

# STANOWISKO DO WYZNACZANIA CHARAKTERYSTYK PRZEPŁYWOWYCH WTRYSKIWACZY BENZYNY

RAFAL DYCHTO<sup>1</sup>, JACEK LEYKO<sup>2</sup>, GRZEGORZ MITUKIEWICZ<sup>3</sup>

Politechnika Łódzka

## Streszczenie

W artykule opisano stanowisko służące do wyznaczania charakterystyk przepływowych wtryskiwaczy benzyny do silników z bezpośrednim wtryskiem paliwa. Wyznaczone charakterystyki posłużyły określeniu relacji pomiędzy czasem wtrysku benzyny, a czasem wtrysku paliwa LPG. Zadaniem prezentowanego stanowiska jest również sterowanie wtryskiem paliwa podczas wielogodzinnych prób trwałościowych przy ograniczonej dawce benzyny i określenie zmian czynnego przekroju otworów wtryskiwaczy po każdej z takich prób. Artykuł zawiera szczegółowy opis tego stanowiska i wchodzącego w jego skład urządzenia sterującego pracą wtryskiwacza. Przebiegi sterujące pracą wtryskiwacza opracowano na podstawie badań przebiegów sterujących, rzeczywistych podczas prób wykonanych na hamowni podwozowej. Przyjęto uproszczoną, matematyczną zależność opisującą zjawiska przepływowe występujące podczas przepływów ustalonych i na jej podstawie zaproponowano procedurę pomiarową. Opisano również wyniki wstępnych pomiarów uzyskane na prezentowanym stanowisku w postaci zależności opisujących efektywne pole przekroju w zależności od zmian czasu wtrysku i różnicy ciśnień przed i za otworem wtryskiwacza. Otrzymane charakterystyki porównano z wynikami uzyskanymi wg przyjętego modelu matematycznego. Planuje się wykorzystanie prezentowanego stanowiska do prób trwałościowych wtryskiwaczy benzyny z wtryskiem ograniczonej dawki benzyny do płomienia.

**Słowa kluczowe:** silniki spalinowe, trwałość wtryskiwaczy, wydatek wtryskiwaczy, charakterystyki przepływowe wtryskiwaczy, stanowisko badawcze

## 1. Wprowadzenie

Do zasilania silników benzynowych obok systemów pośredniego wtrysku wielopunktowego do kanałów dolotowych, stosuje się coraz powszechniej bezpośredni wtrysk benzyny

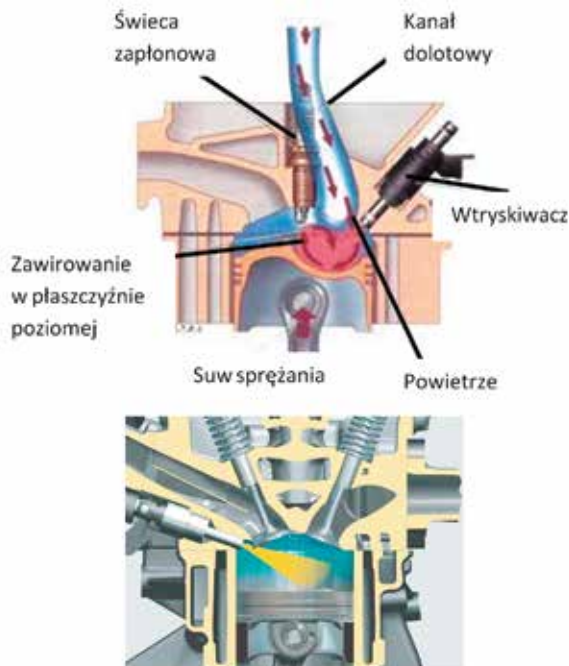
<sup>1</sup> Politechnika Łódzka, Katedra Pojazdów i Podstaw Budowy Maszyn, ul. Żeromskiego 116, 90-924 Łódź, e-mail: rafal.dychto@p.lodz.pl, tel. 42 631 23 93

