

## Method of determining the single and two-part fuel dose injection in the Common Rail system of marine combustion engine

*Marine combustion piston engines are more often equipped with common rail systems, which provide multi-part injection fuel delivery to the cylinder. Dose selection must take into account, among others, its duration, the engine speed and load torque. Practical use of a specific fuel dosing is usually preceded by a study on the test stand simulating the injection process and its dependence on the dose parameters.*

*The authors have presented a method for the selection of these parameters in the case of one- and two-part injection in the medium speed marine engine. There has been presented the manner of creating a mathematical model of the fuel dosing during the injection and research of its characteristics in order to optimize the selection of the amount of fuel, that can be applied in the design of the CR system in the marine combustion engines.*

**Key words:** *Common Rail system, research of fuel dosing, multi-part injection*

### Metoda określania wielkości dawki jedno- i dwuczęściowego wtrysku paliwa w systemie Common Rail okrętowego silnika spalinowego

*Okrętowe tłokowe silniki spalinowe wyposażane są coraz częściej w układy Common Rail zapewniające wieloczęściowy wtrysk dawki paliwa do cylindra. Dobór wielkości dawki musi uwzględniać m. in. czas jej trwania, prędkość obrotową silnika i jego obciążenie momentem obrotowym. Praktyczne zastosowanie określonego dawkowania paliwa poprzedza się zazwyczaj badaniami na stanowisku symulującym proces wtrysku i jego zależność od parametrów dawkowania.*

*W artykule przedstawiono metodę doboru tych parametrów w przypadku jedno- i dwuczęściowego wtrysku paliwa w okrętowym średnioobrotowym silniku spalinowym. Przedstawiono sposób tworzenia matematycznego modelu dawkowania paliwa podczas wtrysku i badania jego charakterystyk w celu optymalizacji doboru dawki paliwa, który może być wykorzystany w projektowaniu układów CR okrętowych silników spalinowych.*

**Słowa kluczowe:** *układ Common Rail, badania dawkowania paliwa, wieloczęściowy wtrysk paliwa*

## 1. Introduction

In the design of a Common Rail (CR) system used in marine piston combustion engines the important issue is the selection of the dosage that must take into account, inter alia, the duration of dosage (or the duration of the individual parts of the injection), engine speed and torque.

In the paper [1], the authors proposed a method for the selection of these parameters for a medium speed marine engine with the injection system in which the fuel dose is divided into three parts. This method uses the theory of experiment planning, which allows obtaining a mathematical model of the fuel dosage during the injection. In this paper, this method was applied to select the single and two-part fuel dose. A single fuel dose in the Common Rail system corresponds to conventional fuel feed systems, the difference is in the manner of control of the fuel dose and the injection timing angle.

## 2. Implementation of the experiment

The selection of the test methods includes the properties of the test stand designed to measure the mass of the fuel dose, and, most importantly, to record the wave phenomena associated with the fuel feed. Another device used in the construction of the test stand is the controller enabling the change of pressure in the hydraulic tank, the total time of the fuel injection with the assumed distribution times of the

## 1. Wstęp

W budowie układów typu Common Rail (CR) stosowanych w okrętowych tłokowych silnikach spalinowych istotnym zagadnieniem jest dobór dawkowania, który musi uwzględniać m. in. czas trwania dawki lub jej części, prędkość obrotową silnika i jego obciążenie momentem obrotowym. Praktyczne zastosowanie określonego dawkowania paliwa poprzedza się zazwyczaj badaniami na stanowisku symulującym proces wtrysku i jego zależność od parametrów dawkowania.

W pracy [1] zaprezentowano metodę doboru tych parametrów dla okrętowego średnioobrotowego silnika spalinowego z układem wtrysku, w którym dawka paliwa podzielona jest na trzy części. Metoda ta opiera się na teorii planowania eksperymentu, co pozwala uzyskać matematyczny model dawkowania paliwa podczas wtrysku. W niniejszej pracy zastosowano tę metodę do doboru wtrysku dla jednoczęściowej i dwuczęściowej dawki paliwa. Jednoczęściowa dawka paliwa w układzie zasilania typu CR odpowiada konwencjonalnym układom zasilania; różnica polega na sposobie sterowania dawką i kątem wyprzedzenia wtrysku.

## 2. Realizacja eksperymentu

Przy doborze metody badań uwzględniono właściwości stanowiska badawczego, które jest przeznaczone do pomiaru

dose (for the given dwell times between each injection of the dose) and the measurement of the mass of a single dose. The structure of the controller allows dividing the fuel dose into five parts. The controller also enables the measurement and recording of the fuel pressure in the manifold, the engine speed, the fuel temperature in different parts of the fuel feed system, the crankshaft angle of the injection period, the latter affecting the time needed to inject a full dose of fuel per cycle [2].

