

Kamil WĘGLARZ¹

Opiekun naukowy: Tomasz KNEFEL²

ANALIZA ZALEŻNOŚCI POMIĘDZY ZADANYM CZASEM PRZERWY, A PARAMETRAMI WTRYSKU DLA RÓŻNYCH RODZAJÓW PALIW

Streszczenie: Tematyką niniejszej pracy jest analiza dwuczęściowego procesu wtrysku, realizowanego dla dwóch paliw o odmiennym pochodzeniu. Pomiary przebiegów wtrysku przeprowadzono z wykorzystaniem indykatora z komorą o stałej objętości znanych warunkach termodynamicznych w aspekcie realizowania zadanych parametrów. Określono wpływ zadanego czasu przerwy między częściami dawki na sumaryczną ilość podawanego paliwa oraz zmianę natężenia wypływu paliwa z rozpylacza.

Słowa kluczowe: Common Rail, wtrysk, dwufazowy, FAME, olej napędowy, czas przerwy, pomiary

STUDY OF DEPENDENCY BETWEEN DESIRED BREAK TIME AND INJECTION PARAMETERS FOR DIFFERENT TYPES OF FUELS

Summary: The subject of this thesis is the analysis of the two-phase injection process of two fuels of different origin to a closed chamber of a defined volume and known thermodynamic conditions in terms of the implementation of the set parameters and the injection course with variable break times between successive injection phases. The effect of a given break time between parts of the dose on the total amount of fuel fed and the change of the fuel outflow from the atomizer was determined.

Keywords: common rail, injection, two-phase, FAME, diesel, break time, measurements

1. Wstęp i cel pracy

Tłokowy silnik spalinowy o zapłonie samoczynnym, jako maszyna cieplna zmieniająca energię zawartą w paliwie na pracę mechaniczną poprzez zmianę parametrów termodynamicznych czynnika roboczego, liczy sobie już prawie 130 lat.

¹ Akademia Techniczno-Humanistyczna w Bielsku-Białej, Wydział Budowy Maszyn i Informatyki, specjalność: samochody i ciągniki, kweglarz@2com.pl

² dr hab. inż. prof. ATH, Akademia Techniczno-Humanistyczna w Bielsku-Białej, Wydział Budowy Maszyn i Informatyki, knefel@ath.bielsko.pl

Świadczy to o jego dojrzałości technicznej, a co za tym idzie niezawodności i trwałości. Cały czas jednak prowadzone są prace mające na celu dalszą poprawę parametrów eksploatacyjnych silnika, jego niezawodności i zmniejszenia uciążliwości dla środowiska tego najpowszechniejszego obecnie źródła napędu pojazdów samochodowych [1].

Stosowane do napędu tłokowych silników spalinowych paliwa stanowią związki oraz mieszaniny związków węgla, wodoru i siarki. Skład chemiczny paliwa i jego własności mają istotne znaczenie przy stosowaniu ich do określonych silników. Paliwem spalonym w silniku o zapłonie samoczynnym (ZS) jest zwykle olej napędowy lub (w przypadku wolnobieżnych silników wielkogabarytowych) mazut. Istotną cechą paliw dla o ZS jest liczba cetanowa, która świadczy o zdolności do samozapłonu. Paliwem alternatywnym do tego rodzaju silników może być również olej roślinny (np. olej rzepakowy). Niestety, jego liczba cetanowa ma małą wartość, co jest istotną wadą. Znacznie lepsze są estry olejów roślinnych (tzw. biodiesel). Zużycie tego paliwa jest o kilka procent większe, co wynika z mniejszej niż oleju napędowego wartości opałowej. Warto wspomnieć, że pierwszy silnik wysokoprężny, zbudowany przez Rudolfa Diesla zasilany był olejem arachidowym.

Zwraca uwagę duża zawartość tlenu w paliwach rzepakowych, co jest korzystne ze względu na przebieg spalania, gdyż tlen ten cechuje się większą aktywnością niż tlen cząsteczkowy zawarty w powietrzu. Winien więc on sprzyjać intensyfikacji spalania i obniżyć zadymienie spalin. Bardzo ważną zaletą tych paliw jest praktycznie zerowa zawartość siarki, co jest korzystną cechą zarówno ze względów ekologicznych, jak i ze względu na korozyjne zużycie elementów silnika [5].

