Article citation info:
NITA, J. Unrepeatability from cycle to cycle of the mixture composition burned in the GDI engine. *Combustion Engines*. 2013, **154**(3), 995-1001. ISSN 0138-0346.

Józef NITA **PTNSS–2013–SC–185**

Unrepeatability from cycle to cycle of the mixture composition burned in the GDI engine

Abstract: The paper presents some results of the analysis of variation from cycle to cycle the mixture composition burned in one of the GDI engine cylinders. The control algorithm in the selected states of the engine have been identified. High stability of the average composition in the engine states governed by the system with two-state oxygen sensor were found. Cyclic composition fluctuates around a stable average value over a wide range. These oscillations are significantly lower in states without the engine control. In the highly dynamic transients autonomous throttle control system is being running, that corrects regardless of the external control of the air filling the cylinders. This is a characteristic of the control system.

Keywords: *DGI engine, cyclic mixture composition, unrepeatability of the mixture composition, controlling the mixture composition*

Niepowtarzalność z cyklu na cykl składu mieszanki spalanej w silniku GDI

Streszczenie: W pracy przedstawiono wybrane wyniki analizy zmienności z cyklu na cykl składu mieszanki spalanej w jednym z cylindrów silnika GDI. Dokonano identyfikacji algorytmu sterowania w wybranych stanach pracy silnika. Stwierdzono wysoką stabilność składu średniego w stanach silnika regulowanych systemem z dwustanową sondą lambda. Skład cyklowy oscyluje wokół stabilnej wartości średniej w szerokim zakresie. Oscylacje te są istotnie mniejsze w stanach pracy silnika bez tej regulacji. W stanach przejściowych o dużej dynamice uruchamiany jest system autonomicznego sterowania przepustnicą, korygujący niezależnie od jej zewnętrznego sterowania, napełniania cylindrów powietrzem. Jest to cecha znamienna tego systemu sterowania.

Słowa kluczowe: *silnik GDI, skład cyklowy mieszanki, niepowtarzalność składu mieszanki, sterowanie składem mieszanki*

1. Wstęp

Jednym z powodów opracowania silników iskrowych z bezpośrednim wtryskiem benzyny (GDI) była możliwość dokładniejszego konstytuowania składu mieszanki na poziomie pojedynczego cyklu pracy silnika. Możliwość wysterowania fazy wtrysku w szerokim zakresie dała podstawę do tworzenia mieszanki uwarstwionej (globalnie ubogiej), co prowadzi do zmniejszenia zużycia paliwa ale również negatywnie wpływa na katalityczny system oczyszczania spalin. Wymusiło to modyfikację algorytmów sterowania i je skomplikowało. Pozytywem tej modyfikacji było jednak wyeliminowanie wpływu na proces roboczy w silniku tzw. filmu paliwowego w silnikach z wtryskiem pośrednim, zwiększającego toksyczność spalin zwłaszcza w stanach przejściowych. Należy się spodziewać w silniku GDI istotnej poprawy w tych stanach stabilności składu mieszanki, tj. mniejszej jego zmienności w relacji z cyklu na cykl i z cylindra na cylinder. Ze względów ekologicznych, oczekiwana w silnikach z 3-funkcyjnym katalizatorem fluktuacja cyklowego składu wokół składu stechiometrycznego nie powinna przekroczyć wartości ±0,003. W silnikach z wtryskiem pośrednim benzyny to oczekiwanie nie jest spełnione. Przedkładana publikacja dotyczy oceny tych możliwości w silniku GDI.

Badania wykonano w ramach projektu badawczego zleconego przez MNiSW [1].

Przedstawiona w publikacji analiza tego zagadnienia jest zawężona do trzech wybranych stanów ustalonych i dwóch stanów dynamicznych. Wybrane stany ustalone są w sensie celu badań reprezentatywne dla pełnego pola pracy silnika w tych stanach. Wysterowane stany przejściowe wymuszają w silniku największą dynamikę zmian jego stanu, co stwarza dla systemu sterowania najtrudniejsze warunki pracy.

2. Parametry niepowtarzalności cyklowego składu mieszanki

Skład cyklowy λ^i w i-tym cyklu roboczym danego cylindra jest składem średnim określonym w spalinach wypływających bezpośrednio z tego cylindra w czasie trwania w nim jednego cyklu.

