

Estimation of cycle-to-cycle variations of the air-fuel ratio in an engine with indirect gasoline injection

Abstract: The paper presents results of investigation on cycle-to-cycle variations of the air-fuel ratio in a naturally-aspirated spark ignition engine with an indirect multipoint fuel injection. The air-fuel ratio was controlled with the application of an algorithm developed by the authors. Its characteristic feature is the ability to adjust a required air-fuel ratio from cycle to cycle. Estimation of cycle-to-cycle variations was carried out on the basis of the engine test bed investigation under transient and steady operating conditions. The obtained results were compared to those presented in [1], obtained for manufacturer's parameters. The comparative analysis has revealed decreased variations of the air-fuel ratio controlled with the application of the developed system. Additionally, the results indicated further improvement directions of the developed control system.

Keywords: spark ignition engine, cylinder fill, cycle-to-cycle air-fuel ratio, cycle-to-cycle control

Ocena fluktuacji składu mieszanki wysterowanej z cyklu na cykl w silniku z pośrednim wtryskiem benzyny

Streszczenie: W publikacji przedstawiono wyniki badań nad fluktuacją wysterowanego składu mieszanki paliwowo-powietrznej w wolnossącym silniku o zapłonie iskrowym z wtryskiem pośrednim wielopunktowym benzyny. Skład mieszanki wysterowano według opracowanego we własnym zakresie algorytmu. Jego znamioną cechą jest konstytuowanie mieszanki w cylindrze o wymaganym składzie w trybie z cyklu na cykl. Ocena fluktuacji tak wysterowanego składu mieszanki wykonano na bazie wyników z badań hamownianych silnika w wybranych stanach ustalonych i przejściowych. Otrzymane wyniki porównano z wynikami przedstawionymi w pracy [1], uzyskanymi dla fabrycznego sterowania w tym silniku. Analiza porównawcza wykazała obniżenie fluktuacji składu mieszanki wysterowanej opracowanym systemem. Badania wskazały ponadto kierunki dalszego doskonalenia opracowanego sposobu sterowania.

Słowa kluczowe: silnik benzynowy, napełnienie cylindra, cyklowy skład mieszanki, sterowanie z cyklu na cykl

1. Wprowadzenie

Cyklowy skład mieszanki paliwowo-powietrznej mierzony w spalinach silnika o zapłonie iskrowym jest niepowtarzalny. Jego odchylenie od składu referencyjnego (oczekiwanego) w silniku z wtryskiem pośrednim benzyny jest duże [1], co obniża efektywność wykorzystania katalizatora oraz wpływa na moc silnika i zużycie paliwa.

Jedną z głównych przyczyn fluktuacji składu mieszanki spalanej (mierzonej w spalinach), jest fluktuacja składu wysterowanego tej mieszanki, tj. składu wynikającego z mas powietrza i paliwa zassanych przez cylinder w czasie trwania pojedynczego napełnienia. Skład mieszanki spalanej różni się od składu wysterowanego (głównie w stanach przejściowych) zwłaszcza z trzech następujących przyczyn:

- istnienia tzw. filmu paliwowego, występującego zawsze w silnikach z wtryskiem pośrednim bądź z zasilaniem gaźnikowym,
- niepełnego i/lub niezupełnego spalania mieszanki wysterowanej,

- wad stosowanego powszechnie sposobu sterowania wtryskiem benzyny.

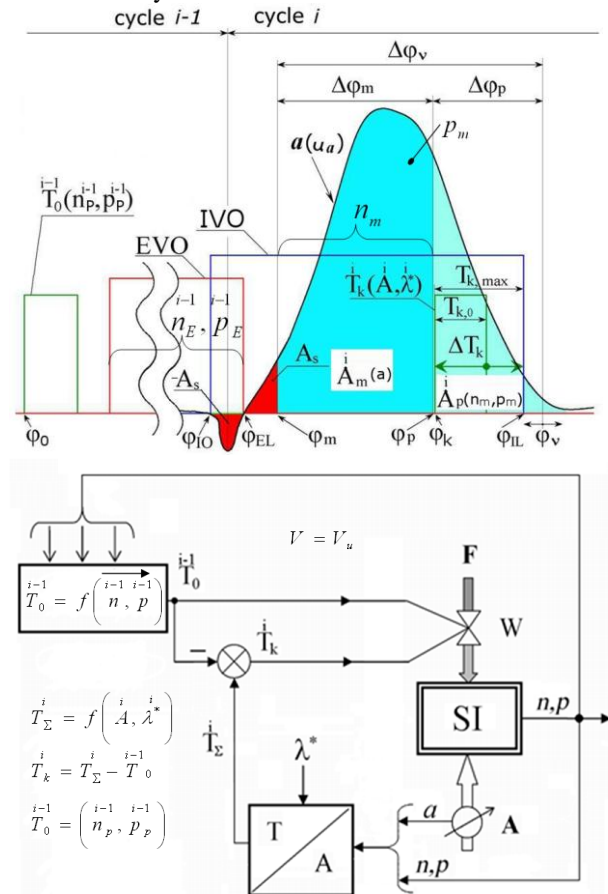
Dwie pierwsze przyczyny są wynikiem stosowanego sposobu zasilania (wtrysk pośredni) i cech konstrukcyjnych silnika zwłaszcza jego kolektora dolotowego. Stosowane algorytmy sterowania mają również znaczący wpływ na poziom tej fluktuacji. We współczesnych silnikach, wyposażonych w trójfunkcyjny katalizator, skład mieszanki sterowany jest z wykorzystaniem tzw. sondy lambda, będącej dwustanowym detektorem, stwierdzającym jedynie obecność tlenu w spalinach, bądź jego brak, lecz niemierzającym jego ilości. Dwustanowy charakter sygnału z tego czujnika, opóźnienie jego reakcji oraz zasada pracy stosowanego układu sterowania (jest to zasada wykorzystująca sprzężenie zwrotne, według której wysterowany skład mieszanki zależy od różnicy między składem mierzonym w spalinach a składem referencyjnym, najczęściej stechiometrycznym w poprzednich cyklach) powodują, że skład mieszanki w następujących po sobie cyklach może być różny od składu referencyjnego [1]. Szczególnie duża fluktuacja składu mieszanki ma miejsce w stanach przejściowych w

silniku. W stanach tych układ ze sprzężeniem zwrotnym – ze względu na jego w/w cechy nie może zapewnić wymaganego składu mieszanki w relacji z cyklu na cykl. Skład mieszanki sterowany jest wtedy w systemie otwartym. U podstaw otwartego sposobu sterowania są tzw. mapy sterowania, wiążące skład wymagany z wybranymi wielkościami określającymi aktualny stan silnika [2].

