

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

Jan Monieta

Maritime University Szczecin  
Institute of Marine Power Plant Operation  
Wały Chrobrego 2, 70-500 Szczecin, Poland  
tel.: +48 91 4809415, 4809479, fax: +48 91 4809575  
e-mail: jmonieta@am.szczecin.pl

### Abstract

The paper presents elaborated model of marine diesel engine injector as series of functional blocks notation by means rectangles. The each block is contains determinate number of entrances and exits. The some exits values of one block are entrances values of other blocks.

The elaborated model takes qualification of changeable values of pressures in working chamber of cylinder and course variation of pressure in closed space of injection pump and injector. It takes an aspect of course of pressure values as working parameter at exit. There have been simulated for different load of engine on pressure course in each space of injection apparatus and in cylinder during working cycle on subordination crank angle.

In article have been formulate of mathematical dependence and utilization of experimental dates, with enabled calculation of interest parameters and for indexes for simulated process. The model takes into consideration the properties of the fuel injected, construction parameters of the injection systems and temperature and temperature course of the working medium.

**Keywords:** seagoing vessels, marine diesel engines, injectors, performance, modelling

## MODEL FUNKCJONALNY WTRYSKIWACZA ŚREDNIO-OBROTOWEGO SILNIKA OKRĘTOWEGO

### Streszczenie

W artykule przedstawiono opracowany model wtryskiwacza okrętowego silnika spalinowego, jako zbioru bloków funkcjonalnych oznaczonych za pomocą prostokątów, z których każdy zawiera określoną liczbę wejść i wyjść. Określone wielkości wyjściowe jednego bloku są wielkościami wejściowymi innego bloku.

Opracowany model obejmuje określenie wartości ciśnień zmieniających się w komorze roboczej cylindra i przebiegu zmian ciśnienia w przestrzeniach zamkniętych pompy wtryskowe i wtryskiwacza. Podejmuje on aspekt przebiegu wartości ciśnienia, jako roboczego parametru wyjściowego. Zasyulowano dla różnych wartości obciążenia silnika na przebieg ciśnienia w poszczególnych przestrzeniach aparatury wtryskowej i w cylindrze w czasie cyklu roboczego w zależności od kąta obrotu wału korbowego silnika.

W artykule sformułowano zależności matematyczne i wykorzystano dane eksperymentalne, umożliwiające obliczenie interesujących parametrów i wskaźników charakterystycznych dla symulowanego procesu. Model uwzględnia właściwości wtryskiwanego paliwa, parametry konstrukcyjne sytemu wtryskowego oraz ciśnienie i temperaturę czynnika roboczego.

**Słowa kluczowe:** statki morskie, silniki okrętowe, wtryskiwacze, funkcjonowanie, modelowanie

### 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. Modelowanie pozwala także ograniczyć koszty i czas badań.

Modele diagnostyczne obiektów tworzy się na potrzeby wnioskowania diagnostycznego w badaniach symulacyjnych lub eksperymentalnych [5, 10]. Model nie jest odbiciem rzeczywistego obiektu, lecz jest tylko odbiciem aktualnie posiadanej wiedzy o nim i dlatego nie może być traktowany jako coś trwałego i niepodlegającego zmianom.

Model obiektu jest to narzędzie, które pozwala opisać obiekt oraz jego zachowanie w różnych warunkach za pomocą relacji na zbiorze wielkości wejściowych i wyjściowych. Celem modelowania jest uzyskanie wiarygodnego modelu matematycznego, który umożliwi 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.

Głównym procesem wpływającym na uzyskanie pożądanych parametrów obiegu silnika wysokoprężnego jest przebieg wtrysku paliwa. Dotychczasowe badania wykazały, że najbardziej zawodnym elementem systemu wtryskowego jest wtryskiwacz, a zmiany jego stanu technicznego istotnie wpływają na parametry pracy silnika oraz emisję spalin [6].

Badania systemu wtryskowego można prowadzić na obiekcie rzeczywistym w eksploatacji, na obiekcie rzeczywistym w warunkach laboratoryjnych oraz z wykorzystaniem symulacji komputerowej. Istotą badań symulacyjnych procesu wtrysku paliwa jest opracowanie modeli, pozwalających poznać zjawiska fizycznych, determinujących jakość wtrysku.

