

## SYNTHESIS AND ESTIMATION OF CYCLE-TO-CYCLE AIR-FUEL MIXTURE COMPOSITION QUALITY CONTROL IN A SPARK IGNITION ENGINE

Józef Nita, Zbigniew Wolczyński

Technical University of Radom  
ul. Chrobrego 45, 26-600 Radom, Poland  
e-mail: j\_nita@o2.pl, zpw@o2.pl

### Abstract

Within the framework of the project No. 1785/T12/2001/20 entitled "New approach to air-fuel mixture composition control in the spark ignition engine, in transient conditions" sponsored by Polish Committee for Scientific Research, a new approach for cycle-to-cycle air-fuel mixture composition control in a spark ignition engine - named the CC method - was developed and verified. This way of control was also the main subject of a doctor's thesis defended in the Faculty of Mechanical Engineering at Technical University of Radom.

This way of control is based on the assumption that air-fuel mixture composition will be in accordance with expectations only when, in the considered filling cycle, the amount of fuel delivered will result from the amount of air that filled the cylinder in this cycle. It means that achievement of such state needs air amount estimation before the filling cycle end, with such advance that allowed calculation and delivery of needed fuel amount in this cycle.

A method of determination of cylinder fill with the use of HFM-5 air-mass meter was presented in the proceedings of the present Congress.

This paper presents a method of control system synthesis in a spark ignition 1.6l engine with sequential multipoint gasoline injection. The ways of determination of so called preliminary injection map and complementary injection generation were presented. Quality of CC control method was presented showing fluctuation of the controlled cycle-to-cycle air-fuel mixture composition for sequential work point.

**Keywords:** transportation, combustion engines, cylinder fill measurement, control, air-fuel mixture composition

## SYNTEZA I OCENA JAKOŚCI STEROWANIA Z CYKLU NA CYKL SKŁADEM MIESZANKI W SILNIKU O ZI

### Streszczenie

W ramach projektu KBN Nr 1785/T12/2001/20 pt. „Nowy sposób sterowania składem mieszanki paliwowo-powietrznej w silniku benzynowym w stanach przejściowych” opracowano i zweryfikowano nowy sposób sterowania z cyklu na cykl składem mieszanki w silniku o zapłonie iskrowym nazwany metodą CC. Ten sposób sterowania był również przedmiotem rozprawy doktorskiej obronionej na Wydziale Mechanicznym Politechniki Radomskiej.

U podstaw tego sposobu sterowania jest założenie, że mieszanka w cylindrze będzie miała skład zgodny z oczekiwanym tylko wtedy, gdy do cylindra w rozpatrywanym cyklu napełniania dostarczona zostanie ilość paliwa wynikająca z ilości powietrza, które wpłynęło do cylindra w tym cyklu. Oznacza to, że dla osiągnięcia takiego stanu konieczne jest oszacowanie ilości powietrza zanim zakończy się cykl napełniania z takim wyprzedzeniem, aby możliwe było obliczenie i dostarczenie w tym cyklu wymaganej ilości paliwa.

Sposób wyznaczania ilości powietrza z użyciem miernika masowego wydatku typ HFM-5 został przedstawiony w materiałach tego Kongresu.

W przedkładanej publikacji przedstawiono metodę syntezy systemu sterowania na przykładzie silnika 1,6l z sekwencyjnym wielopunktowym wtryskiem benzyny. Zaprezentowano sposób wyznaczania tzw. mapy wtrysku wstępnego oraz generowania wtrysku uzupełniającego. Zaprezentowano jakość metody sterowania CC, przedstawiając fluktuację wysterowanego składu mieszanki z cyklu na cykl dla kolejnych punktów pracy.

