

JÓZEF NITA\*

## NIEPOWTARZALNOŚĆ CYKLOWEGO SKŁADU MIESZANKI W SILNIKU GDI

---

### CYCLE BY CYCLE VARIATION OF THE MIXTURE COMPOSITION IN GDI ENGINE

#### Streszczenie

Przedstawiono statystyczną ocenę odchylenia z cyklu na cykl składu mieszanki w silniku GDI, wysterowanego w oparciu o pomiar cyklowego napełnienia termoanemometrem własnej konstrukcji. Otrzymane wyniki porównano z uzyskanymi z tego samego silnika, wysterowanego systemem oryginalnym. Zastosowanie nowego sposobu sterowania poprawiło ponadczterokrotnie stabilność cyklowego składu mieszanki.

*Słowa kluczowe: silnik GDI, napełnienie cyklowe, niepowtarzalność składu mieszanki*

#### Abstract

The cycle by cycle variation of the mixture composition in GDI engine is presented in the paper. The engine was controlled by the signal from thermo-anemometer of the author's own design. The results were compared with those received from the same engine controlled with original control system. Application of the new method of the engine control improved stability of the engine cycle by cycle mixture composition even by four times.

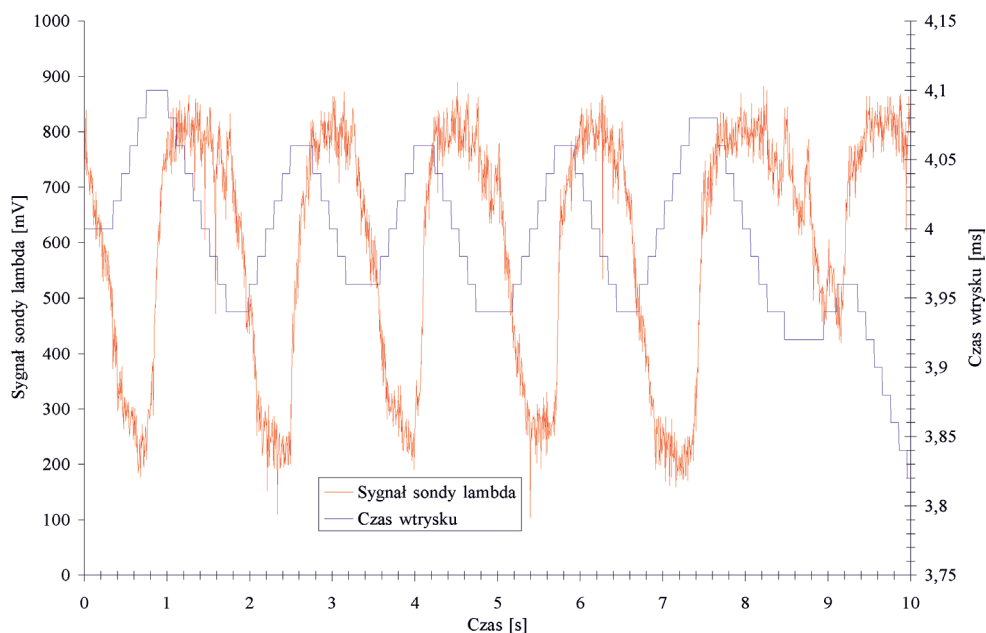
*Keywords: GDI engine, engine cylinder filling, cycle by cycle variation of the mixture composition*

---

\* Dr hab. inż. Józef Nita, prof. PR, Instytut Eksploatacji Pojazdów i Maszyn, Wydział Mechaniczny, Politechnika Radomska.

