_i$  – kąt wierzchołkowy stożka iglicy rozpylacza.

W zespole wtryskiwacza występują dwa przekroje, przez które paliwo jest przetłaczane w wyniku różnicy ciśnienia. Są to: gniazdo iglicy wtryskiwacza i otworki rozpylające. Geometryczny przekrój przepływu gniazda iglicy zmienia się wraz ze zmianą położenia iglicy i wyraża się zależnością:

$$A_g = \pi h \sin(0,5\alpha_i)(d_s - 0,5h \sin \alpha_i). \quad (4)$$

Przekrój geometryczny otworków wtryskiwacza jest stały i zależy od średnicy otworków  $d_r$  i ich liczby  $i_s$ :

$$A_s = i_s \pi d_r^2 / 4, \quad (5)$$

gdzie:

$i_s$  – liczba otworków rozpylacza,  
 $d_r$  – średnica otworków rozpylacza.

Problemem jest natomiast wyznaczenie współczynników przepływu  $\mu_w$  i  $\mu_s$ . Współczynniki te wyznaczono eksperymentalnie na stanowisku przepływowym.

Przebieg dawki wtrysku paliwa  $q_k$  określa wzór:

$$q_k = \varepsilon \mu A_s \sqrt{\frac{2}{\rho_s} |p_s - p_k|} . \quad (6)$$

Energia sprężysta zawarta w układzie wysokiego ciśnienia jest równa średniemu ciśnieniu panującemu w tym układzie i wyraża się zależnością:

$$p_E = \frac{E_{sp}}{V_c} . \quad (7)$$

gdzie:

$E_{sp}$  – chwilowa energia sprężysta układu wysokiego ciśnienia,

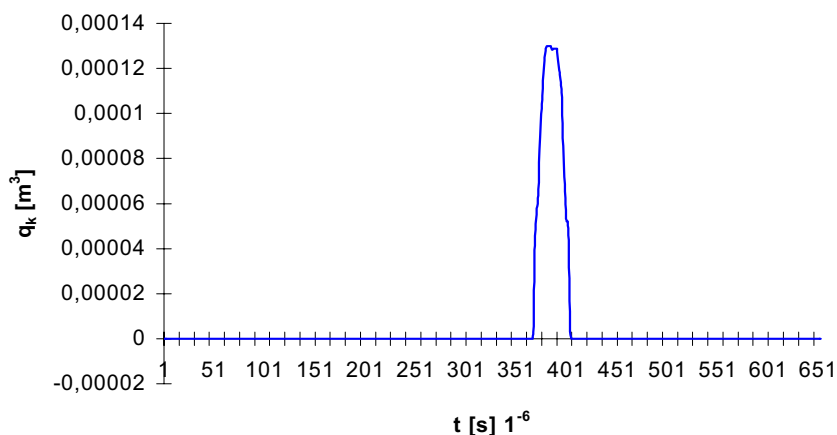
$V_c$  – objętość całkowita przestrzeni.

Przy obliczeniach przyjęto założenia upraszczające:

- stałe ciśnienie w komorze spalania,
- gęstość paliwa jest zmienna,
- stałą temperaturę paliwa i wtryskiwacza,
- stały współczynnik przepływu.

#### 4. Wyniki modelowania wtryskiwaczy silników okrętowych

Podczas modelowania procesu wtrysku paliwa posłużono się programem komputerowym Microsoft Excel. Na rys. 4 przedstawiono przykładowo przebieg dawki paliwa tłoczonej do komory spalania w czasie (wzór 6), wyznaczony na podstawie przebiegu ciśnienia w układzie wtryskowym z badań eksperymentalnych i przy prędkości obrotowej wału rozrządu 375 obr/min [3].



Rys. 4. Przebieg obliczonej dawki paliwa w czasie  
Fig. 4. Course of calculated of fuel dose in time

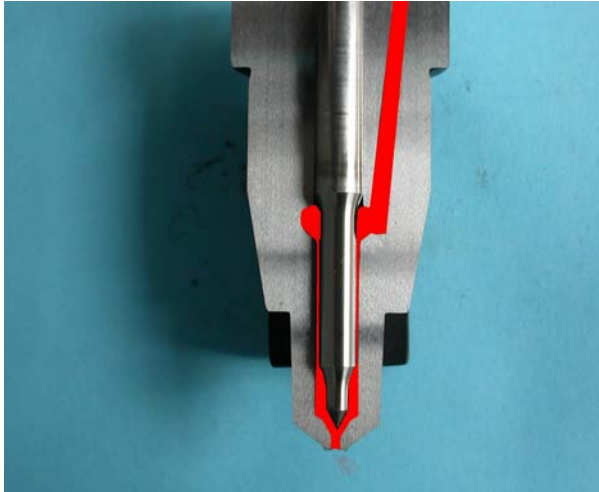
Wykres 4 przedstawia przebieg dawki wtrysku obliczony dla pracy silnika przy częściowym obciążeniu. Można tu zaobserwować, że dawka paliwa gwałtownie wzrasta w chwili otwarcia wtryskiwacza, po czym maleje, czego przyczyną jest zamknięcie wtryskiwacza i koniec wtrysku.