Using some of the above-mentioned features of the test stand the two input and one output values were established – as in tables 1–4. The results of the measurements for two cases are presented there: single dose injected and the dose divided into two parts in the ratio of 40%–60%, for which a constant dwell time of 850  $\mu$ s between the pilot dose and the main dose were set. Due to a low number of input variables (two) and their three values a plan of complete static trivalent experiment was adopted, which was marked as S/DK-32 [3].

The results obtained during the measurement allow determining the approximating functions whose calculations are based on the analysis of variance and provide [3, 4]:

- evaluation of the main effects and interactions,
- determining the correlation of the input and the output values,
- determining the regression coefficients of the approximating functions,
- evaluation of the accuracy of the approximation of approximating polynomials.

Table 2. Plan of the experiment and the results of the measurements of the fuel delivery for the single dose

Tabela 2. Plan doświadczenia i wyniki pomiarów dawki paliwa dla dawki jednoczęściowej

Number of measurement system/ numer układu pomiarów	$p_z$ [MPa]	Total time of injection/sumaryczny czas wtrysku [ $\mu$ s]	Fuel dose/dawka paliwa [mg/inj.]
1	120	3000	137.58
2	120	1950	92.39
3	120	900	45.38
4	135	3000	143
5	135	1950	101.53
6	135	900	49.94
7	150	3000	158.84
8	150	1950	107.65
9	150	900	50.68

The software package used for the analysis enabled research with the following models:

- models not taking the interaction into account,
- models taking the linear-linear interaction into account,
- models taking the linear-square interaction into account.

The final decision considering the selection of the model is taken by an operator familiar with the theoretical basis of the investigated problems.

masy dawki paliwa, ale także, co ważniejsze, rejestracji zjawisk falowych towarzyszących zasilaniu paliwem. Dodatkowym urządzeniem zastosowanym w budowie stanowiska jest sterownik umożliwiający zmiany ciśnienia w zasobniku hydraulicznym i całkowitego czasu wtrysku paliwa przy założonej krotności podziału dawki (dla danych przerw pomiędzy wtryskiem poszczególnych jej części) oraz pomiar masy pojedynczej dawki. Konstrukcja sterownika umożliwia podział dawki na pięć części. Sterownik umożliwia również pomiar i rejestrację: ciśnienia paliwa w kolektorze, prędkości obrotowej silnika, temperatury paliwa w różnych odcinkach układu zasilania i kąta OWK trwania wtrysku, co przekłada się na czas dysponowany na realizację pełnej dawki paliwa na jeden cykl [2].

Table 1. The comparison of the input values for the single dose

Tabela 1. Zestawienie wartości wielkości wejściowych dla dawki jednoczęściowej

No.	Name of the input value/ nazwa wielkości wejściowej	Mark and dimension/ oznaczenie i wymiar	Low value/ wartość dolna	Average value/ wartość średnia	High value/ wartość górna
1	Pressure in the hydraulic tank/ciśnienie w zasobniku hydraulicznym	$p_z$ [MPa]	120	135	150
2	Total time of injection/sumaryczny czas wtrysku paliwa	$t$ [ $\mu$ s]	900	1950	3000

Wykorzystując niektóre z wymienionych wyżej możliwości stanowiska badawczego, przyjęto dwie wielkości wejściowe i jedną wyjściową – jak podano w tabelach 1–4. Rozpatrzono dwa przypadki: gdy pojedyncza dawka została wtrysnięta w jednej części oraz gdy została podzielona na dwie części w proporcji 40%–60%, przy czym przyjęto między dawką pilotującą a główną stały odstęp czasowy równy 850  $\mu$ s. Z uwagi na niewielką liczbę wielkości wejściowych (dwie) i ich trzy wartości przyjęto plan doświadczenia statyczny kompletny trójwartościowy oznaczany PS/DK-3 [3].

Uzyskane podczas pomiarów wyniki pozwoliły na określenie funkcji aproksymujących, których obliczenia opierają się na analizie wariancji i zapewniają [3, 4]:

- ocenę tzw. efektów głównych i interakcji,
- wyznaczenie korelacji wielkości wejściowych z wyjściowymi,
- wyznaczenie współczynników regresji funkcji aproksymujących,
- ocenę dokładności przybliżenia wielomianów aproksymujących.

Wykorzystany do analizy pakiet oprogramowania umożliwił przeprowadzenie badań z użyciem następujących modeli:

- nieuwzględniających interakcji,
- z uwzględnieniem interakcji liniowo- liniowych,
- z uwzględnieniem interakcji liniowo-kwadratowych.

