

Michał ŚMIEJA
Sławomir WIERZBICKI
Jarosław MAMALA

PTNSS–2013–SC–091

Control of the injected fuel charge in the common rail system using the LabVIEW environment

Abstract: The common rail system has currently become a commonly used fuel feed system for compression ignition engines. In this system, the amount of the injected fuel charge closely depends on the course of the parameters of the electrical pulse sent by the power output unit of the system for injector fuel feed from the engine controller. Therefore, when designing your own controller for this type of system, it is extremely important to properly select the parameters of the course of the pulse guaranteeing precise fuel injection. The article presents the results of experimental tests for common rail electromagnetic injectors, controlled with a dedicated Drivven card, cooperating with a National Instruments CompactRIO programmable controller. The test results described in the article present the effect of the basic parameters of the electrical pulse opening the electromagnetic injector on the value of the injected fuel charge.

Keywords: CR electromagnetic fuel injector, injector control pulse, value of the injected fuel charge

Sterowanie dawką wtryskiwanego paliwa w układzie common rail z wykorzystaniem środowiska LabView

Streszczenie: Obecnie system common rail stał się powszechnie wykorzystywanym układem zasilania w paliwo silników o zapłonie samoczynnym. W tym układzie, wielkość wtryskiwanej dawki paliwa jest ściśle uzależniona od przebiegu parametrów impulsu elektrycznego wysłanego przez końcówkę mocy układu zasilania wtryskiwacza paliwem z sterownika silnika. Konstruując, zatem własny sterownik do tego typu układów niezwykle ważny jest właściwy dobór parametrów przebiegu impulsu gwarantującego precyzyjny wtrysk paliwa. W artykule przedstawione wyniki badań eksperymentalnych elektromagnetycznych wtryskiwaczy układu common rail, sterowanych za pomocą dedykowanej karty Drivven, współpracującej z programowalnym sterownikiem CompactRIO firmy National Instruments. Opisane w artykule wyniki badań przedstawiają wpływ podstawowych parametrów impulsu elektrycznego otwierającego wtryskiwacz elektromagnetyczny na wartość dawki wtryskiwanego paliwa.

Słowa kluczowe: elektromagnetyczny wtryskiwacz paliwa CR, impuls sterujący wtryskiwaczem, wartość dawki wtryskiwanego paliwa

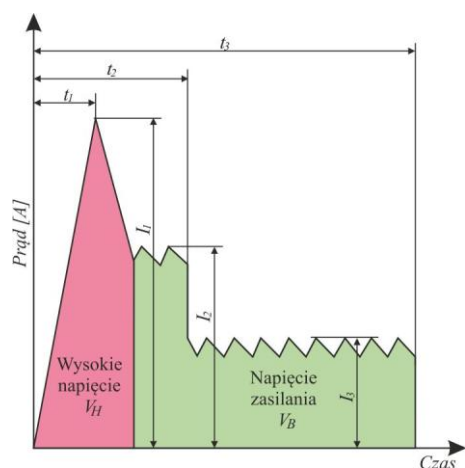
1. Wprowadzenie

Troska o środowisko naturalne oraz konieczność spełnienia rygorystycznych norm odnośnie poziomu emisji związków toksycznych w spalinach silnika, wymusza poszukiwanie nowych rozwiązań układów zasilania paliwem silników spalinowych. Sprostanie tym wymaganiom wiąże się z zastosowaniem nowoczesnych, wysokotechnologicznych układów wtryskowych, których sterowanie wymaga wykorzystania zaawansowanych metod sterowania pracą silnika. Ilość parametrów i zmiennych opisujących stan obiektu, jakim jest nowoczesny silnik spalinowy oraz potrzeba ich przetwarzania oznacza, w praktyce powszechne wykorzystanie układów sterujących opartych o zaawansowane urządzenia elektroniczne, w tym: mikrokontrolery, układy FPGA (Field Programmable Gate Array), układy DSP (Digital Signal Processor), które pracują w trybie czasu rzeczywistego (real time) [3, 6].

Jednym z najistotniejszych podzespołów silnika w tym kontekście jest układ zasilania paliwem, którego głównym zadaniem jest precyzyjne dozowanie i dostarczanie określonej dawki paliwa w procesie

spalania. Ponadto dawka wtryskiwanego paliwa zależy od takich zmiennych jak: obroty silnika, obciążenie i jego temperatura oraz inne wynikające z dodatkowego wyposażenia pojazdu. Biorąc pod uwagę konieczność kształtowania dawki paliwa przy zachowaniu wysokiej precyzji przebiegu procesu jego wtrysku, szczególnego znaczenia nabiera sterowanie pracą samego wtryskiwacza [2].

