

Identification of properties of the GDI engine and its control system

Abstract: The paper is a continuation of the presentation of research within the research project MNiSW No. N N 504 340636 on GDI engine control system. There are presented operating and regulatory characteristics of the engine (δ_w , δ_z , T_w), that are particularly interesting in the working area of stratified mixture. The paper presents also the way the original injection system controls due to the use of a NO_x absorber and the description of the research stand of the GDI engine that is pre-installed in the Mitsubishi Carisma car.

Key words: gasoline engine, direct ignition, operating and regulatory characteristics, stratified mixture, NO_x absorber

Identyfikacja właściwości silnika GDI i jego systemu sterowania

Streszczenie: Referat jest kontynuacją prezentacji badań własnych w ramach projektu badawczego MNiSW nr N N 504 340636 systemu sterowania silnikiem GDI. Przedstawia charakterystyki robocze i regulacyjne silnika (δ_w , δ_z , T_w), które są szczególnie ciekawe w obszarze pracy silnika na mieszankach uwarstwionych. W referacie przedstawiono także sposób fabrycznego sterowania wtryskiem paliwa ze względu na zastosowanie katalizatora zasobnikowego NO_x i opis stanowiska badawczego silnika GDI zamontowanego fabrycznie w samochodzie Mitsubishi Carisma.

Słowa kluczowe: silnik benzynowy, bezpośredni wtrysk paliwa, charakterystyki robocze i regulacyjne, mieszanka uwarstwiona, katalizator zasobnikowy NO_x

1. Wstęp

Firma Mitsubishi wprowadziła w 1995 roku do produkcji seryjnej silnik benzynowy z bezpośrednim wtryskiem benzyny do komory spalania pod nazwą GDI (Gasoline Direct Injection). Obecnie taki sposób zasilania silnika benzynowego wykorzystują w produkcji seryjnej również inne firmy. Rozwiązanie to pozwala spalać mieszanki uwarstwione tzn. o składzie palnym w okolicach świecy zapłonowej i bardzo ubogie w odleglejszych obszarach komory spalania. Średni skład takiej mieszanki jest bardzo ubogi. Spalanie mieszanek ubogich do pewnych granic pozwala na ograniczenie zużycia paliwa lecz ogranicza też możliwość redukcji tlenków azotu przez typowy katalizator.

W prezentowanym systemie sterowania wykorzystano katalityczny reaktor magazynujący tlenki azotu. Pozwala on na gromadzenie tlenków azotu podczas spalania mieszanek uwarstwionych i ich redukcji w krótkim czasie podczas spalania mieszanki o składzie stechiometrycznym. Silnik GDI firmy Mitsubishi jest obiektem, na którym realizowane są badania w ramach projektu badawczego MNiSW nr N N 504 340636. Wyniki pierwszego etapu tych badań prezentowane są w przedkładanej publikacji. Są to charakterystyki robocze i regulacyjne silnika GDI zamontowanego w samochodzie Mitsubishi Carisma. Referat przedstawia także opis stanowiska badawczego, sposób przeprowadzenia badań i opracowania wyników. Są to badania identyfikacyjne obiektu, który w kolejnym etapie prac będzie zasilany w paliwo wg metody „z cyklu na

cykl” [2][3]. Metoda ta w swych założeniach pozwala zasilać silnik, w każdym jego cyklu pracy, mieszanką o ściśle określonym składzie. Pozwala na to wtrysk benzyny wprost do cylindra, który może być realizowany nawet po zamknięciu zaworu dolotowego. Dokonując pomiaru masy powietrza napływającego do cylindra można dokładnie wyznaczyć dawkę paliwa dla uzyskaniażądanego składu mieszanki i wtrysnąć to paliwo po zamknięciu zaworu dolotowego.

2. Stanowisko badawcze

Obiektem badań był silnik GDI (Gasoline Direct Injection) o pojemności skokowej 1834cm^3 samochodu Mitsubishi Carisma.

Silnik zainstalowany był fabrycznie w samochodzie Mitsubishi Carisma.

Badania prowadzono na hamowni podwoziowej w Zakładzie Mechatroniki Samochodowej Politechniki Radomskiej [1]. Hamownia wyposażona jest w rolki dla kół napędowych samochodu o obwodzie 1m. Rolki sprzęgnięte są z dwiema maszynami prądu stałego o mocy po 50kW każda, sterowane zespołem tyrystorowym. Hamownia umożliwia zarówno napęd jak i hamowanie kół samochodu z dynamicznym przejściem od hamowania do napędu i odwrotnie. Każde koło może być napędzane lub hamowane z różną prędkością i różnym momentem. Do pomiaru momentu wykorzystane są dwa momentomierze niemieckiej firmy Hottinger Baldwin Messtechnik GmbH typu T4A o zakresie

pomiarowym do 500Nm każdy, klasie dokładności 0,1 i przeciążalności do 750Nm. Prędkość rolek mierzona jest za pomocą mikroprocesorowego miernika własnej konstrukcji wykorzystującego czujniki indukcyjne. Za chłodzenie silnika odpo-

wiadał zespół sterowanych wentylatorów zapewniających właściwy nadmuch powietrza na chłodnicę samochodu i układ wydechowy a w szczególności katalizator i dwie sondy lambda.



Rys. 1. Hamownia podwoziowa w Zakładzie Mechatroniki Samochodowej Politechniki Radomskiej a – rolki, b – sterownik napędu elektrycznego rolek, c – zespół wentylatorów, d – sterownik wentylatorów, e – zestaw komputerów pomiarowych i sterowników urządzeń hamowni, f – system analizy spalin

Badania systemu sterowania silnikiem wymagały rejestracji określonych sygnałów. W tym celu zbudowano interfejs pomiarowo-sterujący. Projekt interfejsu oparto o potrzebę dostępu do poszczególnych sygnałów w systemie elektronicznego sterowania silnika i rozpoznanie tego systemu. Rozpoznanie systemu sterowania silnika, projekt i budowę interfejsu zrealizowano w poprzednim etapie prac. Interfejs pomiarowo-sterujący zapewnia dostęp do wszystkich wymaganych sygnałów w systemie sterowania silnika a także umożliwia sterowanie cewkami zapłonowymi i wtryskiwaczami z zewnętrznego sterownika. Druga z wyżej wymienionych możliwości interfejsu będzie wykorzystana w kolejnym etapie projektu badawczego.

W projekcie badawczym, którego wynikiem jest niniejsza publikacja, najważniejszym parametrem pracy silnika jest skład spalanej mieszanki określany współczynnikiem nadmiaru powietrza λ . Pomiar tego parametru realizowano za pomocą miernika

MEXA700 λ firmy Horiba. Miernik ten działa w oparciu o sygnał z szerokopasmowej sondy lambda, którą zainstalowano w gałęzi kolektora wylotowego drugiego cylindra w odległości 10cm od głowicy. Jednym z istotnych parametrów tego miernika jest czas odpowiedzi, który wynosi $T_{63}=80$ ms. Zapewnia on dokładne określenie średniego składu mieszanki w czasie pomiaru (równego 1s).