Tabela 3. Input values for the two-part dose

Tabela 3. Zestawienie wartości wielkości wejściowych dla dawki dwuczęściowej

No.	Name of the input value/nazwa wielkości wejściowej	Mark and size/oznaczenie i wymiar	Low value/wartość dolna	Medium value/wartość średnia	High value/wartość górna
1	Pressure in the hydraulic accumulator/ciśnienie w zasobniku hydraulicznym	$p_z$ [MPa]	120	135	150
2	Total fuel injection time/sumaryczny czas wtrysku paliwa	$t$ [ $\mu$ s]	1650	2650	3650

Table 4. Plan of the experiment and the results of the measurements of the fuel delivery for the two-part dose

Tabela 4. Plan doświadczenia i wyniki pomiarów dawki paliwa dla dawki dwuczęściowej

Number of measurement system/ numer układu pomiarów	$p_z$ [MPa]	Total time of injection/sumaryczny czas wtrysku [ $\mu$ s]	Fuel dose/dawka paliwa [mg/inj.]
1	120	3650	134.08
2	120	2650	94.12
3	120	1650	52.72
4	135	3650	143.56
5	135	2650	99.12
6	135	1650	60.2
7	150	3650	153.78
8	150	2650	93.32
9	150	1650	62.38

In the case of the analyzed experiment for the single fuel dose, the approximating function upon identification may take the following forms, depending on the type of interaction:

– not taking the interaction into account:

$$q = -15.28091 - 0.251333 \cdot p_z + \\ + 0.002652 \cdot p_z^2 + 0.05702 \cdot t - \\ - 0.00000268 \cdot t^2$$

– taking the linear-linear interaction into account:

$$q = 51.409 - 0.74533 \cdot p_z + 0.00265 \cdot p_z^2 + \\ + 0.02282 \cdot t - 0.00000268 \cdot t^2 + \\ + 0.000253 \cdot p_z \cdot t$$

– taking the linear-square interaction into account:

$$q = 251.381 - 3.5458 \cdot p_z + 0.01234 \cdot p_z^2 - \\ - 0.63431 \cdot t + 0.000236 \cdot t^2 - \\ - 0.009832 \cdot p_z \cdot t + 0.000003499 \cdot p_z \cdot t^2 - \\ - 0.0000346 \cdot p_z^2 \cdot t + 0.000000127 \cdot p_z^2 \cdot t^2$$

Similarly to the above, for the two-part fuel dose:

– without taking into account the interaction:

Ostateczną decyzję co do wyboru modelu podejmuje operator znający podstawy teoretyczne badanego zagadnienia.

W odniesieniu do analizowanego eksperymentu, dla dawki jednocząściowej, funkcja aproksymująca w wyniku przeprowadzonej identyfikacji może mieć następujące postacie w zależności od rodzaju uwzględnionej interakcji:

– bez uwzględnienia interakcji:

$$q = -15.28091 - 0.251333 \cdot p_z + \\ + 0.002652 \cdot p_z^2 + 0.05702 \cdot t + \\ - 0.00000268 \cdot t^2$$

– z uwzględnieniem interakcji liniowo- liniowych:

$$q = 51.409 - 0.74533 \cdot p_z + 0.00265 \cdot p_z^2 + \\ + 0.02282 \cdot t - 0.00000268 \cdot t^2 + \\ + 0.000253 \cdot p_z \cdot t$$

– z uwzględnieniem interakcji liniowo- kwadratowych:

$$q = 251.381 - 3.5458 \cdot p_z + 0.01234 \cdot p_z^2 + \\ + 0.63431 \cdot t + 0.000236 \cdot t^2 + \\ + 0.009832 \cdot p_z \cdot t + 0.000003499 \cdot p_z \cdot t^2 + \\ + 0.0000346 \cdot p_z^2 \cdot t + 0.000000127 \cdot p_z^2 \cdot t^2$$

Dla dawki dwuczęściowej analogicznie do powyższego:

– bez uwzględnienia interakcji:

$$q = -226.77 + 3.38933 \cdot p_z - 0.011378 \cdot p_z^2 + 0.01301 \cdot t + 0.0000056 \cdot t^2$$

– taking the linear – linear interaction into account:

$$q = -166.9 + 2.9459 \cdot p_z - 0.01138 \cdot p_z^2 - 0.009583 \cdot t + 0.0000056 \cdot t^2 + 0.0001673 \cdot p_z \cdot t$$

– taking the linear-square interaction into account:

$$q = 1243.9 - 21.464 \cdot p_z + 0.0912 \cdot p_z^2 - 1.333 \cdot t - 0.000278 \cdot t^2 + 0.0227 \cdot p_z \cdot t - 0.0000046 \cdot p_z \cdot t^2 - 0.0000936 \cdot p_z^2 \cdot t + 0.000000019 \cdot p_z^2 \cdot t^2$$

In the above-mentioned polynomials the regression coefficients were set, in which the significant numbers occur on distant decimal places, yet, their product with the specified parameters results in values significant for the study.

