

*procesor sygnałowy, sterowanie silnikiem ZS,
komputer pokładowy ECU/EDC, system OBDII/EOBD*

Leszek DĘBOWSKI*, Krzysztof P. DYRCZ**, Paweł KAWALIŁO***,
Kamil TRZMIEL***, Radosław WŁOSTOWSKI***, Radosław WRÓBEL***

KONCEPCJA NOWEGO KOMPUTERA POKŁADOWEGO ECU DO STEROWANIA SILNIKIEM POJAZDU SAMOCHODOWEGO Z WYKORZYSTANIEM DSP

W referacie przedstawiono możliwości wykorzystania rozwojowych modułów jednostek centralnych z elementami DSP/FPGA do sterowania silnikami pojazdów samochodowych. Omówiono standard pokładowego systemu diagnostycznego EOBD oraz magistralę komunikacyjną CAN, występujące we współczesnych pojazdach samochodowych. Zaprezentowano potencjalne możliwości, jakie niesie za sobą zmiana parametrów zasilania silnika, przy wykorzystaniu najnowszych procesorów sygnałowych w dedykowanych modułach do budowy nowoczesnych komputerów ECU.

1. WSTĘP

Dynamiczny rozwój elektroniki i energoelektroniki, obserwowany na przestrzeni ostatnich lat spowodował, że możliwe stało się stosowanie złożonych metod sterowania silnikami napędowymi pojazdów samochodowych. Obecnie standardem stało się stosowanie tzw. komputera pokładowego ECU (ang. *Engine Control Unit*), służącego już nie tylko do sterowania podstawowymi funkcjami silnika, ale także zarządzania pracą całego, skomplikowanego zespołu napędowego.

Dotychczas, do sterowania silnikiem pojazdu samochodowego stosowano specjalizowane mikrokontrolery, jednak wzrost wymagań eksploatacyjnych dotyczących sil-

* Instytut Elektrotechniki, Oddział w Gdańsku, ul. Narwicka 1, 80-557 Gdańsk, e-mail: leszek.debowski@iel.gda.pl

** Politechnika Wrocławska, Instytut Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych, ul. Smoluchowskiego 19, 50-370 Wrocław, e-mail: krzysztof.dyrcz@pwr.wroc.pl

*** Politechnika Wrocławska, Instytut Konstrukcji i Eksploatacji Maszyn, Zakład Pojazdów Samochodowych i Silników Spalinowych, ul. Braci Gierzyńskich 164, 51-640 Wrocław, e-mail: pawel.kawalilo@pwr.wroc.pl, kamil.trzmiel@pwr.wroc.pl, radoslaw.wlostowski@pwr.wroc.pl, radoslaw.wrobel@pwr.wroc.pl

ników napędowych, zwłaszcza silników z zapłonem samoczynnym (tzw. silników Diesla lub ZS), spowodował konieczność stosowania wyrafinowanych metod sterowania napędem, które możliwe są do zrealizowania jedynie przy użyciu szybkich procesorów sygnałowych.

