

**Sławomir WIERZBICKI, Michał ŚMIEJA**

UNIwersytet WARMIŃSKO – MAZURSKI W OLSZTYNIE, WYDZIAŁ NAUK TECHNICZNYCH  
ul. Oczapowskiego 11, 10-719 Olsztyn

**Sterowanie układem zasilania silnika o zapłonie samoczynnym w środowisku rapid-prototyping z wykorzystaniem LabView**

Dr inż. Sławomir WIERZBICKI

Pracuje na stanowisku adiunkta w Katedrze Mechatroniki, na Wydziale Nauk Technicznych, Uniwersytetu Warmińsko-Mazurskiego w Olsztynie. W pracy naukowej zajmuje się zagadnieniami zasilania i diagnostyki współczesnych silników spalinowych o zapłonie samoczynnym. Jest członkiem Polskiego Towarzystwa Diagnostyki Technicznej, Polskiego Towarzystwa Naukowego Silników Spalinowych oraz Polskiego Naukowo-Technicznego Towarzystwa Eksploatacji.

e-mail: slawekw@uwm.edu.pl



Dr inż. Michał ŚMIEJA

Absolwent Wydziału Inżynierii Mechanicznej i Robotyki AGH w Krakowie. Obecnie pracuje na stanowisku adiunkta w Katedrze Mechatroniki, na Wydziale Nauk Technicznych, Uniwersytetu Warmińsko-Mazurskiego w Olsztynie. W pracy naukowej zajmuje się zagadnieniami sterowania i komunikacji w układach automatyki.

e-mail: smieja@uwm.edu.pl

**Streszczenie**

Układ sterujący zasilaniem to najistotniejszy element silnika spalinowego decydujący o jego osiągnięciach. W artykule opisano budowę laboratoryjnego układu sterowania zasilaniem silnika z wykorzystaniem narzędzi naukowo-inżynierskich. Opracowany układ oparto na oprogramowaniu LabView i sterowniku rodziny CRio wykorzystujący układy FPGA i mikrokontroler rodziny PowerPc. Zawarte w artykule przykładowe wyniki sterowania potwierdzają skuteczność prezentowanego podejścia do projektowania tego typu stanowisk.

**Słowa kluczowe:** silnik spalinowy o zapłonie samoczynnym, układ zasilania, sterownik, LabView.

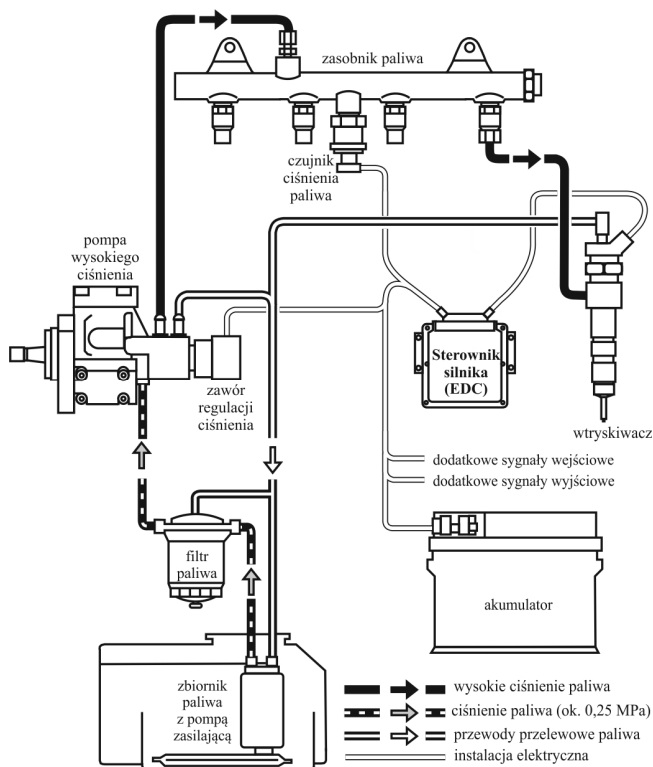
**Controlling the fuel feeding system in a self-ignition engine under fast-prototyping conditions using LabView****Abstract**