To assess the reliability of the analysis included in the above-adopted models of multiple regression a review of the results of the unconverted output value was performed.

$$q = -226.77 + 3.38933 \cdot p_z - 0.011378 \cdot p_z^2 + 0.01301 \cdot t + 0.0000056 \cdot t^2$$

– z uwzględnieniem interakcji liniowo- liniowych:

$$q = -166.9 + 2.9459 \cdot p_z - 0.01138 \cdot p_z^2 - 0.009583 \cdot t + 0.0000056 \cdot t^2 + 0.0001673 \cdot p_z \cdot t$$

– z uwzględnieniem interakcji liniowo- kwadratowych:

$$q = 1243.9 - 21.464 \cdot p_z + 0.0912 \cdot p_z^2 - 1.333 \cdot t - 0.000278 \cdot t^2 + 0.0227 \cdot p_z \cdot t - 0.0000046 \cdot p_z \cdot t^2 - 0.0000936 \cdot p_z^2 \cdot t + 0.000000019 \cdot p_z^2 \cdot t^2$$

W podanych wyżej wielomianach wyznaczono współczynniki regresji, w których liczby znaczące występują wiele miejsc po przecinku, jednak ich iloczyn z podanymi parametrami daje w rezultacie wartości znaczące dla prowadzonej analizy.

W celu oceny wiarygodności analiz uwzględnionych w przyjętych wyżej modelach regresji wielokrotnej dokonano przeglądu wyników dla nieprzekształconej wielkości wyjściowej.

Wyniki wskazują na to, że dla modelu bez interakcji i z interakcją liniowo-liniową największą istotność testów wykazują liniowe składniki równań. Dla przykładu, prawdopodobieństwo uzyskania przypadkowego wyniku p dla powyższych składników równań nie przekracza 0,015, wartość rozkładu t-Studenta znacznie przekracza minimalne wartości dla przyjętej liczby stopni swobody i  $p < 0,05$ . Analiza modelu równania regresji z interakcją liniowo-kwadratową nie jest istotna statystycznie ( $R^2 > 1$ , co jest sprzeczne z definicją współczynnika determinacji), o czym świadczą wielkości i miary oceny zamieszczone w tabelach 5 i 6.

Wykresy warstwiczne (rys. 1–4) pozwalają przewidywać dawkę paliwa na wtrysk w podanych przykładowo na rysunkach przedziałach zmian  $p_z$  i  $t$ . Na przykład dla dawki dwuczęściowej przy  $p_z = 142$  MPa i  $t = 2100$   $\mu$ s estymowana dawka paliwa wg modelu bez interakcji wynosi  $II_{q\_bi} = 77,11$  [mg/wtr.], a z interakcją liniowo-liniową  $II_{q\_ll} = 76,46$  [mg/wtr.].

Na wykresach rozrzutu (rys. 5–8) przedstawiono zależności dawki paliwa

Table 5. The summary of specific values and evaluations of the function fitness of the research object describing the single-part fuel dosage

Tabela 5. Zestawienie charakterystycznych wielkości i miar oceny dopasowania funkcji obiektu badań opisującej jednoczęściowe dawki paliwa

No.	Value/wielkość	Model		
		without the interaction/bez interakcji	with the linear-linear interaction/z interakcjami liniowo-liniowymi	with the linear-square interaction/z interakcjami liniowo-kwadratowymi
1	Regression coefficient/ współczynnik regresji bi	$p_z$	-0.2513333	-0.74533
		$p_z^2$	0.002651851	0.00265
		$t$	0.057021768	0.02282
		$t^2$	-0.000002678	-0.00000
2	Average estimation error of the parameter/średni błęd szacunku parametru Sbi	$p_z$	3.94388055	2.3386
		$p_z^2$	0.01459946	0.0086
		$t$	0.01175952	0.0137
		$t^2$	0.00000298	0.0000
3	Quotient/iloraz $t = bi/Sbi$	$p_z$	-0.063727	-0.31872
		$p_z^2$	0.181640	0.30714
		$t$	4.848989	1.66892
		$t^2$	-0.899069	-1.52027
4	Total residual/suma reszt MS	21,58084	7.54766	–
5	Determination coefficient/współczynnik determinacji $R^2$	0,99415	0.99846	> 1.0



The results indicate that for the model without the interaction and that with linear-linear interaction, the components of linear equations show a significant importance for tests. For example, the probability of obtaining a random result  $p$  for the above components of equation does not exceed 0.015, the value of the t-Student's distribution is well above the minimum values for the accepted number of degrees of latitude and  $p < 0.05$ . The analysis of the equation of regression with the linear – square interaction is statistically insignificant ( $R^2 > 1$ , which is in opposition to the definition of the coefficient of determination), which is proven by the values and evaluations of measures presented in Tables 5 and 6.