Klasyczny stosowany obecnie przebieg sygnału sterującego cewką wtryskiwacza elektromagnetycznego układu Common Rail przedstawiono na rys. 1. Ze względu na jego konstrukcję oraz określone cechy fizyczne takie jak: bezwładność iglicy wtryskiwacza, indukcyjność uzwojeń cewki, wartości prądu są kontrolowane przez końcówkę mocy stopnia wyjściowego układu sterującego sterownika która jest realizowana w trzech fazach. Pierwsze dwie fazy cechują się wyraźną dynamiką dotyczącą zmian wielkości elektrycznych, magnetycznych i mechanicznych. Charakter fazy trzeciej można w dużym przybliżeniu określić jako statyczny polegający na utrzymaniu iglicy zaworu wtryskiwacza w położeniu otwartym [1, 3, 6].



Rys. 1. Przykładowy przebieg prądu sterowania wtryskiwaczem elektromagnetycznym [1]

Fig. 1. Example changes of the electromagnetic injector control current [1]

Ze względu jednak na proces sterowania elektromagnesem wtryskiwacza, wymaganą dokładność dawkowania paliwa, nowoczesne układy sterujące kontrolują również dystrybucję energii elektromagnetycznej związanej z otwieraniem i zamykaniem iglicy zaworu wtryskiwacza. Używane, w seryjnie produkowanych silnikach, sterowniki uwzględniają wysoką złożoność wspomnianych powyżej procesów i są optymalizowane stosownie do jego struktury, algorytmu i parametru jego sterowania. Naturalną konsekwencją optymalizacji jest zawężenie obszaru aplikacji wypracowanego rozwiązania do określonej grupy produktów lub wręcz do konkretnego modelu wtryskiwacza. Racjonalne z punktu widzenia produkcji masowej, ograniczenie uniwersalności produktu, podyktowane jego kosztami produkcji, uniemożliwia w wielu przypadkach wykorzystanie takich sterowników do celów badawczych. Istotą tych badań, jest wielokrotnie przeprowadzenie testów dla różnych wariantów konfiguracji sprzętowej oraz parametrów układu sterowania. W ramach prowadzonych w Katedrze Mechatroniki, UWM w Olsztynie prac nad dwupaliwowym zasilaniem silników o zapłonie samoczynnym, opracowano stanowisko badawcze wykorzystujące układ typu CR do wtrysku dawki pilotującej paliwa ciekłego. Mając na względzie przewidywany szeroki obszar poszukiwań optymalnego sposobu zasilania do sterowania pracą wtryskiwacza zdecydowano się wykorzystać moduł Drivven DI.

W ramach niniejszego artykułu przedstawiono wyniki kalibracji i testów tego modułu współpracującego z wtryskiwaczem elektromagnetycznym firmy BOSCH o numerze BOSCH 0445110083. Podstawowe parametry cewki tego wtryskiwacza:

- indukcyjność: 0,21 [mH];
- rezystancja: 0,4 [Ω].

2. Moduł DRIVVEN DI w aplikacji na stanowisku badawczym

Wśród najistotniejszych kryteriów określających przydatność układu sterującego pracą wtryskiwaczy w ramach prowadzonych badań wymienić należy:

- łatwość integracji z softwarowym środowiskiem naukowo-inżynierskim np. LabView;
- elastyczność aplikacji, rozumiana jako możliwość współpracy z wtryskiwaczami o zróżnicowanych konstrukcjach oraz parametrach;
- dokładność i powtarzalność kształtowanego przez układ przebiegu sygnału, skutkującego precyzyjnym określeniem wielkości dawki paliwa zgodnie z ścisłym reżimem czasowym;

Kierując się powyższymi kryteriami w pracach nad zintegrowanym sterownikiem sterowania silnikiem o zapłonie samoczynnym pracującym w układzie dwupaliwowym wykorzystano moduł Drivven DI dedykowany do współpracy z programowalnym sterownikiem rodziny CompactRio firmy NI.

Dołączone do modułu oprogramowanie umożliwia kalibrację urządzenia dla wybranego wtryskiwacza oraz wizualizację efektów tej kalibracji. Schemat blokowy architektury układu przedstawiono na rys. 2.

