

*silnik benzynowy, bezpośredni wtrysk paliwa,
mieszanka stechiometryczna, termoanemometr, wydatek masowy,
mikrokontroler, sterowanie wtryskiem benzyny*

Marek BARTCZAK¹
Zbigniew WOŁCZYŃSKI²

WERYFIKACJA SPRZĘTOWEJ REALIZACJI ALGORYTMU GENEROWANIA WTRYSKU BENZYNY W SILNIKU GDI W STEROWANIU Z CYKLU NA CYKL^{*)}

W referacie przedstawiono weryfikację sprzętowej realizacji algorytmu generowania wtrysku benzyny w silniku GDI w sterowaniu z cyklu na cykl. Przedstawiono także wyniki badań sprawdzających przeprowadzonych na silniku samochodu Mitsubishi Carisma.

THE VERIFICATION OF HARDWARE REALIZATION OF ALGORITHM OF GENERATION OF GASOLINE INJECTION IN „FROM CYCLE TO CYCLE” CONTROL GDI ENGINE

In this paper verification of hardware realization and algorithm of generation of gasoline injection in „from cycle to cycle” control GDI engine has been presented. The results of investigated verification test of the GDI-Mitsubishi engine of the Mitsubishi Carisma car are given too.

1. WSTĘP

Spalanie mieszanki paliwowo-powietrznej o składzie stechiometrycznym lub nieznacznie różniącym się od niego (współczynnik nadmiaru powietrza $\lambda = 0,997 \div 1,003$) gwarantuje dużą skuteczność oczyszczania spalin za pomocą katalizatora [3,7]. Zasilanie silnika mieszanką o właściwym składzie dla danego punktu pracy pozwala także na uzyskanie optymalnych osiągnięć silnika. W silniku z bezpośrednim wtryskiem GDI właściwy skład mieszanki można zapewnić w każdym cyklu pracy, gdyż wtrysk paliwa bezpośrednio do komory spalania jest możliwy również po zamknięciu zaworu dolotowego.

W celu dostarczenia paliwa do komory spalania odpowiednio do ilości zassanego powietrza, w każdym cyklu roboczym silnika dokonuje się pomiaru masy zassanego powietrza, na podstawie której oblicza się dawkę paliwa zapewniającą żądany skład mieszanki [2]. Masę zasysanego powietrza można wyznaczyć całkując numerycznie

¹ Politechnika Radomska, Wydział Transportu i Elektrotechniki, 26-600 Radom, ul. J. Malczewskiego 29,
tel: + 48 48 361-77-12, e-mail: marbart@poczta.onet.pl

² Politechnika Radomska, Wydział Mechaniczny 26-600 Radom, ul. Chrobrego 45,
tel: + 48 48 361-76-72, e-mail: z.wolczynski@pr.radom.pl

^{*)} Praca naukowa finansowana ze środków na naukę w latach 2009-2011 w ramach projektu badawczego nr N N504 340636

przebieg sygnału napięciowego z wyjścia termooanemometru, odpowiadającego masowemu wydatkowi powietrza m_A , w czasie otwarcia zaworów dolotowych, który określają kąty – odpowiednio – φ_{p1} i φ_{p2} położenia wału korbowego [4]. W celu lepszego wymieszania i odparowania paliwa, w silniku wtrysk części dawki paliwa, nie powodującej utworzenia mieszanki paliwowo-powietrznej bardziej bogatej niż żądana, jest realizowany na początku suwu napełniania, tj. ok. 30°OWK licząc od punktu GMP. Czas T_{w1} tego wtrysku sterownik mikroprocesorowy odczytuje z tablicy na podstawie aktualnej prędkości obrotowej wału korbowego i masy powietrza zassanego w poprzednim cyklu roboczym silnika. Drugi wtrysk paliwa następuje po napełnieniu cylindra powietrzem i obliczeniu dodatkowej dawki paliwa. Początek tego wtrysku przypada na 285°OWK po punkcie GMP w czasie suwu sprężania. Dla współczynnika nadmiaru powietrza $\lambda=1$ czas T_{w2} drugiego wtrysku można obliczyć ze wzoru

- obliczenie całkowitej żądanej masy paliwa M_F ze wzoru

$$M_F = \frac{M_{A1}}{14,7}$$

- obliczenie masy paliwa M_{F2} przypadającej na drugi wtrysk ze wzoru

$$M_{F2} = M_F - 12,054 \cdot T_{w1} - 1,0293$$

- obliczenie czasu drugiego wtrysku T_{w2} ze wzoru

$$T_{w2} = 0,08228551 \cdot M_{F2} - 0,0754$$

gdzie: M_F – całkowita żądana masa paliwa w mg,

M_{A1} – masa zassanego powietrza w mg,

M_{F2} – masa paliwa przypadająca na drugi wtrysk w mg,

T_{w1} – czas pierwszego wtrysku w μ s,

T_{w2} – czas drugiego wtrysku w μ s.