Celem pracy jest analiza przebiegu procesu wtrysku dawki paliwa podzielonej na dwie części. Wykorzystano system Common Rail z wtryskiwaczami II generacji. Badania stanowiskowe przeprowadzono dla dwóch różnych, dostępnych na rynku paliw, o odmiennym pochodzeniu: oleju napędowego Ekodiesel Ultra D i paliwa roślinnego FAME. Olej napędowy Ekodiesel Ultra D, produkowany przez Polski Koncern Naftowy Orlen S.A., jest paliwem węglowodorowym, nowej generacji, o podwyższonych parametrach użytkowych i ekologicznych, przeznaczonym do zasilania szybkoobrotowych silników o zapłonie samoczynnym. Jest to paliwo o małej zawartości siarki. Ponadto charakteryzuje się obniżoną temperaturą końca procesu destylacji, obniżoną zawartością węglowodorów aromatycznych, małą zawartością zanieczyszczeń stałych, podwyższoną liczbą cetanową [8]. Drugim paliwem wykorzystanym w badaniach było paliwo roślinne FAME, będące mieszaniną estrów metylowych kwasów tłuszczowych oleju rzepakowego, produkowane przez Polski Koncern Naftowy Orlen S.A. Jest to paliwo uzyskiwane w procesie trans estryfikacji triglicerydów oleju rzepakowego metanolem. W wyniku reakcji uzyskuje się mieszaninę estrów metylowych kwasów tłuszczowych oraz frakcję glicerynową. Wykorzystane do badań paliwo roślinne ma podobną jak olej napędowy Ekodiesel Ultra D liczbę cetanową, większą gęstość, mniejszą wartość opałową, większą temperaturę mętnienia i zablokowania zimnego filtra. Jego wykorzystanie w warunkach zimowych jest możliwe po zastosowaniu odpowiednich dodatków. Paliwo roślinne FAME zawiera więcej tlenu, co korzystnie wpływa na proces spalania. Ponadto charakteryzuje się dobrymi własnościami smarnymi. Wysoka temperatura zapłonu estrów zapewnia bezpieczeństwo podczas stosowania tego paliwa [7].

2. Stanowisko badawcze i przebieg badań

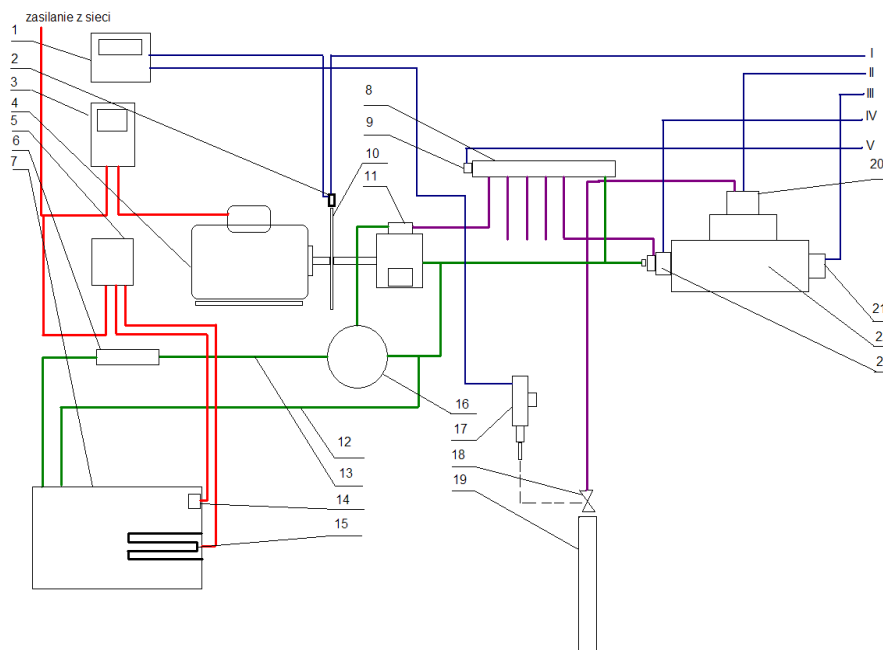
Do pomiaru natężenia wypływu paliwa z rozpylacza (przebiegu wtrysku) we współczesnych układach zasilania najlepiej nadaje się indykator umożliwiający wtrysk do komory o stałej objętości. W tej metodzie paliwo jest wtryskiwane do komory wypełnionej olejem napędowym, będącym pod niewielkim ciśnieniem. W czasie procesu wtrysku zwiększa się masa paliwa w komorze, a ciśnienie rośnie proporcjonalnie do wtrysniętej masy. Iloczyn pochodnej ciśnienia paliwa w komorze i stosunku objętości komory do modułu sprężystości paliwa, umożliwia obliczenie natężenia przebiegu wtrysku. Moduł sprężystości jest funkcją ciśnienia i temperatury, którą należy uwzględnić przy wyznaczaniu przebiegu wtrysku [3, 4]. Równanie indykatora wtrysku (1) opiera się o równanie zachowania masy. Podstawową zależność, umożliwiającą obliczenia przebiegu wtrysku, można zapisać w postaci [2, 3]:

$$\frac{dB}{dt} = \frac{V}{E} \frac{dp}{dt} \quad (1)$$

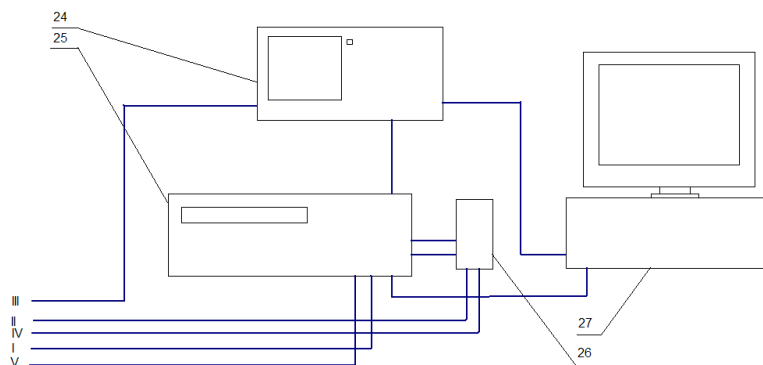
gdzie: B – dawka paliwa,
 t – czas,
 V – objętość komory pomiarowej,
 E – moduł sprężystości paliwa,
 p – ciśnienie w komorze pomiarowej.

Jak już wspomniano, głównym celem przeprowadzonych badań było wyznaczenie przebiegu wtrysku dwóch rodzajów paliw: oleju napędowego Ekodiesel Ultra D i paliwa roślinnego FAME. Do wyznaczenia natężenia wypływu paliwa z rozpylacza wykorzystano indykator z komorą o stałej objętości. Realizowano schemat podziału dawki na dwie jednakowe części, przy różnych wartościach zadanego czasu przerwy pomiędzy nimi. Oczywiście dla obu paliw zadawano jednakowe parametry wtrysku. Badania do celów niniejszej pracy wykonano na specjalnie zbudowanym stanowisku do badania przebiegu wtrysku (rys. 1, 2). Głównym elementem jest stół probierczy typu STAR-8, na którym zamontowana została pompa systemu Common Rail (11) i indykator do pomiaru przebiegu wtrysku (22). Pompa systemu Common Rail jest napędzana przez trójfazowy silnik elektryczny prądu zmiennego o mocy 3,1 kW (4). Regulacja prędkości obrotowej wałka pompy jest możliwa dzięki zastosowaniu w układzie zasilania silnika falownika typu HITACHI L100 (3). Pompa wysokiego ciśnienia typu CP-3.1 zasilana jest w paliwo dzięki zastosowaniu w układzie pompy paliwa (6) i regulatora ciśnienia paliwa (16). Paliwo pobierane jest z zabudowanego w stole zbiornika z wmontowanym systemem grzewczym (7), który zapewnia utrzymanie stałej temperatury paliwa w zbiorniku. Głównym elementem systemu grzewczego jest grzałka (15) o mocy znamionowej 2 kW współpracująca z regulatorem temperatury (5) typu THERMO-STAB RB51. Paliwo z pompy wysokiego ciśnienia zasila zasobnik systemu CR (8), w którym zabudowany jest czujnik ciśnienia paliwa (9). Paliwo z zasobnika płynie do wtryskiwacza CR (23) zabudowanego w indykatorze (22). Indykator składa się z obudowy, w której zabudowana jest demontowalna komora. W komorze są umieszczone przetwornik ciśnienia AVL GU-21D (21) i szybki zawór elektromagnetyczny. Do niej jest

wtryskiwane paliwo, a sygnał z przetwornika umożliwia wyznaczenie przebiegu wtrysku.