Podstawowym parametrem do oceny niepowtarzalności składu cyklowego mieszanki jest jego odchylenie bezwzględne z cyklu na cykl wg zależności (1):

$$\Delta\lambda = \lambda^{i+1} - \lambda^i \tag{1}$$

lub odchylenie względne z cyklu na cykl wg zależności (2):

$$\Delta\lambda = \frac{\lambda^{i+1} - \lambda^{i}}{\lambda^{i}} \qquad (2)$$

Odchylenia wg zależności (1) i (2) uśrednione w zakresie ***j*** cykli mogą – w przypadku nawet bardzo dużych ich wartości lecz przeciwnych znaków – być równe zero, co istotnie fałszuje ocenę jakości sterowania. W tym przypadku dla obliczenia wartości średniej odchylenia wskazane jest stosowanie modułu ze wskaźników (1) i (2).

Z wykorzystaniem wskaźników (1) i (2) można stosować inne wskaźniki, które pogłębią analizę niepowtarzalności. Ich postacie są znane z analizy statystycznej parametrów populacji takich jak:

$\bar{\lambda}_k$ – wartość przeciętna (oczekiwana),

σ_k^2 – wariancja,

σ_k – odchylenie standardowe.

Parametry te zastosowano w pracy [2] w analizie odchylenia bezwzględnego wg (1) składu mieszanki. W przedkładanej publikacji w analizie fluktuacji składu cyklowego mieszanki spalanej w wybranym cylindrze silnika GDI zastosowano następujące parametry:

λ_k – wartość średnią cyklowego składu mieszanki, określoną na zbiorze ***j*** cykli w ***k***-tym punkcie pracy silnika wg (3):

$$\lambda_k = \frac{1}{j}\sum_{i=1}^{j} \lambda^{i} \qquad (3)$$

Δ_k^2 – rozrzut rozkładu cyklowego składu mieszanki, określony jak w warunkach (3) wg zależności (4):

$$\Delta_k^2 = \frac{1}{j}\sum_{i=1}^{i=j} \left(\lambda^{i} - \lambda_k\right)^2 \qquad (4)$$

Δ_k – odchylenie średnie wg zależności (5):

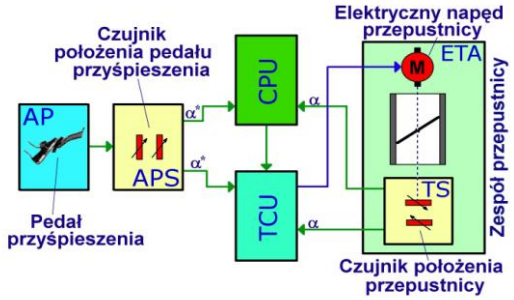
$$\Delta_k = \sqrt{\Delta_k^2} \qquad (5)$$

Jak wynika z postaci (3) ÷ (5) tych parametrów, wartość średnią cyklowego składu mieszanki w danym zbiorze zastąpiono wartością przeciętną składu cyklowego w tym zbiorze. Postać parametru (4) charakteryzuje dokładniej rozrzut populacji niż wariancja obliczona w sposób konwencjonalny.

Zdefiniowane wyżej parametry (1) ÷ (5) charakteryzują niepowtarzalność z cyklu na cykl składu mieszanki spalonej w wybranym cylindrze, co oznacza, że w tych zależnościach ***i*** jest numerem kolejnych cykli pracy w tym cylindrze. Parametry te są przyporządkowane wybranym parametrom silnika w ***k***-tym punkcie jego pracy. W stanach ustalonych najczęściej są to prędkość obrotowa i obciążenie a w stanach dynamicznych średnia szybkość $\frac{d(\ )}{dt}$ ich zmiany w stanie przejściowym. Takie podejście umożliwia graficzne przedstawienie zmienności parametrów (1) ÷ (5) w pełnym polu pracy ustalonej silnika [1], bądź w zbiorze jego stanów dynamicznych. Można również obliczać wartości średnie wskaźników niepowtarzalności cyklowego składu dla całego zbioru warunków pracy silnika.

3. Osobliwości systemu sterowania badanego silnika GDI

Charakterystykę użytego w badaniach silnika GDI (typ 4G93 MITSUBISHI) i systemu jego sterowania przedstawiono w pracach [3]÷[8]. Cechą wyróżniającą jego sterowanie jest niezależne (od kierowcy) działanie przepustnicy powietrza. O stopniu α jej otwarcia decyduje sterownik wtrysku, który analizuje intencje kierowcy wyrażone w sposobie jego oddziaływania α^* na pedał zmiany prędkości obrotowej silnika (rys. 1).



Rys. 1. Istota systemu sterowania przepustnicą w silniku 4G93 (*CPU – sterownik centralny, TCU – sterownik przepustnicy*)

Sterownik przepustnicy otrzymuje informacje o intencji kierowcy czyli o położeniu α^* pedału przyśpieszenia. W oparciu o ten sygnał oraz o informację z centralnego sterownika CPU silnika, otwiera przepustnicę α. Informacja zwrotna z czujnika położenia przepustnicy trafia do obydwóch sterowników.

