

Dariusz KOŚCIELNIK

AKADEMIA GÓRNICZO-HUTNICZA, KATEDRA ELEKTRONIKI, Al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków

Adaptacyjna korekcja mapy paliwa i mapy zapłonu silnika wyczynowego

Dr inż. Dariusz KOŚCIELNIK

Ukończył studia na kierunku Elektronika Wydziału Elektrotechniki, Automatyki i Elektroniki Akademii Górniczo-Hutniczej, Od 1992 roku pracuje w Katedry Elektroniki AGH, gdzie zajmuje się optymalizacją topologii i protokołów transmisyjnych dla sieci komunikacji międzyprocesorowej w systemach o inteligencji rozproszonej. Realizuje liczne projekty na zlecenie przemysłu. Tematem ostatnich z nich były: sterownik tłokowego silnika lotniczego oraz system pomiarowy dla hamowni podwozowej i silnikowej.

e-mail: koscieln@agh.edu.pl

**Streszczenie**

W artykule przedstawiono konstrukcje oraz sposób działania, programowalnego sterownika silnika spalinyowego z zapłonem iskrowym, opracowanego na potrzeby tuningu samochodów sportowych. Opisano sposób sprzęgania komputera z systemem docelowym, algorytm jego pracy oraz struktury wykorzystywanych danych. Przedstawiono modyfikacje wprowadzone do ostatniej, czwartej wersji sterownika, dotyczące sposobu adaptacyjnego korygowania map: paliwa i zapłonu.

Słowa kluczowe: ECU, mapa paliwa, mapa zapłonu.

The adaptive correction of the fuel map and the ignition map for the combustion engine**Abstract**

An engine of a race car is exposed to permanent modifications. As a result of realised modifications, the engine's parameters are still changing. A correct control of the supply of such engine needs many corrections of the single parameters and sometimes also of the algorithms used. The structure and functioning of the programmable controller for combustion engines with spark ignition, designed for the tanned sports cars there is presented in the paper. The method of connection of the computer with the target system has been presented in the first part. The second part has been dedicated to data structures and the working algorithms of the controller. The newest version of the computer presented in the paper seems to be a solution that meets all requirements concerning controllers used in race car engines. The enormous advantage of the solution is its universality, obtained thanks to the possibility of defining of main parameters within target system software, the most important being: the number and the layout of cylinders, construction of the pulse wheel and the structure of fuel and ignition systems. The user can chose different algorithms, concerning for instance the way of control of the injectors. The algorithms can be chosen according to the equipment of a given car as well as the user's preferences.

Keywords: electronic control unit, fuel map, ignition map.

1. Wstęp

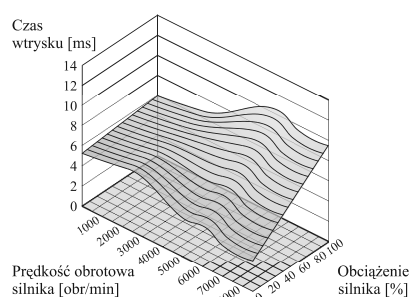
Pracę zdecydowanej większości samochodowych silników z zapłonem iskrowym nadzorują specjalizowane komputery, nazywane jednostkami sterującymi – ECU (ang. electronic control unit) lub po prostu sterownikami. Urządzenia te określają sposób zasilania silnika w jego aktualnym punkcie pracy, gwarantując osiągnięcie wymaganego momentu obrotowego przy jednoczesnym ograniczeniu zużycia paliwa oraz emisji związków toksycznych.

Sposób działania typowego sterownika polega na śledzeniu w czasie rzeczywistym stanu silnika i określaniu na tej podstawie dawki paliwa oraz kąta wyprzedzenia zapłonu. Punkt pracy silnika wyznaczają: jego aktualna prędkość obrotowa oraz obciążenie, którego miarą może być m.in. stopień uchylenia przepustnicy. Komputer analizuje także sygnał czujnika tleny w spalinach (sondy lambda). Na podstawie jego wskazań można określić, czy ładunek dostarczany do cylindrów nie jest zbyt ubogi lub zbyt

bogaty. Wprowadzana korekta pozwala przygotowywać mieszankę o składzie możliwie bliskim do stechiometrycznego.

