

Marek FLEKIEWICZ

WPLYW UKIERUNKOWANIA STRUGI WTRYSKIWACZA GAZOWEGO NA JAKOŚĆ MIESZANINY POWIETRZNO-GAZOWEJ

Streszczenie. Celem niniejszego opracowania jest określenie wpływu ukierunkowania strugi wtryskiwacza gazowego na skład wytwarzanej mieszaniny powietrzno gazowej. Przedstawiono i omówiono wyniki badań stanowiskowych i badań przeprowadzonych na hamowni podwoziowej dla samochodu Fiat Ducato napędzanego alternatywnie paliwem gazowym i benzyną. Wykazano znaczący wpływ kierunku wtryskiwanego gazu na skład mieszaniny, a w konsekwencji na poziom emisji składników toksycznych spalin.

INFLUENCE OF INJECTOR SPRAY DIRECTION ON AIR GAS MIXTURE QUALITY

Summary. Determining the influence of gaseous fuel spray direction was the main goal of this study. Changes of transient function $t_{wg}=f(t_{wb})$ as a results of spray direction were presented and discussed. The results show that the spray direction has an influence on time injection and engine emission.

1. WPROWADZENIE

Wtryskiwacz gazowy stanowi znaczną innowację w technice motoryzacyjnej; jego wprowadzenie dokonało istotnej zmiany w systemach zasilania alternatywnymi paliwami gazowymi. W konsekwencji tych zmian możliwe było zmniejszenie poziomu emisji składników toksycznych spalin, obniżenie zużycia paliwa gazowego, a także uzyskanie własności dynamicznych samochodu porównywalnych do własności samochodu zasilanego benzyną. Wprowadzenie wtryskiwacza gazowego zapewnia bardzo prostą regulację dawki paliwa gazowego, umożliwia również realizację specjalnych strategii, takich jak np. zimny rozruch silnika.

W przypadku wykorzystania do zasilania silnika ZI skroplonej lub odparowanej mieszaniny gazów ropopochodnych, konstrukcja wtryskiwaczy jest odmienna. Przykłady rozwiązań konstrukcyjnych wtryskiwaczy wraz z ilustracją ukształtowania strugi wtryskiwanego paliwa gazowego przedstawiono na rysunkach 1 i 2.

Przy założeniu przepływu ustalonego strumień masy paliwa przepływający przez wtryskiwacz można określić poniższą zależnością:

$$\dot{m}_f = \int_0^{\Delta t} m_f dt = \sqrt{2\rho\Delta p} \int_0^{\Delta t} A_f dt \quad (1)$$

gdzie:

\dot{m}_f – strumień masy paliwa,

Δp – różnica ciśnienia paliwa i ciśnienia w kanale dolotowym,

A_f – zmienny w czasie efektywny przekrój dyszy wtryskiwacza,

ρ – gęstość paliwa.

Ponieważ średni efektywny przekrój dyszy można określić następująco:

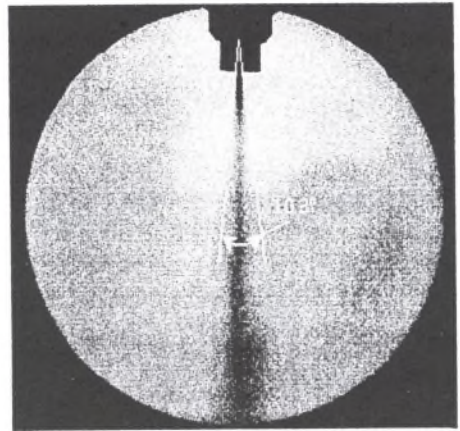
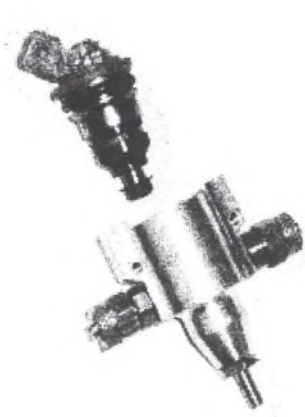
$$\overline{A_f} = \frac{1}{\Delta t} \int_0^{\Delta t} A_f dt \quad (2)$$

masę paliwa wypływającą z dyszy wtryskiwacza określa poniższa zależność:

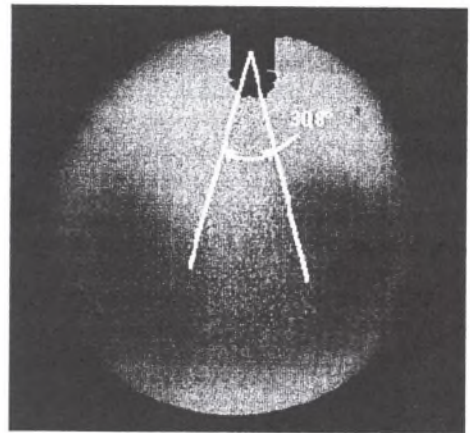
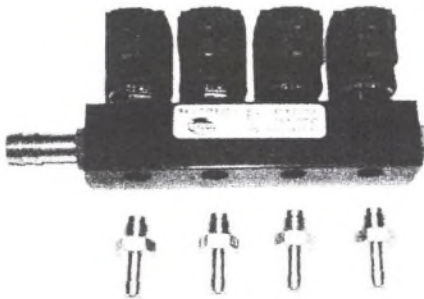
$$m_f = \sqrt{2\rho\Delta p} A_f \Delta t \quad (3)$$

gdzie:

Δt – czas otwarcia wtryskiwacza.