Według zgodnych opinii, (wyrażonych m.in. w [3]), docelowe sterowanie procesem roboczym w silniku powinno zapewnić jego optymalny przebieg na poziomie pojedynczego cyklu, w każdym z jego cylindrów odrębnie, co uzasadnia jego nazwę „sterowanie autonomiczne”. Problem ten może być rozwiązywany w różny sposób. Jeden z możliwych sposobów takiego sterowania, oznaczony w pracach własnych skróttem C/C (Cycle by Cycle), był przedmiotem badań zrealizowanych z udziałem autorów tej publikacji [4], [5], [6].

2. Istota sterowania C/C

Istotę sterowania C/C i sposób jej realizacji przedstawiono na rys. 1.



Rys. 1. Istota sterowania C/C (a) i sposób jej realizacji (b) (oznaczenia użyte na rysunku objaśniono w tekście)

U podstaw opracowanego sposobu sterowania jest metoda prognozowania w trybie z cyklu na cykl masy powietrza, które napelni cylinder w każdym z jego cykli roboczych [7]. W tym celu zastosowano tzw. termoanemometr stałotemperaturowy. Jego znaną cechą, mającą bardzo pozytywny wpływ na szybkość pomiaru jest stałość temperatury czujnika (względem mierzonego medium) co eliminuje jego inercję. Generuje on sygnał analogowy u_a o wartości związanej nieliniowo z wydatkiem masowym a powietrza. Sygnał u_a masowego wydatku a powietrza napieniającego cylinder w i -tym cyklu jest całkowany w czasie odpowiadającym przedziałowi kątowemu $\Delta\varphi_m$ obrotu wału silnika. Dolna granica φ_m tego przedziału wyznaczona jest w taki sposób aby wyeliminowane zostały z mierzonego napienienia spaliny A_s wtłoczone do kolektora dolotowego w fazie przekroczenia zaworów. Górna granica φ_p jest wynikiem kompromisu między oczekiwaną dokładnością wyznaczania cyklowego napienienia A^i a czasem $T_{k,max}$ wtrysku uzupełniającego niezbędnego dla zapewnienia wymaganego cyklowego składu mieszanki. W sposobie sterowania C/C masa powietrza A^i , która napienia pojedynczy cylinder w i -tym cyklu jest wg (1) sumą mas powietrza: masy zmierzonej A_m^i i masy prognozowanej A_p^i :

$$A^i = A_m^i + A_p^i \quad (1)$$

Wymagana cyklowa masa paliwa F^i wynika z zależności (2):

$$F^i = \frac{1}{\lambda^*} A^i \quad (2)$$

gdzie: λ^* – wymagany cyklowy skład mieszanki.

Paliwo o masie F^i , które utworzy mieszankę z masą A^i powietrza w i -tym cyklu, jest wtryskiwane w silniku z wtryskiem pośrednim na zawór dolotowy dwukrotnie w trakcie:

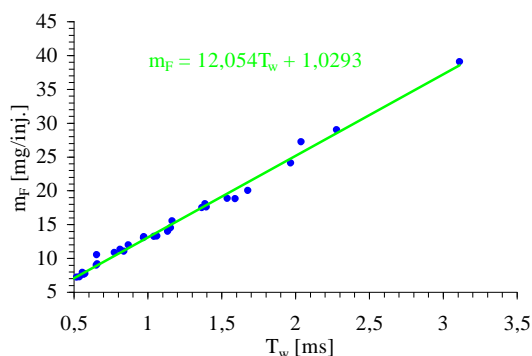
- wtrysku podstawowego T_0^{i-1} , wykonanego w cyklu $i-1$ na zamknięty zawór dolotowy w suwie wydechu EVO,
- wtrysku uzupełniającego T_k^i , wykonanego na otwarty zawór dolotowy w i -tym cyklu w końcowej fazie suwu napieniania IVO.

Masa paliwa F^i wtrysnięta w pojedynczym wtrysku powiązana jest z jego długością (czasem trwania T), zależnością (3):

$$F^1 = aT^1 + b \quad (3)$$

gdzie: a , b – współczynniki opisujące charakterystykę systemu wtrysku,

Przebieg tej charakterystyki przedstawiono na rys. 2



Rys. 2. Charakterystyka wydatkowa zastosowanego systemu wtrysku

Dla bieżącego wyznaczania w procesie sterowania długości wtrysków T_0^{i-1} , T_k^i stosowane są cztery 3-wymiarowe związki (1), nazywane potocznie „mapami”, opracowane dla danego silnika i stosowanych w nim czujników pomiarowych na etapie syntezy sterowania:

$$T_0(n_P, p_P) \quad (4a)$$

$$\varphi_m(n_E, p_E) \quad (4b)$$

$$\varphi_P(n_E, p_E) \quad (4c)$$

$$A_P(n_m, p_m) \quad (4d)$$

Indeksem P oznaczono suw sprężania, indeksem E suw wydechu (obydwa w cyklu $i-1$) a indeksem m fazę pomiaru wydatku powietrza w suwie napełniania w i -tym cyklu. Prędkość obrotowa n i ciśnienie p w związkach (4a) ÷ (4d) są wielkościami średnimi z j kolejnych cykli roboczych silnika, obliczonymi odpowiednio dla faz: sprężania (4a), wydechu (4b, 4c) i napełniania (4d).

Opracowane dla danego silnika związki (4) umożliwiają wyznaczanie i generowanie wtrysków T_0^{i-1} , T_k^i w procesie sterowania, według następującego algorytmu:

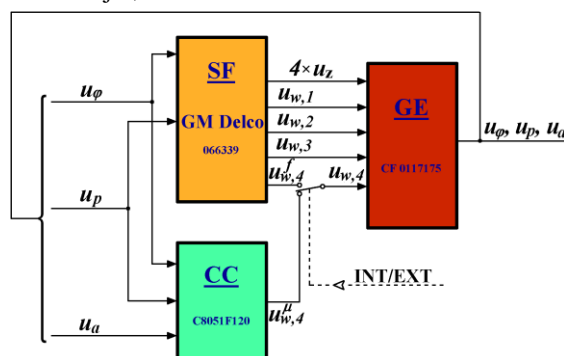
- mierz w suwie sprężania n i p , oblicz n_P^{i-1} , p_P^{i-1} i wyznacz w oparciu o (4a) $T_0^{i-1}(n_P^{i-1}, p_P^{i-1})$,
- wykonaj w suwie wydechu EVO dla kąta φ_0 ($\varphi_{LL} < \varphi_0 \leq \varphi_{10}$) wtrysk $T_0^{i-1}(n_P^{i-1}, p_P^{i-1})$,
- mierz w suwie sprężania n i p , oblicz n_E^{i-1} , p_E^{i-1} i wyznacz w oparciu o (4b) φ_m^i oraz w oparciu o (4c) φ_P^i ,
- mierz w granicach φ_m^i , φ_P^i masowy wydatek a powietrza napełniającego cylinder i oblicz masę powietrza A_m^i , którą napełnił się cylinder w czasie obrotu wału silnika między φ_m^i i φ_P^i ; w tym samym czasie mierz n i p i oblicz ich wartości n_m^i , p_m^i ,
- wykorzystując związek (4d), prognozuj masę A_P^i powietrza, które napłynie do cylindra do zakończenia pomiaru napełnienia,
- oblicz cyklową masę powietrza A^i , wg (1) które napełniło cylinder w i -tym cyklu,
- uwzględniając charakterystykę wydatkową stosowanego systemu dozowania paliwa oraz

paliwo wtrysnięte we wtrysku T_0^{i-1} wyznacz dla wymaganego składu λ^* czas trwania wtrysku uzupełniającego T_k^i ,

