

ALGORITHMS OF THE SW -680 ENGINE ELECTRONIC GOVERNOR

Mirosław Karczewski

Military University of Technology
Faculty of Mechanical Engineering
Gen. Sylwestra Kaliskiego 2, 00-908 Warsaw, Poland
tel. +48 022 6837754, e-mail: m.karczewski@wme.wat.edu.pl

Abstract

Creation of a appropriate programme of electronic control systems in diesel engines is key factor to use a central control unit, which could simultaneously and all in all realize the function of control of revolution speed, correction of fuel dose and also in more complicated versions to control different parts of an engine. The study about algorithm of the diesel engine control with regard on necessity of cover of many situations and conditioning of the engine work is complicated process and time-consuming. In the article was introduced the algorithm of the SW -680 diesel engine controlling with the electronic governor. The range of the engine work was divided on phase of starting and phase useful revolution speed. In every phase fuel dosage was worked out according to the algorithms of control. The methodology of equalization of dose fuel was showed in the paper. The correctness of working of algorithm was verified during investigations of a vehicle equipped with the electronic controller.

The control unit software worked out in the Flow chart the window of the ISaGraf pack and C++ was experimentally verified on the dynamometric stand (during start, in settled and unestablished states, and during modeling of supplementary cycle of load). The engine worked correctly in all states.

Keywords: the combustion engine, control, the electronic governor, algorithm of controlling, programme of controlling

ALGORYTMY ELEKTRONICZNEGO REGULATORA SILNIKA SW-680

Streszczenie

W elektronicznych układach sterowania silnikami o zapłonie samoczynnym kluczową kwestią jest stworzenie odpowiedniego programu dla centralnej jednostki sterującej, który mógłby jednocześnie i całościowo realizować funkcję regulatora prędkości obrotowej, korektora dawki paliwa, a w bardziej rozbudowanych wersjach sterować także innymi układami silnika. Opracowanie algorytmu sterowania silnikiem o zapłonie samoczynnym ze względu na konieczność uwzględnienia wielu czynników i sytuacji warunkujących pracę silnika jest procesem skomplikowanym i czasochłonnym. W artykule przedstawiono algorytm sterowania silnikiem SW-680 z regulatorem elektronicznym. Zakres pracy silnika podzielono na fazę rozruchu i użytecznej prędkości obrotowej silnika i dla każdej fazy opracowano algorytmy sterowania dawkowaniem paliwa. Przedstawiono metodykę korekcji dawki paliwa. Poprawność działania algorytmu została zweryfikowana doświadczalnie podczas badań poligonowych pojazdu wyposażonego w omawiany regulator.

Oprogramowanie sterownika napisane w języku Flow Chart okno pakietu ISaGraf oraz C++ zostało eksperymentalnie zweryfikowane na stanowisku dynamometrycznym (podczas rozruch, w stanach ustalonych i nieustalonych oraz podczas odtwarzania zastępczego cyklu obciążenia). We wszystkich stanach pracy silnik pracował poprawnie.

Słowa kluczowe: silnik spalinowy, sterowanie, regulator elektroniczny, algorytm sterowania, program sterowania

1. Wprowadzenie

W elektronicznych układach sterowania silnikami o zapłonie samoczynnym kluczową kwestią jest stworzenie odpowiedniego programu dla centralnej jednostki sterującej, który mógłby

jednocześnie i całościowo realizować funkcję regulatora prędkości obrotowej, korektora dawki paliwa, a w bardziej rozbudowanych wersjach sterować także innymi układami silnika (np. kątem wyprzedzenia wtrysku, turbosprężarką, fazami rozrządu, układem chłodzenia itp.) oraz spełniać zadania układu diagnostycznego.

Opracowanie algorytmu sterowania silnikiem o zapłonie samoczynnym ze względu na konieczność uwzględnienia wielu czynników i sytuacji warunkujących pracę silnika jest procesem skomplikowanym i czasochłonnym. W trakcie opracowywania algorytmu sterowania konieczne jest przeprowadzenie wielu prób z kolejnymi wersjami. Próby te w skrajnych przypadkach mogą doprowadzić do uszkodzenia silnika, dlatego też po stworzeniu algorytmu musi być poddany całemu szeregowi badań symulacyjnych, które mają na celu wyeliminowanie wszelkich błędów.