## 1. Wstęp

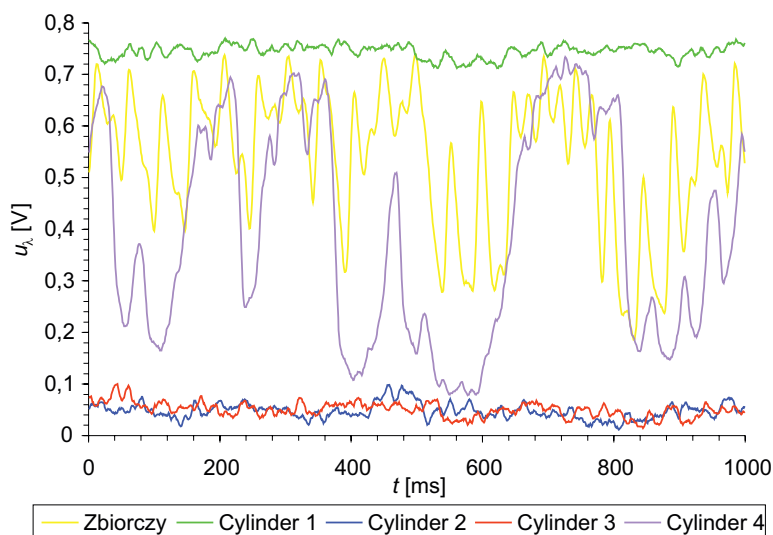
Efektom współczesnego stanu wiedzy w obszarze stabilizacji składu mieszanki jest stosowany powszechnie system sterowania składem mieszanki z czujnikiem zawartości tlenu w spalinach – tzw. sondą lambda. System ten ma za zadanie konstituowanie mieszanki o składzie stechiometrycznym w celu maksymalizacji efektywności reaktora katalitycznego. Jest to system ze sprzężeniem zwrotnym, w którym sygnałem sprzężenia zwrotnego jest napięcie generowane przez tę sondę. Wady tego systemu wynikają z istoty pracy układów ze sprzężeniem zwrotnym oraz z charakterystyki statycznej sondy. Wada strukturalna systemów ze sprzężeniem zwrotnym polega na korekcie *post factum* sterowanego procesu. Oznacza to, że wysterowana przez system zmiana składu mieszanki w kolejnym cyklu jest wynikiem spalania mieszanki z cykli poprzedzających cykl sterowany. Sytuację komplikuje występowanie opóźnień w transmisji informacji, jej przetworzenia i wykonania nowej decyzji systemu sterowania. Opóźnienie to w przypadku procesu spalania w silniku benzynowym jest zmienne i zależy od prędkości obrotowej oraz obciążenia silnika. Sytuację pogarsza typ charakterystyki statycznej sondy lambda. Ma ona przebieg dwustanowy – wartość sygnału zmienia się skokowo z poziomu wysokiego na niski przy zmianie składu z bogatego na ubogi i odwrotnie wokół składu stechiometrycznego. Nałożenie się tych dwóch niekorzystnych właściwości systemu z sondą lambda skutkuje ciągłą fluktuacją składu mieszanki wokół składu stechiometrycznego nawet w stanach ustalonych (rys. 1). Pogarsza to właściwości ekologiczne i inne silnika.



Rys. 1. Fluktuacja sygnału z sondy lambda jako skutek zmian czasu wtrysku dla systemu sterowania MPI z sondą lambda w obwodzie sprzężenia zwrotnego (badania własne)

Fig. 1. Fluctuation of the signal from the lambda probe as an effect of the injection time variation for the control system MPI with lambda probe in the feedback circuit [personal research]

Ponadto zastosowanie w systemie jednej sondy lambda, umieszczonej w części zbiorczej kolektora wydechowego, uśrednia pomiar składu spalanej mieszanki ze wszystkich cylindrów, co może prowadzić do istotnych różnic w składach mieszanki spalanej w poszczególnych cylindrach (rys. 2).



Rys. 2. Różnice w składzie mieszanki zasilającej poszczególne cylindry silnika oraz ich wartość średnia (badania własne)

Fig. 2. Differences in compositions of mixtures fuelling the individual engine cylinders and their mean value (personal research)

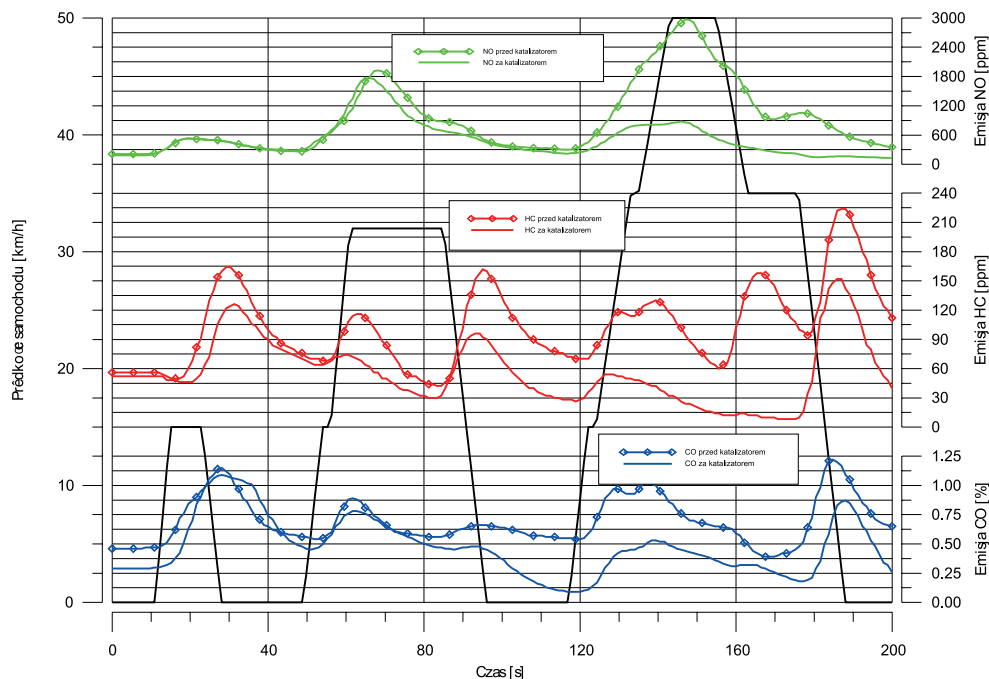
Zasadnicze pogorszenie efektywności ekologicznej silników z reaktorem katalicznym – w wyniku niestabilności składu mieszanki – ma miejsce w stanach przejściowych. Jako dowód słuszności tej tezy może służyć analiza emisji HC, CO, NO w warunkach testu homologacyjnego, ECE-15 R.83 (rys. 3). Przedstawiona na rysunku rejestracja stężeń ww. składników w spalinach wskazuje na przeważający wpływ emisji w stanach przejściowych w globalnej emisji testu. Z obliczeń (tabela 1) wykonanych w oparciu o te rejestracje wynikają dwa wnioski:

- udział emisji powstałych w stanach przejściowych w emisji łącznej (za cały test), mierzonej przed reaktorem katalicznym wynosi średnio dla wszystkich emitentów 59% i jest wyższy niż to wynika z czasowego udziału tych stanów w łącznym czasie trwania testu, który wynosi około 42%,
- efektywność reaktora katalicznego w stanach dynamicznych tego testu jest praktycznie zerowa; jej miarą może być stosunek emisji w stanach dynamicznych testu,
- obliczanych dla emisji za- i przed katalizatorem, który jest bliski jedności co można obliczyć w oparciu o dane zamieszczone w tabeli 1.

**Efektywność reaktora katalistycznego w stanach dynamicznych testu ECE 15 R.83  
dla systemu sterowania MPI z sondą lambda**

Miejsce poboru spalin	$\frac{t_{dyn}}{t_{\Sigma}}$	$\frac{CO_{dyn}}{CO_{\Sigma}}$	$\frac{HC_{dyn}}{HC_{\Sigma}}$	$\frac{NO_{dyn}}{NO_{\Sigma}}$
– przed katalizatorem	42%	57%	59%	63%
– za katalizatorem		56%	56%	61%

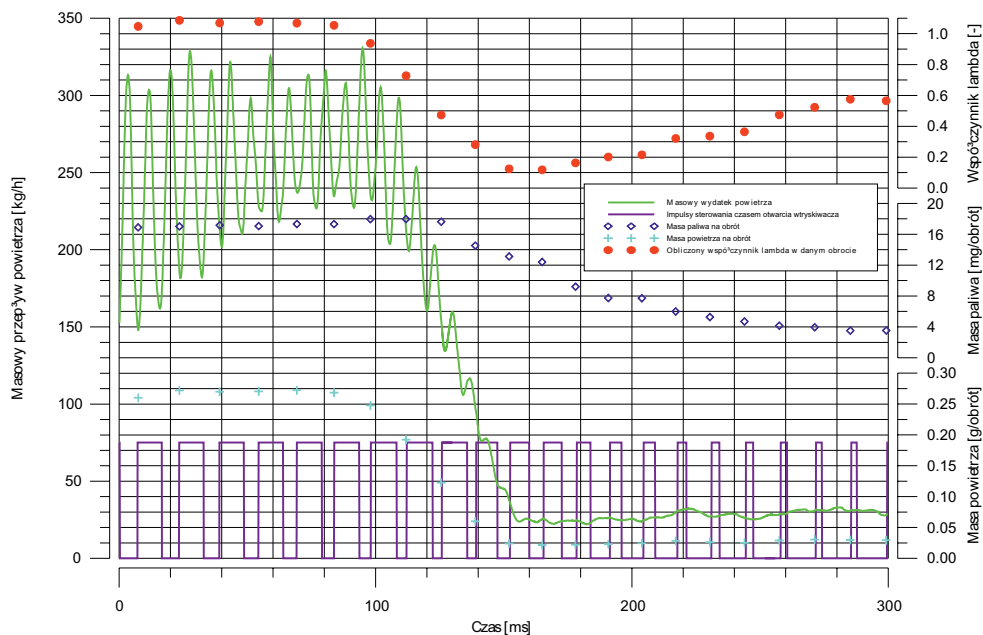
Oznacza to, że w stanach przejściowych emisje za i przed reaktorem katalitycznym są porównywalne, co wskazuje na niespełnienie roli przez reaktor katalityczny.



Rys. 3. Wizualizacja istotności stanów przejściowych silnika z i bez katalizatora w emisji sumarycznej toksycznych składników w spalinach silnika w warunkach części miejskiej UDC testu homologacyjnego ECE 15 R.83 (badania własne)

Fig. 3. Visualization of the significance of engine intermediate states with and without a catalyst in total emission of toxic components in engine exhaust gas under conditions of the urban part UDC of certification test ECE 15 R.83 (personal research)

Na przyczyny tej sytuacji wskazuje rys. 4, na którym wykazano, jak istotnej zmianie ulega skład mieszanki w stanie przejściowym, obliczany w oparciu o zarejestrowane szybkozmienne przebiegi masowego wydatku powietrza oraz czasu trwania wtrysku i charakterystykę statyczną dozowania zastosowanego wtryskiwacza. Obliczany w taki sposób skład mieszanki może z wielu powodów odbiegać od składu widzianego przez katalizator, tj. po stronie wydechu. Rysunek ten uwidacznia skalę i istotę problemu. Dodatkowo tak gwałtowna zmiana składu, prowadząca również do niepalności mieszanki, skutkuje pogorszeniem dynamiki silnika i stratą niespalonego paliwa, wyrzuconego z cylindrów do układu wydechowego. Należy dodać, że wszystkie załączone wykresy będące wynikiem badań własnych, zostały wykonane na silniku z wtryskiem pośrednim wyposażonym w nowoczesny system sterowania MPI z sondą lambda jednego ze światowych liderów w zakresie ich produkcji.