- dla kąta φ_k ($\varphi_{LL} > \varphi_k \geq \varphi_P$) wykonaj wtrysk T_k^i .

3. Egzemplifikacja sterowania

Egzemplifikację sterowania C/C wykonano dla przypadku mieszanki stechiometrycznej $\lambda^{i*}=1,0$. W tym celu wykorzystano jeden z czterech cylindrów wolnossącego silnika typ CF 0117175 o pojemności skokowej 1,6l.



Rys. 3. Sprzętowa realizacja sposobu sterowania C/C (u_φ – dwustanowy sygnał kąтового położenia φ wału korbowego, u_p – sygnał analogowy ciśnienia p_J w zbiorczej części kolektora dolotowego, u_a – sygnał analogowy wydatku masowego powietrza w zasilającym 4-ty cylinder)

System sterowania C/C (rys. 2) zrealizowano na bazie mikroprocesora C8051F120. Cztery mapy (4) zaimplementowano w procesorze w postaci 2-bajtowych tablic o rozmiarze 64×64 każda. Źródłem sygnału u_φ kąтового położenia φ wału silnika był czujnik indukcyjny, generujący sygnał w wyniku obrotu koła zębatego zamocowanego na wale silnika. Koło zębate posiada 58 równomiernie rozłożonych zębów oraz przerwę o szerokości 2-zębów do identyfikacji położenia odniesienia wału silnika. W oparciu o ten sygnał obliczane są również prędkości obrotowe n_P , n_E , n_m . Źródłem sygnału u_p do pomiaru ciśnienia p był czujnik MAP ciśnienia fabrycznego systemu sterowania. Sygnał u_p poddawano dolnoprzepustowej filtracji i pomiarowi metodą 1-krotnego próbkowania w wybranej fazie cyklu. Pomiar wydatku a powietrza polegał na próbkowaniu co $53\mu s$ sygnału u_a i wyznaczaniu jego wartości średniej z dwóch kolejnych próbek. Wartość średnia u_a zamieniana była na wartość uśrednionego w tym przedziale wydatku masowego a powietrza z wykorzystaniem tablicy $a=f(u_a)$ o 256 przedziałach dyskretyzacji sygnału u_a . Cykl ten powtarzał się aż wał silnika osiągnął położenie φ_P . Wtedy następowało mnożenie każdej wartości a wydatku przez czas $\Delta t_j=53\mu s$ i automatyczne sumowanie wartości kolejnych iloczynów $a \times \Delta t_j$, w wyniku, czego obliczono masę powietrza A_m^i za-

ssanego do cylindra w przedziale $\Delta\varphi_m$ i -tego cyklu. Jednocześnie, w chwili gdy wał silnika osiągnął położenie φ_p , pobierano z tablicy 64×64 wartość A_p^i odpowiadająca wartościom $n_m \times p_m$ w wyznaczonym w przedziale $\Delta\varphi_m$ w sposób jak dla A_m . Masy A_m^i i A_p^i sumowano co wyznaczało cyklowe napełnienie A^i a następnie z jego wykorzystaniem obliczano masę F^i cyklowego paliwa, wymaganą dla zapewnienia mieszanki o oczekiwany cyklowym składzie λ^* , (w tym przypadku składzie stechiometrycznym). Charakterystyka wtryskiwacza, wg (3) pozwalała obliczyć wymagany, sumaryczny czas wtrysku T^i w i -tym cyklu i równocześnie – po uwzględnieniu czasu T^i rozbiegu wtryskiwacza i wygenerowanego w fazie wydechu poprzedniego cyklu wtrysku podstawowego T_o^{i-1} – czasu trwania wtrysku korekcyjnego T_k^i , który był generowany w i -tym cyklu.

4. Badanie systemu C/C

Celem badań była ocena fluktuacji cyklowego składu mieszanki, wysterowanej według sposobu C/C oraz porównanie jej z fluktuacją składu wysterowanego fabrycznym systemem SF badanego silnika.

Program badań obejmował próby w pięciu wybranych stanach ustalonych k1÷k5 i dwóch stanach dynamicznych k6, k7 a do ich oceny zastosowano zdefiniowane w p.5 wskaźniki. Każdy stan pracy ustalonej (k-ty punkt pracy silnika) był identyfikowany parą identyfikatorów stanu n_k^j, p_k^j , będących wartościami średnimi w zbiorze j cykli w k -tym punkcie pracy silnika, cyklowej prędkości wirowania n_c i cyklowego ciśnienia p_c w kolektorze dolotowym.

Stany przejściowe identyfikowano średnim (w zbiorze j pełnych cykli pracy silnika) przyspieszeniem $\frac{dn_c^j}{dt}$ prędkości cyklowej i średnią (w zbiorze j pełnych cykli) szybkością zmian $\frac{dp_c^j}{dt}$ ciśnienia w kolektorze dolotowym.

Dla oceny sterowania w stanach dynamicznych przyjęto następujące kryteria wyznaczania jego poszczególnych faz:

- faza rozbiegu FR rozpoczyna się wraz ze zmianą wymuszenia (początek skokowego otwierania od α_j do α_{max} przepustnicy powietrza) a kończy, gdy chwilowa prędkość wirowania n osiągnie poziom 95% prędkości ustalonej,
- aktywna część fazy wybiegu FWA (znamienna tym, że wtryskiwacze dozują paliwo), rozpoczyna się w chwili gdy $dp_c/dt < 0$, a kończy ostatnim wtryskiem, którego czas trwania jest większy od czasu jego jałowego rozbiegu T_j ,
- faza wyłączonego wtrysku FWW bez wpływu na sterowalność składu mieszanki,

- faza stabilizacji stanu silnika podczas wybiegu FWS rozpoczyna się wraz z pierwszym wtryskiem, którego czas trwania jest równy lub większy niż czas trwania wtrysku na biegu jałowym silnika, a kończy gdy ciśnienie cyklowe p_c w kolektorze osiągnie wartość jak dla biegu jałowego silnika.