Contour graphs (Fig. 1–4) allow predicting the fuel delivery per injection in the change interval  $p_z$  and  $t$ , given in the figures as an example. For example, for the two-part dose at  $p_z = 142$  MPa and  $t = 2100$   $\mu$ s the estimated fuel dose according to the model without the interaction is equal to  $\Pi\_q\_bi = 77.11$  [mg/inj] and according to the model with the linear – linear interaction is  $\Pi\_q\_li = 76.46$  [mg/inj].

On the dispersion graphs (Fig. 5–8) the relations of the fuel dose per injection are presented on: the fuel pressure in the hydraulic tank, the total time of injection for the considered fuel dose and kinematic viscosity of fuel used in the research on the test stand. To build the considered graphs the results of the measurements of the fuel dose on the test stand and the values of fuel obtained following its prediction using the models used for the analysis have been presented. The figures contain the equations of adjustment straight of considered results of both measurements and prediction. The forms of equations indicate that all straight almost overlap. However, the results of the dose predictions according to the model with the linear-square interaction are statistically insignificant, as was proven in Tables 5 and 6.

### 3. Summary and conclusions

Summarizing the above considerations related to the modeling of the fuel dosage for different fuel supply options in the Common Rail systems of a medium-speed marine engine we can conclude as follows:

1. The time required for the implementation of a given dose is different for single and two-part doses considered here, while in the second case it is more about the dwell time between the initial and the principal dosage.
2. The measurements on the test stand show that too short a dwell time between different parts of the fuel dose results in a choking rather than closing of the fuel flow by the needle.

Table 6. The summary of specific values and evaluations of the function fitness of the research object describing the two-part fuel dosage

Tabela 6. Zestawienie charakterystycznych wielkości i miar oceny dopasowania funkcji obiektu badań opisującej dwuczęściowe dawki paliwa

No.	Value/wielkość		Model		
			without the interaction/bez interakcji	with the linear-linear interaction/z interakcjami liniowo-liniowymi	with the linear-square interaction/z interakcjami liniowo-kwadratowymi
1	Regression coefficient/ współczynnik regresji bi	$p_z$	3.38933	2.9459	-21.46371
		$p_z^2$	-0.0113778	-0.0113778	0.091175
		$t$	0.01300667	-0.0095833	-1.332848
		$t^2$	0.0000056	0.0000056	0.000278
2	Average estimation error of the parameter/średni błąd szacunku parametru Sbi	$p_z$	4.5754173	4.7005225	–
		$p_z^2$	0.0169373	0.01730696	–
		$t$	0.0203172	0.03232857	–
		$t^2$	0.0000038	0.00000389	–
3	Quotient/iloraz $t = bi/Sbi$	$p_z$	0.740770	0.62671756	–
		$p_z^2$	-0.671759	-0.65741041	–
		$t$	0.640180	-0.29643540	–
		$t^2$	1.469474	1.43808527	–
4	Total residual/suma reszt MS		29.04573	30.32751	–
5	Determination coefficient/ współczynnik determinacji $R^2$		0.98968	0.99192	> 1.0

na wtrysk od, odpowiednio, ciśnienia paliwa w zasobniku hydraulicznym, sumarycznego czasu wtrysku rozpatrywanej dawki na stanowisku laboratoryjnym. Do budowy rozpatrywanych wykresów wykorzystano wyniki pomiarów dawki paliwa na stanowisku badawczym oraz wartości dawki paliwa uzyskane w rezultacie ich predykcji przy użyciu zastosowanych do analizy modeli. Na rysunkach zamieszczono równania prostych dopasowania rozpatrywanych wyników zarówno pomiarów, jak i predykcji. Postaci zamieszczonych równań wskazują na to, że wszystkie proste prawie się pokrywają. Jednak wyniki predykcji dawki wg modelu z interakcjami liniowo-kwadratowymi nie są istotne statystycznie – wykazano to w tabelach 5 i 6.

### 3. Podsumowanie i wnioski

Podsumowując powyższe rozważania związane z modelowaniem dawkowania paliwa dla różnych wariantów zasilania paliwem w układach Common Rail średnioobrotowego silnika okrętowego można stwierdzić, że:

1. Czas niezbędny do realizacji określonej dawki jest różny dla dawki jednoczęściowej i rozpatrywanej tu dawki dwuczęściowej, przy czym w drugim przypadku jest on dłuższy o czas przerwy między dawką inicjującą a główną.
2. Z pomiarów na stanowisku badawczym wynika, że zbyt krótka przerwa między poszczególnymi częściami dawki nie powoduje zamknięcia paliwa przez iglicę rozpylacza, a jedynie dławí przepływ paliwa.
3. Zastosowanie elementów planowania eksperymentu zapewnia wysoką efektywność realizacji założonego zakresu badań, a także skrócenie czasu ich trwania oraz obniżenie kosztów.

