

Tomasz KNEFEL

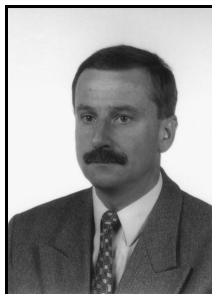
AKADEMIA TECHNICZNO – HUMANISTYCZNA BIELSKO - BIAŁA

Ocena możliwości pomiaru przebiegu i dawki wtrysku za pomocą indykatora z komorą o powiększonej objętości

Dr inż. Tomasz KNEFEL

Absolwent Wydziału Budowy Maszyn Filii Politechniki Łódzkiej w Bielsku-Białej, dyplom w zakresie silników spalinowych. Stopień doktora uzyskał w 1996 r. w dyscyplinie budowa i eksploatacja maszyn. Jest adiunktem na Wydziale Budowy Maszyn i Informatyki Akademii Techniczno-Humanistycznej w Bielsku-Białej w Zakładzie Silników Spalinowych, Katedry Silników Spalinowych i Pojazdów. Zajmuje się zagadnieniami zasilania w paliwo silników o zapłonie samoczynnym, zwłaszcza układami wysokociśnieniowymi.

e-mail: knefel@ath.bielsko.pl



Streszczenie

Artykuł jest poświęcony pomiarom: natężenia wypływu paliwa z rozpylacza oraz dawki, podawanych przez wtryskiwacz silnika o zapłonie samoczynnym. Oceniono możliwości wyznaczania przebiegu wtrysku pojedynczej i dzielonej dawki przy wtrysku do komory indykatora o powiększonej objętości. W pomiarach wykorzystano wtryskiwacz samochodu ciężarowego średniej ładowności. Przy ocenie wyników przyjęto, że różnice między wartościami zmierzonymi a obliczonymi nie powinny przekraczać $\pm 4\%$. Tak wyznaczony zakres stosowania indykatora obejmuje dawki o objętościach od 10 do ok. 52 mm³/wtrysk. Poza nim występują przypadki objęte dopuszczalnym przedziałem błędów, jednak istnieje prawdopodobieństwo wystąpienia pomiarów, których wynik nie będzie się mieścił w przyjętym przedziale.

Słowa kluczowe: silnik spalinowy o zapłonie samoczynnym, Common Rail, indykator dawki wtrysku, wtrysk wielofazowy.

Possibility of measuring the injection rate and dose with an indicator of enlarged volume

Abstract

The paper deals with measurements of the fuel dose and injection rate for a diesel engine injector. Possibility of measuring the single and multiple fuel injection rate was estimated. The investigations were performed for an electromagnetic common rail injector during fuel injection to the indicator chamber of enlarged volume. Such injectors are usually used in engines of medium carrying capacity trucks. The amplified pressure signal from the indicator was recorded by means of a digital oscilloscope. The equation for calculation of the injection rate results from the mass conservation law (2). For each measurement point (Tab. 1) the relative difference between the injection dose measured and calculated was determined (3) (Figs. 4, 6 and 10) for both single and multiple injection. The relative approximation errors were determined, too (Figs. 1 and 2). Comparison of the measured and calculated injection dose as a function of the rail pressure for both single and multiple injection is presented in Figs. 3 and 5. Fig. 7 shows the measured and calculated injection dose as a function of the dwell time for multiple injection. It was assumed that the differences between the measured and calculated values should not exceed $\pm 4\%$. Hence, the indicator should be used within the range of fuel supply from 10 for 52 mm³/cycle. Outside the assumed range, the error can be less than or equal to $\pm 4\%$, but it also it can be greater.

Keywords: diesel engine, common rail, injection indicator, multiple injection.

