

Simulation studies of selected characteristics of the injection system the common rail medium-speed research engine

Injection Systems of Common Rail type are becoming widely used in marine engines. The aim of the research and development of these systems is to optimize the multi-injection process. The authors of the paper present the results of research on the fuel supply system of research common-rail marine medium-speed engine. The study was conducted for the nominal circulation engine speed. For the analysis were established three variants of fuel supply – a single dose, two-piece and three-piece. The interdependence of measured injection parameters and their effect on engine operation have been presented in graphical form.

Key words: common rail, fuel injection characteristics, single dose and multi-piece dose

Badania symulacyjne wybranych charakterystyk wtrysku układu typu common rail średnioobrotowego okrętowego silnika badawczego

Układy wtryskowe typu common rail znajdują coraz szersze zastosowanie w okrętowych silnikach spalinowych. W badaniach rozwojowych tych układów dąży się do wielokryterialnej optymalizacji przebiegu procesu wtrysku. Autorzy referatu przedstawiają wyniki badań instalacji zasilania paliwem układu typu common rail średnioobrotowego okrętowego silnika badawczego. Badania przeprowadzono dla nominalnej prędkości obrotowej silnika. Do analizy przyjęto trzy warianty zasilania paliwem: dawkę pojedynczą, dwuczęściową i trzyczęściową. Przedstawiono w formie graficznej wzajemne zależności pomierzonych parametrów wtrysku paliwa, a także ich wpływ na pracę silnika.

Słowa kluczowe: system common rail, charakterystyka wtrysku paliwa, podział dawki wtrysku

1. Introduction

The need to obtain relevant characteristics of the fuel injection which would ensure the desired combustion process has led the use of electronic control of fuel injection into the cylinders of combustion engines. The electronic fuel injection systems [1 – 6] have been developing dynamically which can also be observed with marine diesel engines [7, 8]. For several years low-speed ($n = 70 \div 240$ rpm) engines produced by Wärtsilä RT-flex type and the MAN B & W LM-E have been used on ships. The later company has replaced the fuel injection pump (with adjustable dosage overflow valves) with the electronically controlled hydraulic cylinder supplying the conventional injectors. The Wärtsilä Company used a common rail with the Wärtsilä Engine Control System 9500 (WECS-9500). This system electronically controls the operation of injectors as well as controls the operation of start and exhaust valves and pumps of the cylinder lubrication system. Input parameters of this control system are: given and actual engine speed, type of fuel and its maximum dose limited by the operator.

Medium-speed engines ($n = 240 \div 1200$ rpm) are also fitted with the fuel injection systems of CR type. Lifting of the needle in the injectors of these engines is either electromagnetically operated (for the amount of fuel less than $45 \text{ mm}^3/\text{ms}$) or traditionally controlled by hydraulic amplifiers.

The CR systems in the high-speed engines ($n = 1200 \div 2500$ rpm) are analogous to the once used in the automobile industry. Piezoquartz injectors are used in these engines because of the value of injection pressure and the division of fuel delivery into several parts (phases).

1. Wstęp

Konieczność uzyskania odpowiednich charakterystyk procesu wtrysku paliwa, zapewniających pożądany przebieg procesu spalania spowodowała zastosowanie sterowania elektronicznego wtryskiem paliwa do cylindrów silników spalinowych. Nastąpił dynamiczny rozwój stosowania układów elektronicznego wtrysku paliwa [1 – 6], co odnosi się również do okrętowych silników spalinowych [7, 8]. Od kilku lat wolnoobrotowe ($n = 70 \div 240$ obr/min) silniki firmy Wärtsilä typu RT-flex i firmy MAN B&W typu LM-E stosowane są na statkach. Ta ostatnia firma zastąpiła pompę wtryskową paliwa z regulacją dawkowania zaworami przelewowymi sterowanym elektronicznie siłownikiem hydraulicznym, zasilającym tradycyjne wtryskiwacze. Firma Wärtsilä zastosowała system zasobnikowy typu common rail, sterując elektronicznie działaniem wtryskiwaczy za pomocą systemu Wärtsilä Engine Control System – 9500 (WECS-9500), który dodatkowo steruje pracą zaworów wylotowych i rozruchowych silnika oraz pracą pomp układu smarowania cylindrów. Wielkościami wejściowymi tego układu sterowania są: zadana i rzeczywista prędkość obrotowa i kątowa wału korbowego silnika, rodzaj paliwa i jego maksymalna dawka ograniczona nastawą dokonywaną przez operatora.