Modern control systems for fuel feeding to self-ignition engines are complex, both in terms of their structure and software. Their complexity virtually prevents their use for controlling engines at test stands, where the major expected features include easy access and control of selected engine parameters. Therefore, in order to study such objects, it is necessary to develop control systems adapted to specific needs [4, 9]. In order to ensure proper operation of an engine and to reproduce the actual conditions of its operation, it is necessary to control its input parameters precisely as well as ensure the complex series of impulses which control fuel injections (Fig. 6). This paper describes the structure of a LabView-based Common Rail-type laboratory controller of a feeding system. The controller was developed based on a CompactRio programmable controller using FPGA systems and PowerPC family microcontrollers, with real-time operation capability. A Driven DI card was used as an injection control output module, which is a card dedicated for controlling this type of elements. The parameters of a PID regulator, which controls the pressure regulation valve, were also selected to ensure that the set fuel pressure is maintained regardless of the operating conditions. The structure of the controller developed in the study is open, which enables its use in different kinds of research and its expansion by additional control systems, as well as recording the operation parameters.

**Keywords:** compression ignition engine, fueling system, controller, LabView.

**1. Wstęp**

Najpowszechniej obecnie stosowanym rozwiązaniem wykorzystywanym do zasilania silników o zapłonie samoczynnym jest tzw. system Common Rail. W stosunku do wcześniejszych konstrukcji dzięki relatywnie prostej budowie oraz elektronicznym układom sterującym systemy te pozwalają osiągnąć korzystne parametry pracy silnika z szczególnym uwzględnieniem niskiej emisji związków toksycznych do atmosfery. Budowę układu zasilania silnika o zapłonie samoczynnym typu Common Rail przedstawiono schematycznie na rys. 1.



Rys. 1. Budowa układu zasilania paliwem typu Common Rail

Fig. 1. Chart of a supply system with Common Rail solution

Zadaniem systemu Common Rail jest dostarczenie do komory spalania dawki paliwa o określonej wielkości w określonych momentach czasu (położeniach wału korbowego). Wzajemna relacja tych wielkości w szerokim zakresie wpływa na parametry mechaniczne silnika oraz wspomniane wcześniej skutki uboczne w postaci emisji związków toksycznych.

Formalny opis mechanizmów i zjawisk wprowadzania paliwa do przestrzeni roboczej jest złożony i szeroko opisany w literaturze [5, 6]. Ostateczny optymalny przebieg wtrysku paliwa zależy od wielu czynników, w tym głównie od: konstrukcji mechanicznej, obciążenia silnika, jakości paliwa, warunków atmosferycznych. Z oczywistych względów ingerencja w komercyjne sterowniki silników tego typu układów jest zadaniem niezwykle czasochłonnym, a w wielu przypadkach kolidujących z prawem. Alternatywą do tych sterowników są wykorzystywane na stanowiskach badawczych rozwiązania indywidualne. Popularnym podejściem jest stosowanie urządzeń modyfikujących przebieg wybranych sygnałów w seryjnie produkowanych układach napędowych [7].

Innym sposobem ingerencji w działanie układu jest modyfikacja fabrycznego oprogramowania, zwana chiptuningiem [8]. Tego typu podejścia nie zapewniają jednak dowolnego kształtowania poszczególnych parametrów sterujących z uwagi za relacje pomiędzy poszczególnymi parametrami zapisane w pamięci sterownika.