Rysunek 1. Schemat stołu probierczego (opis w tekście)



Rysunek 2. Schemat podłączenia urządzeń sterujących i rejestrujących

Po otwarciu zaworu paliwo z komory indykatora płynie do układu pomiarowego, który umożliwia pobranie paliwa z dokładnie określonej liczby wtrysków. Układ składa się z zaworu (18) uruchamianego przez siłownik (17), który jest sterowany z urządzenia zliczającego cykle (1). Odmierzona porcja paliwa jest zbierana w menzurce (19).

Stół probierczy sterowany jest ze stanowiska wyposażonego w sterownik (25) typu KSSiP-2 połączony z cyfrowym oscyloskopem Tektronix TDS 3014 (24),

wzmacniaczem AVL PIEZO AMPLIFIER 3066A01 (26) i komputerem klasy PC (27). W specjalnym programie użytkownik może ustalić zadane czasy wtrysku i liczbę części podziału dawki, a także kąty otwarcia i zamknięcia zaworu upustowego i ciśnienie w zasobniku CR. Żądania te przesyłane są przez program do sterownika, a stamtąd do odpowiednich urządzeń. Są to: II - sygnał sterujący zaworem upustowym, IV - sygnał sterujący wtryskiwaczem.

Sterownik także odbiera sygnały pochodzące z czujników zamontowanych na stole probierczym. Są nimi: I - sygnał z czujnika prędkości obrotowej wałka pompy CR, III - sygnał z przetwornika ciśnienia zamontowanego w komorze indykatora, V - sygnał z czujnika ciśnienia paliwa w zasobniku CR.

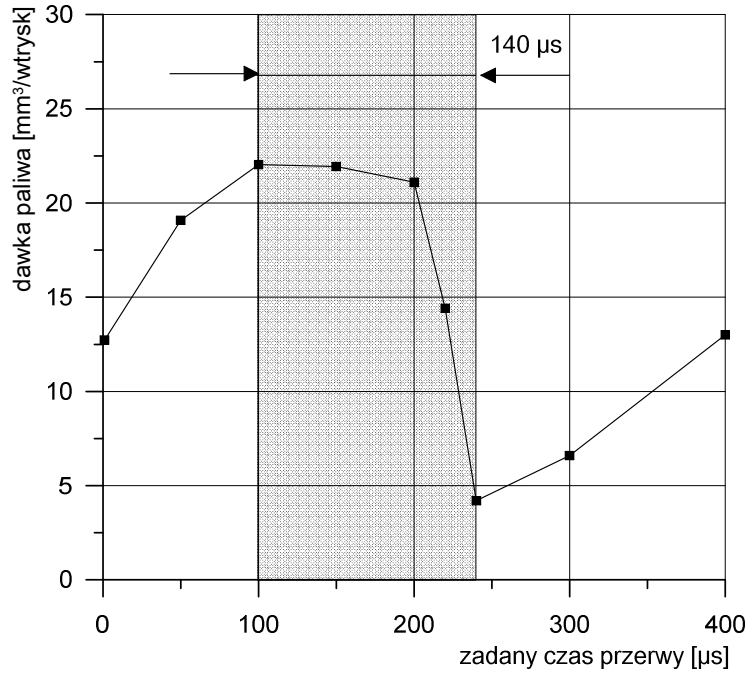
Sygnał z przetwornika ciśnienia AVL GU-21D (21, rys. 1) należało odpowiednio przygotować do wykorzystania w toku obliczeniowym. W pierwszej kolejności danych przesunięto wykres względem osi odciętych tak, aby początek tej osi przypadła w punkcie 0. Następnie dokonano konwersji napięcia na odpowiadające mu wartości ciśnienia, korzystając ze wzoru kalibracyjnego czujnika. W celu uzyskania gładkich przebiegów ciśnienia aproksymowano je w taki sposób, aby błąd aproksymacji nie przekraczał 3 %. Wykorzystano wielomiany różnych rzędów. W dalszej kolejności wyznaczono przebieg pochodnej ciśnienia względem czasu oraz iloraz wspomnianej wielkości i zmiennego w każdym punkcie obliczeń modułu sprężystości paliwa. Po przemnożeniu przez stałą wartość objętości komory indykatora otrzymano przebieg wtrysku (natężenia wypływu paliwa z rozpylacza). Dawkę paliwa wyznaczano w oparciu o 250 cykli pracy wtryskiwacza. Wykorzystano wagę laboratoryjną firmy Radwago dokładności 0,01 g.