Silniki średnioobrotowe ($n = 240 \div 1200$ obr/min) również wyposażane są coraz częściej w układy wtrysku paliwa typu common rail (CR). Wtryskiwacze tych silników mają sterowane elektromagnetycznie uniesienie iglicy (dla dawki paliwa mniejszej niż $45 \text{ mm}^3/\text{ms}$) lub tradycyjne – sterowane wzmacniaczami hydraulicznymi.

pressure in the common rail, engine speed, fuel temperature in different sections of the injection system, the injection time and the size of a single injection rate.

3. The program of research

The described test stand allows to perform tests with the use of various numbers of injections.

This paper presents the results of tests carried out under the following assumptions:

- studies were carried out at three values of fuel pressure in the common rail, i.e. 1500, 1350 and 1200 bars;
- single fuel rate was equivalent to that for the engine speed at 1200 rpm;
- the maximum injection time for the engine speed adopted in the present analysis was about 25 °CA, (about 3470 μs);
- for the above assumptions three fuel injection options were adopted, the first – a single injection (as in conventional systems), the second – two-stage injection (1/3 + 2/3), the third – a three-stage injection (0.1 + 0.8 + 0.1);
- for the two-stage injection a constant interval of 850 μs was assumed, while for the three-stage injection the interval between pilot injection and main injection was 700 μs and the interval between the main injection and the post injection was 600 μs.

An injector with an electromagnetic valve (mass flow rate of approximately 0.1054 g/cycle) was used in the present research. As it has been shown by preliminary tests, if the interval between injections is shorter than 700 μs the fuel flow through the nozzle is not fully closed.

4. The results of research

Graphs in Fig. 2 to 4 present results of measurements of fuel injection which have been linearized. Due to limited data points, the to cross-correlations should be regarded as qualitative changes.

(konstrukcja sterownika umożliwia podział dawki na pięć części). Sterownik umożliwia również pomiar i rejestrację: ciśnienia paliwa w kolektorze, prędkość obrotową silnika, temperaturę paliwa w różnych odcinkach układu zasilania, kąt OWK trwania wtrysku, wielkość pojedynczej dawki.

3. Program badań

Opisane stanowisko badawcze umożliwia przeprowadzenie badań przy zastosowaniu wielu sposobów podziału nominalnej dawki wtrysku paliwa.

W niniejszej pracy zamieszczono wyniki badań wykonanych według następujących założeń:

- badania przeprowadzono przy trzech wartościach ciśnienia w zasobniku hydraulicznym wynoszących 1500, 1350 i 1200 barów;
- pojedyncza dawka paliwa miała odpowiadać pracy silnika z prędkością obrotową nominalną, czyli 1200 obr/min;
- przyjętej do analizy prędkości obrotowej odpowiadał maksymalny czas na realizację wtrysku paliwa odpowiadający ok. 25 °OWK, więc dla tej prędkości obrotowej wynosi on 3470 μs;
- dla powyższych założeń przyjęto trzy warianty zasilania: pierwszy – pojedyncza dawka (podobnie jak w układach konwencjonalnych), drugi – dawka dwuczęściowa w proporcjach 1/3 + 2/3, trzeci – dawka trzyczęściowa w proporcjach – 0,1 + 0,8 + 0,1;
- dla dawki dwuczęściowej przyjęto stałą przerwę przesterowania zaworu wynoszącą 850 μs, natomiast dla trzyczęściowej dawki przerwa między dawką pilotującą a główną wynosiła 700 μs i pomiędzy dawką główną a uzupełniającą 600 μs – ze względu na ograniczenia czasowe wynikające z realizacji pełnej dawki przy nominalnej prędkości obrotowej.