Dodatkowo oprogramowanie umożliwia analizę prądu zasilającego cewkę, informując użytkownika o przekroczeniach dopuszczalnych wartości na ekranie programu kalibrującego, zabezpieczając tym samym układ przed możliwym uszkodzeniem. Moduł ten umożliwia między innymi śledzenie następujących wielkości i zdarzeń:

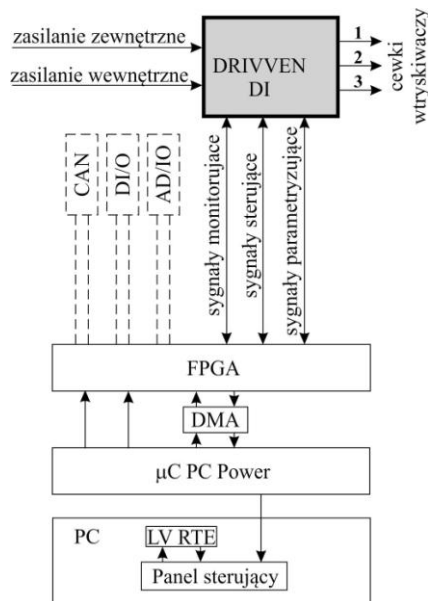
- przekroczenie maksymalnego napięcia na cewce wtryskiwacza;
- maksymalnego natężenia prądu;
- zwarcia obwodu wtryskiwacza;
- temperatury modułu sterującego;
- przerwy w obwodzie wtryskiwacza;
- niewłaściwego napięcia zasilania układu.

3. Badania wpływu przebiegu parametrów impulsu elektrycznego na wydatek wtryskiwacza paliwa

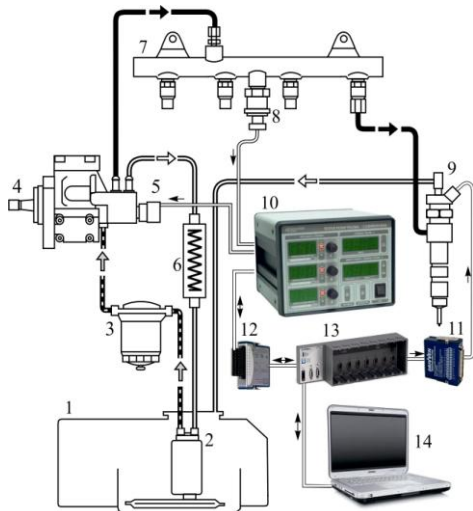
Celem prowadzonych badań było określenie wpływu przebiegu impulsu sterującego wtryskiwaczem na wielkość oraz powtarzalność dawki wtryskiwanego paliwa.

W celu określania wpływu przebiegu impulsu sterującego na wydatek wtryskiwacza, zmodyfikowano program do kalibracji wchodzący w skład zestawu DRIVVEN pracujący w środowisku LabView. Zasilanie wtryskiwacza paliwem zrealizowano z wykorzystaniem zbudowanego na potrzeby badań stanowiskowego symulatora układu Common Rail. Układ ten wyposażono w interfejs analo-

gowsy umożliwiające integrację poprzez zewnętrzny nadajnik ciśnienia, który jest wyposażony w układ jego stabilizacji, umożliwiające rejestrowanie przebiegu zmian ciśnienia w zasobniku (rys. 3).

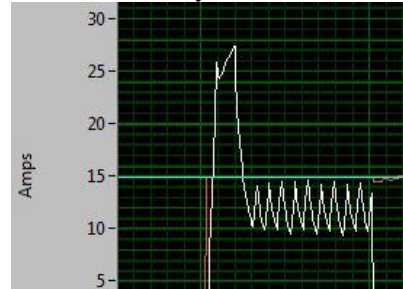


Rys. 2. Architektura układu sterowania wtryskiwaczem z wykorzystaniem karty Drivven DI
Fig. 2. Architecture of the injector control system using a Drivven DI card



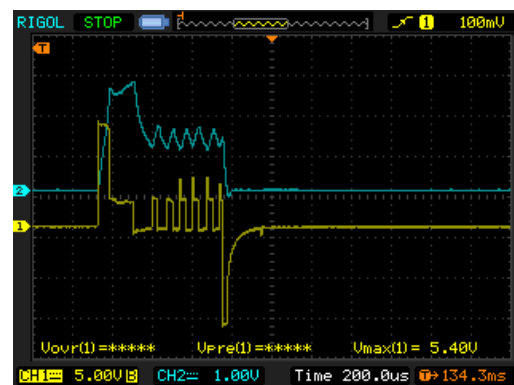
Rys. 3. Schemat sterowania układem zasilania: 1 – zbiornik paliwa, 2 – pompa zasilająca, 3 – filtr paliwa, 4 – pompa wysokiego ciśnienia CR, 5 – regulator ciśnienia, 6 – chłodnica paliwa, 7 – zasobnik, 8 – czujnik ciśnienia paliwa, 9 – wtryskiwacz elektromagnetyczny, 10 – moduł sterujący (wykonawczy) pompy wysokiego ciśnienia, 11 – karta Drivven, 12, karta wejść/wyjść, 13 – moduł Compact Rio, 14 – komputer PC z oprogramowaniem
Fig. 3. Scheme of control of supply with fuel: 1 – tank, 2 – supply pump, 3 – filter, 4 – high pressure pump, 5 – pressure control valve, 6 – fuel cooler, 7 – fuel container, 8 – pressure sensor, 9 – electromagnetic injector, 10 – high pressure pump module, 11 – Drivven card, 12, input/output card, 13 – module Compact Rio, 14 – PC computer with software