Inne podejście do budowy układu sterowania silnikiem oparte na samodzielnie przygotowanych kompletnych układach sterowania przedstawiono w [1, 4, 9]. Daleko posunięta otwartość tego typu rozwiązań rozumiana jako możliwość dostosowania algorytmów i parametrów dla założonego procesu badawczego bazuje na wykorzystaniu specjalistycznych narzędzi softwarowych i sprzętowych co w dużym stopniu stanowi ograniczenie ze względu na konieczność rozbudowy zespołów badawczych o wyspecjalizowanych specjalistów w zakresie elektroniki i informatyki. Wykorzystanie powszechnie dostępnych i zobiektywizowanych w środowiskach naukowych narzędzi typu rapid prototyping opisane w niniejszym artykule stanowi istotną alternatywę dla przyspieszenia i uelastycznienia procesu badawczego w zakresie sterowania układami zasilania silników. Przyjęty sposób realizacji stanowiska badawczego mający na celu wyznaczenie związków między wyselekcjonowanymi wielkościami fizycznymi takimi jak: ciśnieniem paliwa, początkiem wtrysku i wielkością dawki a osiąganymi silnika, wymaga wielokrotnie dezintegracji złożonych układów sterowania na podukłady badane w określonych fazach eksperymentu przy na sztywno ustalonych pozostałych parametrach.

W kolejnych etapach badań w celu wyznaczenia złożonych oddziaływań konieczna jest możliwość powtórnej reintegracji układu. Będący przedmiotem artykułu sterownik układu Common Rail charakteryzuje się konstrukcją spełniającą obydwa te wymagania.

W ramach opisanej pracy rozdzielono zadania sterowania w systemie CR na dwa podukłady tj. układ utrzymania ciśnienia w zasobniku oraz układ sterowania otwarciem wtryskiwacza.

Koncepcję stanowiska będącego przedmiotem niniejszego artykułu oparto na następujących założeniach:

- możliwość pracy w trybie czasu rzeczywistego;
- szeroka dostępność kompatybilnego ze środowiskiem programistycznym wyposażenia sprzętowego, takiego jak moduły akwizycji sygnałów oraz moduły przygotowania sygnałów wyjściowych;
- dostępność specjalizowanych modułów sprzętowych kompatybilnych ze środowiskiem programistycznym;
- łatwość integracji z zewnętrznymi układami sterowania np. układem sterowania obciążeniem silnika;
- krótki czas rekonfiguracji układu sprzętowego i programowego w celu dostosowania do aktualnego programu badań;
- wykorzystanie środowiska naukowo-inżynierskiego pozwalającego na łatwą implementację złożonego aparatu matematycznego;
- możliwość szybkiej i elastycznej wizualizacji i archiwizacji danych;
- wykorzystania gotowych narzędzi do elastycznego tworzenia interfejsów wizualizacji danych.

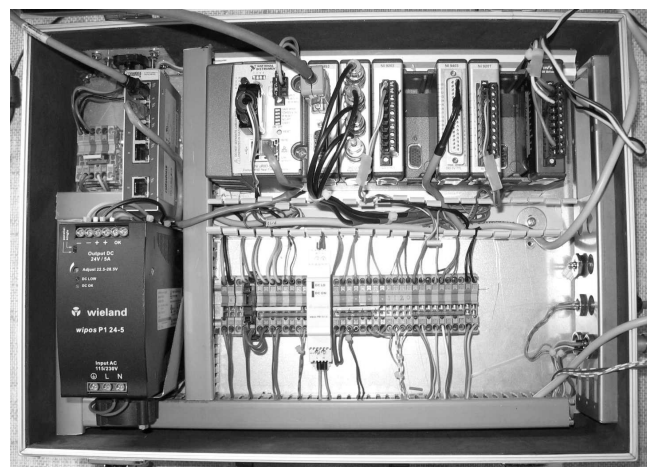
Mając na uwadze powyższe założenia do budowy układu sterowania zasilaniem silnika typu Common Rail wykorzystano programowalny sterownik typu CompactRio firmy National Instruments (rys. 2).

Istotną cechą tego sterownika jest możliwość programowania przy użyciu środowiska programistycznego LabView oraz szeroka oferta dostępnych modułów wejść/wyjść. Dostępne są również specjalistyczne karty dedykowane do realizacji złożonych przebiegów prądów i napięć wymaganych do sterowania wtryskiwaczami paliwa.