System tworzenia mieszanki i spalania w silnikach o zapłonie samoczynnym wymaga dodatkowych regulatorów prędkości obrotowej i korektorów dawki paliwa. Coraz częściej są to regulatory elektroniczne [8, 10]. Ich zadaniem jest zapewnienie:

- * niezawodnego rozruchu silnika w niskiej i wysokiej temperaturze otoczenia,
- * nie dopuszczenie do nadmiernego wzrostu dawki paliwa w stosunku do ilości powietrza dostarczonego do cylindra (przekroczenie granicy dymienia),
- * utrzymanie zadanej prędkości obrotowej silnika i zabezpieczenie przed przekraczaniem jej dopuszczalnej wartości,
- * ekonomicznej pracy silnika i minimalnej emisji toksycznych składników spalin,
- * uwzględnienia podczas sterowania silnikiem jak największej liczby wielkości istotnie wpływających na jego pracę,
- * stabilnej pracy silnika przy szybkich zmianach obciążenia, jakie występują w samochodach terenowych i maszynach roboczych,
- * współpracy z innymi zespołami sterowania układami silnika (np. ABS, ASR, układem zmiany kąta wyprzedzenia wtrysku paliwa lub początku otwarcia zaworów);

Tak duża liczba zadań może być zrealizowana tylko za pomocą urządzeń elektronicznych. Wymagają one algorytmizacji działania regulatora na podstawie zdefiniowanych modeli matematycznych regulatorów.

2. Cel i zakres pracy

Celem przedstawionej pracy było opracowanie modeli i algorytmów działania regulatora elektronicznego z nastawnikiem elektromagnetycznym listwy zębatej pompy wtryskowej, przy uwzględnieniu podstawowych czynników wpływających na pracę silnika. Algorytmy te oparto na danych silnika SW-680.

W opracowanym algorytmie przyjęto, że kierowca pojazdu będzie sterował silnikiem za pomocą pedału przyspieszenia (położenie **P**) oraz przełącznika dwustanowego w_1 umożliwiającego wyłączenie silnika. W czasie pracy silnika będzie mierzona jego prędkość obrotowa (poprzez pomiar prędkości obrotowej wałka krzywkowego pompy wtryskowej), temperatura otoczenia na zewnątrz silnika T_o , ciśnienie – P_d w kolektorze dolotowym (na jego końcu) oraz temperatura cieczy chłodzącej silnik T_{ch} .

Algorytm programu głównego w zapisie programowym jest przedstawiony na rys 1. Program rozpoczął pracę z chwilą podjęcia przez kierowcę czynności uruchomienia silnika i włączenia zasilania. Wtedy uruchamiany był mikrokontroler, który ładował system operacyjny i program sterujący silnikiem wraz z jego podprogramami. Praca programu trwała do chwili wyłączenia silnika za pomocą przełącznika w_1 .

Program sterownika został podzielony na trzy podstawowe bloki:

- program główny (wczytanie danych, wybór podprogramu w zależności od prędkości obrotowej),
- podprogram rozruch – realizacja rozruchu silnika,

- podprogram regulacja – sterowanie silnikiem w zakresie użytecznych prędkości obrotowych, utrzymywanie zadanej prędkości biegu jałowego (w zależności od temperatury silnika) oraz korekcja dawki paliwa.

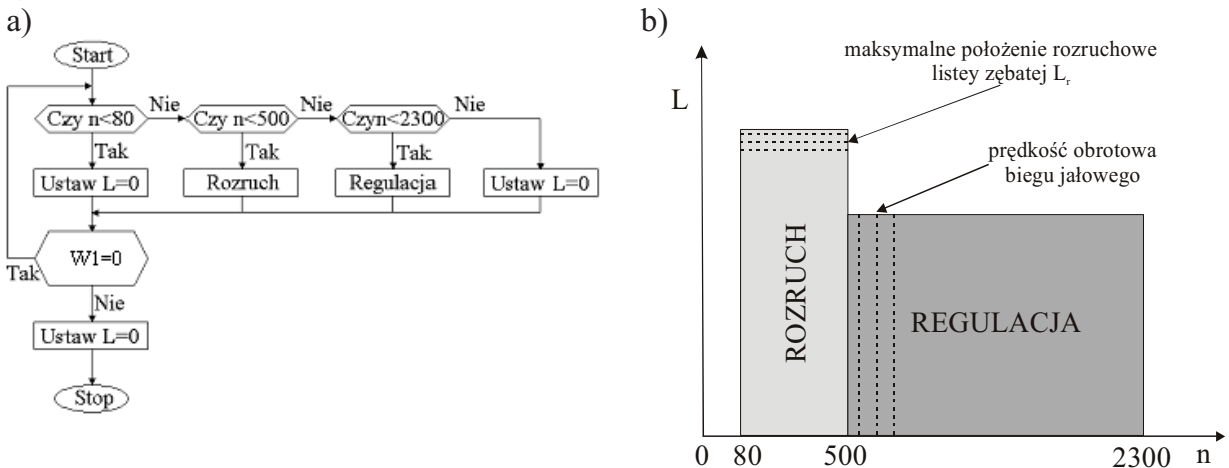


Rys. 1. Ogólna struktura programu sterowania silnikiem
 Fig. 1. General structure of controll programme of the engine