Podczas badań zadawano jednakowe czasy obu części dzielonej dawki – 450 μ s.

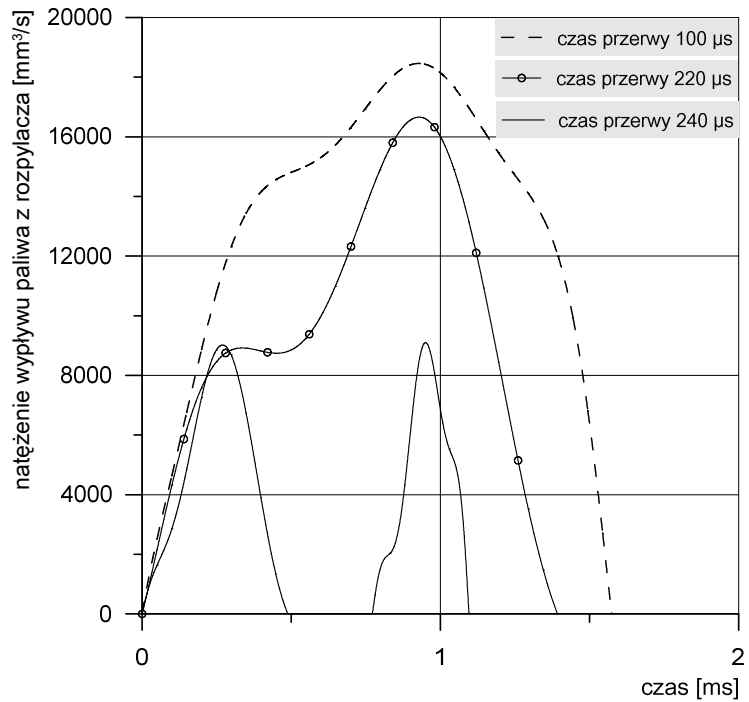
3. Analiza zależności pomiędzy zadaniem czasem przerwy, a wtryskiwaną dawką paliwa

Na rys. 3 przedstawiono zależność dawki paliwa FAME w zależności od zadanego czasu przerwy. Wraz ze zwiększaniem czasu przerwy zwiększa się jednostkowa dawka podawanego paliwa, jednak jedynie do 100 μ s. Tu następuje zmiana dawki o około 70 %. W przedziale od 100 do 200 μ s ma miejsce pewna stabilizacja podawanej dawki na poziomie 22 mm³/wtrysk. Dalej wyraźnie widać nagłe zmniejszenie wielkości wtryskiwanej dawki dla czasów przerwy z zakresu od 200 do 240 μ s. Wynosi ono 80 %. Przyczyn zmiany dawkowania należy szukać przede wszystkim w przebiegu natężenia prądu sterującego wtryskiwaczem. Z innych, nie zamieszczonych tutaj badań wynika, że jest wydłużony czas zanikania prądu cewki elektromagnesu, przy krótkich czasach przerwy co powoduje zwiększenie czasu uniesienia iglicy.

W celu analizy tego zjawiska, obliczono i wykreślono przebiegi wtrysku dla trzech, charakterystycznych czasów przerw: 100, 220 i 240 μ s. Zależności przedstawia rysunek 4. Jak wyraźnie widać na wykresie, zmniejszenie wielkości wtryskiwanej dawki paliwa wynika z postępującej realizacji podziału dawki w zakresie zadanych czasów przerw. Dla zadanego czasu przerwy 220 μ s zaczyna się zaznaczać początek podziału dawki, a dla czasu przerwy wynoszącego 240 μ s podział dawki jest już wyraźnie widoczny.