Innym źródłem dokonywanych poprawek są informacje na temat: temperatury silnika, temperatury zasysanego powietrza oraz ciśnienia bezwzględego. ECU steruje także kilkoma układami wykonawczymi, których przykładami mogą być: silnik krokowy stabilizacji obrotów biegu jałowego, pompa paliwa, siłownik przepustnicy oraz zawór recyrkulacji spalin.

Informacje o ilości wtryskiwanego paliwa oraz kącie wyprzedzenia zapłonu są zwykle przechowywane w postaci map, nazywanych odpowiednio: mapą paliwa i mapą zapłonu. Każda z map wyznacza trójwymiarową powierzchnię rozpiętą nad siatką współrzędnych, określających punkt pracy silnika (rys. 1).



Rys. 1. Przykładowy kształt mapy paliwa

Fig. 1. An example of a fuel map

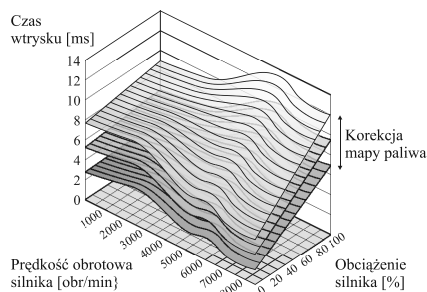
Informacja o aktualnej prędkości obrotowej silnika jest dostarczana przez czujnik indukcyjny, umieszczony przy krawędzi stalowego koła zębatego, zespolonego z wałem korbowym. Zmiany pola magnetycznego wywołane przez przesuujące się zęby indukują w uzwojeniu sygnał sinusoidalny o częstotliwości i fazie zgodnych z zarysem krawędzi zębów.

Wygenerowanie impulsu zapłonowego, wyprzedzającego o zadany kąt górny martwy punkt (GMP) danego tłoka, a także wyznaczenie właściwych momentów otwierania poszczególnych wtryskiwaczy wymaga precyzyjnego określenia aktualnego położenia wału korbowego. Punktem odniesienia jest puste miejsce po zębie, lub kilku kolejnych zębach usuniętych z koła impulsatora. Brak tych zębów zmienia kształt sygnału generowanego przez czujnik indukcyjny.

Stan aktualnego obciążenia silnika może być szacowany w różny sposób. Najprostszym rozwiązaniem jest uwzględnienie kąta uchylenia przepustnicy. Inne polega na pomiarze podciśnienia w kolektorze ssącym. Największą dokładność można uzyskać instalując przepływomierz w rurze ssącej. Urządzenie to jest jednak niechętnie stosowane w silnikach wyczynowych ponieważ tamuje swobodny przepływ gazu i niekorzystnie wpływa na uzyskiwane osiągi. Wady tej nie mają przepływomierze z gorącą płytką (termoanemometry płytkowe), ale one z kolei wymagają precyzyjnej i okresowo powtarzanej kalibracji oraz są bardzo wrażliwe na udary mechaniczne.

Informacje o aktualnej prędkości obrotowej silnika oraz jego obciążeniu są traktowane jako podstawowe i niezbędne. Optymalizowanie składu mieszanki oraz kąta wyprzedzenia zapłonu wymaga uwzględnienia także kilku innych sygnałów nazywanych korekcyjnymi. Pierwszy z nich pochodzi z czujnika temperatury silnika. Jego wskazania pozwalają wzbogacić mieszankę przygotowywaną dla zimnego silnika. Do wyznaczenia gęstości zasysanego gazu są wykorzystywane: czujnik temperatury powietrza oraz czujnik ciśnienia bezwzględego. Aktualna wielkość każdego z sygnałów jest zamieniana na cząstkowy współczynnik korekcyjny. ECU wykorzystuje te dane do wyznaczenia wypadkowego wektora korekcji. Ostatecznie, każdy z punktów mapy paliwa jest przemnażany przez obliczony wektor. Operacja ta powoduje

przeskalowanie całej mapy z jednoczesnym zachowaniem proporcji jej kształtu (rys. 2).



