

ZBIGNIEW WOŁCZYŃSKI\*

SYNTEZA I SYMULACJA STATYCZNA STEROWANIA  
„Z CYKLU NA CYKL” WTRYSKIEM PALIWA  
W SILNIKU GDISYNTHESIS AND STATIC SIMULATION  
OF “CYCLE-BY-CYCLE” CONTROLLING  
THE FUEL INJECTION IN GDI ENGINE

## Streszczenie

W artykule przedstawiono metodę „z cyklu na cykl” wyznaczania dawki i wtrysku paliwa zastosowaną do zasilania silnika GDI. Polega ona na pomiarze masy zassanego do cylindra powietrza w każdym cyklu pracy i wtrysnięciu właściwej, ze względu na skład mieszanki, dawki paliwa. Paliwo wtryskiwane jest w dwóch częściach: wstępnej podczas napełniania cylindra i uzupełniającej po zakończeniu procesu napełniania powietrzem. Dawka wstępna stanowi ok. 50% całej masy paliwa dla danego cyklu. Dawka uzupełniająca jest różnicą pomiędzy dawką całkowitą wyliczoną dla zassanej masy powietrza a dawką wstępną. W artykule zaprezentowano metodykę opracowania granic fazy pomiaru masy powietrza oraz utworzenia „mapy” (tablicy) czasu wtrysku wstępnego. Przeprowadzono symulację statyczną opracowanej metody oraz przedstawiono jej wyniki.

*Słowa kluczowe: silnik benzynowy, wtrysk paliwa, pomiar masy zassanego powietrza, skład mieszanki, symulacja sterowania*

## Abstract

The paper presents the „cycle-by-cycle” method of fuel injected dose determination that is used for feeding the GDI engine. It relies on measurement of the air mass sucked to cylinder in each work cycle and injection of the proper, due to the composition, fuel dose. The fuel is injected in two parts: initial during filling the cylinder and supplementary after finishing the air filling process. The initial dose is app. 50% of the whole fuel mass for given cycle. The supplementary dose is a difference between the entire dose calculated for sucked air mass and the initial dose. It was presented the procedure of determination of the area limits of air mass measurement and creation the “map” (matrix) of initial injection time. The static simulation of processed method was conducted. The paper presents also the results of the simulation.

*Keywords: gasoline engine, fuel injection, measurement of sucked air mass, mixture composition, control simulation*

\* Dr inż. Zbigniew Wołczyński, Instytut Eksploatacji Pojazdów i Maszyn, Wydział Mechaniczny, Politechnika Radomska.

Silnik o ZI jest najbardziej popularną jednostką napędową w samochodach osobowych. Ciągły wzrost liczby samochodów wymaga m.in. ograniczania emisji gazów spalinowych, aby utrzymać właściwy stan środowiska naturalnego. Wiąże się z tym konieczność zmniejszenia zużycia paliwa przez silniki oraz katalitycznego oczyszczania spalin. Od wielu lat stosuje się w układach wydechowych silników reaktory katalityczne do oczyszczania spalin. Ich zadaniem jest „odzyskiwanie” tlenu z tlenków azotu ( $\text{NO}_x$ ) i wykorzystanie go do utleniania tlenku węgla (CO) i niespalonych węglowodorów (HC). Reakcje te przebiegają z wysoką efektywnością tylko wtedy, gdy w gazach spalinowych znajduje się tlen w ilościach nie większych niż potrzeba go do przebiegu reakcji utleniania. Taka ilość tlenu w gazach spalinowych jest wynikiem spalania w silniku mieszanki paliwowo-powietrznej o składzie stechiometrycznym.

Zapewnienie stechiometrycznego składu spalanej mieszanki w każdym cyklu pracy silnika ZI skutecznie umożliwi obniżenie zawartości składników toksycznych w jego spalinach. Przedstawiona w niniejszym artykule metoda wtrysku paliwa „z cyklu na cykl” ma zapewnić właściwy skład mieszanki w każdym cyklu pracy silnika ZI.

## 2. Istota metody

Metoda „z cyklu na cykl” wtrysku paliwa do komory spalania silnika GDI polega na dwukrotnym jego wtrysku na jeden cykl pracy silnika. Pierwszy wtrysk paliwa występuje podczas suwu napełniania powietrzem. Wtryskuje się wtedy ok. 50% całej dawki paliwa na cykl. Paliwo to ma czas na odparowanie i utworzenie jednorodnej mieszanki z zassanym do cylindra powietrzem. Proces napełniania cylindra powietrzem nadzorowany jest przez bardzo szybki przepływomierz (termoanemometr). Pozwala on zmierzyć masę powietrza zassanego do cylindra podczas suwu napełniania. Dla zmierzonej masy powietrza obliczana jest masa paliwa, które powinno być wtrysnięte, aby uzyskać „właściwy” skład mieszanki paliwowo-powietrznej. Istotę metody przedstawiono na rys. 1.