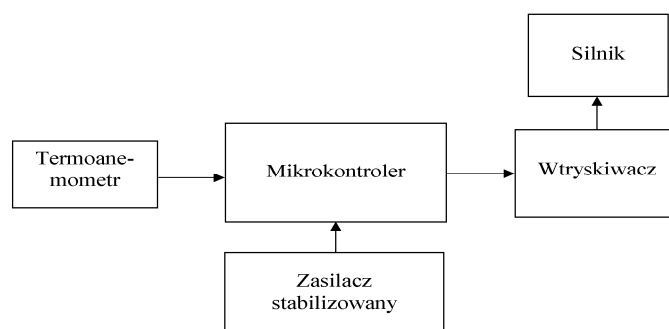
W niniejszym referacie przedstawiono weryfikację sprzętowej realizacji algorytmu generowania wtrysku benzyny w silniku GDI w sterowaniu z cyklu na cykl.

2. STEROWNIK WTRYSKU W SILNIKU GDI-MITSUBISHI

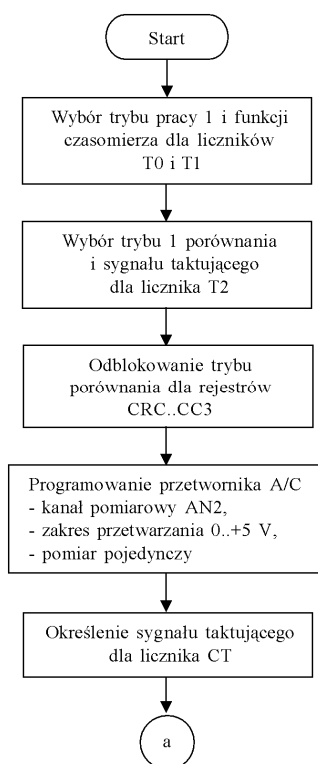
Schemat blokowy sterownika wtrysku paliwa w silniku GDI-Mitsubishi, opartego na mikrokontrolerze SAB80C517 firmy Siemens (odpowiednik SAF-80C517 prod. Infineon) [5] przedstawiono na rysunku 1, natomiast algorytm sterowania pracą wtryskiwaczy z zastosowaniem metody sterowania z cyklu na cykl jest pokazany na rysunku 2.

Sygnały sterujące pracą wtryskiwaczy są generowane na wyjściach P1.0, P1.1, P1.2 i P1.3 mikrokontrolera [1,2]. Sygnałem aktywnym jest poziom wysoki. Sygnały z czujnika położenia wału korbowego CAS i z czujnika wałka rozrządu CS są podawane na wejścia – odpowiednio – P1.4 i P1.5. Poziomy sygnałów wejściowych i wyjściowych są w pełni zgodne ze standardem TTL. Napięcie z wyjścia termooanemometru jest doprowadzane do wejścia analogowego AN2 wewnętrznego przetwornika A/C mikrokontrolera. Jako