W badaniach rozwojowych silników jedną z najistotniejszych kwestii jest emisja toksycznych składników spalin. Na stanowisku badawczym do pomiaru toksyczności spalin wykorzystano analizator MEXA 554J firmy Horiba. Umożliwia on m.in. pomiar emisji dwutlenku węgla, tlenu węgla i węglowodorów. Poboru spalin do analizy dokonywano z końca rury wydechowej za pomocą sondy analizatora. Ze względu na długą drogę spalin przed każdym pomiarem wymagana jest stabilizacja punktu pracy silnika przez czas jednej minuty.

Do rejestracji sygnałów zastosowano komputer pomiarowy klasy PC wyposażony w kartę pomiarową firmy GAGE typu CS8380 o czternasto bitowej rozdzielczości. System pomiarowy zapewnia możliwość jednoczesnej rejestracji ośmiu sygnałów napięciowych na zakresach od $\pm 100\text{mV}$ do $\pm 10\text{V}$ z szybkością próbkowania do 10MS/s . Zastosowana pamięć na karcie pomiarowej 256MS w pełni wystarcza do wykonania zaplanowanych badań.

3. Program badań

Zaplanowano badania mające na celu wyznaczenie charakterystyk roboczych i regulacyjnych silnika GDI typ 4G93 o pojemności skokowej 1834cm^3 samochodu Mitsubishi Carisma. Wyznaczone charakterystyki silnika z fabrycznym sterowaniem będą odniesieniem do oceny pracy tego silnika zasilanego w paliwo wg metody „z cyklu na cykl”. W fabrycznym systemie sterowania badany silnik przy małych i średnich obciążeniach zasilany jest mieszanką uwarstwowaną. Spalanie takiej mieszanki powoduje, że reaktor katalityczny nie jest w stanie zredukować tlenków azotu. Są one wtedy gromadzone a następnie zredukowane, gdy silnik zasilany jest mieszanką stechiometryczną.

Zaplanowano wyznaczenie charakterystyk roboczych: zewnętrznej i przedstawiającej czasu wtrysków i kąty ich początków w cyklu gromadzenia i redukcji NO_x -ów w katalizatorze oraz regulacyjne: kąta początku wtrysku θ_w , czasu wtrysku T_w , kąta wyprzedzenia zapłonu δ w funkcji prędkości obrotowej i obciążenia silnika.

Dla wyznaczenia charakterystyki zewnętrznej zaplanowano jednosekundowe rejestracje przy kilkunastu prędkościach obrotowych i pełnym otwarciu przepustnicy następujących sygnałów:

- ✓ czujnika położenia wału korbowego,
- ✓ czujnika położenia wałka rozrządu,
- ✓ sterującego wzmacniaczem mocy wtryskiwacza drugiego cylindra,
- ✓ sterującego cewką zapłonową drugiego cylindra,
- ✓ przepływomierza powietrza z wyjściem częstotliwościowym,
- ✓ analizatora MEXA-700 λ z sondą zainstalowaną w gałęzi kolektora wylotowego drugiego cylindra,
- ✓ momentu na rolce prawego koła,
- ✓ momentu na rolce lewego koła

oraz pomiar emisji dwutlenku węgla, tlenku węgla i węglowodorów za pomocą analizatora MEXA 554J po jednoczesnej stabilizacji punktu pracy silnika.

Rejestrację sygnałów zaplanowano z częstotliwością 1MS/s co umożliwi dokładny pomiar czasów poszczególnych wtrysków paliwa.

Takie same sygnały zaplanowano zarejestrować dla zobrazowania pracy systemu wtrysku paliwa w cyklu gromadzenia i redukcji tlenków azotu w

reaktorze katalitycznym. Czas tego pomiaru to 80s z częstotliwością próbkowania 200kS/s

Dla wyznaczenia charakterystyk regulacyjnych zaplanowano także jednosekundowe rejestracje w/w sygnałów z częstotliwością 1MS/s w kilkuset różnych punktach pracy silnika określonych przez prędkość obrotową i moment na wale silnika, obejmujących cały obszar jego pracy oraz pomiar emisję toksycznych składników spalin po jednoczesnej stabilizacji punktu pracy. W punktach pracy, w których silnik zasilany jest mieszanką uwarstwowaną rejestracje zaplanowano z pominięciem okresów pracy na mieszance stechiometrycznej czyli redukcji tlenków azotu z katalizatora.

4. Opracowanie wyników badań

Z zarejestrowanych w trakcie badań sygnałów wyznaczono dla każdego punktu pracy silnika:

- prędkość obrotową silnika,
- moment obciążenia,
- moc oddawaną z wału silnika,
- jednostkowe zużycie paliwa,
- współczynnik nadmiaru powietrza spalanej mieszanki,
- czasy trwania wszystkich wtrysków w czasie rejestracji oraz średni czas trwania wtrysku w cyklu,
- masę wtrysniętego paliwa na cykl,
- kąt początku wtrysku,
- kąt wyprzedzenia zapłonu w każdym cyklu.

Do wyznaczenia wartości powyższych wielkości w każdym z zarejestrowanych cykli pracy napisano program komputerowy w języku Turbo Pascal. Wykorzystano przy tym wiedzę zdobytą na etapie rozpoznawania systemu sterowania badanego silnika GDI [4].

