

TOMASZ KNEFEL*

ANALIZA PORÓWNAWCZA WYBRANYCH CZASÓW
WTRYSKU WIELOCZĘŚCIOWEJ DAWKI PALIWACOMPARATIVE ANALYSIS OF CHOSEN INJECTION
TIMES OF MULTIPARTIAL FUEL DELIVERY

Streszczenie

Celem przedstawionych analiz było określenie zakresu, wielkości oraz kierunku zmian, jakim podlegają zadane czasy wtrysku. Omówiono zależności między sygnałem sterującym a sterowanymi czasami wtrysku i czasami uniesienia iglicy poszczególnych części dawki. Sterowane czasy wtrysku wyznaczano, przeprowadzając pomiary czasów napięciowych przebiegów sterujących. Przebiegi generowane przez sterownik mierzono na wyjściu z urządzenia za pomocą oscyloskopu cyfrowego. Z kolei czasy uniesienia iglicy określano na podstawie przebiegów zmian napięcia piezokwarcowego czujnika ciśnienia umieszczonego w komorze elektronicznie sterowanego indykatora dawki wtrysku. Porównania przeprowadzono dwutorowo: dla sum czasów poszczególnych części dawki oraz dla całkowitych czasów wtrysku.

Słowa kluczowe: silnik o zapłonie samoczynnym, układ wtryskowy, podział dawki paliwa

Abstract

The aim of this analysis was to determine the range, magnitude and direction of changes which are subjected to set injection times. One discussed the relationship between control signal, the controlled injection times and lift times of the needle individual parts of fuel delivery. Controlled injection times were determined by performing measurements of the time waveforms of control voltage. Waveforms generated by the control unit were measured at the output of the device by using a digital oscilloscope. The needle lift times were determined on the bases on the waveforms of voltage changes piezo pressure transducer, placed in a chamber of an electronically controlled indicator of injection. Comparisons were carried out in two ways: the sum of the individual times parts of fuel delivery and for the total injection time.

Keywords: Diesel engine, fuel injection system, partition of fuel delivery

* Dr inż. Tomasz Knefel, Katedra Silników Spalinowych i Pojazdów, Wydział Budowy Maszyn i Informatyki, Akademia Techniczno-Humanistyczna w Bielsku-Białej.

1. Wstęp

Współczesne silniki o zapłonie samoczynnym wymagają stosowania takich układów zasilania w paliwo, które zapewnią spełnienie wszystkich stawianych tym silnikom wymagań dotyczących zarówno norm emisji, jak i jednostkowego zużycia paliwa czy poziomu emitowanego hałasu. Dzisiaj, zwłaszcza w samochodach osobowych, najczęściej jest stosowany zasobnikowy układ wtryskowy (Common Rail). Żądane, w danym punkcie pracy, parametry osiąga się przez zmianę strumienia paliwa dostarczanego do cylindra silnika, w tym również przez podział wymaganej dawki paliwa [2, 3]. W większości tego typu systemów stosowane są wtryskiwacze uruchamiane za pomocą elektromagnetycznego zaworu [1, 4] i taki właśnie będzie przedmiotem przedstawionych niżej rozważań.

Analiza czasów otwierania wtryskiwaczy wykazała, że istnieją różnice między zadanymi czasami wtrysku, czasami realizowanymi przez sterownik i rzeczywistymi czasami uniesienia iglicy. Określenie różnic między wspomnianymi wielkościami, ich zależność od ciśnienia paliwa w zasobniku czy też sposobu podziału dawki paliwa na części, jest istotna przy projektowaniu i modyfikacji algorytmów sterujących silnika [6]. Jest również przydatna przy modelowaniu roboczego cyklu pracy silnika o zapłonie samoczynnym.

2. Zakres analizy

Przy stałej, w danej chwili, wartości ciśnienia w zasobniku, czasy wtrysku decydują o wielkości podawanej dawki paliwa. Gdy układ zasilania jest zabudowany na silniku, zadawane wartości czasów są przechowywane w module sterującym i wywoływane stosownie do parametrów pracy silnika. Podczas prowadzonych prac rozwojowych i badawczych żądane wartości są zadawane za pomocą laboratoryjnego sterownika układu wtryskowego. Czasy umieszczone w pamięci stałej modułu sterującego silnika lub wprowadzone do badawczego sterownika będą nazywane zadanymi czasami wtrysku.

Zadany, w postaci elektrycznego sygnału, czas wtrysku zawsze odbiega od oczekiwanych wartości. Dlatego w celu wyznaczenia błędów generowanych przez sterownik mierzy się czasy na wyjściu ze sterownika. Te będą nazywane sterowanymi czasami wtrysku.

Rzeczywisty wznios iglicy wtryskiwacza można wyznaczać różnymi metodami. W niniejszym artykule wykorzystano skutek wtrysku paliwa w postaci przyrostu ciśnienia w komorze elektronicznie sterowanego indykatora dawki wtrysku. Tak wyznaczone czasy nazwano czasami uniesienia iglicy.

Celem artykułu było określenie zakresu, wielkości oraz kierunku zmian, jakim podlegają sterowane czasy wtrysku i czasy uniesienia iglicy, w zależności od zadanego czasu wtrysku, całkowitej dawki oraz ciśnienia paliwa.

Ponieważ rozważano wieloczęściowe dawki wtrysku, w każdym przypadku porównania przeprowadzono dwutorowo:

- dla sum czasów poszczególnych części dawki. W przypadku sterowanych czasów, były to sumy impulsów sterujących podawanych na cewkę wtryskiwacza. Dla czasów uniesienia iglicy były to sumy czasów poszczególnych części dawki, dla których następuje przyrost ciśnienia paliwa w komorze indykatora;
- dla całkowitych czasów wtrysku, czyli dla sum czasów poszczególnych części dawki i przerw między nimi.