## 2. Układ utrzymania ciśnienia paliwa

Podstawowym zadaniem układu zasilania silnika paliwem jest podanie określonej dawki paliwa odpowiadającej aktualnemu zapotrzebowaniu silnika przy ciśnieniu wtrysku zapewniającym wytworzenie właściwego rozpylenia dawki paliwa w komorze spalania. Najpopularniejszym obecnie rozwiązaniem jest będący

przedmiotem analizy układ Common Rail, w którym za wytworzenie wysokiego ciśnienia odpowiada pompa wysokiego ciśnienia, dozowanie paliwa zaś odbywa się za pośrednictwem wtryskiwaczy sterowanych elektrycznie.



Rys. 2. Widok głównej jednostki sterującej układu Common Rail  
Fig. 2. View of the main control unit of Common Rail system

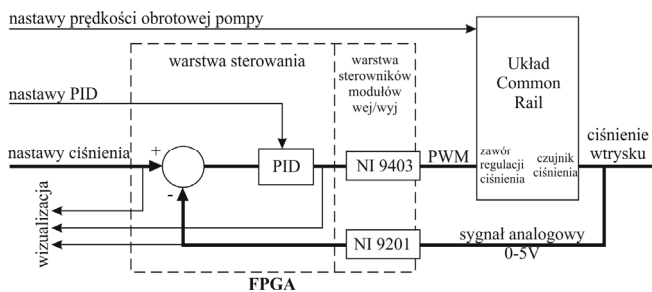
Najistotniejsze parametry decydujące o skuteczności i precyzji tego rozwiązania to dokładna wartość ciśnienia, niskie tolerancje czasów rozpoczęcia i zakończenia dozowania wtrysku paliwa.

W układzie Common Rail paliwo zassane przez pompę zasilającą ze zbiornika przez układ filtrujący doprowadzane jest do pompy wysokiego ciśnienia. Następnie pompa ta podaje paliwo pod ciśnieniem rzędu nawet 260 MPa do zasobnika, który za pomocą przewodów wysokiego ciśnienia połączony jest z wtryskiwaczami. Wartość ciśnienia paliwa w zasobniku ustalana jest w trakcie pracy silnika w funkcji prędkości obrotowej i obciążenia silnika. Elementem wykonawczym wpływającym bezpośrednio na ciśnienie jest zawór regulacji ciśnienia skojarzony na ogół z pompą wysokiego ciśnienia. Sygnał sprzężenia zwrotnego na podstawie którego sterownik silnika wypracowuje właściwe ustawienia zaworu regulacji pochodzi z czujnika ciśnienia paliwa umieszczonego w zasobniku.

Źródłem zakłóceń w przedstawionym układzie regulacji są zmienny wydatek pompy wysokiego ciśnienia wynikający z mechanicznego sprzężenia z układem korbowym silnika, zmienna gęstość paliwa pod wpływem zmian temperatury, zmiany nastaw ciśnienia w funkcji obciążenia i obrotów oraz zmienny wydatek paliwa podawanego przez wtryskiwacze do komory spalania. Zadaniem układu automatycznej regulacji jest uzyskanie zadanego ciśnienia paliwa w zasobniku (sygnał wyjściowy).

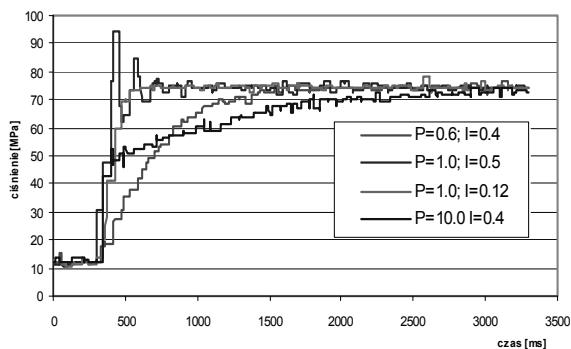
Do wykonania części mechanicznej układu zasilania zaadaptowano typowe elementy wykorzystywane w pojazdach. W celu kontrolowanego przebiegu zakłóceń związanych ze zmienną prędkością obrotową sprzężenie z układem korbowym zastąpiono napędem elektrycznym z możliwością ustawiania prędkości obrotowej w postaci sygnału z nastawnika bądź sygnału z współpracujących podzespołów.