<sup>2</sup> Politechnika Łódzka, Katedra Pojazdów i Podstaw Budowy Maszyn, ul. Żeromskiego 116, 90-924 Łódź, e-mail: jacek.leyko@p.lodz.pl, tel. 42 631 23 93

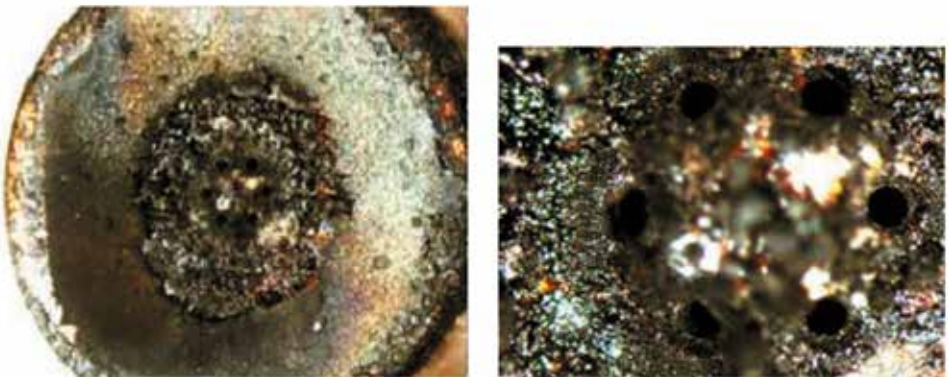
<sup>3</sup> McMaster University, MFL, Hamilton, Ontario, Canada, L8S 4L7, e-mail: mitukig@mcmaster.ca, ph. +48 905 393 95 52

do cylindra. Wtrysk bezpośredni pozwala bowiem regulować skład mieszanki w szerszych granicach i w wybranych obszarach pracy spalać ubogą mieszankę uwarstwioną. Dzięki temu możliwe jest ograniczenie zużycia paliwa oraz emisji szkodliwych składników spalin.

Umieszczenie wtryskiwacza benzyny w komorze spalania (rys. 1) naraża go na działanie wysokiej temperatury i ciśnienia, co staje się przyczyną koksowania paliwa na ściankach



Rys.1. Położenie wtryskiwacza w silnikach ZI z bezpośrednim wtryskiem paliwa [3, 7]



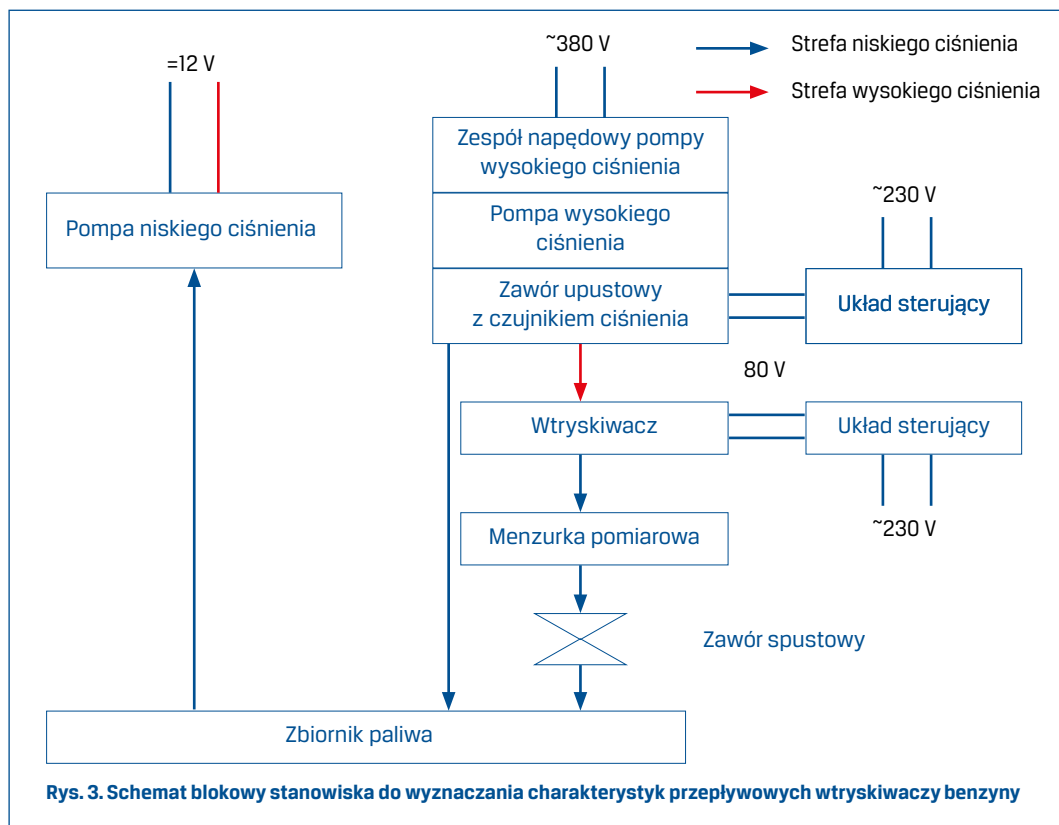
Rys.2. Odkładanie się nagaru na ściankach wtryskiwacza