4. Sposób wykonania badań

Badany silnik typ 4G93 sterowany był oryginalnym sterownikiem w oparciu o sygnały z oryginalnych czujników. W regulacji wtrysku w układzie ze sprzężeniem zwrotnym stosowana była sonda lambda typ Denso 09B11. Prezentowane wyniki badań dotyczą 2-go cylindra tego silnika. W 2-giej gałęzi kolektora wydechowego zainstalowano dwa czujniki:

- sondę szerokopasmową przyrządu MEXA 700λ firmy HORIBA,
- jednoprzewodową, dwustanową sondę lambda AC DELCO typ 25164596.

W pomiarach wykorzystano zbudowany we własnym zakresie interfejs, umożliwiający m.in. rejestrację następujących sygnałów:

- sygnału ***CS*** kątowego położenia wałka rozrządu, wykorzystywany do identyfikacji faz kątowych przebiegów (ϕ_w – fazy wtrysku),

– sygnału ***CAS*** kątowego położenia wału korbowego, wykorzystywany jak CS i do wyznaczania prędkości obrotowej silnika,
– sygnału u_H z przyrządu MEXA 700λ jako miary wartości chwilowej λ,
– sygnału u_λ z dwustanowej sondy lambda typ AC-DELCO 25164596 do obserwacji cyklowego składu mieszanki (bogata-uboga),
– sygnału u_{α^*} położenia α^* pedału sterowania prędkością obrotową silnika,
– sygnału u_α stopnia otwarcia α przepustnicy
– sygnału u_a wydatku a powietrza napełniającego wszystkie cylindry (czujnik typ. MEC. 481E5T08271 umieszczony w części zbiorczej kolektora dolotowego, przed przepustnicą),
– sygnału u_w, tj. napięcia sterującego otwarciem wtryskiwacza w drugim cylindrze.

Wymienione sygnały rejestrowano systemem wyposażonym w 14-bitową kartę OCTOPUS CS8380 firmy GAGE z częstotliwością próbkowania 1 MHz. Długość odcinków rejestracji wynosiła 16 sekund, co pozwalało na rejestrację wymaganej statystycznie ilości cykli pracy cylindra. Stosując opracowane we własnym zakresie oprogramowanie w języku Pascal wygenerowano zbiór wartości lambdy cyklowej, określonej na bazie sygnału u_H. Na jego podstawie obliczono zestawione w tabeli parametry oceny niepowtarzalności z cyklu na cykl składu mieszanki w wybranym cylindrze silnika.

5. Analiza wyników

Należy zauważyć, że prezentowane wyniki w zakresie niepowtarzalności pochodzą z rejestracji wielkości w drugim cylindrze silnika, który był sterowany centralnie, tj. w oparciu o sygnały dotyczące całego silnika (np.: sygnału przepływomierza powietrza zainstalowanego w części zbiorczej układu dolotowego, sygnału sondy lambda wykorzystywanej do stabilizacji składu mieszanki, umieszczonej w części zbiorczej kolektora wylotowego, itp.). To oznacza m.in., że szacowana dla tego cylindra niepowtarzalność cyklowego składu z cylindra na cylinder może się różnić od składu sumarycznego (dla całego silnika).

Wybrane wyniki badań przedstawiono w postaci graficznej na rys. 2÷7 a obliczone wskaźniki dla tych przypadków zestawiono w tabeli 1.

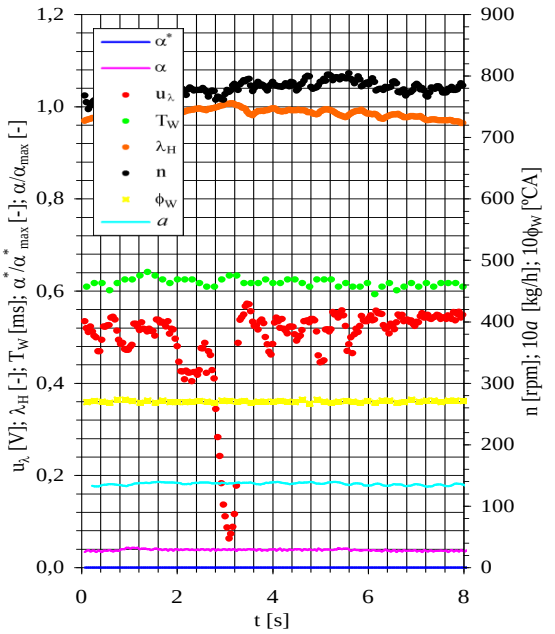
Dla dwóch zbiorów (e0 i e3) reprezentujących dwa punkty pracy ustalonej silnika obliczono błąd $\delta\lambda_k$ sterowania cyklowego składu wg (6):

$$\delta\lambda_k = \frac{\lambda_k - \lambda^*}{\lambda^*} \qquad (6)$$

Są to dwa badane przypadki, w których znana jest lambda referencyjna λ^*=1,0, co pozwoliło na obliczenie tego błędu.