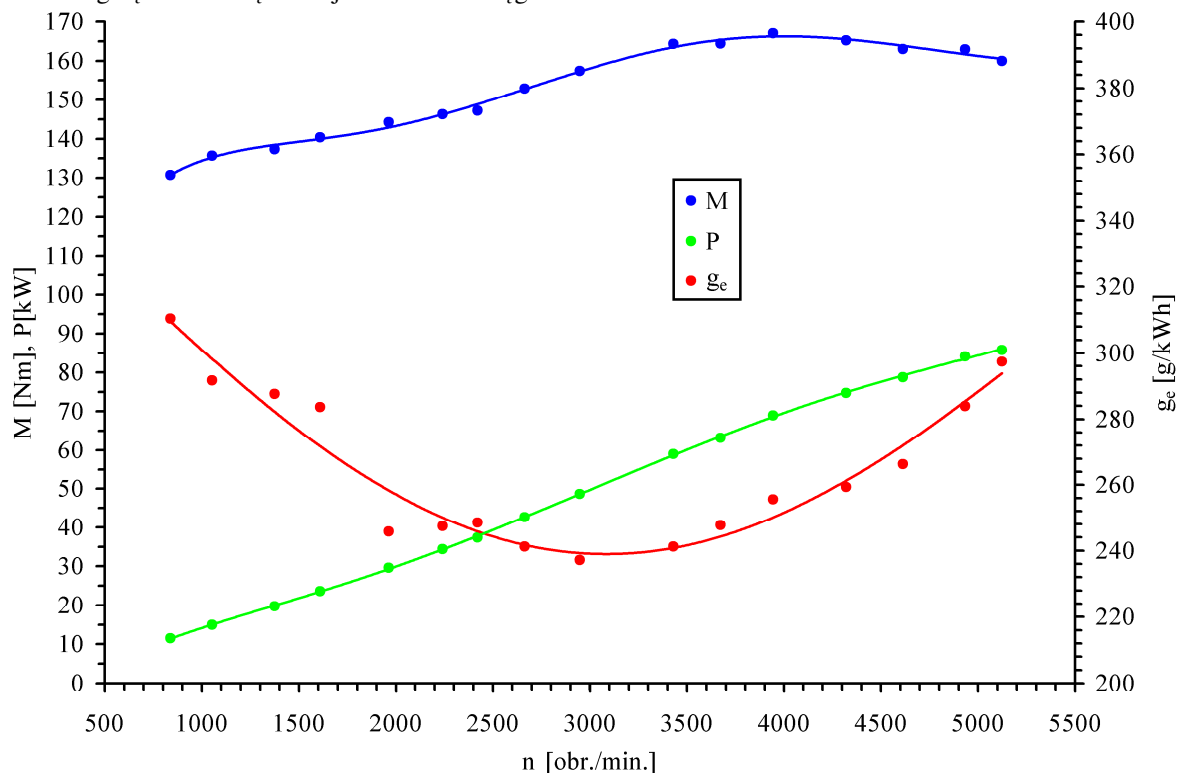
Opracowane wyniki badań zebrano w arkuszu kalkulacyjnym MS Excel oraz wykonano wykresy dwuwymiarowe. Wykresy przestrzenne wykonano w programie Surfer 7.0 firmy Golden Software.

5. Wyniki badań i ich analiza

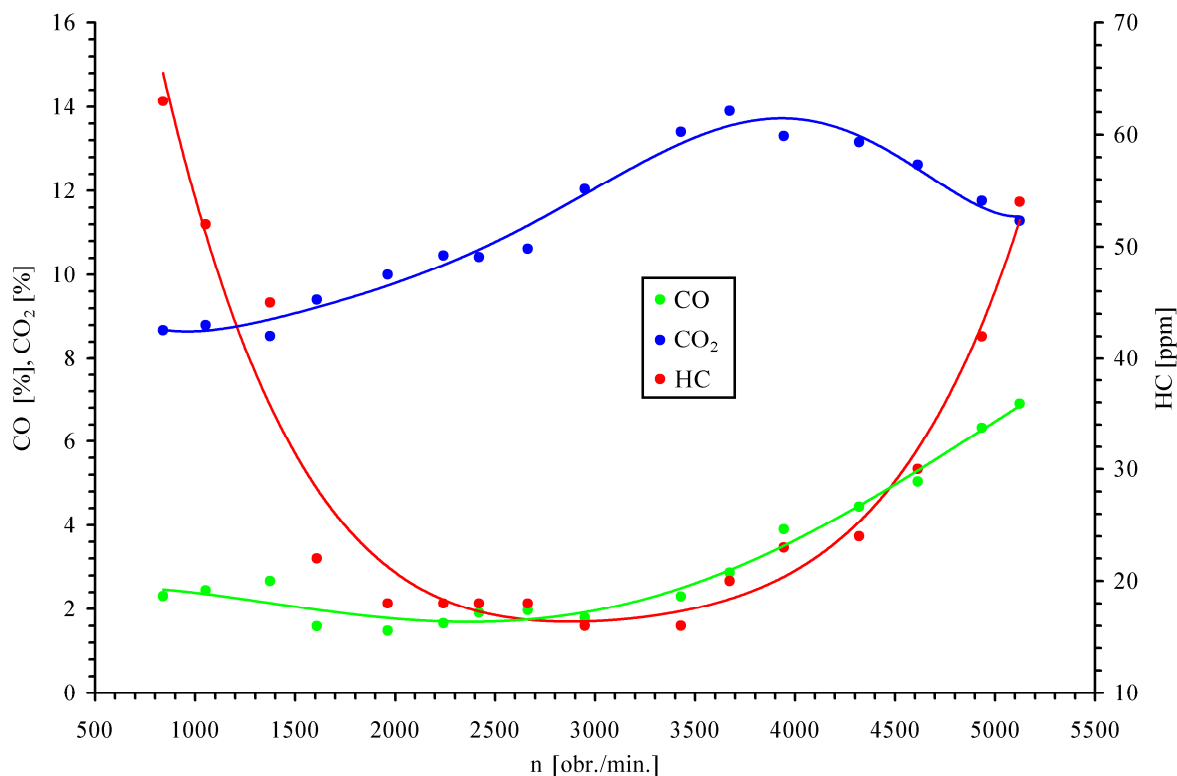
Na rys. 2 przedstawiono charakterystykę zewnętrzną badanego silnika. Wynika z niej, że maksymalny moment obrotowy 167Nm silnik osiągnął dla prędkości obrotowej ok. 3950obr./min. a minimalne jednostkowe zużycie paliwa 240g/kWh przy prędkości ok. 3100obr./min. Na charakterystyce nie widać punktu maksymalnej mocy ponieważ ze względów bezpieczeństwa (prędkość samochodu na rolkach hamowni ok. 180km/h) wykonano ją tylko do prędkości 5100obr./min. a maksymalną moc badany silnik uzyskuje przy wyższej prędkości. Rysunek 3 przedstawia stężenia objętościowe tlenku węgla, węglowodorów i dwutlenku węgla przy pełnym otwarciu przepustnicy. Stężenie tlenku węgla jest najniższe dla średnich prędkości obroto-

wych. Emisja węglowodorów rośnie dla większych prędkości obrotowej co związane jest z zasilaniem silnika bogatą mieszanką. Emisja dwutlenku węgla