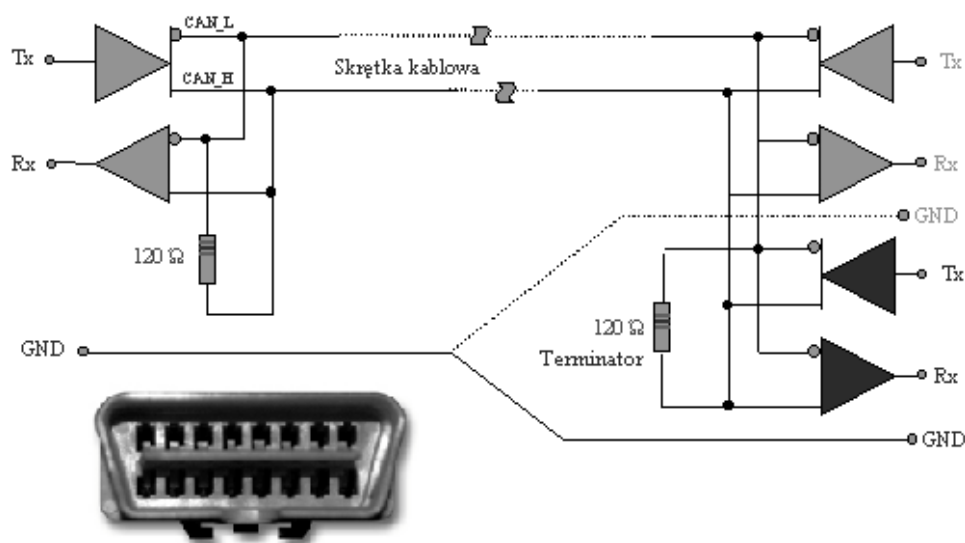
Główna różnica pomiędzy procesorem sygnałowym, a mikrokontrolerem leży w szybkości przetwarzania informacji. Procesory klasyczne i sygnałowe operują na sygnale dyskretnym w dziedzinie czasu i wartości. Jednak prędkość przetwarzania procesora sygnałowego, pozwala na wykonywanie operacji matematycznych (jak zastosowanie okna czasowego czy transformowanie do dziedziny częstotliwości), na podstawie których możliwe jest podejmowanie decyzji w czasie quasi rzeczywistym. Klasyczne procesory podejmują decyzje tylko na podstawie odebranego pojedynczego bitu czy słowa w sensie cyfrowym. Z tego wynika kolejna różnica: układy konwencjonalne pracują na sygnałach deterministycznych, natomiast procesory sygnałowe mogą pracować także na sygnałach (quasi) stochastycznych.

Podstawowym elementem składowym pojazdu samochodowego jest układ zasilania. Najpopularniejszym obecnie systemem w silnikach o zapłonie samoczynnym jest Common Rail. Umożliwia on uzyskanie dużych wartości ciśnienia wtrysku przy jednoczesnym zmniejszeniu kosztów (w porównaniu do skuteczniejszych pompowtryskiwaczy). Sterowanie układem zasilania odbywa się w komputerze pokładowym ECU, który na podstawie danych, pochodzących od czujników podłączonych do magistrali CAN wybiera optymalny punkt wtrysku (z zaprogramowanych wartości, zapisanych w tzw. mapie wtrysku). W artykule przedstawiono podstawowe aspekty związane z prowadzonymi obecnie pracami projektowymi i perspektywicznym zastosowaniem rozwojowej wersji badawczej ECU do sterowania systemem zasilania współczesnego silnika Diesla.

2. POKŁADOWY SYSTEM DIAGNOSTYCZNY EOBD

Pokładowy system diagnostyczny powstał w 1984 roku, w Kalifornii (USA) [3]. Głównym celem wprowadzenia i dalszego rozwoju systemu było ograniczenie emisji szkodliwych substancji do atmosfery przez silniki spalinowe. System, znany pod nazwą Systemu Diagnostyki Pokładowej OBD I (ang. *On Board Diagnostic*) podlegał ciągłemu udoskonalaniu, aż w 1994 roku powstała jego druga wersja (OBD II), która stała się w USA obowiązującym standardem we wszystkich nowych pojazdach samochodowych, produkowanych od 1996 roku. Oprócz zwiększenia liczby nadzorowanych parametrów pracy pojazdu, w systemie ODB II, ujednociono złącze diagnostyczne (rysunek 1) oraz protokół komunikacji, co umożliwiło kontrolę pracy układów odpowiedzialnych za emisję spalin przy pomocy uniwersalnych testerów diagnostycznych [1]. Ponadto, złącze diagnostyczne OBD II umożliwia szybkie i efektywne sprawdzenie poprawności działania zainstalowanych w pojeździe modułów, co ma

fundamentalne znaczenie w przypadku ich nieprawidłowej pracy lub uszkodzenia. W krajach europejskich, system OBD z kilkoma zmianami został przyjęty jako EOBD (ang. *European OBD*) i określony w normie ISO/DIS 15031 dyrektywami 98/69/EC i 1999/102/EC, przy czym dla silników z zapłonem iskrowym (tzw. silników ZI) system jest obowiązujący od 1.1.2000 r., natomiast dla silników ZS obowiązek jego stosowania powstał 1.1.2003 r.