Fazy FR, FWA i FWS przedstawione są na rys. 4 i 5. Faza FWW ze względu na wyłączone wtryskiwacze nie jest uwzględniona w ocenie fluktuacji składu mieszanki.

Sposób badania w stanach ustalonych polegał na ustawieniu punktu pracy $n_k^j \times p_k^j$ silnika poprzez odpowiednie otwarcie α przepustnicy powietrza oraz obciążenie go za pomocą hamulca elektrycznego momentem M w celu ustawienia wymaganego ciśnienia p_k^j w kolektorze dolotowym przy stabilnej prędkości n_k^j . Istota badań w wymuszonych stanach nieustalonych polegała na skokowym, pełnym otwarciu przepustnicy α i po zadanym czasie, na tyle krótkim, aby nie zaczął działać system ograniczania prędkości obrotowej w systemie SF, jej skokowym zamknięciu. W badaniach rozbiegu i wybiegu z obciążeniem, silnik obciążony był momentem o stałej wartości M .

We wszystkich badaniach rejestrowano z rozdzielczością 1 μ s sygnały napięciowe następujących wielkości:

- sygnał u_φ kąтового położenia φ wału korbowego z 60-cio zębego nadajnika zainstalowanego na wale silnika,
- sygnał u_p ciśnienia p_k^j w zbiorczej części kolektora dolotowego,
- sygnał u_a masowego wydatku powietrza a napełniającego 4-ty cylinder silnika [7],
- sygnał u_w czasu T otwarcia wtryskiwacza w 4-tym cylindrze.

5. Wskaźniki oceny fluktuacji wysterowanego składu mieszanki

W wyniku przetwarzania zarejestrowanych sygnałów napięciowych obliczono następujące wielkości charakteryzujące stany (S i D) silnika:

- średnią w zbiorze j cykli w k -tym punkcie pracy silnika, cyklową prędkość wirowania n_c ,
- średnie (w warunkach jak dla n_c) ciśnienie cyklowe p_c ,
- średnie w stanie przejściowym przyspieszenie $\frac{dn_c^j}{dt}$,
- średnią w stanie przejściowym szybkość zmian $\frac{dp_c^j}{dt}$ ciśnienia p_c w kolektorze dolotowym,
- współczynnik λ_μ^i nadmiaru powietrza w mieszance wysterowanej w i -tym cyklu w badanym cylindrze wg (5):

$$\lambda_{\mu}^i = \frac{1}{L_o} \cdot \frac{A^i}{F^i} \quad (5)$$

gdzie: A^i – masa powietrza zassanego do cylindra w i -tym cyklu wg zależności (6),

$$A^i = A_m^i + A_p^i \quad (6)$$

F^i – masa paliwa wtrysnięta do kolektora dolotowego sterowanego cylindra w i -tym cyklu wg (7),

$$F^i = \sum_s F_w^1 \quad (7)$$

przy czym:

$$F_w^1 = aT_w - b \quad (8)$$

Wzór (7) ma zastosowanie w przypadku, gdy mieszankę w i -tym cyklu tworzy paliwo F^i będące wynikiem wielokrotnych wtrysków F_w^s w liczbie s , występujących bądź w suwie wydechu EVO cyklu $i-1$ i/lub suwie napełnienia IVO w cyklu i . Masa paliwa F_w^1 wtrysnięta na zawór dolotowy w pojedynczym wtrysku zależy liniowo od czasu T_w jego trwania wg (8). Współczynniki a i b we wzorze (8) charakteryzują konstrukcję zastosowanego systemu wtrysku paliwa.

Skład wysterowany mieszanki o cyklowym współczynniku nadmiaru powietrza λ_{μ}^i wg (5) stanowi podstawę do wyznaczania jego zmienności (fluktuacji) z cyklu na cykl w wybranych stanach statycznych i dynamicznych. Dla oceny tej zmienności zastosowano niżej zdefiniowane wskaźniki, określone w zbiorze j pełnych cykli pracy silnika:

- średni, cyklowy skład mieszanki w cylindrze, którego miarą jest współczynnik nadmiaru powietrza λ_{μ}^i wg (9) wysterowanej mieszanki:

$$\lambda_{\mu}^j = \frac{1}{j} \sum_{i=1}^{i=j} \lambda_{\mu}^i \quad (9)$$

- błąd sterowania składem mieszanki w stanie ustalonym w k -tym punkcie pracy silnika wg (10):

$$\delta\lambda_{\mu}^j = \frac{\lambda_{\mu}^j - \lambda^*}{\lambda^*} \quad (10)$$

- odchylenie średnie $\Delta\lambda_{\mu}^i$ wysterowanego składu cyklowego wg (11) od cyklowego składu średniego wg (9):

$$\Delta\lambda_{\mu}^j = \sqrt{(\Delta\lambda_{\mu}^j)^2} \quad (11)$$

gdzie:

$$(\Delta\lambda_{\mu}^j)^2 = \frac{1}{j} \sum_{i=1}^j (\lambda_{\mu}^i - \lambda_{\mu}^j)^2 \quad (12)$$

jest rozrzutem średnim cyklowego składu

- odchylenie maksymalne $\Delta\lambda_{\mu}^i$ wg (13) wysterowanego cyklowego składu λ_{μ}^i mieszanki od składu średniego wg (9):

$$\Delta\lambda_{\mu}^i = \lambda_{\mu,\max}^i - \lambda_{\mu,\min}^i \quad (13)$$

gdzie:

$$\lambda_{\mu,\max}^i = \max \lambda_{\mu}^i \text{ oraz } \lambda_{\mu,\min}^i = \min \lambda_{\mu}^i \quad (14)$$

dla $i \in j$

Wskaźnik (10) jest syntetycznym wskaźnikiem jakości sterowania cyklowym składem mieszanki. Jego wykorzystanie dla oceny jakości sterowania ma sens w tych przypadkach, w których znany jest skład oczekiwany (referencyjny) λ^* .

Wskaźniki (11÷13) są miarami błędów sterowania, mających swoje źródła w opracowanej metodzie sterowania C/C (błąd metody) i jej egzemplifikacji (błąd egzemplifikacji). Udział obydwóch źródeł w błędzie można ocenić m.in. metodą symulacji dynamicznej, angażującej w procesie oceny opracowany sterownik [7], [8], [9].