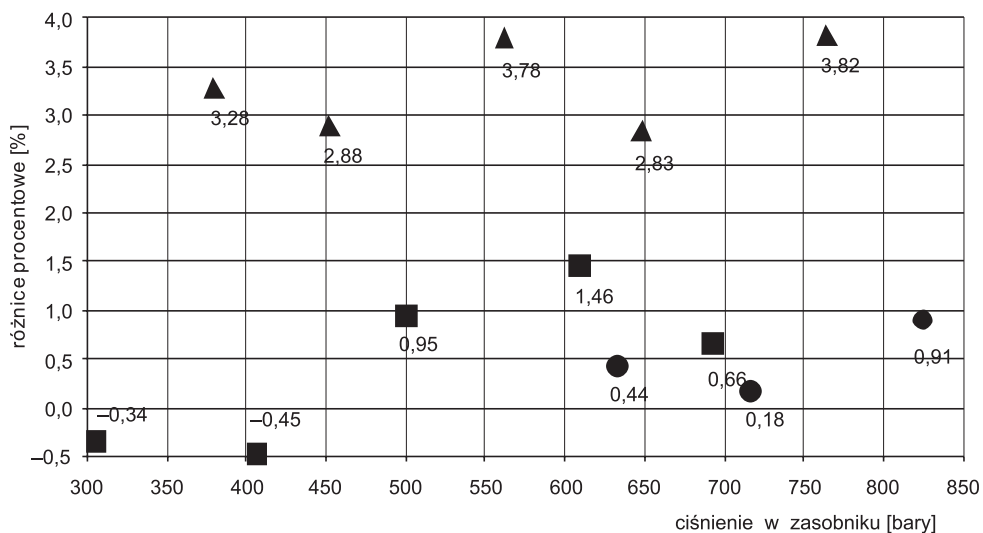
Rozważania były prowadzone dla różnych konfiguracji wieloczęściowych dawek, o różnych wartościach czasów i przerw wtrysku. Pomiarów wykonano dla trzech grup zadawanych parametrów. Pierwszą grupę, przy dwuczęściowym podziale dawki, stanowiły krótkie, jednakowe wartości zadawanych czasów oraz małe, zmienne ciśnienia wtrysku. Drugą – wartości uzyskane dla różnych czasów, przy trzy-, dwu- i jednoczęściowym podziale i różnym ciśnieniu, lecz dla jednakowej, sumarycznej wartości dawki. Trzecią grupę stanowiły jednakowe wartości czasów, zadawanych dla pięcioczęściowego podziału i zmiennych wartości ciśnienia paliwa w zasobniku, z zakresu średnich stosowanych w eksploatacji wartości.

Badany zasobnikowy układ zasilania był sterowany za pomocą sterownika KSSiP-2, opracowanego i wykonanego w Katedrze Silników Spalinowych i Pojazdów. Sterowane czasy wtrysku wyznaczano, przeprowadzając pomiary czasów napięciowych przebiegów sterujących. Przebiegi, generowane przez sterownik, mierzono na wyjściu z urządzenia za pomocą oscyloskopu cyfrowego Tektronix TDS-3014. Z kolei czasy uniesienia iglicy określano na podstawie przebiegów zmian napięcia piezokwarcowego czujnika ciśnienia GU-21D firmy AVL, umieszczonego w komorze elektronicznie sterowanego indykatora dawki wtrysku.

3. Analiza porównawcza zadanych i sterowanych czasów wtrysku

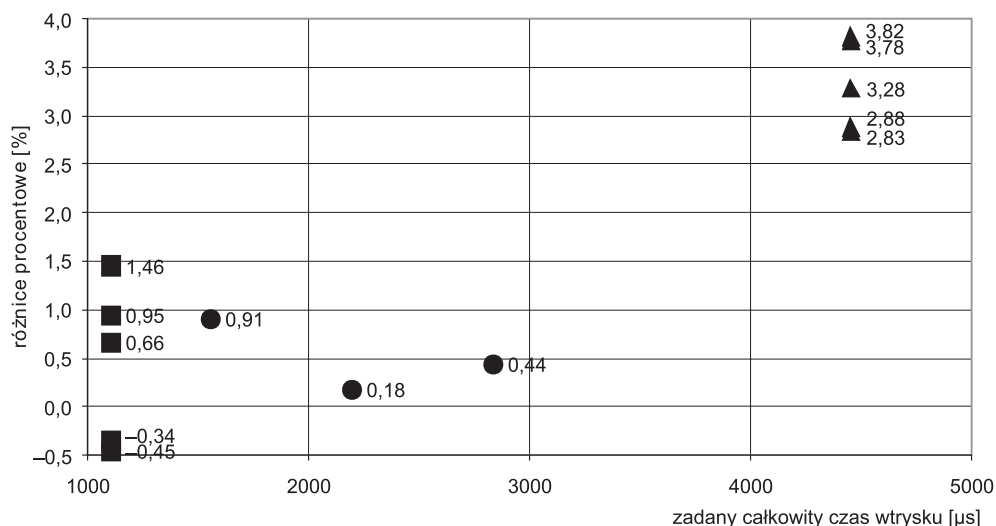
Podczas pracy zasobnikowych układów zasilania stwierdzono różnice między zadanymi a sterowanymi czasami wtrysku. W celu oceny tych różnic, na podstawie przeprowadzonych pomiarów, wyznaczono sterowane czasy wtrysku (czasy trwania impulsów sterujących), wychodzące ze stopni mocy sterownika. Zmierzone wartości sterowanych czasów porównywano z zadanymi czasami wtrysku. Oceny dokonano, opierając się na uśrednionych oscylogramach impulsów sterujących, podawanych przez sterownik na zawory elektromagnetyczne wtryskiwaczy. W każdym punkcie pomiarowym wyznaczano procentowe różnice analizowanych czasów, które obliczano jako różnicę zadanego i sterowanego czasu wtrysku, odniesioną do zadanego czasu wtrysku. Rozważania prowadzono zarówno dla sum czasów poszczególnych części dawki (rys. 1, 2), jak i dla całkowitych czasów wtrysku (rys. 3, 4).

Na rysunku 1, dla wszystkich przypadków pomiarowych, w zależności od ciśnienia, przedstawiono porównanie procentowych różnic sum zadanych i sterowanych czasów poszczególnych części dawki. Największe różnice, od 2,9 do 3,8%, (co odpowiada przedziałowi wartości bezwzględnych od 50,4 do 66,8 μ s), stwierdzono dla długich sekwencji sygnałów sterujących, o dużej liczbie podziałów na części (trzecia grupa pomiarowa, punkty w kształcie trójkąta). Z kolei najmniejsze różnice procentowe, nieprzekraczające 0,9% (od 3,2 do 14,2 μ s), zaobserwowano dla drugiej grupy pomiarowej, to jest dla przypadków o stałej dawce wtrysku (punkty w kształcie kół). Stwierdzono, że wartości ciśnienia w zasobniku wydają się nie mieć wpływu na analizowane wielkości.