Rys. 1. Elektryczny schemat ideowy i widok ujednoczonego złącza diagnostycznego standardu OBD
Fig. 1. Electric circuit and view of OBD connector

Integralną częścią systemu diagnostycznego OBD są czujniki. W pojeździe samochodowym, oprócz czujników tworzących układ peryferyjny systemu diagnostyki pokładowej, istnieją dodatkowo dwie inne, niezależne grupy [8]:

- funkcyjne, do zadań regulacyjnych i sterujących,
- zabezpieczenia przed kradzieżą.

Zaleca się, aby systemy funkcyjne i nadzorujące nie korzystały z tego samego toru diagnostycznego: mimo częstego pomiaru tych samych parametrów wymaga się, aby były to oddzielne, niezależne systemy.

Ogólnie, stosowany tor sterowania w inżynierii samochodowej (mechatronicznej) nie wyróżnia się technologicznie w stosunku do rozwiązań w innych dziedzinach inżynierii. Jest to obwód zamknięty o przebiegu: element badany–czujnik–sterownik–urządzenie wykonawcze–element badany. Interfejsem pomiędzy czujnikiem, a komputerem ECU jest magistrala CAN, będąca obowiązującym standardem we wszystkich nowych pojazdach samochodowych [1], [8], [6].

Pierwotna specyfikacja CAN została wprowadzona przez firmę BOSCH, przy czym obejmuje ona dwa typy ramki transmisji danych:

- standardowy CAN (SCAN, wersja 2.0A z 11-bitową identyfikacją w nagłówku ramki),
- rozszerzony CAN (ECAN, wersja 2.0B z 29-bitową identyfikacją w nagłówku ramki).

Ponadto, wyróżnia się dwa standardy ISO dla magistrali CAN, przy czym różnica występuje w warstwie fizycznej (tzw. warstwie pierwszej, zgodnie z teoretycznym modelem sieci ISO/OSI). Standard ISO 11898 dotyczy szybkich aplikacji o częstotliwościach transmisji do 1 Mbps, natomiast ISO 11519 dotyczy aplikacji wolniejszych, o prędkościach transmisji do 125 kbps.

Standard ISO 11898-2 definiuje dużą szybkość transmisji na poziomie warstwy fizycznej, przy czym linia magistrali musi być dopasowana w celu uniknięcia odbić fali. Wykorzystuje się do tego rezystor o rezystancji zawierającej się w zakresie $100\ \Omega$ – $130\ \Omega$ (nominalnie $120\ \Omega$). Należy przy tym zwrócić uwagę, że dopasowanie impedancyjne nie jest konieczne w przypadku korzystania z wolniejszego standardu CAN, ponieważ wg normy ISO 11519 prędkość transmisji jest na tyle mała, że zjawisko odbicia jest znikome.

Topologią CAN jest magistrala, wykorzystująca dwuprzewodowy kabel miedziany typu skrętka, przy czym maksymalna długość magistrali to 40 m a połączenia z czujnikami (odgałężenia) nie powinny być dłuższe niż 0,3 m [7].

Wymiana informacji w sieci, opartej na magistrali CAN, może odbywać się dwójako, przez rozgłaszanie lub adresowanie. Rozgłaszanie, podobnie jak w przypadku globalnych systemów informacyjnych, opartych na modelu OSI/ISO, polega na wysłaniu wiadomości do każdego dostępnego węzła sieci. W tym przypadku ramka danych, wysłana przez adresującego, nie jest opatrzona informacją zawierającą adres docelowy. Takie postępowanie warunkuje szybsze przekazywanie informacji w sieci przez skrócenie czasu odczytywania adresu w węźle odbiorczym. Adresowanie jest stosowane tylko w przypadku ramek o wysokim priorytecie zawierających wyjątkowo istotne informacje (np. periodycznego pomiaru ciśnienia) w celu uniknięcia zjawiska burzy rozgłoszeń w przypadku dużych topologii. Wówczas węzeł sieci samodzielnie decyduje, czy rozgłoszona informacja jest mu potrzebna.

