

DETERMINATION OF CYLINDER FILL WITH THE USE OF HFM-5 AIR-MASS METER

Józef Nita, Zbigniew Wołczyński

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

Abstract

The composition of air-fuel mixture in the spark ignition engine changes from cycle to cycle and differs in individual cylinders due to unrepeatability of filling with air resulting from complex gasodynamic phenomena in the engine inlet system as well as retardation in fuel injection.

Fluctuation of air-fuel mixture composition lowers effectiveness of a three-way catalytic converter, what affects exhaust gas toxicity increase and vehicle dynamics and engine work deterioration resulting from higher revolution irregularity. It should be believed in the near future, air-fuel mixture composition control will be realised automatically in individual cylinders, at the level of single working cycle. This problem was emphasized in the report entitled "Combustion problems in combustion engines" prepared by experts from the Combustion Section of the Committee on Thermodynamics and Combustion of Polish Academy of Sciences and Polish Combustion Institute (pp. 188 and 189).

The idea of air-fuel mixture composition control realised at the level of single working cycle was the main subject of project No. 1785/T12/2001/20 entitled "New approach to air-fuel mixture composition control in the spark ignition engine, in transient conditions" commissioned by Polish Committee for Scientific Research and realised with participation of the authors of this paper in Technical University of Radom.

The paper describes the method for cylinder fill determination, what is the basis for control. Cylinder fill determination is based on transitory air-mass flow measured, using HFM-5 thermoanemometer produced by BOSCH, in the precisely determined range of the cylinder fill phase. This range has an upper limit in order to make possible, in a given cycle, injection of such gasoline quantity that ensured required air-fuel mixture composition. Mass of air that fills the cylinder beyond this range may be estimated only by prediction. Therefore, cylinder fill is a sum of air mass calculated from the air-mass flow and estimated on the basis of other engine work parameters.

The paper describes the method of angle range determination for air-mass flow measurement and of cylinder fill calculation in this range as well as a way of estimation of air mass that fills the cylinder beyond the measurement range. The investigation results for the whole load range of 1.6l engine and for engine speed limited to 3000 rpm were presented.

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

WYZNACZANIE NAPEŁNIENIA CYLINDRA Z WYKORZYSTANIEM MIERNIKA MASOWEGO WYDATKU POWIETRZA HFM-5

Streszczenie

Skład mieszanki w silniku benzynowym zmienia się z cyklu na cykl i nie jest taki sam w poszczególnych cylindrach. Jest to wynikiem niepowtarzalności napełniania poszczególnych cylindrów powietrzem będącej skutkiem złożonych zjawisk gazodynamicznych w układzie dolotowym i opóźnienia w dozowaniu paliwa.

Fluktuacja tego składu obniża efektywność pracy trójdrożnego katalizatora, co skutkuje wzrostem toksyczności spalin, pogarsza dynamikę samochodu oraz kulturę pracy silnika w wyniku zwiększonej nierównomierności obrotów.

Należy sądzić, że w nieodległej perspektywie sterowanie składem mieszanki realizowane będzie autonomicznie w poszczególnych cylindrach na poziomie pojedynczego cyklu roboczego. Problem ten podkreślony został m.in. w ekspertyzie pt. „Problemy spalania w silnikach spalinowych” opracowanej przez wybranych specjalistów

działających w ramach Sekcji Spalania Komitetu Termodynamiki i Spalania PAN oraz Polskiego Instytutu Spalania (str. 188, 189).

Idea sterowania składem mieszanki na poziomie pojedynczego cyklu roboczego silnika była przedmiotem projektu badawczego Nr 1785/T12/2001/20 pt. „Nowy sposób sterowania składem mieszanki paliwowo-powietrznej w silniku benzynowym w stanach przejściowych” zleconego przez Komitet Badań Naukowych, realizowanego z udziałem autorów tej publikacji na Politechnice Radomskiej.

Przedkładana publikacja zawiera opis metody wyznaczania napełnienia cylindra, stanowiącego podstawę takiego sterowania. Wyznaczanie napełnienia opiera się na pomiarze chwilowego masowego wydatku powietrza wykonywanego termoanemometrem HFM-5 firmy BOSCH, w ściśle określonym przedziale fazy napełniania cylindra. Przedział ten jest ograniczony od góry w taki sposób, aby możliwe było w danym cyklu wtrysnięcie benzyny w ilości zapewniającej wymagany skład mieszanki. Masa powietrza napełniającego cylinder poza tym przedziałem może być określona tylko metodą prognozowania (szacowania). Napełnienie cylindra jest więc sumą mas powietrza: obliczonej z przebiegu masowego wydatku i oszacowanej (prognozowanej) w oparciu o inne parametry pracy silnika.

Publikacja zawiera opis sposobu wyznaczania kąтового przedziału dla pomiaru masowego wydatku powietrza i obliczania napełnienia cylindra w tym przedziale oraz sposobu wyznaczania (prognozowania) masy powietrza napełniającego cylinder poza przedziałem pomiaru napełniania. Przedstawiono wyniki badań dla pełnego zakresu obciążeń silnika 1.6l i prędkości obrotowej ograniczonej do 3000 obr./min.