Dla opisu fluktuacji cyklowego składu mieszanki (jak również fluktuacji innych wielkości, np. prędkości obrotowej, cyklowego napełnienia, dawki wtrysniętego paliwa itp.), w miejsce wskaźników (9)÷(13) mogą być stosowane wybrane wskaźniki stosowane w analizie statystycznej wyników pomiarów, takie jak wartość przeciętna, wariancja, odchylenie standardowe i inne. Jest to wtedy zasadne, gdy przetworzeniu poddawane są duże zbiory danych a celem analizy jest np. ilościowa ocena wpływu fluktuacji cyklowego składu na toksyczność spalin, zmianę mocy, zużycia paliwa czy fluktuację prędkości obrotowej silnika.

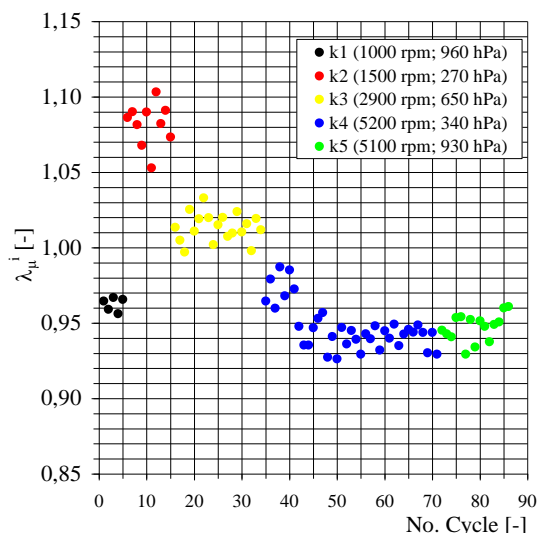
6. Analiza porównawcza systemów sterowania SF i C/C składem mieszanki

W publikacji [10] przedstawiono wyniki badań w zakresie fluktuacji cyklowego składu mieszanki w jednym z czterech cylindrów silnika z wtryskiem pośrednim MPFI, wysterowanym systemem fabrycznym (SF) firmy GM Delco.

Średni cyklowy skład mieszanki λ_{μ}^i , wysterowany systemem C/C w 4-tym cylindrze silnika pracującego w 5-ciu stanach ustalonych k1÷k5 przedstawiono na rys. 4.

Tabela 1. Wskaźniki fluktuacji cyklowego składu mieszanki wysterowanego systemu SF i C/C w stanach ustalonych w silniku

EWP	CCS	n_k^j	p_k^j	λ_{μ}^j	$\Delta\lambda_{\mu}^j$	$\Delta\lambda_{\mu}^i$
		[rpm]	[hPa]	[-]	[-]	[-]
k1	SF	1025	964	0,873	0,008	0,014
	C/C	1023	964	0,962	0,008	0,011
k2	SF	1514	270	0,975	0,051	0,085
	C/C	1561	264	1,082	0,021	0,050
k3	SF	2910	646	1,084	0,011	0,035
	C/C	2900	649	1,014	0,015	0,036
k4	SF	5199	344	0,714	0,061	0,207
	C/C	5216	346	0,947	0,025	0,061
k5	SF	5113	930	0,641	0,015	0,036
	C/C	5180	928	0,947	0,015	0,032



Rys. 4. Wysterowany systemem C/C cyklowy skład mieszanki w 4-tym cylindrze silnika w stanach ustalonych

W tabeli 1 zestawiono dla tych stanów wartości zdefiniowanych wyżej wskaźników fluktuacji składu dla obydwóch systemów sterowania: SF i C/C. Dane zamieszczone w tabelach 1, 2 i 3 dla sterowania SF, pochodzą z publikacji własnej [1].

W analizowanych pięciu stanach ustalonych k1÷k5 silnika sterowanego systemem SF fluktuacja składu zmienia się znacząco: odchylenie średnie $\Delta\lambda_{\mu}^i$ prawie 8-krotnie, (k4/k1) a odchylenie maksymalne $\Delta\lambda_{\mu}^i$ prawie 19-krotnie (k4/k1). Zmiany składu dla systemu C/C wynosiły odpowiednio: 3-krotnie i 5,5-krotnie.

Najmniejsza fluktuacja cyklowego składu występuje dla obydwóch systemów przy najmniejszej prędkości i największym obciążeniu (zbiory k1). Obydwa wskaźniki posiadają wartości najmniejsze wśród 5-ciu stanów, a przy tym są porównywalne względem siebie.

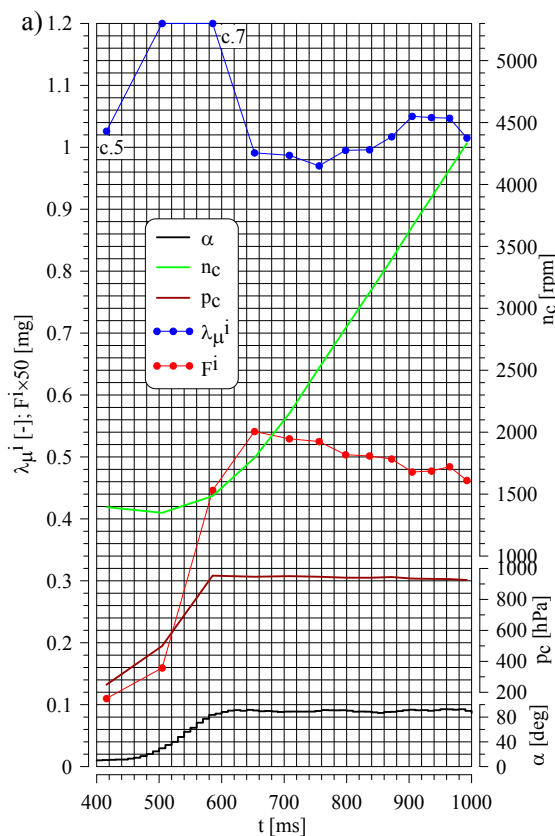
Mieszanka o składzie najbliższym stechiometrycznemu (wskaźnik $\delta\lambda_{\mu}^i = \min$) konstituowana jest w obydwóch systemach w warunkach zbiorów k2 i k3, w których dla systemu SF aktywne jest sterowanie z sondą lambda. Średni dla tych dwóch stanów błąd względny sterowania wg (10) jest porównywalny i wynosi dla obydwóch systemów około 5%. Fluktuacja składu w warunkach jak w stanie k3 jest dla obydwóch systemów prawie identyczna a jej wskaźniki mają wartości zbliżone do wartości średniej wszystkich pięciu stanów. Przewaga sterowania C/C w stanie silnika jak w zbiorze k2, spowodowana jest prawdopodobnie strukturalną wadą systemu SF, tj. korektą *post-factum* składu w układzie regulacji ze sprzężeniem zwrotnym z udziałem sondy lambda. Największa fluktuacja składu mieszanki w obydwóch systemach występuje przy najwyższej prędkości obrotowej i niskim obciążeniu silnika (stan k4), przy czym przy stero-