wtryskiwacza [2]. To z kolei ogranicza czynny przekrój otworów wtryskiwacza (rys. 2) i doprowadza do zmniejszenia wydatku wtryskiwanego paliwa, a w skrajnych przypadkach nawet do ustania przepływu benzyny przez otwór wtryskiwacza. Zjawisko koksowania zaburza proces dawkowania benzyny w związku z tym celowe staje się określenie zmian wydatku wtryskiwanego paliwa w funkcji czasu pracy wtryskiwacza.

## 2. Stanowisko pomiarowe do wyznaczania charakterystyk wtryskiwaczy benzynowych

Stanowisko pomiarowe do prób trwałościowych musi zapewnić sterowanie wtryskiwaczem, gdy przez wiele godzin pracuje on w zbiorniku z płomieniem oraz umożliwić porównanie charakterystyki wypływu na początku i na końcu próby.

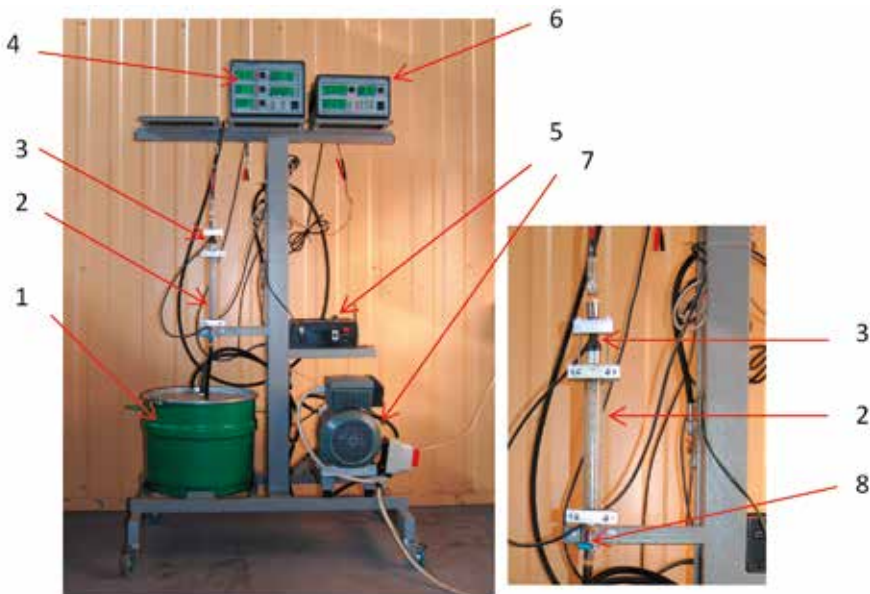
Diagnostyczne stanowiska probiercze oferowane przez producentów aparatury wtryskowej pozwalają określić stan i parametry pracy układu wtrysku paliwa, lecz nie nadają się do wielogodzinnych prób trwałościowych. Z tego powodu zdecydowano się zbudować układ sterujący, który można wykorzystać zarówno przy długotrwałej pracy z wtryskiem paliwa do płomienia, jak i do wyznaczenia charakterystyki wtryskiwacza.