3. Algorytm sterowania silnikiem

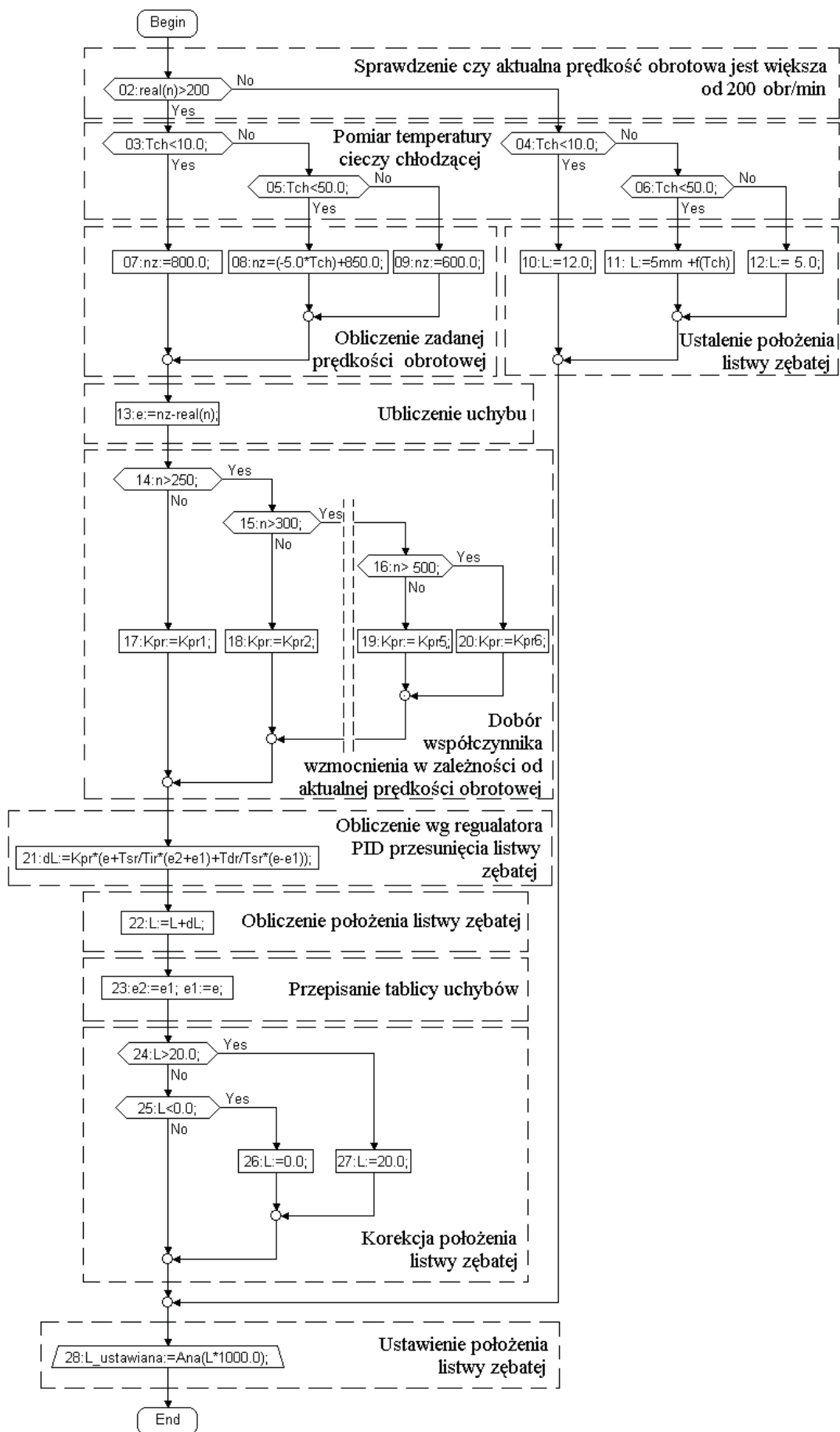
W chwili uruchomienia programu w pierwszej kolejności mierzona była aktualna prędkość obrotowa silnika. Jeżeli była ona mniejsza od 80 obr/min lub większa od 2300 obr/min, listwa ustawiana była na 0 mm (rys. 2). W zakresie od 80 do 500 uruchamiany był podprogram ROZRUCH. Jeżeli prędkość obrotowa mieściła się w zakresie 500...2300 obr/min program główny uruchamiał podprogram REGULACJA. Prędkość obrotowa w zakresie, w którym była uruchamiana procedura rozruchu, celowo była ograniczona do 500 obr/min a nie do prędkości obrotowej biegu jałowego, gdyż przy większej prędkości zachodziło samoczynne włączenie procedury rozruchu przy niestabilnej pracy silnika na biegu jałowym. Prędkość obrotowa w zakresie, której była uruchamiana procedura regulacji została celowo zwiększona do 2300 obr/min w celu eliminacji niestabilnej pracy w okolicach prędkości obrotowej 2200 obr/min. Prędkość maksymalna (2200 obr/min) jest ograniczana w procedurze regulacja.