Rys.1. Wtryskiwacz skroplonej mieszaniny gazów ropopochodnych i struga wtryskiwanego paliwa
Fig. 1. Injector for liquid LPG and spray angle

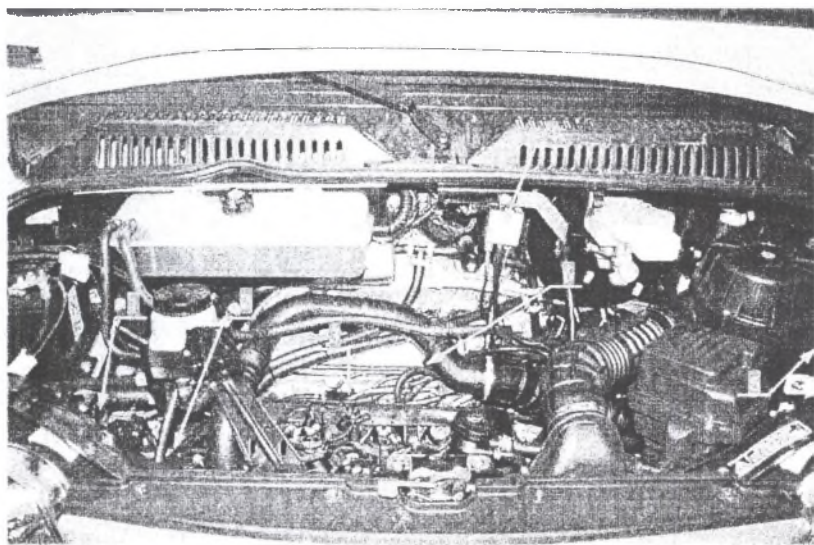


Rys. 2. Listwa wtryskiwaczy odparowanej mieszaniny gazów ropopochodnych i struga wtryskiwanego paliwa
Fig. 2. Injection rail for gaseous injection and spray angle

Różnice gęstości mieszaniny skroplonej i odparowanej decydują o objętości wtryskiwanego paliwa gazowego; w przypadku mieszaniny odparowanej wtryskiwacz wtryskuje około

300 razy większą objętość paliwa gazowego niż wtryskiwacz benzynowy. konstrukcja wtryskiwacza powinna więc zapewnić jego duży wydatek objętościowy, natomiast system sterowania jego otwarciem odpowiednie wyprzedzenie otwarcia i wystarczający czas otwarcia. Dla prędkości obrotowej silnika równej 1000 obr/min otwarcie wtryskiwacza dawkującego skroploną mieszaninę, w odniesieniu do położenia zaworu ssącego, powinno następować równocześnie z rozpoczęciem otwierania zaworu dolotowego, a jego zamknięcie w chwili maksymalnego jego otwarcia. W przypadku mieszaniny odparowanej proces ten powinien się rozpocząć znacznie wcześniej, tzn. około 50° przed rozpoczęciem otwarcia zaworu i zakończyć się w chwili uzyskania maksymalnego otwarcia zaworu ssącego. W obu przypadkach kąt otwarcia wtryskiwacza i czas jego otwarcia zwiększa się wraz ze wzrostem prędkości obrotowej silnika [L 3, 4 i 5].

Właściwe przygotowanie mieszaniny powietrzno-gazowej, poza wspomnianymi powyżej czynnikami, zależy także od umiejscowienia dyszy wtryskiwacza i kierunku strugi wtryskiwanego gazu do kolektora dolotowego silnika. Wpływ ukierunkowania strugi gazu wyjaśniono w niniejszym opracowaniu na przykładzie silnika samochodu Fiat Ducato.