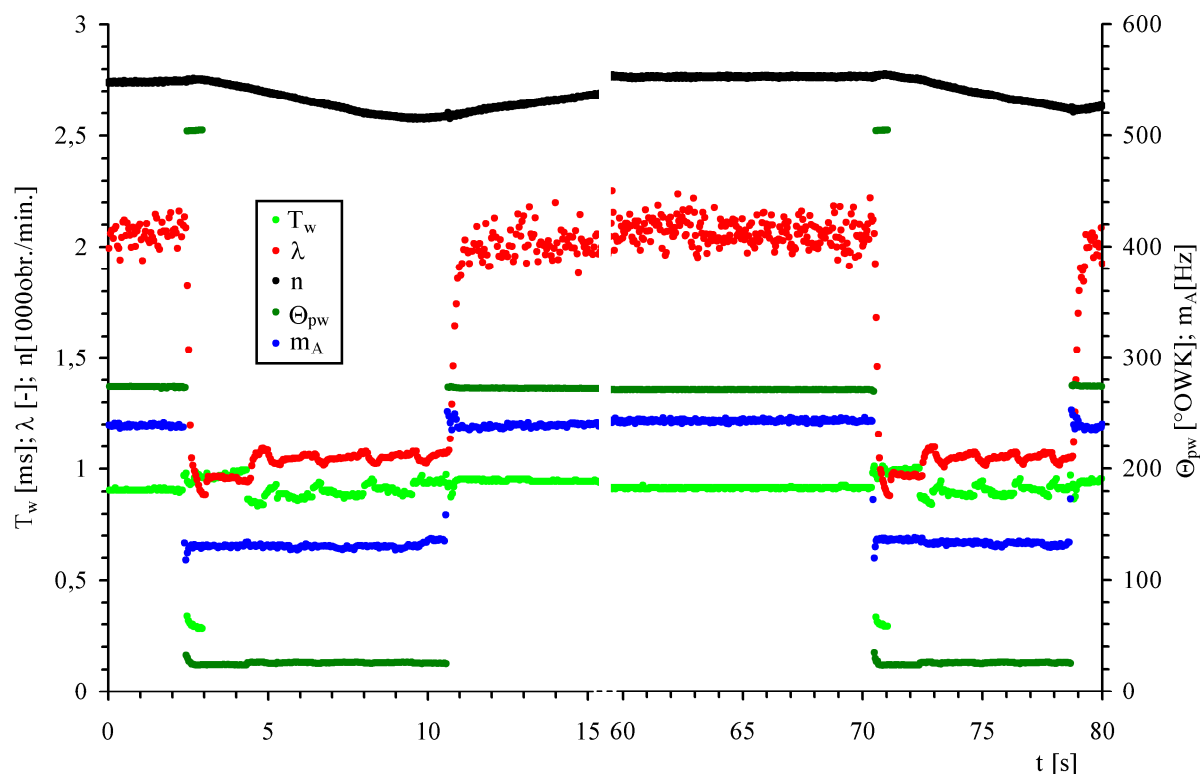
jest najwyższa dla prędkości maksymalnego momentu.



Rys. 2. Charakterystyka zewnętrzna silnika GDI samochodu Mitsubishi Carisma



Rys. 3. Wykres stężenia objętościowego tlenu i dwutlenku węgla oraz węglowodorów przy pełnym otwarciu przepustnicy



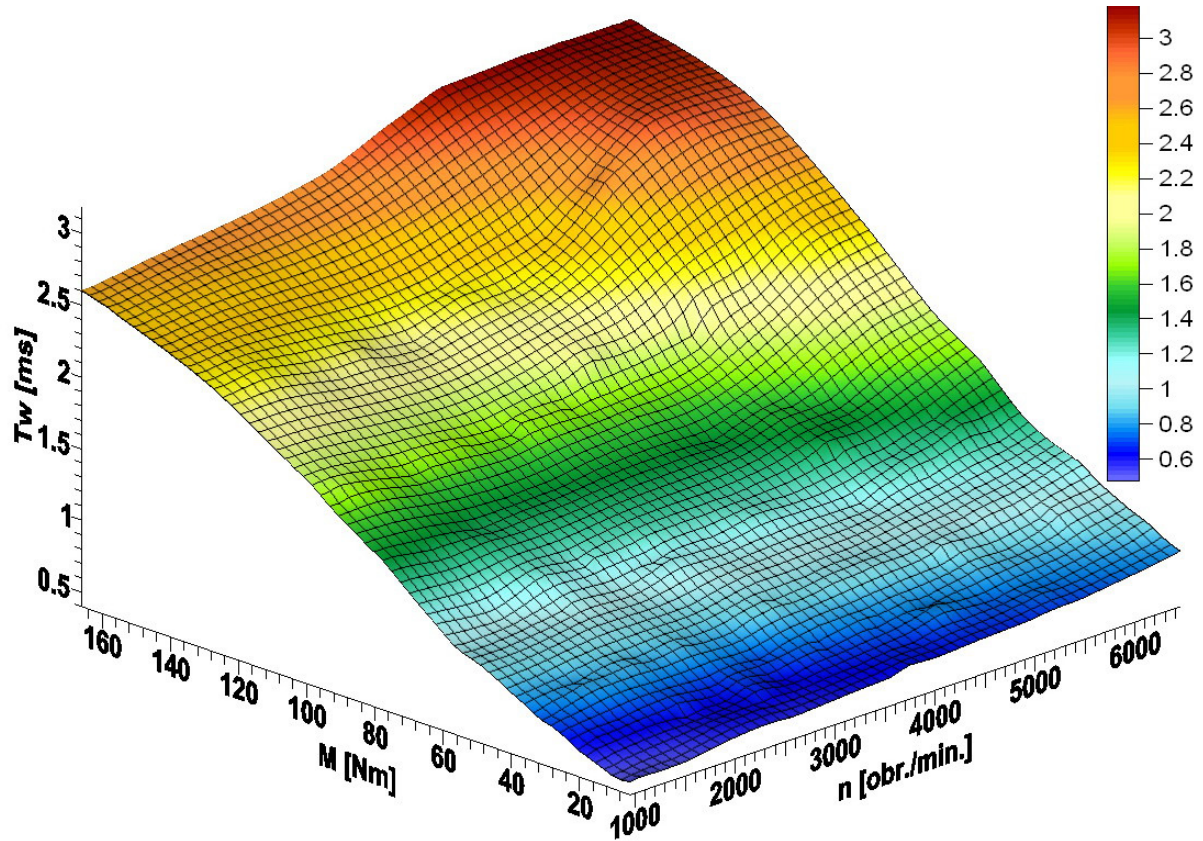
Rys. 4. Sposób sterowania wtryskiem paliwa podczas cyklu zasilania silnika ubogą mieszanką uwarstwowią i stechiometryczną w czasie redukcji NO_x -ów z katalizatora

Na rys. 4 przedstawiono fabryczny sposób sterowania wtryskiem benzyny przy małych obciążeniach i prędkościach obrotowych. Badanie to przeprowadzono przy prędkości obrotowej silnika równej 2750obr./min. i obciążeniu równym 40Nm. Cykl składa się z dwóch okresów zasilania silnika mieszankami: uwarstwowią i stechiometryczną. Zasilanie ubogą mieszanką uwarstwowią trwa 60 sekund. W tym czasie w katalizatorze gromadzą się tlenki azotu. Następnie system sterowania przez 9 sekund zasila silnik mieszanką stechiometryczną. Jest to czas na redukcję zgromadzonych w katalizatorze tlenków azotu. Z wykresu na rys. 4 wynika, że niezależnie od składu tworzonej mieszanki masa wtryskiwanego paliwa na cykl nie ulega zdecydowanej zmianie. Natomiast zmienia się masa zasysanego powietrza. Należy zatem wnioskować, że system sterowania zmienia położenie przepustnicy aby zmieniać napełnienie cylindrów powietrzem, pomimo niezmiennego położenia pedału przyspieszenia. Potwierdza to pomiar masowego wydatku powietrza zasilającego silnik m_A . W czasie badania przedstawionego na rys. 4. nie zmieniano momentu hamującego i położenia pedału przyspieszenia. W skutek zmiany położenia przepustnicy zmienia się napełnienie, które skutkuje zmianą momentu i mocy silnika. Jest to widoczne jako zmiana prędkości obrotowej silnika. Z chwilą przełączenia na zasilanie silnika mieszanką stechiometryczną maleje napełnienie i moment silnika co skutkuje zmniejszeniem się prędkości obrotowej. Po ponownym przełączeniu na zasilanie ubogą mieszanką uwarstwowią zwiększa się napełnienie i moment obro-