3. UKŁAD ZASILANIA COMMON RAIL SILNIKA ZS

W początkowym okresie rozwoju konstrukcji silników spalinowych starano się osiągnąć jak najlepsze parametry użytkowe (moment obrotowy, moc). Lata siedemdziesiąte ubiegłego wieku, ze względu na kryzys paliwowy, narzuciły trend zmniejszania zużycia paliwa, natomiast od lat 80-tych zaczęto zwracać uwagę na skutki ekologiczne coraz szybciej rozwijającej się motoryzacji. Warto przy tym zwrócić

uwagę na fakt, że rozwiązania proekologiczne nie zawsze prowadzą do zmniejszenia zużycia paliwa. Klasyczny układ zasilania silników ZS wykorzystuje mechaniczną pompę wtryskową, napędzaną bezpośrednio z wału korbowego. Niewątpliwą zaletą pomp mechanicznych jest prosta konstrukcja, nieskomplikowana obsługa oraz możliwość pracy z gorszej jakości paliwami. W chwili obecnej pompy tego typu wykorzystywane są głównie w napędach silników agregatów, okrętów, silników stacjonarnych [9].

Znaczącą poprawę osiągnięć silników ZS umożliwiło wprowadzenie elektronicznego sterowania. Początkowo stosowano adaptacje mechanicznych pomp wykorzystujących elektromagnetyczne nastawniki, przy czym kontrolę położenia powierzono potencjometrom lub przetwornikom indukcyjnym a wtryskiwanie paliwa opierało się na układach mechanicznych, z czujnikiem położenia iglicy wtryskiwacza [7]. Dawka i kąt wtrysku paliwa obliczana była na podstawie przepływomierza powietrza, potencjometru położenia pedału przyspieszenia i korygowana w zależności od temperatury cieczy chłodzącej i prędkości pojazdu. Poprawność cyklu wtrysku paliwa kontrolował czujnik wzniosu iglicy wtryskiwacza. Największą wadą tego systemu było małe ciśnienie (rzędu 900 bar), ograniczone możliwości sterowania kątem i czasem wtrysku, brak możliwości podziału dawki wtryskiwanego paliwa na kilka części (duża bezwładność elementów mechanicznych wtryskiwacza).

W układzie typu Common Rail (rysunek 2), który jest obecnie najbardziej popularny, paliwo jest gromadzone pod wysokim ciśnieniem w rozdzielaczu paliwa, z którego przewodami wysokiego ciśnienia jest doprowadzane do wtryskiwaczy (elektromagnetycznych) i wtryskiwane do komory spalania [4].



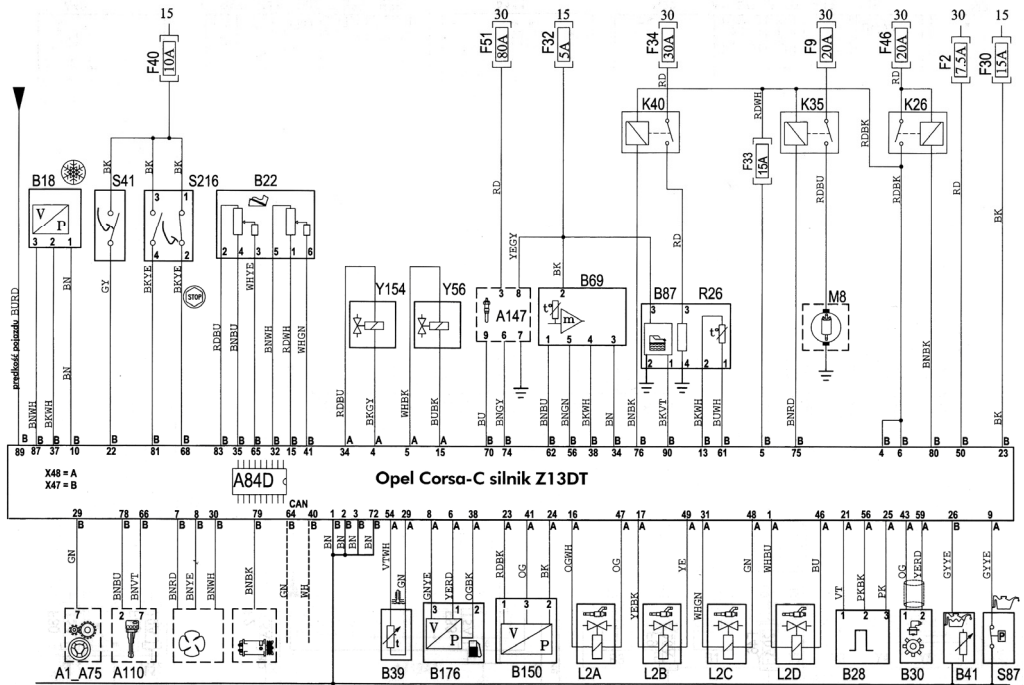
Rys. 2. Układ zasilania typu Common Rail
Fig. 2. Diagram of Common Rail supply