Rys. 1. Różnice procentowe sum zadanych i sterowanych czasów poszczególnych części dawki w zależności od ciśnienia w zasobniku

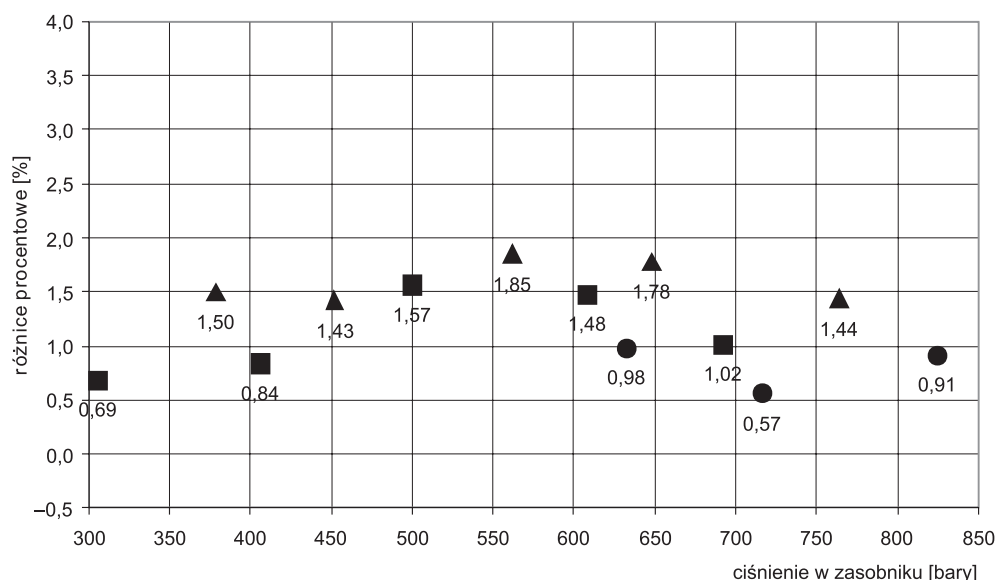
Fig. 1. Percentage differences of sum set and controlled times individual parts of fuel dose depending on rail pressure



Rys. 2. Różnice procentowe sum zadanych i sterowanych czasów poszczególnych części dawki w zależności od zadanego, całkowitego czasu wtrysku

Fig. 2. Percentage differences of sum set and controlled times individual parts of fuel dose depending on total set injection time

Na rysunku 2 przedstawiono zależność omawianych różnic procentowych od zadanego, całkowitego czasu wtrysku. Tu daje się zauważyć podział punktów na grupy odpowiadający przyjętemu w planie badań. W zdecydowanej większości przypadków sumy czasów sterowanych poszczególnych części dawki są mniejsze od zadanych. Widać, że wartości procentowych różnic zależą od wartości całkowitych zadanych czasów wtrysku – im dłuższy całkowity zadany czas i większa liczba części dawki, tym większe procentowe różnice. Na rozbieżności składa się kilka czynników, w tym propagacja sygnału w sterowniku realizacja zadanych czasów przez poszczególne elementy wykonawcze w sterowniku czy współpraca mikrokontrolera z elementami wykonawczymi. Należy jednak zauważyć, że dla większości przypadków, tj. najczęściej stosowanych krótkich czasów i małej liczby podziałów, wartości różnic nie przekraczają 1,5%, co świadczy o dobrej kalibracji urządzenia.



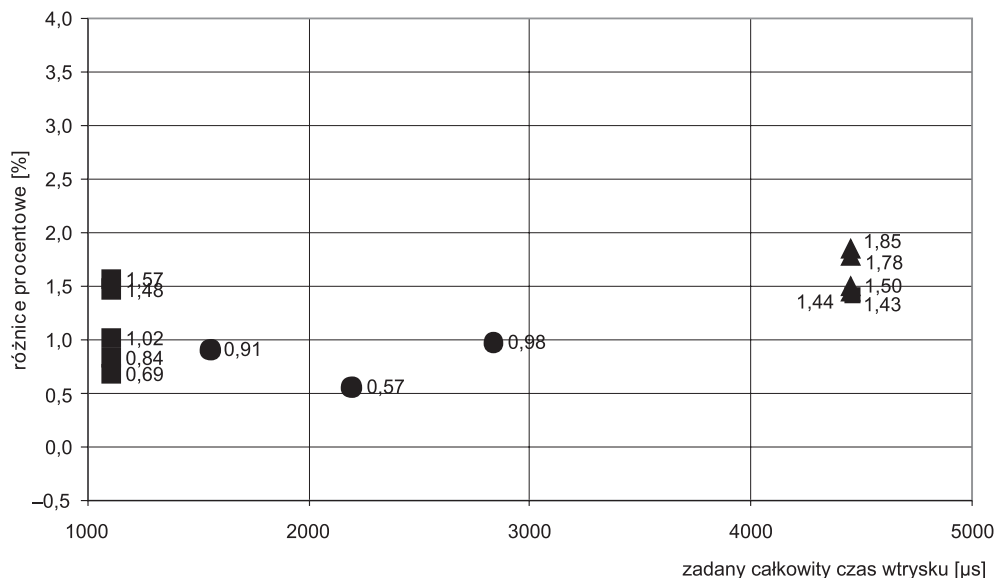
Rys. 3. Różnice procentowe całkowitych zadanych i sterowanych czasów wtrysku w zależności od ciśnienia w zasobniku

Fig. 3. Percentage differences of total set and controlled injection times depending on rail pressure

Na rysunku 3 przedstawiono procentowe różnice całkowitych zadanych i sterowanych czasów wtrysku (czyli sum czasów poszczególnych części i przerw). Całkowite czasy sterowane są zawsze mniejsze od całkowitych zadanych. Wartości różnic są mniejsze niż w przypadkach dotyczących sum czasów sterowanych poszczególnych części dawki i zawierają się w przedziale 0,6–1,9%. Jak można było oczekiwać, największe różnice wartości bezwzględnych (od 63,5 do 82,3 μ s) stwierdzono dla długich czasów pracy wtryskiwaczy, o dużej liczbie podziałów na części (punkty w kształcie trójkąta). Najmniejsze różnice bezwzględne (7,6–17,3 μ s) uzyskano dla przypadków realizujących podział dawki na małą liczbę części. Wartości ciśnienia w zasobniku również nie miały wpływu na analizowane wielkości.

Wykreślono także zależność procentowych różnic całkowitych zadanych i sterowanych czasów od całkowitego zadanego czasu wtrysku (rys. 4). Różnice nie uległy zmianie, jednak

od razu można zauważyć znacznie mniejszy (w stosunku do przedstawionych wcześniej różnic dla poszczególnych części dawki, rys. 2) rozrzut wartości. Wynika on z rozpatrywania dłuższych przedziałów czasowych oraz sposobu wyznaczania analizowanych wartości, który nie uwzględnia czasów włączania i wyłączania poszczególnych części dawki.