Rys. 2. Wpływ wektora korekcji na zawartość mapy paliwa
Fig. 2. Influence of the correction coefficient on the shape of fuel map

Korekcja mapy zapłonu jest wykonywana na podstawie wskazań czujnika spalania stukowego. Czasami uwzględnia się także: stan cieplny silnika, parametry układu oczyszczania spalin oraz ewentualne załączenie odbiorników dużych ilości energii.

Oprócz wymienionych sygnałów korekcyjnych ECU może analizować wiele innych danych na temat stanu systemu i czynności kierowcy. Przykładowo, wartość napięcia w instalacji elektrycznej kształtuje czas ładowania cewek zapłonowych. Duża szybkość wciskania pedału przyspieszania świadczy zwykle o pojawieniu się na drodze sytuacji krytycznej. Komputer, starając się przewidzieć intencję kierowcy, maksymalizuje moment obrotowy silnika, sterując jego zasilaniem w sposób często daleki od wynikającego z założeń ekonomicznych i ekologicznych.

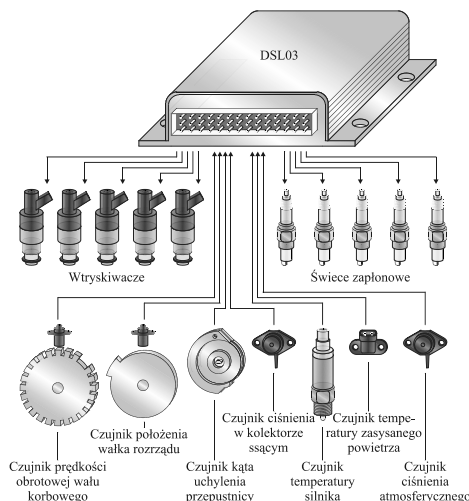
2. Sterownik silnika wyczynowego

Silnik samochodu wyczynowego jest poddawany licznym przeróbkom. Wiele z nich dotyczy układów: ssącego, paliwowego, wydechowego oraz rozrządu. W wyniku wprowadzania tak istotnych zmian powstaje silnik o charakterystykach bardzo różniących się od typowych dla jednostek produkowanych seryjnie. Wszelkim mechanicznym modyfikacjom silnika musi towarzyszyć odpowiednia adaptacja jego układu sterującego. Zmiany te powinny obejmować przynajmniej przygotowanie nowych map: paliwa i zapłonu. Standardowe ECU nie pozwalają na wprowadzanie tak dużych zmian w swym oprogramowaniu i wartościach wykorzystywanych danych. Dlatego często jedynym wyjściem jest zastąpienie oryginalnego sterownika układem reprogramowalnym, pozwalającym na swobodne definiowanie ogromnej liczby zmiennych. W ich skład wchodzi zarówno: mapy paliwa i zapłonu, progi dyskryminacji prędkości obrotowej i obciążenia silnika, jak i tablice współczynników korekcyjnych, stabilizowane charakterystyki wykorzystywanych czujników oraz wielkości ruchowej dawki paliwa, dopuszczalnej prędkości obrotowej, parametrów mechanicznych systemu i wiele innych. Komputery samochodów wyczynowych pozwalają ponadto na zdefiniowanie nie jednego lecz kilku zestawów map paliwa i zapłonu, z których każdy jest zoptymalizowany dla innego rodzaju nawierzchni, warunków pogodowych, rodzaju zastosowanego ogumienia, a czasem także paliwa o nietypowym składzie. Niektóre sterowniki umożliwiają także rejestrowanie w czasie jazdy kompletu danych na temat pracy silnika. Informacje te wykorzystuje się później do określenia przyczyn ewentualnych problemów lub wytyczenia kierunku dalszych przeróbek.