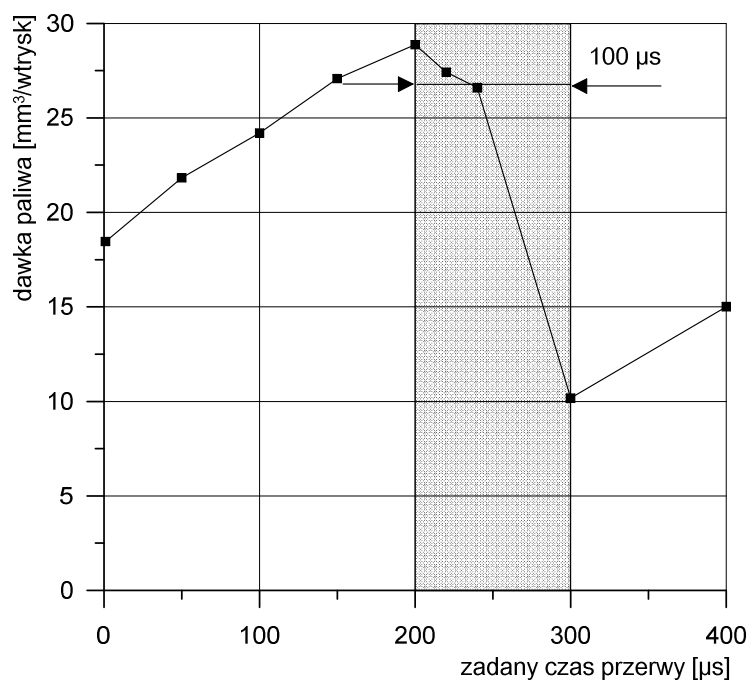


Rysunek 3. Zmian dawki paliwa FAME w zależności od zadanego czasu przerwy



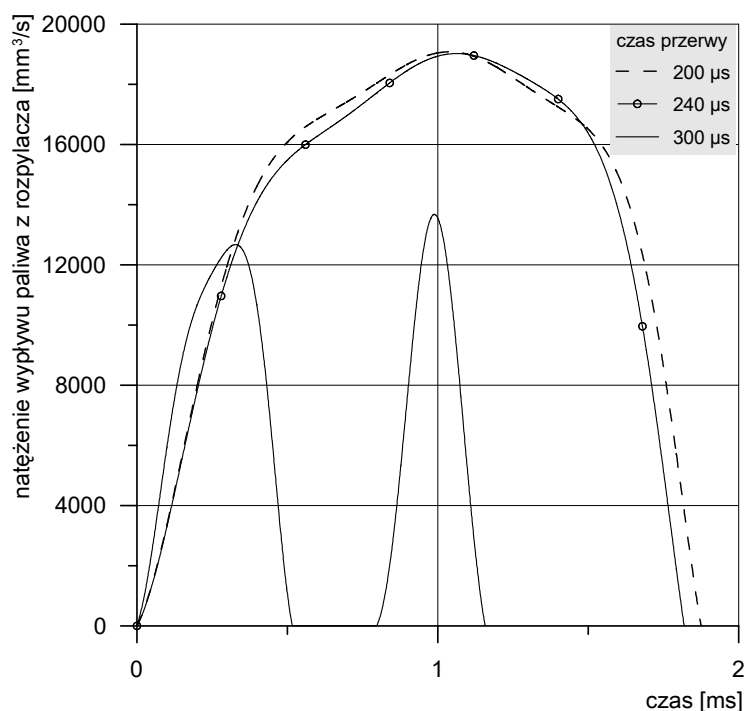
Rysunek 4. Wybrane przebiegi wtrysku paliwa FAME

Z kolei na rys. 5 zostały zestawione dane dotyczące wtryskiwanej dawki paliwa oraz zadanych czasów wtrysku i przerwy, przy zasilaniu układu CommonRail olejem napędowym. Podobnie jak dla paliwa FAME, tak i dla oleju napędowego widać istotne zmiany ilości wtryskiwanego paliwa dla zadanych czasów przerwy. Inny jest jednak charakter zmian. Zwiększanie czasu przerwy do 200 μs powoduje zwiększenie dawki paliwa o 56 %. Podobnie jak w poprzednio analizowanym przypadku i tu występuje zmniejszenie wartości wtryskiwanej dawki paliwa dla czasów z przedziału 200 do 300 μs , lecz o mniejszą wartość (64 %). Dla czasów przerwy większych od 300 μs następuje ponowny wzrost ilości wtryskiwanego paliwa, jednak jest on realizowany przez podawanie dawki w dwóch częściach.