Tabela 1. Zestawienie wskaźników oceny niepowtarzalności z cyklu na cykl składu mieszanki w drugim cylindrze silnika 4G93.

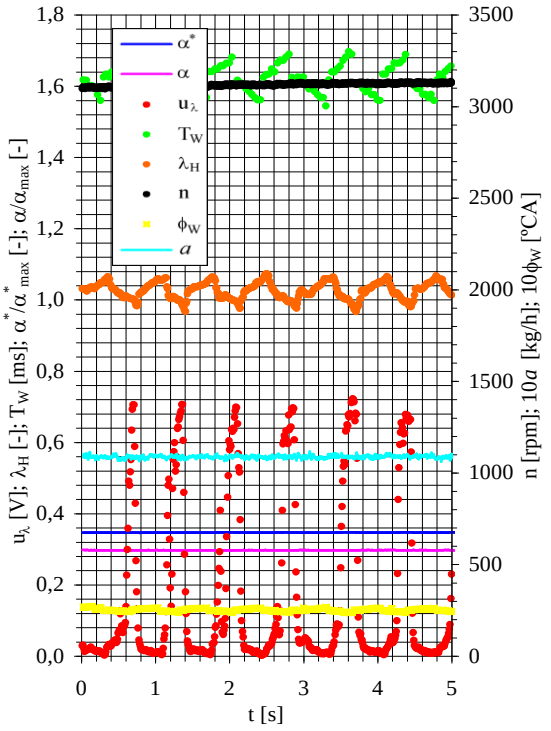
Fig		λ_k	Δ_k^2	Δ_k
2	e0	0,9811711491	$71{,}2\times10^{-6}$	$8{,}4\times10^{-3}$
3	e3	1,0254907463	$628{,}4\times10^{-6}$	$25{,}1\times10^{-3}$
4	e7/1	1,8935	$74{,}1\times10^{-6}$	$8{,}6\times10^{-3}$
	e7/2	1,5985625	$138280{,}6\times10^{-6}$	$371{,}9\times10^{-3}$
	e7/3	0,9287058824	$679{,}9\times10^{-6}$	$26{,}1\times10^{-3}$
	e7/4	0,8795514019	$5552{,}0\times10^{-6}$	$74{,}5\times10^{-3}$
5	e6/1	1,6245357143	$420{,}3\times10^{-6}$	$20{,}5\times10^{-3}$
	e6/2	1,2777090909	$45469{,}4\times10^{-6}$	$213{,}2\times10^{-3}$
	e6/3	1,0224658455	$671{,}8\times10^{-6}$	$25{,}9\times10^{-3}$
	e6/4	0,9171715629	$3148{,}1\times10^{-6}$	$56{,}1\times10^{-3}$
6	e7/2	∞	-	-
	e7/3	1,6893977273	$6618{,}1\times10^{-6}$	$81{,}4\times10^{-3}$
7	e7/1	0,94732	$44728{,}6\times10^{-6}$	$211{,}5\times10^{-3}$



Rys. 2. Przebiegi wybranych wielkości cyklowych dla biegu jałowego

Na rys. 2 przedstawiono wybrane przebiegi dla biegu jałowego silnika. Silnik pracuje ze sterowaniem otwartym (nieaktywna pętla regulacji λ=1,0), ze stałym napełnieniem oraz stabilizacją prędkości obrotowej za pomocą wtrysku paliwa, i prawdopodobnie) kąta wyprzedzenia zapłonu, co nie było jednak przedmiotem badań.