**Słowa kluczowe:** transport, silniki spalinowe, pomiar napełnienia, sterowanie, skład mieszanki

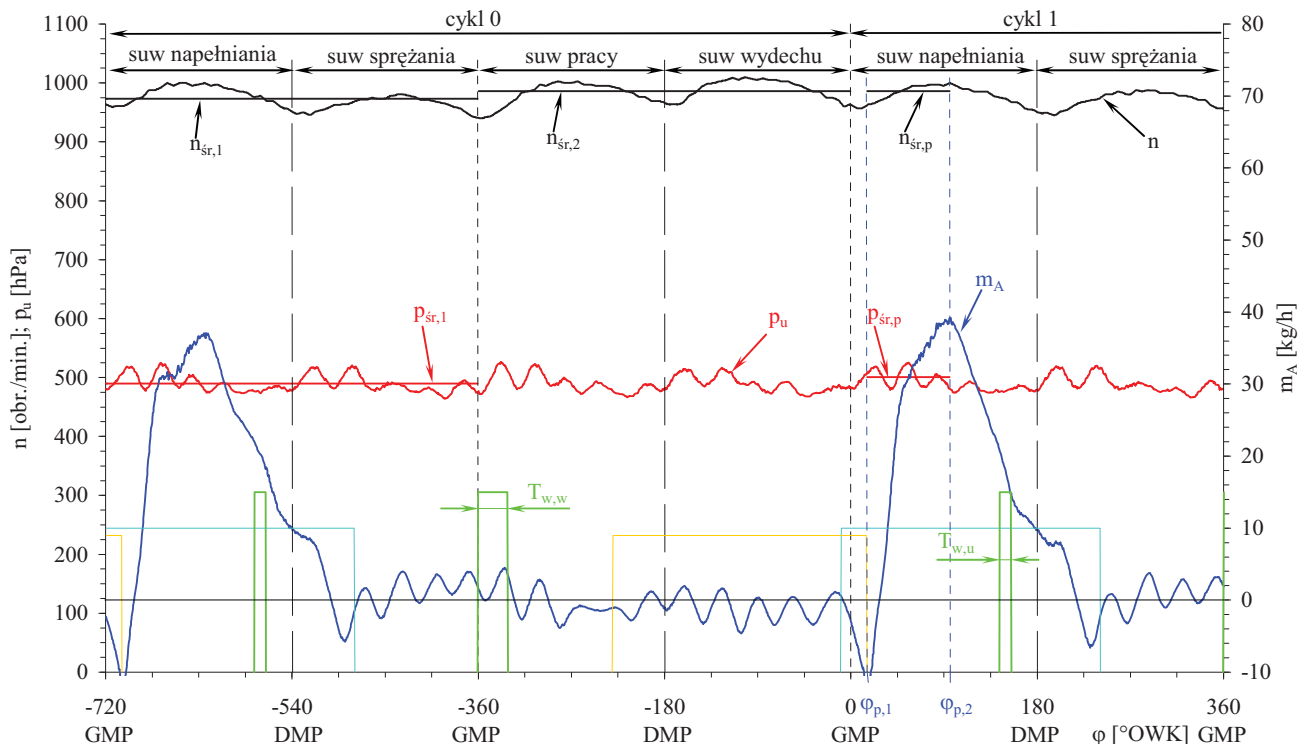
## 1. Istota metody sterowania składem mieszanki z cyklu na cykl

W publikacji [1] przedstawiono sposób wyznaczania napełnienia powietrzem cylindra silnika o ZI z wykorzystaniem stałotemperaturowego termoanemometru. Cechą znaną tego sposobu jest obliczanie masy powietrza w pierwszej fazie cyklu napełniania cylindra w oparciu o sygnał masowego, chwilowego wydatku powietrza oraz prognozowanie masy powietrza w pozostałej części cyklu napełniania. Faza prognozowania napełnienia jest równocześnie fazą wtrysku paliwa w ilości wynikającej z oczekiwanego w tym cyklu składu mieszanki.

Ważnym zagadnieniem w tej procedurze jest właściwe przyporządkowanie tym dwóm fazom (pomiaru i prognozowania) odpowiedniego udziału w całym cyklu napełniania. Im dłużej trwa faza pomiaru napełniania, tym krótsza jest faza prognozowania napełniania co skutkuje wzrostem dokładności wyznaczania napełnienia. O wzajemnej relacji czasów trwania tych faz decyduje czas niezbędny na dostarczenie do analizowanego cylindra obliczonej masy paliwa. Rozwiązania konstrukcyjne współczesnych niskociśnieniowych systemów wtrysku benzyny wymagają odpowiednio długiego czasu dla zrealizowania tej funkcji. Stąd proces wtrysku rozłożony jest na wtrysk wstępny (na zamknięty zawór zasilający) i wtrysk uzupełniający (na otwarty zawór zasilający).