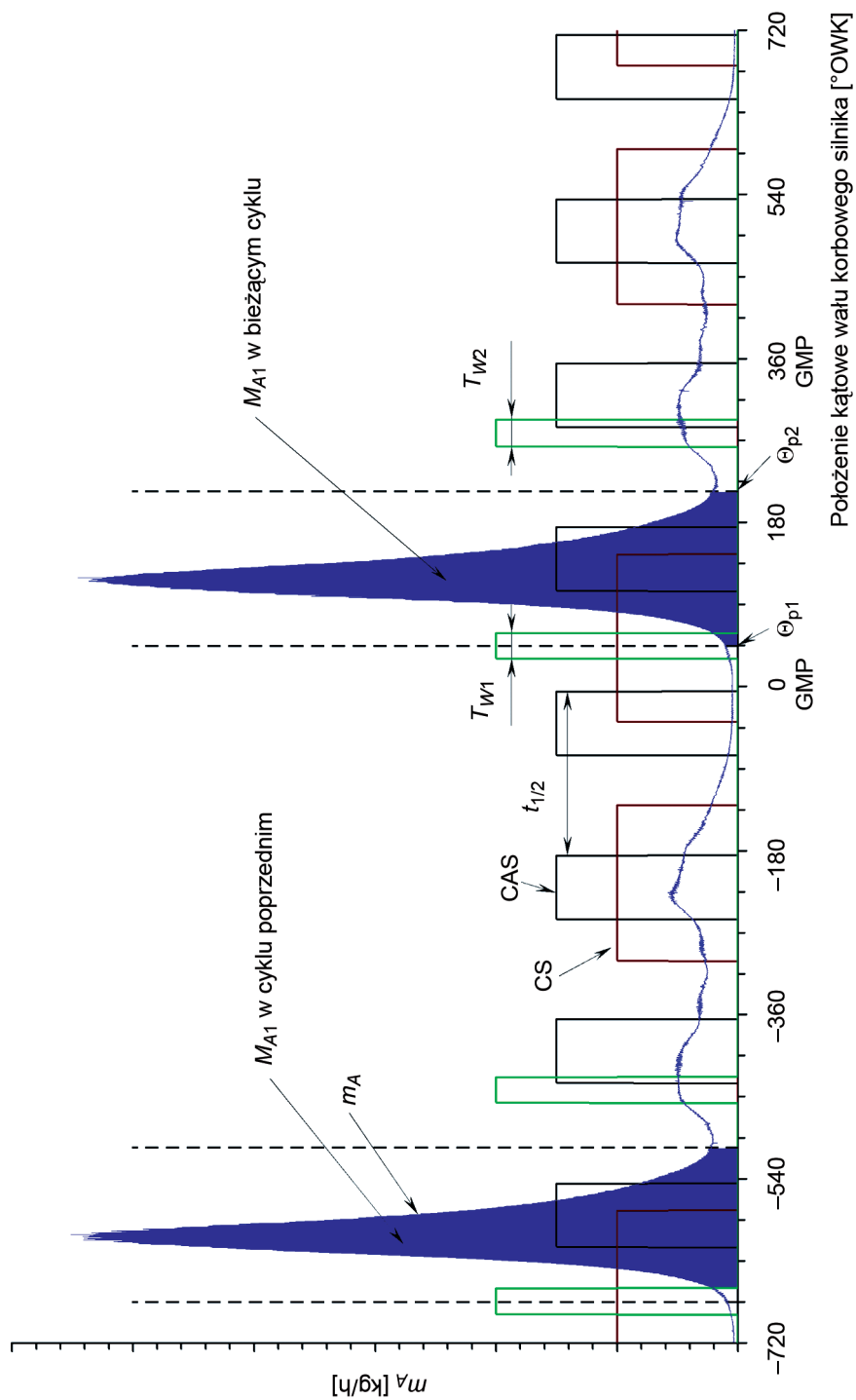
Rysunek przedstawia sygnały w systemie sterowania wtryskiem paliwa, w czasie ponad czterech obrotów wału korbowego, czyli dwóch pełnych cykli pracy jednego cylindra. Analiza metody opisana będzie na przykładzie cyklu, który rozpoczyna się w  $0^\circ\text{OWK}$ . Jest to GMP tłoka przed suwem napełniania.  $5^\circ\text{OWK}$  przed GMP tłoka występuje zbocze opadające sygnału z czujnika położenia wału korbowego silnika CAS. Jest to chwila rozpoczęcia wyznaczania wszystkich parametrów w bieżącym cyklu pracy. Jako pierwszy parametr, wyznaczana jest prędkość obrotowa w czasie ostatniego półobrotu silnika zgodnie ze wzorem (1):

$$n = \frac{30000}{t_{1/2}} \quad (1)$$

gdzie:

$n$  – prędkość obrotowa [obr./min],

$t_{1/2}$  – czas półobrotu mierzony między dwoma zboczami opadającymi CAS [ms].



Rys. 1. Istota metody „z cyklu na cykl” wtrysku paliwa w silniku GDI

Fig. 1. The principle of the method “from cycle to cycle” of fuel injection into the engine GDI

Po obliczeniu prędkości obrotowej wyznaczany jest z mapy wtrysku wstępnego czas pierwszego wtrysku benzyny  $T_{w1}$ . Mapa wtrysku wstępnego jest tablicą dwuwymiarową, w której czasy wtrysku wstępnego przypisano do prędkości obrotowej silnika w ostatnim półobrocie i masy powietrza, zassanego do cylindra w poprzednim cyklu pracy. Na podstawie wcześniej prowadzonych badań [1, 4] stwierdzono, że napełnienie powietrzem w następujących po sobie cyklach pracy nie zmienia się więcej niż o 50%. Stąd czasy wtrysku wstępnego zapisane w mapie zapewniają ok. 50% całej dawki paliwa w danym cyklu w stanach pracy ustalonej.

Ze względu na właściwości dynamiczne przepływomierza i złożoność procesu napełniania powietrzem [1], pomiaru masy powietrza dokonuje się w pewnym zakresie kątowym położenia wału korbowego. Zakres ten nazwano fazą pomiaru napełniania powietrzem, a jej granice uzależniono od prędkości obrotowej silnika. Poprzez  $\Theta_{p1}$  oznaczono kątowe położenie wału korbowego silnika, w którym rozpoczyna się pomiar masy powietrza. Podobnie poprzez  $\Theta_{p2}$  oznaczono kątowe położenie wału, w którym kończy się pomiar masy powietrza. Kolejnym krokiem w opisywanej metodzie jest wyznaczenie granic fazy pomiaru powietrza. Są one liniową zależnością prędkości obrotowej silnika. Dla silnika i przepływomierza zastosowanego w badaniach mają postać (2) i (3):

$$\Theta_{p1} = 0,0289 \cdot n + 16,368 \quad (2)$$

$$\Theta_{p2} = 0,0204 \cdot n + 112,18 \quad (3)$$

gdzie:

- $n$  – prędkość obrotowa [obr/min],
- $\Theta_{p1}$  – kąt początku fazy pomiaru napełniania [ $^{\circ}$ OWK],
- $\Theta_{p2}$  – kąt końca fazy pomiaru napełniania [ $^{\circ}$ OWK].

W przedziale kątowym od  $\Theta_{p1}$  do  $\Theta_{p2}$ , czyli w fazie pomiaru napełniania następuje pomiar masy powietrza  $M_{A1}$  napływającego do cylindra. Polega on na obliczeniu pola pod krzywą sygnału masowego wydatku powietrza  $m_A$  z przepływomierza (termoanemometru) zainstalowanego w gałęzi kolektora dolotowego sterowanego cylindra. Odbywa się to zgodnie z zależnością:

$$M_{A1} = \sum_{t \rightarrow \Theta_{p1}}^{t \rightarrow \Theta_{p2}} m_A \cdot \Delta t \quad (4)$$

gdzie:

- $M_{A1}$  – masa powietrza zassana do cylindra w danym cyklu [mg],
- $t \rightarrow \Theta_{p1}$  – czas, w którym wał silnika osiągnął położenie kątowe  $\Theta_{p1}$ ,
- $t \rightarrow \Theta_{p2}$  – czas, w którym wał silnika osiągnął położenie kątowe  $\Theta_{p2}$ ,
- $\Delta t$  – okres próbkowania sygnału  $m_A$ .