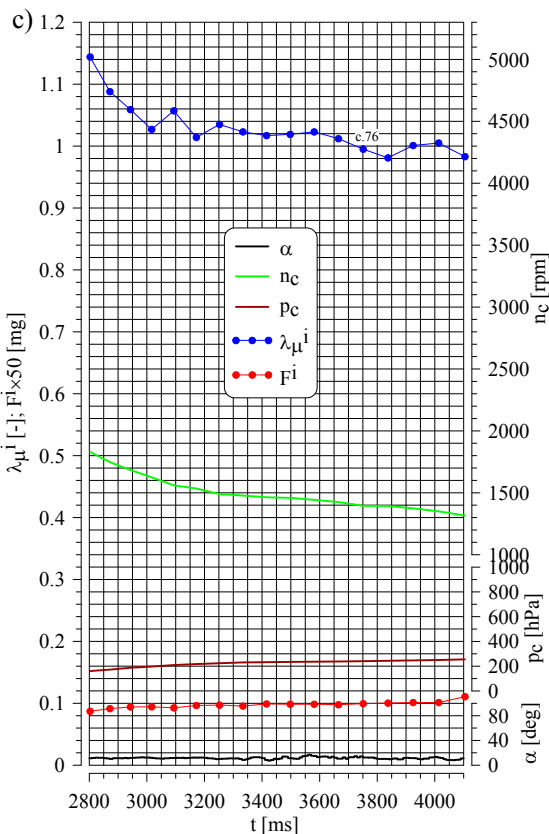
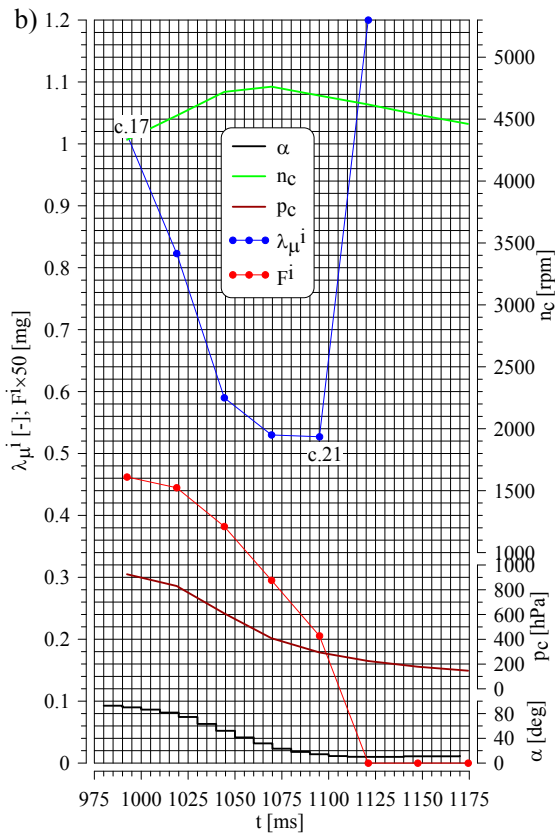
waniu C/C w tych warunkach fluktuacja jest około 3-krotnie mniejsza niż przy sterowaniu SF. Mieszanka wysterowana przez system SF w tych warunkach pracy silnika (k4) jest niezasadnie bogata. Wysoką fluktuację składu, będącą prawdopodobnie skutkiem wypadania zapłonów z powodu zbyt bogatej mieszanki, wywołuje wzrost fluktuacji prędkości obrotowej – a w wyniku tego – wzrost fluktuacji cyklowego napełnienia cylindrów powietrzem. Musi to skutkować – przy niezaawansowanych systemach sterowania – wzrostem fluktuacji wysterowanego składu mieszanki.

W stanach przejściowych wysterowanych systemem C/C (rys. 5 i 6) większą fluktuację składu zidentyfikowano w silniku bez zewnętrznego obciążenia (tabela 2) niż z jego stałym zewnętrznym obciążeniem (tabela 3).

Tabela 2. Wskaźniki fluktuacji składu mieszanki wysterowanego przez systemy SF i C/C w rozbiegu i wybiegu silnika nieobciążonego

Fig	CCS	$\frac{dn_c^j}{dt}$	$\frac{dp_c^j}{dt}$	λ_{μ}^i	$\Delta\lambda_{\mu}^i$	$\delta\lambda_{\mu}^i$
		[c./min/s]	[hPa/s]	[-]	[-]	[-]
5a	SF	2300	749,6	0,774	0,175	0,549
5a	C/C	2483	1242,3	1,012	0,048	0,080
5b	SF	-702	-2420,5	0,597	0,375	0,780
5b	C/C	1738	-6144,1	0,660	0,223	0,302
5c	SF	-192	79,6	0,947	0,123	0,375
5c	C/C	-197	66,1	1,028	0,068	0,163