Rys. 3. Rozmieszczenie w komorze silnika elementów układu zasilania paliwem LPG, przy czym:
 1 - parownik/regulator ciśnienia, 2 - zespół filtra paliwa LPG, 3 - urządzenie wtrysku gazu,
 4 - czujnik ciśnienia, 5 - elektroniczna jednostka sterująca natomiast 6 - bezpiecznik
 Fig. 3. Main elements of LPG supply system in the engine compartment of tested car

2. OBIEKT BADAŃ I PRZEBIEG BADAŃ

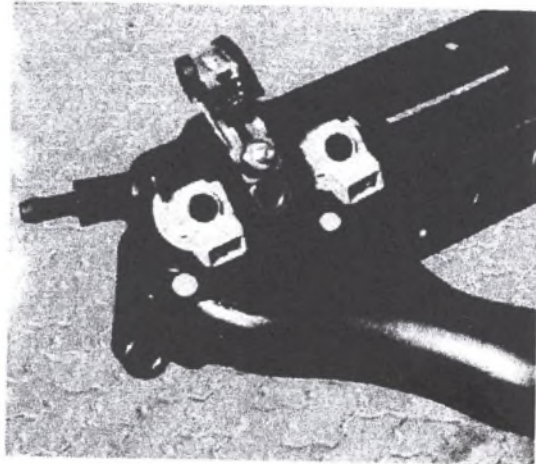
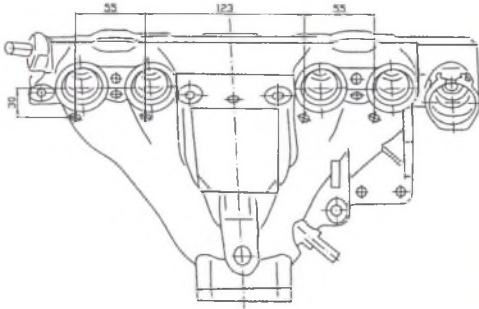
W badaniach wykorzystano samochód marki FIAT Ducato napędzany silnikiem o pojemności skokowej $2,0 \text{ dm}^3$. Samochód ten posiadał fabrycznie zabudowany system diagnostyki pokładowej oraz był przystosowany do alternatywnego zasilania paliwem gazowym, mieszaniną propanu butanu. Zasilanie paliwem gazowym realizowane było za pomocą sekwencyjnego, fazowanego wtrysku gazu w fazie odparowanej. System ten, jako system podległy, przetwarzał czas otwarcia wtryskiwacza benzynowego na czas otwarcia wtryskiwacza gazowego. System ten oprogramowano, wykorzystując metodę opracowaną w Katedrze Budowy Pojazdów Samochodowych, a poprawność jego pracy zweryfikowano poprzez ocenę:

- transformacji czasu otwarcia wtryskiwacza benzynowego na czas otwarcia wtryskiwacza gazowego,
- zakresu pracy monitorów systemu diagnostyki pokładowej,
- emisji składników toksycznych spalin.

Do oceny przebiegu transformacji czasu otwarcia wtryskiwacza benzynowego na czas otwarcia wtryskiwacza gazowego zastosowano metodę doboru funkcji adaptacji [L.3]

Głowica silnika badanego samochodu posiada duże okna kanałów dolotowych obejmujące dwa sąsiadujące z sobą cylindry. W konsekwencji kolektor dolotowy nie jest wyposażony w oddzielne kanały dolotowe, lecz zwiększając przekrój obejmuje szerokie okno dolotowe dwóch sąsiadujących cylindrów (rys. 4).

Biorąc pod uwagę kąt, pod jakim wtryskiwana jest struga odparowanego paliwa gazowego (rys. 2), do badań przygotowano dwie dysze wtryskiwaczy. Jedna z nich zapewniała wtrysk paliwa gazowego prostopadle do osi kolektora dolotowego, druga równoległe do osi kolektora dolotowego. W drugim przypadku dokonano również zmiany punktu wtrysku przesuwaną dyszę tak, aby jej koniec znajdował się w oknie dolotowym głowicy. Sposób zabudowy dysz w trakcie badań przedstawia rysunek 5 (oznaczono je odpowiednio jako wersja A i wersja B).



Rys. 4. Kolektor dolotowy badanego silnika wraz z punktami montażu dysz wtryskiwaczy gazowych

Fig. 4. Intake manifold of tested engine with marked points for injectors mounting