W trakcie pomiaru masy powietrza realizowany jest wtrysk wstępny paliwa, który rozpoczyna się  $30^{\circ}$ OWK po GMP, w czasie suwu napełniania, a czas jego trwania jest zgodny z wartością odczytaną z mapy. W warunkach rzeczywistych dla silnika GDI samochodu Mitsubishi Carisma wtrysk ten kończy się zawsze podczas suwu napełniania. Po zakończeniu napełniania powietrzem obliczana jest całkowita dawka paliwa dla uzyskania mieszanki o żądanym składzie  $\lambda^*$  wg wzoru (5):

$$M_F = \frac{M_{A1}}{\lambda^* \cdot L_0} \quad (5)$$

gdzie:

- $M_F$  – masa paliwa wymagana w danym cyklu [mg],
- $M_{A1}$  – masa powietrza zasana do cylindra w danym cyklu [mg],
- $L_0$  – teoretyczne zapotrzebowanie na powietrze dla całkowitego spalania zastosowanego paliwa (dla zastosowanej w badaniach benzyny  $L_0 = 14,7$ ).

Różnicą pomiędzy masą paliwa wyznaczoną dla danego cyklu  $M_F$  a masą paliwa wtrysniętego podczas wtrysku wstępnego  $M_{F1}$  jest masa paliwa  $M_{F2}$ , które należy wtrysnąć podczas wtrysku uzupełniającego  $T_{W2}$ . Wtrysk ten realizowany jest podczas suwu sprężania. Dla wtryskiwacza zastosowanego w badanym silniku masę paliwa i czas wtrysku uzupełniającego oblicza się z następujących zależności:

$$M_{F1} = 12,054 \cdot T_{W1} + 1,0293 \quad (6)$$

$$M_{F2} = M_F - M_{F1} \quad (7)$$

$$T_{W2} = 0,08228551 \cdot M_{F2} - 0,0754 \quad (8)$$

gdzie:

- $M_F$  – masa paliwa wymagana w danym cyklu [mg],
- $M_{F1}$  – masa paliwa wtrysniętego podczas wtrysku wstępnego [mg],
- $M_{F2}$  – masa paliwa wtrysku uzupełniającego [mg],
- $T_{W1}$  – czas wtrysku wstępnego [ms],
- $T_{W2}$  – czas wtrysku uzupełniającego [ms].

Zostały one opracowane we wcześniejszym etapie prac nad omawianą metodą wtrysku i przedstawione w innych publikacjach [3].

Realizacja wtrysku uzupełniającego może odbyć się natychmiast po wyznaczeniu jego czasu trwania bądź w innym ściśle określonym położeniu wału silnika. Wtrysk uzupełniający powinien zakończyć się przed zapłonem mieszanki w cylindrze.

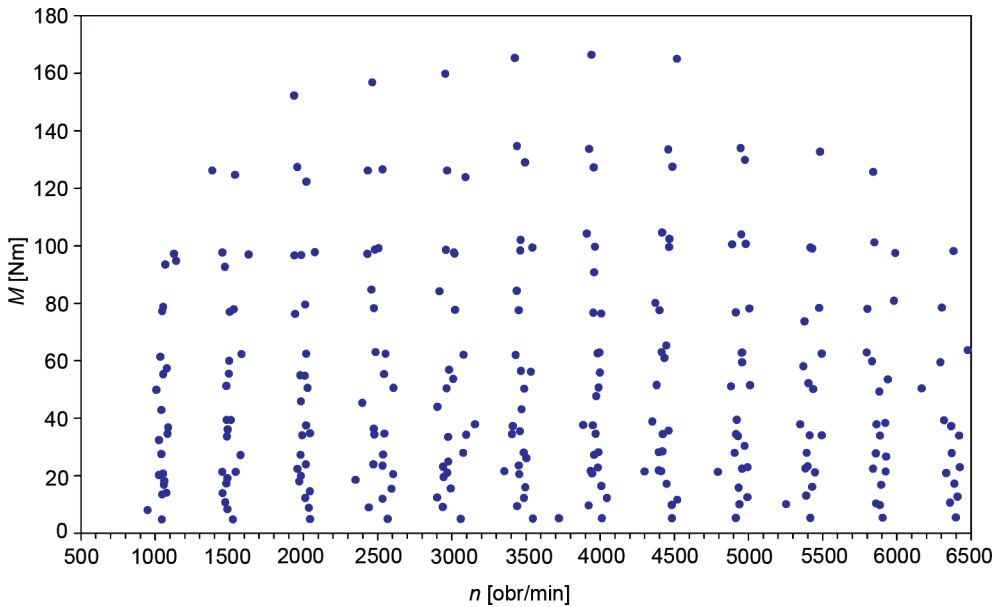
### 3. Synteza metody sterowania „z cyklu na cykl” wtryskiem paliwa

W metodzie sterowania „z cyklu na cykl” wtryskiem paliwa wykorzystywane są: „mapa wtrysku wstępnego” i dwa równania opisujące granice fazy pomiaru napełniania.

Wyznaczono je na podstawie badań eksperymentalnych przeprowadzonych na silniku GDI samochodu Mitsubishi Carisma. Badania prowadzono w całym obszarze pracy silnika  $n \times M$ . Na rys. 2 przedstawiono punkty  $n \times M$  pracy silnika, w którym dokonano pomiarów.

Badania prowadzono w hamowni podwoziowej na silniku GDI fabrycznie zamontowanym w samochodzie [4]. W badanym silniku wprowadzono zmiany konstrukcyjne umożliwiające rejestrację i analizę istotnych parametrów dla metody „z cyklu na cykl”, którymi są:

- prędkość obrotowa silnika i fazy cyklu pracy,
- napełnianie powietrzem drugiego cylindra silnika,
- skład spalanej mieszanki w drugim cylindrze silnika,
- czasy i fazy wtrysku paliwa do drugiego cylindra silnika.