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

1. Istota metody wyznaczania napełnienia cylindra

Dalszy rozwój silnika w obszarze sterowania składem mieszanki niewątpliwie musi mieć miejsce na poziomie pojedynczego cyklu, w każdym cylindrze silnika autonomicznie. Zatem, aby precyzyjnie sterować składem mieszanki paliwowo-powietrznej należy dokładnie wyznaczać masowe napełnienie cylindra w każdym cyklu. Do pomiaru masy powietrza w silnikach spalinowych ZI stosuje się przepływomierze powietrza, obecnie coraz częściej tzw. termoanemometry. Przyrządy te instalowane są w przewodzie zbiorczym kolektora zasilającego (przed przepustnicą powietrza). W takim rozwiązaniu mierzona jest masa powietrza zasilającego wszystkie cylindry silnika. Z wielu powodów poszczególne cylindry silnika mogą być zasilane powietrzem o różniących się masach. Skutkuje to zasilaniem poszczególnych cylindrów silnika mieszankami paliwowo-powietrznymi o różnych stosunkach powietrza i paliwa (A/F). Zastosowanie indywidualnych przepływomierzy masowych w każdej z gałęzi kolektora dolotowego, umożliwi indywidualny dobór dawki paliwa w każdym cyklu, każdego cylindra.

Aby w pojedynczym cyklu pracy silnika ZI zapewnić mieszankę paliwowo-powietrzną o właściwym stosunku A/F, należy zmierzyć masę powietrza, jakie napełniło cylinder i wtrysnąć odpowiednią dawkę paliwa jeszcze w tym cyklu napełniania. W silnikach o pośrednim wtrysku paliwa (do kolektora dolotowego nad zawór) nie ma możliwości wtrysku paliwa po zakończeniu napełniania powietrzem. W takim przypadku całkowita dawka wtryskiwanego paliwa musi być ustalana najpóźniej podczas napełniania powietrzem. Aby jak najdokładniej wyznaczyć dawkę paliwa w trakcie napełniania cylindra powietrzem, należy uczynić to możliwie najpóźniej, tak aby objąć pomiarem wydatku masowego powietrza największą część tej fazy. Zatem wtrysnięcie całej dawki paliwa po jej wyznaczeniu nie byłoby możliwe ze względu na ograniczony wydatek wtryskiwacza i krótki czas na realizację wtrysku.

Opracowana metoda sterowania składem mieszanki paliwowo-powietrznej dla silnika ZI [1], [2] z wtryskiem pośrednim polega na dwukrotnym wtrysku paliwa na cykl. Pierwszy z wtrysków odbywa się jeszcze przed otwarciem zaworu dolotowego. Masa paliwa wtryskiwanego podczas tego wtrysku wyznaczana jest z tzw. mapy w oparciu bieżące parametry pracy silnika. Zapewnia ona ok. 80 – 90% całego zapotrzebowania na paliwo w cyklu. Po otwarciu zaworu dolotowego mierzona jest masa powietrza napływającego do cylindra. Pod koniec fazy napełniania wyznaczana jest całkowita masa powietrza, jakie napłynie do cylindra w cyklu i obliczana całkowita masa paliwa, które zapewni żądany stosunek A/F (skład mieszanki). Następnie od tak wyznaczonej masy całkowitej paliwa odejmowana jest masa z pierwszego (wstępnego) wtrysku i realizowany jest drugi (uzupełniający) wtrysk paliwa. Wtrysk uzupełniający ma miejsce

w końcowej fazie napełniania powietrzem i musi zakończyć się przed zakończeniem tej fazy. Realizacja tej idei zaowocowała nową metodą sterowania wtryskiem paliwa, opisaną w publikacjach [1], [2].

Sednem tej metody sterowania, nazwanej skrótowo metodą CC (z cyklu na cykl) jest bieżące wyznaczanie napełnienia we wszystkich, kolejnych cyklach wszystkich cylindrów autonomicznie.

Takie sformułowanie problemu pomiaru napełniania powietrzem jest bardzo złożone ze względu na złożoność procesów gazodynamicznych przy napełnianiu cylindra i ich dużą dynamiką zostaje istotnie skomplikowane, jeżeli oczekiwać, że napełnianie musi być wyznaczone na tyle wcześnie, aby obliczyć i dostarczyć w tym cyklu wymaganą ilość paliwa

Problem ten jest możliwy do rozwiązania tylko w jeden sposób. Polega on na podzieleniu cyklu napełniania na dwie części: pierwszą, w której mierzy się odpowiednio szybkim miernikiem napełnienie i drugą, w której masa powietrza jest przewidywana (prognozowana) w oparciu o wybrane parametry towarzyszące napełnieniu.

Pierwsza faza polega na całkowaniu masowego wydatku powietrza m_A mierzonego termoanemometrem w ściśle zdefiniowanych granicach.

Drugą część powietrza (poza przedziałem pomiaru wyznacza się w trybie kalibracji układu, korzystając z dokładnych metod pomiaru zużycia paliwa i składu mieszanki (po jej spalaniu), co pozwala wyznaczyć masę powietrza biorącego udział w tym spalaniu. W wyniku tego postępowania opracowana zostaje tzw. mapa prognozowanego napełnienia powietrzem $M_{A,2}$, która umożliwia obliczenie w każdym punkcie pracy silnika $n \times p$ całkowitego napełnienia powietrzem.