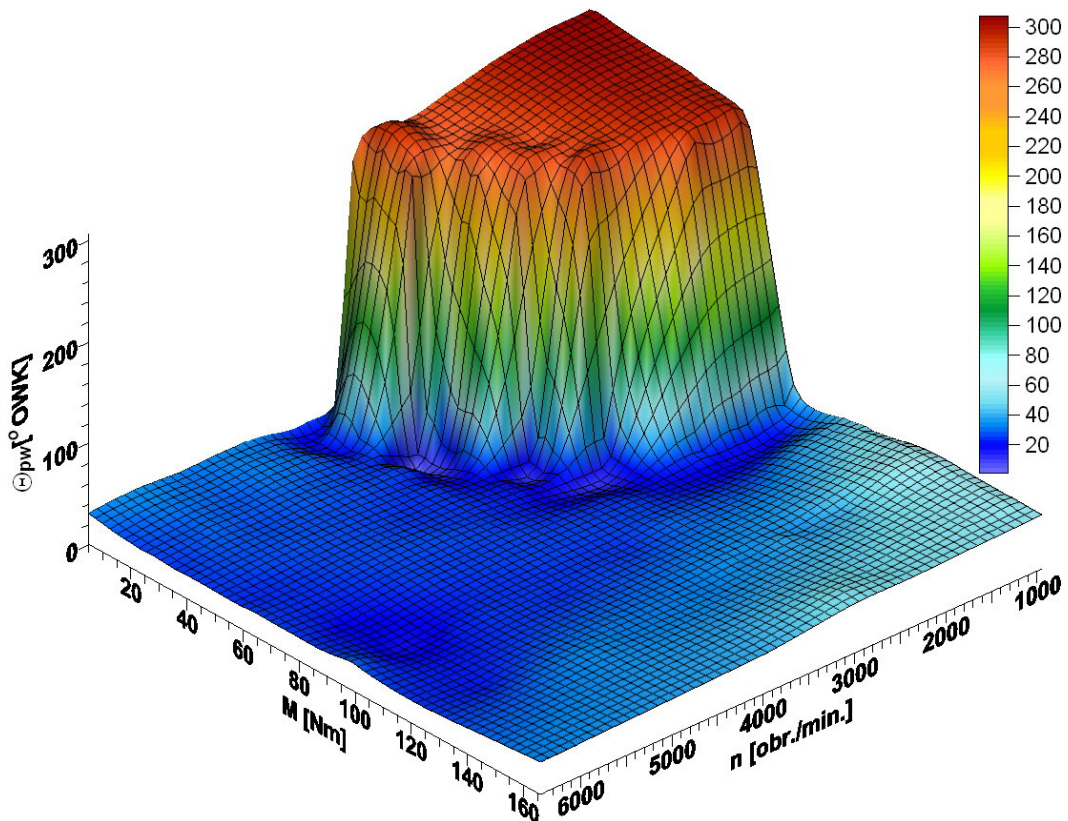
wy co z kolei skutkuje przyrostem prędkości obrotowej. Zasilanie silnika mieszanką stechiometryczną polega na jednokrotnym wtrysku paliwa w czasie suwu napełniania. Wtrysk rozpoczyna się ok. 30°OWK po GMP. Wtryskiwane paliwo dokładnie miesza się z powietrzem napływającym do cylindra i ma czas na odparowanie. Zasilanie ubogą mieszanką uwarstwowią także polega na jednokrotnym wtrysku paliwa do komory spalania lecz w końcowej części suwu sprężania, tuż przed zapłonem. Z rys. 4 wynika, że wtrysk rozpoczyna się ok. 280°OWK po rozpoczęciu cyklu a więc na kilkadziesiąt stopni przed zapłonem. Tak wtrysnięte paliwo rozprzestrzenia się tylko w okolicy wtryskiwacza i świecy zapłonowej.

Rysunki 9, 10 i 11 przedstawiają poziom emisji tlenku węgla, węglowodorów i dwutlenku węgla w całym obszarze pracy silnika ($n \times M$). Poziom emisji tlenku węgla jest bardzo niski i wzrasta dopiero dla dużych prędkości obrotowych i obciążeń silnika. Wzrost ten jest związany z zasilaniem silnika bardziej bogatymi mieszankami. Podobnie wygląda emisja węglowodorów, przy czym obserwuje się wzrost ich emisji dla stanów, w których silnik pracuje na mieszankach uwarstwowionych. Z wykresu przedstawiającego poziom stężenia dwutlenku węgla wynika, że jego emisja jest zdecydowanie mniejsza dla obszarów zasilania silnika ubogą mieszanką uwarstwowią. Jest to efekt zwiększonej ilości powietrza napełniającego silnik przy zasilaniu mieszankami ubogimi a co się z tym wiąże mniejszego procentowego udziału dwutlenku wę-