1. Wstęp

Współczesne silniki spalinowe o zapłonie samoczynnym powinny cechować się wysoką sprawnością, niską emisją szkodliwych składników spalin oraz akceptowalnym poziomem generowanego hałasu. Zwiększające się wymagania dotyczące zwłaszcza trakcyjnych jednostek napędowych, mogą być spełnione jedynie dzięki znajomości czasowego rozkładu wydatku paliwa dostarczanego do silnika i przebiegu procesu spalania. Te procesy, mimo

wielu przeprowadzonych prac badawczych, nie są dostatecznie poznane. Jest to spowodowane nakładaniem się i współzależnością zjawisk występujących podczas procesów: podawania paliwa i spalania [1]. Rozwój konstrukcji wysokociśnieniowych układów wtryskowych, ich technologii produkcji, a zwłaszcza elektronicznych systemów sterowania umożliwił spełnienie, często sprzecznych, wymagań stawianych silnikom i spowodował znaczące poszerzenie stanu wiedzy na temat wtrysku i spalania paliwa. Aktualnie produkowane samochodowe silniki o zapłonie samoczynnym są w większości zasilane przez sterowane elektronicznie układy Common Rail, z wtryskiwaczami elektromagnetycznymi lub piezoelektrycznymi. Umożliwiają one realizację wtrysku wielofazowego, a przez to kształtowanie w szerokim zakresie przebiegów wywiązywania ciepła i ciśnienia w cylindrze silnika. Odbyna się to w warunkach precyzyjnego dawkowania i bardzo dobrego rozpylenia paliwa, przy wysokich ciśnieniach wtrysku. Przebieg wtrysku, czyli natężenie wypływu paliwa z rozpylacza wtryskiwacza, to jeden z tych elementów, które w bardzo istotny sposób wpływają na szeroko rozumiane parametry pracy silnika. Współczesne układy zasilania umożliwiają uzyskanie kontrolowanego przebiegu procesu spalania. Konieczna jest jednak znajomość czynników wpływających na przebieg wtrysku i umiejętność pomiaru natężenia wypływu paliwa z rozpylacza.

Celem przedstawianej pracy była doświadczalna analiza parametrów wtrysku, w szczególności dawki, realizowanej przez elektromagnetyczny wtryskiwacz Common Rail samochodu ciężarowego. Przeprowadzono pomiary umożliwiające wyznaczenie obszaru zastosowań indykatora z komorą o stałej objętości dla dawek pojedynczych i dzielonych.

2. Metodyka, program i obiekt badań

Celem analizy jest wyznaczenie relacji pomiędzy zmierzoną na stanowisku probierczym (rzeczywistą) a obliczoną na podstawie przebiegu wtrysku objętością paliwa przypadającą na jeden wtrysk. Jako rzeczywistą objętość dawki przyjmowano każdorazowo objętość paliwa obliczaną wg zależności:

$$V_{rz} = m_{250}/250 \cdot \rho \text{ [m}^3\text{/wtrysk]} \quad (1)$$

gdzie: m_{250} – masa paliwa zgromadzona w probówce w czasie 250 cykli wtrysku (w zakresie jednego pomiaru) [kg], ρ – gęstość paliwa [kg/m³].

Natężenia wypływu paliwa z rozpylacza oraz całkowite dawki obliczano w oparciu o zależność (2):

$$\frac{dB}{dt} = \frac{V}{E} \frac{dp}{dt} \text{ [m}^3\text{/s]} \quad (2)$$

gdzie: B – dawka paliwa przypadająca na jeden wtrysk, t – czas, V – objętość komory indykatora, E – moduł sprężystości paliwa, p – ciśnienie w komorze indykatora.

Pomiar ciśnienia następował w oparciu o rejestrację oscyloskopem cyfrowym sygnału napięciowego z piezokwarcowego czujnika AVL GU21D, a następnie aproksymacji zarejestrowanych przebiegów wielomianami, w celu uzyskania ich gładkich postaci funkcyjnych dogodnych do różniczkowania. Szczegółowo sposób postępowania przedstawiono w [2]. Zmiany wartości modułu sprężystości dla zmiennych parametrów paliwa (temperatury i ciśnienia) zawartych w granicach ustalonych warunkami pomiaru uwzględniono w każdym kroku obliczeniowym danego przebiegu.