Uruchomienie z poziomu programu głównego dowolnego podprogramu powodowało wstrzymanie wykonywania programu uruchamiającego. Program główny był zatrzymywany do chwili zakończenia realizacji podprogramu. Niemożliwe było jednoczesne wykonywanie programu uruchamianego i uruchamiającego. Strukturę programu głównego przedstawiono na rysunku 2.



Rys. 2. Algorytm głównego programu sterującego (a) oraz charakterystyka statyczna regulatora (b)
 Fig. 2. The algorithm of a main programme of controll (a) as well as the static characteristic of governor (b)

Jeżeli podprogram ROZRUCH zakończył swoje działanie, wtedy wznawiał swoją pracę program główny. W następnej kolejności sprawdzana była pozycja przełącznika w_1 . Jeżeli był on przełączony na zakończenie pracy, listwa ustawiana była w położenie odcięcia dawki paliwa i program kończył swoje działanie, a silnik zatrzymywał się. Jeżeli pozycja wyłącznika wskazywała na kontynuację pracy, wówczas ponownie dokonywany był pomiar prędkości obrotowej silnika. Wprowadzenie do pamięci mikrokontrolera wartości wielkości wejściowych (np. prędkości obrotowej silnika) odbywało się automatycznie.



Rys. 3. Algorytm podprogramu ROZRUCH
 Fig. 3. The algorithm of the START UP subroutine

3.1. Podprogram „Rozruch”

Podprogram ROZRUCH był aktywny, gdy wartość prędkości obrotowej silnika mieściła się w przedziale 80...500 (rys. 3). Po osiągnięciu przez silnik prędkości $n = 80$ obr/min listwa zębata pompy wtryskowej była przesunięta w położenie dawki rozruchowej L_r .

Prędkość $n = 80$ obr/min została dobrana doświadczalnie, ponieważ jest to minimalna prędkość zapewniająca niezawodny rozruch silnika. W kolejnym etapie sprawdzano czy silnik przekroczył prędkość 200 obr/min, która świadczyła o wystąpieniu pierwszych samozapłonów mieszanki paliwowo powietrznej. Jeżeli prędkość obrotowa była mniejsza od 200 obr/min, wówczas maksymalne położenie listwy zębatej ustawiane było w zależności od temperatury silnika. Po uruchomieniu silnika następowało zmniejszanie dawki paliwa według charakterystyki regulatora PID, tak aby osiągnięta została dawka biegu jałowego silnika.

Odpowiednio dla temperatury cieczy chłodzącej silnika ustalana była prędkość obrotowa biegu jałowego. Przyjęto, że poniżej temperatury 10°C silnik jest zimny i prędkość biegu jałowego była zwiększana do 800 obr/min, natomiast dla silnika rozgrzanego ($T_{ch} > 50^{\circ}\text{C}$) wynosiła 600 obr/min. W zakresie temperatur $10^{\circ}\text{C} < T_{ch} < 50^{\circ}\text{C}$ prędkość obrotowa biegu jałowego była OBLICZANA w zależności od temperatury.

Przekroczenie przez silnik zadanej prędkości obrotowej biegu jałowego powodowało uruchomienie podprogramu REGULACJA. W celu zmiany ustalonej w procedurze rozruch prędkości obrotowej biegu jałowego wraz z rozgrzewaniem się silnika w programie REGULACJA znajdowała się procedura bieg jałowy.

3.2. Podprogram „REGULACJA”

Podprogram regulacja był wykonywany, gdy wartość prędkości obrotowej silnika mieściła się w granicach 500 – 2300 obr/min. Algorytm tego programu przedstawiono na rys.4. Strukturalnie jest on bardzo zbliżony do algorytmu programu ROZRUCH.