W niniejszym artykule zamierzono przedstawić model funkcjonalny wtryskiwacza silnika okrętowego, który wchodzi w skład układu zasilania paliwem. Model funkcjonalny obiektu jest to graficzne przedstawienie urządzenia jako zbioru bloków funkcjonalnych oznaczonych za pomocą np. prostokątów, bloków, z których każdy zawiera pewną liczbę wejść i wyjść, przy czym wielkości wyjściowe pompy wtryskowej mogą być wielkościami wejściowymi wtryskiwacza.

Model funkcjonalny postanowiono zastosować do celów diagnostyki technicznej. Stanowi jeden z wielu typów modeli wykorzystywanych w analizie systemu wtryskowego średnioobrotowego silnika okrętowego [5, 6, 8]. Głównym zadaniem jest opracowanie nowoczesnego, uwzględniającego najnowsze osiągnięcia teoretyczne i numeryczne, modelu wtryskiwacza silnika okrętowego.

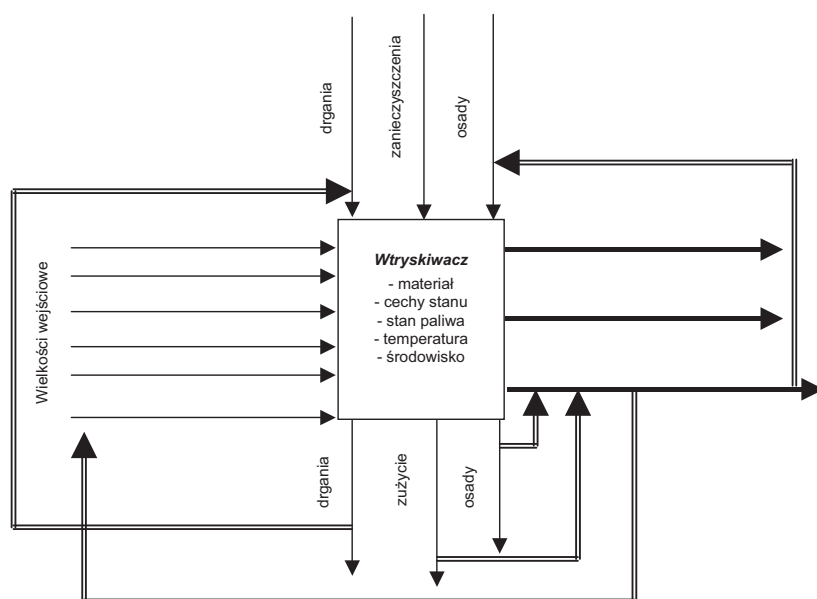
## 2. Budowa modelu funkcjonalnego

Modele funkcjonalne badają wpływ określonych zmian stanu wybranych elementów i zespołów obiektu na jakość zadania spełnianego w trakcie pracy. Zachodzące w obiekcie zmiany fizyczne są dobrze odzwierciedlane w modelu, ujmującym te procesy w całym cyklu istnienia. Procesy takie określa się mianem czynników wymuszających i dzieli się je na trzy zasadnicze grupy:

- czynniki robocze wynikające z działania wtryskiwacza;
- czynniki zewnętrzne uwzględniające otoczenie, w jakim znajduje się wtryskiwacz;
- czynniki antropotechniczne uwzględniające wpływ świadomej lub nieświadomej działalności człowieka.

Model funkcjonalny wtryskiwacza przedstawiono na rys 1. Stan techniczny obiektu można tu określić obserwując jego wyjście główne przekształconej energii rozpylonych cząstek paliwa oraz wyjście dyssypacyjne, gdzie obserwować można różnego rodzaju procesy towarzyszące: termiczne, wibracyjne, akustyczne itp.

Wielkości wyjściowe wtryskiwacza są wielkościami wejściowymi komory spalania. Model funkcjonalny opracowano dla średnio-obrotowego silnika okrętowego napędzającego prądnice typu AL20/24 [8].