Rys. 4. Cyklowe przebiegi w fazie skokowego zamknięcia przepustnicy w silniku z wtryskiem pośrednim, sterowanym systemem wtrysku znanego światowego producenta (badania własne)

Fig. 4. Cycle runs in the phase of throttling valve stroke-bore closure in an engine with indirect injection, controlled by injection system of a worldly known producer (personal research)

Prezentowany w artykule system stabilizacji cyklowego składu mieszanki jest nowatorski w stosunku do obecnych rozwiązań, ponieważ zapewnia wymagany skład mieszanki z cyklu na cykl z dokładnością istotnie wyższą niż realizują to stosowane powszechnie systemy.

## 2. Niepowtarzalność a fluktuacja składu mieszanki

Niepowtarzalność składu mieszanki odnosi się do jej zmienności z cyklu na cykl. Jej miarą jest odchylenie międzycykłowe (1):

$$\Delta\lambda = \lambda^i - \lambda^{i-1} \quad (1)$$

gdzie:

$i$  – nr cyklu

$\lambda$  – współczynnik nadmiaru powietrza.

W analizie uśredniającej zjawisko niepowtarzalności składu cyklowego mieszanki bardziej zasadnym jest stosowanie modułu odchylenia składu wg (2):

$$|\Delta\lambda| = |\lambda^i - \lambda^{i-1}| \quad (2)$$

Fluktuacja składu mieszanki związana jest z trendem zmian niepowtarzalności składu cyklowego i określana jest na zbiorze  $j$  cykli pracy silnika. Można ją definiować takimi wskaźnikami jak:

- odchylenie średnie składu, tj. odchylenie średniego w zbiorze  $j$  cykli składu od składu oczekiwanego,
- rozrzut przeciętny składu cyklowego,
- rozrzut maksymalny składu cyklowego.

Wskaźniki te zdefiniowane zostały w pracy [1] i wykorzystane do oceny sterowania silnika z wtryskiem pośrednim [2].

Niniejszy artykuł dotyczy analizy niepowtarzalności składu mieszanki, co jest związane z jej zmiennością z cyklu na cykl. Nie dotyczy natomiast problemu fluktuacji tego składu, czyli trendu zmian odchyleń międzycyklowych.

## 3. Wskaźniki niepowtarzalności składu mieszanki

Podstawowym wskaźnikiem niepowtarzalności składu mieszanki jest jego odchylenie międzycykłowe (inaczej: odchylenie z cyklu na cykl) wg (1) oraz jego modyfikacja wg (2), uwypuklająca zjawisko niepowtarzalności składu. Odchylenie wg (1), uśrednione w zbiorze  $j$  cykli wg (3):

$$\Delta\lambda_j = \frac{1}{j-1} \sum_{i=1}^{i=j} \Delta\lambda \quad (3)$$

może być – przy tej samej liczbie odchyleń dodatnich i ujemnych – równe zero nawet w przypadku bardzo dużych odchyleń międzycyklowych lecz o przeciwnych znakach, co fałszuje obraz problemu.

Wady tej pozbawiony jest wskaźnik (2), którego wartość średnia  $|\Delta\lambda_j|$  obliczona w sposób jak wskaźnika (3) z modułu odchylenia  $|\Delta\lambda|$  jednoznacznie charakteryzuje niepowtarzalność składu z cyklu na cykl.

Stosować można inne, niżej zdefiniowane wskaźniki:

- wartość przeciętna (oczekiwana)  $\Delta\lambda_k$  przyrostu międzycyklowego określona na zbiorze  $j$  cykli w  $k$ -tym punkcie  $n \times p$ . pracy silnika (4):

$$\Delta\lambda_k = \frac{1}{j+1} \sum_{z=1}^{z=\omega} \Delta\lambda_z I_z \quad (4)$$

gdzie:

$$k = 1, 2, \dots, 98$$

$z = 1, 2, \dots, \omega$  – numer kolejnego przedziału zmienności  $\Delta\lambda$ , (każdy o szerokości  $\Delta\lambda_p$ ) w zbiorze  $j$  cykli,

$\omega$  – liczba przedziałów  $\Delta\lambda_p$ ,

$I_z = 1, 2, \dots, j-1$  – liczba przyrostów międzycyklowych  $\Delta\lambda$  w  $z$ -tym przedziale o szerokości  $\Delta\lambda_p$ ,

$\Delta\lambda_z$  – wartość środkowa przyrostu międzycyklowego  $\Delta\lambda$  w  $z$ -tym przedziale (5):

$$\Delta\lambda_z = (z-1)\Delta\lambda_p + 0,5\Delta\lambda_p \quad (5)$$

Przyrost międzycyklowy  $\Delta\lambda$  składu mieszanki należy do  $z$ -tego przedziału, jeżeli spełnia warunek (6):

$$(z-1)\Delta\lambda_p \leq \Delta\lambda < z\Delta\lambda_p \quad (6)$$

- wariancja (7):

$$\sigma_k^2 = \frac{1}{j-1} \sum_{z=1}^{\omega} (\Delta\lambda_z - \Delta\lambda_k)^2 I_z \quad (7)$$