2. Wyznaczanie granic pomiaru przepływu

Wyznaczanie całkowitej masy powietrza, które napłynie do cylindra w pojedynczym cyklu oparte jest w metodzie CC o pomiar przepływomierzem masowym (termoanemometrem) HFM-5 firmy Bosch umieszczonym w jednej z gałęzi kolektora dolotowego. Polega ono na pomiarze masy powietrza $M_{A,1}$ napływającego do cylindra w pierwszej części fazy napełniania, wyznaczonej granicami kąтового położenia wału korbowego silnika φ_{p1} , φ_{p2} (tzw. fazy pomiaru napełniania) i dodaniu masy powietrza $M_{A,2}$, które napłynie do cylindra po zakończeniu fazy pomiaru. Masa powietrza $M_{A,2}$ jest prognozowana na podstawie wartości średnich w przedziale prognozowania, tj. od φ_{p2} do φ_{zD} , tj. zamknięcia zaworu dolotowego: prędkości obrotowej n , ciśnienia w kolektorze dolotowym p . Prognozowanie odbywa się w oparciu o dane zgromadzone doświadczalnie zapisane w postaci tzw. mapy. Masa M_A powietrza, które wpłynęło do cylindra jest równa sumie (1):

$$M_A = M_{A,1} + M_{A,2}, \quad (1)$$

gdzie:

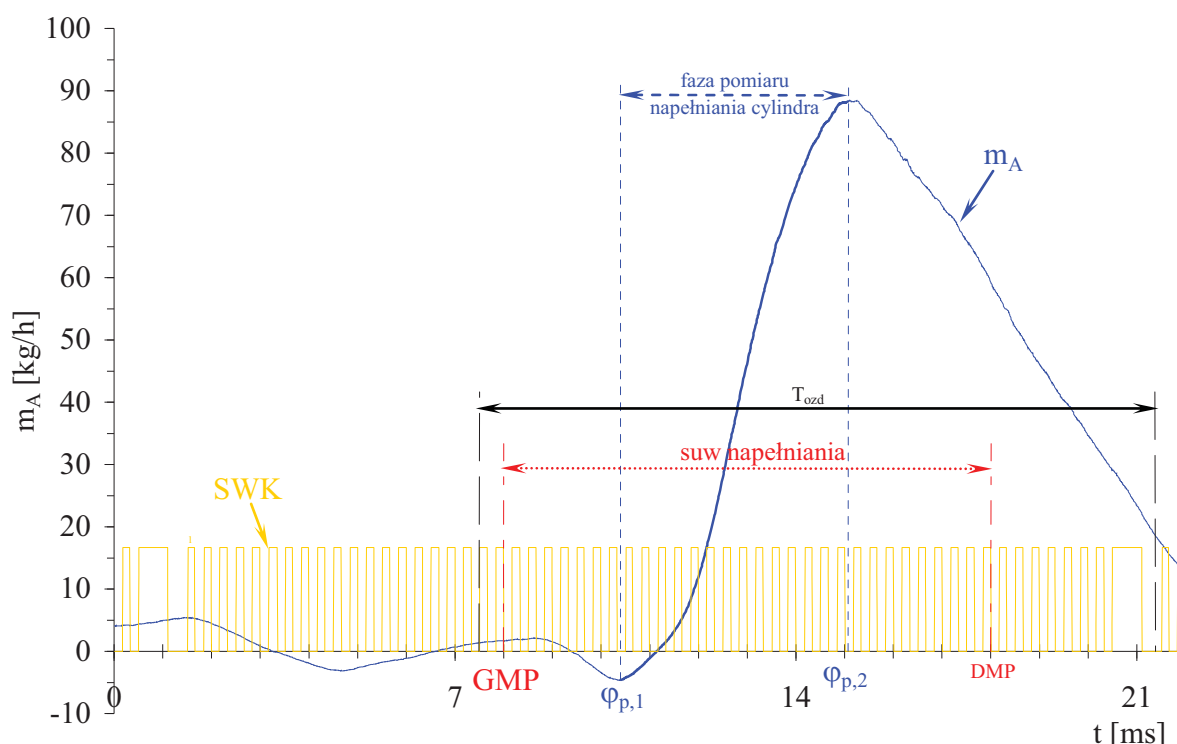
$M_{A,1}$ - zmierzona masa powietrza w fazie pomiaru napełniania cylindra,

$M_{A,2}$ - masa powietrza zasysanego do cylindra po zakończeniu fazy pomiaru (masa prognozowana).

Ze względu na zjawiska zachodzące w gałęzi kolektora dolotowego takie jak np. przepływy zwrotne z cylindra oraz parametry samego przepływomierza, a w szczególności jego czas odpowiedzi, zmienia się w funkcji prędkości przedział kątowy fazy pomiaru masy powietrza określony przez φ_{p1} , φ_{p2} . Po otwarciu zaworu dolotowego wskutek nadciśnienia następuje cofanie gazów z cylindra do kolektora dolotowego. Następnie gazy te są zasysane do cylindra lecz wskutek braku w nich tlenu nie biorą one udziału w spalaniu. Dlatego istotnym jest takie ustalenie granicy początku pomiaru, aby mierzyć tylko powietrze zawierające tlen, czyli biorące udział w spalaniu.