Rysunek 5. Zmiana dawki oleju napędowego w zależności od zadanego czasu przerwy

Na rys.6 przedstawiono wybrane przebiegi wtrysku w funkcji czasu dla zadanych czasów przerwy wynoszących 200, 240 i 300 μs . Ostatnia z wymienionych wartości powoduje wystąpienie podziału dawki paliwa na dwie części. Jak wynika z danych uzyskanych z pomiarów i z wartości przedstawionych na rys. 6, dla zadanych czasów przerwy mniejszych od 240 μs podział dawki nie występuje.



Rysunek 6. Wybrane przebiegi wtrysku oleju napędowego

4. Podsumowanie i wnioski

Wielkość podawanej przez wtryskiwacz dawki paliwa uzależniona jest m.in. od ciśnienia paliwa. Jest to bardzo ważny parametr, ze względu na niebagatelny wpływ ciśnienia wtrysku na jakość rozpylenia paliwa, czy zwłokę samozapłonu. W systemach wtrysku Common Rail jest ono wartością regulowaną w zależności od potrzeb, przez co staje się zmienną kształtującą dawkę paliwa.

Jak wynika z przedstawionych, danych dawka paliwa wtryskiwana przez wtryskiwacz systemu Common Rail zależy nie tylko od zadanego czasu wtrysku i ciśnienia w zasobniku. Na wielkość uzyskiwanej dawki paliwa ma wpływ także zadany i realizowany czas przerwy.

Dla zadanych podczas pomiarów wartości ciśnienia i czasów otwarcia wtryskiwacza, podział dawki na dwie części zaczął się zaznaczać dopiero dla zadanych czasów przerwy z zakresu od 220 do 240 μ s. Znajomość tego czasu ma bardzo istotne znaczenie przy ustalaniu czasów pracy wtryskiwacza, gdyż w tym zakresie wielkość dawki zależy dodatkowo od zadanego czasu przerwy, który nie jest w pełni realizowany.

Dla paliwa FAME i czasu przerwy 1 μ s zmiana ciśnienia w zasobniku z 500 na 700 barów, a więc o 40% powodowała zmianę dawki o 60%. Dla czasu przerwy 50 μ s zmiana ciśnienia w zasobniku z 500 na 700 barów, powodowała zmianę dawki o 50%.

Dla oleju napędowego i czasu przerwy 1 μ s zmiana ciśnienia w zasobniku z 500 na 700 barów, a więc o 40% powodowała zmianę dawki o 88%. Dla czasu przerwy 1 μ s zmiana ciśnienia w zasobniku z 500 na 700 barów powodowała zmianę dawki o 57,5%.

Jak widać z przeprowadzonych analiz, porównań i badań, proces wtrysku paliwa realizowany przez wtryskiwacz systemu Common Rail jest procesem złożonym, zależnym od wielu czynników. Ponieważ przebieg wtrysku paliwa ma bezpośredni i największy wpływ na przebieg spalania w silniku o zapłonie samoczynnym, to poznanie praw rządzących wtryskiem paliwa ma fundamentalny wpływ na możliwość kształtowania całego procesu spalania, a co za tym idzie daje możliwość dalszego doskonalenia tego procesu.

LITERATURA

1. WAJAND J. A., WAJAND J. T., Tłokowe silniki spalinowe, Warszawa 1993.
2. RESNICK R., HALLIDAY D., Fizyka, Wydawnictwa Naukowe PWN, Warszawa 2001.
3. ORZECHOWSKI Z., PRYWER J., Rozpylanie cieczy w urządzeniach energetycznych, WNT Warszawa 1994.
4. ORZECHOWSKI Z., Mechanika płynów, WNT Łódź 1993.
5. BOCHENSKI C., Biodiesel paliwa rolnicze, SGGW Warszawa 2003.
6. SZLACHTA Z., Zasilanie silników wysokoprężnych paliwami rzepakowymi, WKiŁ, Warszawa 2002.
7. Sprawozdanie z badań nr 5120402 wyrobu BIODIESELA D-FAME, Zleceniodawca: Rafineria Trzebinia S.A.
8. Świadectwo Jakości Nr BM-101/209a/2005 oleju napędowego Ekodiesel Ultra D.