Układ regulacji ciśnienia paliwa zrealizowany został w warstwie FPGA sterownika CRio (rys. 3), w której wyróżnić można dwie podwarstwy – drivery modułów wejść/wyjść obsługujące kartę NI9403 odpowiedzialną za generowanie sygnału PWM oraz kartę NI9201 odpowiedzialną za wprowadzenie sygnału analogowego 0-5V pochodzącego z czujnika ciśnienia paliwa. Funkcje sterujące realizowane są w warstwie sterującej w której wykorzystano regulator PI dostępny w bibliotece FPGA Control. Interfejs komunikacyjny z warstwą mikrokontrolera sterownika CRio obejmuje następujące parametry i sygnały: prędkość obrotowa silnika napędzającego pompę, nastawy PI, zadane ciśnienie paliwa, sygnał wyjściowy PI, ciśnienie wyjściowe paliwa, które dalej przesyłane są przez sieć Ethernet do aplikacji na PC.



Rys. 3. Schemat blokowy opracowanego układu regulacji ciśnienia  
Fig. 3. Chart of designed pressure control system

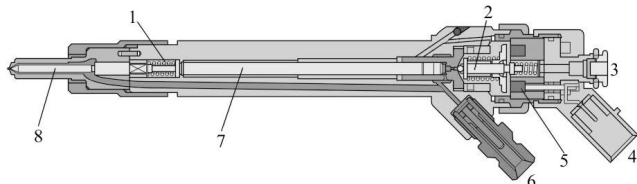
Przykładowe efekty strojenia regulatora PI ciśnienia paliwa z wykorzystaniem opracowanej aplikacji przedstawiono na rys. 4.



Rys. 4. Przykładowe odpowiedzi układu na wymuszenia skokowe sygnałem ciśnienia zadawanego z panelu operatorskiego  
Fig. 4. Step response of the system to change of set input pressure signal

### 3. Układ sterowania otwarciem wtryskiwacza

Zadaniem wtryskiwacza jest rozpylenie paliwa w komorze spalania. Typową konstrukcją wtryskiwacza jako układu elektrohydraulicznego przedstawiono na rys. 5. Przebieg spalania i bilans energetyczny silnika ma bezpośredni związek z momentem otwarcia wtryskiwacza i czasem trwania wtrysku paliwa.

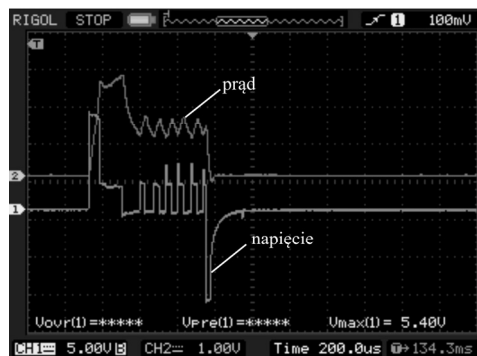


Rys. 5. Wtryskiwacz elektromagnetyczny układu Common Rail (rozwiązanie firmy Bosch): 1 – sprężyna rozpylacza, 2 – rdzeń zaworu elektromagnetycznego, 3 – przelew – do zbiornika paliwa, 4 – złącze elektryczne, 5 – zawór elektromagnetyczny, 6 – doprowadzenie paliwa z zasobnika, 7 – tłoczek sterujący, 8 – iglica rozpylacza

Fig. 5. Electromagnetic injector (Bosch solution): 1 – atomizer spring, 2 – electromagnetic valve core, 3 – overflow – to fuel tank, 4 – electric connector, 5 – electromagnetic valve, 6 – fuel inlet from container, 7 – control piston, 8 – atomizer needle

Ze względu na trudność pomiaru przebiegu wtrysku, wielkości te odwzorowuje się w praktyce przebiegiem wielkości elektrycznych na zaciskach zasilających wtryskiwaczy przy określonych założeniach. Przykład klasycznego przebiegu prądu i napięcia sterującego wtryskiwaczem przedstawiono na rys. 6.