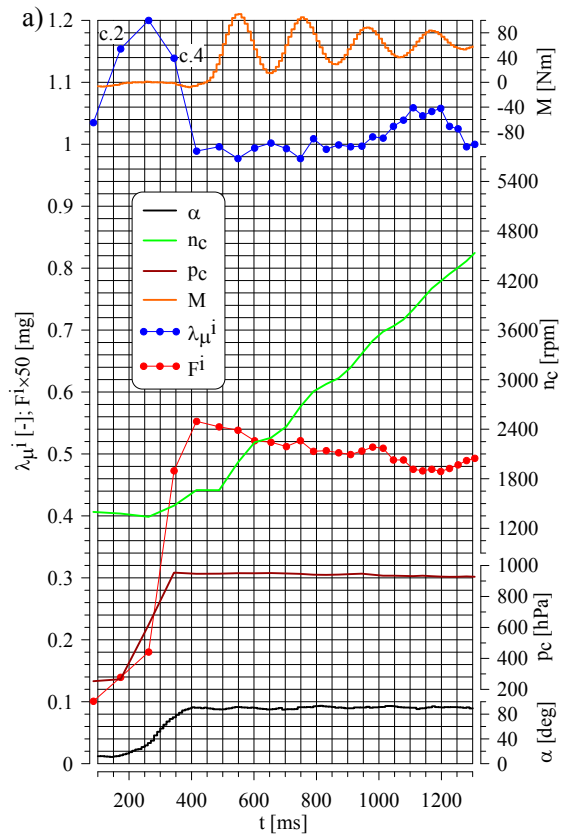




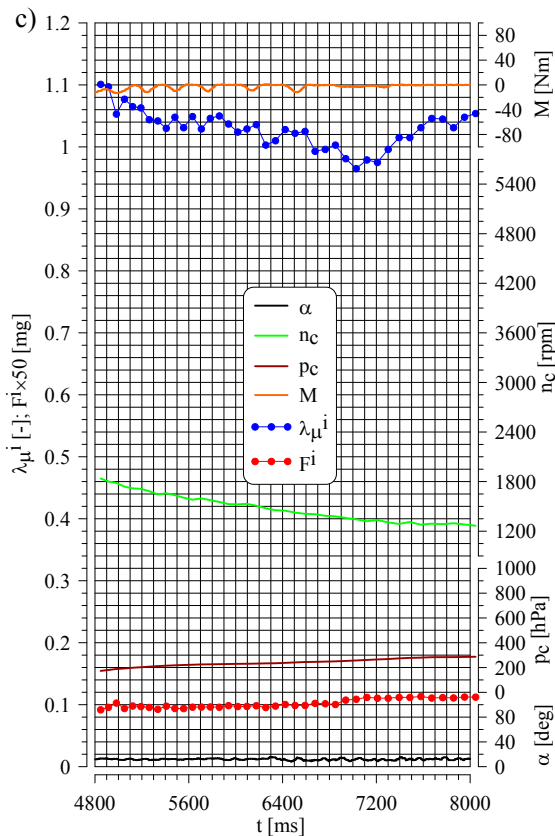
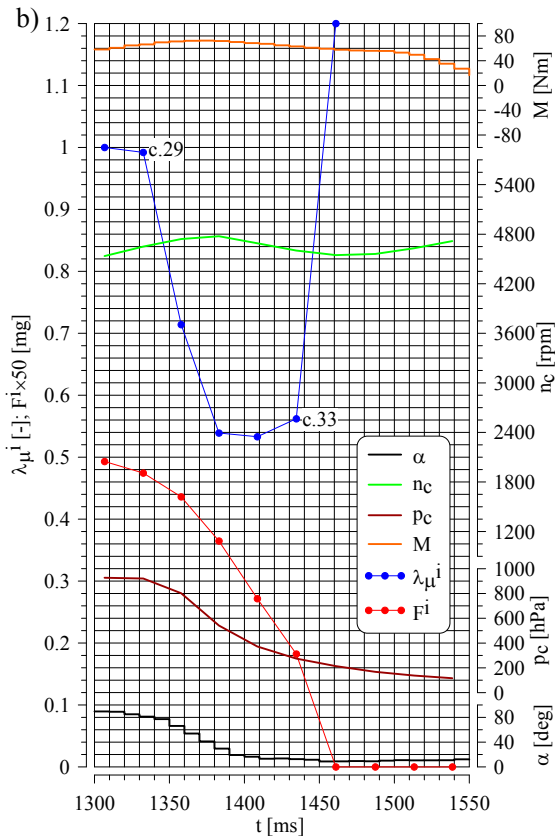
W silniku ze sterowaniem fabrycznym SF [1], fluktuacja składu mieszanki ma charakter zanikających w ciągu około 0,3 sekundy oscylacji i całkowicie wygasających w ciągu następnej 0,5 sekundy. Stabilizacja składu mieszanki występuje przy bardzo bogatej mieszance (dla rozbiegu jałowego $\lambda_j^\mu=0,77$, dla rozbiegu z obciążeniem $\lambda_j^\mu=0,82$). We wszystkich cyklach rozbiegu mieszanka jest palna.

W stanie jałowego rozbiegu silnika wysterowanego systemem C/C (rys. 5a), w pierwszym cyklu stanu wysterowana mieszanka posiada skład niepalny ($\lambda_j^\mu = 1,45$). W cyklu drugim mieszanka jest palna lecz uboga ($\lambda \approx 1,2$). Kolejne cztery cykle to stabilizacja składu. Począwszy od cyklu 6 skład mieszanki stabilizuje się na poziomie bliskim składowi wymaganego.

„Syndrom pierwszego cyklu” sterowania C/C – tak nazwano umownie ten problem w sprawozdaniu [3] – ma również miejsce w fazie rozbiegu silnika obciążonego (cykl 3) (tabela 3, rys. 6a). Jest to skutek niewystarczającej długości przedziału czasowego w fazie $\Delta\phi_p$ na wygenerowanie odpowiedniej długości wtrysku korekcyjnego T_k . Wadę tą można skorygować w wyniku optymalizacji przedziału ΔT_k .



Rys. 5. Fluktuacja składu w stanie rozbiegu i wybiegu silnika nieobciążonego wysterowanego systemem C/C



Rys. 6. Fluktuacja składu w stanie rozbiegu i wybiegu silnika z wstępnym, stałym obciążeniem, wysterowanego systemem C/C

Tabela 3. Zestawienie wskaźników oceny fluktuacji składu mieszanki wysterowanego przez systemy SF [10], C/C w wymuszonych stanach przejściowych w silniku ze stałym, początkowym obciążeniem.

Fig	CCS	$\frac{dn_c^j}{dt}$	$\frac{dp_c^j}{dt}$	λ_μ^i	$\Delta\lambda_\mu^i$	$\Delta\lambda_\mu^i$
		[c./min/s]	[hPa/s]	[-]	[-]	[-]
6a	SF	1161	397,5	0,820	0,164	0,489
6a	C/C	1392	583	1,011	0,044	0,082
6b	SF	-80	-1874	0,854	0,311	0,664
6b	C/C	-235	-6347	0,652	0,215	0,488
6c	SF	-141	65,4	1,00	0,092	0,409
6c	C/C	-87	36	1,03	0,046	0,136

Zubożenie mieszanki w cyklu 3 – rys. 6a jest mniejsze niż w cyklu 6 – rys. 5a lecz to nie ma istotnego znaczenia, ponieważ wciąż jest to mieszanka niepalna. W 4-tym cyklu od wystąpienia wymuszenia, skład mieszanki stabilizuje się na poziomie bliskim składowi żadanemu.

W tych samych warunkach sterowanie SF powoduje fluktuację około 4-krotnie wyższą [10].

W pierwszej części fazy wybiegu (FWA) fluktuacja składu w przypadku wybiegu bez obciążenia średni skład λ_μ^i wysterowany systemem fabrycznym SF wynosi ok. 0,6 a jego odchylenia są bardzo duże ($\lambda_\mu^j = 0,375$, $\lambda_\mu^i = 0,78$). Skład ten w tej fazie (cykle 23÷25) zmienia się oscylacyjnie, a następnie ubożeje przez kolejnych 9 cykli, aż do zaniku palności mieszanki. Ta część fazy wybiegu trwa w systemie SF łącznie przez 13 cykli. W przypadku wybiegu z obciążeniem skład mieszanki do cyklu 30 wzbogaca się a następnie ubożeje do cyklu 38. Zakres zmienności wysterowanego składu w ciągu 8 cykli wynosi $\Delta\lambda_\mu^i = 0,664$, $\Delta\lambda_\mu^j = 0,311$.