Rys. 4. Różnice procentowe całkowitych zadanych i sterowanych czasów wtrysku w zależności od całkowitego, zadanego czasu wtrysku

Fig. 4. Percentage differences of total set and controlled injection times depending on total set injection time

Wydaje się, że całkowita wtrysnięta dawka paliwa jest proporcjonalna do zadanego całkowitego czasu wtrysku. Jednak utożsamianie dawki z zadanym czasem może być bardzo mylące. Na podstawie przedstawionych wyników pomiarów należy stwierdzić, że występują pewne różnice między zadanymi a sterowanymi, czyli rzeczywiście realizowanymi przez sterownik, czasami wtrysku. Różnice te są mniejsze, gdy rozpatruje się całkowite czasy, a większe, gdy bierze się pod uwagę tylko sumy czasów sterowanych poszczególnych części dawki (tj. sumę czasów t_1 do t_n , gdzie n jest liczbą części podziałów dawki). Różnice są istotne zwłaszcza dla wieloczęściowych dawek. W związku z tym będzie występował różny, w stosunku do założonego, rozkład masy dostarczanego paliwa, choć całkowity czas wtrysku praktycznie nie zostanie zmniejszony. Czasy sterowane są mniejsze od zadanych i aby osiągnąć zakładane wielkości dawek, do algorytmów sterujących pracą układu zasilania należy wprowadzać korekty czasów otwarcia. Ponadto, w przypadku podawania dawek wieloczęściowych należy pamiętać, że we wszelkich rozważaniach dotyczących sterowania pracą wtryskiwaczy czy też oceny stosowanego sterownika należy brać pod uwagę sumy czasów aktywacji wtryskiwaczy, a nie całkowite wartości sekwencji sterujących.

4. Czasy uniesienia iglicy poszczególnych części dawki oraz czasy przerw między nimi

Czasy uniesienia iglicy poszczególnych części dawki wyznaczono na podstawie przebiegów zmian ciśnienia zmierzonego w komorze indykatora dawki wtrysku. Zastosowano podobną metodykę postępowania, jak w przypadku wyznaczania charakterystycznych czasów wtrysku i całkowitych czasów uniesienia iglicy [5]. Nazwy poszczególnych części dawki przyjęto zgodnie z terminologią używaną w anglojęzycznej literaturze, tzn. pierwszą część nazwano „pilot”, drugą „pre”, trzecią „main”, czwartą „after” i piątą „post”. Określono również czasy przerw między czasami uniesienia poszczególnych części dawki. Czasy uniesienia są interesujące ze względu na możliwość szybkiej, porównawczej oceny zmian natężeń i czasów trwania wybranych części dzielonej dawki wtrysku, bez konieczności prowadzenia obliczeń czy dodatkowych pomiarów.

Nie rozpatrywano czasów uniesienia przypadków z drugiej grupy pomiarowej, ze względu na zadawane zmienne wartości zarówno czasów, jak i ciśnień wtrysku.

Na rysunku 5 przedstawiono przebiegi czasów uniesienia dla pięcioczęściowej dawki wtrysku. Przerywanymi liniami, wraz z liczbami odpowiadającymi kolejnym częściom, zaznaczono zadane wartości czasów wtrysku poszczególnych części dawki. Natomiast ciągłymi liniami (również z właściwymi liczbami) wykreślono aproksymowane przebiegi zmierzonych czasów uniesienia iglicy poszczególnych części dawki. Ze względu na wprowadzony wielokrotny podział i stosunkowo wysokie ciśnienia wtrysku, wyraźnie stają się widoczne zmiany czasów uniesienia. Na rys. 5 przedstawiono je w zależności od całkowitej ilości wtrysniętego paliwa. Wszystkie czasy rosną w miarę wzrostu całkowitej dawki, czyli – wobec stałych dla danej części dawki zadanych czasów wtrysku – z przyrostem ciśnienia wtrysku.

Należy zwrócić uwagę na czasy uniesienia dwóch pierwszych, następujących po sobie części: pilot i pre. Mimo zadawania dla obu jednakowych czasów wtrysku (377 μ s), uzyskano różne wartości czasów uniesienia – mniejsze dla pierwszej (82–431 μ s) i większe dla drugiej części (329–613 μ s). Jest to ważne spostrzeżenie z punktu widzenia projektowania procesu wtrysku. Różnice występują w fazie wzniosu iglicy i mają związek z prędkością narastania natężenia prądu sterującego wtryskiwaczem, czyli ze zwiększaniem strumienia magnetycznego w jego cewce. Przy pierwszej aktywacji (przy podawaniu pierwszej części dawki – pilot) natężenie prądu kierowane na cewkę dopiero po pewnym czasie osiąga wartość niezbędną do uniesienia iglicy, a przez to czas uniesienia iglicy osiąga mniejszą wartość. Odwrotnie dzieje się podczas aktywacji drugiej części dawki. Zadana wartość czasu przerwy między częściami pilot i pre jest mniejsza od wartości czasu koniecznego do zaniku prądu w cewce po aktywacji poprzedniej części dawki. A zatem ponowne podanie sygnału sterującego powoduje narastanie prądu nie od zera, jak było to w pierwszej części, a od poziomu stanowiącego około 50% wartości maksymalnej, wobec czego szybciej są osiągnięte warunki otwarcia iglicy, co skutkuje wydłużeniem czasu uniesienia iglicy drugiej części.

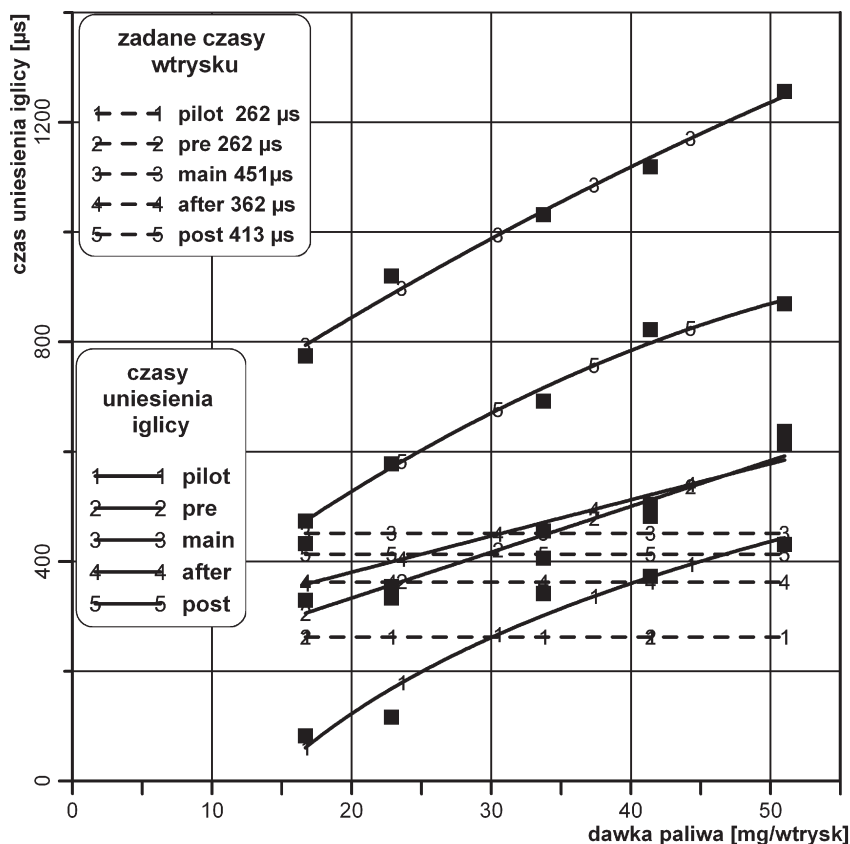
Przebieg i wartości czasów dla trzeciej części dawki (main) wynikają zarówno z omówionych wyżej przebiegów natężenia prądu, jak i wartości zadanego czasu wtrysku. Duży wpływ ma również zadana wielkość przerwy między trzecią i czwartą częścią dawki (między main i after), znacznie większa od pozostałych, co przekłada się na dłuższe czasy opóźnienia końca wtrysku, a tym samym dłuższe czasy uniesienia. Wartości czasu dla czwartej części (after), zbliżone do wartości drugiej części dawki, wynikają przede wszystkim z dużej wartości zadanej przerwy poprzedzającej (1067 μ s). Przerwa umożliwia znaczące zmniejszenie natężenia prądu w cewce po aktywacji trzeciej części i powoduje dłuższy czas narastania strumienia magnetycznego