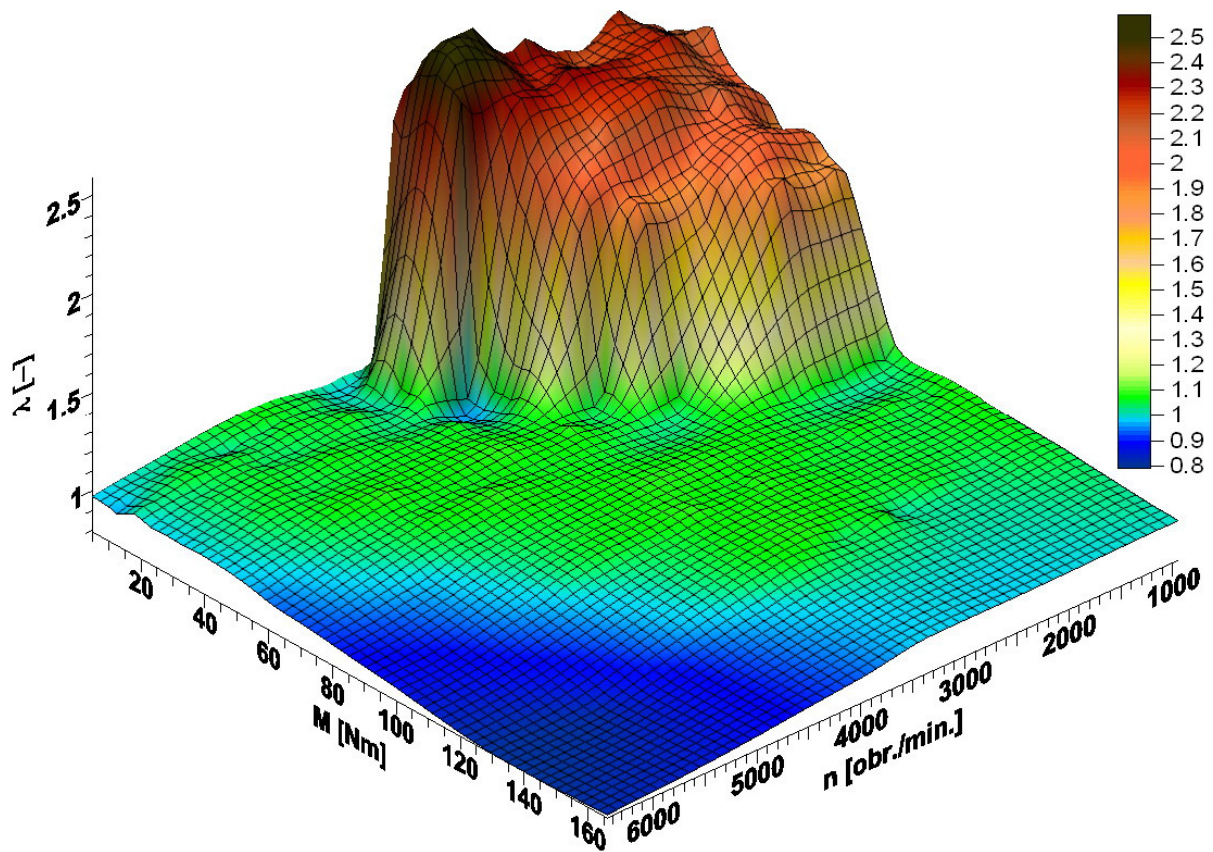
gła, który powstaje ze spalania określonej ilości paliwa.



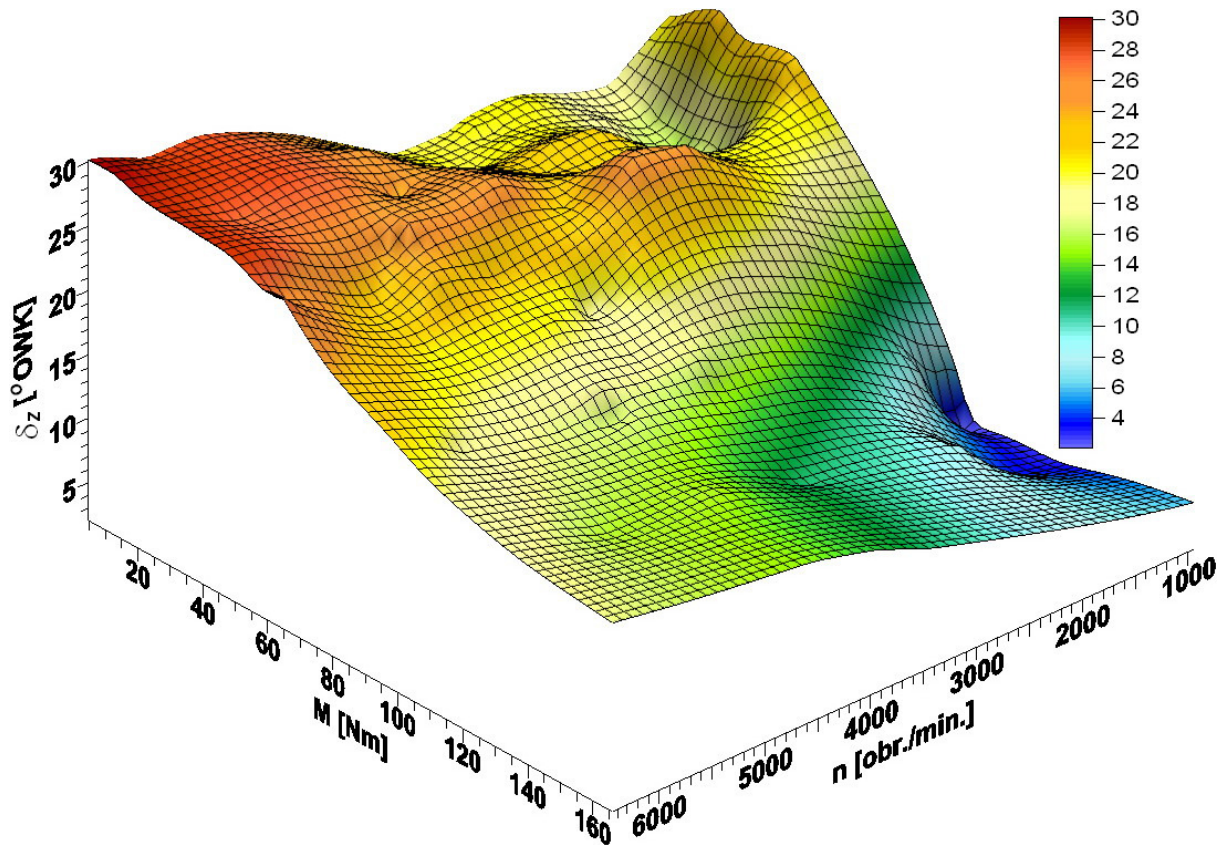
Rys. 5. Czas wtrysku paliwa w całym obszarze pracy silnika ($n \times M$)