Rys. 2. Punkty  $n \times M$  pracy silnika, w których przeprowadzono badania dla sporządzenia „mapy czasu wtrysku wstępnego” i opracowania granic fazy pomiaru napełniania

Fig. 2. The points  $n \times M$  of the engine operation, where the investigation was done in order to make “the map of the preliminary injection time” and determine the limits of the phase of filling measuring

Rejestracje powyższych parametrów były możliwe dzięki zmianom konstrukcyjnym polegającym na zainstalowaniu:

- przepływomierza masowego (termoanemometru) w gałęzi kolektora dolotowego drugiego cylindra,
- interfejsu pomiarowo-sterującego w instalacji elektrycznej silnika,
- czujnika analizatora MEXA 700  $\lambda$  firmy Horiba w gałęzi kolektora wylotowego drugiego cylindra.

Powyższe modyfikacje nie zmieniły w istotny sposób warunków pracy badanego silnika. Instalacja przepływomierza w gałęzi kolektora dolotowego polegała na umieszczeniu w nim jednego drutu pomiarowego o średnicy  $70 \mu\text{m}$ . Drut przebiega przez średnicę gałęzi kolektora dolotowego. Czujnik analizatora MEXA 700  $\lambda$  jest szerokopasmową sondą lambda o gabarytach „typowej” sondy lambda, zatem nie powoduje istotnych oporów dla przepływu spalin w kanale wylotowym.

W badaniach rejestrowano następujące sygnały:

- położenia wału korbowego silnika CAS,
- położenia wałka rozrządu CS,
- wtrysku paliwa do drugiego cylindra  $U_w$ ,
- zapłonu w drugim cylindrze  $U_z$ ,
- masowego wydatku powietrza napełniającego drugi cylinder  $m_A$ ,
- składu spalanej mieszanki w drugim cylindrze  $\lambda_h$ ,
- momentu rolki prawego koła,

– momentu rolki lewego koła.

Badania wykonano na wszystkich biegach, tak aby zarejestrować ww. sygnały w całym obszarze  $n \times M$  pracy silnika. We wszystkich punktach  $n \times M$  przedstawionych na rys. 2 wykonano jednosekundowe rejestracje sygnałów. Rejestracji dokonano komputerem PC wyposażonym w kartę przetworników A/C typu CS8380 firmy GAGE o 14-bitowej rozdzielczości i zakresach napięciowych dobranych do rejestrowanych sygnałów. Wszystkie sygnały próbkowano z częstotliwością 1 MHz.

Moment obrotowy na wale silnika nie jest wielkością wykorzystywaną w prezentowanej metodzie, dlatego jego pomiar nie ma większego znaczenia, a służył tylko do wyznaczenia punktów  $n \times M$ , w których prowadzono badania.

Podstawową wielkością w metodzie „z cyklu na cykl”, na podstawie której wyznaczana jest dawka paliwa, a następnie czasy wtrysków, jest masa powietrza zasasanego do cylindra. Mierzona jest ona za pomocą termoanemometru. Pomiar polega na wyznaczeniu pola pod krzywą sygnału masowego wydatku powietrza  $m_A$  napełniającego cylinder. Ze względu na złożony przebieg procesu napełniania i niedoskonałość samego termoanemometru, realizuje się go w czasie tzw. fazy napełniania. Granice fazy napełniania uzależnione są od prędkości obrotowej silnika i opisane równaniami liniowymi.

W celu wyznaczenia równań opisujących granice fazy napełniania poddano analizie zarejestrowane sygnały. W zależności od prędkości obrotowej silnika w zbiorach znajduje się od kilku do kilkudziesięciu pełnych cykli pracy. W każdym z zarejestrowanych zbiorów wyznaczono granice fazy napełniania w drugim pełnym cyklu. Podstawą wyznaczenia granic całkowania sygnału z przepływomierza była masa powietrza w cyklu  $M_{A1,\lambda}$ , wyznaczona na podstawie wtrysniętego paliwa i zmierzonego współczynnika nadmiaru powietrza w spalinach  $\lambda_H$  będących wynikiem spalania tego paliwa (rys. 3).

$$M_{A1,\lambda} = \lambda_H \cdot M_F \quad (9)$$

gdzie:

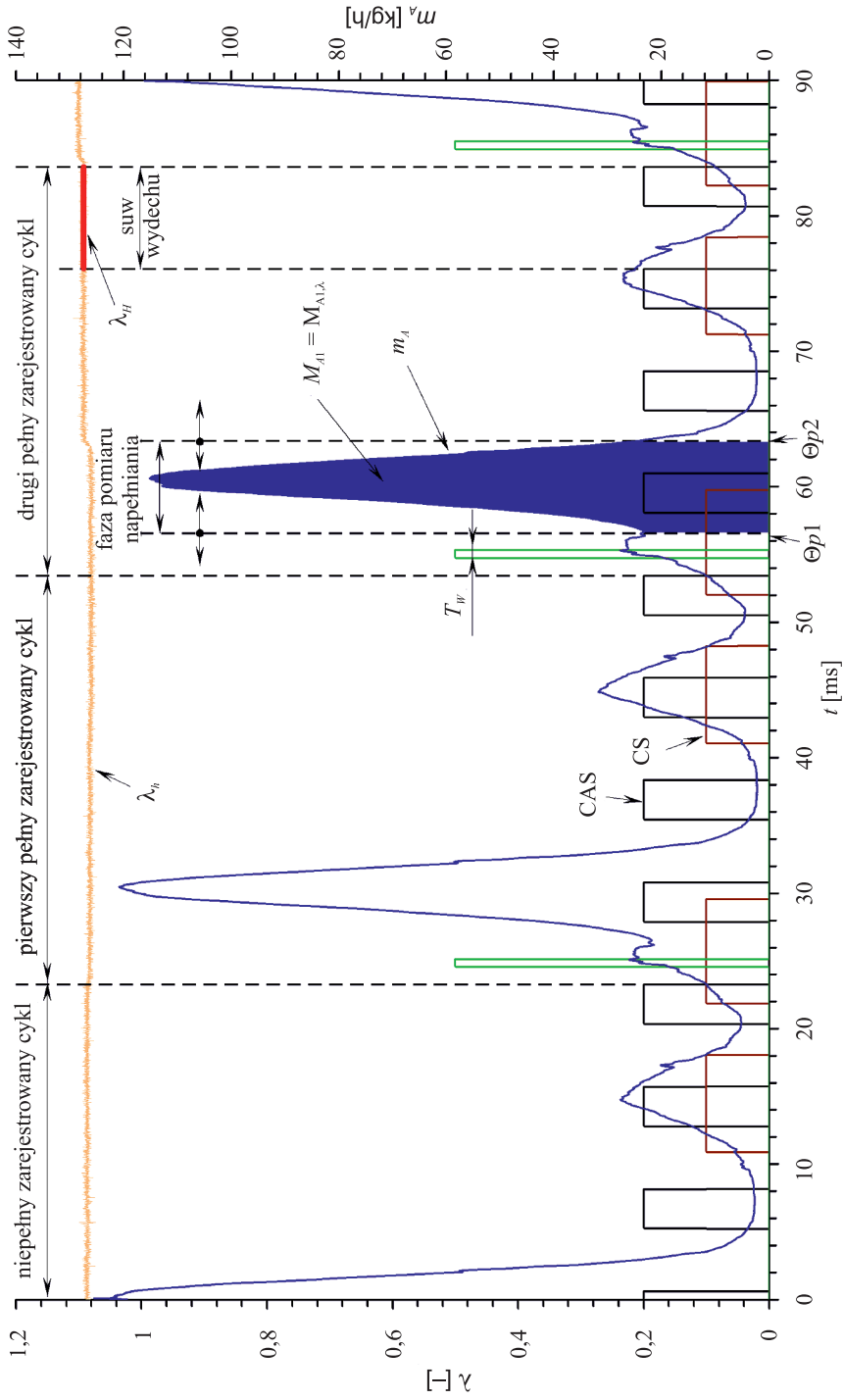
$\lambda_H$  – współczynnik nadmiaru powietrza mieszanki spalanej w analizowanym cyklu,  
 $M_F$  – masa wtrysniętego paliwa w analizowanym cyklu.