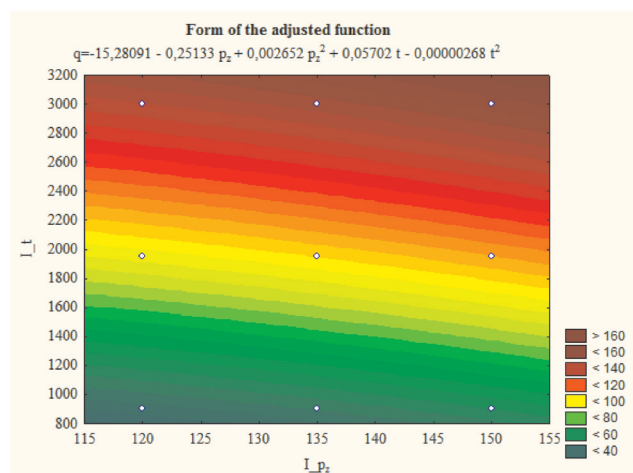


Fig. 1. Contour plot of prediction of the single fuel dose per cycle, depending on the pressure in the hydraulic tank and the total time of fuel injection for the estimation using the model without the interaction

Rys. 1. Wykres warstwiczny predykcji jednoczęściowej dawki paliwa na cykl w zależności od ciśnienia w zasobniku hydraulicznym i sumarycznego czasu wtrysku paliwa przy estymacji z wykorzystaniem modelu bez interakcji;  $t$  [ $\mu$ s],  $p_z$  [MPa],  $q$  [mg/wtr.]

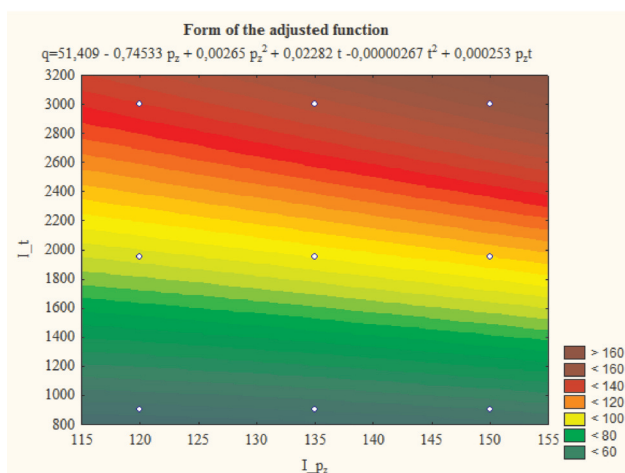


Fig. 2. Contour plot of prediction of the single fuel dose per cycle, depending on the pressure in the hydraulic tank and the total time of fuel injection for the estimation using the model with the linear-linear interaction

Rys. 2. Wykres warstwiczny predykcji jednoczęściowej dawki paliwa na cykl w zależności od ciśnienia w zasobniku hydraulicznym i sumarycznego czasu wtrysku paliwa przy estymacji z wykorzystaniem modelu z interakcjami liniowo-liniowymi;  $t$  [ $\mu$ s],  $p_z$  [MPa],  $q$  [mg/wtr.]

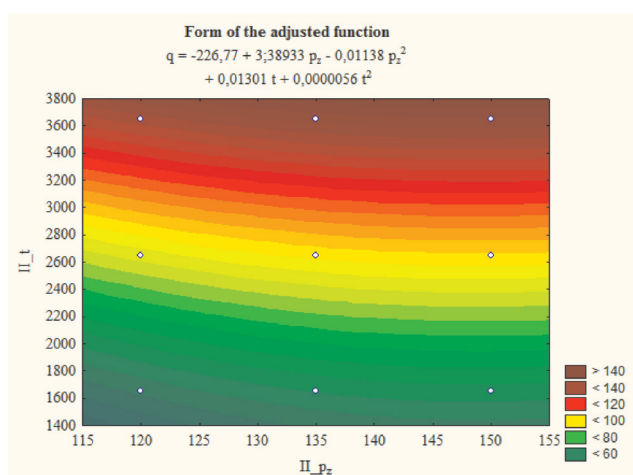


Fig. 3. Contour plot of prediction of the two-part fuel dose per cycle, depending on the pressure in the hydraulic tank and the total time of fuel injection for the estimation using the model without the interaction

Rys. 3. Wykres warstwiczny predykcji dwuczęściowej dawki paliwa na cykl w zależności od ciśnienia w zasobniku hydraulicznym i sumarycznego czasu wtrysku paliwa przy estymacji z wykorzystaniem modelu bez interakcji;  $t$  [ $\mu$ s],  $p_z$  [MPa],  $q$  [mg/wtr.]