Obiektem badań był elektromagnetyczny wtryskiwacz CR z zaworem sterującym o wydatku masowym ok. 0,1054 g/cykl. Jak wykazały wstępne badania, jeżeli przerwa między dawkami jest mniejsza niż 700 μs, nie ma pełnego zamknięcia przepływu paliwa przez iglicę rozpylacza.

4. Wyniki badań

Zestawienie wyników pomiarów dla jednoczęściowej, dwuczęściowej i trzyczęściowej nominalnej dawki paliwa podano w tabeli 1.

Rysunki 2 – 4 przedstawiają wykresy powierzchniowe, na których wyniki pomiarów parametrów wtrysku paliwa zostały zlinearyzowane. Ze względu na zbyt małą liczbę punktów pomiarowych ich wzajemne korelacje należy traktować jako zmiany jakościowe.

Na rysunku 5 przedstawiono wykres sekwencyjny sumarycznego czasu niezbędnego do realizacji dawki paliwa, odpowiednio jedno-, dwu-

Table 1. Test results for the one-stage, two-stage and three-stage injection

Tabela 1. Zestawienie wyników pomiarów dla jednoczęściowej, dwuczęściowej i trzyczęściowej nominalnej dawki paliwa

| Single injection/ dawka jednoczęściowa | | | Two-stage injection/ dawka dwuczęściowa | | | Three-stage injection/ dawka trzyczęściowa | | |
|---|-------------|----------------|--|-------------|----------------|---|-------------|----------------|
| q_{nom} [mg] | p_z [MPa] | t_{sum} [μs] | q_{nom} [mg] | p_z [MPa] | t_{sum} [μs] | q_{nom} [mg] | p_z [MPa] | t_{sum} [μs] |
| 162.48 | 175.0 | 2800 | 143.8 | 150.0 | 3450 | 148.36 | 147.5 | 3610 |
| 132.44 | 150.5 | 2500 | 135.52 | 150.0 | 3250 | 147.2 | 150.0 | 3630 |
| 106.2 | 148.0 | 2000 | 148.35 | 151.0 | 3400 | 148.52 | 150.0 | 3590 |
| 146.84 | 149.7 | 2800 | 142.7 | 145.0 | 3450 | 149.48 | 150.0 | 3560 |
| 141.64 | 148.2 | 3000 | 141.52 | 135.0 | 3600 | 142.28 | 133.0 | 3680 |
| 155.76 | 133.8 | 3200 | 143.56 | 135.0 | 3650 | 150.24 | 136.0 | 3700 |
| 139.6 | 130.0 | 3100 | 152.3 | 133.0 | 3900 | 135.56 | 135.0 | 3650 |
| 143.0 | 134.8 | 3000 | 147.1 | 135.0 | 3700 | 157.32 | 135.0 | 3800 |
| 142.56 | 119.0 | 3130 | 141.36 | 120.0 | 3850 | 141.84 | 123.0 | 3700 |
| 153.2 | 120.0 | 3350 | 131.32 | 120.0 | 3600 | 150.84 | 122.0 | 3900 |
| 159.0 | 118.0 | 3600 | 145.6 | 125.0 | 3800 | 148.74 | 120.0 | 3850 |
| 148.0 | 125.0 | 3150 | 146.7 | 120.0 | 3950 | 146.35 | 121.0 | 3750 |

q_{nom} – nominal injection rate/nominalna dawka paliwa; p_z – fuel pressure in the common rail/ciśnienie w zasobniku hydraulicznym; t_{sum} – total injection time/sumaryczny czas wtrysku

Graph in Fig. 5 presents total injection time for single, two-stage and three-stage injections tested with three dif-

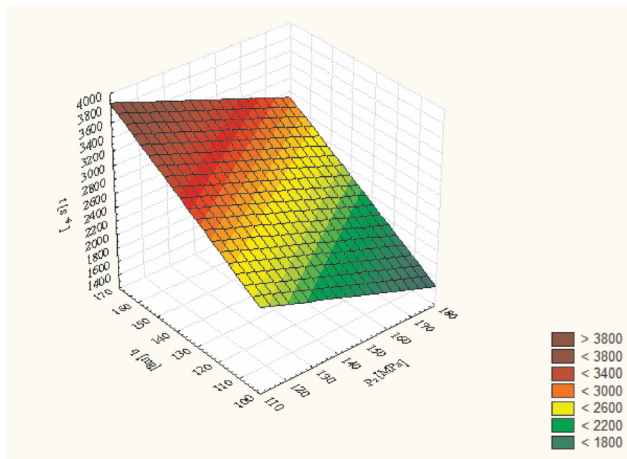


Fig. 2. Dependence of the nominal fuel dose q on the hydraulic pressure p_z and the total time of injection t for a single fuel dose