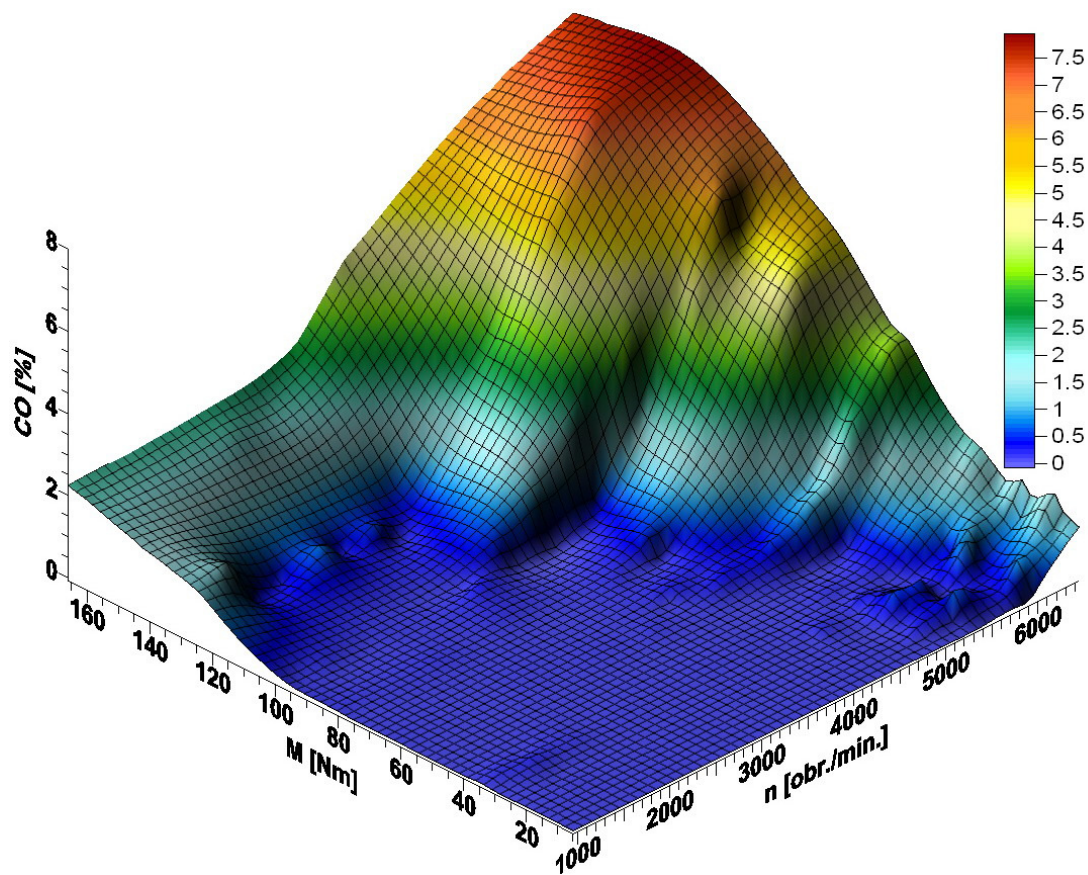
Rys. 6. Kąt początku wtrysku paliwa w całym obszarze pracy silnika ($n \times M$)



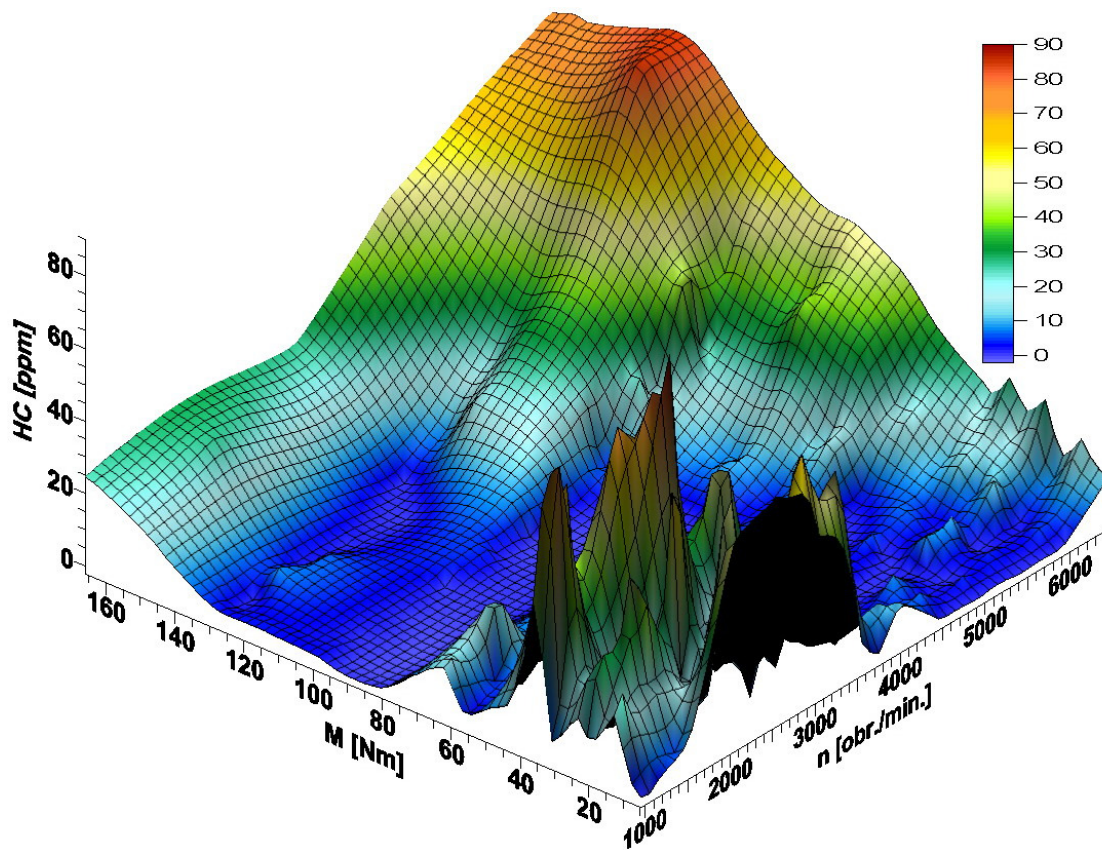
Rys. 7. Skład mieszanki paliwowo-powietrznej zasilającej silnik w całym obszarze pracy ($n \times M$)



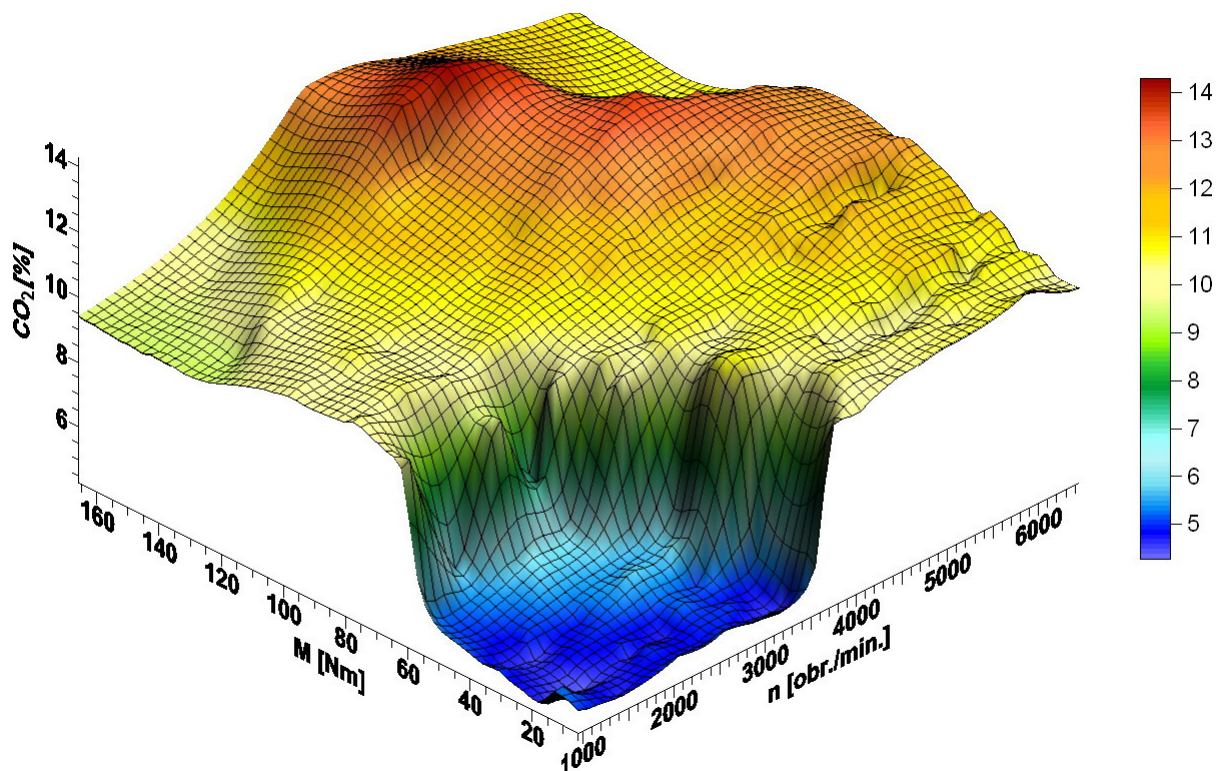
Rys. 8. Kąt wyprzedzenia zapłonu w całym obszarze pracy silnika ($n \times M$)