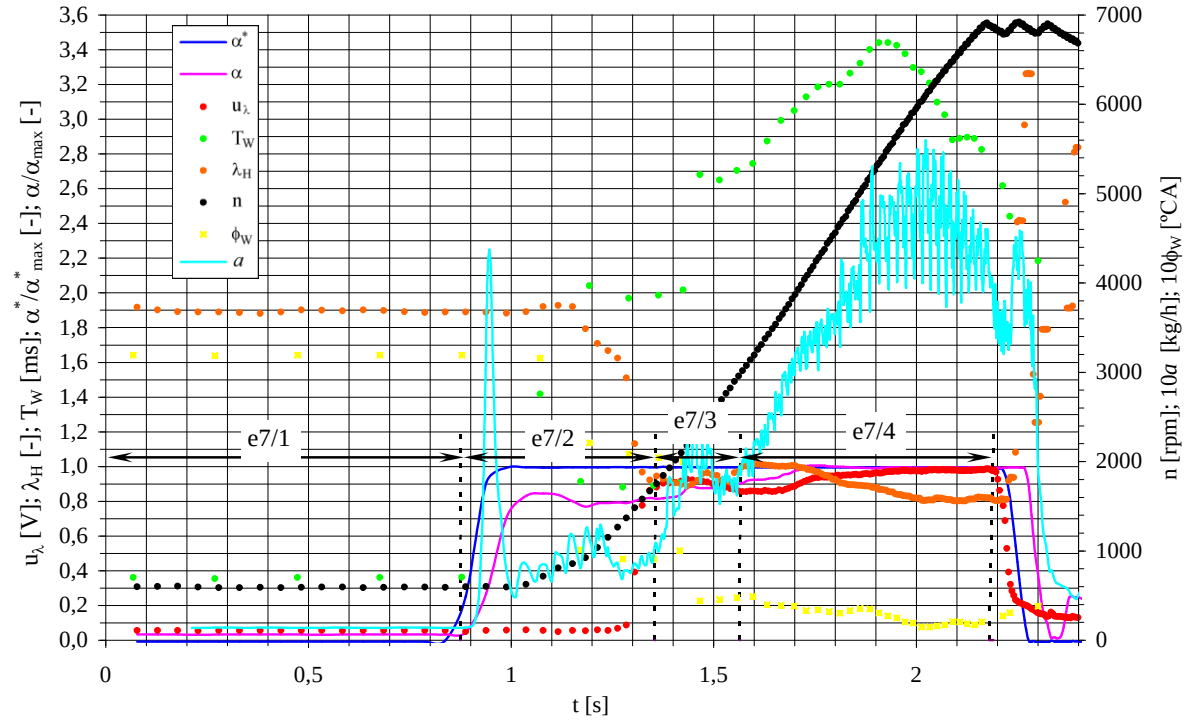
Zwracają uwagę m.in.:
– niska prędkość biegu jałowego (ok. 750 obr/min), co przekłada się na obniżenie zużycia paliwa i wyemitowanej masy spalin,
– wzbogacenie mieszanki (mieszanka bogatsza niż stechiometryczna),
– najmniejsze ze wszystkich badanych stanów silnika odchylenie średnie Δ_k, potwierdzone w podobnym stanie silnika w zbiorze e7/1 (rys. 4).



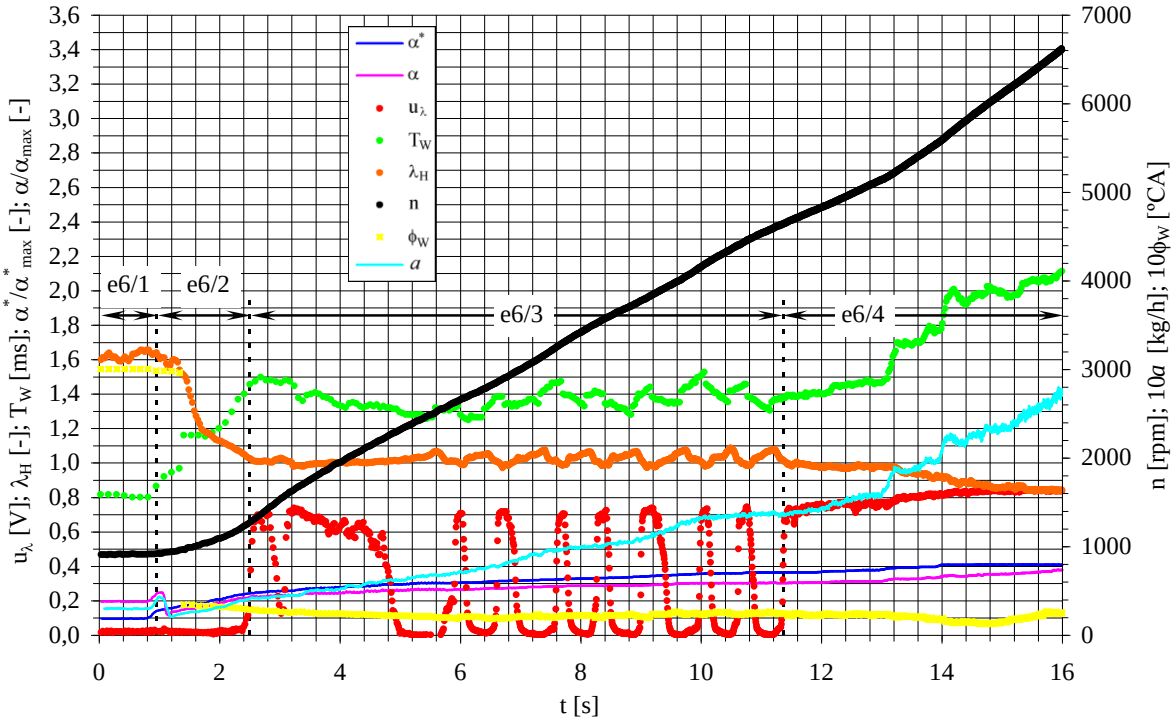
Rys. 3. Przebiegi wielkości cyklowych dla prędkości obrotowej ok. 3200obr/min i stałego obciążenia zewnętrznego