$$M_F = 12,054 \cdot T_w + 1,0293 \quad (10)$$

gdzie:

$T_w$  – czas pojedynczego wtrysku paliwa.

Istnieją takie punkty pracy silnika, w których paliwo wtryskiwane jest dwukrotnie na jeden cykl pracy. Wtedy całkowita masa paliwa jest sumą mas obliczonych dla każdego wtrysku wg (10). Współczynnik nadmiaru powietrza  $\lambda_H$  obliczany jest jako średnia arytmetyczna skorelowanego [7] sygnału  $\lambda_h$  z analizatora MEXA 700  $\lambda$  w czasie suwu wydechu (rys. 3). Dla tak wyznaczonej masy powietrza w cyklu poszukiwano dwóch granic fazy napełniania. Pierwszym warunkiem było, aby pole powierzchni pod przebiegiem sygnału masowego wydatku powietrza w granicach fazy napełniania, odpowiadające mierzonej masie powietrza  $M_{A1}$ , równe było obliczonej masie powietrza  $M_{A1,\lambda}$ .



Rys. 3. Metodyka wyznaczania granic fazy pomiaru napełniania

Fig. 3. The method of determining the limits of the phase of filling measuring



$$M_{A1,\lambda} = M_{A1} \quad (11)$$

gdzie:

$M_{A1,\lambda}$  – obliczona masa powietrza w zarejestrowanym cyklu,

$M_{A1}$  – zmierzona masa powietrza w zarejestrowanym cyklu.

Drugim warunkiem było, aby masowy wydatek powietrza  $m_A$  dla kąta początku fazy pomiaru napełniania  $\Theta_{p1}$  był w przybliżeniu równy wydatkowi dla kąta końca fazy pomiaru napełniania  $\Theta_{p2}$ . Poszukiwanie kątów początku  $\Theta_{p1}$  i końca  $\Theta_{p2}$  fazy napełniania dla tak postawionych warunków jest bardzo pracochłonne, dlatego napisano program komputerowy w języku Turbo Pascal, który graficznie prezentował przebieg sygnału z przepływomierza dla danego cyklu i proponował ustawienie granic spełniające pierwszy warunek. Za pomocą kursorów należało tak przesunąć granicę  $\Theta_{p1}$ , aby spełnić warunek drugi i zapamiętać wynik. Po każdej zmianie położenia kursora odpowiadającego granicy  $\Theta_{p1}$  program automatycznie dobierał granicę  $\Theta_{p2}$ .

W każdym analizowanym cyklu pracy obliczono prędkość obrotową silnika (rys. 3):

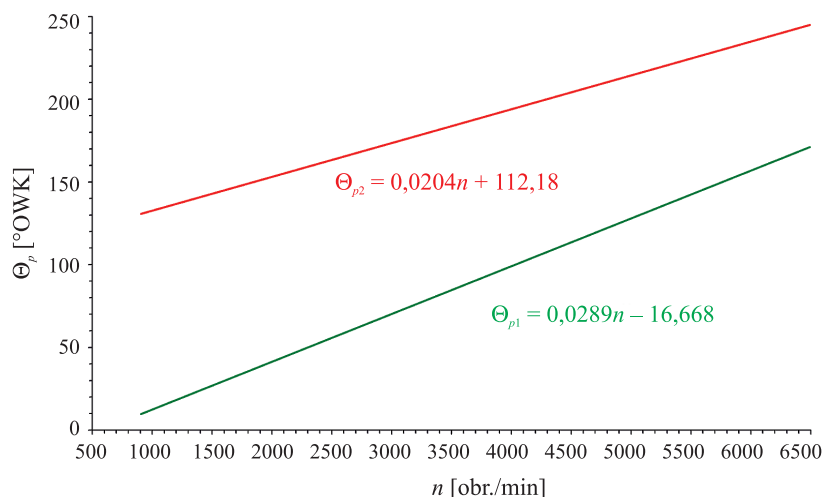
$$n = \frac{120\,000}{t_2} \quad (12)$$

gdzie:

$n$  – prędkość obrotowa [obr./min],

$t_2$  – czas dwóch pełnych obrotów mierzony między zboczami opadającymi CAS (rys. 3) [ms].

Po wyznaczeniu granic fazy pomiaru napełniania dla wszystkich zarejestrowanych zbiorów i odpowiadających im prędkościom obrotowym aproksymowano je do linii prostych i opisano odpowiednio równaniami (rys. 4).