Integralną częścią układu jest sterownik EDC (ang. *Electronic Diesel Control*), który wyznacza początek wtrysku, dawkę paliwa oraz przebieg wtrysku (przedwtrysk, dotrysk). Układ taki zbudowany jest z wykorzystaniem klasycznego, specjalizowanego mikrokontrolera (którego oprogramowanie i budowa jest objęta klauzulą tajemności przez koncerny samochodowe) i umożliwia prawie całkowite „kształtowanie” wtrysku. Jednak ze względu na coraz wyższe wymagania stawiane silnikom spalinowym,

w szczególności dotyczące ich sprawności i zmniejszenia wpływu na środowisko naturalne, stosuje się coraz bardziej złożone obliczeniowo metody sterowania zapłonem, co powoduje, że do budowy komputera ECU coraz częściej wykorzystywane będą procesory sygnałowe. Oczekuje się, że zastosowanie procesorów sygnałowych winno zwiększyć zalety systemu (takie jak lepsze spalanie, niższe zużycie paliwa, zmniejszenie emisyjności). Z drugiej jednak strony, „udoskonalenie” parametrów poszczególnych faz będzie wymagało użycia wysokiej jakości paliwa.

4. KONCEPCJA KOMPUTERA STERUJĄCEGO ECU/EDC

W nowoczesnych konstrukcjach, silnik napędowy traktowany jest jako układ mechatroniczny, wymagający dla prawidłowego działania współpracy wielu czujników połączonych magistralą CAN. Na rysunku 3 przedstawiono najważniejsze z nich, podzielone na blok wejściowy (czujniki oraz układy sterowane przez kierowcę) i wyjściowy (układy sterujące).



Rys. 3. Układ wejść i wyjść w silniku

Fig. 3. Electric circuit of input and output in engine

Należy zauważyć, że tylko niektóre czujniki są niezbędne do funkcjonowania silnika (zaznaczono je grubszą czcionką):

- **potencjometr przyspieszenia** (pierwszy ślizg),
- potencjometr przyspieszenia (drugi ślizg, wprowadzony ze względów bezpieczeństwa, pełni funkcję kontrolną),
- czujnik masy powietrza zasysanego (termoanemometr),
- czujnik temperatury płynu chłodzącego,
- **czujnik ciśnienia doładowania**,
- **czujnik położenia wału korbowego**,
- czujnik położenia wałka rozrządu, niezbędny tylko dla pierwszego cyklu pracy,
- **czujnik ciśnienia paliwa na listwie**.