- odchylenie standardowe (średnie)  $\delta_k$  (8):

$$\delta_k = \sqrt{\sigma_k^2} \quad (8)$$

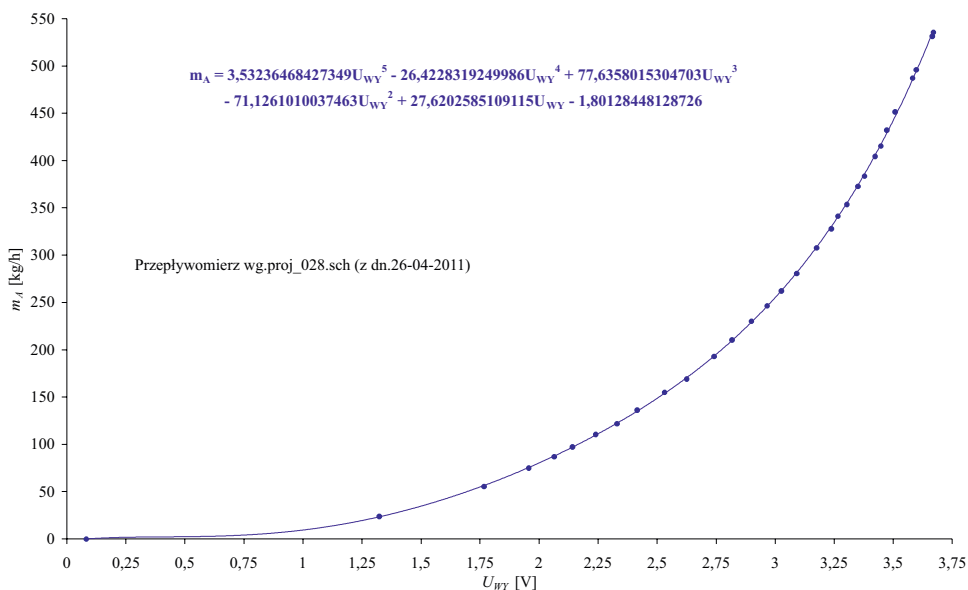
#### 4. Obiekt badań

W badaniach zmienności z cyklu na cykl składu mieszanki stosowano silnik o wtrysku bezpośrednim benzyny (GDI) typ 4G93 firmy MITSUBISHI montowany w samochodzie CARISMA od 1995 roku. Jego charakterystykę użytkową przedstawiono w publikacji [3].

Badano zmienność składu mieszanki w tym silniku dla dwóch wariantów sterowania:

- fabrycznego [4], eksploatowanego w badanym silniku (parametry tego badania oznaczone są indeksem  $f$ ),
- opracowanego we własnym zakresie CbC (parametry badania oznaczone indeksem  $\mu$ ) [5].

Sterowanie składem mieszanki wg [4] bazuje na pomiarze wydatku powietrza wykonywanym miernikiem instalowanym w tym silniku o charakterystyce statycznej (rys. 5).



Rys. 5. Charakterystyka statyczna miernika wydatku powietrza w silniku 4G93

Fig. 5. Static characteristic of the air discharge meter in the engine 4G93

System sterowania MITSUBISHI jest znamieny m.in. tym, że w wysterowanych stanach przejściowych samodzielnie decyduje o stanie i szybkości otwarcia przepustnicy. Kierowca może tylko określić swoje intencje względem prędkości obrotowej silnika. Taki sposób sterowania przepustnicą z pewnością poprawia powtarzalność (stabilność) cyklowego składu mieszanki, przede wszystkim w wysterowanych stanach przejściowych.

System CbC bazuje na pomiarze masowego wydatku powietrza, zapewniającego pomiar napełnienia w każdym, kolejnym cyklu. Opracowany we własnym zakresie stałotemperaturowy termooanemometr [9], zapewnia taki pomiar w silniku 4G93 w zakresie prędkości od biegu jałowego do ok. 5000 obr./min. Powyżej tej prędkości należy wyznaczyć dla silnika tzw. mapy kąta początku i końca „zastępczego” przedziału pomiaru napełnienia.

## 5. Sposób wykonania badań

Prezentowane wyniki badań dotyczą drugiego cylindra silnika 4G93. W gałęzi kolektora dolotowego tego cylindra zainstalowano czujniki wydatku masowego powietrza i jego temperatury, a w odpowiedniej gałęzi kolektora wydechowego czujnik składu mieszanki typ MEXA 700λ firmy HORIBA. Użycie w pomiarach skonstruowanego we własnym zakresie interfejsu [8] umożliwiło pomiar wszystkich istotnych wielkości, koniecznych dla wyznaczenia zmienności składu w całym polu pracy  $n \times p$  silnika. Rejestrowano m.in. takie sygnały jak:

- masowy wydatek  $m_A$  powietrza zmierzonego własnym termooanemometrem,
- położenie kątowe wału korbowego CAS,



- położenie kątowne wałka rozrządu CS,
- napięcie sterujące wtryskiem fabrycznym silnika 4G93,
- napięcie sterujące wtryskiem opracowanego systemu CbC,
- podciśnienie  $p$  w zbiorczej części kolektora dolotowego.