3. Sterownik DSL

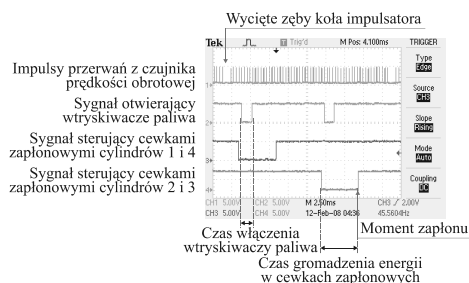
Najważniejsze elementy systemu docelowego sterownika DSL przedstawiono na rys. 3. DSL jest przystosowany do współpracy z bezrozdzielaczowym układem zapłonowym, zawierającym cewki indywidualne lub dwubiegunowe. Komputer obsługuje do pięciu niezależnych obwodów zapłonowych i może kontrolować pracę silników o maksymalnie dwudziestu cylindrach. Sterownik

nadzoruje zarówno pośredni, jedno- lub wielopunktowy wtrysk paliwa, jak i system wtrysku bezpośredniego. Poszczególne obwody mogą być sterowane: jednocześnie, grupowo lub indywidualnie (wtrysk sekwencyjny). Momenty wtrysku paliwa są uzależnione od liczby cylindrów silnika oraz algorytmu wybranego przez użytkownika.



Rys. 3. Struktura systemu nadzorowanego przez sterownik DSL
Fig. 3. The structure of a system controlled by the DSL controller

Na rys. 4 pokazano wybrane sygnały generowane przez DSL sterujący pracą silnika czterocylindrowego z jednoczesnym wtryskiem pośrednim oraz dwubiegunowymi cewkami zapłonowymi. Kanał 1 wyświetla ukształtowany sygnał indukcyjnego czujnika prędkości obrotowej, współpracującego z kołem impulsatora typu 60-2. Kanał 2 pokazuje sygnał wyjściowy sterownika, włączający jeden z wtryskiwaczy zgodnie z algorytmem wtrysku jednoczesnego (pozostałe 3 wyjścia generują identyczne przebiegi). Aby ułatwić odparowywanie paliwa zamiast jednej, pełnej dawki są podawane cztery odpowiednio mniejsze, równomiernie rozłożone w ciągu całego cyklu silnika.



Rys. 4. Przykładowa sekwencja sygnałów wtrysku i zapłonu
Fig. 4. An example of the sequence of injection and ignition signals

Kanały: 3 i 4 pokazują sygnał sterujący pracą cewek zapłonowych. W przedstawionym przykładzie iskra jest generowana równocześnie dla obu cylindrów każdej pary, przy czym zapłon następuje tylko w jednym z nich, wykonującym takt sprężania. Drugi cylinder znajduje się wówczas w fazie wydechu i pojawiająca się w nim iskra nie przynosi żadnego skutku (pusty zapłon). Impulsy generowane dla obu pary cylindrów są przesunięte względem siebie o kąt 180°, a czas magazynowania energii w cewkach zapłonowych zaprogramowano na 5 ms.

DSL03 może współpracować z dwoma czujnikami indukcyjnymi. Pierwszy znajduje się zawsze na wale korbowym silnika i służy do pomiaru jego prędkości obrotowej oraz wyznaczania aktualnego położenia pierwszego tłoka. Drugi jest niezbędny w przypadku stosowania wtrysku sekwencyjnego lub grupowego. Jego koło zębate jest instalowane na wałku rozrządu. Impulsy generowane przez ten układ dostarczają informacji o początku cyklu silnika i jego poszczególnych fazach.

Najważniejszymi z sygnałów korekcyjnych dla mapy paliwa są: temperatury cieczy chłodniczej i zasysanego powietrza, ciśnienie bezwzględne oraz wskazania sondy lambda. Sterownik przelicza napięcia generowane przez poszczególne czujniki na wartości reprezentowanych przez nie wielkości fizycznych posługując się stabilizowanymi charakterystykami. Korekcja mapy zapłonu jest dokonywana na podstawie wskazań czujnika spalania stukowego.

DSL analizuje także zestaw sygnałów pomocniczych. Jedne z nich mają wpływ na sposób sterowania silnikiem (np. pomiar napięcia zasilającego), inne umożliwiają szybkie rozpoznawanie usterek (brak impulsu zapłonowego, rozszczelnienie zbiornika, niskie ciśnienie w układzie paliwowym), jeszcze inne pozwalają kierowcy wskazać nowy bank danych wykorzystywanych przez sterownik (manipulatory wyboru zestawu map i ograniczników).

Sterownik może także nadzorować pracę kilku układów wykonawczych, takich jak: siłownik przepustnicy, turbosprężarka, silnik krokowy stabilizatora obrotów biegu jałowego, pompa paliwa, zawór recyrkulacji spalin. DSL generuje ponadto standardowy przebieg impulsowy dla obrotomierza oraz wysyła przez port szeregowy komunikaty o aktualnym stanie systemu.