Do wyjść, bezpośrednio sterowanych z ECU należą:

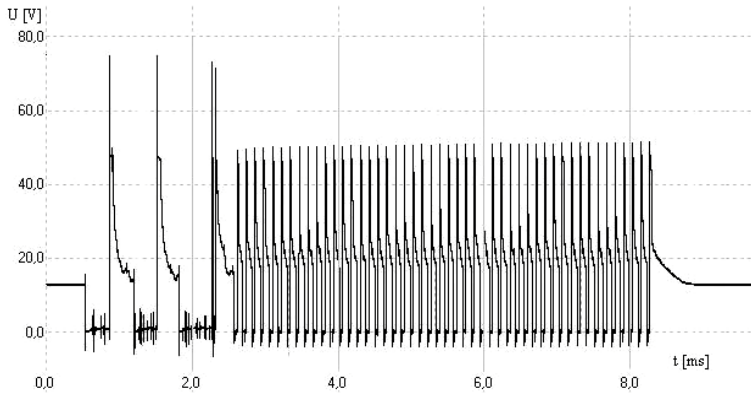
- wtryskiwacze paliwa (1, 2, 3 i 4 cylinder),
- elektrozawór recyrkulacji spalin,
- elektrozawór ciśnienia listwy CR.

Mając na uwadze fakt, że głównym obszarem planowanych zastosowań modułu będzie współczesny silnik o zapłonie samoczynnym (Fiat 1,3 JTD), a w szczególności układy sterowania zasilaniem (wtryskiem), sformułowano następujące założenia dla nowego rozwiązania sprzętowego:

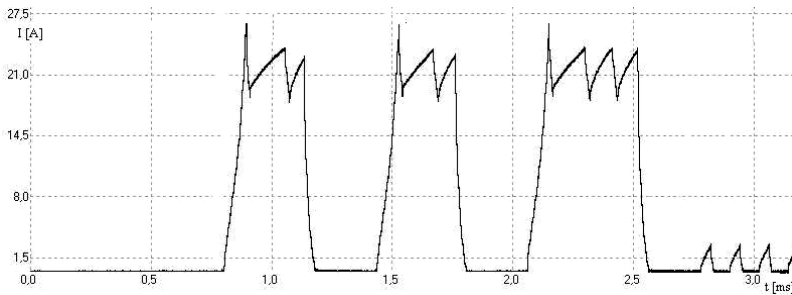
- elastyczna architektura oparta o szybki mikrokontroler, procesor/kontroler DSP lub układ programowalny FPGA, spełniająca wymagania stawiane aplikacjom małoseryjnym, badawczo-rozwojowym i dydaktycznym z zakresu automotive,
- rozbudowany zestaw interfejsów systemowych (magistrale SPI i I2C, szeregowo łącza synchroniczne), komunikacyjnych (RS-232, RS-485, RS-422, USB, CAN, Ethernet) oraz programująco-monitorujących (JTAG),
- niewielkie, standaryzowane wymiary i topologie złącz, dające możliwość perspektywicznego opracowania linii rozwojowej modułów jednostek centralnych o skalowalnych parametrach i architekturze,
- reprogramowanie procesora/układu FPGA na obiekcie za pomocą komputera PC poprzez emulator JTAG lub szeregowo łącza komunikacyjne RS-232/USB,
- bardzo wysoka odporność na zakłócenia (układy monitorujące napięcia zasilające procesora/FPGA i wykonywanie programu użytkownika),
- praca w podstawowym zestawie złożonym z modułu jednostki centralnej osadzonego w karcie bazowej, możliwość pracy autonomicznej.

Wykorzystując dotychczasowe doświadczenia, jako platformę sprzętową dla pilotażowego modułu jednostki centralnej wybrano rodzinę 32-bitowych procesorów/kontrolerów sygnałowych firmy Texas Instruments, przeznaczonych do aplikacji związanych ze sterowaniem, przy czym głównym obszarem ich zastosowań są w szczególności aplikacje napędowe. Należy zwrócić uwagę, że oprócz przemyślanego wyboru procesora sterującego, należy w odpowiedni sposób zaprojektować układ mocy sterujący wtryski-

waczami. Stanowi to istotny problemem techniczny, ponieważ wtryskiwacze piezoelektryczne muszą być sterowane wysokimi napięciami. Wymusza to użycie specjalizowanych układów wykonawczych dla techniki motoryzacyjnej, w celu zachowania właściwych czasów poszczególnych wtrysków. Przykładowe przebiegi napięcia i prądu zasilającego wtryskiwacz w modyfikowanym silniku pokazano na rysunkach 4 i 5.