Na rys. 3 zaprezentowano przebiegi dla stanu ustalonego w silniku obciążonym stałym momentem zewnętrznym. Niska dynamika stanów przejściowych umożliwiła aktywizację systemu regulacji z sondą lambda w sprzężeniu zwrotnym. Zgodnie z zasadą pracy tego układu, cyklowy skład mieszanki oscyluje (w tym przypadku w sposób regularny) wokół wartości średniej (stechiometrycznej). Średnie odchylenie składu Δ_k od wartości średniej jest ok. 3-krotnie wyższe niż w stanie biegu jałowego (bez regulacji). Wartość średnia λ_k cyklowego składu oraz charakter zmian sygnału z sondy dwustanowej dowodzą wysokiej jakości tego systemu regulacji.

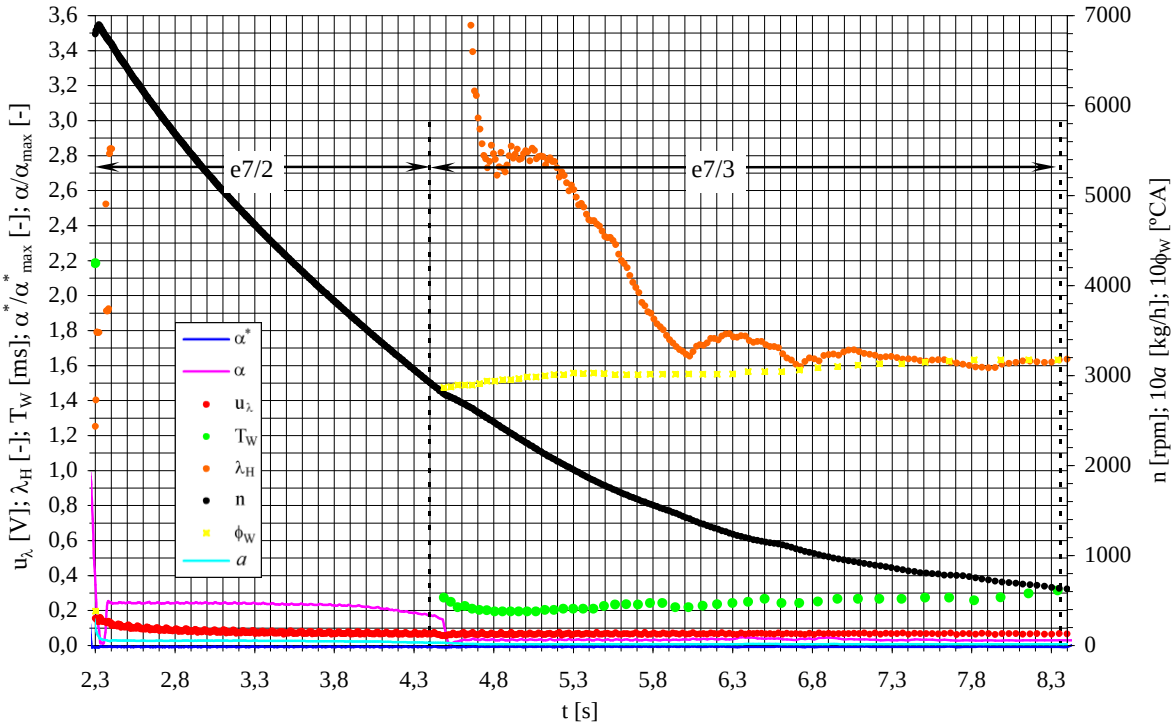
Na rys. 4, przedstawiającym rozbieg silnika nieobciążonego po skokowym wymuszeniu α^*, widoczne jest sterowanie autonomiczne otwarciem α przepustnicy. Jej zadaniem jest takie spowolnienie napełniania powietrzem aby utrzymać na zadanym poziomie skład cyklowy mieszanki, pomimo gwałtownego wzrostu napełnienia kolektora dolotowego (zbiór e7/2). Bardzo duże odchylenie średnie Δ_k składu w tym zbiorze nie świadczy o złej jakości regulacji, lecz o zgodnym ze strategią sterowania, sposobie zmiany (wzbogacenia) składu: z mieszanki uwarstwionej na mieszankę homogeniczną. Pomimo tak gwałtownego doładowania dolotu system sterowania nie dopuścił do istotnych zmian cyklowego składu. Po tej zmianie system wysterował (zbiór e7/3) mieszankę dynamiczną o dużej stabilności z cyklu na cykl, a następnie (zbiór e7/4) w sposób prawie liniowy wzbogacał mieszankę w celu osiągnięcia możliwie wysokich przyśpieszeń prędkości obrotowej. W całym stanie przyśpieszania nie widać działania regulacji ze sprzężeniem zwrotnym od sygnału u_λ.