Jak wskazano w pracach [3], [4] napełnienie cylindra powietrzem w metodzie CC wyznaczone jest na tyle późno, że nie jest możliwe dostarczenie jeszcze w danym cyklu napełniania całej obliczonej ilości paliwa. Problem ten można rozwiązać stosując systemy o wyższych wydatkach paliwa bądź dozując paliwo, jak wskazano wcześniej, w dwóch porcjach. Istotę drugiego sposobu rozwiązywania tego problemu przedstawiono na rys. 1.

Istota sterowania CC polega na wygenerowaniu wtrysku wstępnego  $T_{w,w}$ , wyznaczeniu masy powietrza napełniającego cylinder oraz wygenerowaniu wtrysku uzupełniającego, zapewniającego w konsekwencji wymagany w danym napełnieniu skład mieszanki.



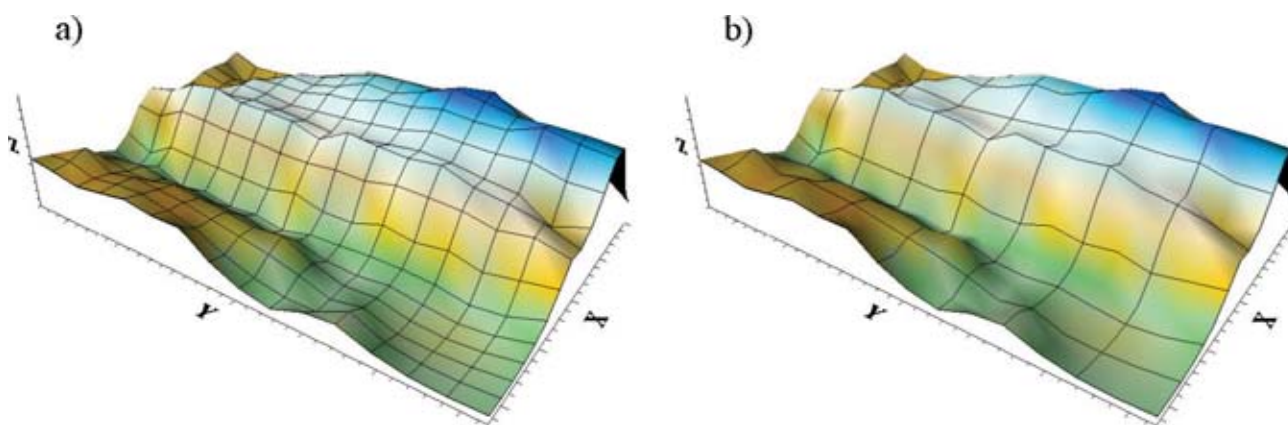
Rys. 1. Istota sterowania składem mieszanki wg metody CC z dwoma wtryskami: wstępnym  $T_{w,w}$  i uzupełniającym  $T_{w,u}$   
 Fig. 1. The idea of air-fuel mixture composition control, according to the CC method, with two injections: preliminary  $T_{w,w}$  and complementary  $T_{w,u}$

## 2. Synteza mapy wtrysku wstępnego

Czas wtrysku wstępnego  $T_{w,w}$  wyznaczany jest z tzw. mapy, tj. stabilizowanego związku tego czasu ze średnią prędkością obrotową  $n_{sr,1}$  i średnim ciśnieniem w kolektorze dolotowym  $p_{sr,1}$ , zmierzonymi w czasie obrotu wału, poprzedzającego ten wtrysk (cykl 0). Są one uporządkowane w kolumnach według wzrastającego ciśnienia w kolektorze dolotowym oraz w wierszach – według wzrastającej prędkości obrotowej wału silnika.

Wartości czasów wtrysków wstępnych zapisane w mapie zapewniają takie dawki paliwa, które wraz z niewielkimi dawkami uzupełniającymi dla wtrysku uzupełniającego  $T_{w,u}$  pozwolą utworzyć mieszanekę paliwowo-powietrzną o wymaganym składzie.