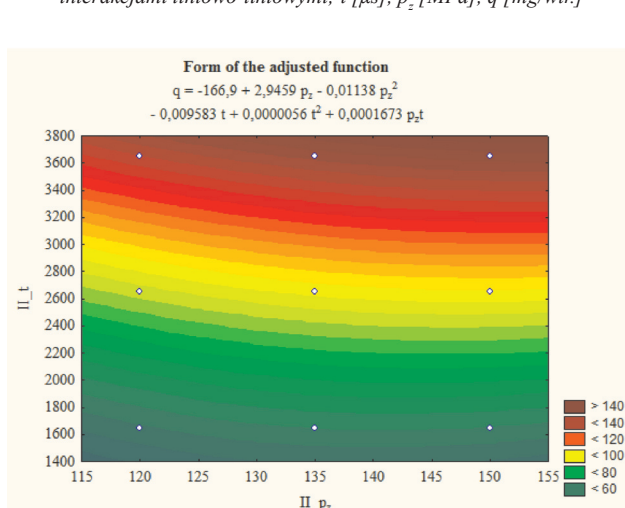


Fig. 4. Contour plot of prediction of the two-part fuel dose per cycle, depending on the pressure in the hydraulic tank and the total time of fuel injection for the estimation using the model with the linear-linear interaction

Rys. 4. Wykres warstwiczny predykcji dwuczęściowej dawki paliwa na cykl w zależności od ciśnienia w zasobniku hydraulicznym i sumarycznego czasu wtrysku paliwa przy estymacji z wykorzystaniem modelu z interakcjami liniowo-liniowymi;  $t$  [ $\mu$ s],  $p_z$  [MPa],  $q$  [mg/wtr.]

- Applying the elements of experiment planning ensures a high efficiency in obtaining the planned scope of research, shortening of the experiment duration and a reduction of its costs.
- Among the approximating functions applied in the analysis the statistically significant were the functions applying the model without the interaction and the function applying the model with the linear-linear interaction. The function applying the model taking the linear-square interaction into account was statistically insignificant.
- The accuracy of the approximation of the approximating polynomials, accepted as statistically significant, does not exceed the established five percent of confidence interval.

- Spśród wykorzystanych do analizy funkcji aproksymujących istotnie statystycznie okazały się funkcje z użyciem modelu bez interakcji i funkcja z użyciem modelu z uwzględnieniem interakcji liniowo-liniowych. Funkcja z użyciem modelu z uwzględnieniem interakcji liniowo-kwadratowych okazała się nieistotna statystycznie.
- Dokładności przybliżenia wielomianów aproksymujących przyjętych jako istotne statystycznie nie przekroczyła założonego pięcioprocentowego przedziału ufności.

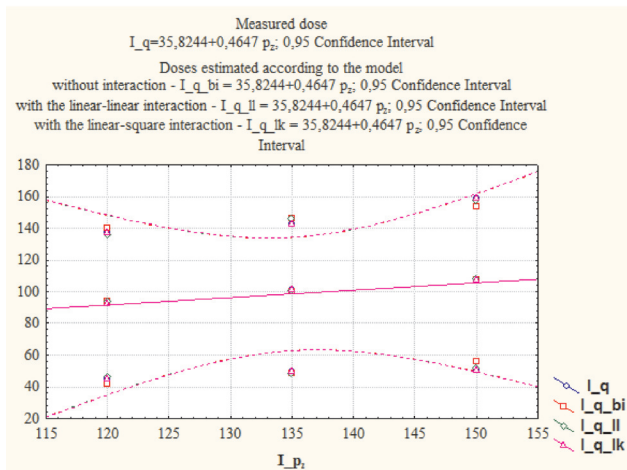


Fig. 5. The comparison of the measured and estimated doses [mg/inj.] of fuel depending on the model of function (function of the research object) as a function of pressure in the tank  $p_z$  [MPa] for the single dose

Rys. 5. Porównanie dawek paliwa [mg/wtr.] pomierzonej i estymowanych w zależności od przyjętego modelu (funkcji obiektu badań) jako funkcji ciśnienia w zasobniku  $p_z$  [MPa] dla dawki jednoczęściowej

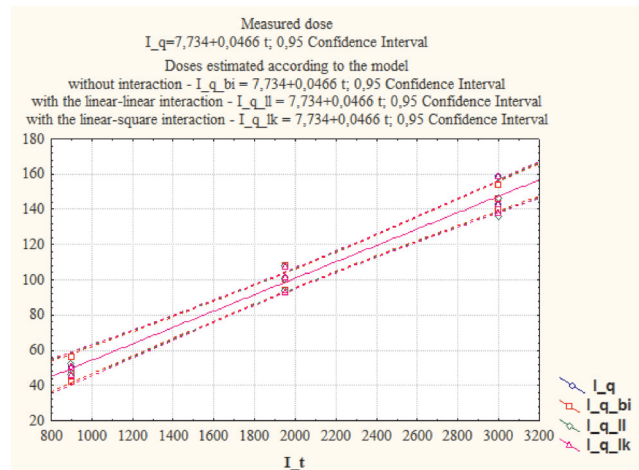


Fig. 6. The comparison of the measured and estimated doses [mg/inj.] of fuel depending on the model of function (function of the research object) as a function of injection time  $t$  [ $\mu$ s] for the single dose