Każdy z realizowanych testów, poprzedzono kalibracją modułu Drivven DI, a zwizualizowany w programie kalibracyjnym przebieg prądu porównywano z przebiegiem rzeczywistym, rejestrowanym za pomocą oscyloskopu wyposażonego w sondę prądową HR30DC/AC oraz różnicową sondę napięciową Agilent 1142A (200 MHz, 1 MΩ). Przykładowe przebiegi prądu i napięcia uzyskane obiema metodami przedstawiono na rys. 4 i 5.



Rys. 4. Przykładowy przebieg prądu w wtryskiwacz zarejestrowany z wykorzystaniem programu kalibracyjnym

Fig. 4. An example of the current flow in the injector registered during the calibration process



Rys. 5. Rzeczywiste przebiegi napięcia (kolor żółty) i prądu (kolor niebieski) na cewce wtryskiwacza przy $V_1=75V$, $I_1=27A$, $I_2=27A$, $I_3=12A$, $V_2=12V$, $t_1=0,058ms$, $t_2=0,18ms$; $t_3=0,625ms$

Fig. 5. The actual waveform chart of voltage (yellow) and current (blue) in the injector coil circuit ($V_1=75V$, $I_1=27A$, $I_2=27A$, $I_3=12A$, $V_2=12V$, $t_1=0,058ms$, $t_2=0,18ms$; $t_3=0,625ms$)

Test wydajności wtryskiwacza realizowano wykonując serie pomiarowe, podczas których mierzono masę wtryskiwanego paliwa podczas realizacji przez układ 2000 wtrysków. Masę paliwa określano na wadze laboratoryjnej z dokładnością do 0,01g. Następnie obliczono średnią objętość dawki paliwa wtryskiwanego podczas jednego cyklu pracy wtryskiwacza. Dla celów statystycznej obróbki danych pomiary w poszczególnych seriach były powtarzane wielokrotnie. Biorąc pod uwagę opisany w literaturze [4] wpływ temperatury paliwa na wartość wtryskiwanej dawki, kolejne pomiary wykonywano po ustabilizowaniu się temperatury wtryskiwacza oraz przy zachowaniu stałej temperatury paliwa w zbiorniku wynoszącej 40°C.

Elektromagnetyczny wtryskiwacz paliwa stosowany w układach wtryskowych typu Common Rail, wymaga przebiegu impulsu zasilania o odpowiednio modulowanym zarówno napięciu jak i natężeniu prądu.

W celu maksymalnego skrócenia fazy otwierania wtryskiwacza na początku podawane jest na jego cewkę podwyższone napięcie, najczęściej ok. 75 V, a uzyskane natężenie prądu w tej fazie dochodzi w niektórych wtryskiwaczach nawet do 30 A. W fazie drugiej napięcie zasilania na cewce obniżane jest do poziomu napięcia akumulatora ok. 12 V. W zależności od parametrów wtryskiwacza wartość prądu utrzymywana jest na poziomie wymaganym dla pełnego otwarcia wtryskiwacza. W ostatniej fazie w celu obniżenia energochłonności urządzenia natężenie prądu utrzymywane jest na minimalnym, wystarczającym dla podtrzymania iglicy w górnym położeniu, poziomie. Efekt ten uzyskuje się poprzez podanie napięcia zasilania (V_B) w formie PWM.

Różne konstrukcje wtryskiwaczy elektromagnetycznych, a w szczególności ich cewek, wymagają indywidualnego doboru parametrów impulsu elektrycznego sterującego pracą wtryskiwacza.

Możliwość dowolnego kształtowania przebiegu napięcia jak i natężenia impulsu sterującego zapewnił opisany moduł Driven DI. Do sterowania tym modulem wykorzystywana jest aplikacja opracowana w środowisku LabView (rys. 6). Pozwala ona nie tylko na definiowanie podstawowych parametrów przebiegu impulsu, ale również wyposażona jest w dodatkowe narzędzia, które umożliwiają wizualizację przebiegu prądów na cewce i diagnostykę działania układu.