Rozmiar mapy (liczba wierszy i kolumn w tabeli) ma istotny wpływ na jakość sterowania. Wartości czasów wtrysków zawarte w mapie wtrysku wstępnego są jedynie wartościami dla węzłów siatki stworzonej dla skończonej ilości wartości ciśnień i prędkości obrotowych. Niemożliwe bowiem jest zbudowanie i wykorzystywanie mapy zawierającej nieskończenie wiele komórek dla wszystkich punktów pracy silnika. Istotne zatem jest, aby liczba wierszy i kolumn umożliwiła stworzenie siatki, której każde cztery sąsiednie węzły zawierają powierzchnię jak najbardziej zbliżoną do wycinka płaszczyzny.



Rys. 2. Przykłady map: a) z siatka o właściwej gęstości, b) ze zbyt rozrzedzoną siatką  
 Fig. 2. Examples of maps: a) network with proper density, b) with too thin network

Na rysunku 2 przedstawiona jest dwa razy ta sama powierzchnia (mogąca odzwierciedlać np. czasy wtrysków wstępnych). Na powierzchnię naniesiono siatkę, której węzły tworzą „mapę” tej powierzchni. Rysunek 2a przedstawia liczbę węzłów (komórek mapy), którą można uznać za wystarczającą, gdyż powierzchnie pomiędzy każdą czwórka sąsiednich węzłów są zbliżone do wycinka płaszczyzny. Istnieje zatem możliwość wyznaczenia z dopuszczalnym w metodzie błędem wartości czasu wtrysku dla każdego punktu pomiędzy czterema danymi punktami (węzłami siatki). W przypadku pokazanym na rysunku 2b powierzchnie zawarte pomiędzy węzłami siatki często zdecydowanie odbiegają od wycinków płaszczyzny. Próby wyznaczenia wartości dla punktów leżących pomiędzy tak oddalonymi węzłami dadzą w wielu wypadkach wyniki daleko odbiegające od rzeczywistych. Ten przykład wskazuje, że „odległości” pomiędzy węzłami siatki powinny być jak najmniejsze, aby „dobrze” odzwierciedlały opisywaną powierzchnię.

Istotnym czynnikiem wpływającym na liczbę węzłów siatki jest nieregularność powierzchni opisującej funkcję (np. czas wtrysku). Im bardziej „pofałdowana” jest powierzchnia, tym liczba węzłów siatki opisującej ją musi być większa.

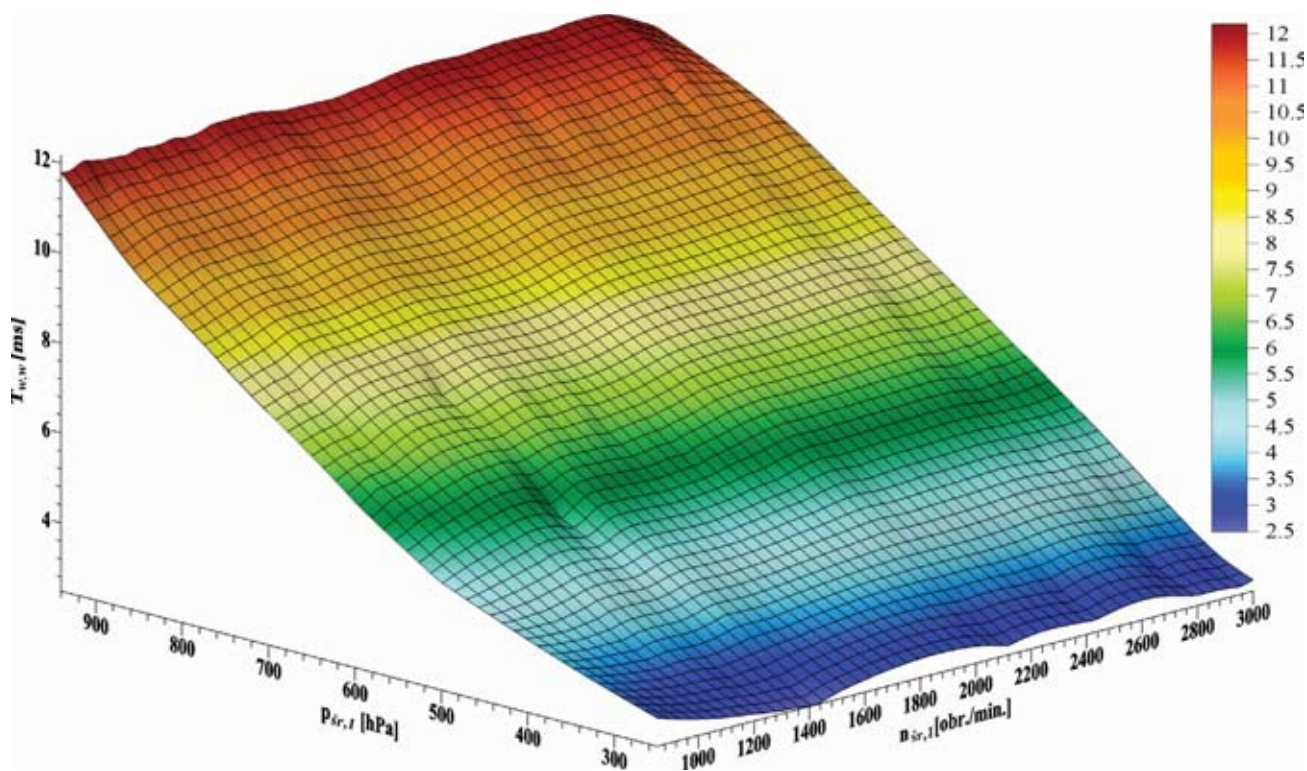
Mając na uwadze powyższy przykład, należy ustalić na zasadzie kompromisu pomiędzy dokładnością, a rozmiarem mapy rozdzielczość, z jaką będą zmieniać się wartości: ciśnienia w kolektorze dolotowym i prędkości obrotowej wału silnika, czyli rozmiar mapy.