Rys. 6. Porównanie dawek paliwa [mg/wtr.] pomierzonej i estymowanych w zależności od przyjętego modelu (funkcji obiektu badań) jako funkcji czasu wtrysku  $t$  [ $\mu$ s] dla dawki jednoczęściowej

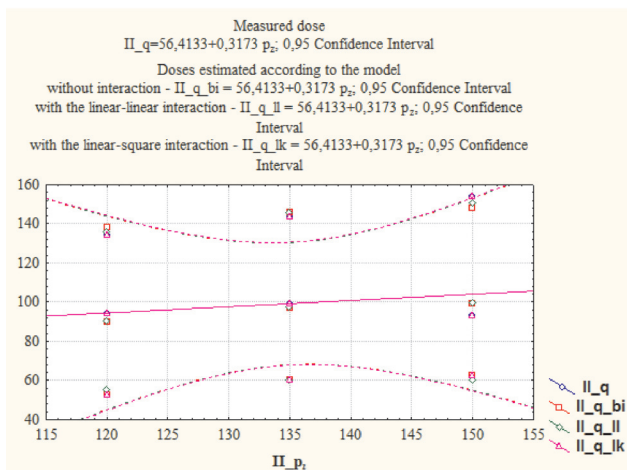


Fig. 7. The comparison of the measured and estimated doses [mg/inj.] of fuel depending on the model of function (function of the research object) as a function of pressure in the tank  $p_z$  [MPa] for the two-part dose

Rys. 7. Porównanie dawek paliwa [mg/wtr.] pomierzonej i estymowanych w zależności od przyjętego modelu (funkcji obiektu badań) jako funkcji ciśnienia w zasobniku  $p_z$  [MPa] dla dawki dwuczęściowej

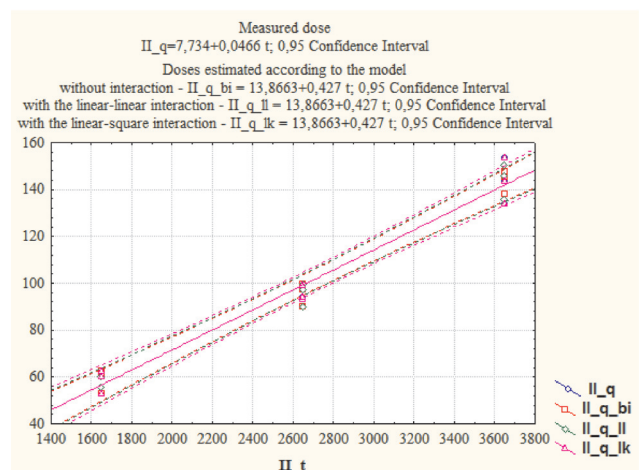


Fig. 8. The comparison of the measured and estimated doses [mg/inj.] of fuel depending on the model of function (function of the research object) as a function of injection time  $t$  [ $\mu$ s] for the two-part dose

Rys. 8. Porównanie dawek paliwa [mg/wtr.] pomierzonej i estymowanych w zależności od przyjętego modelu (funkcji obiektu badań) jako funkcji czasu wtrysku  $t$  [ $\mu$ s] dla dawki dwuczęściowej

## Bibliography/Literatura

- [1] Piaseczny L., Walkowski M.: Method for the determining the fuel dose in three-part injection in the CR System of marine combustion engine. Combustion Engines nr 2/2013.
- [2] Piaseczny L., Walkowski M.: Simulation studies of selected characteristics of the injection system the com-mon rail medium-speed research engine. Combustion Engines nr 4/2012.
- [3] Korzyński M.: Metodyka eksperymentu. WNT, Warszawa 2006.
- [4] Chłopek Z., Piaseczny L.: Zastosowanie teorii planowania doświadczeń w badaniach ekologicznych właściwości silników spalinyowych. Archiwum Motoryzacji nr 2-3/2002.
- [5] STATISTICA PL dla Windows: Tom IV – Statystyki przemysłowe. StatSoft Polska, Kraków 1997.

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](mailto:piaseczny@ptnss.pl)



Mirosław Walkowski, DEng.

Dr inż. Mirosław Walkowski

email: [mwal@interia.eu](mailto:mwal@interia.eu)