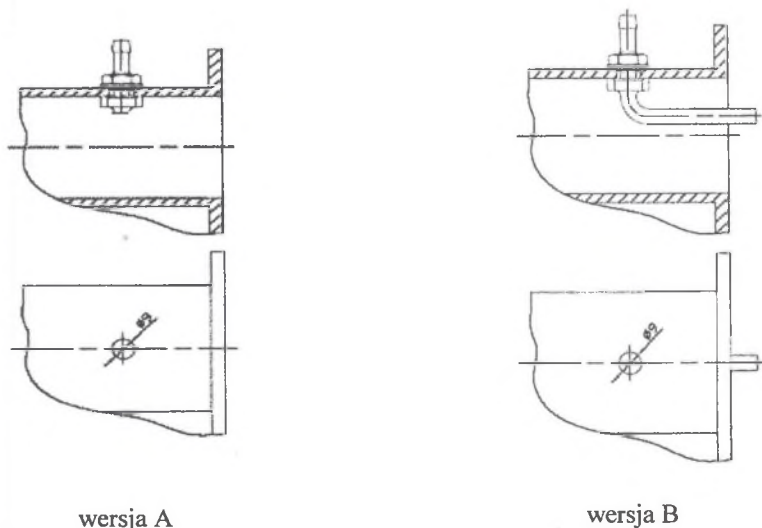
3. WYNIKI BADAŃ NA HAMOWNI PODWOZIOWEJ FLA 203

Tak przygotowany samochód poddano badaniom na hamowni podwoziowej. Podczas tych badań mierzono i rejestrowano między innymi takie parametry, jak: prędkość obrotową silnika, temperaturę silnika, temperaturę regulatora ciśnienia gazu, ciśnienie gazu, czas otwarcia wtryskiwaczy benzyny oraz gazu, napięcie sondy lambda umieszczonej przed i za katalizatorem, położenie przepustnicy, ciśnienie bezwzględne w kolektorze dolotowym, moc silnika oraz prędkość samochodu.

Do pomiarów i rejestracji wykorzystano trzy niezależne od siebie układy. Pierwszy z nich prowadził rejestrację wszystkich parametrów za pośrednictwem złącza komunikacyjnego z urządzeniem sterującym czasem otwarcia wtryskiwacza benzynowego, drugi za pomocą złącza komunikacyjnego urządzenia sterującego wtryskiwaczem gazu, natomiast w trzecim układzie wykorzystano kartę akwizycji danych i oprogramowanie systemu dSpace. Ostatni z

systemów zapewniał niezależny pomiar oraz rejestrację mierzonych parametrów. Celem wykorzystanego sposobu pomiarów i rejestracji za pośrednictwem trzech układów było sprawdzenie, czy:

- urządzenia odpowiedzialne za ustalanie czasu otwarcia wtryskiwaczy, wykorzystujące w swej pracy te same czujniki i przetworniki, otrzymują taką samą informację o stanie pracy silnika,
- informacja ta nie jest obarczona istotnymi błędami.

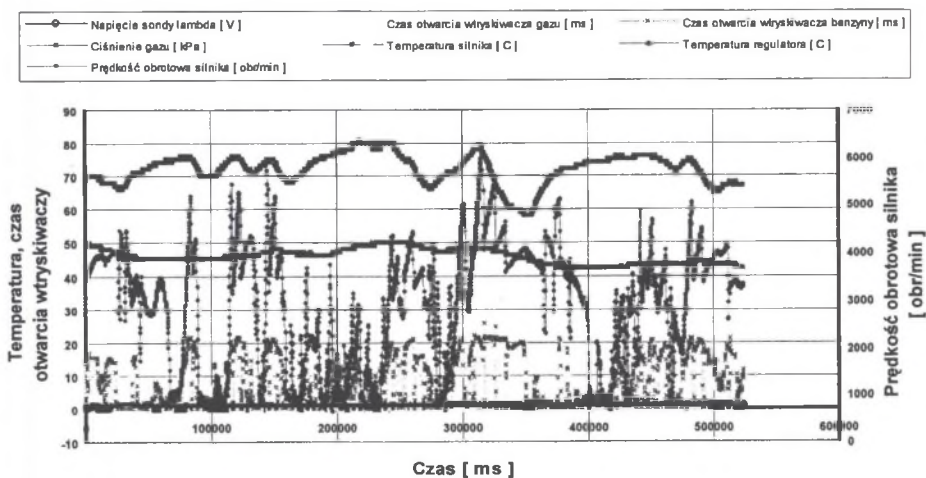


wersja A

wersja B

Rys. 5. Sposób zabudowy wylotu dyszy w kolektorze dolotowym badanego silnika

Fig. 5. Mounting places of injectors on intake manifold of tested engine



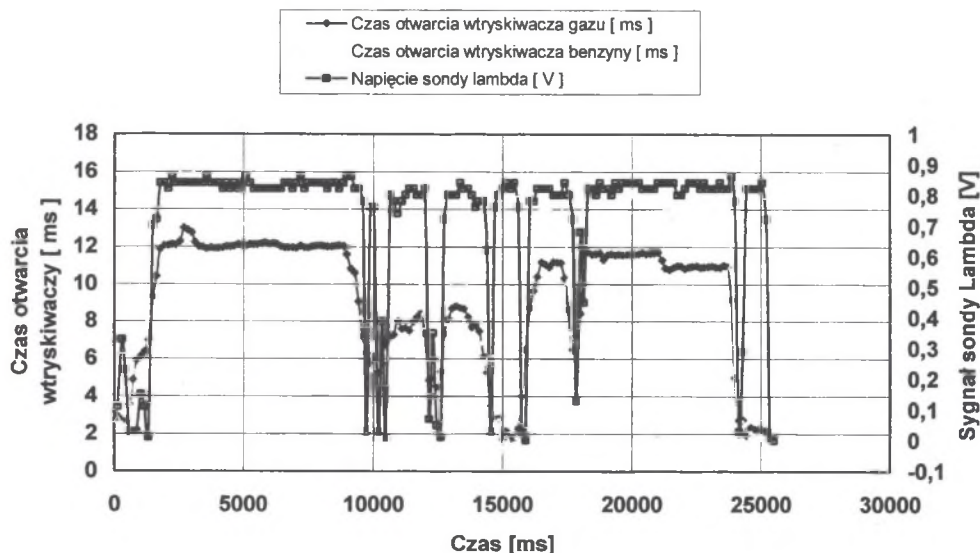
Rys. 6. Przebieg wybranych wielkości mierzonych w trakcie badań