Położenie granic fazy pomiaru masy powietrza $\varphi_{p,1}$, $\varphi_{p,2}$ wyznacza się w oparciu o analizę sygnału masowego wydatku powietrza m_A napełniającego cylinder (rys.1). Granicę początku fazy

pomiaru napełniania $\varphi_{p,1}$ wyznaczono w chwili początku przyrostu sygnału masowego wydatku powietrza m_A , w której rozpoczyna się napływ powietrza do cylindra. Granicę końca tej fazy $\varphi_{p,2}$ przyjęto dla występowania maksymalnej wartości sygnału m_A .



Rys. 1. Przykład wyznaczenia granic $\varphi_{p,1}$, $\varphi_{p,2}$ fazy pomiaru napełniania na tle impulsów SWK określających położenia katowe wału silnika

Fig. 1. Example of determination of the $\varphi_{p,1}$, $\varphi_{p,2}$ limits of cylinder fill measurement phase against SWK impulses determining the angle position of the engine crankshaft

Po zakończeniu fazy pomiaru napełniania następuje uzupełniający wtrysk benzyny.

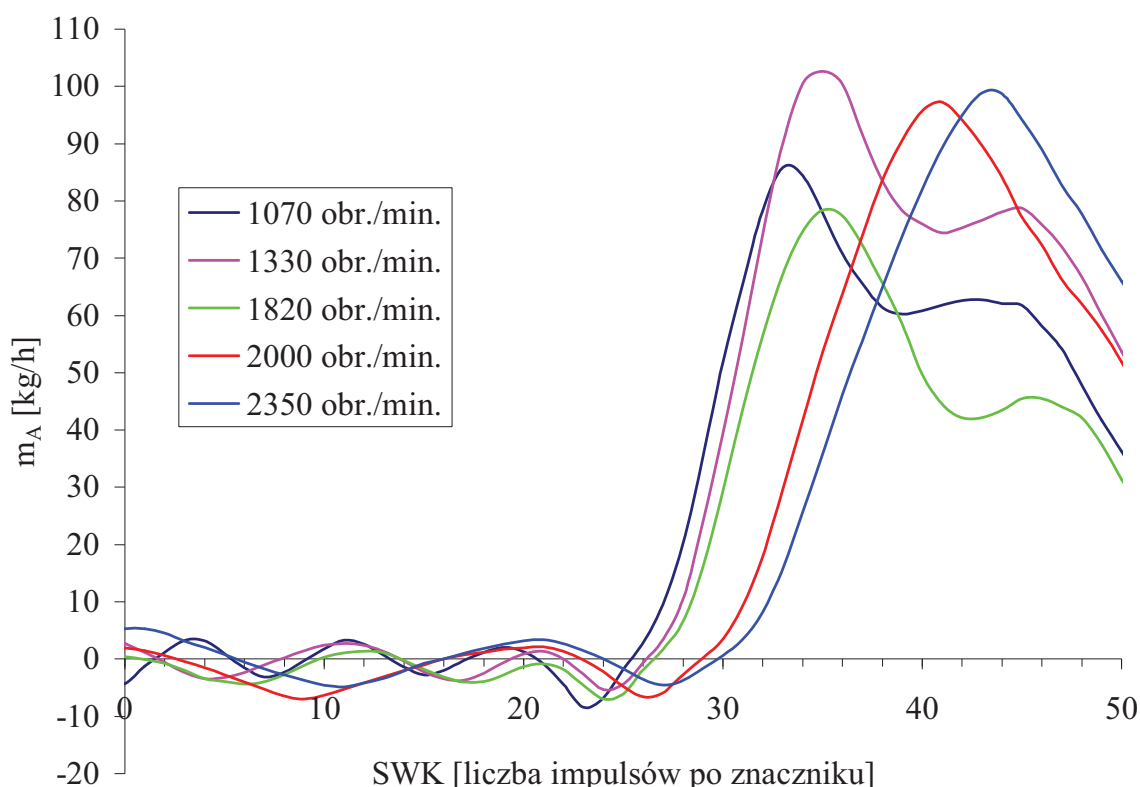
Istotnym zagadnieniem przy ustalaniu granic przedziału pomiaru napełniania jest wpływ prędkości obrotowej na przebieg napełniania m_A . Rysunek 2 przedstawia przebiegi sygnału napełniania m_A dla kilku różnych prędkości obrotowych w funkcji położenia wału. Przebieg sygnału m_A przy różnych prędkościach obrotowych odzwierciedla m.in. zmienność procesu napełniania powietrzem, ale także własności dynamiczne termoanemometru.

Każdy przebieg sygnału m_A przedstawiony na rys. 2 w innych miejscach wyznacza granice fazy pomiaru napełniania cylindra, gdyż zarówno minima jak i maksima tych sygnałów występują przy różnych położeniach wału silnika. Zależności opisujące położenie obu granic, w funkcji prędkości obrotowej silnika mają charakter liniowy. Zależności te wyznaczono doświadczalnie.