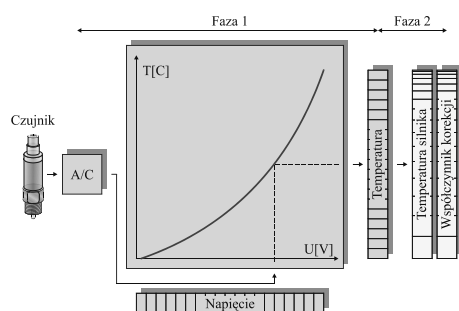
3.1. Struktury danych

Mapy paliwa i zapłonu przechowywane w pamięci nieulotnej komputera zawierają po 16 kolumn i 16 wierszy. Poszczególne wiersze map są przyporządkowane różnym obciążeniom silnika, natomiast kolumny odpowiadają przedziałom prędkości obrotowych. Progi dzielące zakresy wartości obu parametrów mogą być ustalane dowolnie. Zwykle podział nierównomierny jest stosowany przynajmniej w odniesieniu do stopnia uchylenia przepustnicy. Skale prędkości obrotowej oraz obciążenia silnika są definiowane równocześnie dla obu rodzajów map.

Do pamięci nieulotnej komputera można wpisać osiem zestawów danych, z których każdy zawiera jedną mapę paliwa i jedną mapę zapłonu. Wykorzystywany aktualnie zestaw jest wybierany przez kierowcę za pomocą manipulatora instalowanego na desce rozdzielczej pojazdu. Stan przełącznika jest okresowo sprawdzany przez mikrokontroler, który natychmiast wczytuje do pamięci RAM żądany zestaw danych.

Wartości współczynników korekcji są przechowywane w postaci niezależnych tablic jednowymiarowych, składających się z 16 komórek oraz towarzyszących im 16 progów dyskryminacji. Użytkownik może definiować zarówno dyskretne wartości danego współczynnika korekcji, jak i sposób kwantowania przedziału zmienności sterującej nim wielkości fizycznej.

Proces pobrania z tablic wartości współczynników korekcji przebiega dwuetapowo (rys. 5). Jego pierwsza część polega na odczytaniu za pośrednictwem przetwornika analogowo-cyfrowego wielkości sygnału generowanego przez każdy z detektorów. Dane te są zamieniane na wartości odpowiednich wielkości fizycznych dzięki stabilizowanym charakterystykom czujników. W drugim etapie otrzymane liczby są porównywane z progami dyskryminacji zdefiniowanymi przez użytkownika. Otrzymany indeks wskazuje ostatecznie numer komórki w odpowiedniej tablicy, z której należy pobrać wartość współczynnika korekcji.



Rys. 5. Etapy wyznaczania cząstkowych współczynników korekcji

Fig. 5. Phases of definition of the correction indicator

Poza danymi tabelarycznymi w pamięci nieulotnej komputera zdefiniowano szereg programowanych wielkości skalarnych o różnej precyzji. Większość z nich określa parametry systemu docelowego, w którym zainstalowano DSL. Najważniejsze z tych danych dotyczą: liczby i konfiguracji cylindrów silnika, typu układu wtryskowego, rodzaju cewek zapłonowych oraz liczby zębów koła impulsatora. Zmienne optymalizujące proces sterowania określają np.: wielkość rozruchowej dawki paliwa, czas gromadzenia energii w cewkach zapłonowych oraz położenia wału korbowego i ewentualnie wałka rozrządu odpowiadające momentom otwierania poszczególnych wtryskiwaczy.

3.2. Algorytm korekcji mapy paliwa i mapy zapłonu

Do chwili obecnej powstały już cztery wersje sterownika DSL. Wprowadzane stopniowo zmiany wynikały zarówno ze zwiększania jego możliwości i uniwersalności, jak i eliminowania zauważonych wad. Dwie ostatnie wersje różnią się już wyłącznie oprogramowaniem. Usprawnienia dotyczą przede wszystkim sposobu korygowania zawartości obu map. Wykonywanie w czasie rzeczywistym tej złożonej obliczeniowo procedury stwarza poważne problemy, a efekty jej działania okazują się być decydujące dla osiągnięcia sterowanego silnika. Pozostałą część artykułu poświęcono dwóm alternatywnym sposobom realizowania tego zadania.