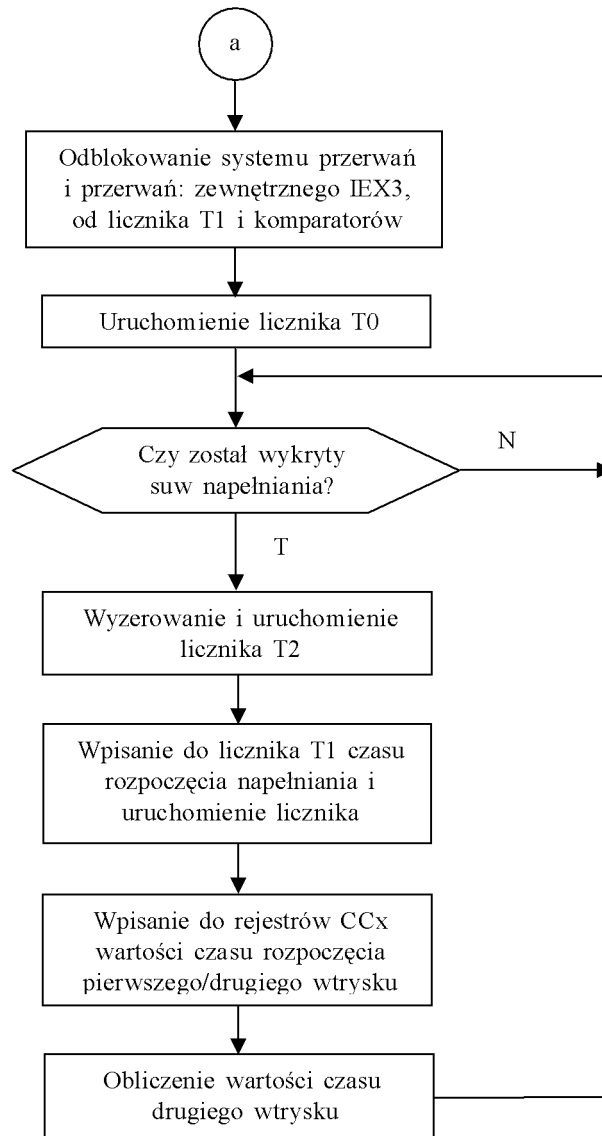
napięcie odniesienia wykorzystano napięcie zasilania mikrokontrolera. Częstotliwość rezonatora zewnętrznego sterującego pracą procesora wynosi 12 MHz. Sterownik jest zasilany napięciem stabilizowanym o wartości +5 V.



Rys. 1. Schemat blokowy sterownika wtrysku paliwa w silniku GDI-Mitsubishi



Rys. 2. Algorytm sterowania pracą wtryskiwaczy paliwa w silniku GDI- program główny



Rys. 2. Algorytm sterowania pracą wtryskiwaczy paliwa w silniku GDI cd.

Do odmierzenia czasu rozpoczęcia wtrysku oraz czasu trwania wtrysku jest wykorzystywany licznik T2 układu czasowo-licznikowego mikrokontrolera, pracujący w trybie 1 porównania, taktowany sygnałem o częstotliwości 1 MHz. Czas rozpoczęcia wtrysku jest odmierzany od opadającego zbocza sygnału z wyjścia czujnika położenia wału korbowego. Wartość tego czasu oblicza się z następującego wzoru

$$t_{\Theta} = \frac{(\Theta + \Delta) \cdot t_o}{180}$$

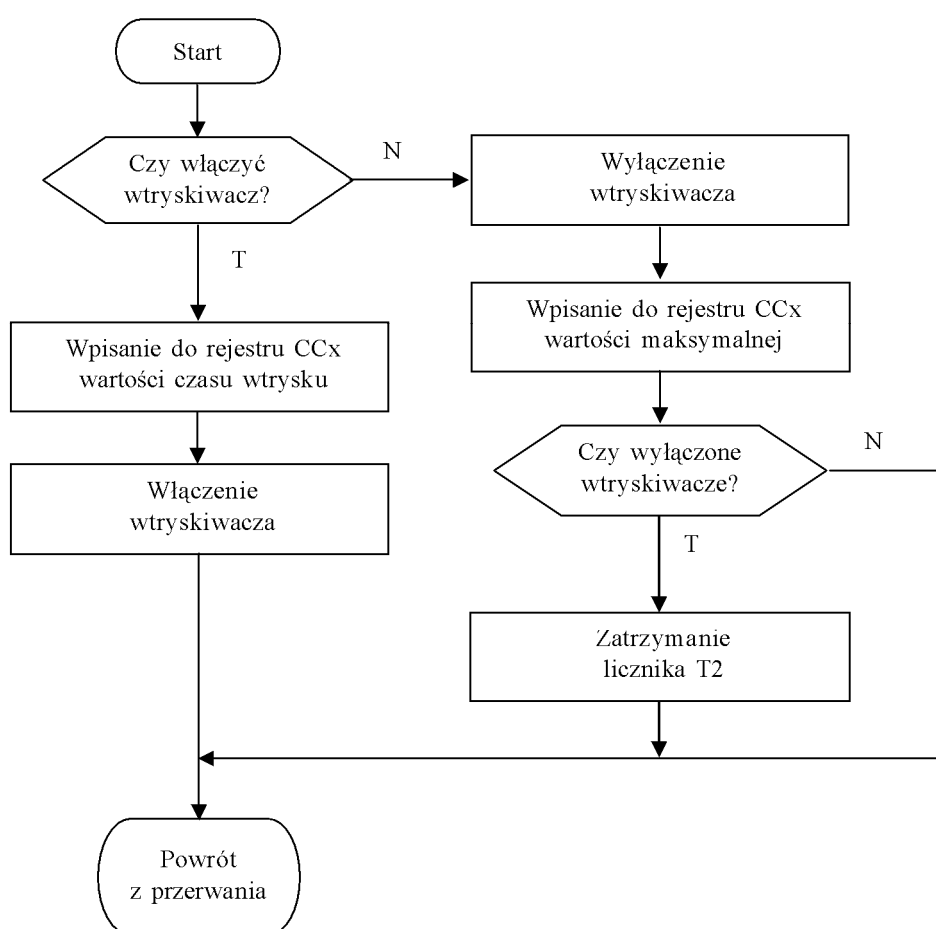
gdzie:

t_o - czas rozpoczęcia wtrysku w μs ,

Θ - kąt wyprzedzenia wtrysku w $^{\circ}\text{OWK}$,

Δ - przesunięcie kątowe między opadającym zboczem sygnału wyjścia z czujnika położenia wału korbowego a punktem GMP, wynoszące w rozpatrywanym przypadku 5°OWK ,

t_o - czas trwania półobrotu wału korbowego w μs .



Rys. 3. Algorytm obsługi przerwania od komparatora

Wpisanie wartości czasu rozpoczęcia wtrysku do właściwego rejestru CCx (CRC, CC1..CC3) licznika T2 i uruchomienie licznika następuje po wykryciu suwu napełniania.

Stan równości zawartości licznika T2 i rejestru CCx powoduje zmianę stanu odpowiedniego wyjścia P1.0..P1.3 sterującego pracą wtryskiwacza i wygenerowanie przerwania od komparatora. W danym momencie są aktywne maksymalnie dwa wyjścia. W podprogramie obsługi przerwania od komparatora (rys. 3), do rejestru CCx jest wpisywana wartość czasu wtrysku. Po odmierzeniu czasu wtrysku i wyłączeniu wtryskiwacza, do rejestru CCx zostaje wpisana wartość maksymalna. Licznik T2 zostaje zatrzymany po wyłączeniu obu wtryskiwaczy.

Czas trwania półobrotu wału korbowego jest mierzony między dwoma kolejnymi narastającymi zboczami sygnałów z czujnika położenia wału korbowego. Pomiar jest dokonywany za pomocą licznika T0, pracującego w trybie 1 jako czasomierz. Odczyt zawartości tego licznika i jego wyzerowanie następuje każdorazowo w podprogramie obsługi przerwania zewnętrznego IEX3 (rys. 4), generowanego przy zmianie stanu linii P1.4 na wysoki.

Czas pierwszego wtrysku jest odczytywany z tablicy umieszczonej w pamięci programu, na podstawie prędkości obrotowej silnika i ilości zasysanego powietrza, w podprogramie obsługi przerwania IEX3. Prędkość obrotowa silnika jest obliczana z zależności

$$n = \frac{30 \cdot 10^6}{t_o}$$

gdzie: n – prędkość obrotowa silnika w obr/min,

t_o – czas trwania półobrotu wału korbowego w μ s.

Ilość powietrza zasysanego do silnika wyznaczana jest metodą całkowania numerycznego przebiegu napięcia analogowego na wyjściu termooanemometru. Pomiar napięcia są wykonywane w pełnym zakresie przetwarzania (0..+5 V) przetwornika A/C. Odstęp czasu między dwoma kolejnymi pomiarami jest stały i wynosi 80 μ s. Do jego odmierzenia wykorzystano licznik CT mikrokontrolera, pracujący w trybie autoładowania wartości początkowej po przepełnieniu, taktowany sygnałem o częstotliwości 3 MHz. Wartość początkowa wpisywana do tego licznika wynosi $65536 - (3 \cdot 80) = 65296 \mu$ s.