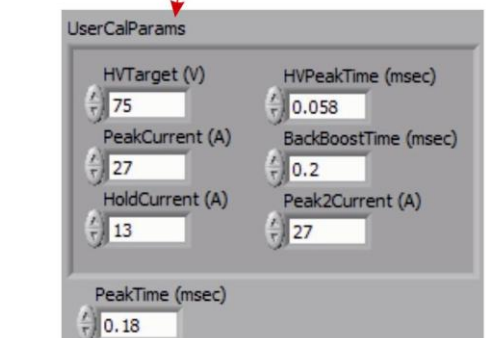
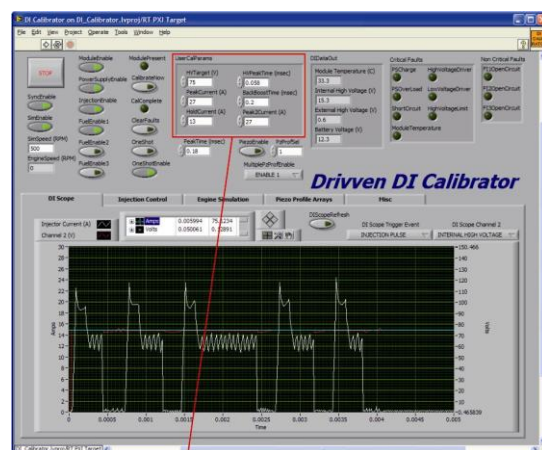
W celu określenia wpływu poszczególnych parametrów impulsu sterującego na wartość i powtarzalność dawki wtryskiwanego paliwa przeprowadzono szereg pomiarów.

W pierwszej kolejności zbadano wpływ wartości napięcia (V_H) impulsu otwierającego wtryskiwacz na wydatek paliwa.

Na rys. 7 przedstawiono przykładowy przebieg napięcia i prądu na cewce wtryskiwacza po obniżeniu napięcia V_H z 75 do 50 V, natomiast na rys. 8 przedstawiono wpływ tego napięcia na wartość dawki wtryskiwanego paliwa.

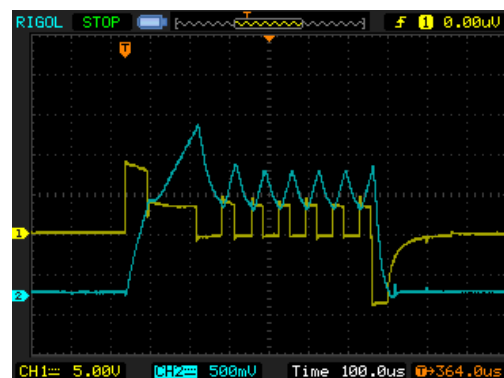
Porównując przebiegu prądu i napięcia na rys. 4 i 7 widać, iż obniżenie napięcia V_H skutkuje znacznym spowolnieniem narastania prądu na cewce wtryskiwacza, a w konsekwencji skutkuje to zmniejszeniem dawki wtryskiwanego paliwa.

W testowanym przypadku maksymalne uzyskane napięcie kształtuje się na poziomie 80 V, po przekroczeniu tej wartości moduł sygnalizuje zwarcie w obwodzie wtryskiwacza.



Rys. 6. Widok okna programu do kalibracji modułu Driven DI

Fig. 6. User interface for calibration of the DI Driven module

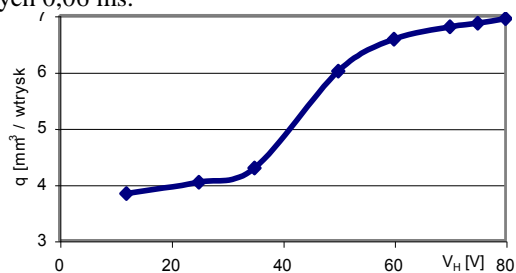


Rys. 7. Rzeczywiste przebiegi napięcia (kolor żółty) i prądu (kolor niebieski) na cewce wtryskiwacza przy $V_H=50V$, $I_1=27A$, $I_2=27A$, $I_3=12A$, $V_2=12V$, $t_1=0,058ms$, $t_2=0,18ms$; $t_3=0,625ms$

Fig. 7. The actual waveform chart of voltage (yellow) and current (blue) in the injector coil circuit ($V_H=50V$, $I_1=27A$, $I_2=27A$, $I_3=12A$, $V_2=12V$, $t_1=0,058ms$, $t_2=0,18ms$; $t_3=0,625ms$)