Rys. 4. Przebiegi wielkości cyklowych dla rozbiegu silnika nieobciążonego



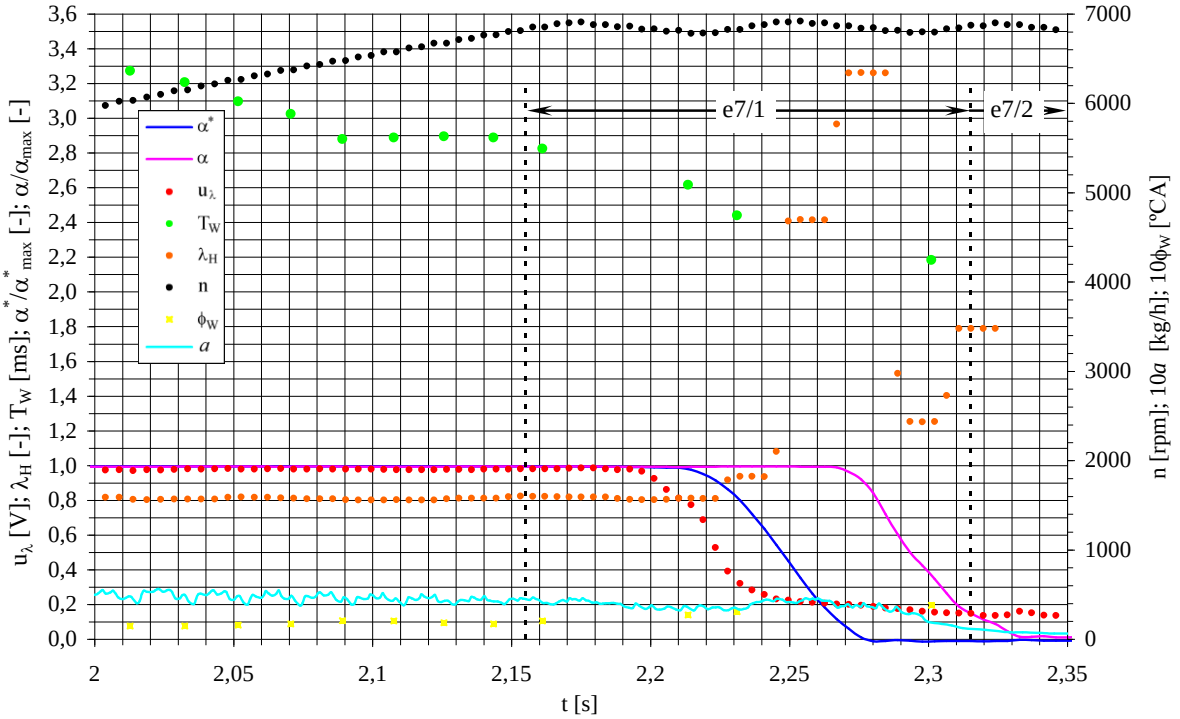
Rys. 5. Przebiegi wielkości cyklowych dla przyśpieszania ze stałym obciążeniem zewnętrznym



Rys. 6. Przebiegi wielkości cyklowych dla fazy pasywnej wybiegu silnika nieobciążonego

Stan przyśpieszania z obciążeniem zewnętrznym (rys. 5), charakteryzujący się łagodnym wymuszeniem α^* i spójnym z nim otwarciem przepustnicy α, znamienny jest w pierwszej fazie (zbiór e6/2) wysterowanym „spokojnym" przechodzeniem z mieszanki uwarstwionej na mieszankę homogeniczną i pracy w pierwszej części zbioru e6/3 w systemie otwartym, z mieszanką o składzie bliskim stechiometrycznemu. Mieszanka stechiometryczna (homogeniczna) jest konstytuowana we wtrysku realizowanym na początku suwu napełniania ($\phi_w \approx 25$°OWK). Zmiana fazy ϕ_w wtrysku widoczna jest w początku zbioru e6/2. W drugiej części stanu (zbiór e6/3) włącza się system regula-

cji składu zapewniający małe odchylenie średnie składu cyklowego. W fazie końcowej tego rozbiegu (zbiór e6/4) sterowanie podporządkowane jest maksymalizacji mocy silnika, czego dowodem jest systematyczne, prawie liniowe wzbogacanie mieszanki homogenicznej. Sposób sterowania w tych stanach potwierdzony jest również przebiegiem sygnału u_λ z dwustanowej sondy lambda.