Fig. 6. Traces of chosen parameters measured during tests

Standardowe urządzenia wykorzystane do pomiarów i rejestracji to między innymi system diagnostyczny KTS 520 – firmy Bosch. Wszystkie wyniki rejestrowano na komputerze przenośnym.

Przykład zarejestrowanych zmian mierzonych parametrów w funkcji czasu przedstawiają rysunki 6 i 7.

Badania przeprowadzone na hamowni podwoziowej miały na celu zebranie danych niezbędnych do wykreślenia funkcji adaptacji czasu otwarcia wtryskiwacza gazowego oraz pomiar poziomu emisji składników toksycznych w spalinach.



Rys. 7. Przebiegi zmian czasu otwarcia wtryskiwaczy gazu i benzyny oraz sygnału sondy Lambda dla samochodu marki FIAT Ducato 2.0, dla wersji 1

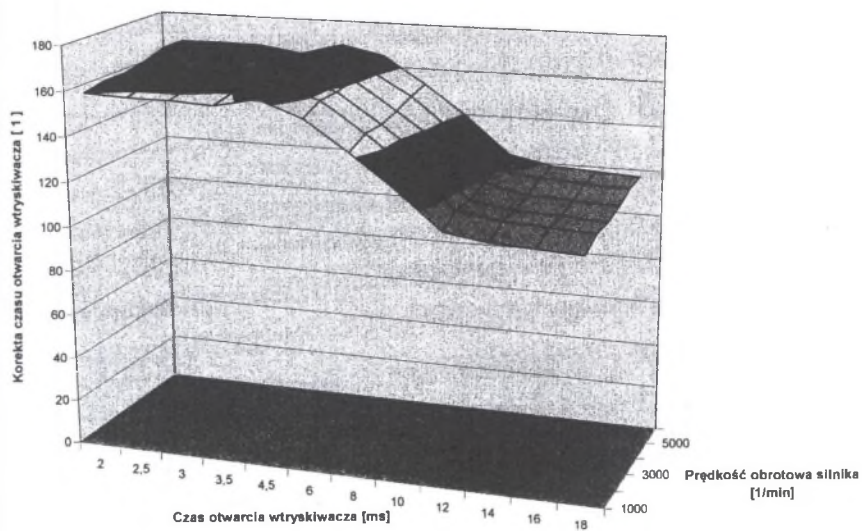
Fig. 7. Traces of gas and petrol injection time and oxygen sensor signal of FIAT Ducato 2.0 for version 1

Otrzymane wyniki pomiarów stanowiły podstawę do wyznaczenia zmian współczynnika korygującego czasu otwarcia wtryskiwacza benzynowego, ustalonego przez elektroniczną jednostkę sterującą. Zmiany te określono w funkcji prędkości obrotowej silnika dla różnych czasów otwarcia wtryskiwacza gazowego. Otrzymane zależności dla obu badanych wersji, różniących się lokalizacją dyszy wtryskiwacza, przedstawiono na rysunkach 8 i 9. Natomiast na rysunku 9 przedstawiono różnicę w wartości współczynnika korygującego dla obu badanych wersji lokalizacji dyszy wtryskiwaczy gazowych.

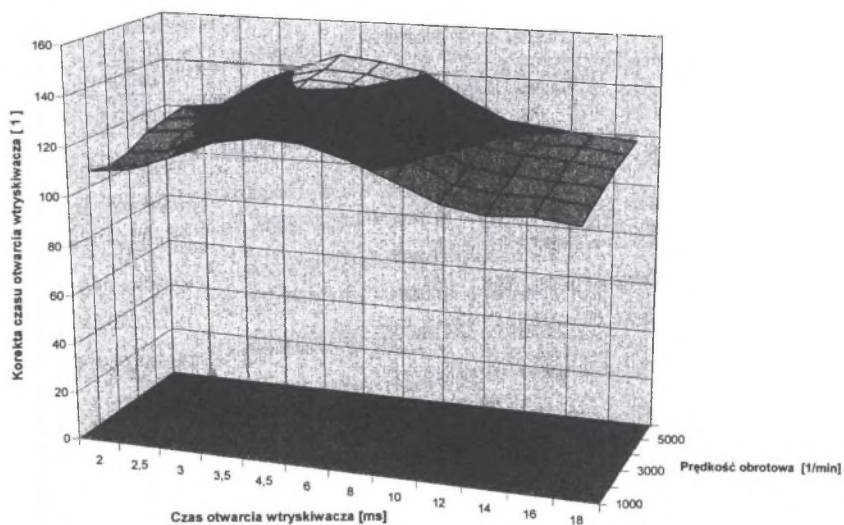
Współczynnik korekty dla wersji pierwszej przyjmuje duże wartości w zakresie małych czasów otwarcia wtryskiwacza gazowego, odpowiadających małym obciążeniom silnika. Wartość równą jedności przyjmuje dla dużych obciążeń, odpowiadających dużym wartościom czasu otwarcia wtryskiwacza benzynowego. Przedział zmian współczynnika korygującego dla tej wersji jest znaczny i wynosi około 0,75.