Dla zbudowania mapy (rys. 3) wykorzystano 200 zarejestrowanych zbiorów sygnałów: ( $\Sigma$  – sumaryczny, zawierający m.in. informację o sygnale wtrysku paliwa,  $\lambda_H$  – chwilowego wskazania miernika MEXA 700 $\lambda$ ,  $p_u$  – ciśnienia w kolektorze dolotowym), w zakresie do 3000 obr./min. i w pełnym zakresie obciążeń. Po przetworzeniu ich przy pomocy opracowanego we własnym zakresie programu komputerowego do postaci, w której każdy cykl opisany jest zbiorem parametrów, wykorzystano je do opracowania map sterowania. U podstaw tej mapy jest wyznaczona w sposób zaprezentowany w [1] dla danego cyklu masa  $M_A$  napełniającego cylinder, która w powiązaniu z wymaganym składem narzuca wymaganą w tym cylindrze masę paliwa  $M_F$ . Czas trwania wtrysku wstępnego stanowi 80 – 90% łącznego czasu wtrysku, na który ma wpływ charakterystyka dozowania paliwa

Metodyka opracowania mapy wymaga też przyjęcia jej rozmiaru. Na potrzeby syntezy systemu sterowania wg CC przyjęto rozmiar 101 $\times$ 101. W rzeczywistym sterowniku o rozmiarze decydują jego możliwości obliczeniowe i pamięciowe procesora oraz złożoność funkcji „zapisywanej” mapy, czyli ilość punktów pomiarowych, z których powstała mapa.