Wymienione sygnały rejestrowano systemem wyposażonym w 14-bitową kartę OCTOPUS CS8380 firmy Gage z częstotliwością próbkowania 1 MHz. Długość rejestrowanych odcinków w każdym z 98 punktów pracy silnika wynosiła 2 sekundy, co pozwalało zarejestrować w zależności od prędkości obrotowej od 16 do 107 pełnych cykli pracy silnika.

Stosując opracowane we własnym zakresie oprogramowanie w języku Turbo Pascal wyznaczono zdefiniowane wcześniej wskaźniki zmienności cyklowego składu.

Z wykorzystaniem sygnału  $m_A$  wyznaczono dla wszystkich cykli pracy silnika napełnienie  $M_A$  wg (9) lub wg 10:

$$M_A = \int_{t_{\varphi p1}}^{t_{zD}} m_A(t) dt \quad \text{dla } n \leq 5000 \text{ obr./min} \quad (9)$$

$$M_A = \int_{t_{\varphi p1}}^{t_{\varphi p2}} m_A(t) dt \quad \text{dla } n > 5000 \text{ obr./min} \quad (10)$$

Kąt  $\varphi_{p1}$  eliminuje przepływ zwrotny w fazie przekrycia zaworów, a kąt  $\varphi_{p2}$  ustanawia sztuczną granicę zastępczego przedziału pomiaru napełnienia dla  $n > 5000$  obr./min wg zależności (11):

$$\int_{\varphi_{p2}}^{\varphi_{p1}} m_A(\varphi) d\varphi = 14,7 \bar{\lambda}_H^s M_F \quad (11)$$

gdzie:

$\bar{\lambda}_H^s$  – zmierzony przyrządem MEXA700λ skład mieszanki spalanej w drugim cylindrze po skorelowaniu i uśrednieniu [8],

$M_F$  – cyklowa masa paliwa wysterowana systemem MITSUBISHI.

Tak wyznaczone napełnienie  $M_A$  zastosowano w celach:

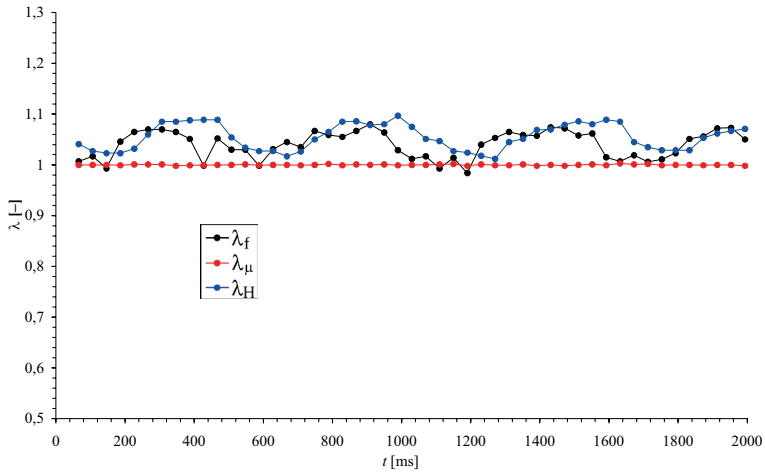
- generowania wtrysków w systemie CbC (dla oczekiwanego składu  $\lambda^* = 1,0$ ),
- wyznaczenia cyklowego składu mieszanki wysterowanego systemem MITSUBISHI wg (12):

$$\lambda_f = \frac{1}{14,7} \frac{M_A}{M_F} \quad (12)$$

## 6. Wyniki badań

Przykład zmian cyklowego składu mieszanki:

- wysterowanego systemem CbC ( $\lambda_\mu$ ),
- wysterowanego systemem MITSUBISHI ( $\lambda_p$ ),
- zmierzonego w wydechu drugiego cylindra przyrządem MEXA 700 λ ( $\lambda_H$ ) w wybranym (b75) punkcie pracy silnika przedstawiono na rys. 6.

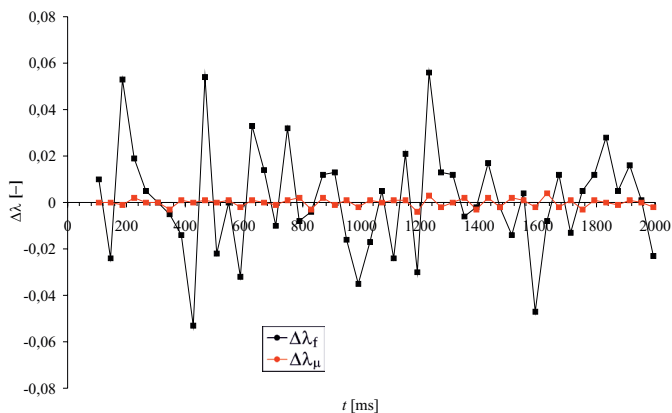


Rys. 6. Przykładowy przebieg cyklowego składu mieszanki dla trzech sposobów jego wyznaczania ( $n = 3000$  obr./min,  $p = 14,7$  kPa)

Fig. 6. Example of a cycle run of the mixture composition for three determining methods ( $n = 3000$  rpm,  $p = 14.7$  kPa)

Obliczone dla tego przykładu odchylenia międzycyklowe składu mieszanki przedstawiono na rys. 7.