Rys. 2. Wykres zależności nominalnej dawki paliwa od ciśnienia w zasobniku hydraulicznym i sumarycznego czasu wtrysku dla pojedynczej dawki paliwa

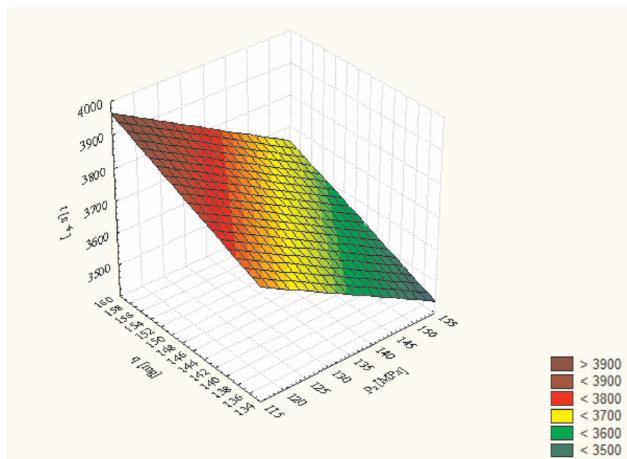


Fig. 4. Dependence of the minimum fuel dose q on the pressure in the common rail p_z and the total time of injection t for the three-piece fuel dose

Rys. 4. Wykres zależności nominalnej dawki paliwa od ciśnienia w zasobniku hydraulicznym i sumarycznego czasu wtrysku dla trzyczęściowej dawki paliwa

ferent values of fuel pressure in the common rail. Figure 6 shows the range of fuel doses for the considered variants of fuel injection. Figure 7 shows the value of pressure in the common rail for the considered variants of fuel injection.

5. Summary

On the basis of the analyses reported on in the present paper, it can be stated that:

- for the analyzed nominal engine speed for which accounts the shortest time of implementation of complete fuel dose, the important parameter that can be used for selection of fuel dose in qualitative aspect is the value of pressure in the hydraulic accumulator;

i trzyczęściowej dla porównywalnych nominalnych dawek przy trzech przyjętych do badań wartościach ciśnienia w zasobniku hydraulicznym.

Na rysunku 6 przedstawiono wielkość dawki paliwa w zależności od wariantu wtrysku wielofazowego, a na rys. 7 – ciśnienie w zasobniku w zależności od wariantu wtrysku wielofazowego.

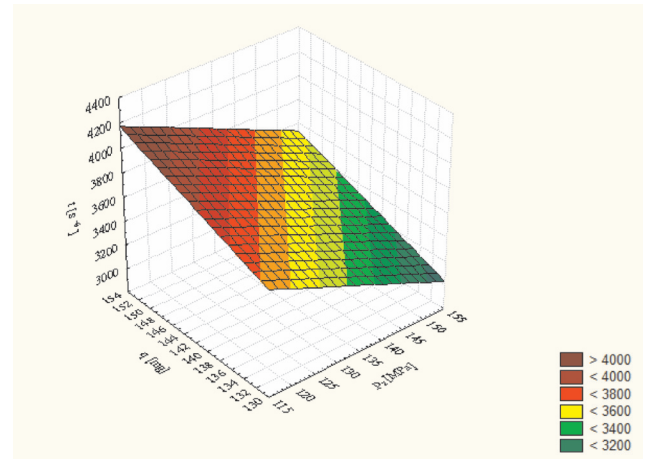


Fig. 3. Dependence of the nominal fuel dose q on the pressure in the common rail p_z and the total time of injection t for the two-piece fuel dose

Rys. 3. Wykres zależności nominalnej dawki paliwa od ciśnienia w zasobniku hydraulicznym i sumarycznego czasu wtrysku dla dwuczęściowej dawki paliwa