W podprogramie obsługi przerwania od licznika CT jest uruchamiany przetwornik A/C do następnego pomiaru. Jednocześnie zostaje obliczona ilość zasysanego powietrza. Do odmierzenia czasu rozpoczęcia pomiaru zasysanego powietrza jak i czasu pomiaru zasysanego powietrza został użyty licznik T1, pracujący w trybie 1 jako czasomierz. Wartości te są obliczane w podprogramie obsługi przerwania IEX3 z zależności podanych niżej:

- czas rozpoczęcia pomiaru zasysanego powietrza

$$t_{\phi 1} = 4800 - \frac{632 \cdot t_o}{10000}$$

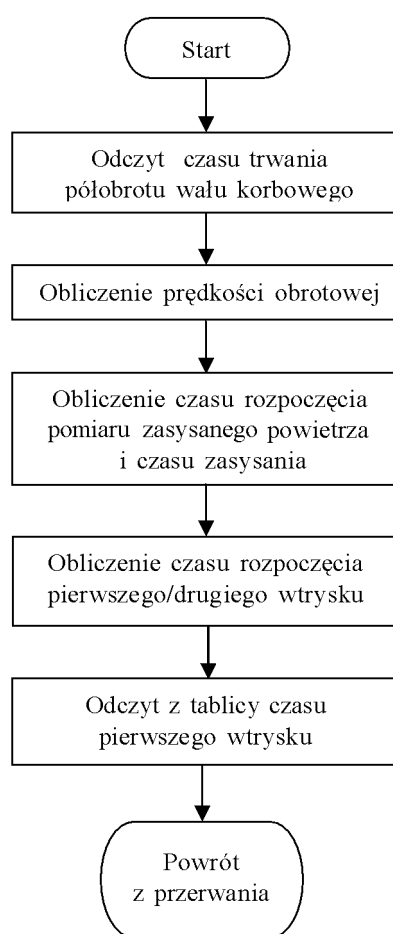
- czas pomiaru zasysanego powietrza

$$t_{\varphi 2-\varphi 1} = \frac{7142 \cdot t_o}{10000} - 1417$$

gdzie: $t_{\varphi 1}$ – czas rozpoczęcia pomiaru zasysanego powietrza w μs ,

t_o – czas trwania półobrotu wału korbowego w μs ,

$t_{\varphi 2-\varphi 1}$ – czas pomiaru zasysanego powietrza w μs .



Rys. 4. Algorytm obsługi przerwania zewnętrznego IEX3

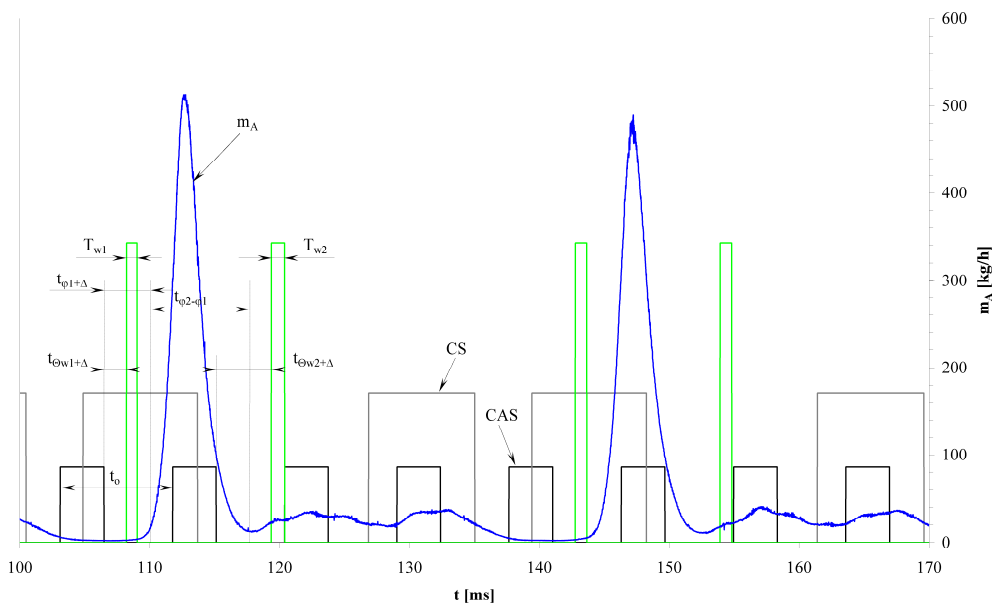
Na podstawie ilości zasysanego powietrza i czasu pierwszego wtrysku, w suwie sprężania jest obliczany czas drugiego wtrysku. Wartość tego czasu wyznacza się ze wzoru