Na rysunku 3 zaznaczono różnymi kolorami przebieg sygnału m_A w kolejnych cyklach pracy dla stałej prędkości obrotowej. Pokrywanie się faz sygnału dla minimów i maksimów w kolejnych cyklach świadczy, iż jedynie prędkość obrotowa silnika decyduje o położeniu granic fazy pomiaru napełniania. Dwa skrajne przebiegi sygnału widoczne na rys. 3 mają punkty charakterystyczne w tej samej fazie, co świadczy, że masa zasysanego powietrza nie ma istotnego znaczenia. Z uzyskanych w ten sposób wartości opracowano wykresy przedstawiające zależności $\varphi_{p,1} = f(n)$ i $\varphi_{p,2} = f(n)$ oraz opisano je matematycznie.

Rysunek 4 przedstawia wyniki badań eksperymentalnych mających na celu wyznaczenie powyższych zależności. Punkty koloru czerwonego przedstawiają granice $\varphi_{p,2}$ w 200 różnych punktach pracy silnika (n , p_u), natomiast punkty koloru zielonego przedstawiają granice $\varphi_{p,1}$. Widoczne „załamanie” wykresu górnej granicy $\varphi_{p,2}$ powyżej 2730 obr./min. spowodowane jest

koniecznością wcześniejszego zakończenia fazy pomiaru, aby pozostał odpowiednio długi czas na realizację wtrysku uzupełniającego przed DMP tłoka. Zrezygnowano z kryterium wyznaczania $\varphi_{p,2}$ dla maksymalnego wydatku $m_A = m_{A,max}$



Rys. 2. Wpływ prędkości obrotowej na położenie granic $\varphi_{p,1}$, $\varphi_{p,2}$ fazy pomiaru napełniania cylindra przy stałym obciążeniu silnika

Fig. 2. Effect of the engine speed on the position of $\varphi_{p,1}$, $\varphi_{p,2}$ limits of cylinder fill measurement phase at constant engine load

3. Obliczenie masy powietrza w oparciu o sygnał z termoanemometru

Obliczanie masy powietrza polega na całkowaniu sygnału masowego wydatku m_A w fazie pomiaru napełniania wyznaczonej granicami $\varphi_{p,1}$ i $\varphi_{p,2}$. Przedstawia to równanie (2):

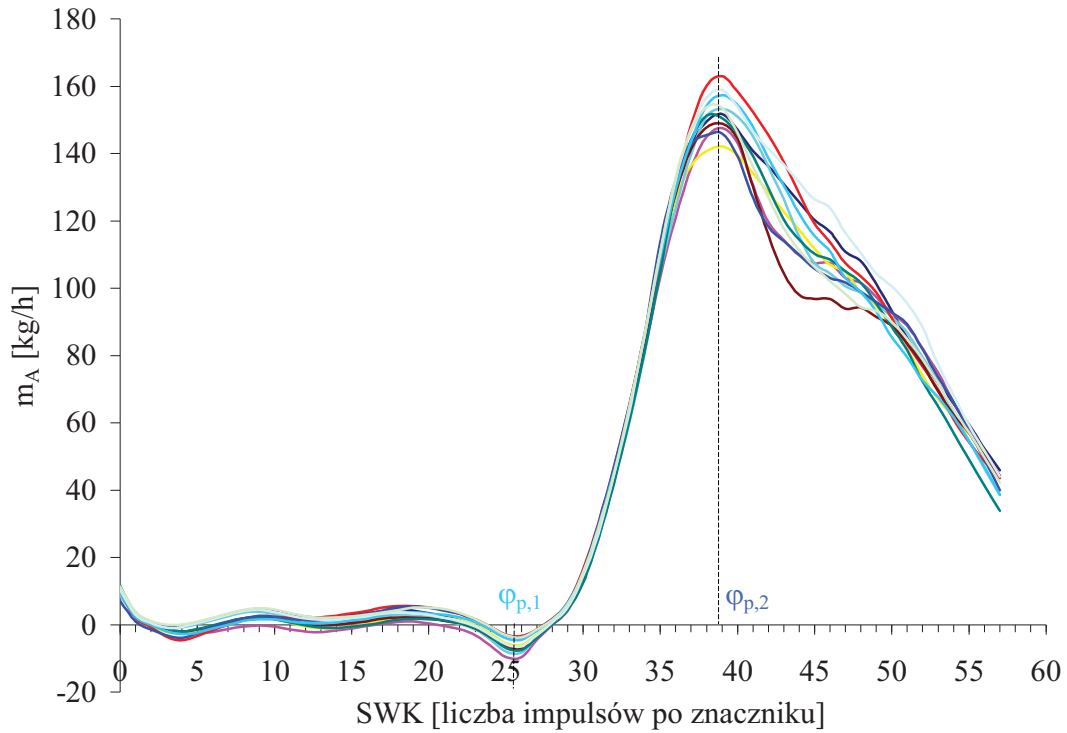
$$M_{A,1} = \int_{t_{p,1}}^{t_{p,2}} m_A(t) / dt, \quad (2)$$

gdzie:

$t_{p,1}$ i $t_{p,2}$ oznaczają odpowiednio czasy początku i końca fazy pomiaru napełniania.