W obu opracowanych rozwiązaniach sterownik rozpoczyna pracę od przepisania do wewnętrznej pamięci RAM wyjściowej bazy danych. W jej skład wchodzi: mapa paliwa i zapłonu, tablice współczynników korekcji, stabilizowane charakterystyki czujników oraz zmienne pomocnicze. Wczytywany zestaw jest wybierany na podstawie aktualnego stanu manipulatora i może być później zastąpiony innym, o ile zażąda tego kierowca.

W pamięci nieulotnej jest przechowywana tylko jedna wersja każdego zestawu map, nazywana podstawową i odpowiadająca przypadkowi braku korekcji (właściwa w sytuacji, gdy wypadkowy współczynnik korekcji ma wartość 1). Wersja podstawowa stanowi punkt wyjścia do dalszych obliczeń i w związku z tym nie powinna być modyfikowana, aby z upływem czasu nie dochodziło do pogarszania dokładności otrzymywanych wyników. Wersja ta nie nadaje się także do bezpośredniego sterowania silnika. Na podstawie aktualizowanych okresowo współczynników korekcji mikrokontroler musi ciągle wyznaczać jej uaktualnioną postać. Opracowane algorytmy różnią się właśnie sposobem przygotowywania map nazywanych skorygowanymi.

Pierwszy z algorytmów był stosowany w sterownikach: DSL01, DSL02 i DSL03. Jego podstawowym założeniem było możliwe jednoczesne korygowanie całej powierzchni map, co jednak okazało się bardzo trudne, ze względu na długi czas wykonywania niezbędnych obliczeń. Pierwszą korekcję mapy paliwa, dotyczącą rzeczywiście jej całej powierzchni, co przy zatrzymanym silniku nie sprawiło żadnego problemu, przeprowadzano natychmiast po zakończeniu kopiowania danych. Przed rozpoczęciem obliczeń mikrokontroler odczytywał aktualne wskazania poszczególnych czujników. Dane te przekształcano na wartości parametrów fizycznych zgodnie ze stabilizowanymi charakterystykami detektorów, które z kolei zamieniano na cząstkowe współczynniki korekcji (rys. 5). Wypadkowy wektor korekcji mapy paliwa otrzymuje się przemnażając przez siebie, współczynniki cząstkowe. Mapę zapłonu koryguje się przede wszystkim na podstawie wskazań detektora spalania stukowego. Proces ten rozpoczynało nieco później, a wykonywane obliczenia okazały się znacznie mniej skomplikowane i czasochłonne.

Okresowe powtarzanie jednoczesnego korygowania całej powierzchni mapy paliwa bardzo spowolniłoby pracę komputera i uniemożliwiło mu sterowanie w czasie rzeczywistym układami: zapłonowym i wtryskowym. Dlatego w kolejnych cyklach programu głównego była obliczana nowa wartość tylko jednej, kolejnej komórki mapy paliwa. Ponieważ wykonywanie pętli programu głównego powtarzano przynajmniej kilkaset razy w ciągu sekundy (częstość ta rośnie, gdy maleją obroty silnika), pełna skorygowana wersja mapy paliwa powstawała z opóźnieniem nie większym od 1 sekundy w stosunku do zmiany dyskretyzowanej wartości dowolnego z parametrów korekcyjnych.

Modyfikowanie mapy zapłonu wykonywano jednocześnie dla jej całej powierzchni, natychmiast po odebraniu odpowiedniego sygnału z czujnika spalania stukowego. Rozwiązanie takie gwarantuje bezzwłoczne reagowanie sterownika (jeszcze w ciągu tego samego cyklu silnika) na pojawienie się samozapłonu. Poza tym nie warto było dzielić na części procedury, której wykonanie zajmuje stosunkowo niewiele czasu.