Rys. 4. Granice fazy pomiaru napełniania w metodzie „z cyklu na cykl” dla silnika GDI samochodu Mitsubishi Carisma

Fig. 4. Limits of the phase of filling measuring in the method “from cycle to cycle” for the engine GDI of the car Mitsubishi Carisma

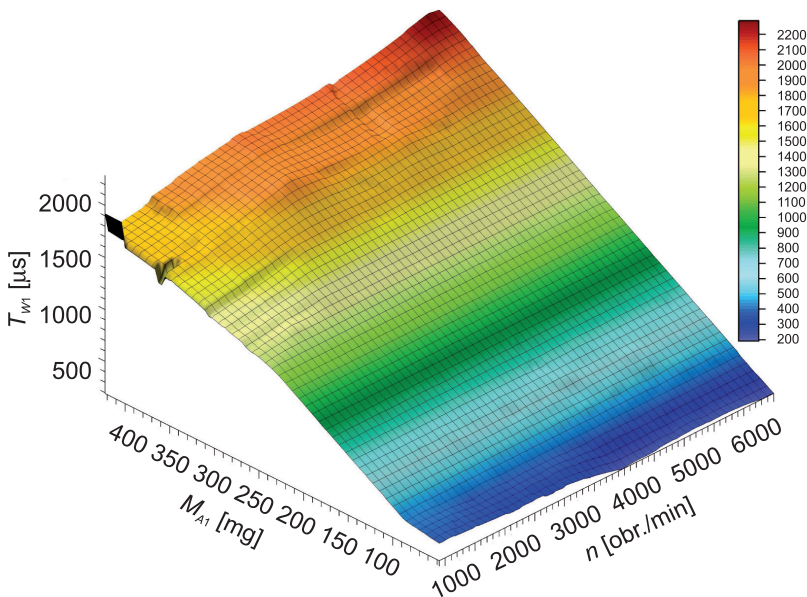
Po wyznaczeniu granic fazy napełniania wykorzystano je do wyznaczenia masy powietrza  $M_{A1}$  we wszystkich zarejestrowanych pełnych cyklach. Dla każdej masy powietrza obliczono masę paliwa tak, by uzyskać mieszankę o żądanym składzie  $\lambda^*$ . W metodzie „z cyklu na cykl” założono, że wtrysk wstępny zapewnia ok. 50% całej dawki potrzebnego paliwa dlatego obliczoną dawkę paliwa podzielono na pół i dla niej wyznaczono czas wtrysku  $T_{w1}$ :

$$T_{w1} = 0,08228551 \cdot \frac{M_{A1}}{2 \cdot \lambda^* \cdot L_0} - 0,0754 \quad (13)$$

Przy założeniu, że dla stosowanej benzyny  $L_0 = 14,7$ , a żądany skład mieszanki  $\lambda^* = 1$ , powyższy wzór przyjmuje postać:

$$T_{w1} = 0,08228551 \cdot \frac{M_{A1}}{29,4} - 0,0754 \quad (14)$$

Wykorzystując program Surfer 8.0, utworzono mapę wtrysku wstępnego o wymiarach  $101 \times 101$ , którą graficznie przedstawiono na rys. 5.



Rys. 5. Mapa czasu wtrysku wstępnego dla metody „z cyklu na cykl” sterowania wtryskiem w silniku GDI samochodu Mitsubishi Carisma

Fig. 5. The map of the preliminary injection time for the method “from cycle to cycle” of controlling the injection in the engine GDI of the car Mitsubishi Carisma

#### 4. Symulacja statyczna sterowania „z cyklu na cykl” wtryskiem benzyny

Najprostszym sposobem oceny opracowanej metody „z cyklu na cykl” sterowania wtryskiem benzyny jest jej symulacja. Pozytywne wyniki symulacji były przesłanką do sprzętowej realizacji metody.

W przedstawionej metodzie wtrysk paliwa odbywa się w oparciu o analizę sygnałów określających: prędkość, położenie wału korbowego i napełnienie powietrzem sterowanego cylindra. W tym celu zarejestrowano w kilku punktach pracy silnika sygnały wymagane w metodzie „z cyklu na cykl”. Są to:

- sygnał położenia wału korbowego silnika CAS,
- sygnał położenia wałka rozrządu CS,
- sygnał masowego wydatku powietrza napełniającego drugi cylinder  $m_A$ .

Sygnały wykorzystano do symulacji komputerowej, w wyniku której został wygenerowany sygnał sterowania wtryskiwaczem dla symulowanego cylindra silnika. Symulację przeprowadzono za pomocą własnego programu komputerowego napisanego w języku Turbo Pascal. Algorytm programu wynikający z istoty metody przedstawiono na rys. 6.

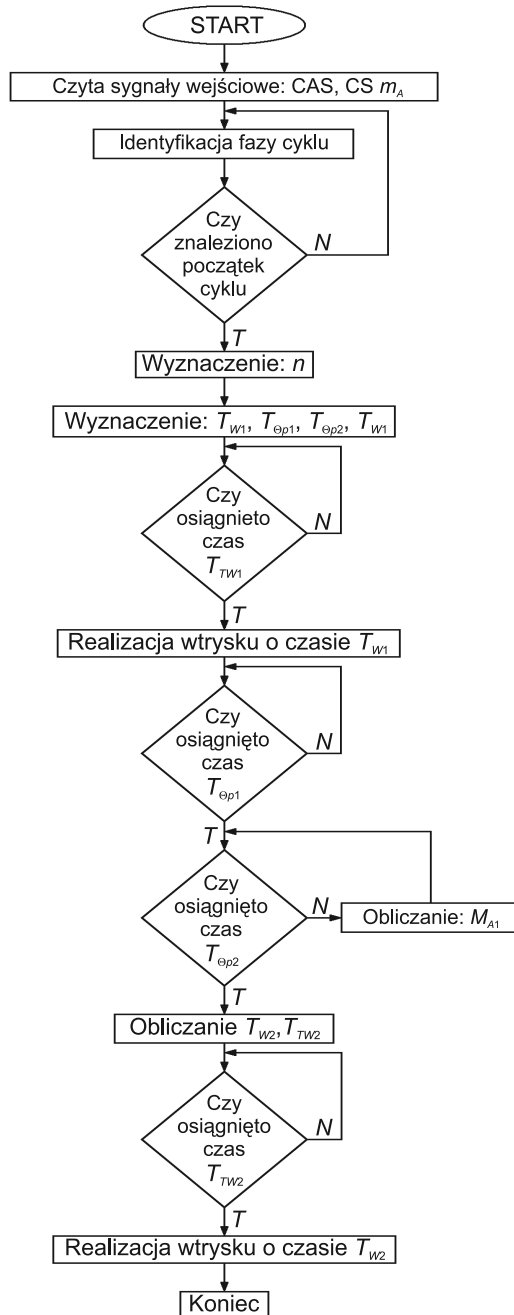
Na rysunkach 7 i 8 przedstawiono przykładowe wyniki symulacji sterowania wtryskiem benzyny w dwóch punktach pracy silnika. Na rysunkach tych przedstawiono czasy wtrysków: wstępnego i uzupełniającego. Każdy punkt to czas pojedynczego wtrysku. Punkty połączono liniami, tak by lepiej było widać zmienność tych czasów w kolejnych cyklach pracy. Przecinanie się linii świadczy o tym, że czas wtrysku uzupełniającego  $T_{w2}$  nadążnie dobierany jest do masy zassanego powietrza  $M_{A1}$ , a czas wtrysku wstępnego  $T_{w1}$  stanowi ok. 50% całej dawki paliwa potrzebnej na cykl dla założonego składu mieszanki  $\lambda^* = 1$ . Przebieg współczynnika nadmiaru powietrza mieszanki  $\lambda$  wyznaczony na podstawie zmierzonego strumienia powietrza i zasymulowanego wtrysku paliwa potwierdza bardzo małą jego zmienność i minimalne odchylenie od składu założonego.