W programie REGULACJA wartości stałej wzmocnienia proporcjonalnego i stałej czasowej członu różniczkującego T_D regulatora PID dobierane były w zależności od uchybu prędkości obrotowej. Po przekroczeniu przez silnik prędkości obrotowej biegu jałowego n_j program REGULACJA przechodził w tryb sterowania, w którym jego prędkość obrotowa zależała od położenia pedału przyspieszenia.

W pierwszym kroku ustalana była prędkość obrotowa biegu jałowego (podobnie jak w programie ROZRUCH) w czasie rozgrzewania silnika odpowiednio do temperatury cieczy chłodzącej.

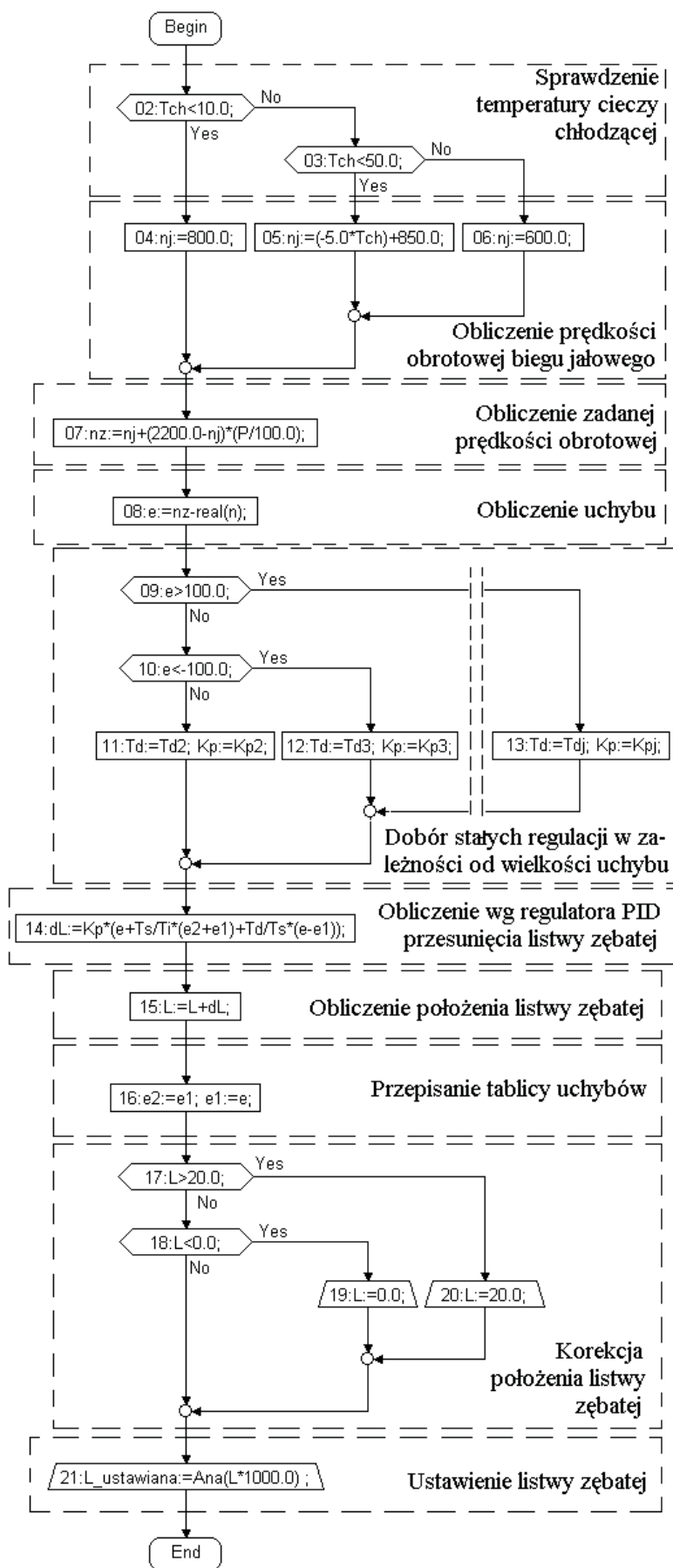
W drugim etapie pracy programu określana była zadana prędkość obrotowa silnika na podstawie pozycji pedału przyspieszenia P oraz obliczonej prędkości biegu jałowego wg zależności:

$$n_z = n_j + (2200 - n_j) \cdot \left(\frac{P}{100} \right). \quad (1)$$

W kolejnym kroku obliczany był uchyb prędkości obrotowej na podstawie bieżącej prędkości obrotowej i prędkości zadanej n_z , a na jego podstawie dobierane były współczynniki równania regulatora K_P i T_D . Po określeniu zadanego położenia listwy zębatej pompy wtryskowej, sterownik sprawdzał czy nie przekroczono jej maksymalnego położenia, co mogłoby w konsekwencji doprowadzić do rozbiegania się silnika.