czwartej części, podobnie jak w przypadku pierwszej części. Ponadto zadany czas czwartej części jest jedynie o 100 μs większy od zadanego czasu drugiej części. Z kolei na wartości czasów uniesienia piątej części dawki mają wpływ zarówno stosunkowo długa przerwa poprzedzająca, jak i większa wartość zadanego czasu i brak ponownej aktywacji po zakończeniu tej części, co powoduje zwiększenie czasów uniesienia.

Większe prędkości narastania czasów uniesienia można zaobserwować dla tych części dawki, po których są zadawane długie przerwy lub po których przerwy nie występują. W tych przypadkach opóźnienie końca wtrysku przyjmuje największe wartości, które wpływają na wzrost czasów uniesienia.

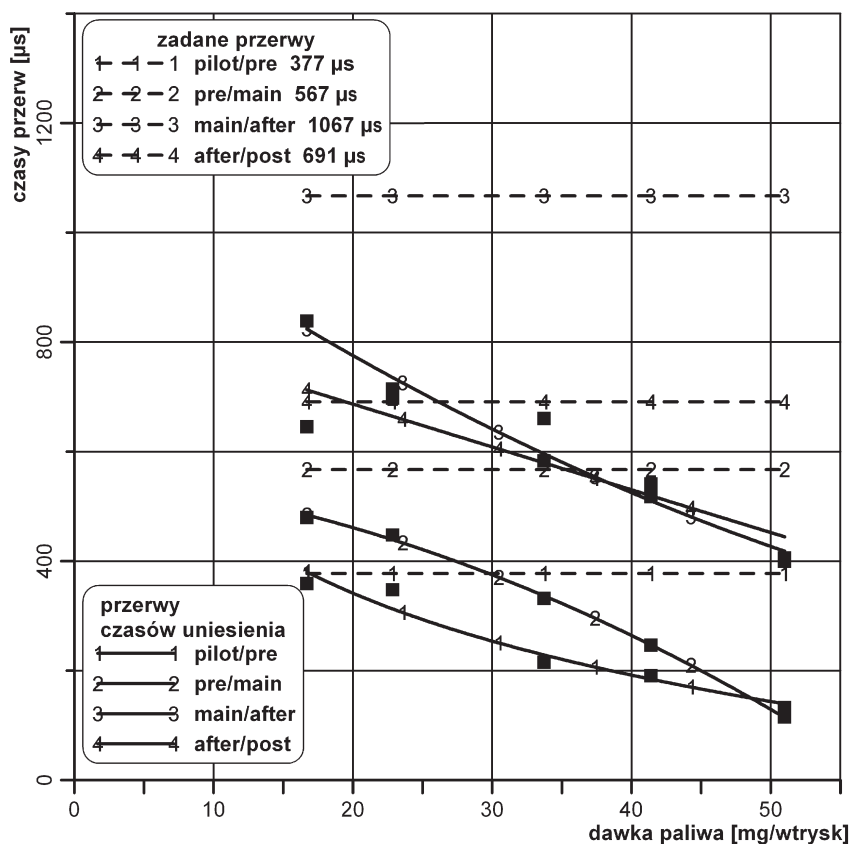
Przerwy cząstkowych czasów uniesienia zmniejszają się wraz ze wzrostem sumarycznej ilości podawanego paliwa (rys. 6). To zjawisko jest związane z omówionym wcześniej zwiększaniem wartości czasów uniesienia, który zawsze odbywa się kosztem przerw.

Podobną analizę wykonano dla dawki paliwa podzielonej na dwie części (pierwsza grupa pomiarów, rys. 7).



Rys. 5. Czasy uniesienia iglicy pięcioczęściowej dawki w zależności od sumarycznej ilości wtrysniętego paliwa