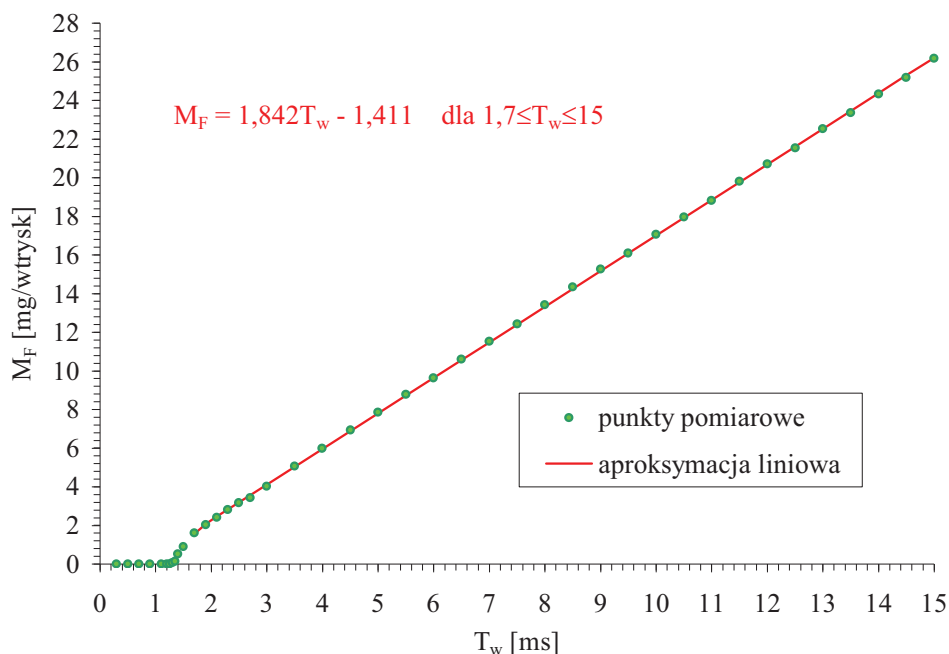
Mapa wtrysku wstępnego wyznaczona jest dla założonego składu mieszanki, gdyż masa paliwa wtrysnięta podczas wtrysku wstępnego może być w niewielkim zakresie korygowana wtryskiem uzupełniającym. Przyjęto dla syntezy metody sterowania CC jako przykładową mieszankę stechiometryczną. Opracowano zatem mapę wtrysku wstępnego dla mieszanki o współczynniku  $\lambda^*=1,00$ .



Rys. 3. Mapa wtrysku wstępnego silnika 1,6l MPI  
Fig. 3. Preliminary injection map of the 1.6l MPI engine

### 3. Wyznaczanie wtrysku uzupełniającego

W cyklu 1 (rys. 1) wyznaczane jest sumaryczne napełnienie cylindra w sposób opisany w [1]. Wyznaczona masa powietrza w analizowanym cyklu napełniania, w powiązaniu z oczekiwanym składem mieszanki, wyznacza wymaganą, łączną dla dwóch wtrysków masę paliwa  $M_{F,c}$ , a po uwzględnieniu charakterystyki wtryskiwacza (rys. 4) łączny czas wtrysków  $T_c$  a w następstwie czas trwania wtrysku uzupełniającego  $T_u$ .



Rys. 4. Charakterystyka dozowania benzyny wtryskiwacza MPI silnika 1,6l  
 Fig. 4. Gasoline dosage characteristics of an injector of the 1.6l MPI engine

Charakterystykę wykreślono na podstawie pomiaru masy paliwa w 40 punktach odpowiadających czasom wtrysku od 0,3 do 15ms [3]. Odczytywano masę pojemnika z paliwem przed i po serii 4096 wtrysków. Paliwo wtryskiwano z częstotliwością 50 razy na sekundę. Czas wtrysku mierzono czasomierzem oraz porównywano go z rejestracją komputerową napięciowego sygnału wtrysku.

Stwierdzono niewielki ubytek masy paliwa na wadze (ok. 0,02g) dla wtrysków o czasie mniejszym od 1,3ms. Czas 1,3ms zinterpretowano jako minimalny czas potrzebny do uruchomienia zaworu wtryskiwacza, a ubytek jako parowanie paliwa z naczynia pomiarowego w czasie próby. Powiększono wszystkie zarejestrowane przyrosty paliwa o tę wartość.

Zmierzone na wadze przyrosty paliwa podzielono przez liczbę wtrysków, uzyskując średnią wartość dawki paliwa przypadającą na jeden wtrysk. Z uzyskanych wyników wykreślono charakterystykę dozowania paliwa oraz opisano matematycznie zależność masy wtryskiwanego paliwa od czasu przyłożonego napięcia do cewki wtryskiwacza. Z tych samych danych pomiarowych wykreślono i opisano matematycznie zależność, pozwalającą wyznaczyć czas wtrysku dla danej masy paliwa. Z racji na czas trwania fazy prognozowania napełnienia przy wysokich prędkościach obrotowych założono, że czas wtrysku uzupełniającego nie powinien być dłuższy niż 2 milisekundy. Dla zastosowanego wtryskiwacza wyznaczało to wtrysk podstawowy na poziomie ok. 80% wyznaczonego łącznego wtrysku paliwa.