$$T_{w2} = \frac{56 \cdot M_{A1} - 9919 \cdot T_{w1} - 1600965}{10000}$$

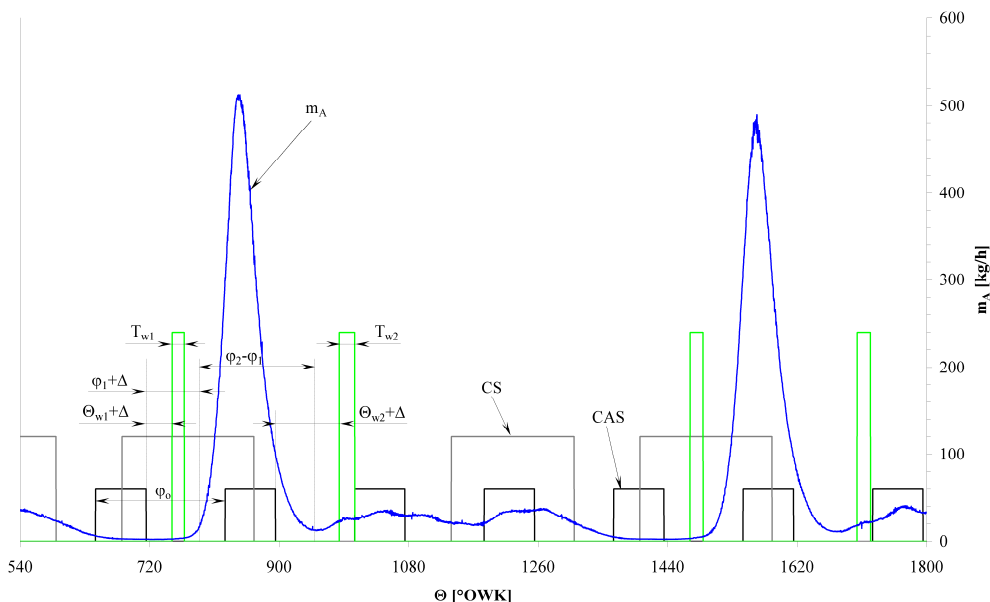
gdzie: T_{w2} – czas drugiego wtrysku w μs ,
 M_{A1} – masa zasysanego powietrza w μg ,
 T_{w1} – czas pierwszego wtrysku w μs .

3. BADANIA SPRAWDZAJĄCE ALGORYTMU

Poprawność działania opracowanego algorytmu generowania wtrysku benzyny w silniku GDI w sterowaniu z cyklu na cykl sprawdzono na stanowisku badawczym, którego funkcję spełniała hamownia podwoziowa znajdująca się w Zakładzie Mechatroniki Samochodowej Politechniki Radomskiej, która została wyposażona w silnik GDI zamontowany w samochodzie Mitsubishi Carisma. Sterownik podłączono do silnika za pośrednictwem interfejsu pomiarowo-sterującego, którego zadaniem było dostarczenie sygnałów z instalacji elektrycznej samochodu do mikrokontrolera i komputera pomiarowego oraz zapewnienie możliwości sterowania pracą wtryskiwacza drugiego cylindra z wyjścia sterownika.



Rys. 5. Przebiegi zarejestrowanych sygnałów w funkcji czasu: T_{w1} – czas pierwszego wtrysku, T_{w2} – czas drugiego wtrysku, $t_{\phi 1}$ – czas rozpoczęcia pomiaru zasysanego powietrza, $t_{\phi 2 - \phi 1}$ – czas pomiaru zasysanego powietrza, t_0 – czas trwania półobrotu wału korbowego, CAS – sygnał z czujnika położenia wału korbowego, CS – sygnał z czujnika wałka rozrządu