Dla wersji drugiej zmiana współczynnika korygującego nie przekracza 0,4, przy czym dla niskich i dużych obciążeń silnika nie przekracza wartości 1,15-1,2. W przedziale średnich obciążeń przyjmuje wartości nieprzekraczające 1,45. Różnicę czasu wtrysku paliwa gazowego dla obu badanych wersji, z prostopadłym i równoległym ukierunkowaniem strugi paliwa przedstawia rysunek 8.

a)

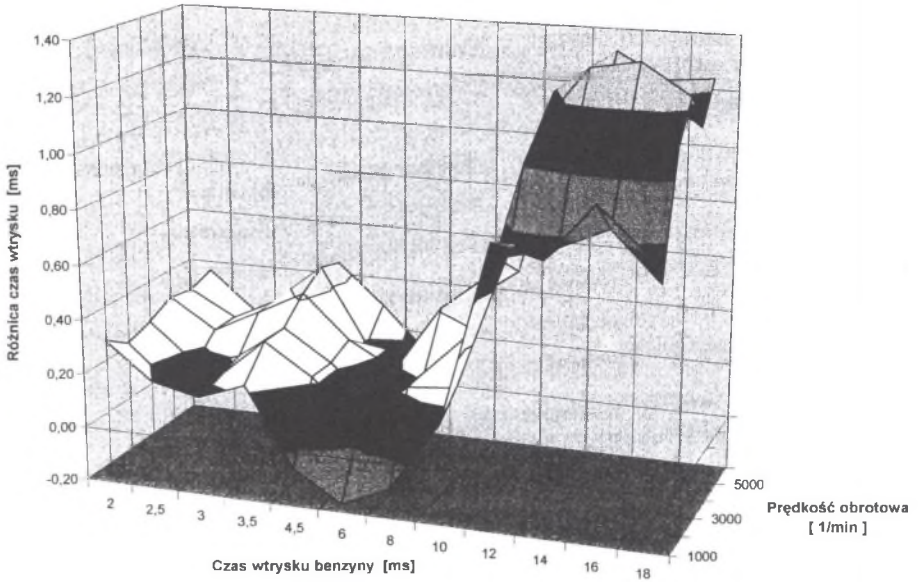


b)



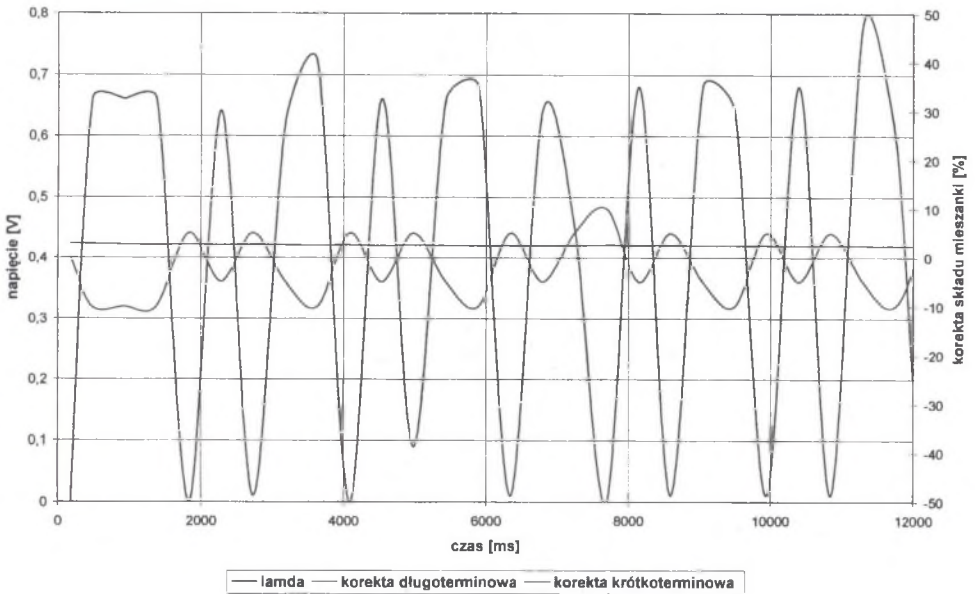
Rys. 8. Korekta czasu otwarcia wtryskiwacza gazowego w funkcji czasu otwarcia wtryskiwacza benzynowego i prędkości obrotowej silnika dla lokalizacji wtryskiwacza, a) dla wersji 1 i b) w wersji 2