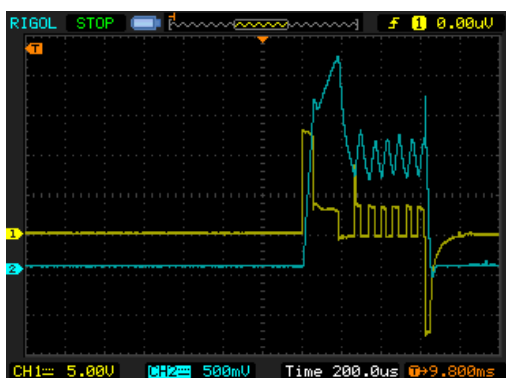
W dalszej kolejności zbadano wpływ czasu trwania impulsu napięcia V_H na wartość dawki wtryskiwanego paliwa. Na rys. 9 przedstawiono przykładowy przebieg prądów i napięć na cewce wtryskiwacza dla czasów trwania tego impulsu w zakresie 0,04–0,06 ms. Zarejestrowane przebiegi potwierdzają, iż skrócenie trwania tego impulsu znacznie obniża wartość prądu, co skutkuje istot-

nym zmniejszeniu dawki wtryskiwanego paliwa (rys. 10). Zastosowana konfiguracja sprzętowa umożliwiła przeprowadzanie badań dla czasów trwania podwyższonego napięcia nie przekraczających 0,06 ms.



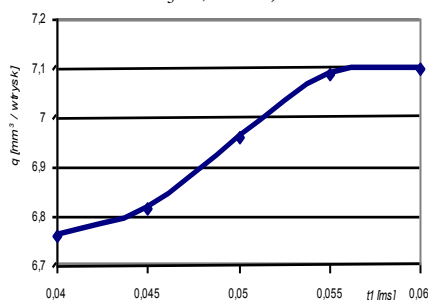
Rys. 8. Wpływ wartości wysokiego napięcia V_H na wartość dawki wtryskiwanego paliwa

Fig. 8. Relation between the high-voltage value V_H , and value of the injected fuel dose



Rys. 9. Rzeczywiste przebiegi napięcia (kolor żółty) i prądu (kolor niebieski) na cewce wtryskiwacza przy $V_1=75V$, $I_1=27A$, $I_2=27A$, $I_3=12A$, $V_2=12V$, $t_1=0,05$, $t_2=0,18ms$; $t_3=0,625ms$

Fig. 9. The actual waveform chart of voltage (yellow) and current (blue) in the injector coil circuit ($V_1=75V$, $I_1=27A$, $I_2=27A$, $I_3=12A$, $V_2=12V$, $t_1=0,05$, $t_2=0,18ms$; $t_3=0,625ms$)



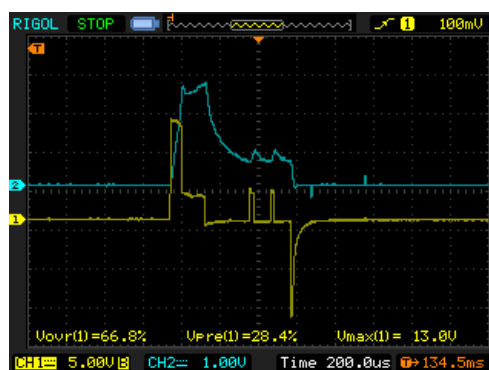
Rys. 10. Wpływ czasu t_1 (trwania impulsu wysokiego napięcia) na wielkość dawki wtryskiwanego paliwa

Fig. 10. Relation between the duration of the V_H pulse, and value of the injected fuel dose

Podczas prowadzonych badań, poddano również analizie wpływ wartości prądu I_2 na wydatek wtryskiwacza. Dla badanego wtryskiwacza podczas badań zmieniano zarówno wartość prądu I_2 jak również czas jego trwania t_2 . Na podstawie przeprowadzonych badań stwierdzono, iż przy odpowiednio ukształtowanym impulsie wysokiego na-

pięcia, dla badanego wtryskiwacza wartość prądu I_2 jak i czas jego trwania nie ma istotnego wpływu na wartość dawki wtryskiwanego paliwa. Stwierdzenie to jest zgodne z informacjami przedstawionym w literaturze, gdzie podano, że w niektórych rozwiązaniach wtryskiwaczy impuls prądu I_2 nie jest konieczny dla właściwej pracy wtryskiwacza [2, 5].