#### 4. Jakość sterowania wg metody CC

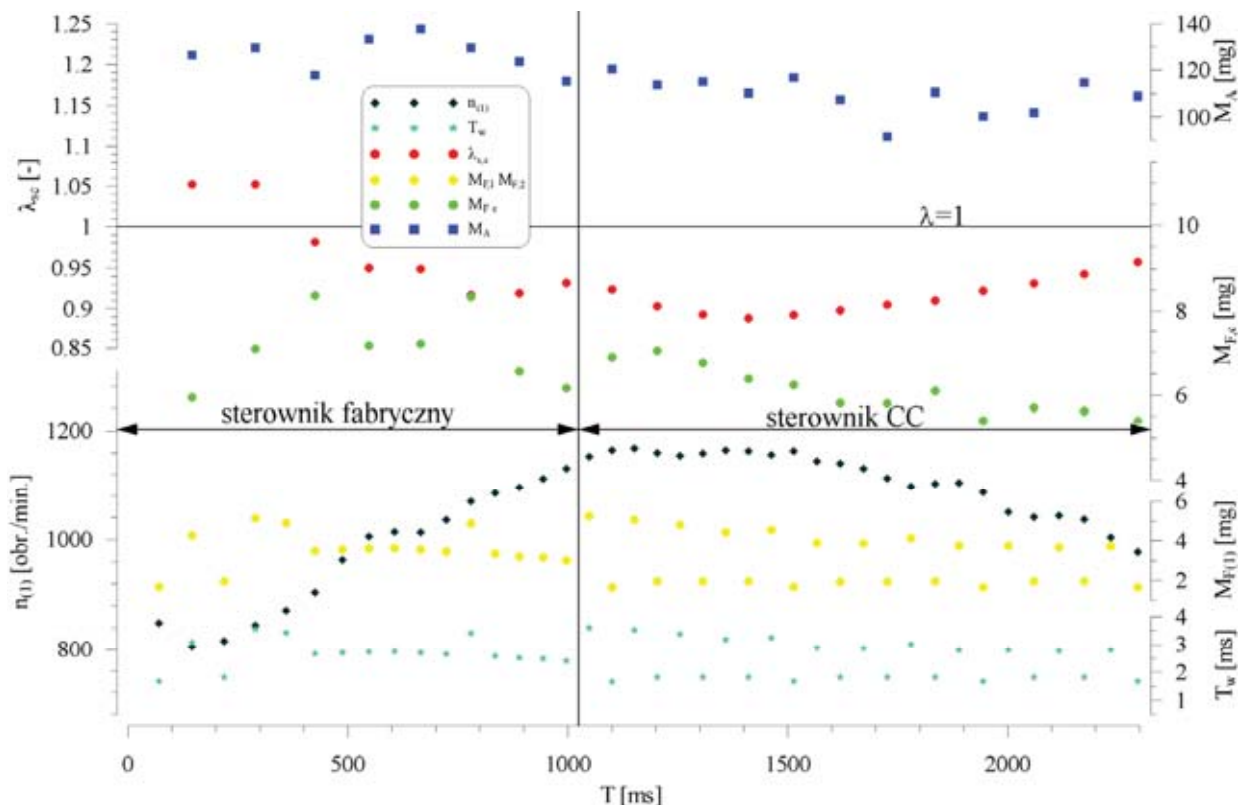
W Zakładzie Elektroniki Samochodowej Politechniki Radomskiej realizowany był w latach 2001-2002 projekt badawczy KBN nr 8T12D04120 pt. „Nowy sposób sterowania składem mieszanki paliwowo-powietrznej w silniku benzynowym w stanach przejściowych”, w ramach którego zbudowano mikroprocesorowy sterownik wtrysku benzyny, pracujący według metody CC. Przykładowy wynik sterowania, zaczerpnięty ze sprawozdania po realizacji projektu [2], pokazano na rys. 5.

Rysunek przedstawia rejestrację sygnałów opisujących pracę silnika i jego wysterowanie, w czasie którego nastąpiło przełączenie sterownika znanego producenta na opracowany

w projekcie sterownik CC. Zarejestrowanie sygnałów zgodnych z rys. 5 pozwoliło obliczyć czasy poszczególnych wtrysków  $T_w$ , masy wtryskiwanego paliwa w poszczególnych wtryskach  $M_{F(i)}$  oraz na cykl  $M_{F,c}$  a także współczynnik uzyskanej i spalanej w poszczególnych cyklach mieszanki  $\lambda_{s,c}$ , określony przy pomocy miernika MEXA 700 $\lambda$ . Parametry te jednoznacznie określają chwilę, w której nastąpiło przełączenie sterowników oraz wywołaną zmianę składu mieszanki zasilającej silnik ZI.