Całkując każdorazowo otrzymany na drodze kolejnych przekształceń i obliczeń przebieg wtrysku dB/dt otrzymywano obliczoną objętość paliwa V_{obl} przypadającą na jeden wtrysk. Dodat-

kowo w celu ilościowej oceny różnic między wartościami V_{rz} i V_{obl} każdorazowo obliczano wartość względnej różnicy między dawką obliczoną a zmierzoną, korzystając z zależności (3):

$$\Delta V = \frac{V_{obl} - V_{rz}}{V_{rz}} 100\% \quad (3)$$

Badania przeprowadzono wykorzystując elektromagnetyczny wtryskiwacz zasobnikowego układu zasilania typu Common Rail samochodu ciężarowego średniej ładowności. Analizy wykonano dla różnych parametrów pracy badanego wtryskiwacza i stosowanego czujnika ciśnienia, w celu zapewnienia warunków umożliwiających ocenę metody pomiaru natężenia wypływu paliwa z rozpylacza poprzez wtrysk do komory o stałej objętości, której objętość całkowita wynosiła 15.800 mm^3 . W oparciu o wyniki przeprowadzonych badań wstępnych opracowano program badań przedstawiony w tabeli 1.

Tab. 1. Zestawienie mierzonych parametrów i konfiguracji dawek wtrysku
Tab. 1. Measurement program

Lp.	ciśnienie paliwa w zasobniku [bar]	konfiguracja dawki wtrysku		
		PILOT [μs]	przerwa [μs]	MAIN [μs]
1.	1014	570	872	400
2.	920	570	872	400
3.	834	570	872	400
4.	726	570	872	400
5.	615	570	872	400
6.	518	570	872	400
7.	1089	-	-	400
8.	994	-	-	400
9.	915	-	-	400
10.	771	-	-	400
11.	649	-	-	400
12.	1084	-	-	1702
13.	920	400	1	400
14.	920	400	100	400
15.	915	400	200	400
16.	890	400	300	400
17.	933	400	400	400
18.	902	400	500	400
19.	899	400	600	400
20.	917	400	700	400
21.	893	400	850	400
22.	902	400	1120	400
23.	875	850	1120	850
24.	893	850	850	850
25.	890	850	350	850

Występujące w tab. 1 określenia „pilot” oraz „main” są ogólnie przyjętymi pojęciami, służącymi do opisu poszczególnych części dzielonej dawki paliwa.