Rys. 7. Przebiegi wielkości cyklowych dla fazy ograniczania maksymalnej prędkości

W zarejestrowanym wybiegu silnika nieobciążonego (rys. 6 i 7) można wyróżnić dwie wyraźne fazy: faza pasywna (rys. 6 zbiór e7/2), w której system wyłączył wtryskiwacze a cylinder jest przepłukiwany zwiększonym napływem powietrza w wyniku wzrostu otwarcia przepustnicy α. Faza ta trwa około dwóch sekund i obniża zużycie paliwa oraz toksyczność spalin. Wtryskiwacze zostają włączone ponownie gdy prędkość obrotowa obniży się do ok. 3000 obr/min. Zapewnienie w tej fazie bardzo późnego wtrysku (tuż przed wyładowaniem zapłonowym) zapewnia – pomimo bardzo ubogiej globalnie mieszanki – jej prawdopodobny zapłon i spalanie. Brak jednak w tych badaniach dowodów na poprawność tego wniosku. Do końca tej fazy system zapewnia mieszankę uwarstwioną, globalnie ubogą ($\lambda_k \approx 1{,}69$).

W fazie ograniczania maksymalnej prędkości obrotowej silnika (rys. 7 zbiór e7/1) system eliminuje wtryski w niektórych cyklach, co skutkuje brakiem spalania w nich a co za tym idzie brakiem mocy i w konsekwencji obniżeniem prędkości obrotowej silnika.

6. Podsumowanie

Zaprezentowane wyniki badań jak również inne wykonane na silniku 4G93 badania nie prezentowane w tej publikacji dowodzą wysokiej jakości jego systemu sterowania wtryskiem benzyny. We wszystkich badanych stanach pracy silnika, cyklowy skład mieszanki w cylindrze zmienia się w sposób zaplanowany. Nie występują stany przypadkowe, które skutkować mogłyby zwłaszcza zwiększeniem toksyczności spalin.

Badania potwierdziły również – w aspekcie fluktuacji cyklowego składu mieszanki w cylindrze – mniejszą fluktuację składu wysterowanego (w tym przypadku ok. 3-krotnie) niż składu regulowanego w układzie ze sprzężeniem zwrotnym.

Pomimo tej pozytywnej oceny, zaobserwowana fluktuacja składu mieszanki spalonej w cylindrze w obydwóch przypadkach jest wyższa niż oczekiwana ze względu na maksymalizację konwersji katalizatora. Poziom tej konwersji obniżany jest również z powodu dość dużego błędu sterowania składu w stanach ustalonych. Należy jednak podkreślić, że wszystkie sformułowane wnioski odnoszą się do fluktuacji składu w wybranym cylindrze a nie w całym silniku.

Bibliography/*Literatura*

[1] Nowy sposób sterowania składem mieszanki z cyklu na cykl w silniku z bezpośrednim wtryskiem GDI. Sprawozdanie z realizacji projektu badawczego Nr N N 504 340636, zleconego prze MNiSW, Radom 2012.

[2] Nita J.: Niepowtarzalność i niedoskonałość składu mieszanki w silniku GDI, Konferencja KONMOT, Politechnika Krakowska, Kraków 2012.

[3] Wołczyński Zb.: Identification of fuel injection control system in a GDI engine, Journal of KONES Powertrain and Transport, Vol.17.No.4.2010.

[4] Wołczyński Zb.: Identyfikation of properties of the GDI engine and its control system. Silniki Spalinowe 3/2011(146), CD.

[5] Wołczyński Z., Bartczak M., Algorithm and hardware realization of gasoline injection control of the GDI-Mitsubishi engine, Transcomp – XIV International Conference.

[6] Bartczak M., Wołczyński Zb.: The algorithm of determination of injection time in "from cycle to cycle" control GDI engine. Silniki Spalinowe 3/2011(146), CD.

[7] Bartczak M., Wołczyński Zb.: Weryfikacja sprzętowej realizacji algorytmu generowania wtrysku w silniku GDI w sterowaniu z cyklu na cykl. Logistyka 6/2011 Listopad-Grudzień.

[8] Wołczyński Zb., Synteza i symulacja statyczna sterowania z cyklu na cykl wtryskiem paliwa w silniku GDI, Konferencja KONMOT, Czasopismo Techniczne, Kraków 2012.

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