W obliczeniach uwzględniono wpływ ciśnienia i temperatury na takie parametry tłoczonego paliwa jak: gęstość, lepkość kinematyczna i moduł sprężystości. Obliczona dawka była zbliżona do dawki eksperymentalnej.

## **5. Opracowanie animacji procesu wtrysku paliwa**

Na potrzeby pracy została opracowana animacja komputerowa, przedstawiająca funkcjonowanie wtryskiwacza. Przekrój rozpylacza silnika AL20/24 oraz wtrysk dawki paliwa przedstawia jeden slajd animacji na rys 5.

W animacji pokazano wtrysk dawki paliwa, kolejno następuje unoszenie iglicy i stopniowe zapełnianie kanału paliwowego paliwem, następnie pokazano dawkowanie paliwa i ruch iglicy wtryskiwacza ku dołowi, który to kończy wtrysk paliwa.



*Rys. 5. Slajd opracowanej animacji proces wtrysku paliwa silnika okrętowego AL20/24  
Fig. 5. The slide of elaborated animation of the injection process of marine diesel engine AL20/24*

## **6. Wnioski**

Na podstawie wyżej opisanych rozważań można przedstawić następujące wnioski dotyczące modelowania wtryskiwaczy:

- wspólną cechą wszystkich rodzajów modeli jest ich zdolność odzwierciedlania obiektu naturalnego;
- współcześnie opracowywane modele procesu wtrysku nie są doskonałe, a wpływają na to uproszczenia w matematycznym opisie zjawisk fizycznych;
- przedstawiony w artykule model odwzorowuje przebiegi rzeczywiste z dużą dokładnością, co może być przydatne dla wielu zastosowań technicznych i rozważań teoretycznych;
- przedstawiony model pozwolił na zauważenie powiązań pomiędzy parametrami procesu wtrysku a cechami wtryskiwaczy w zależnościach matematycznych, opisujących zjawiska przepływu paliwa oraz zachowania się elementów będących w ruchu podczas pracy wtryskiwacza;
- zwiększenie dokładności obliczeń odwzorowujących proces rzeczywisty wymagało trafnego doboru wartości kilku współczynników określających straty przepływu, straty tarcia itp.;

- możliwe było dokonanie założeń upraszczających, które w znacznym stopniu uprościły tworzenie modelu;
- opracowanie i doskonalenie modelu zależy w znacznym stopniu od dostępu do danych konstrukcyjnych danego silnika;
- w większości przypadków udało się zgromadzić dane konstrukcyjne (lub je wyznaczyć) rozpatrywanego silnika, pomocnych przy wyznaczaniu parametrów procesu wtrysku;
- opracowana na potrzeby pracy animacja komputerowa przedstawiająca ruch iglicy rozpylacza i wtrysk dawki paliwa umożliwia dokonania analizy funkcjonowania wtryskiwacza silnika okrętowego;
- dawka wtrysniętego paliwa obliczona w pracy jest zbliżona do dawki podanej przez producenta;
- w trakcie weryfikacji obliczeń modelu ograniczono się do wyznaczenia wybranych parametrów charakteryzujących proces wtrysku paliw.

## Literatura

- [1] Korczewski, Z., *Introduction to the numerical simulation of gas-dynamic processes within a turbocharging system of a marine engine*. III International Scientific-Technical Conference EXPLO-DIESEL & GAS TURBINE'03, s. 369–374, Gdańsk – Międzyzdroje – Lund, maj 2003.
- [2] Lejda, K., Ustrzycki, A., *Modelling of injection characteristic with in-line type injection pump in diesels engine*. III International Scientific-Technical Conference EXPLO-DIESEL & GAS TURBINE'03, s. 369–374, Gdańsk – Międzyzdroje – Lund, maj 2003.
- [3] Monieta, J., *Diagnostyka kontrolna wtryskiwaczy silników okrętowych z zastosowaniem parametrów procesów roboczych i towarzyszących*. Zagadnienia Eksploatacji Maszyn, nr 4, s. 167–179, 2001.
- [4] Monieta, J., *Modele diagnostyczne wtryskiwaczy silników okrętowych*. II International Congress of Technical Diagnostic. "Diagnostyka 2000", s. 181–182, CD s. 1–6, Warsaw 2000.
- [5] Sobieszcański, M., *Modelowanie procesów zasilania w silnikach spalinowych*. WKiŁ, Warszawa 2000.
- [6] Żółtkowski, B., *Podstawy diagnostyki maszyn*. Wyd. ATR Bydgoszcz, Bydgoszcz 1996.