Wyznaczone dla wszystkich analizowanych 5127 cykli silnika odchylenie międzycyklowe  $\Delta\lambda_\mu$  w systemie CbC przedstawiono na rys. 8a. Na rys. 8b ukazano profil (obrys) maksymalnych zmian  $\Delta\lambda$  spowodowanych zmianą podciśnienia  $p$  w całym zakresie prędkości obrotowej silnika. Na rys. 8c profil maksymalnych zmian  $\Delta\lambda$  wywołanych zmianą prędkości obrotowej  $n$  w całym zakresie podciśnienia  $p$ .



Rys. 7. Przebiegi odchyleń cyklowych składu mieszanki wyznaczone dla przykładu wg rys. 6

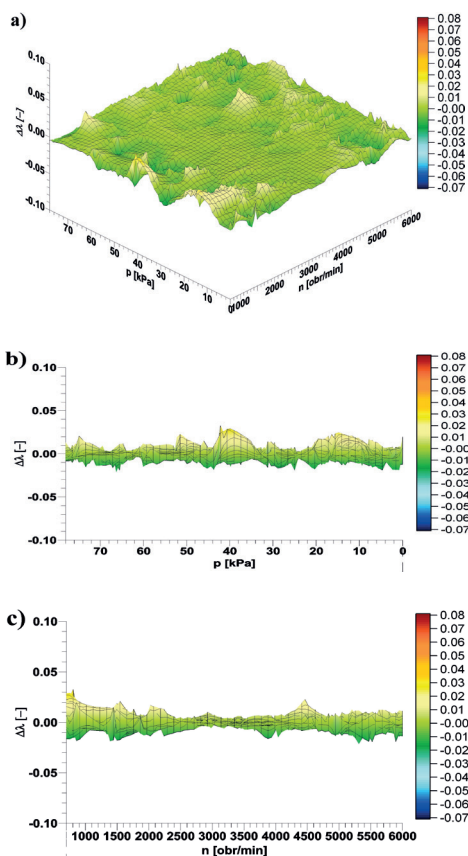
Fig. 7. Runs of the mixture composition cycle deviations determined for the example in Fig.6

Wykresy te pokazują w sposób wyraźny większą stabilność składu wysterowanego systemem CbC. Wskazuje na to zwłaszcza porównanie profili 5b, 5c oraz 6b i 6c. W obydwu przypadkach profile dla systemu Mitsubishi mają większą amplitudę niż w systemie CbC.

Porównanie obliczonych dla zbioru wszystkich 5127 analizowanych cykli – wartości średnich bezwzględnego odchylenia międzycyklowego  $|\Delta\lambda|$  wykazuje ponadczterokrotnie zmniejszenie niepowtarzalności składu cyklowego w wyniku zastosowania sposobu CbC.

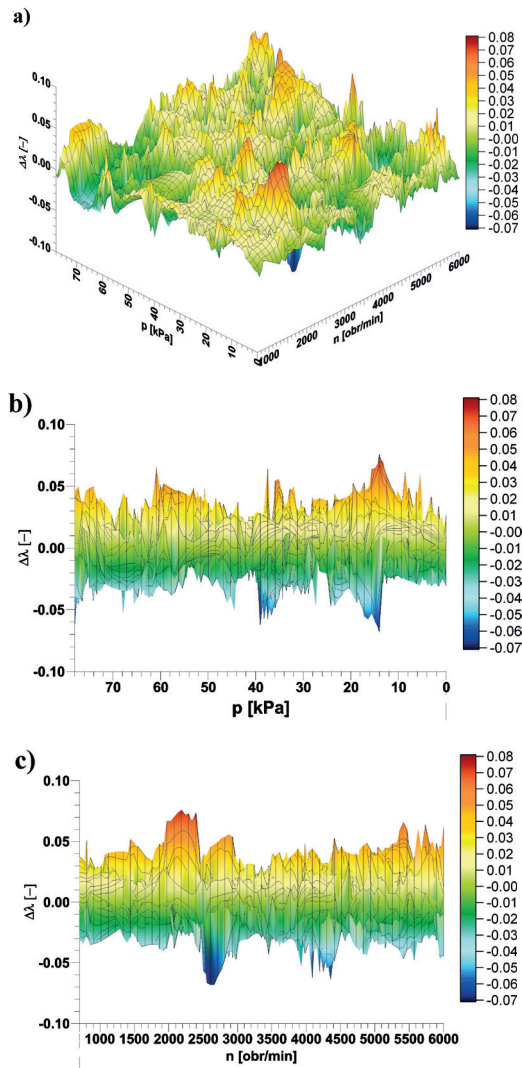
Wyznaczone na zbiorze  $k$  punktów pracy silnika wartości średnie pozostałych wskaźników wg (4), (7), (8) dla systemów MITSUBISHI i CbC zestawiono w tabeli 2.