W projekcie badawczym MNiSW nr N N 504 340636 systemu sterowania silnikiem GDI zbudowano mikroprocesorowy sterownik wtryskiwacza benzyny pracujący wg metody „z cyklu na cykl” [2, 5, 6]. Na etapie budowy wykorzystano metodę symulacji statycznej do oceny poprawności pracy sterownika. W tym celu rejestrowano dodatkowo sygnały:

- wtrysku paliwa do drugiego cylindra  $U_{w2}$ ,
- składu spalanej mieszanki w drugim cylindrze  $\lambda_n$ .

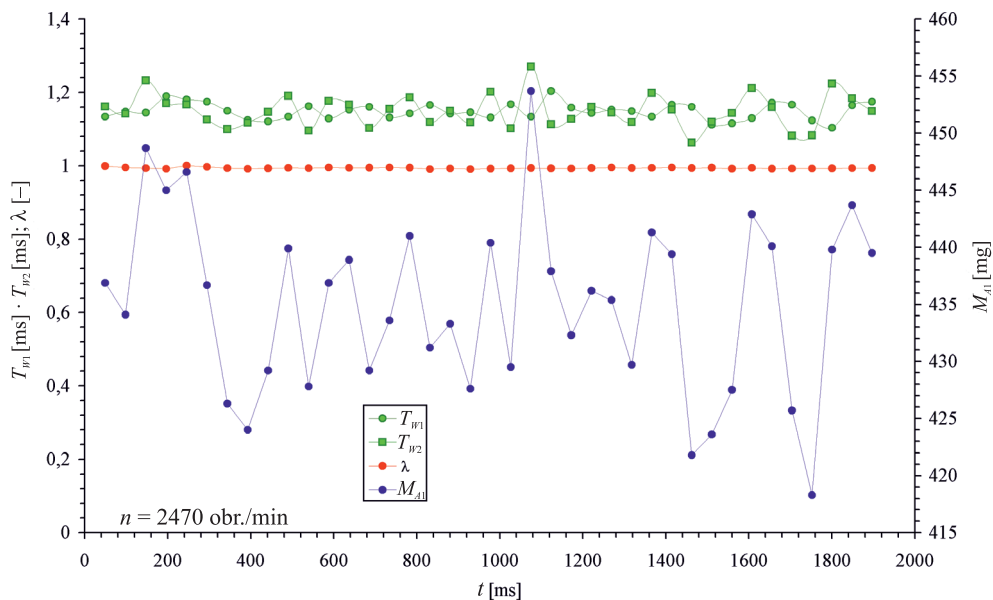
Na ich podstawie wyznaczono czasy wtrysków generowanych przez mikroprocesorowy sterownik. Przedstawienie ich na jednym wykresie z czasami symulowanymi pozwala określić poprawność pracy sterownika (rys. 9).

Na rysunku 9 uwidoczniło, że czasy wtrysków wygenerowane przez sterownik i pochodzące z symulacji różnią się. Widać też, że ich zmiana w obu przypadkach ma ten sam charakter. Świadczy to o tym, że sterownik działa poprawnie, biorąc pod uwagę istotę metody. Prawdopodobnie za różnice w czasach wtrysku odpowiada za mała dokładność próbkowania sygnału powietrza (w sterowniku używany jest przetwornik 10-bitowy).



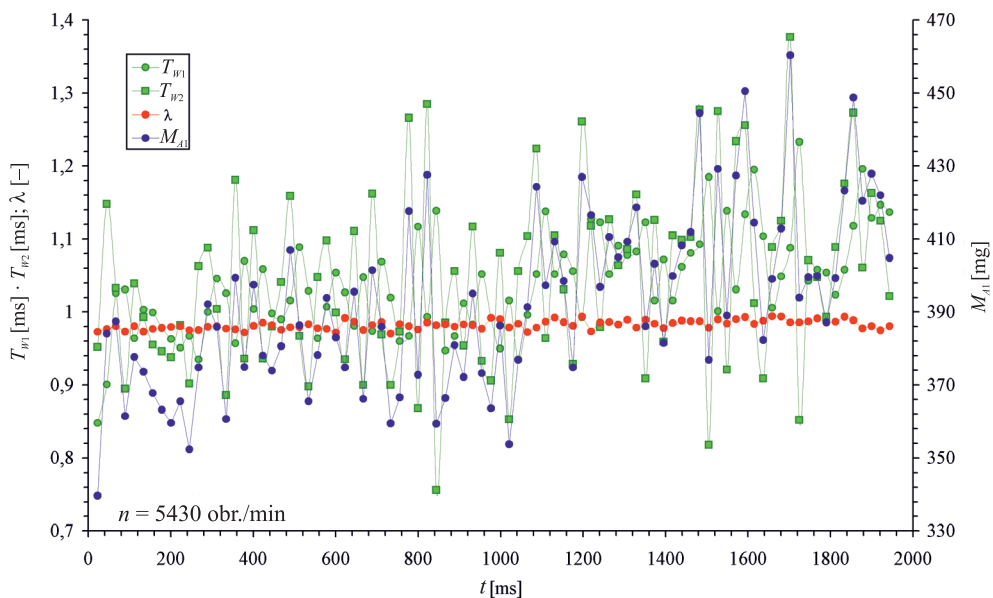
Rys. 6. Algorytm programu do symulacji sterowania „z cyklu na cykl” wtryskiem benzyny w silniku GDI samochodu Mitsubishi Carisma