Stanowisko oparto na elementach układu bezpośredniego wtrysku benzyny Bosch Motronic MED 7. Zrezygnowano z oryginalnego sterownika zastępując go własnym układem sterującym. Schemat blokowy stanowiska pokazano na rys. 3. Stanowisko składało się z pompy niskiego ciśnienia, która tłoczyła paliwo do pompy wysokiego ciśnienia. W odróżnieniu od układu Motronic pompa wysokiego ciśnienia współpracowała nie z oryginalnym sterownikiem silnika, lecz ze sterownikiem uniwersalnym pomp wtryskowych wysokiego ciśnienia firmy Mechatronika Wyposażenie Dydaktyczne. Dzięki zaworowi upustowemu z czujnikiem ciśnienia utrzymywano zadane ciśnienie na stałym poziomie podczas całej próby. Układ zapewniał wybór zadanej wartości ciśnienia z przedziału od 2 do 15 MPa. Paliwo pod wysokim ciśnieniem płynęło wprost do pojedynczego wtryskiwacza. Osobny układ sterujący zapewniał zasilanie wtryskiwacza napięciem 80 V, oraz sterowanie przebiegiem i częstotliwością wtrysku.

Na rys. 4. przedstawiono widok kompletnego stanowiska pomiarowego. Na rys. 5 przedstawiono zespół napędowy pompy wysokiego ciśnienia. Pompa napędzana była silnikiem trójfazowym z falownikiem służącym do regulacji prędkości obrotowej.

Na rys. 6 przedstawiono widok panelu głównego sterownika zaprojektowanego do współpracy z wtryskiwaczem. Sterownik umożliwiał pracę w dwóch trybach. W trybie pracy ciągłej wykorzystywanym w czasie wielogodzinnych prób trwałościowych oraz trybie



**Rys. 4** Stanowisko pomiarowe do wyznaczania charakterystyk przepływowych wtryskiwacza benzyny  
 1. – Zbiornik paliwa, 2. – Menzurka pomiarowa, 3. – Badany wtryskiwacz, 4. – Tester pomp paliwa common rail, 5. – Układ sterujący pracą wtryskiwacza benzyny, 6. – Tester wtryskiwacza paliwa common rail, 7. – Zespół napędowy pompy wysokiego ciśnienia, 8. – zawór spustowy menzurki

realizującym zadaną liczbę wtrysków. Tryb, w którym układ realizował zadaną liczbę wtrysków, a paliwo gromadzone było w menzurce (2) (rys. 4) używany był przy wyznaczaniu charakterystyki wypływu z wtryskiwacza na początku i końcu próby trwałościowej.

Przebieg napięcia sterującego badanym wtryskiwaczem ustalono na podstawie rejestracji przebiegu napięcia na zaciskach cewki wtryskiwacza zainstalowanego w silniku. Rejestracji dokonano podczas badań pojazdu w hamowni podwozowej. Przyjęty przebieg, realizowany przez układ sterujący przedstawia rys. 8. Przebieg składa się z części stałej w postaci dwóch impulsów o stałej długości oraz części zmiennej złożonej z serii impulsów,



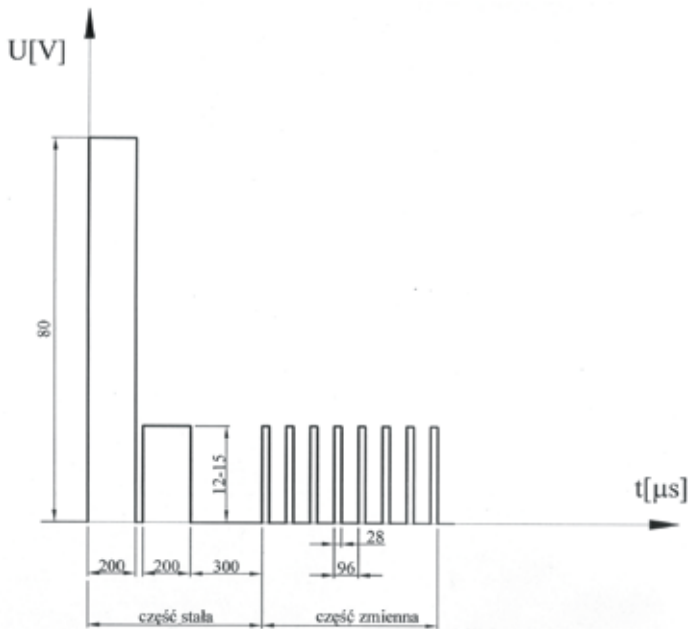
**Rys. 5. Zespół napędowy pompy wysokiego ciśnienia**