Rozwój konstrukcji silników jak i rozszerzające się spektrum paliw wymusza konieczność optymalizacji tych przebiegów ze względu na optymalizację procesu spalania, niezawodność wtryskiwacza oraz jego energochłonność. Przykładem takich tendencji jest rozdzielanie dawki wtrysku paliwa w najnowszych konstrukcjach na 9 pojedynczych dawek na jeden cykl pracy silnika.

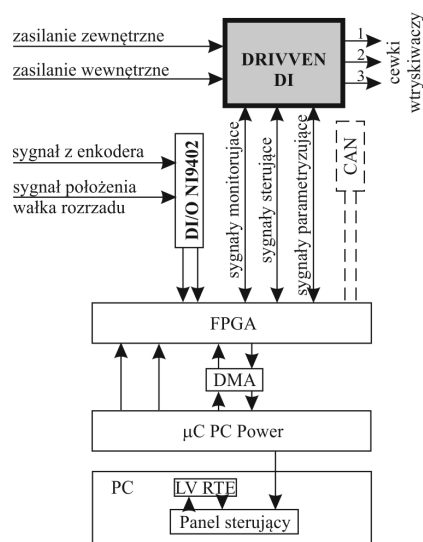


Rys. 6. Rzeczywiste przebiegi napięcia i prądu na cewce wtryskiwacza  
Fig. 6. The actual waveform chart of voltage and current in the injector coil circuit

Stosowane we współczesnych pojazdach wtryskiwacze poza szczegółami konstrukcyjnymi różnią się między sobą parametrami eksploatacyjnymi wynikającymi z ekonomicznie uzasadnionego poziomu dokładności wykonania. W każdym zatem przypadku układ sterownik-wtryskiwacz stanowi indywidualnie zestrojoną parę. Konsekwencją tego jest np. konieczność wprowadzania korekt w układzie sterowania w postaci tzw. kodów IMA (niem. Injector Menge Abgleichung) przy wymianie wtryskiwacza. Przy opracowaniu układu sterowania otwarciem wtryskiwacza przyjęto następujące założenia:

- możliwość sterowania wtryskiwaczami elektromagnetycznymi i piezoelektrycznymi;
- możliwość dowolnego kształtowania przebiegu sygnałów elektrycznych na zaciskach wtryskiwacza;
- możliwość kalibracji wtryskiwacza;
- łatwość integracji z opisanym wcześniej układem utrzymania ciśnienia;
- dostępność narzędzi do wizualizacji uzyskiwanych w procesie kalibracji charakterystyk pracy;
- wysoka precyzja działania;
- szybki czas reakcji na sygnały sterujące otwarciem i czasem trwania wtrysku.

Rozwiązanie układu sterowania otwarciem wtryskiwacza oparto o przyjętą na wstępie jednolitą platformę sprzętowo-programową, uzyskując tym samym spełnienie przyjętych założeń (rys. 7).