Fig. 6. Algorithm of the program for simulating the control “from cycle to cycle” of the petrol injection into the engine GDI of the car Mitsubishi Carisma



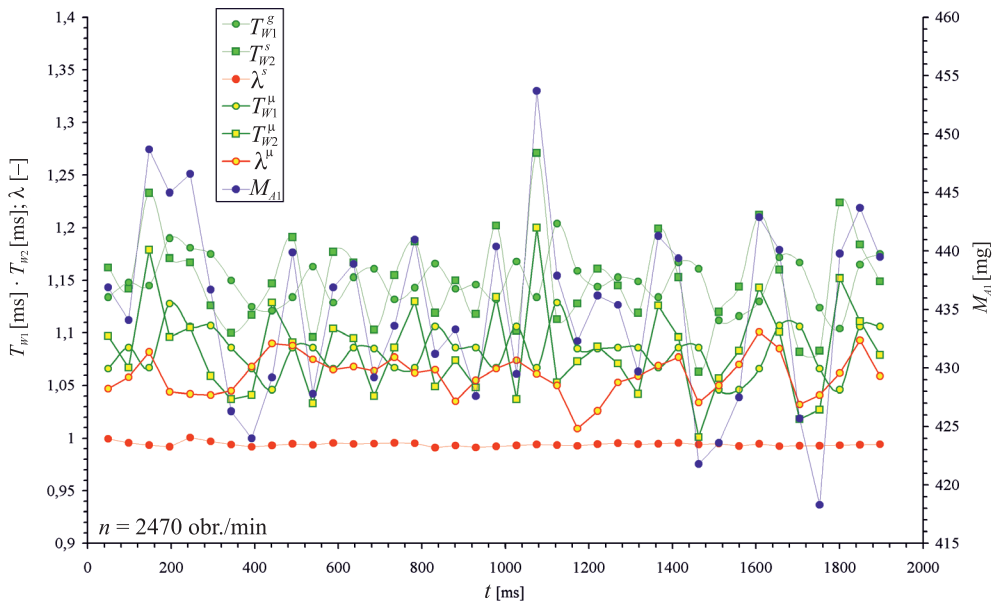
Rys. 7. Wynik symulacji sterowania „z cyklu na cykl” wtryskiem benzyny dla  $n = 2470$  obr./min

Fig. 7. The result of simulating the control “from cycle to cycle” of the petrol injection for  $n = 2470$  rpm



Rys. 8. Wynik symulacji sterowania „z cyklu na cykl” wtryskiem benzyny dla  $n = 5430$  obr./min

Fig. 8. The result of simulating the control “from cycle to cycle” of the petrol injection for  $n = 5430$  rpm



Rys. 9. Przykład porównania czasów wtrysków wygenerowanych przez rzeczywisty sterownik i poprzez symulację sterowania „z cyklu na cykl” wtryskiem benzyny dla  $n = 2470$  obr./min

Fig. 9. Example of a comparison of injection times generated by a real controller and by the simulation of the control “from cycle to cycle” of the petrol injection for  $n = 2470$  rpm

## 5. Wnioski

W artykule przedstawiono istotę metody „z cyklu na cykl” wtrysku benzyny w silniku GDI oraz jej syntezę i symulację statyczną w kilku punktach pracy. Na podstawie symulacji statycznej można stwierdzić, że metoda ta może być stosowana do silnika z bezpośrednim wtryskiem benzyny w celu utrzymania stałego składu mieszanki w każdym cyklu pracy. W metodzie tej bardzo ważny jest dokładny pomiar masy powietrza napełniającego cylinder silnika w każdym cyklu pracy. Z tego względu w praktycznej realizacji wymagany jest bardzo dokładny (wielobitowy) przetwornik sygnału z przepływomierza. Także sam przepływomierz musi się odznaczać krótkim czasem reakcji, a jego parametry nie mogą zmieniać się w czasie ani w funkcji temperatury. Na podstawie dotychczas przeprowadzonych badań można wyciągnąć wniosek, iż liniowe funkcje prędkości określające granice fazy pomiaru napełniania nie będą w sposób wystarczający opisywały fazy i trzeba będzie zastąpić je funkcjami bardziej złożonymi (np. wielomianem wyższego stopnia bądź dwuwymiarową mapą). Taka decyzja wymaga dalszych badań i będzie podjęta po ich przeprowadzeniu i analizie.

Artykuł jest kontynuacją prezentacji badań własnych w ramach projektu badawczego MNiSW nr N N 504 340636 systemu sterowania silnikiem GDI.

## Literatura

- [1] Nita J., Wołczyński Z., *Ocena fluktuacji cyklowego składu mieszanki w silniku z pośrednim wtryskiem benzyny*, Silniki Spalinowe 4/2009.
- [2] Bartczak M., Wołczyński Z., *Algorytm i realizacja sprzętowa sterowania wtryskiem benzyny w silniku GDI-MITSUBISHI*, Logistyka 6/2010.
- [3] Wołczyński Z., *Identification of fuel injection control system in a GDI engine*, Journal of KONES Powertrain and Transport, Vol. 17, No. 4, Warszawa 2010.
- [4] Wołczyński Z., *Identyfikation of properties of the GDI engine and its control system*, Silniki Spalinowe 3/2011(146).
- [5] Bartczak M., Wołczyński Z., *The algorithm of determination of injection time in "from cycle to cycle" control GDI engine*, Silniki Spalinowe 3/2011(146).
- [6] Bartczak M., Wołczyński Z., *Weryfikacja sprzętowej realizacji algorytmu generowania wtrysku w silniku GDI w sterowaniu z cyklu na cykl*, Logistyka 6/2011.
- [7] Wołczyński Z., *Metoda sterowania składem mieszanki paliwowo-powietrznej w silniku benzynowym*, rozprawa doktorska, Radom 2005.