W systemie C/C ta część fazy charakteryzuje się (w obydwóch przypadkach) istotnym wzbogaceniem składu w bardzo krótkim czasie. Dla wybiegu bez obciążenia (rys. 5b) trwa to przez 4 cykle (c.18÷c.21) z maksymalnym odchyleniem $\Delta\lambda_\mu^i = 0,302$. Dla wybiegu z obciążeniem (rys. 6b) czas trwania tej fazy wynosi również 4 cykle (c.30 ÷ c. 33) a odchylenie maksymalne wynosi $\Delta\lambda_\mu^i = 0,488$. Fluktuacja w tym stanie pracy, mierzona odchyleniem maksymalnym składu jest ponad 1,5-krotnie większa w systemie SF niż w systemie C/C.

Wpływ obciążenia silnika na fluktuację składu cyklowego jest istotnie większy w systemie fabrycznym SF, niż w systemie C/C.

W fazie trzeciej wybiegu, tj. po ponownym włączeniu wtryskiwaczy, skład mieszanki w pierwszych czterech cyklach w systemie SF (rys. 5c i 6c [10]) jest bardzo bogaty. Średni w zbiorze skład mieszanki jak również jego fluktuacja są większe w stanie wybiegu z obciążeniem niż bez obciążenia. Faza ta w systemie SF przebiega z pojedynczym wtryskiem na cykl, a wtrysk drugi uaktywniany jest

w końcowej części tej fazy, powodując wzrost fluktuacji składu.

Trzecia część fazy wybiegu wysterowana systemem C/C charakteryzuje się istotnie mniejszą niż w systemie SF fluktuacją składu oraz mniejszym odchyleniem składu średniego od składu referencyjnego (rys. 5c i 6c). Podobnie jak w przypadku sterowania systemem SF, przy sterowaniu systemem C/C wzrost obciążenia powoduje wzrost fluktuacji składu. Wzrost tej fluktuacji w tej części wybiegu w wyniku zastosowania sterowania C/C jest średnio 2-krotnie mniejszy niż przy sterowaniu fabrycznym SF.

7. Wnioski

1. Przyjęte w analizie wyniki miary fluktuacji składu z cyklu na cykl mieszanki wysterowanej w tym samym cylindrze (odchylenie średnie, odchylenie maksymalne, rozrzut średni) dobrze charakteryzują proces niepoważności tego składu.
2. Uśredniona w stanach ustalonych fluktuacja cyklowego składu mieszanki w cylindrze wysterowanego systemem C/C jest 3-krotnie mniejsza niż wysterowana systemem SF; jej obniżenie

jest tym większe im większe jest obciążenie silnika i im mniejsza jest jego prędkość obrotowa.

3. Poziom obniżenia fluktuacji wysterowanego systemem C/C względem fluktuacji w systemie SF, cyklowego składu mieszanki w cylindrze jest szczególnie wysoki (ok. 4-krotny) w stanie rozbiegu silnika. Na wartość wskaźników tej fluktuacji ma w tej fazie negatywny wpływ składu mieszanki w pierwszym cyklu po zaistnieniu wymuszenia.
4. W aktywnej części fazy wybiegu (faza zaniku wtrysków), fluktuacja składu cyklowego wysterowanego jest największa ze wszystkich stanów silnika, wysterowanych obydwo systemami sterowania. Czas zanikania wtrysków w fazie wybiegu jest istotnie krótszy w przypadku sterowania C/C.
5. Niezasadne jest (ze względów ekologicznych) w silniku z wtryskiem pośrednim paliwa, wyłączanie wtrysku w stanach wybiegu (hamowanie silnikiem). Występujący film paliwowy w kolektorze dolotowym skutecznie „przeszkadza” w optymalizacji długości wtrysku w tej fazie.

Bibliography/Literatura

- [1] Nita J., Wołczyński Zb.: Estimation of unrepeatability of cycle mixture composition in an indirect gasoline injection engine, *Combustion Engine/Silniki Spalinowe* 4/2009.
- [2] Nita J.: Trędy rozwojowe systemów sterowania wtryskiem benzyny, Referat wygłoszony na XVI Ogólnopolskim Sympozjum Naukowym: Motoryzacyjne Problemy Ochrony Środowiska, Politechnika Warszawska, Warszawa, 2008.
- [3] Wolański P. i inni: Problemy spalania w silnikach spalinowych. Ekspertyza, Polska Akademia Nauk, str. 154, 157, Warszawa, 2000.
- [4] Rozwój sposobu sterowania składem mieszanki z cyklu na cykl na przykładzie silnika benzynowego, Sprawozdanie z pracy zleconej przez Komitet Badań Naukowych, Nr umowy 4 T12D 009 27, Radom, 2007.
- [5] Wołczyński Zb.: Metoda sterowania składem mieszanki paliwowo-powietrznej w silniku benzynowym, Rozprawa doktorska, Politechnika Radomska, Radom, 2005.
- [6] Nowy sposób sterowania składem mieszanki paliwowo-powietrznej w silniku benzynowym w stanach przejściowych, Sprawozdanie z pracy zleconej przez Komitet Badań Naukowych, Nr umowy 8 T12D 041 20, Radom, 2004.
- [7] Nita J.: Determination of cylinder filling to control fuel injection, '11-th EAEC CONGRESS, Budapeszt, 2007.
- [8] Nita J., Komorska I.: A simulation based verification of the cycle by cycle fuel injection control, Asia Pacific Automotive Conference, Hanoi, 2009.
- [9] Nita J.: Evaluation of quality of the system for control of mixture composition in SI engine by the method of dynamic simulation: F2010-C-89, FISITA CONGRESS, Budapest, 2010.
- [10] Nita J., Wołczyński Zb.: The evaluation of cycle by cycle mixture composition in an indirect injection engine, *Combustion Engine/Silniki Spalinowe* 4/2009(139).

Mr Józef Nita, DSc., DEng. – Professor in the Faculty of Mechanical Engineering at Kazimierz Pulaski University of Technology and Humanities in Radom.

Dr hab. inż. Józef Nita – profesor na Wydziale Mechanicznym Uniwersytetu Technologiczno-Humanistycznego w Radomiu.



Mr Zbigniew Wołczyński, DEng. – Doctor in the Faculty of Mechanical Engineering at Kazimierz Pulaski University of Technology and Humanities in Radom.

Dr inż. Zbigniew Wołczyński – adiunkt na Wydziale Mechanicznym Uniwersytetu Technologiczno-Humanistycznego w Radomiu.