Rys. 1. Model funkcjonalny wtryskiwacza  
Fig. 1. Functional model of injector

### 3. Wyniki modelowania

Praca pompy wtryskowej dla sytemu Bosch wymuszana jest krzywką, znajdującą się na wale rozrządu. Ruch tłoka pompy zależy jest od wzniosu krzywki paliwowej i od kąta położenia wału rozrządu  $h_p = h_p(\alpha_w)$ . Zmiana przemieszczenia tłoka pompy w poszczególnych przedziałach czasu pozwala określić wartości prędkości wzniosów w charakterystycznych punktach:

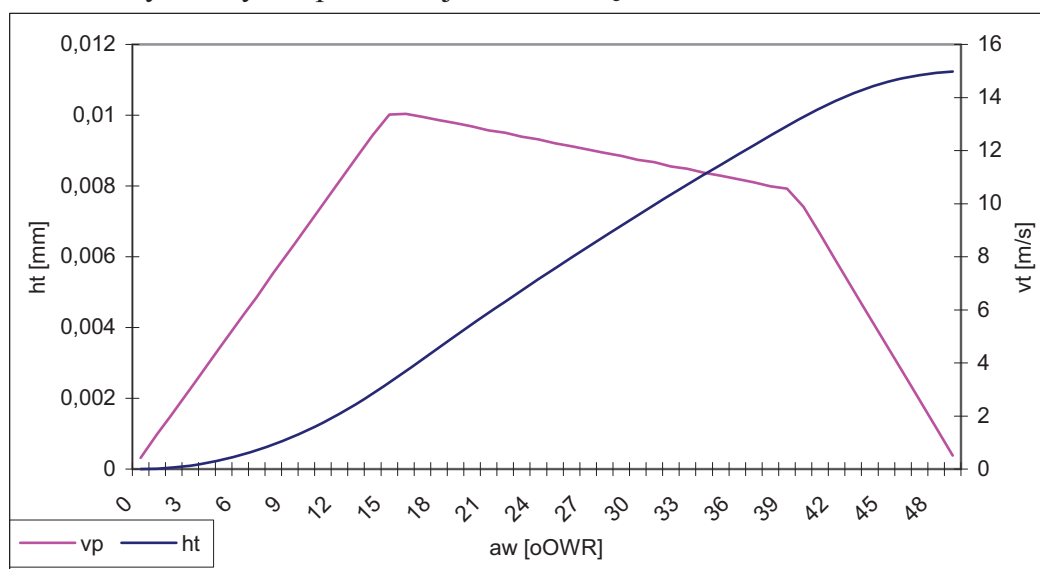
$$v_t = \frac{dh_p}{dt} \text{ [m/s]}, \quad (1)$$

gdzie:

$h_p$  – zmiana położenia tłoka pompy wtryskowej,

$dt$  – zmiana czasu odpowiadająca zmianie kąta obrotu wału rozrządu.

Przebieg wzniosu tłoka pompy wtryskowej oraz prędkości tłoka w fazie tłoczenia pompy wtryskowej, dla silnika AL20/24, przedstawiono na rys. 2. Wielkości te zostały wyznaczone na podstawie kształtu zarysu krzywki paliwowej wału rozrządu.



Rys. 2. Wznios i prędkości tłoka pompy wtryskowej w zależności od kąta obrotu wału rozrządu  
Fig. 2. Lift and velocity of plunger of the injection pump

Strumień tłoczonego paliwa zależy od średnicy tłoka pompy  $d_t$  i prędkości tłoczenia  $v_t$ :

$$q_t = \frac{\pi d_t^2 v_t}{4} \quad [\text{m}^3 / \text{s}]. \quad (2)$$

Spiętrzenie ciśnienia w pompie wtryskowej opisuje zależność [2]:

$$p_p = \frac{E v_p}{a} \quad [\text{MPa}], \quad (3)$$

gdzie:

$E$  – moduł sprężystości paliwa,

$a$  – prędkość rozchodzenia się dźwięku w paliwie.

W przewodzie wtryskowym wystąpi stan ustalony przepływu wówczas, gdy przekrój otworków rozpylających  $A_r$  ma taką wartość, przy której [2]:

$$p_p = p_{pwr}, \quad (4)$$

gdzie:

$p_{pwr}$  – przebieg ciśnienia w pompie wtryskowej.

Pole powierzchni przepływu otworków rozpylających określa zależność:

gdzie:

$$A_r = i_r \frac{\pi}{4} d_r^2, \quad (5)$$

$d_r$  – średnica otworu rozpylającego,

$i_r$  – liczba otworków rozpylających.