Weryfikacja metody z wykorzystaniem zbudowanego we własnym zakresie sterownika daje podstawę do wstępnej, pozytywnej oceny zaproponowanej metody sterowania CC. Przedstawiony na rys. 5 przykład zarejestrowanego sterowania, wykazuje stabilizację składu mieszanki paliwowo-powietrznej. Około tysiąc pierwszych milisekund rejestracji, to wynik pracy sterownika znanego światowego producenta, a pozostała część – sterownika według metody CC. Chwile przełączenia sterowania określa przebieg czasu wtrysku. Sterownik fabryczny generuje po dwa wtryski na cykl o takich samych czasach  $T_w$ , natomiast opracowany sterownik zgodnie z metodą CC generuje znacznie dłuższy czas wtrysku wstępnego  $T_{w,w}$  i drugi krótszy czas wtrysku uzupełniającego  $T_{w,u}$ . Wtryskom odpowiadają masy paliwa na cykl  $M_{F,c}$  oraz zmierzone analizatorem MEXA 700 $\lambda$  wartości współczynnika nadmiaru powietrza  $\lambda_{s,c}$ , utworzonej mieszanki.

Rys. 5 dokumentuje poprawę stabilności współczynnika nadmiaru powietrza spalanej mieszanki po przełączeniu na sterowanie według metody CC. Dla sterowania fabrycznego wartość tego współczynnika zmieniała się istotnie z cyklu na cykl wokół wartości stechiometrycznej, natomiast dla sterownika realizującego sterowanie według metody CC zmiany składu mieszanki z cyklu na cykl są niewielkie oraz wykazują trend zbieżności do składu stechiometrycznego.



Rys. 5. Porównanie jakości sterowania wg metody CC i wg metody znanego producenta  
 Fig. 5. Comparison of control quality, according to the CC method and a method of a well-known producer

Należy wziąć pod uwagę fakt, że są to wstępne badania z wykorzystaniem prototypowego sterownika oraz że zaimplementowano w nim mapy sterowania o zbyt małym, w stosunku do potrzeb, rozmiarze, tzn. 16×16 (po 16 przedziałów n i p).

W oparciu o dotychczasowe badania nie można jednoznacznie wskazać przyczyn istotnego odchylenia konstytuowanego składu od oczekiwanego składu stechiometrycznego. Widać wyraźnie związek bezwzględnego uchybu sterowania  $\lambda^* - \lambda_{sc}$  z wartością prędkości obrotowej: im wyższa prędkość biegu jałowego tym wyższy uchyb (dla  $n \approx 1180$  obr/min, uchyb  $\lambda^* - \lambda_{sc} \approx 0,11$  a dla  $n \approx 980$  obr/min, uchyb  $\lambda^* - \lambda_{sc} \approx 0,04$ ). Można wnioskować na bazie badań [2], że wciąż niedoskonałe jest wyznaczanie napełnienia zwłaszcza dla niskich prędkości obrotowych, gdzie udział przepływów zwrotnych w łącznym przepływie jest ważący a jednocześnie trudny do określenia. Wymaga to doskonalenia termoanemometru oraz metod wyznaczania napełnienia z jego zastosowaniem

## **Literatura**

- [1] Nita, J., Wołczyński, Z., *Wyznaczanie napełnienia cylindra z wykorzystaniem miernika masowego wydatku powietrza HFM-5*, European Kongress KONES, Warsaw, 2007.
- [2] Nita, J., *Determination of Cylinder Filling to Control Fuel Injection*, EAEC/FISITA, Budapeszt, 2007.
- [3] *Nowy sposób sterowania składem mieszanki paliwowo-powietrznej w silniku benzynowym w stanach przejściowych*, Sprawozdanie z realizacji projektu badawczego KBN nr 8 T12D 041 20, Radom, 2003.
- [4] Wołczyński, Z., *Metoda sterowania składem mieszanki paliwowo-powietrznej w silniku benzynowym*, Rozprawa doktorska, Politechnika Radomska, Radom, 2005.