Rys. 6. Przebiegi zarejestrowanych sygnałów w funkcji kąta położenia wału korbowego: T_{w1} – długość pierwszego wtrysku, T_{w2} – długość drugiego wtrysku, φ_1 – kąt rozpoczęcia pomiaru zasysanego powietrza, $\varphi_2 - \varphi_1$ – przedział kątowy pomiaru zasysanego powietrza, φ_0 – kąt między dwoma kolejnymi zbroczeniami narastającymi sygnału CAS, CAS – sygnał z czujnika położenia wału korbowego, CS – sygnał z czujnika wałka rozrządu

Termoanemometr zamontowano w gałęzi kolektora dolotowego drugiego cylindra silnika, a do pomiaru składu mieszanki spalanej w tym cylindrze w gałęzi drugiej kolektora wylotowego zamontowano czujnik miernika MEXA 700 λ , którego wyjście dołączono do komputera pomiarowego. Badania przeprowadzono dla rozpędzania oraz pięciu statycznych punktów pracy silnika, mianowicie:

- minimalna prędkość obrotowa i zerowy moment obciążenia,
- maksymalna prędkość obrotowa i zerowy moment obciążenia,
- minimalna prędkość obrotowa i maksymalny moment obciążenia,
- maksymalna prędkość obrotowa i maksymalny moment obciążenia,
- średnia prędkość obrotowa i średni moment obciążenia.

W czasie badań rejestrowano jednocześnie sygnały, na podstawie których sterownik generował sygnał wtrysku oraz sygnał wyjściowy miernika MEXA 700 λ . Po zarejestrowaniu kilkusekundowych odcinków pracy silnika określono wszystkie parametry sterowania z cyklu na cykl w celu dokonania weryfikacji sprzętowej realizacji algorytmu generowania wtrysku. Przykładowo przebiegi zarejestrowanych sygnałów (drugi i trzeci cykl pracy silnika) w funkcji czasu i kąta położenia wału korbowego dla drugiego cylindra pokazano na rysunkach 5 i 6.

4. PODSUMOWANIE

Przeprowadzone badania wykazały poprawne działanie opracowanego algorytmu generowania wtrysku paliwa w silniku GDI-Mitsubishi z zastosowaniem metody sterowania

z cyklu na cykl. Sterownik poprawnie generował sygnały wtrysku. Poprawnie też była mierzona ilość zasysanego powietrza.

Dokładność termooanemometrycznego pomiaru ilości powietrza dostarczanego do silnika można zwiększyć przez zastosowanie mikrokontrolera SAB80C517A (odpowiednik SAF-C517A prod. Infineon) zawierającego wewnętrzny przetwornik A/C o rozdzielczości wynoszącej 10 bitów [6]. Ponadto, przy zastosowaniu rezonatora zewnętrznego o częstotliwości 24 MHz krok całkowania przebiegu sygnału napięcia z wyjścia termooanemometru może być dwukrotnie mniejszy i wynosić 40 μ s.

Wyniki weryfikacji sprzętowej realizacji algorytmu dla pozostałych punktów pracy silnika będą przedmiotem odrębnej publikacji.

5. LITERATURA

- [1] Bartczak M., Wołczyński Zb.: *Algorytm i realizacja sterowania wtryskiem paliwa w silniku GDI-Mitsubishi*, 14th International Conference Computer Systems Aided Science, Industry and Transport – TransComp 2010, Politechnika Radomska, Zakopane, 6.XII–9.XII.2010.
- [2] Bartczak M., Wołczyński Zb.: *Algorytm generowania czasu wtrysku w sterowaniu z cyklu na cykl w silniku GDI*, Kongres PTNSS-2011, Politechnika Radomska, Radom 2011.
- [3] Herner A., Riehl H.-J.: *Elektrotechnika i elektronika w pojazdach samochodowych*, Wydawnictwa Komunikacji i Łączności, Warszawa 2007.
- [4] Nita J.: *Determination of cylinder filling to control fuel injection*, EAEC-Congres Budapest 2007.
- [5] *Microcomputer Components SAB 80C517/80C537 8-Bit CMOS Single-Chip Microcontroller*, User's Manual 8.91, Siemens AG.
- [6] *Microcomputer Components SAB 80C517A/83C517A-5 8-Bit CMOS Single-Chip Microcontroller*, Addendum to User's Manual SAB 80C517-A/83C537 05.94, Siemens AG.
- [7] *Sterowanie silników o zapłonie iskrowym. Zasada działania, podzespoły*, Wydawnictwa Komunikacji i Łączności, Warszawa 2002.