1. - Silnik elektryczny wraz z falownikiem, 2. - Główny wyłącznik zasilania, 3. - Pompa wysokiego ciśnienia wraz z zaworem upustowym i czujnikiem ciśnienia, 4. - Pompa niskiego ciśnienia



**Rys. 6. Panel główny sterownika wtryskiwacza benzyny/gazu**

1. - Przycisk wyboru ustawianej wielkości, 2. - Przełącznik rodzaju badanego wtryskiwacza, 3. - Ekran LCD, 4. - Pokrętko zmiany wartości wybranego parametru, 5. - Przycisk wyzwalający pomiar



Rys. 7. Ideowy przebieg napięcia na zaciskach wtryskiwacza realizowany przez układ sterujący

których liczbę dobiera się w zależności od czasu otwarcia wtryskiwacza. Obie części rozdzielone są 300-mikrosekundową przerwą.

Pierwszy z dwóch impulsów części stałej jest 200-mikrosekundowym impulsem o napięciu 80 V, zaś drugi 200-mikrosekundowym impulsem o napięciu 12-15 V. Część zmienna składa się z 28-mikrosekundowych impulsów o napięciu 12-15 V, których współczynnik wypełnienia wynosi 29%. W sterowniku liczba impulsów części zmiennej była programowalna od 0 do 150, co pozwalało regulować całkowity czas otwarcia wtryskiwacza od 700  $\mu$ s do 15 ms. W trybie wyznaczania charakterystyk przepływu, po osiągnięciu wymaganej liczby wtrysków, sterownik przerywa pracę wtryskiwacza.

W trybie wykorzystywanym w próbach trwałościowych kolejne otwarcia wtryskiwacza rozdzielone były czasem, który dobrano tak, by częstotliwość wtrysków odpowiadała wybranej prędkości obrotowej silnika. Sterownik zapewniał zmianę tego czasu, odpowiadającą prędkościom obrotowym od biegu jałowego do 6000 obr/min. Próba trwałościowa trwała dopóki osoba obsługująca sterownik nie zatrzymała pracy sterownika przyciskiem (5) (rys. 6).

### 3. Charakterystyka wtryskiwacza

Stanowisko wykorzystywane było przy pracach badawczych zmierzających do opracowania układu wtrysku paliwa LPG w silniku VW FSI z wtryskiem bezpośrednim benzyny. Dla

potrzeb sterowania potrzebne było określenie relacji pomiędzy czasem wtrysku benzyny, a czasem wtrysku gazu oraz określenie trwałości wtryskiwacza benzyny, pracującego przy ograniczonej dawce benzyny. W związku z tym badania stanowiskowe miały posłużyć do wyznaczenia relacji pomiędzy masą paliwa a ciśnieniem i czasem wtrysku. Wypływ z wtryskiwacza opisano za pomocą równania ustalonego wypływu płynu nieściśliwego. Przy różnicy ciśnienia  $\Delta p$  przed i za otworem wtryskiwacza, masa płynu  $m$  o gęstości  $\rho$  wypływająca przez otwór o efektywnym polu powierzchni przekroju  $\mu A_{tz}$  w czasie  $t_w$  opisana jest następującym wzorem:

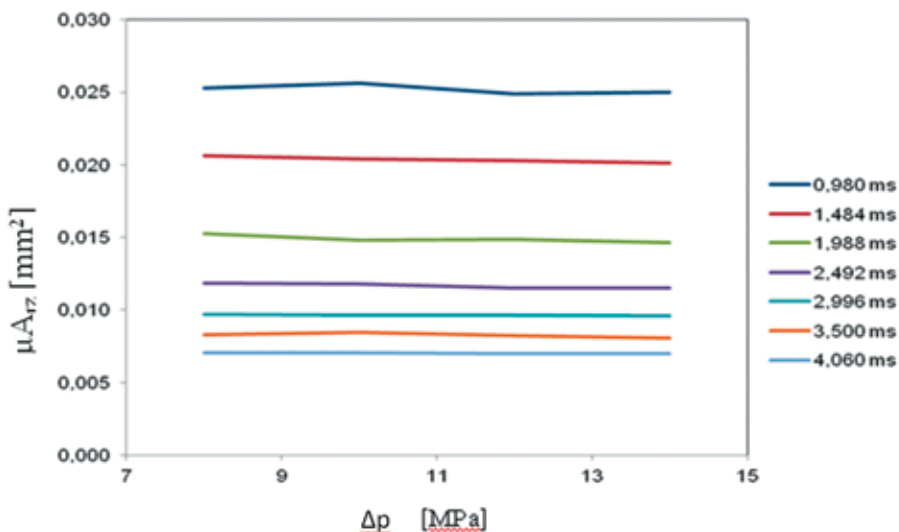
$$m = \mu \cdot A_{tz} \cdot \sqrt{2\rho \cdot \Delta p} \cdot t_w \quad (1)$$

Przy znanej gęstości paliwa  $\rho$  i objętości  $V$  mierzonej na stanowisku możliwe jest wyznaczenie efektywnego pola powierzchni przekroju:

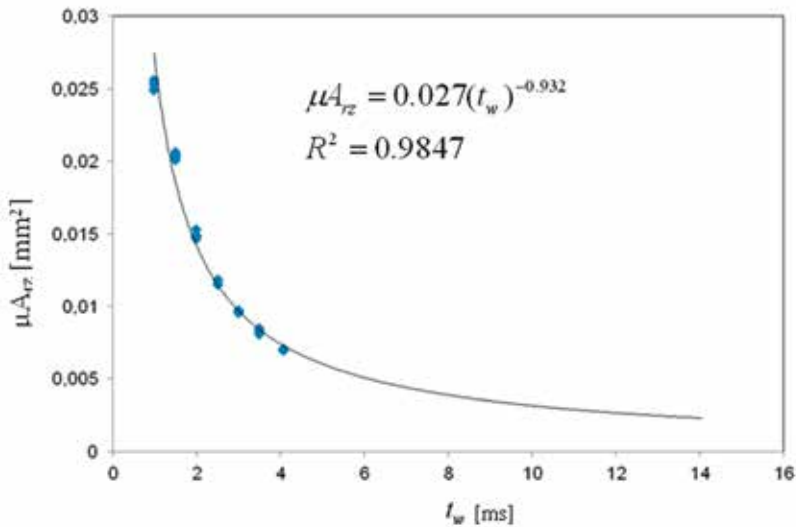
$$\mu \cdot A_{tz} = \frac{V}{\sqrt{2 \frac{\Delta p}{\rho}} t_w} \quad (2)$$

Określona w opisany sposób wartość  $\mu A_{tz}$  zależy od objętości wtrysniętego paliwa  $V$ , czasu otwarcia wtryskiwacza  $t_w$  oraz różnicy ciśnień  $\Delta p$  przed i za otworem wtryskiwacza.

Wyniki obliczeń  $\mu A_{tz}$  w funkcji ciśnienia wtrysku  $p$  i dla różnych czasów otwarcia wtryskiwacza  $t_w$  od 0,980 do 4,080 ms, przedstawiono na rys. 8., a związek pomiędzy  $\mu A_{tz}$ , a czasem  $t_w$  wtrysku pokazano na rys. 9.