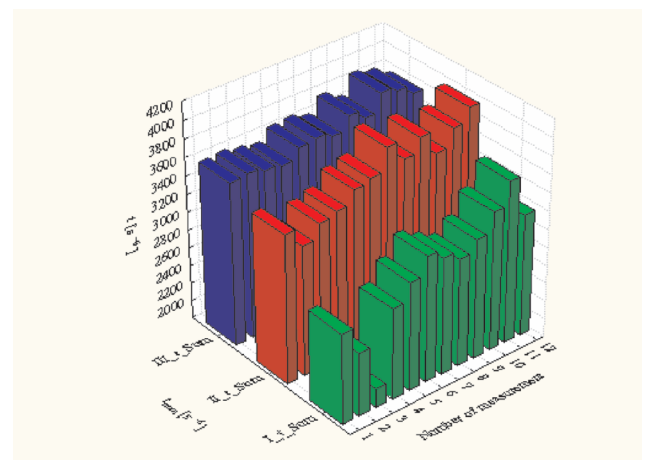


Fig. 5. Dependence of multiplicity of fuel doses on the time required for the completion of comparable fuel doses at different values of pressure p_z in the common rail (measurement 1 – 4 – the highest, 5 – 8 – average, 9 – 12 – the lowest)

Rys. 5. Zależność krotności dawki od czasu niezbędnego do jej realizacji dla porównywalnych wielkości dawek paliwa przy różnych wartościach ciśnieniach p_z (pomiar 1 – 4 – najwyższa; 5 – 8 – średnia; 9 – 12 – najniższa)

5. Podsumowanie

Analizując przedstawione wyniki badań, można stwierdzić, że:

- dla poddanej analizie nominalnej prędkości obrotowej, dla której przypada najkrótszy czas na realizację pełnej dawki paliwa, istotnym parametrem, który można wykorzystać

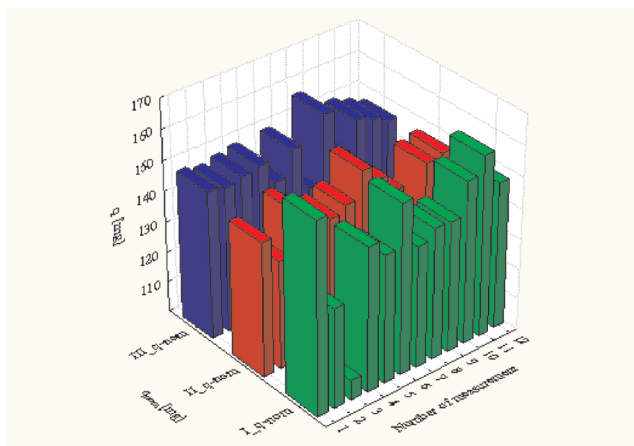


Fig. 6. Diversity of fuel delivery q for the considered injection multiplicity at different values of pressure p_z in the common rail (measurement 1 – 4 – the highest, 5 – 8 – average, 9 – 12 – the lowest)

Rys. 6. Zróżnicowanie dawki paliwa dla rozpatrywanych krotności wtrysku przy różnych wartościach ciśnieniach p_z (pomiar 1 – 4 – najwyższa; 5 – 8 – średnia; 9 – 12 – najniższa)

- total injection time differs for single, two-stage and three-stage injections under the same value of fuel pressure in the common rail;
- it is possible to change the beginning and the end of an injection depending on the number of injections;
- significant differences in the injection rate result from complex wave phenomena, hydraulic shock, turbulence, cavitation, etc. which, in turn, are caused by fast switching on and off injection valves and the valve in the common rail.