Fig. 5. Needle lift times of the five-part dose depending on fuel delivery

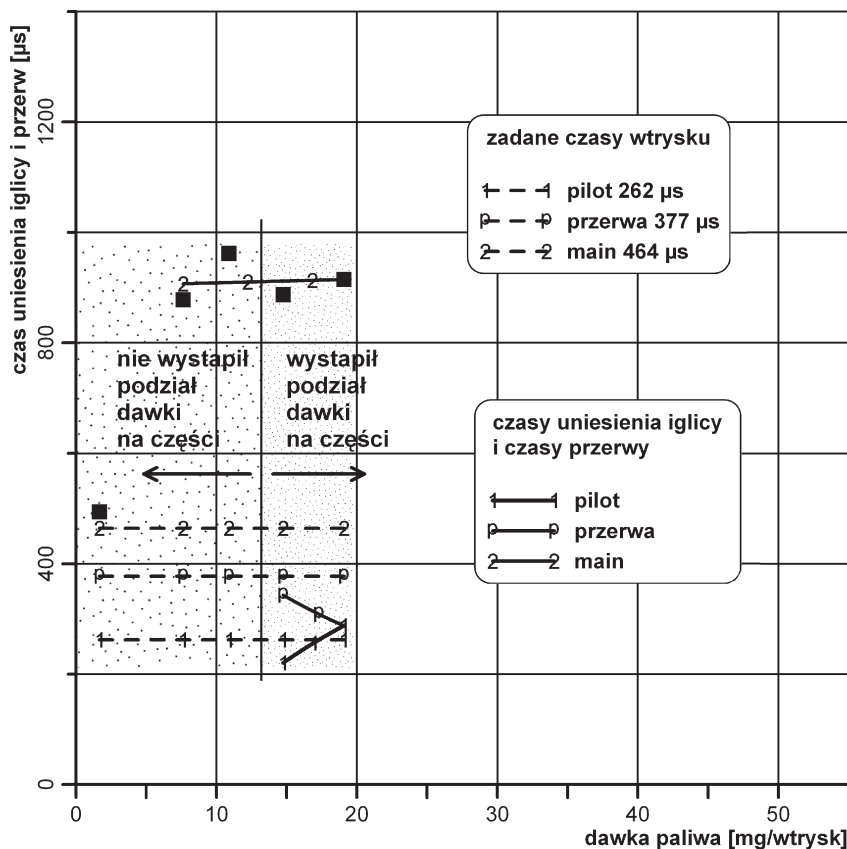


Rys. 6. Przerwy czasów uniesienia iglicy pięcioczęściowej dawki w zależności od sumarycznej ilości wtrysniętego paliwa

Fig. 6. Interval times of the five-part dose depending on fuel delivery

Przebiegi czasu uniesienia dawki pilotującej oraz przerwy między dawką pilotującą a main mogą mieć jedynie charakter poglądowy, ponieważ każdy z nich został wykreślony tylko na podstawie dwóch punktów, które można było odczytać z zarejestrowanych przebiegów. Większej liczby charakterystycznych wartości nie można było pozyskać, pomimo wyraźnego zadawania podziału na części, dla niskich ciśnień w zasobniku nie został on zrealizowany. Podział na dwie części obserwowano dopiero dla ciśnień większych niż 600 barów (dawki większe od 14 mm³/wtrysk). Wtedy na tyle istotnie zwiększa się czas uniesienia związany z pierwszą częścią dawki (pilot), że można go wyodrębnić.

Przebieg czasu uniesienia głównej części dawki (main) w zależności od sumarycznej dawki wtrysku, wynika właśnie z wpływu ciśnienia w zasobniku na czas uniesienia. Jest to widoczne zwłaszcza dla bardzo małej ilości podawanego paliwa i niskiej wartości ciśnienia (pojedynczy punkt w lewej części wykresu), gdzie czas uniesienia ma niewielką wartość, wyraźnie odbiegającą od innych tej grupy pomiarowej. Dla pozostałych punktów czasy uniesienia stabilizują się wokół wartości 900 μs, niezależnie od tego czy podział wystąpił, czy też nie.



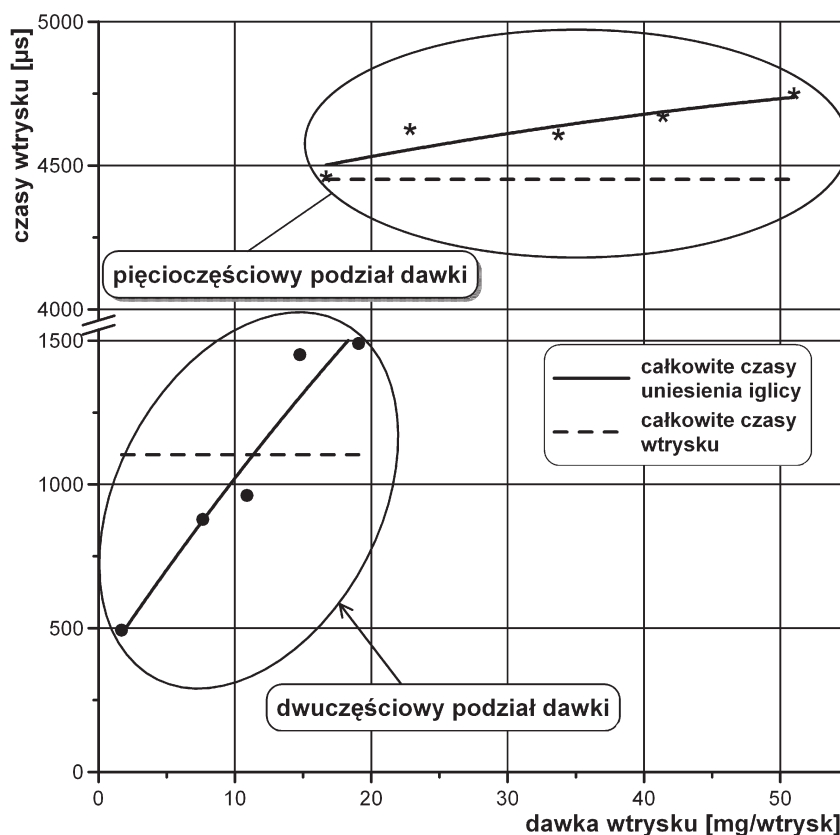
Rys. 7. Czasy uniesienia iglicy i czasy przerwy dwuczęściowej dawki w zależności od sumarycznej ilości wtrysniętego paliwa

Fig. 7. Needle lift times and interval times of the two-part dose depending on fuel delivery

Przeprowadzono również analizy dla całkowitych czasów uniesienia iglicy, to jest dla sum czasów uniesienia i przerw między nimi (rys. 8). Mimo że zarówno w pierwszej, jak i trzeciej grupie pomiarowej zadane czasy wtrysku nie zmieniają się, to całkowite czasy uniesienia iglicy rosną wraz ze wzrostem dawki wtrysku. Sumaryczne wartości zadanych czasów dla pierwszej grupy są blisko czterokrotnie mniejsze niż dla trzeciej grupy i to właśnie w efekcie zadawania dwuczęściowych dawek szybciej rosną całkowite czasy uniesienia. Tu średni przyrost czasu wynosi 57,2 μ s/mg paliwa. Dla pięcioczęściowych dawek przyrosty następują znacznie wolniej i wynoszą średnio 0,75 μ s/bar. Tak istotne różnice wynikają z przyjętego planu badań, w którym dla pierwszej grupy pomiarowej założono zadawanie stosunkowo krótkich czasów i – dla części punktów – niskich ciśnień wtrysku. Uzyskano w ten sposób małe dawki wtrysku, które mimo zadawania dwuczęściowego podziału w większości nie zostały zrealizowane jako podzielone, właśnie ze względu na zbyt niskie ciśnienie. Zwiększanie ciśnienia powoduje zmniejszenie czasu opóźnienia początku wtrysku i wydłużenie końca wtrysku, a więc wydłużenie całkowitego czasu uniesienia iglicy [5]. Stosunkowo długi czas

osiadania iglicy na gnieździe, jaki wynika z przebiegu prądu sterującego, ma procentowo większy udział w całkowitych czasach uniesienia dwuczęściowych dawek niż w długich, podzielonych na pięć części. Stąd szybkie zwiększanie całkowitych czasów uniesienia dla dwuczęściowych dawek.