Położenie listwy odpowiadające maksymalnej dawce paliwa było ograniczone parametrami powietrza w kolektorze dolotowym (temperaturą i ciśnieniem). Funkcja ta była realizowana w podprogramie „korekcja dawki paliwa”.

Po wykonaniu tego podprogramu następował powrót do programu głównego, sprawdzenie prędkości obrotowej silnika oraz poziomu sygnału w_1 .

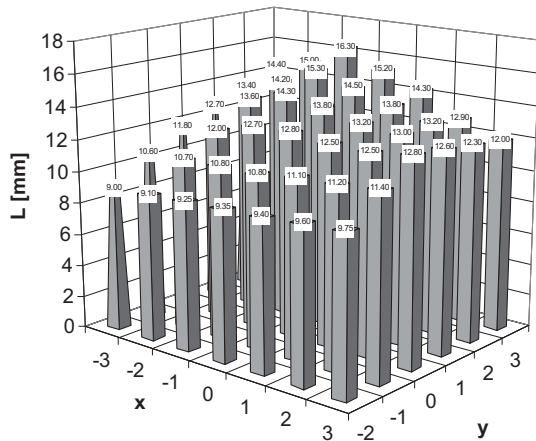


Rys. 4. Uproszczony algorytm programu sterującego silnikiem w zakresie użytecznym (bez korekcji dawki paliwa)
 Fig. 4. The simplified algorithm of the engine control programme in useful range (without correction of fuel dose)

3.3. Podprogram „KOREKTOR”

Algorytm korekcji dawki paliwa został włączony do algorytmu regulacji prędkości obrotowej i stanowi jego część składową. Aby można było w prosty sposób określić odpowiednie położenie listwy zębatej pompy wtryskowej opisano je funkcją matematyczną.

Przy wyznaczaniu równania korekcji wykorzystano wyniki badań przedstawionych w [8], a po standaryzacji zmiennych niezależnych miały one postać przedstawioną rysunku 5.



Rys.5. Optymalne położenie listwy zębatej pompy wtryskowej

Fig.5. Optimum position of a controll rack of the injection's pump

Do określenia równania przybliżonej regresji posłużono się metodą najmniejszych kwadratów wyrażoną w zapisie macierzowym, która należy do najczęściej stosowanych metod analizy regresji i korelacji funkcji wielu zmiennych.

W pierwszym etapie dokonano standaryzacji zmiennych wejściowych x i y przyporządkowując poszczególnym wartościom prędkości obrotowej (1000 – 2200 obr/min, co 200 obr/min) kolejne liczby całkowite z przedziałów: od -3 do 3 , a gęstości powietrza za turbosprężarką ($1.35 - 1.85 \text{ kg/m}^3$, co 0.1 kg/m^3) liczby z przedziału od -2 do 3 . Przedstawiono je na rys. 5.

Dzięki przeprowadzonej standaryzacji możliwe było uproszczenie obliczeń na macierzach oraz uzyskanie lepszego uwarunkowania procedury wyznaczania współczynników regresji. Następnie dokonano

przybliżenia powierzchni wielomianem drugiego, trzeciego i czwartego stopnia oraz zbadano dokładność przybliżania za pomocą opracowanego programu komputerowego.