Rys. 4. Przebieg napięcia wtryskiwacza
Fig. 4. Diagram of injector voltage

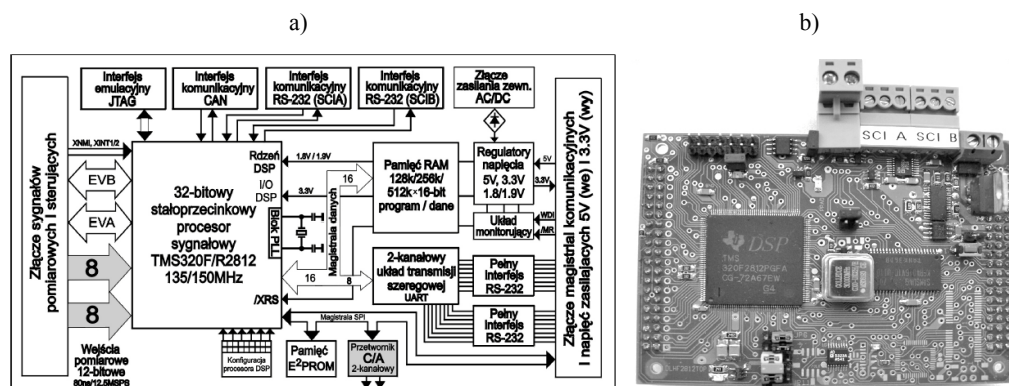


Rys. 5. Przebieg prądu wtryskiwacza
Fig.5. Diagram of injector current

Zasadniczym elementem modułu CPU jest 32-bitowy, stałoprzecinkowy procesor sygnałowy TMS320F2812 [10], do którego poprzez równoległą magistralę danych podłączona jest zewnętrzna 16-bitowa pamięć RAM oraz 2-kanalowy układ komunikacji szeregowej UART. W aplikacjach niewymagających dużych przestrzeni pamięci programu można zastosować odmianę procesora TMS320R2812 bez pamięci FLASH, z powiększoną wewnętrzną pamięcią RAM. Jednostka centralna procesora DSP wykonuje w jednym cyklu pojedynczą (16×16 -bit, 32×32 -bit) lub podwójną (16×16 -bit) operację arytmetyczną typu MAC (ang. *Multiply and Accumulate*). Maksymalna moc obliczeniowa wynosząca 150 MIPS osiągnięta jest przy częstotliwości zegara wewnętrznego 150 MHz

(czas cyklu 6,67ns). Do generowania sygnału zegarowego wykorzystywana jest pętla fazowa PLL o dynamicznie zmiennym współczynniku. W algorytmach sterowania urządzeń energoelektronicznych można wykorzystywać rozbudowany zestaw wewnętrznych bloków peryferyjnych: 12 kanałów głównych PWM z generatorem czasu martwego (dead-time), 4 pomocnicze kanały PWM, układy czasowo-licznikowe i zatrzasujące, wejścia analogowe, 2 grupy linii sprzęgających (A, B, INDEX) z enkoderami przyrostowymi oraz mechanizm przerwań. Procesor jest wyposażony w 16 wejść analogowych dołączonych do dwóch 12-bitowych przetworników A/C przez 8-kanałowe multipleksery, przy czym każdy z przetworników posiada własny układ próbkująco-pamiętający (S/H). Graniczne czasowe parametry przetwarzania A/C wynoszą 80ns/12,5MSPS. Procesory tej serii wyposażone są w rozbudowany system przerwań, obsługujący łącznie 45 źródeł, w tym 3 zewnętrzne.

Schemat blokowy i uruchomiony moduł z procesorem TMS320F2812 pokazano na rysunku 6.