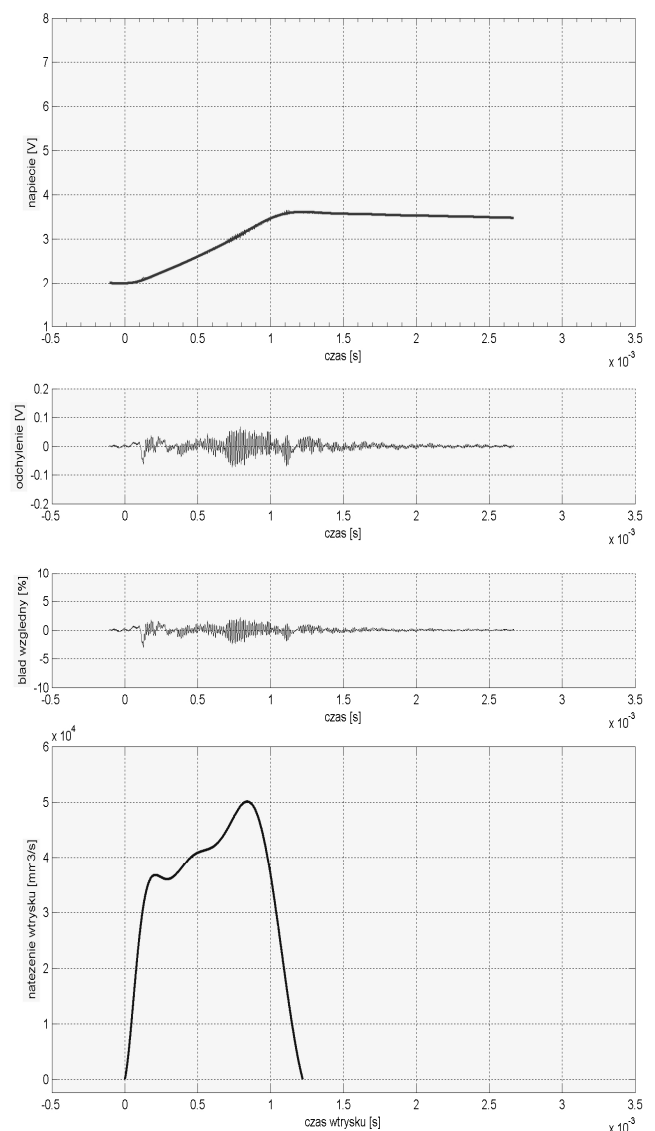
3. Wyniki pomiarów i ich analiza

W oparciu o przedstawiony program badań przeprowadzono pomiary, które miały na celu ocenę wpływu: ciśnienia paliwa w zasobniku, sposobu podziału dawki oraz czasu przerwy między dawkami na przebieg wtrysku.

Na przykładowych rys. 1 i 2 przedstawiono przebiegi napięcia: zmierzonego za pomocą przetwornika ciśnienia i następnie aproksymowanego, błędy aproksymacji oraz obliczone przebiegi natężenia wtrysku. Analizy wykonano dla różnych parametrów pracy układu wtryskowego.

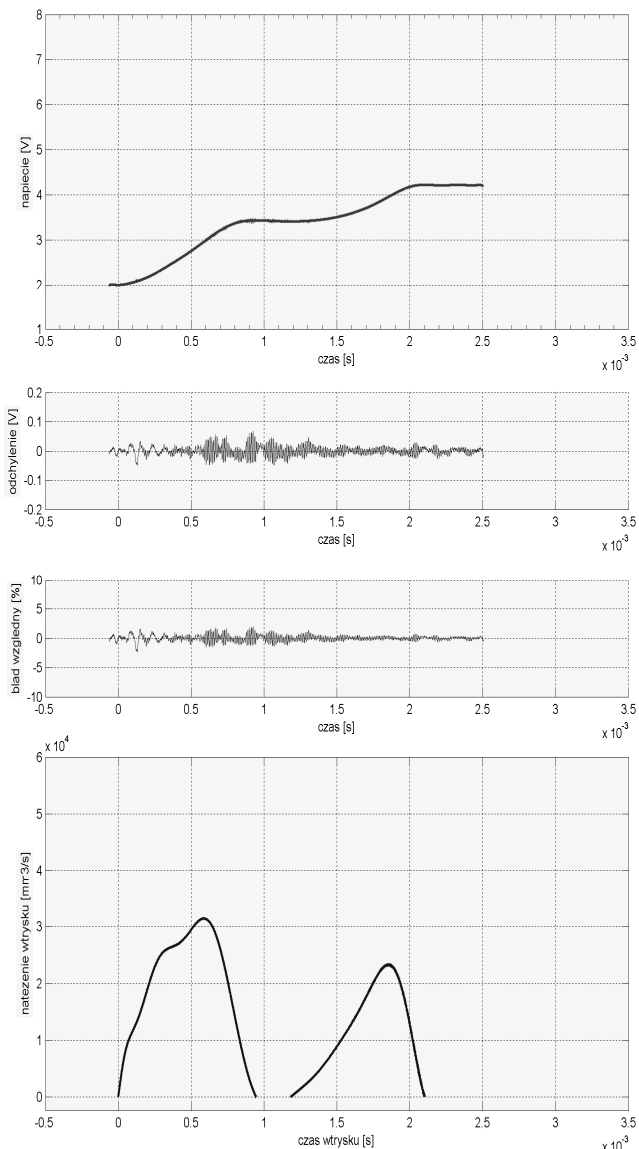
Przebiegi pokazane na rys. 1 dotyczą dzielonej dawki (PILOT – $570 \mu\text{s}$, przerwa – $872 \mu\text{s}$, MAIN – $400 \mu\text{s}$) i ciśnienia w zasobniku 615 bar . Największe różnice między przebiegami zmierzonym i aproksymowanym występują w końcowej fazie pierwszej części wtrysku i wynoszą ok. $0,06 \text{ V}$. Z kolei największy błąd względny występuje w początkowym okresie wtrysku ($130 \mu\text{s}$) i wynosi $2,3 \%$. Wtrysk pierwszej części dawki trwa $946 \mu\text{s}$ i przebiega ze zmiennym natężeniem. Wtrysk drugiej części trwa $920 \mu\text{s}$ i przebiega z łagodnym wzrostem natężenia wtrysku (kształt trójkąta prostokątnego) Maksymalne wartości natężenia wynoszą: dla części pierwszej – ok. $31.000 \text{ mm}^3/\text{s}$, natomiast dla drugiej - ok. $23.000 \text{ mm}^3/\text{s}$.