Dekompozycja czasowa procesu korygowania zawartości mapy paliwa pozwala poświęcić znacznie więcej mocy obliczeniowej jednostki centralnej na obsługę przerw generowanych przez oba impulsatory. Uruchamiane wówczas procedury decydują o rozpoznanie lub zakończeniu generowania wielu sygnałów, z których najważniejsze sterują procesami wtrysku paliwa i generowania iskry zapłonowej. DSL03 jest w stanie nadzorować pracę silnika 20-cylindrowego, osiągającego prędkość 10 000 obrotów na minutę. Wydajność taka jest całkowicie wystarczająca, ponieważ silniki samochodów sportowych nie rozwijają prędkości wyższych od 8 000 obrotów na minutę.

Opisane rozwiązanie jest bardzo bezpieczne, gdyż gwarantuje procedurze obsługującej wtryskiwacze ciągły dostęp do całej powierzchni mapy paliwa, zmodyfikowanej zgodnie z ostatnimi lub przynajmniej jednymi z wcześniejszych wartości sygnałów korekcyjnych. Praktyka eksploatacyjna ujawniła jednak wadę wynikającą z istniejącego opóźnienia we wprowadzaniu korekcji do kolejnych obszarów tablicy. Jej efekty stają się widoczne podczas bardzo dynamicznej jazdy, typowej dla samochodów sportowych, gdy punkt pracy silnika szybko przemieszcza się pomiędzy fragmentami mapy paliwa, zmodyfikowanymi zgodnie z różnymi wartościami wypadkowego współczynnika korekcji.

Długi okres uaktualniania skorygowanej postaci mapy utrudnia także proces strojenia silnika, wykonywany zwykle na hamowni. Zmiany wprowadzane do podstawowej wersji map zaczynają obowiązywać dopiero po pewnym, zauważalnym dla człowieka czasie. Konieczność oczekiwania na rezultaty dokonywanych modyfikacji wydłuża precyzyjne strojenie silnika i jest dla operatora przyczyną pewnego dyskomfortu podczas pracy.

Z wymienionych powyżej względów próbowano przez pewien czas usprawnić omawiany proces. Zadbano m.in. o to, aby podczas strojenia silnika sterownik, znajdujący się wówczas w trybie programowania, rozpoczynał wprowadzanie korekcji od tego punktu mapy, który został właśnie zmodyfikowany przez operatora. Przy braku takiej modyfikacji jest korygowana następna w kolejności komórka, po czym cykl rozpoczyna się od początku.

Przeanalizowano także rozkład prawdopodobieństwa przebiegu punktu pracy silnika w poszczególnych obszarach mapy, który okazuje się być bardzo nierównomierny – dwa narożne fragmenty nie są prawie w ogóle używane. Dlatego sterownik pracujący w trybie normalnym, co zawsze ma miejsce podczas jazdy, rozpoczyna uaktualnianie mapy od komórek najczęściej wykorzystywanych. Jeżeli wypadkowy współczynnik korekcji nie ulega zmianie, to procedura przetwarza kolejno obszary o coraz niższym prawdopodobieństwie wykorzystywania. Każda zmiana wypadkowego współczynnika korekcji powoduje natychmiastowy powrót do początku omawianego algorytmu.

Rozważano także możliwość korygowania w pierwszej kolejności tej komórki mapy, którą wskazuje aktualny punkt pracy silnika. Bardzo szybkie przemieszczanie się punktu pracy podczas dynamicznej jazdy oraz problemy z ewidencjonowaniem komórek uaktualnianych w praktycznie losowej kolejności sprawiły jednak poważne problemy i znacząco wydłużały czas wykonywania niezbędnego zestawu obliczeń

Wszystkie wprowadzane poprawki powodowały, iż kolejne warianty procedury stawały się coraz bardziej rozgałęzione i skomplikowane, a przez to mniej podatne na dalsze modyfikacje. Dlatego ostatecznie postanowiono opracować zupełnie inne rozwiązanie omawianego problemu.

W drugiej wersji algorytmu skupiono się na radykalnym skróceniu czasu obliczania korekcji dla pojedynczego punktu każdej z map. Postanowiono, iż zamiast cyklicznego modyfikowania ich całej powierzchni, nowa procedura powinna dostarczać skorygowaną wartość odpowiedniej komórki w trybie „na żądanie”. Dla

tego pierwszym zadaniem przygotowanego algorytmu jest wyznaczenia współrzędnych korygowanego punktu.