Te same wielkości dla systemu Mitsubishi przedstawiono na rys. 9a–9c



Rys. 8. Odchylenie międzycyklowe składu mieszanki wysterowanego systemem CbC: a) wykres przestrzenny, b) profil maksymalnego odchylenia międzycyklowego, spowodowanego zmiennym podciśnieniem, c) profil maksymalnego odchylenia międzycyklowego, spowodowanego zmianą prędkości obrotowej

Fig. 8. Inter-cycle deviation of the mixture composition controlled using the system CbC: a) spatial diagram, b) profile of the maximum inter-cycle deviation, caused by variable negative pressure, c) profile of the maximum inter-cycle deviation, caused by the change of the rotational speed



Rys. 9. Odchylenie międzycykłowe składu mieszanki wysterowanego systemem Mitsubishi:  
 a) wykres przestrzenny, b) profil maksymalnego odchylenia międzycykłowego, spowodowanego zmiennym podciśnieniem, c) profil maksymalnego odchylenia międzycykłowego, spowodowanego zmianą prędkości obrotowej

Fig. 9. Inter-cycle deviation of the mixture composition controlled using the Mitsubishi system:  
 a) spatial diagram, b) profile of the maximum inter-cycle deviation, caused by variable negative pressure, c) profile of the maximum inter-cycle deviation, caused by the change of the rotational speed

**Zestawienie wskaźników oceny niepowtarzalności cyklowego składu mieszanki w silniku 4G93, sterowanym systemami: MITSUBISHI (indeks f) i CbC (indeks  $\mu$ )**

Wskaźnik System	$\Delta\lambda_j$	$ \Delta\lambda_j $	$\Delta\lambda_{98}$	$\sigma_{98}^2$	$\delta_{98}$
MITSUBISHI	$34,52 \cdot 10^{-6}$	$18,975 \cdot 10^{-3}$	$11,94 \cdot 10^{-3}$	$0,21 \cdot 10^{-3}$	$14,00 \cdot 10^{-3}$
CbC	$91,90 \cdot 10^{-6}$	$4,218 \cdot 10^{-3}$	$6,70 \cdot 10^{-3}$	$0,021 \cdot 10^{-3}$	$3,36 \cdot 10^{-3}$
$\frac{w^f}{w^z}$	0,376	4,50	1,78	10,0	4,167

## 7. Wnioski

W artykule sformułowano i zdefiniowano wskaźniki niepowtarzalności cyklowego składu mieszanki, przyjmując jako podstawowy wskaźnik odchylenie międzycyklowe składu. Wskaźniki zastosowano do oceny niepowtarzalności cyklowego składu mieszanki w silniku GDI typ 4G93, wysterowanym dwoma systemami: systemem firmowym oraz systemem CbC opracowanym w ramach projektu N-N504-3406-36. Wykazano ponadczterokrotne zmniejszenie odchylenia międzycyklowego z użyciem opracowanego systemu. Metoda pomiaru wydatku powietrza umożliwiająca wyznaczanie masowego napełnienia cylindra z cyklu na cykl wymaga dalszego doskonalenia w celu zapewnienia sterowania składem mieszanki przy dużej wartości prędkości obrotowej.

*Praca naukowa finansowana ze środków na naukę w latach 2009–2011 w ramach projektu badawczego nr N N 504 340636*

## Literatura

- [1] Sprawozdanie z realizacji projektu badawczego Nr 4 T12D 009 27 *Rozwój sposobu sterowania składem mieszanki z cyklu na cykl na przykładzie silnika benzynowego*, Politechnika Radomska, Radom 2007.
- [2] Nita J., Wołczyński Z., *The evaluation of cycle by cycle mixture composition in an indirect injection engine*, Silniki Spalinowe 4/2009.
- [3] Wołczyński Z., *Identyfikation of properties of the GDI engine and its control system*, Silniki Spalinowe, 3/2011(146), CD.
- [4] Wołczyński Z., *Identification of fuel injection control system in a GDI engine*, Journal of KONES Powertrain and Transport, Vol. 17, No. 4, Warszawa 2010, 599-606.
- [5] Sprawozdanie z realizacji projektu badawczego Nr N N504 340636 pt.: *Nowy sposób sterowania składem mieszanki z cyklu na cykl w silniku z bezpośrednim wtryskiem benzyny (GDI)*, Politechnika Radomska, Radom 2012.
- [6] Nita J., *Termoanemometr stalotemperaturowy do pomiaru chwilowego wydatku powietrza w silniku 4G93*, opracowanie wewnętrzne Politechniki Radomskiej, Radom 2012.
- [7] Wołczyński Z., Raport pt. *Zaprojektowanie i wykonanie interfejsu pomiarowo-zadającego*, opracowanie wewnętrzne Politechniki Radomskiej, Radom 2012.
- [8] Wołczyński Z., *Metoda sterowania składem mieszanki paliwowo-powietrznej w silniku benzynowym*, Rozprawa doktorska obroniona przed Radą Wydziału Mechanicznego Politechniki Radomskiej, Radom 2005.