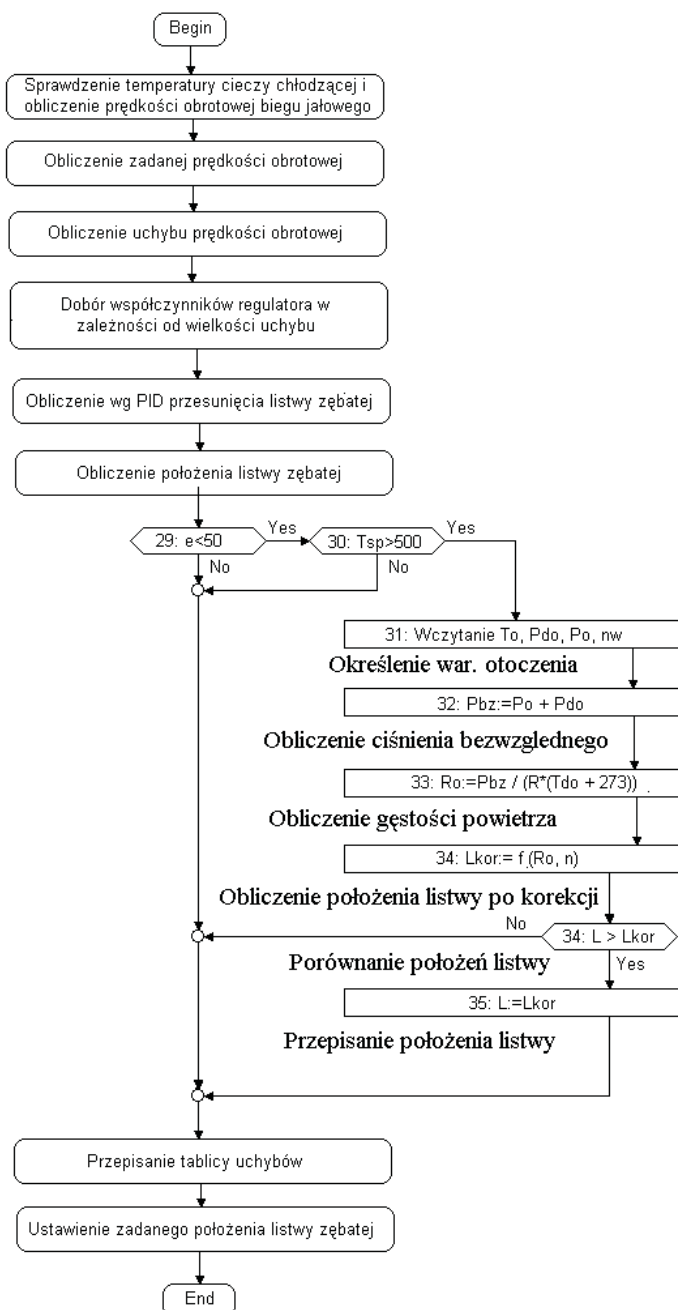
Dzięki przeprowadzonej standaryzacji możliwe było uproszczenie obliczeń na macierzach oraz uzyskanie lepszego uwarunkowania procedury wyznaczania współczynników regresji. Następnie dokonano przybliżenia powierzchni wielomianem drugiego, trzeciego i czwartego stopnia oraz zbadano dokładność przybliżania. Najlepsze rezultaty otrzymano dla funkcji regresji w postaci równania czwartego stopnia. Wartość wariancji resztowej wzniosła $S_{\text{reszt}}=0.09$, a współczynnik korelacji wielowymiarowej $R=0.994$.

Po odwrotnej transformacji zmiennych standaryzowanych na wartości zmiennych rzeczywistych uzyskano funkcję uzależniającą maksymalne położenie listwy sterującej pompy wtryskowej od prędkości obrotowej silnika i parametrów powietrza w kolektorze dolotowym silnika.

$$\begin{aligned}
 L = & -3,15 \cdot 10^{-11} n^4 + 351 \rho^4 - 3 \cdot 10^{-6} \rho^2 n^2 - 8,3 \cdot 10^{-2} \rho^3 n - 1 \cdot 10^{-8} \rho n^3 + 0,39 \rho^2 n + \\
 & + 14,8 \cdot 10^{-7} \rho n^2 - 10,5 \cdot 10^2 \rho^3 + 1,1 \cdot 10^{-8} n^3 - 6,01 \rho n + 15 \cdot 10^2 \rho^2 - 3,8 \cdot 10^{-5} n^2 - \\
 & - 150,4 \rho + 0,05 n - 2,27 \cdot 10^3.
 \end{aligned} \quad (2)$$

Algorytm korekcji uaktywnia się jedynie, gdy wzrośnie uchyb prędkości obrotowej powyżej wartości dopuszczalnej oraz gdy wzrośnie temperatura spalin, co świadczy o zwiększonym obciążeniu silnika.

Zwiększony uchyb regulacji świadczy o przejściu silnika do pracy w stanach nieustalonych, co może spowodować przekroczenie granicy dymienia silnika. Jako wartość dopuszczalną przyjęty został uchyb $e_n = 50 \text{ obr/min}$.



Rys.6. Uproszczony algorytm korekcji dawki paliwa jako część algorytmu regulacji prędkości obrotowej silnika SW-680

Fig.6. The simplified algorithm of fuel dose correction as part of algorithm of adjustment rotatory speed of the SW -680 engine

Kolejnym warunkiem uruchomienia algorytmu korekcji jest odpowiednio wysoka temperatura spalin, wskazująca na osiągnięcie przez silnik zakresu średnich i dużych obciążeń, w którym wzrasta prawdopodobieństwo przekroczenia granicy dymienia. Na podstawie analizy rezultatów badań eksperymentalnych przyjęto jako minimalną, wartość temperatury spalin $T_{sp} = 500^{\circ}\text{C}$.