Na rys. 2 przedstawiono przebiegi dla dzielonej dawki wtrysku (PILOT – $400 \mu\text{s}$, MAIN – $400 \mu\text{s}$) i zadanego czasu przerwy $1 \mu\text{s}$ (nie wystąpiła przerwa we wtrysku). Największe różnice między przebiegami zmierzonym i aproksymowanym występują w końcowej fazie wtrysku i wynoszą ok. $0,07 \text{ V}$. Z kolei największy błąd względny występuje w początkowym okresie wtrysku ($120 \mu\text{s}$) i wynosi ok. 3% . Wtrysk trwa $1.220 \mu\text{s}$ i przebiega ze zmiennym natężeniem wtrysku. Maksymalne wartości natężenia wynoszą ok. $50.000 \text{ mm}^3/\text{s}$.



Rys. 1. Przebiegi napięcia (zmierzony i aproksymowany nakładają się), błądów aproksymacji oraz natężenia wtrysku dla dawki dzielonej (PILOT – $400 \mu\text{s}$, przerwa – $1 \mu\text{s}$, MAIN – $400 \mu\text{s}$) i ciśnienia 900 bar

Fig. 1. Waveforms of voltage (measured and approximated overlap), approximation error and injection rate for multiple injection (PILOT – $400 \mu\text{s}$, dwell – $1 \mu\text{s}$, MAIN – $400 \mu\text{s}$) and rail pressure 900 bar



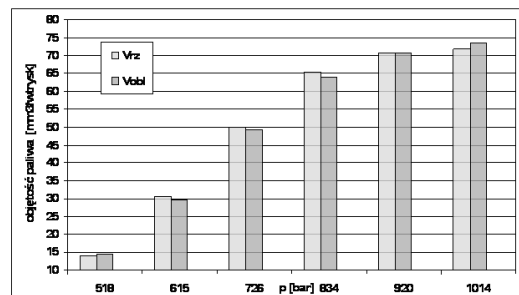
Rys. 2. Przebiegi napięcia (zmierzony i aproksymowany nakładają się), błędów aproksymacji oraz natężenia wtrysku dzielonej dawki (PILOT – 570 μ s, przerwa – 872 μ s, MAIN – 400 μ s) dla ciśnienia w zasobniku 615 bar

Fig. 2. Waveforms of voltage (measured and approximated overlap), approximation error and injection rate for multiple injection (PILOT – 570 μ s, dwell – 872 μ s, MAIN – 400 μ s) and rail pressure 615 bar

Po wykonaniu obliczeń przeprowadzono analizę wpływu ciśnienia w zasobniku i konfiguracji dawki na wzajemne relacje dawek: rzeczywistej i obliczonej.