Fig. 8. Transformation of petrol time injection into gaseous time injection vs. engine speed and load, a) for version 1 and b) for version 2



Rys. 9. Różnica wartości współczynników korekcyjnych dla obu badanych wersji lokalizacji dyszy wtryskiwacza gazowego

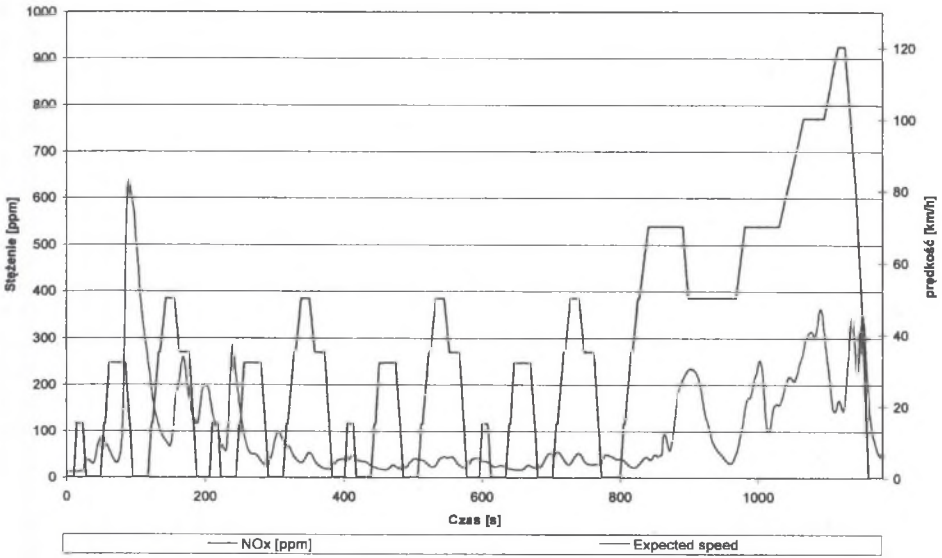
Fig. 9. Differences between injection times for two version of injectors localization in intake manifold



Rys. 10. Przebieg zmian sygnału czujnika tlenu oraz korekty krótko- i długoterminowej w trakcie badań dla wersji 2

Fig. 10. Traces of oxygen sensor and short and long time correction for version 2