Przebieg ciśnienie w komorze wtryskiwacza można obliczyć ze wzoru na strumień tłoczonego paliwa [9]:

$$q_k = \varepsilon_s \mu A_r \sqrt{\frac{2}{\rho} (p_w - p_k)} \quad [\text{m}^3 / \text{s}], \quad (6)$$

gdzie:

$\varepsilon_s$  – wskaźnik sterujący 1 lub 0,

$\mu$  – współczynnik przepływu,

$A_r$  – pole przepływu otworków rozpylających  $[\text{m}^2]$ ,

$\rho$  – gęstość paliwa w temperaturze  $T$ ,

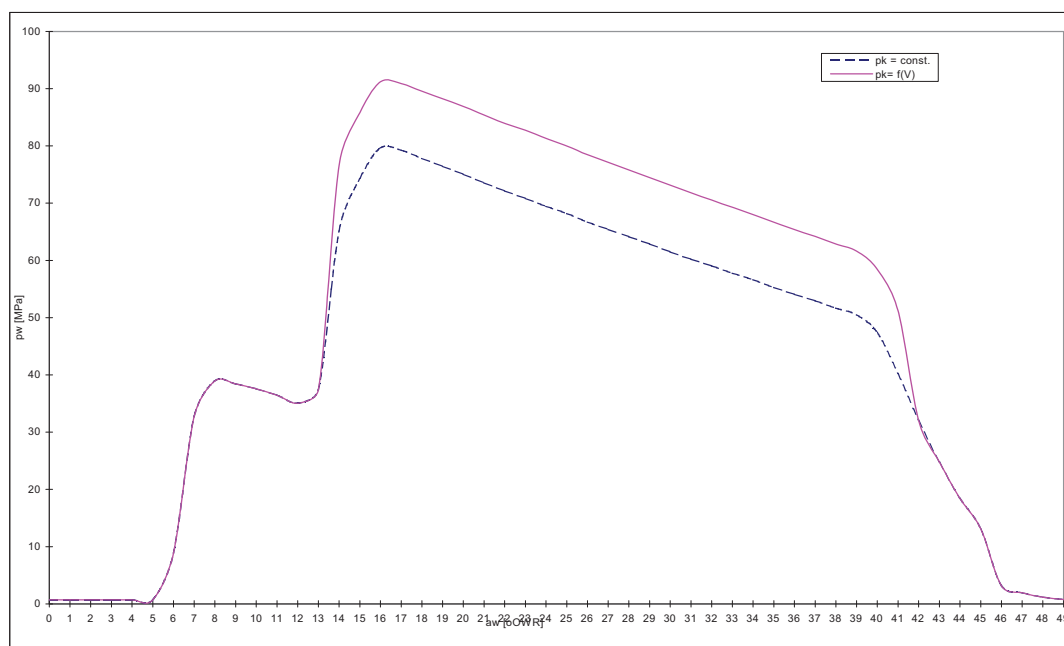
$p_k$  – ciśnienie w przestrzeni, do której odbywa się wtrysk paliwa.

W wielu modelach procesu wtrysku paliwa przyjmowano wartość przeciwcisnienia w komorze spalania jako wartość stałą [1, 4, 9]. W tych badaniach postanowiono uwzględnić zmienne przeciwcisnienie w cylindrze silnika, którego wyznaczenie przebiegów opisano w pracy [7]. Wartości współczynnika przepływu oraz gęstości paliwa określono w badaniach eksperymentalnych.

Ciśnienie całkowite w przestrzeni wtryskiwacza  $p_w$  jest sumą ciśnienia statycznego, którym jest ciśnienie szczątkowe  $p_s$ , oraz ciśnienia dynamicznego zależnego od prędkości tłoczonego paliwa:

$$p_w = p_s + p_d. \quad (7)$$

Połączenie zależności 1-7 pozwoliło oszacować przebieg ciśnienia w przestrzeni wtryskiwacza, którego przebieg bez uwzględnienia zmiennego przeciwcisnienia w komorze, do której odbywa się wtrysk paliwa, oraz przy uwzględnieniu zmiennego przeciwcisnienia w komorze spalania, zależnego od położenia tłoka silnika spalinowego (rys. 3).