Dla określenia wpływu wartości prądu podtrzymania I_3 na wielkość dawki wtryskiwanego paliwa przeprowadzono serię pomiarów dla I_3 w zakresie $5 \div 15$ A. Na rys. 11 przedstawiono przykładowy zarejestrowany przebieg napięcia i prądu na cewce wtryskiwacza przy prądzie podtrzymania równym 5 A. Na rys. 12 przedstawiono wpływ tego prądu na wartość dawki wtryskiwanego paliwa. Analiza uzyskanych wyników potwierdza opisaną w literaturze [3] zależność wpływu prądu podtrzymania na wydatek wtryskiwacza.



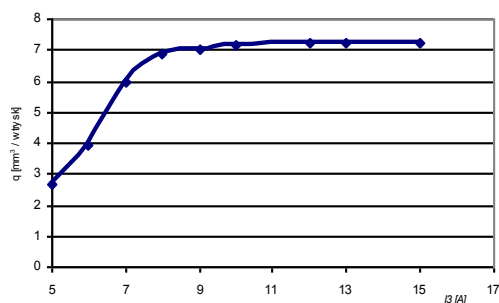
Rys. 11. Rzeczywiste przebiegi napięcia (kolor żółty) i prądu (kolor niebieski) na cewce wtryskiwacza przy $V_1=75V$, $I_1=27A$, $I_2=27A$, $I_3=5A$, $V_2=12V$, $t_1=0,058ms$, $t_2=0,18ms$; $t_3=0,625ms$

Fig. 11. The actual waveform chart of voltage (yellow) and current (blue) in the injector coil circuit ($V_1=75V$, $I_1=27A$, $I_2=27A$, $I_3=5A$, $V_2=12V$, $t_1=0,058ms$, $t_2=0,18ms$; $t_3=0,625ms$)

Istotnym faktem jest wzrost rozrzutu wartości wtryskiwanej dawki dla małych prądów I_3 , co w konsekwencji oznacza ograniczenie możliwości precyzyjnego określenia ilości paliwa podawanego do komory spalania.

Dla wartości I_3 powyżej 9 A zmierzone wielkości dawki wykazują stabilny poziom i znaczne obniżenie rozrzutu wartości dawki. Obliczone wartości odchylenia standardowego i błędu bezwzględnego dla różnych prądów I_3 przedstawiono w tabeli 1.

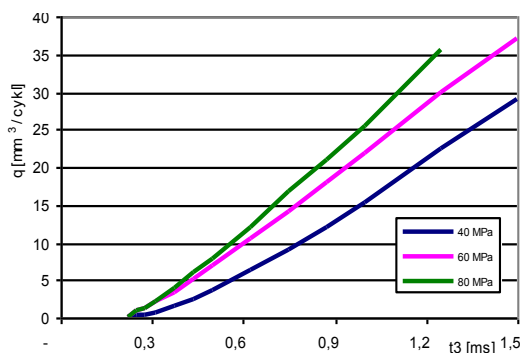
Na wartość dawki wtryskiwanego paliwa istotny wpływ ma czas trwania impulsu prądu podtrzymania I_3 , którego przerwanie kończy wtrysk paliwa. Na rys. 13 przedstawiono zmiany wartości dawki wtryskiwanego paliwa w zależności od całkowitego czasu trwania impulsu otwierającego wtryskiwacz oraz ciśnienia paliwa w zasobniku.



Rys. 12. Wpływ natężenia prądu podtrzymania I_3 na wielkość dawki wtryskiwanego paliwa
Fig. 12. Relation between hold current and value of the injected fuel dose

Tabela. 1. Porównanie odchylenia standardowego i błędu względnego na różnych wartościach prądu I_3
Table 1. Examples of standard deviation and the relative error for selected values of current I_3

Natężenie prądu (current) I_3 [A]	Dawka paliwa (fuel dose) [mm ³ /wtrysk]	Odchylenie standardowe (standard deviation) σ	Błąd bezwzględny (relative error) [%]
5	2,65	0,14	6,46
6	3,91	0,13	5,03
7	5,96	0,11	3,14
8	6,87	0,11	1,26
9	7,00	0,10	1,12
10	7,15	0,05	0,91
12	7,22	0,04	0,53
13	7,20	0,04	0,56
15	7,19	0,04	0,53



Rys. 13. Wpływ całkowitego czasu trwania impulsu otwierającego wtryskiwacz t_3 na wielkość dawki wtryskiwanego paliwa przy różnych ciśnieniach paliwa
Fig. 13. Impact of the total pulse duration t_3 on the value of fuel dose for selected pressures