Rys. 6. Schemat blokowy a) oraz wygląd b) modułu CPU z procesorem TMS320F2812

Fig.6. Block diagram a) and view b) of CPU with TMS320F2812

Złącza modułu CPU, posiadające ustandaryzowaną topologię wyprowadzeń, wykorzystywane są do osadzenia modułu na karcie bazowej. Architektura modułu umożliwia selektywne dobieranie zestawu układów peryferyjnych (pamięci, układy interfejsowe, przetwornik C/A), zależnie od wymagań aplikacyjnych. Ładowanie oraz monitorowanie pracy oprogramowania użytkownika dokonywane jest poprzez interfejs emulacyjny JTAG lub w ograniczonym zakresie przez łącze RS-232 (SCIA).

5. UWAGI I WNIOSKI

Zaprezentowana w artykule koncepcja budowy nowego komputera sterującego pracą silnika z zapłonem samoczynnym stanowi podstawę do dalszych prac badaw-

czych, mających na celu stworzenie nowoczesnej jednostki sterującej pracą takiego silnika. Należy zwrócić uwagę, że poruszone zagadnienia są złożone i wymagają współpracy specjalistów różnych dziedzin techniki: m.in. mechaniki, energoelektroniki i mikroelektroniki, co pokazuje, że współczesny silnik spalinowy staje się klasycznym przykładem złożonego układu mechatronicznego.

Podstawowym zagadnieniem, które należy rozwiązać w pierwszej kolejności, jest dobór procesora o odpowiednio dużej mocy obliczeniowej. Zaprezentowane przez autorów rozwiązanie, wykorzystujące procesor sygnałowy TMS320F22812 wydaje się wystarczające przy użyciu podstawowych, stosowanych obecnie metod sterowania wtryskiem. W przypadku najbardziej złożonych algorytmów sterowania moc obliczeniowa zastosowanego procesora może okazać się zbyt mała. Można wówczas skorzystać z najszybszych uniwersalnych stało- lub zmiennoprzecinkowych procesorów DSP wchodzących w skład rodzin TMS320C6000, Blackfine i Sharc, które osiągają obecnie efektywność obliczeniową rzędu pojedynczych tysięcy MIPS/MFLOPS. Dlatego też, do celów badawczych opracowano specjalną wersję modułu jednostki centralnej z procesorem zmiennoprzecinkowym rodziny TMS320C672x.

LITERATURA

- [1] DŁUGOSZ T., *New filter separation efficiency in CAN bus*, Przegląd Elektrotechniczny, 7/2011.
- [2] KNEBA Z., MAKOWSKI S., *Zasilanie i sterowanie silników*, WKŁ, Warszawa 2004.
- [3] MERKISZ J., MAZUREK S., *Pokładowe systemy diagnostyczne pojazdów samochodowych*, WKŁ, Warszawa 2007.
- [4] PRACA ZBIOROWA, *Silniki pojazdów samochodowych*. REA, Warszawa 2010.
- [5] ROKOSCH U., *Układy oczyszczania spalin i pokładowe systemy diagnostyczne samochodów OBD*, WKŁ, Warszawa 2007.
- [6] SZWAJA S., NABER J.D., *Exhaust Gas Recirculation Strategy In The Hydrogen SI Engine*, Journal of Kones – Powertrain and Transport, Warsaw 2007.
- [7] CAN in automation – www.cancia.org
- [8] *Czujniki w pojazdach samochodowych*, Informatory Techniczne Bosch, WKŁ, Warszawa 2002.
- [9] *Sterowanie silników o zapłonie samoczynnym*, Informatory Techniczne, WKŁ, Warszawa 2004.
- [10] TMS320F2812 Data Manual, Texas instruments, June 2004.

A NEW IDEA OF DSP-BASED ECU COMPUTER/COMBUSTION ENGINE CONTROLLER FOR AUTOMOTIVE APPLICATIONS

In article the possibility of a new module of central unit with DSP/FPGA elements to car vehicle engines control is described. Elaborated European On Board Diagnosis (EOBD) standard presented in nowadays cars' vehicles. Presented abilities that changes of engine's parameter by the newest digital signal processors in dedicated modules for ECU are carried out.