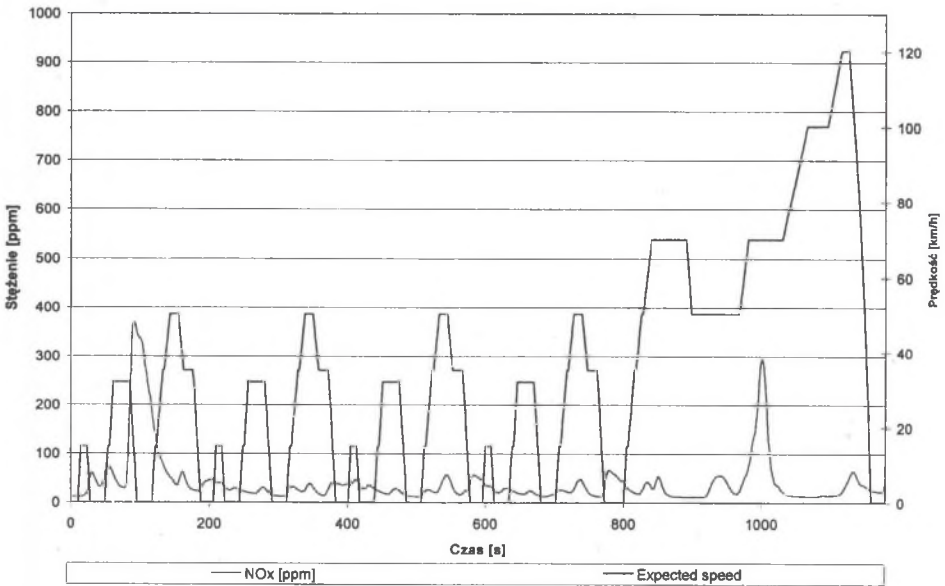
Cykl jezdny NEDC



Rys. 11. Emisja NO_x w cyklu jezdny NEDC dla wersji 1

Fig. 11. NEDC NO_x emission for version 1

Cykl jezdny NEDC



Rys 12. Emisja NO_x w cyklu jezdny NEDC dla wersji 2

Fig. 12. NO_x emission for version 2

PODSUMOWANIE

Stosowany w praktyce eksploatacyjnej system wtrysku sekwencyjnego, fazowanego wykorzystuje strategię zarządzania czasem otwarcia wtryskiwaczy urządzenia bazowego, tzn. strategię opracowaną dla paliwa benzynowego. O prawidłowym jego działaniu w zakresie przygotowania mieszaniny powietrzno-gazowej, oprócz właściwego oprogramowania, decydują jednak czynniki konstrukcyjne, a wśród nich lokalizacja dyszy wtryskiwacza. Przeprowadzone badania wykazały, że kierunek strugi wtryskiwanego paliwa gazowego do kolektora dolotowego decyduje o czasie otwarcia wtryskiwacza gazowego.

Największe zmiany czasu otwarcia wtryskiwacza w zależności od obciążenia silnika i jego prędkości obrotowej występują dla wersji pierwszej. Zmiany te obejmują bardzo szeroki zakres korekty czasu otwarcia wtryskiwacza benzynowego, tj. od 0,79 do 1,29. Największe korekty występują w zakresie małych obciążeń silnika. Tym niekorzystnym zmianom współczynnika korekcyjnego towarzyszy zwiększenie poziomu emisji tlenków azotu tak w początkowej, jak i końcowej fazie testu jezdnego (rys.11). Ukierunkowanie strugi wtryskiwanego paliwa gazowego równoległe do osi kolektora dolotowego zapewnia znacznie mniejsze zmiany współczynnika korekcyjnego. Zakres jego zmian w tym przypadku zawiera się w przedziale od 0,9 do 1,09. W rezultacie stabilnych zmian współczynnika korekcyjnego poziom emisji składników toksycznych spalin jest dla tej wersji znacznie mniejszy.

Różnice czasu wtrysku, widoczne na rysunku 9, są spowodowane nakładaniem się na siebie strugi powietrza zasysanego przez cylindry przez jedno wspólne okno dolotowe. Ponadto przy małych prędkościach obrotowych silnika prędkość strumienia powietrza zmniejsza się ze względu na duży przekrój okna. Stąd też rozwiązanie drugie, dla którego struga ukierunkowana jest równoległe, a końcówka dyszy wtryskowej jest wprowadzona do okna dolotowego, zapewnia korzystne wyniki.

Stabilność pracy układu regulacji składu mieszaniny dla tej wersji potwierdzają również przebiegi korekty krótko- i długoterminowej (rys. 10).

Literatura

1. Baker SP., Watson H.: MPI Air/Fuel Mixing for Gaseous and Liquid LPG, *SAE Paper*, 2005-01-0246, 2005.
2. Cipollone R., Villante C.: A/F and Liquid-Phase Control in LPG-Injected, Spark-Ignition Ice, *SAE Paper*, 2000-01-2974, 2000.
3. Flekiewicz B.: Ocena wpływu funkcji adaptacji czasu wtrysku na wybrane wskaźniki pracy silników ZI zasilanych paliwem gazowym. Rozprawa doktorska, Wydział Transportu Politechniki Śląskiej, 2006.
4. Flekiewicz M.: Sekwencyjny wtrysk paliwa gazowego w silnikach o zapłonie iskrowym, *Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, seria Transport z.56*, 2004.
5. Flekiewicz M.: Zasilanie paliwami gazowymi a system OBD cz.2. *Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, seria Transport z.48*, 2003.
6. Flekiewicz M.: Sekwencyjny wtrysk paliwa gazowego w silnikach o zapłonie iskrowym, *Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, seria Transport z.56*, 2004.
7. Li L., Deng B., H. Wang H., Xiao Z. Jiang Z. W.: Development of a Gas-Phase LPG Injection System for a Small SI Engine, *SAE Paper*, 2003-01-3260, 2003.
8. Lis M.: Określenie wpływu zasilania paliwami gazowymi na pracę układów adaptacji czasu otwarcia wtryskiwacza. Praca dyplomowa, Wydział Transportu Politechniki Śląskiej, Katowice 2003.
9. Luft S.: Analysis of Chosen Parameters of Dual-Fuel CI Engine Fuelled With Propane-Butane Gas as a Main Fuel, *SAE Paper*, 2002-01-2234, 2002.

10. Zyzański R.: Wpływ temperatury gazu na temperaturę mieszanki powietrzno-gazowej i moc użyteczną silnika gazowego Perkins AD 3.152G. Praca dyplomowa, Wydział Transportu Politechniki Śląskiej, Katowice 2000.
11. Wendeker M.: Adaptacyjne sterowanie wtryskiem benzyny w silniku samochodowym. PWN, Warszawa 2000.

Recenzent: Prof. dr hab. Sławomir Luft

Pracę wykonano w ramach BK- 265/RT2/2006