Współrzędna wskazywana przez obciążenie silnika (y – numer wiersza) jest obliczana cyklicznie w pętli programu głównego. Mikrokontroler porównuje w tym celu zmierzoną wartość (stopień uchylenia przepustnicy lub podciśnienie w kolektorze ssącym) z progami kwantyzacji zdefiniowanymi przez użytkownika i ostatecznie określa indeks najbliższego z nich.

Druga współrzędna jest obliczana bezpośrednio w omawianej procedurze, która jest wykonywana podczas obsługi przerwania generowanego po każdym pełnym obrocie wału korbowego. Wyznaczana wówczas prędkość obrotowa silnika, porównywana z zadanymi przedziałami dyskryminacji, określa współrzędną x – numer kolumny komórki pobieranej z mapy paliwa i zapłonu.

Po odczytaniu wartości wyznaczonego punktu podstawowej wersji mapy paliwa, mikrokontroler przystępuje natychmiast do jej skorygowania. Czas wykonywanych w tym celu obliczeń istotnie skrócono dzięki wprowadzeniu trzech modyfikacji. Przede wszystkim znacznie zoptymalizowano algorytm przetwarzania danych. Użyto nowszej wersji mikrokontrolera, pozwalającej na taktowanie go zegarem o dwukrotnie większej częstotliwości. Ograniczono dokładność obliczeń, dopasowując ją ściśle do rozdzielczości wypadkowego współczynnika korekcji, wyznaczonego przecież na podstawie sygnałów korekcyjnych dyskretyzowanych za pomocą zestawu zaledwie szesnastu progów. W identyczny sposób przyspieszono proces korygowania wskazanej komórki mapy zapłonu, co było jednak już znacznie łatwiejsze. Obliczane wartości skorygowane określają sposób zasilania silnika w czasie tylko najbliższego obrotu wału korbowego. Później cały proces rozpoczyna się od początku.

Nowa wersja procedury korygowania stanu map nie wymaga tworzenia i przechowywania w pamięci RAM ich ciągle uaktualnianych kopii oraz doskonale spisuje się zarówno podczas strojenia silnika, jak i w czasie jazdy, niezależnie od jej dynamiki. Wykonywanie zestawu niezbędnych obliczeń po każdym obrocie wału korbowego zajmuje jednak istotną część czasu pracy jednostki centralnej. Stąd efektywna wydajność DSL04 jest nieco niższa niż poprzednio. Sterownik może nadzorować pracę silnika 20-cylindrowego, osiągającego maksymalną prędkość około 9000 obrotów na minutę, co nadal jest wielkością w pełni satysfakcjonującą.

4. Podsumowanie

Obie wersje algorytmów obliczania skorygowanych postaci mapy paliwa i mapy zapłonu doskonale sprawdzają się podczas typowego sposobu prowadzenia pojazdu. Nowsze rozwiązanie okazuje się jednak znacznie lepsze w przypadku bardzo dynamicznej jazdy, charakterystycznej dla samochodowych sportów wyczynowych. Wprowadzone zmiany ułatwiają także i przyspieszają proces precyzyjnego strojenia silnika. Poprawę walorów eksploatacyjnych sterownika okupiono niewielkim zawężeniem zakresu obsługiwanych prędkości obrotowych silnika, który jednak nadal całkowicie pokrywa istniejące obecnie zapotrzebowanie.

5. Literatura

- [1] Hernandez W.: Robust multivariable estimation of the relevant information coming from a wheel speed sensor and an accelerometer embedded in a car under performance tests, *Sensors*, vol. 5, 2005.
- [2] Hongying S., Wei J., Bo L.: A Study on Fault Diagnosis Expert System of Engine Based on Fuzzy Neural Network, *Shandong Internal Combustion Engine*, 2004.
- [3] Kościelnik D.: A Programmable Controller for Combustion Engines Used in Race Cars, *IEEE International Symposium of Industrial Electronics, ISIE08*, Cambridge, United Kingdom 2008.
- [4] Kościelnik D., Stępień J.: Electronic control unit for the tuned combustion engines with spark ignition, *Int. Conf. on Signals and Electronic Systems - ICSES 2008*, Kraków, Poland, 2008.