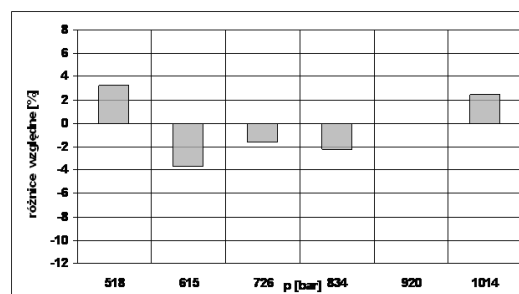
Wpływ ciśnienia dla niezmiennych wartości zadanych czasów wtrysku dzielonej dawki przedstawiono na rys. 3 i 4. Jak można zauważyć, nie ma w tym przypadku wyraźnej zależności pomiędzy wartością ciśnienia w zasobniku, a błędem względnym zmierzonej i obliczonej dawki paliwa. Różnice wartości obliczonych i zmierzonych wahają się w granicach od 3,3 do – 3,7 %. Można zauważyć, że począwszy od ciśnienia 615 bar wartości obliczonej dawki (mniejsze od zmierzonej) zbliżają się do wartości zmierzonej i dla ciśnienia 920 bar są praktycznie równe. Przy wzroście ciśnienia do 1014 bar obliczone wartości objętości wtryskiwanego paliwa przewyższają wartości zmierzone. Jest prawdopodobne, że tendencja ta utrzymuje się przy dalszym wzroście ciśnienia.

Porównanie zmierzonej oraz obliczonej dawki niedzielonej paliwa przy różnych ciśnieniach paliwa w zasobniku przedstawiono na rys. 5 i 6.



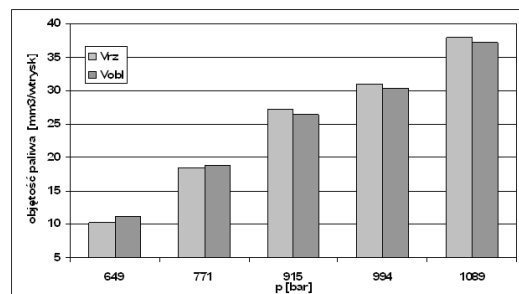
Rys. 3. Porównanie obliczonych i zmierzonych objętości dawki dzielonej dla różnych ciśnień paliwa w zasobniku

Fig. 3. Comparison of measured and calculated injection dose vs. rail pressure for multiple injection



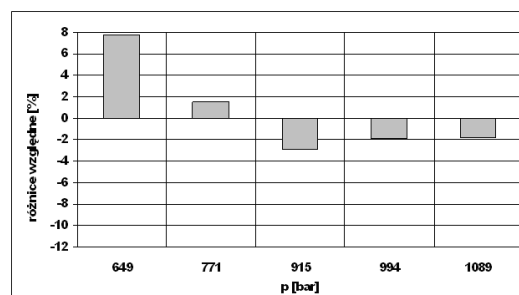
Rys. 4. Różnice względne między obliczonymi i zmierzonymi dawkami dzielonymi dla różnych ciśnień paliwa w zasobniku

Fig. 4. Relative differences between measured and calculated injection dose vs. pressure for multiple injection



Rys. 5. Porównanie wyników pomiarów i obliczeń dla pojedynczej dawki wtrysku i różnych ciśnień paliwa w zasobniku

Fig. 5. Comparison of measured and calculated injection dose vs. rail pressure for single injection

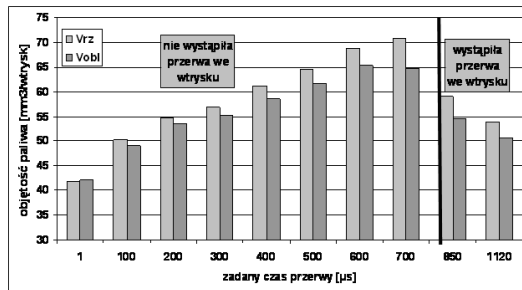


Rys. 6. Różnice względne dawek obliczonych i zmierzonych w zależności od ciśnienia paliwa w zasobniku dla pojedynczej dawki