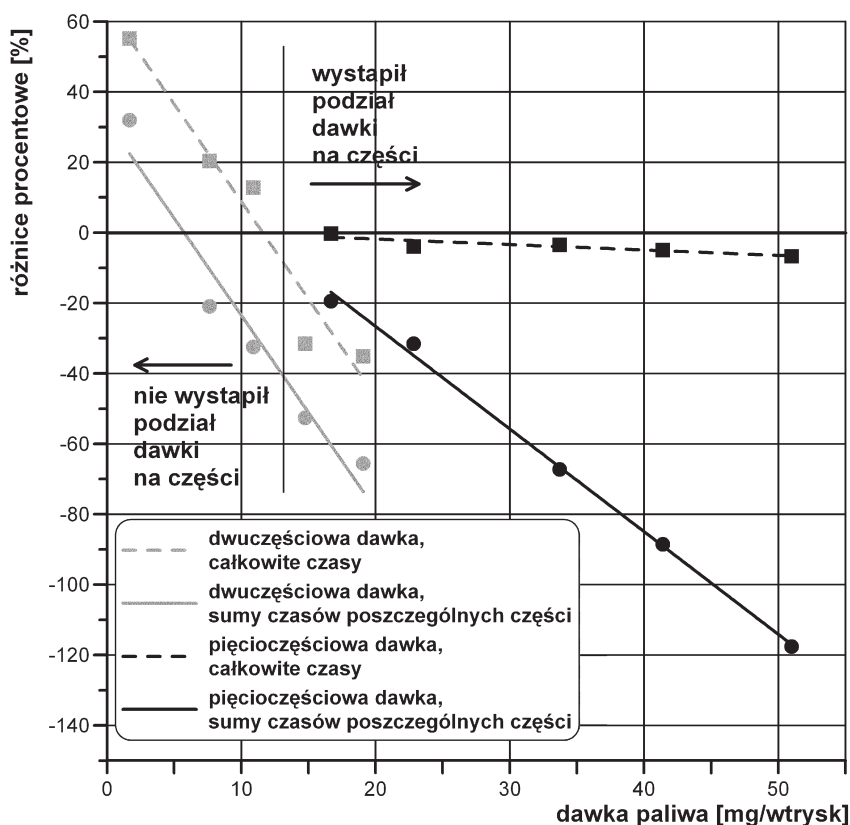
Odczytane wartości czasów uniesienia porównano z zadanymi wartościami czasów wtrysku. Analizę prowadzono zarówno dla sum czasów uniesienia poszczególnych części dawki, jak i dla całkowitych czasów uniesienia. Do oceny wykorzystano procentowe różnice analizowanych czasów, które obliczano jako różnicę zadanego czasu (lub sumy czasów) wtrysku i czasu (lub sumy czasów) uniesienia, odniesioną do zadanego czasu (lub sumy czasów) wtrysku.



Rys. 8. Całkowite czasy uniesienia iglicy dwu- i pięcioczęściowych dawek w zależności od sumarycznej ilości wtrysniętego paliwa

Fig. 8. Entire needle lift times of the two- and five-part doses depending on fuel delivery

Na rysunku 9 przedstawiono różnice procentowe rozważanych czasów wtrysku wyznaczone dla pierwszej i trzeciej grupy pomiarowej. Wszystkie cechują się liniowym charakterem przebiegu, co oznacza, że w prosty sposób można je wykorzystać do wstępnego prognozowania wartości czasów uniesienia w innych niż zmierzone punktach pracy układu zasilania.



Rys. 9. Różnice procentowe zadanych czasów wtrysku i czasów uniesienia iglicy wyznaczone dla dwu- i pięcioczęściowych dawek

Fig. 9. Percentage differences of sum set and needle lift determined for two- and five portion fuel doses

Można zauważyć istotne rozbieżności między wartościami czasów zadanych i uniesienia iglicy. Są one zwłaszcza duże, gdy rozpatruje się sumy czasów uniesienia iglicy poszczególnych części dawki i odnosi się do odpowiednich sum zadanych czasów wtrysku (ciągłe linie). Sumy czasów uniesienia są w większości przypadków większe niż analogiczne sumy zadane. Wyjątkiem są przypadki obejmujące dawki paliwa mniejsze niż 7 mg/wtrysk. Tu, z powodu stosowania małych ciśnień wtrysku i w konsekwencji niewystąpienia podziału dawki na części, większe są zadane czasy. Dla analizowanych sum dają się zauważyć znaczne zmiany różnic procentowych sięgające w rozpatrywanych zakresach parametrów wtrysku 120% (ciągła, czarna linia). Różnice rosną wraz ze zwiększaniem ilości podawanego paliwa, a wobec zadawania stałych wartości czasów – wraz ze wzrostem ciśnienia paliwa. Największe wartości są osiągane dla wieloczęściowych dawek, o większej liczbie podziałów na części, które powodują większe przyrosty sum czasów uniesienia poszczególnych części dawki.

Przy porównaniu całkowitych czasów wtrysku (kreskowane linie) widać, że jedynie dla małych dawek, mniejszych niż 14 mg/wtrysk, dla których nie występuje podział na części,

zadane czasy są większe od czasów uniesienia iglicy. Dla pozostałych zarejestrowano większe wartości czasów uniesienia.

Dla dwuczęściowych, niewielkich dawek, realizowanych początkowo przy niskim ciśnieniu wraz z jego wzrostem następuje szybki przyrost całkowitych czasów uniesienia iglicy. Te zmiany wynikają przede wszystkim ze znaczącego zmniejszania się opóźnienia początku wtrysku związanego ze wzrostem ciśnienia. Następują one szybciej niż w przypadku dłuższych, pięcioczęściowych dawek, realizowanych przy nieco wyższych ciśnieniach. Ponadto w pierwszej grupie pomiarowej zadawano czasy zawierające tylko jedną przerwę, więc zwiększanie czasu uniesienia poszczególnych części powodowało zarówno zmniejszenie przerwy, jak i zwiększenie całkowitego czasu uniesienia iglicy. Dlatego też dla przypadków tej grupy występują różnice między czasami zadanymi a uniesienia, zwiększające się wraz ze wzrostem dawki, a wobec stałych wartości czasów i ciśnienia paliwa w zasobniku (szara linia kreskowana). Ich wartości zmieniają się od 55 do -35%, co odpowiada przedziałowi bezwzględnych różnic od 600 do -390 μ s.