Jeśli obydwa warunki są spełnione, za pomocą uruchomionego program KOREKCJA obliczana jest maksymalna, dopuszczalna dawka paliwa, przeliczona na położenie listwy zębatej pompy wtryskowej. Wartość skorygowana położenia listwy pompy (L_k) porównywana jest następnie z wartością obliczoną zgodnie z równaniem regulatora PID (L), a jako ostateczne położenie listwy przyjęta zostaje wartość mniejsza spośród powyższych.

Schemat wydzielonego algorytmu korekcji dawki paliwa przedstawiono na rysunku 6. Jego działanie rozpoczyna się od wczytania zmiennych wejściowych, takich jak:

- temperatura powietrza w kolektorze dolotowym (T_{do}),
- ciśnienie powietrza w kolektorze dolotowym za sprężarką (p_{do}),
- ciśnienie atmosferyczne (p_o),
- prędkość obrotowa wałka pompy wtryskowej (n_w).

Następnie obliczana była wartość bezwzględnego ciśnienia powietrza w kolektorze dolotowym (p_{bz}), która wraz z temperaturą powietrza (T_{do}) została wprowadzona do równania na gęstość powietrza w kolektorze dolotowym. W dalszej części następuje przeliczenie prędkości obrotowej wałka pompy (n_w) na prędkość obrotową silnika (n). Wartości gęstości powietrza w kolektorze dolotowym i prędkości obrotowej silnika podstawione zostają do równania korekcji obliczającej skorygowane położenie listwy pompy wtryskowej (L_k).

4. Podsumowanie

Na podstawie przedstawionych algorytmów opracowano wersję programu do sterowania silnikiem za pomocą nastawnika elektromagnetycznego i mikrosterownika we wszystkich fazach pracy silnika. W tym celu wykorzystano pakiet oprogramowania firmy CJ Internatinal, dostarczonym przez producenta sterownika. Oprogramowanie sterownika napisano w języku Flow Chart okno pakietu ISaGraf oraz C++. Oprogramowanie zostało eksperymentalnie zweryfikowane na stanowisku dynamometrycznym (podczas rozruch, w stanach ustalonych i nie ustalonych oraz podczas odtwarzania zastępczego cyklu obciążenia).

We wszystkich stanach pracy silnik pracował poprawnie. Nie dochodziło do rozbiegania się silnika ani jego samoczynnego gaśnięcia.

Literatura

- [1] Hikosaka, N., *A view of the Future of Automotive Diesel Engines*, SAE 972682.
- [2] Dorna, G., Klaus, R., Polaszek A., *System sterowania silnikiem SW-400 z mikrokontrolerem 80C535*, III Symp. Naukowe. Automatyzacja pracy silników wysokoprężnych AUTOMA-SIL 96, Poznań, 1996.
- [3] Kaczorek, T., *Teoria układów regulacji automatycznej*, WNT, Warszawa 1974.
- [4] Karczewski, M., Świątek, S., Walentynowicz, J., *Wstępny dobór parametrów elektronicznego regulatora pompy wtryskowej silnika o zapłonie samoczynnym*, Biuletyn WAT XLVII, nr 6, 1998.
- [5] Karczewski, M., Walentynowicz, J., *Dobór parametrów regulacji silnikiem o zapłonie samoczynnym*, IV Sympozjum Naukowe. Automatyzacja pracy silników wysokoprężnych AUTOMA-SIL 99, Poznań, 1999.
- [6] Klaus, R., *Synteza wybranych algorytmów zabezpieczeń i sterowania silnikiem wysokoprężnym*, III Sympozjum Naukowe. Automatyzacja pracy silników wysokoprężnych AUTOMA-SIL 96, Poznań 1996.
- [7] Krutow, W., *Automatyczna regulacja silników spalinowych*, PWT, Warszawa, 1960.
- [8] Karczewski, M., *Sterowanie silnikiem o zapłonie samoczynnym za pomocą regulatora elektronicznego*, Rozprawa doktorska, WAT, Warszawa, 2005.
- [9] Ochocki, W., *Automatyzacja silnika SW 400*, II Sympozjum Naukowe. Automatyzacja pracy silników wysokoprężnych AUTOMA-SIL 94, Poznań, 1994.
- [10] Ochocki, W., *Numerycznie sterowane systemy wtrysku paliwa silników wysokoprężnych*, PTPN Poznań, 1994.