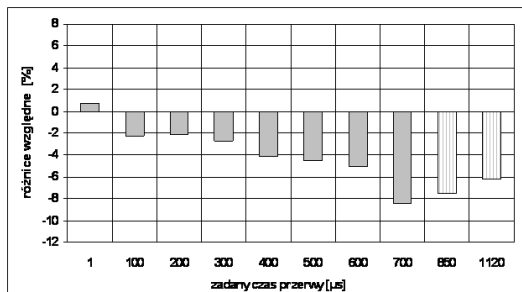
Fig. 6. Relative differences between measured and calculated injection dose vs. rail pressure for single injection

Podobnie jak w przypadku dawki dzielonej dla pojedynczej dawki występuje pewien obszar silniejszego wpływu ciśnienia na relację rzeczywistej i obliczonej objętości wtrysku. Ma to miejsce w zakresie ciśnień od 649 do 915 bar, kiedy wartości różnic między omawianymi wielkościami zmieniają się najwyraźniej – od 7,8 do -2,9%, po czym stabilizują się na poziomie ok. -2 %. Dla ciśnienia około 900 barów występuje najmniejsza różnica objętości zmierzonej i obliczonej.

Wykorzystując wyniki obliczeń dla trzeciej serii pomiarów określono wpływ czasu przerwy pomiędzy częściami dawki PILOT oraz MAIN na różnice rzeczywistej i obliczonej objętości wtryskiwanego paliwa. Otrzymane w tym przypadku wyniki zestawiono na rys. 5 i 6.



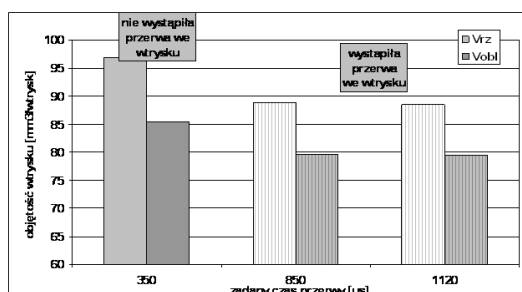
Rys. 7. Zmierzone oraz obliczone objętości wtryskiwanej dawki w zależności od czasu przerwy dla dzielonej dawki
Fig. 7. Measured and calculated injection dose vs. dwell time for multiple injection



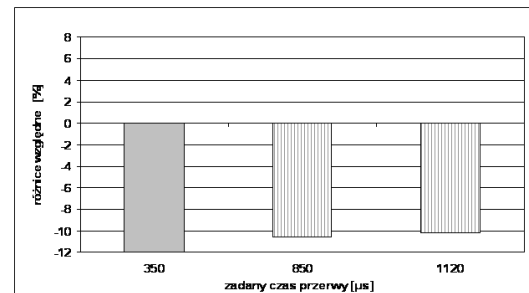
Rys. 8. Różnice względne obliczonych i zmierzonych dawek dzielonych w zależności od czasu przerwy
Fig. 8. Relative differences between measured and calculated injection dose vs. dwell time for multiple injection

Na podstawie powyższych wykresów można stwierdzić, że wraz z wydłużaniem zadanego czasu przerwy rośnie wartość różnicy objętości obliczonej i zmierzonej (od 0,8 do -8,5 %), przy czym objętość obliczona jest zawsze mniejsza od rzeczywistej. Największe odchylenie objętości obliczonej od rzeczywistej (-8,5 %) występuje w punkcie, w którym iglica osiada na gnieździe po zakończeniu wtrysku pierwszej części dawki, po czym unosi się powtórnie. Badany wtryskiwacz zaczyna wtedy reagować na zadane wartości czasu przerwy. Ma to miejsce dla czasów przerwy większych od ok. 700 μ s. Od momentu wystąpienia przerwy we wtrysku, nawet przy dalszym jej wydłużaniu różnice względne rozpatrywanych objętości maleją z -8,5 do -6,2 %.