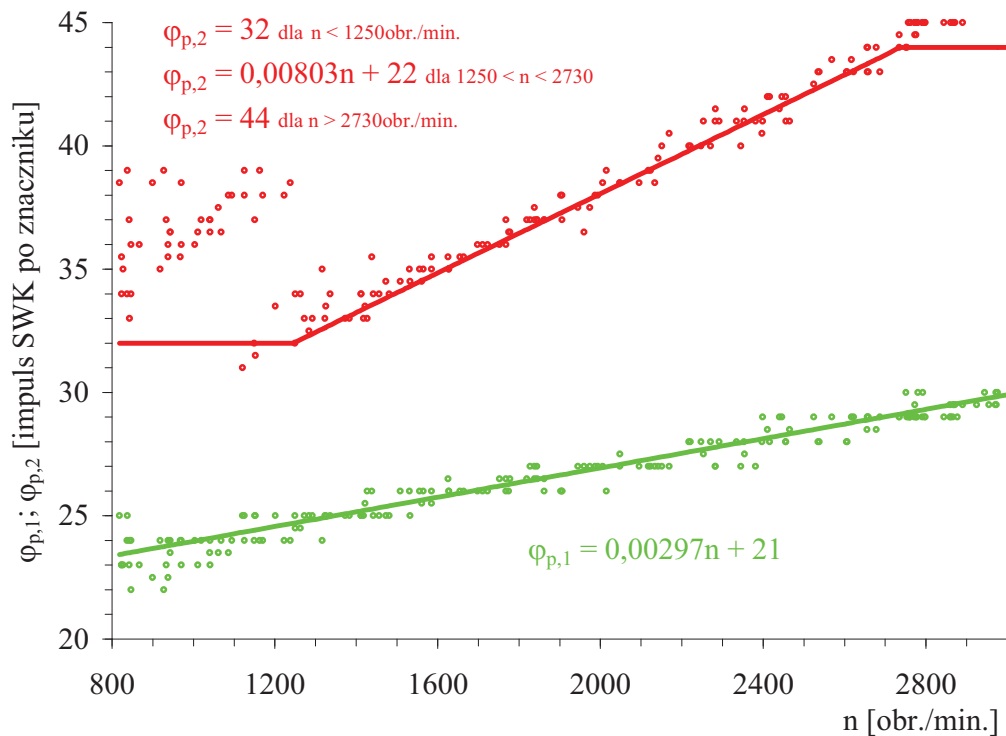
Sygnał wyjściowy przepływomierza masowego wydatku powietrza U_A jest sygnałem napięciowym. Producent przepływomierza podaje dla kilku charakterystycznych napięć wyjściowych przepływomierza, z całego zakresu, odpowiadające im wydatki. Na tej podstawie opracowana została charakterystyka wydatku przepływomierza i opisana wielomianem szóstego stopnia (3):

$$m_A = a_6 u_A^6 + a_5 u_A^5 + a_4 u_A^4 + a_3 u_A^3 + a_2 u_A^2 + a_1 u_A^1 + a_0. \quad (3)$$



Rys. 3. Przebieg napełnienia cylindra w kolejnych cyklach zmierzony przepływomierzem HFM-5 dla stałej prędkości obrotowej

Fig. 3. Cylinder fill course in successive cycles, measured using the HFM-5 air-mass meter, for constant engine speed



Rys. 4. Wpływ prędkości obrotowej silnika na granice $\varphi_{p,1}$ i $\varphi_{p,2}$ fazy pomiaru napełniania
 Fig. 4. Effect of the engine speed on the $\varphi_{p,1}$, $\varphi_{p,2}$ limits of cylinder fill measurement phase

4. Prognozowanie masy powietrza

Druga część wyznaczonej masy powietrza jest prognozowana przy pomocy mapy masy powietrza dla określonej prędkości i ciśnieniem w kolektorze dolotowym punktu pracy silnika.

Mapa masy powietrza powstaje także w oparciu o dane eksperymentalne. W celu jej wyznaczenia zostały zarejestrowane n/w sygnały w wielu punktach pracy silnika, w całym zakresie jego obciążeń i do 3000 obr/min. Na podstawie:

- sygnału położenia wału SWK – umożliwiającego określenie prędkości obrotowej silnika w danym punkcie pracy,
- sygnału sterowania wtryskiwaczem U_w – umożliwiającego określenie mas paliwa wtryskiwanego na cykl,
- sygnału ciśnienia w kolektorze dolotowym p_u – służącego do wyznaczenia $p_{sr,1}$ i $p_{sr,p}$,
- sygnału λ_H miernika MEXA 700 λ - umożliwiającego określenie współczynnika nadmiaru powietrza spalanej mieszanki $\lambda_{s,c}$,

określono w każdym z zarejestrowanych cykli pracy prędkość obrotową $n_{sr,1}$ i ciśnienie w kolektorze dolotowym $p_{sr,1}$ a następnie wyznaczono masę powietrza M_A , które utworzyło mieszankę o współczynniku $\lambda_{s,c}$ z paliwem zgodnie z:

$$M_A = (M_{F,1} + M_{F,2}) \cdot L_o \cdot \lambda_{s,c}, \quad (4)$$

gdzie:

- $M_{F,1}, M_{F,2}$ – masy paliwa wtryskiwane na cykl w systemie fabrycznym,
- M_A – całkowita masa powietrza zassanego do cylindra analizowanym cyklu,
- L_o – teoretyczne zapotrzebowanie powietrza.
- $\lambda_{s,c}$ – zmierzony współczynnik nadmiaru powietrza mieszanki spalanej w analizowanym cyklu, (tzw. skorelowana lambda cyklowa)

Prognozowana masa powietrza M_{A2} napełniającego cylinder poza przedziałem pomiaru napełniania dana jest zależnością (5):

$$M_{A,2} = M_A - M_{A,1}, \quad (5)$$

gdzie:

- $M_{A,1}$ – zmierzona masa powietrza w fazie pomiaru napełniania cylindra,
- $M_{A,2}$ – masa powietrza zassanego do cylindra po zakończeniu fazy pomiaru,
- Jest to masa powietrza, które napłynęło do cylindra po zakończeniu fazy pomiaru w punkcie pracy silnika określonym przez: $n_{sr,p}, p_{sr,p}$.

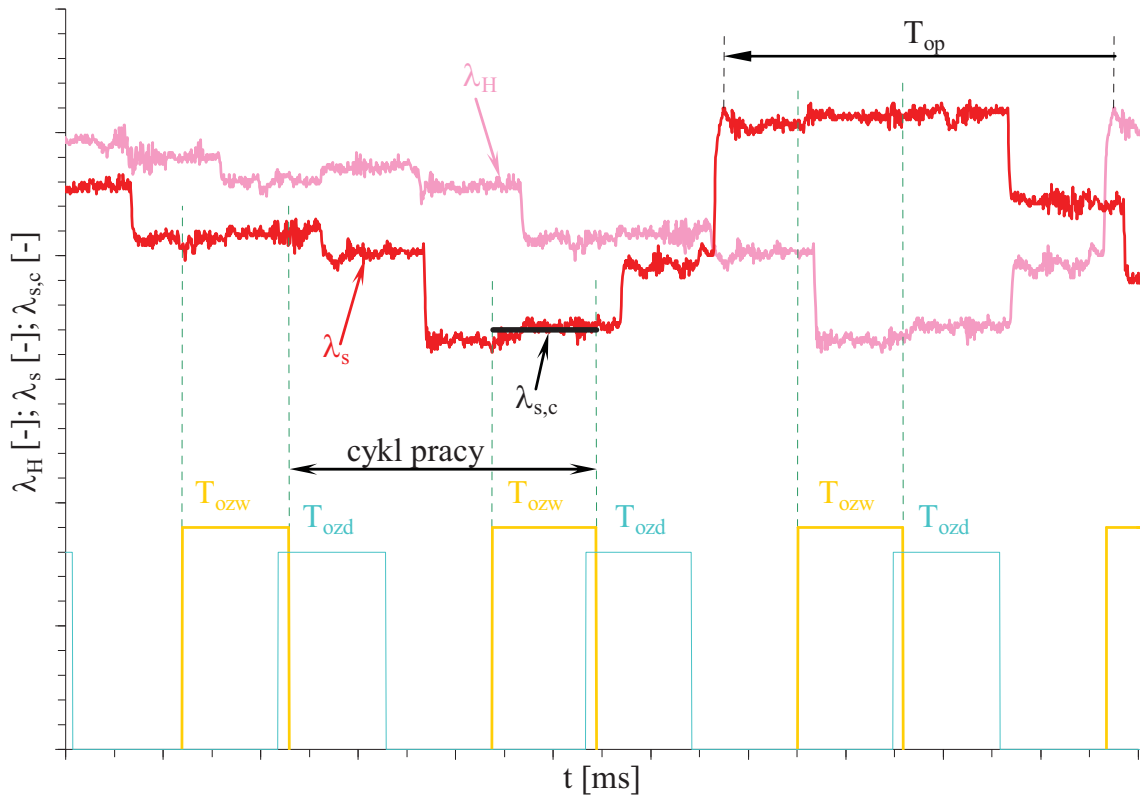
Wzory (4) i (5) dotyczą wielkości cyklowych. Dla poprawy wiarygodności wyników wielkości cyklowe obliczono dla kilkudziesięciu cykli w każdym z punktów pracy silnika $n \times p$ i obliczono ich wartości średnie. Dotyczy to takich wielkości jak: $\lambda_{s,c}, M_{F,c}, M_A, n_{sr,p}, p_{sr,p}$.