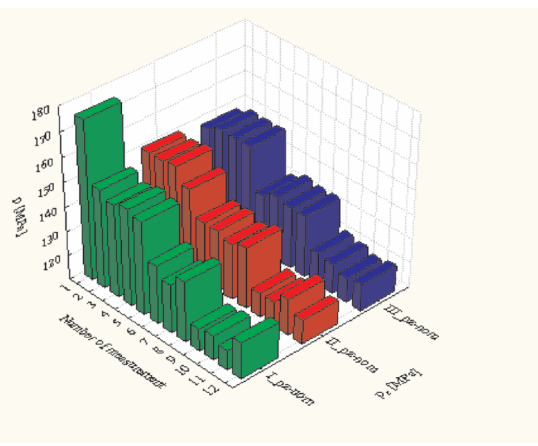


Fig. 7. Fuel pressure in the common rail for the considered multiplicity of injection

Rys. 7. Wartości ciśnień w zasobniku hydraulicznym rozpatrywanych krotności wtrysku

- do doboru dawki pod względem jakościowym, jest wartość ciśnienia w zasobniku hydraulicznym;
- sumaryczny czas na realizację porównywalnych dawek paliwa przy tych samych ciśnieniach, ale różnych krotnościach podziału dawki znacznie się różni;
- dobierając krotność dawki przy określonym ciśnieniu w zasobniku hydraulicznym, można zmieniać kąt początku i końca wtrysku paliwa w zależności od stanu pracy silnika;
- znaczny rozrzut dawki nominalnej paliwa jest efektem skomplikowanych zjawisk falowych, uderzeń hydraulicznych, turbulencji, kawitacji itp., które wywoływane są szybkimi (rzędu ms) przesterowaniami zaworów sterujących we wtryskiwaczach i zasobniku hydraulicznym.

Paper reviewed/Artykuł recenzowany

Bibliography/Literatura

- [1] Sobieszczański M.: Modelowanie procesów zasilania w silnikach spalinowych. Zagadnienia wybrane. WKŁ, Warszawa 2000.
- [2] Smolarz J., Walkowski M.: The model of steady fuel flow in the injector channels in the Common Rail systems. Scientific Journals. Maritime University of Szczecin. 2009, 17(89), s. 80-86.
- [3] Balawender K., Kuszewski H., Lejda K., Ustrzycki A.: The effect of multi-phase injection on selected parameters of the common rail fuel system. Combustion Engines/Silniki Spalinowe, nr 4/2008 (135), s. 22-28.
- [4] Informator Bosch: Zasobnikowe układy wtryskowe Common Rail. WKiŁ, Warszawa 2009.
- [5] Janiszewski T., Mavrantzas S.: Elektroniczne układy wtryskowe silników wysokoprężnych. WKiŁ, Warszawa 2009.
- [6] Kafar I., Merksiz J., Piaseczny L.: Fuel spray model in a medium speed marine engine – a simulation. Combustion Engines/Silniki Spalinowe, nr 3/2006 (126), s. 63-76.
- [7] Krupa A.: State of the art of electronically controlled engines. Combustion Engines/Silniki Spalinowe, nr 1/2004 (118), s. 20-27.
- [8] Kuszewski H., Lejda K., Ustrzycki A.: Determinanty dokładności dawkowania paliwa w systemie zasobnikowego układu zasilania Common Rail. Czasopismo Techniczne, z. 8 – M/2008, s. 161-172.
- [9] Bocheński C.: Możliwość sterowania procesami termodynamicznymi w silnikach wysokoprężnych przy zastosowaniu akumulatorowego (Common Rail) systemu paliwa. Journal of KONES Internal Combustion Engines, 2000, s. 38-44.
- [10] Zbierski K.: Układy wtryskowe Common Rail. Oficyna Wydawnicza, Łódź 2001.
- [11] Merksiz J.: Kierunki rozwoju spalinowych zespołów napędowych. Czasopismo Techniczne, z. 6-M/2004, s. 9-32.

Prof. Leszek Piaseczny, DSc, DEng. – Professor in the Mechanical-Electric Faculty at Naval University of Gdynia.

Prof. dr hab. inż. Leszek Piaseczny – profesor na Wydziale Mechaniczno-Elektrycznym Akademii Marynarki Wojennej w Gdyni.

e-mail: piaseczny@ptnss.pl



Mirosław Walkowski, DEng. – doctor in the Faculty of Technical Sciences at University of Warmia and Mazury in Olsztyn.

Dr inż. Mirosław Walkowski – adiunkt na Wydziale Nauk Technicznych Uniwersytetu Warmińsko-Mazurskiego w Olsztynie.

e-mail: mwal@interia.eu