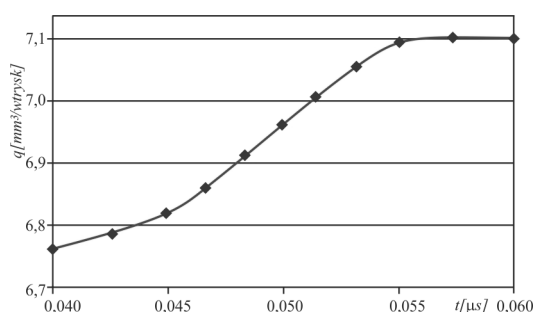
Rys. 7. Architektura układu sterowania wtryskiwaczem z wykorzystaniem karty Driven DI

Fig. 7. Architecture of the injector control system using a Driven DI card

Kluczowym elementem układu jest specjalizowana karta Driven DI, dedykowana do sterowania wtryskiwaczami elektromagnetycznymi i piezokwarcowymi [2]. Dedykowane oprogramowanie współpracujące z modułem Driven DI działa w war-

stwie FPGA przy częstotliwości zegara 40 MHz, co pozwala na osiągnięcie wysokiego stopnia determinizmu czasowego w torze sygnału między czujnikami pozycji wału korbowego (sygnał z enkodera i czujnika położenia wałka rozrządu) a inicjacją wtrysku związaną z przebiegiem prądu i napięcia na zaciskach wtryskiwacza.

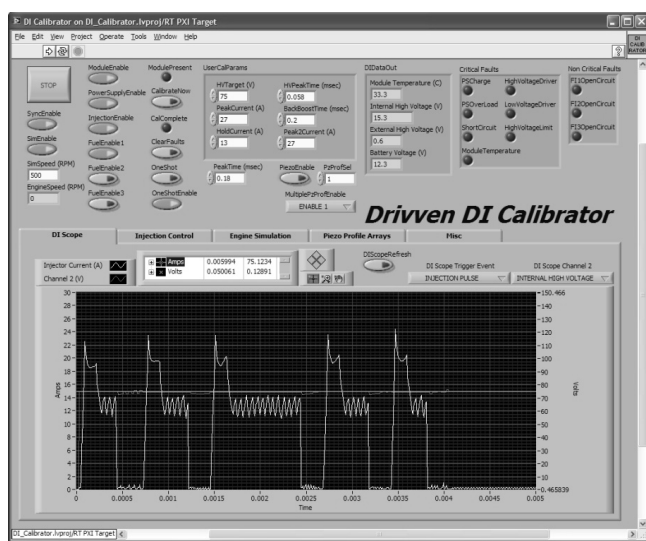
Na rys. 8 przedstawiono przykładowe wyniki kalibracji ilustrujące wpływ czasu trwania impulsu wysokiego napięcia na wielkość dawki wtryskiwanego paliwa [10]. Przebieg ten wyraźnie pokazuje, iż po przekroczeniu pewnego czasu tego impulsu wielkość dawki nie ulega zmianie, zatem odpowiedni dobór czasu tego impulsu pozwala ograniczyć nie tylko zapotrzebowanie energii potrzebnej do otwarcia wtryskiwacza, ale również na ograniczenie nagrzewania cewki wtryskiwacza.



Rys. 8. Wpływ czasu trwania impulsu wysokiego napięcia na wielkość dawki wtryskiwanego paliwa

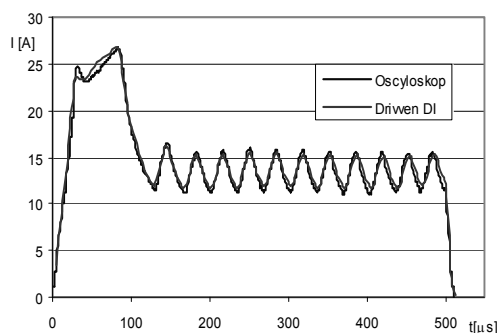
Fig. 8. Relation between the duration of the high voltage pulse, and value of the injected fuel dose

Parametryzacja algorytmów aplikowanych w warstwie FPGA odbywa się w warstwach mikrokontrolera i komputera PC. W układzie komunikacji między warstwami FPGA i mikrokontrolera wykorzystano sterownik DMA. Panel sterujący pełniący również funkcje interfejsu wizualizacji opracowano w LabView pracujący na komputerze klasy PC. Przykładowy widok panelu kalibracyjnego karty Driven DI przedstawiono na rys. 9. W trakcie realizacji stanowiska przeprowadzono testy zgodności wyników pomiarów uzyskanych z wykorzystaniem zastosowanego sprzętu i oprogramowania z wynikami uzyskanymi za pomocą zewnętrznego urządzenia rejestrującego (rys. 10). Przedstawione przebiegi pokazują dużą zgodność wyników uzyskanych za pomocą wbudowanego oprogramowania z rzeczywistymi wynikami pomiarów.