Rys. 9. Stężenie tlenku węgla w całym obszarze pracy silnika ($n \times M$)



Rys. 10. Stężenie węglowodorów w całym obszarze pracy silnika ($n \times M$)



Rys. 11. Stężenie dwutlenku węgla w całym obszarze pracy silnika ($n \times M$)

Rysunki 5, 6, 7 i 8 przedstawiają charakterystyki regulacyjne fabrycznego systemu sterowania silnikiem. Rysunek 5 przedstawia czas wtrysku paliwa. Zależą one od prędkości obrotowej i obciążenia silnika. Na charakterystyce tej nie daje się zaobserwować (wyróżnić) obszaru gdzie silnik zasilany jest ubogą mieszkanką uwarstwowaną. Kolejny rys. 6 przedstawia kąt początku wtrysku. Można zauważyć, że w obszarze pracy silnika, w którym zasilany jest mieszkanką stechiometryczną kąt ten przybiera małe wartości ok. $30 \div 60^\circ \text{OWK}$ po GMP rozpoczynającym suw napełniania. Natomiast w obszarze pracy, w którym silnik zasilany jest ubogą mieszkanką uwarstwowaną wtrysk rozpoczyna się na ok. 80°OWK przed zakończeniem sprężania. Rys. 8 przedstawia kąt wyprzedzenia zapłonu w całym obszarze pracy silnika. Cechą charakterystyczną dla tego silnika jest to, że przy obciążeniach bliskich maksymalnym i małych prędkościach obrotowych, zapłon występuje w pobliżu GMP. Rys. 7 przedstawia skład mieszkanki zasilającej silnik wystereowany przez oryginalny fabryczny system sterowania. Wyraźnie widać obszar pracy silnika, gdzie zasilany jest on ubogą mieszkanką uwarstwowaną. W pozostałym obszarze pracy skład mieszkanki jest bardzo bliski stechiometrycznemu a dla największych obciążeń i największych prędkości obrotowych, silnik zasilany jest mieszkanką bogatą w celu uzyskania maksymalnej mocy.

6. Wnioski

Przeprowadzone badania identyfikacyjne miały na celu rozpoznanie możliwości zastosowania metody „z cyklu na cykl” do zasilania badanego silnika oraz porównanie parametrów pracy tego silnika, w tym głównie składu mieszkanki i toksyczności spalin, przy zasilaniu w paliwo systemem fabrycznym i wg metody „z cyklu na cykl”. Po przeprowadzonych badaniach można uznać że:

1. istnieje możliwość zastosowania metody „z cyklu na cykl” do zasilania tego silnika,
2. zastosowanie wtrysku wstępnego pozwoli utworzyć mieszkankę paliwowo-powietrzną z całej zassanej masy powietrza, a wtrysk uzupełniający spowoduje osiągnięcieżądanego średniego jej składu,
3. możliwość uzupełnienia paliwa w mieszkance po zamknięciu zaworów dolotowych daje szanse uzyskaniażądanego składu mieszkanki,
4. tworzenie ubogiej mieszkanki uwarstwowanej w danym punkcie pracy ($n \times M$) odbywa się poprzez zwiększenie napełnienia powietrzem i z zachowaniem tej samej masy paliwa na cykl,
5. tworzenie ubogiej mieszkanki uwarstwowanej zawsze odbywa się poprzez wtrysk paliwa do komory spalania w okolice świecy zapłonowej w ostatniej fazie suwu sprężania, tuż przed wystąpieniem zapłonu.

Nomenclature/Skróty i oznaczenia

λ	współczynnik nadmiaru powietrza	δ_z	kąt wyprzedzenia zapłonu zapłonu
CO	tlenek węgla	Θ_{p1}	kąt położenia wału korbowego, w którym rozpoczyna się pomiar masy powietrza
NO _x	tlenki azotu	Θ_{p2}	kąt położenia wału korbowego, w którym kończy się pomiar masy powietrza
HC	węglowodory	Θ_{w1}	kąt położenia wału korbowego, w którym rozpoczyna się wstępny wtrysk paliwa
T _w	czas wtrysku	Θ_{w2}	kąt położenia wału korbowego, w którym rozpoczyna się uzupełniający wtrysk paliwa
m _A	masowy wydatek powietrza		
M _{A1}	masa powietrza zassanego do cylindra		
M _F	całkowita masa paliwa na cykl		
M	moment obrotowy na wale silnika		
g _e	jednostkowe zużycie paliwa		
P	moc odbierana z wału silnika		

Bibliography/Literatura

- [1] Metoda wyznaczania czasu wtrysku i kąta wyprzedzenia zapłonu w silniku benzynowym na przykładzie rozszerzonego testu ECE-15, Projekt badawczy finansowany przez KBN Nr 9 T12D 020 14 realizowany w Politechnice Radomskiej w latach 1998-2000.
- [2] Rozwój sposobu sterowania składem mieszanki z cyklu na cykl na przykładzie silnika benzynowego, Projekt badawczy finansowany przez MNiSW Nr 4 T12D 009 27 realizowany w Politechnice Radomskiej w latach 2004-2007.
- [3] Wołczyński Zb.: Nowa metoda sterowania składem mieszanki paliwowo-powietrznej w silniku benzynowym, Rozprawa doktorska obroniona na Wydziale Mechanicznym Politechniki Radomskiej, Radom, grudzień 2005.
- [4] Wołczyński Zb.: Identification of fuel injection control system in a GDI engine, Journal of KONES Powertrain and Transport Vol. 17, No 4 s. 599-606, Warszawa 2010.

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

Dr inż. Zbigniew Wołczyński – adiunkt na Wydziale Mechanicznym Politechniki Radomskiej.