Związek

$$M_{A,2} = f(n_{sr,p}; p_{sr,p}) \quad (6)$$

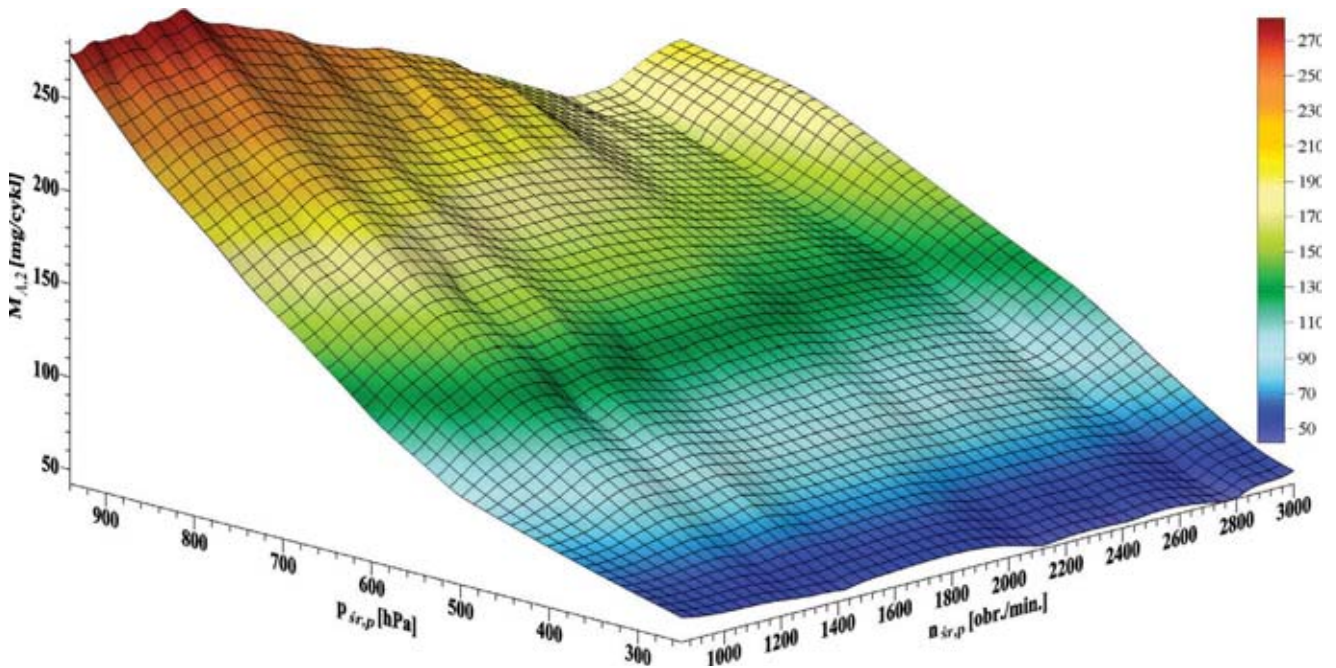
nazywany mapą jest związkiem wartości średnich z całej rejestracji tych wielkości.

Istotnym zagadnieniem w procedurze wyznaczania masy powietrza $M_{A,2}$ po zakończeniu fazy napełniania jest korelacja wskazania miernika współczynnika nadmiaru powietrza spalanej mieszanki MEXA 700 λ . Miernik ten charakteryzuje się typowym czasem odpowiedzi równym 80ms. Chcąc zatem określić dokładnie skład spalanej mieszanki przy użyciu miernika MEXA 700 λ wykorzystującego szerokopasmową sondę lambda, wprowadzono pojęcie tzw. „lambdy skorelowanej” λ_s . Przebieg chwilowy λ_s tworzony jest przez „przesunięcie” sygnału λ_H pochodzącego z miernika MEXA 700 λ o czas opóźnienia T_{op} tego miernika w sposób jak na rys.5.



Rys. 5. Sposób wyznaczenia λ_s i $\lambda_{s,c}$ na podstawie przebiegu λ_H
 Fig. 5. Method of λ_s and $\lambda_{s,c}$ determination on the basis of the λ_H course

Średnia wartość sygnału λ_s w czasie otwarcia zaworu wylotowego jest wynikiem pomiaru składu mieszanki w danym cyklu i oznaczana przez $\lambda_{s,c}$. Należy tu podkreślić, że przedstawiona na rysunku 6 metoda korelacji czasowej λ_s i λ_H jest słuszną dla ustabilizowanych warunków pracy silnika, gdyż czas T_{op} , o który należy „przesunąć” sygnał λ_H , zależy od zakresu zmian składu mieszanki.



Rys. 6. Graficzna ekspozycja mapy masy powietrza prognozowanego $M_{A,2}$
 Fig. 6. Graphic exposition of the predicted air mass $M_{A,2}$

Ostatnią fazą opracowania mapy masy powietrza (rys. 6) jest wyznaczenie wartości $M_{A,2}$ dla węzłów przyjętej siatki metodą interpolacji. Procedurę taką udostępnia program komputerowy Surfer v.8 amerykańskiej firmy Golden Software do tworzenia powierzchni przestrzennych.

Literatura

- [1] *Nowy sposób sterowania składem mieszanki paliwowo-powietrznej w silniku benzynowym w stanach przejściowych*, Sprawozdanie z realizacji projektu badawczego KBN nr 8 T12D 041 20, Radom, 2003.
- [2] *Wołczyński, Z., Metoda sterowania składem mieszanki paliwowo-powietrznej w silniku benzynowym*, Rozprawa doktorska, Politechnika Radomska, Radom, 2005.