Podsumowanie

Podsumowując zawarte w artykule rozważania oraz wyniki analizy przeprowadzonych badań można stwierdzić że:

- zastosowany moduł sterowania wtryskiwaczem daje szerokie możliwości elastycznego i precyzyjnego sterowania wielkością dawki wtryskiwanego paliwa;
- dane na temat przebiegu prądu w uzwojeniach cewki wtryskiwacza uzyskane z pamięci modułu DI wykazują zgodność z rzeczywistymi przebiegami zarejestrowanymi na oscyloskopie;
- przeprowadzone badania potwierdzają przydatność modułu Drivven DI do precyzyjnego dawkowania paliwa;
- cenną zaletą zastosowanego urządzenia jest wstępna eliminacja błędów grubych związanych z potencjalnymi niesprawnościami układu, dzięki wbudowanemu systemowi monitorowania stanu obiektu;
- w dalszych badaniach należy przeprowadzić próby wykorzystania modułu do sterowania wtryskiwaczem piezoelektrycznym;
- przeprowadzone badania w szerokim zakresie potwierdzają opisaną w literaturze zależność wpływu parametrów impulsu na wielkość jednostkowej dawki wtryskiwanego paliwa.

Ścisła zależność pomiędzy parametrami impulsu elektrycznego, a wartością uzyskanej jednostkowej dawki paliwa nabiera szczególnego znaczenia dla krótkich czasów wtrysku. W takich przypadkach kształt przebiegu prądu w stanach przejściowych w trakcie otwierania i zamykania zaworu wtryskiwacza ma istotny wpływ na precyzję dawkowania. W wyniku badań, eksperymentalnie potwierdzono przydatność modułu DI w aplikacjach, w których konieczne jest precyzyjne podawanie małych dawek paliwa.

Zbudowane stanowisko badawcze cechuje się uniwersalnością oraz możliwością szerokiego jego wykorzystania w badaniach symulacyjnych typu Hardware-in-the-loop.

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

Nomenclature/Skróty i oznaczenia

CR układ Common Rail

I_1 natężenie prądu o napięciu U_H ;

I_2 prąd stabilizacji otwarcia wtryskiwacza;

I_3 prąd podtrzymania otwarcia wtryskiwacza;

U_H napięcie podwyższone impulsu otwierającego wtryskiwacz;

U_B napięcie akumulatora;

t_1 czas trwania impulsu wysokiego napięcia U_H ;
 t_2 czas trwania impulsu stabilizacji otwarcia wtryskwiacza

t_3 całkowity czas impulsu otwarcia wtryskwiacza.

Bibliography/Literatura

- [1] DRIVEN. *DI Driver Module Kit User's Manual D000020 Rev E3*. Driven, Inc., 2010.
- [2] Graba M., Lachowicz A., Mamala J., Bieniek A. 2010. *Wielofazowy wtrysk paliwa dla silników z zapłonem samoczynnym wyposażonych w rzędowną pompę wtryskową*. Inżynieria Rolnicza. Nr 5 (123). s. 29-35, 2010.
- [3] GÜNTHER H.: *Układy wtryskowe Common Rail w praktyce warsztatowej*. WKiŁ Warszawa, 2010.
- [4] Kuszewski H., Lejda K., Ustrzycki A. 2008, *Determinanty dokładności dawkowania paliwa w systemie zasobnikowego układu zasilania Common Rail*. Czasopismo Techniczne, z. 8-M/2008, str. 161-172. Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej.
- [5] Lechowski M.: *Analiza sygnałów sterujących wtryskiwaczy układu Common Rail*. Auto Moto Serwis, 11/2012.
- [6] *Zasobnikowe układy wtryskowe Common Rail*. Informator techniczny BOSCH, WKiŁ, 2009.

Michał Śmieja DEng. – doctor in the Faculty of Technical Sciences at University of Warmia and Mazury in Olsztyn.

Dr. inż. Michał Śmieja – adiunkt na Wydziale Nauk Technicznych Uniwersytetu Warmińsko-Mazurskiego w Olsztynie.



Jarosław Mamala DSc, DEng. – Professor in the Faculty of Mechanical Engineering at Opole University of Technology.

Dr hab. inż. Jarosław Mamala, prof. PO – profesor na Wydziale Mechanicznym Politechniki Opolskiej.



Sławomir Wierzbicki DEng. – doctor in the Faculty of Technical Sciences at University of Warmia and Mazury in Olsztyn.

Dr. inż. Sławomir Wierzbicki – adiunkt na Wydziale Nauk Technicznych Uniwersytetu Warmińsko-Mazurskiego w Olsztynie.