Dla dawek pięcioczęściowych również następuje wzrost procentowych różnic (czarna linia kreskowana), jednak znacznie mniejszy, bowiem dla czterokrotnie większych czasów osiągają one maksymalną wartość -6,7% (-300 μ s). Zmierzone, bezwzględne wartości różnic są porównywalne dla obu grup pomiarowych, lecz przez odniesienie do większych wartości dla trzeciej grupy uzyskuje się mniejsze wartości procentowych różnic. Ponadto zwiększanie się czasów uniesienia poszczególnych części dawek nie powoduje zwiększenia całkowitego czasu uniesienia, bowiem odbywa się w większości kosztem przerw.

5. Wnioski

Na podstawie przedstawionych wyżej analiz sformułowano następujące wnioski:

A. Dotyczące zadanych i sterowanych czasów wtrysku:

Sterowane czasy wtrysku są mniejsze od zadanych. Wprawdzie przy zadawaniu krótkich czasów mogą zdarzyć się przypadki, dla których powyższe nie jest prawdziwe, jednak przypadki te są jednostkowe.

Największe różnice, sięgające 3,8%, między zadanymi a sterowanymi czasami poszczególnych części, występują dla wieloczęściowych dawek. Ta forma podawania paliwa jest z pewnością częściej stosowana we większych jednostkach napędowych. Przy podziale na małą liczbę części różnice są mniejsze i przyjmują wartości od 0,9 do 1,5%.

Procentowe różnice zadanych i sterowanych całkowitych czasów wtrysku są dla wieloczęściowych dawek mniejsze niż dla sum czasów poszczególnych części dawki i dochodzą do 1,9%. Podział na małą liczbę części powoduje utrzymanie wartości tych różnic na poziomie podobnym do różnic dla poszczególnych czasów, a więc około 1,5%.

Przedstawione różnice mogą stanowić podstawę do oceny układu sterującego wtryskiwaczem pod względem dokładności odwzorowania założonych sekwencji sterujących. Jak można zauważyć, generowanie kilku następujących po sobie impulsów sterujących powoduje powstanie pewnych błędów w układach wykonawczych. Mogą one wynikać z innych niż założono parametrów pracy elektronicznych elementów sterownika. Błędy składają się na wartość korekcyjną, którą należy uwzględnić w algorytmach sterujących dawkowaniem paliwa. Należy podkreślić, że przy ocenie stopnia odwzorowania zadanych czasów wtrysku

należy opierać się na czasach sterowanych poszczególnych części dawki, a nie na całkowitych czasach wtrysku.

W związku z powyższym można stwierdzić, że zaprojektowany i wykonany na potrzeby tej pracy sterownik układu zasilania w paliwo zapewnia należyłą dokładność sterowania dzieloną dawką wtrysku.

B. Dotyczące czasów uniesienia iglicy:

Przy zasilaniu paliwem silnika o zapłonie samoczynnym bardzo istotne jest zagadnienie podania wymaganej wielkości dawki przy określonym ciśnieniu. Innymi słowy, stosownie do punktu pracy silnika konieczne jest uzyskanie właściwego rozpylenia paliwa, przy zastosowaniu odpowiedniej długości kąta (czasu) wtrysku. Z przedstawionych wyżej wyników pomiarów wynika, że zadane czasy różnią się od czasów uniesienia iglicy. W zdecydowanej większości analizowanych przypadków zadane czasy były mniejsze niż czasy uniesienia. Jednak dla małych dawek, realizowanych przy małych ciśnieniach paliwa, powyższa prawidłowość nie obowiązuje. Wynika to właśnie z małych wartości ciśnienia panujących wtedy w części wysokociśnieniowej układu. W tych warunkach, po podaniu sygnału uruchamiającego wtryskiwacz, wznios iglicy następuje z małą prędkością, trwa stosunkowo długo, a tym samym duża część impulsu sterującego zostaje przeznaczona na unoszenie iglicy. Z tej samej przyczyny iglica stosunkowo szybko opada. Stąd tam, gdzie podawane są bardzo małe dawki, większe są zadane czasy. Zatem przy projektowaniu algorytmów sterujących należy zbadać, czy proponowane sekwencje zadawanych czasów wtrysku nie spowodują nadmiernego wydłużenia procesu spalania lub zbyt gwałtownego przyrostu ciśnienia w komorze spalania silnika. Przy doborze czasów wtrysku bardzo pomocna i prosta w realizacji może okazać się analiza porównawcza oparta na zadanych czasach wtrysku i czasach uniesienia iglicy.

Aby mógł nastąpić podział dawki paliwa na części, muszą być spełnione pewne warunki. Przede wszystkim należy wytworzyć odpowiednie ciśnienie paliwa oraz zadawać wystarczająco długie czasy przerw. Należy również wziąć pod uwagę przebiegi krzywych narastania i zaniku natężenia prądu zaworu sterującego. Przy zadawaniu stałych wartości czasów wtrysku czasy uniesienia iglicy rosną wraz ze wzrostem ciśnienia. Przyrost jest uzależniony od wielkości przerwy, bo dla dłuższych przerw zwiększa się czas opóźnienia końca wtrysku i tym czas uniesienia. To z kolei powoduje zmniejszanie przerw między częściami dawki.

Podczas oceny wartości różnic procentowych całkowitych czasów zadanych i uniesienia iglicy należy pamiętać, że wydłużanie czasów uniesienia poszczególnych części dawki następuje przez zmniejszanie zadanych przerw. Tak więc przy dużej liczbie podziałów dawki na części różnice całkowitych czasów ulegają tylko nieznacznym zmianom. Jednak przy krótkich czasach i małej liczbie przerw różnice mogą być znaczne (pierwsza grupa pomiarowa).

L i t e r a t u r a

- [1] Bosch Robert GmbH., *Diesel-Engine Management*, Chichester: John Wiley & Sons, 2005.
- [2] Badami M., Mallamo F., Millo F., Rossi 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*, Int. J. Engine Res., Vol. 4, No. 4, London 2003, 299-314.

- [3] Carlucci P., Ficarella A., Laforgia D., *Effects on combustion and emissions of early and pilot fuel injections in Diesel engines*, Int. J. Engine Res., Vol. 6, No. 1, London 2005, 43-60.
- [4] Jorach R., Bercher I., Meissonnier G., Milovanovic N., *Common-Rail-System von Delphi mit magnetventilen und Einkolben-Hochdruckpumpe*, MTZ 2011, 3, 186-191.
- [5] Knefel T., *The evaluation of the characteristic injection times of a multiple fuel dose*, J. of KONES, Vol. 18, No. 2, Kraków 2011, 205-213.
- [6] Wang X., Kikutami T., Takeuchi K., Nakane N., *Development Toward Diesel Revolution Using Ultra High Pressure CRS with Closed-Loop Control System for Heavy Duty Engine*, Proceedings of the World Automotive Congress FISITA 2010, F2010-A-164, Budapest 2010.