Rys. 8. Efektywne pole przepływu benzyny przez wtryskiwacz w funkcji ciśnienia wtrysku



Rys. 9. Efektywne pole przepływu wtryskiwacza benzyny w funkcji czasu wtrysku

Różnica ciśnień  $\Delta p$  ma niewielki wpływ na wartość  $\mu A_{tz}$ , o czym świadczy płaski przebieg krzywych na rysunku 8. Natomiast wyraźnie widać nieliniowy wpływ czasu wtrysku. Im dłuższy czas wtrysku tym mniejsze wartość  $\mu A_{tz}$ .

Zależność między  $\mu A_{tz}$  a czasem otwarcia wtryskiwacza  $t_w$  wyrażonego ms, dobrze, ze współczynnikiem korelacji  $R^2=0,9847$ , odwzorowuje funkcja potęgowa o następującej postaci:

$$\mu A_{tz} = 0,027 (t_w)^{-0,932} \text{ [mm}^2\text{]} \quad (3)$$

## 4. Wnioski

1. Zaprojektowane stanowisko służy do wyznaczania charakterystyk przepływowych jak również może być użyte do wielogodzinnych prób trwałościowych wtryskiwacza benzyny.
2. Przeprowadzone próby wykazały niewielki wpływ zmian różnicy ciśnień  $\Delta p$  na współczynnik  $\mu A_{tz}$ . Porównując wyniki badań doświadczalnych z przyjętym opisem matematycznym zależności  $\mu A_{tz}=f(\Delta p)$ , można sądzić, iż zakresy ciśnień paliwa w części wysokociśnieniowej odpowiadały części hiperboli  $\mu A_{tz}=f(\Delta p)$ , dla której zmiana wartości  $\mu A_{tz}$  jest znikomo mała w porównaniu ze zmianą argumentu tej funkcji. Zmiana wartości ciśnienia paliwa w części wysokociśnieniowej w zakresie od 8 do 14 MPa odzwierciedlała wartości ciśnień panujące w rzeczywistych układach zasilania.



3. Uzyskana w wyniku badań charakterystyka  $\mu A_{rz} = f(t_w)$  w sposób zadowalający odwzorowuje przyjętą zależność (1). Uproszczony model przepływu ustalonego nie uwzględnia dynamiki procesu otwierania wtryskiwacza, istotnego zwłaszcza dla krótkich czasów wtrysku. Rozpatrzenie tych zjawisk wymagałoby wprowadzenia poprawki uzyskanej drogą empiryczną. Należy jednak pamiętać, że zadaniem prezentowanego stanowiska jest wykonanie serii pomiarów porównawczych dla których przyjęty model wydaje się być wystarczający.

Planuje się badania trwałości wtryskiwaczy stosowanych w układach bezpośredniego wtrysku benzyny zasilanych zmniejszoną dawką benzyny przy jednoczesnym zasilaniu paliwem LPG na stanowisku badawczym.

## Literatura

- [1] ZHAO F., LAI M.C., HARRINGTON D.L.: *Automotive spark-ignited direct-injection gasoline engines*. Progress in Energy and Combustion Science 25 (1999) ss. 437–562
- [2] Von BACHO P.S., SOFIANEK J.K., GALANTE-FOX J.M., MCMAHON C.J.: *Engine Test for Accelerated Fuel Deposit Formation on Injectors Used in Gasoline Direct Injection Engines*, 2009 SAE International
- [3] <http://techauto.republika.pl/Benzyna/benzyniaki.htm>
- [4] MAJCZAK A.: *Badania stanowiskowe koncepcyjnego wtryskiwacza wodorowego*. Politechnika Lubelska, Lublin 2010.
- [5] KUCZEWSKI H., LEJDA K., USTRZYCKI A.: *Determinanty dokładności dawkowania paliwa w systemie zasobnikowego układu zasilania Common Rail*. Konmot z. 8-M/2008
- [6] UNSA B., TRIMIS D., DURST F.: *Instantaneous mass flowrate measurements through fuel injection nozzles*. Internal Journal of Engine Research 2006 7:371
- [7] *1.4 I 90kW TSI Engine with Turbocharger*, Volkswagen AG, Wolfsburg, 2007.