Podobną tendencję można zauważyć w przypadku wyników uzyskanych w czwartej serii pomiarów, przeprowadzonych przy większych – w stosunku do trzeciej serii pomiarów – objętościach wtryskiwanych dawek i zmiennym czasie przerwy pomiędzy częściami PILOT i MAIN dawki. Zestawienie otrzymanych wyników przedstawiają rys. 9 i 10.



Rys. 9. Zmierzone oraz obliczone objętości wtryskiwanej dawki w zależności od czasu przerwy dla dzielonej dawki o większej objętości
Fig. 9. Measured and calculated injection dose vs. dwell time for large multiple injection



Rys. 10. Różnice względne dawek obliczonych i zmierzonych w zależności od czasu przerwy dla dzielonej dawki o większej objętości
Fig. 10. Relative differences between measured and calculated injection dose vs. dwell time for large multiple injection

4. Podsumowanie

Na podstawie przeprowadzonych pomiarów i wyników obliczeń oraz ich analizy sformułowano uwagi końcowe i wnioski.

Wszystkie zadane za pomocą sterownika czasu wtrysku oraz czasy przerwy pomiędzy częściami dawki są odwzorowane na przebiegach napięcia w funkcji czasu.

Stopień aproksymacji przebiegów wejściowych (napięciowych) ma znaczący wpływ na charakter przebiegu krzywej natężenia wtrysku, a tym samym na wartość obliczonej dawki.

Wykresy natężenia wypływu paliwa z rozpylacza wykonane w funkcji czasu, odwzorowują konfigurację dawki, jej wielkość, rzeczywisty czas trwania wtrysku oraz czas przerwy pomiędzy częściami dawki.

Na przebiegach napięcia w funkcji czasu, wykonanych dla dawek dzielonych o zadanych czasach przerwy mniejszych od 500 μ s, nie obserwowano wyraźnej zmiany charakteru przebiegu sygnału. Zadana przerwa powodowała jednak powstawanie lokalnych zakłóceń przebiegu napięciowego, co objawiało się wzrostem błędów bezwzględnego i względnego w tych miejscach.

Na przebiegach natężenia wypływu paliwa z rozpylacza dla krótkich czasów przerwy mniejszych od czasu reakcji wtryskiwacza, można zauważyć wpływ niecałkowitego opadania iglicy wtryskiwacza. W miarę zwiększania zadanego czasu przerwy i zbliżania się do czasu reakcji wtryskiwacza, jest zauważalne znaczne zmniejszenie natężenia wypływu paliwa z rozpylacza, które jest efektem procesu opadania iglicy wtryskiwacza, której czas osiadania jest dłuższy od zadanego czasu przerwy. Objawia się to gwałtownym zdlawieniem przepływu w rozpylaczu.

Temperatura i ciśnienie paliwa w komorze mają wpływ na wartość modułu sprężystości paliwa, a tym samym na wartość obliczonej dawki. Optymalne (z uwagi na dokładność uzyskiwanych wyników obliczeń) warunki pracy stosowanego indykatora to: ciśnienia paliwa ok. 900 barów, wtrysk dawek dzielonych lub niedzielonych o objętości $10\div 52$ mm³/cykl realizowany – w przypadku dawek dzielonych - dla zadanych czasów przerw poza obszarem czasu reakcji stosowanego wtryskiwacza.

5. Literatura

- [1] Badami M., Mallamo F., Millo F., Rossi E.E.: Experimental investigation on the effect of multiple injection strategies on emissions, noise and brake specific fuel consumption of an automotive direct injection common-rail diesel engine. International Journal of Engine Research, Volume 4, Number 4, 1 December 2003.
- [2] Knefel T.: Methodology of determination diesel engine injection rate and dose with the assistance indicator of injection, Combustion Engines, 2009-SC2, s. 379-385, 2009.
- [3] Knefel T.: Real time determination of Diesel engine multiple fuel injection, Combustion Engines, 2009-SC2, s. 386-391, 2009.