Rys. 3. Przebieg ciśnienia w przestrzeni wtryskiwacza przy stałej i zmiennej wartości ciśnienia komorze spalania  
 Fig. 3. Course of pressure in injector camber at constant and variable values of pressure in combustion chamber

Uwzględnienie zmiennego przeciwcisnienia w komorze spalania dało wyższą wartość maksymalną i skuteczną w przebiegu ciśnienia wtrysku. Przedstawiony rysunek przedstawia przebieg wtrysku przy znamionowej prędkości obrotowej silnika spalinowego i przy pełnej nastawie paliwowej.

#### 4. Wnioski

Opracowany model funkcjonalny oraz wykorzystane zależności matematyczne, umożliwiają przeprowadzenie szerokiego zakresu badań procesu wtrysku paliwa. Zmiennymi wejściowymi mogą być: nastawa paliwowa, ciśnienia tłoczenia paliwa, ciśnienie otwarcia wtryskiwacza, przeciwcisnienie, parametry pracy silnika i warunki pracy wtryskiwacza. Cechami stanu technicznego mogą być parametry konstrukcyjne wtryskiwacza, zmieniane stosownie do wartości rozwiązań konstrukcyjnych oraz procesów zużycia i uszkodzeń.

Wielkościami zakłócającymi mogą być: drgania, hałas oraz warunki termodynamiczne otoczenia. Dla silników okrętowych warunki otoczenia wynikają ze stanu morza, strefy klimatycznej i są mocno zróżnicowane.

Aktualnie prowadzone są badania symulacyjne wpływu wartości cech konstrukcyjnych wtryskiwacza na przebieg ciśnienia w przestrzeniach wtryskiwacza, dla określonych w badaniach eksploatacyjnych przedziałów zmienności cech nastaw paliwowych. Oszacowane przebiegi ciśnienia w przestrzeniach wtryskiwacza są zbliżone do przebiegów uzyskanych na drodze eksperymentalnej, na stanowisku sytemu wtryskowego poza silnikiem oraz w badaniach laboratoryjnych rzeczywistego silnika.

#### Literatura

- [1] Ambrozik, A., Kruszyński S., Jakóbiec J., Orliński S., *Wpływ zasilania silnika spalinowego o zapłonie samoczynnym paliwem mineralnym i roślinnym na proces wtrysku oraz rozpad strugi paliwa*, Journal of KONES Powertrain and Transport, vol. 13 no. 3, s. 22–28, 2006.
- [2] Falkowski, H., Hauser, G., Janiszewski, T., Jaskuła, A., *Układy wtryskowe silników wysokoprężnych*. WKŁ, Warszawa, 1989.

- [3] Kafar, I., Merkisz, J., Piaseczny, L., *Model rozpylania paliwa w średnioobrotowym silniku okrętowym i jego badania symulacyjne*, Silniki Spalinowe, nr 3, s. 63–76, 2006.
- [4] 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, Gdańsk – Międzyzdroje – Lund, s. 369–374, maj, 2003.
- [5] Monieta, J., *Modele diagnostyczne wtryskiwaczy silników okrętowych*, II International Congress of Technical Diagnostic, Diagnostyka 2000, s.181–182, CD s. 1–6, Warsaw, 2000.
- [6] Monieta, J., *Using of vibration signal in marine diesel injectors failure diagnosis*, Journal of KONES, No. 1–2, p. 414–419, 2000.
- [7] Monieta, J., Bolin, P., *Modelowanie analityczno-empiryczne przebiegu ciśnienia w cylindrze średnio-obrotowego silnika spalinowego*, Silniki Spalinowe -SC2, s. 369–376, 2007.
- [8] Monieta, J., Siedlich, S., *Model strukturalny wtryskiwacza średnio-obrotowego silnika okrętowego*, Journal of KONES Powertrain and Transport, vol. 13 no. 4, p. 113–120, 2006.
- [9] Sobieszkański, M., *Modelowania procesów zasilania w silnikach spalinowych*, WKiŁ, Warszawa, 2000.
- [10] Żółtkowski, B., *Podstawy diagnostyki maszyn*, Wyd. ATR Bydgoszcz, Bydgoszcz, 1996.