Rys. 9. Architektura układu sterowania wtryskiwaczem z wykorzystaniem karty Driven DI

Fig. 9. Architecture of the injector control system using a Driven DI card



Rys. 10. Zarejestrowane przebiegi prądu na cewce wtryskiwacza za pomocą modułu Driven i oscyloskopu

Fig. 10. Current changes recorded at the injector coil using the Driven module and the oscilloscope

## 4. Wnioski

Opracowany i zrealizowany układ zasilania silnika o zapłonie samoczynnym wykorzystany został na stanowisku do badania wpływu udziału biogazu w dawce zasilającej silnik.

Wykonane na potrzeby badań testy i kalibracje zbudowanego sterownika wykazały bardzo dobre parametry układu takie jak: stabilność ciśnienia, powtarzalność wyników, dokładność sterowania przebiegiem wielkości elektrycznych sterujących wtryskiwaczem. Do najważniejszych zalet opracowanego sterownika należy zaliczyć:

- łatwą integrację ze stanowiskiem hamownianym;
- możliwość łatwej rozbudowy zarówno układu sterowania jak i interfejsu wizualizacji wyników;
- możliwość archiwizacji danych w dowolnym formacie;
- łatwą implementację opracowanych algorytmów sterowania silnikiem.

Artykuł opracowany w ramach projektu badawczego nr N N509 573039, finansowanego przez Narodowe Centrum Nauki w latach 2010-2014.

## 5. Literatura

- [1] Arnold J.F., Langlois N., Chafouk H.: Fuzzy controller of the air system of a diesel engine: Real-time simulation. *European Journal of Operational Research*. Vol. 193, Issue 1, 2009, p. 282-288.
- [2] DI Driver Module Kit User's Manual D000020. Rev. E3. Driven, Inc., 2010.
- [3] Gustof P., Hornik A.: The influence of change software of engine control unit on chosen parameters of its work. *Transport Problems*. 2007, t. 2, s. 31-36.
- [4] Grzeszczyk R., Merksiz J., Drop T., Kamiński T., Niezgodna M., Bogdanowicz Z.: The use of the open source engine control modules in the laboratory research of internal combustion engines. *Combustion Engines*. Vol. 50, nr 3. 2011.
- [5] Isermann R., Muller N.: Design of computer controlled combustion engines. *Mechatronics* 13 (2003). pp.1067-1089.
- [6] Plianos A., Achir A., Stobart R., Langlois N.: Dynamic feedback linearization based control synthesis of the turbocharged Diesel engine. *American Control Conference*, 2007. p. 4407 - 4412.
- [7] Prajwowski K.: Possibilities of changes of parameters of the driver to engine Fiat 1.3 JTD performances. *Journal of KONES*. Vol. 18. No. 4/2011, pp. 389-396.
- [8] Sethanunt K, Koetnyiom S.: Influence of fuel pressure increment in diesel common rail engine using external tuning box. *International Journal of Engineering Science and Innovative Technology (IJESIT)*. Vol. 2, 2013.
- [9] Stelmasiak Z., Knefel T., Larisch J.: Sterownik do badań silników z systemem wtrysku Common Rail. *PAK*, 03/2010, s. 217-220.
- [10] Śmieja M., Wierzbicki S., Mamala J.: Sterowanie dawką wtryskiwanego paliwa w układzie Common Rail z wykorzystaniem środowiska LabView. *Combustion engines*, 3(154)/2013, s. 123+CD.