

Wpływ parametrów napięciowych i prądowych na pracę układu wtrysku wielokrotnego zbudowanego na bazie sterownika Compact RIO

Streszczenie. W pracy opisano budowę i działanie układu wtrysku wielokrotnego przeznaczonego do zasilania silnika spalinowego o zapłonie samoczynnym. Do sterowania pracą układu wtryskowego wykorzystano sterownik Compact RIO obsługiwany z poziomu komputera przez aplikację sterującą. Przedstawiono wyniki prób działania układu wtryskowego i ocenę jego przydatności do sterowania pracą silnika badawczego.

Abstract. The paper describes the structure and operation of the multiple injection system intended to supply a compression-ignition internal combustion engine. To control the operation of the injection system, a Compact RIO controller was used, operated from a computer by the control application. The results of operation tests of the injection system and the assessment of its suitability for controlling the operation of the test engine are presented. (*Influence of voltage and current parameters on the operation of the multi-pulse fuel injections system based on the Compact RIO controller.*)

Słowa kluczowe: układu wtrysku wielokrotnego, prąd podtrzymania, napięcie wzbudzenia, sterowanie wtryskiem.

Keywords: multiple injection system, holding current, excitation voltage, injection control

Wstęp

Zmniejszenie zanieczyszczeń emitowanych przez silniki spalinowe przy jednoczesnym zapewnieniu optymalnych osiągnięć silnika stało się możliwe do zrealizowania wraz z rozwojem technologii w dziedzinie urządzeń do wtrysku paliwa. Od kilku lat gorącym tematem jest poprawa spalania i emisji silników o zapłonie samoczynnym poprzez optymalizację strategii wtrysku paliwa. W pracy [1] przedstawiono obszerny przegląd różnych strategii wtrysku paliwa, a mianowicie zmiany ciśnienia wtrysku, kształtów prędkości wtrysku, czasu wtrysku oraz wtrysków dzielonych/wielokrotnych w celu poprawy osiągnięć silnika i kontroli emisji. W artykule opisano zalety i wady różnych strategii wtrysku, aby pomóc w wyborze najlepszej strategii lub ich kombinacji. Na przykład zwiększenie ciśnienia wtrysku paliwa może poprawić rozpylenie paliwa, a następnie poprawić proces spalania, co skutkuje wyższą sprawnością cieplną silnika, wytwarzając mniej HC, CO, PM, ale zwiększając emisję NOx. Wtrysk pilotowy pomaga w zmniejszeniu hałasu spalania i emisji NOx, a natychmiastowy dotrysk może pomóc w utlenianiu sadzy, natomiast późny dotrysk pomaga w regeneracji filtra cząstek stałych.

W silnikach z układem zasilania Common Rail przed wtryskiem zasadniczym, z ściśle określonym wyprzedzeniem czasowym stosuje się wtrysk wstępny w postaci niewielkiej dawki paliwa. Zastosowanie wtrysku wstępnego powoduje bardziej płynny wzrost ciśnienia spalania i zarazem poprawia jakość spalania. Wcześniej wtrysnięta mała dawka paliwa zapala się ogrzewając górną część cylindra, zapewniając w nim optymalną temperaturę do spalania zasadniczej dawki. W silnikach z filtrem cząstek stałych podczas procesu regeneracji, oprócz wtrysku wstępnego i zasadniczego stosuje się do dwóch wtrysków dopalających. Pierwszy wtrysk dopalający jest wykonywany w określonych zakresach obciążenia prędkości obrotowej, bezpośrednio po wtrysku zasadniczym. Wtrysk ten następuje podczas trwającego nadal procesu spalania, a jego głównym celem jest podwyższenie temperatury spalin podczas procesu regeneracji filtra cząstek stałych. Drugi wtrysk dopalający następuje tuż przed wewnętrznym zwrotnym punktem tłoka i służy również do podwyższenia temperatury spalin.

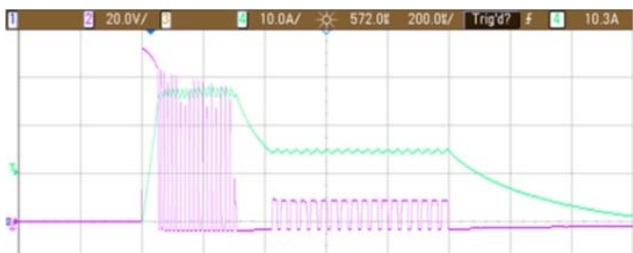
Strategia wielokrotnego wtrysku paliwa w silniku o zapłonie samoczynnym pozwala na poprawę efektywności pracy silnika przy jednoczesnym obniżeniu emisji szkodliwych produktów spalania. Panda i inni w pracy [2] wykazali, że strategia wtrysku pilotującego, głównego i końcowego może zmniejszyć szybkość wzrostu ciśnienia, zmienić poziom tlenu azotu i średnią temperaturę w cylindrze w porównaniu z pojedynczym trybem wtrysku paliwa. Poprzez odpowiedni dobór ilości i czasu wtrysku oleju napędowego we wtrysku dopalającym, który jest stosowany wraz z wtryskiem pilotującym i głównym, uzyskano znaczną redukcję węglowodorów, tlenków węgla i azotu. Ouchikh i inni [3] badali wpływ strategii wtrysku oleju napędowego w silniku dwupaliwowym i stwierdzili, że kluczową rolę w rozwoju procesu spalania odgrywa strategia wtrysku oleju napędowego. Strategia dzielonego wtrysku ma ważną zaletę pod względem zużycia paliwa. Wstępny wtrysk oleju napędowego skutecznie zmniejsza emisję NOx i hałas spalania oraz powoduje, że wczesny wtrysk końcowy skutkuje poprawą sprawności przy niskim obciążeniu silnika.

Wyzwaniem dla konstruktorów układów wtryskowych staje się nie tylko sama konstrukcja wtryskiwacza, ale także algorytm sterowania i moduł sterowania. Wu i inni [4] badali wpływ różnych strategii post-wtryskowych na spalanie i emisje spalin. Wykazali, że emisje sadzy są bardziej wrażliwe na wczesny czas po wtrysku, opóźnienie w szczytowych emisjach występujących pomiędzy krakowanym i nie krakowanym paliwem oraz zwiększenie emisji węglowodorów przy opóźnieniu wtrysku końcowego.

Catania i inni [5] przeprowadzili badania w układach wtrysku wielokrotnego, gdy dwa kolejne impulsy prądu wtrysku są zbyt blisko i następuje połączenie dwóch wtrysków w jeden. Taka „fuzja wtryskowa” zwiększa nadmiernie ilość wtryskiwanego paliwa, pogarszając zarówno zużycie paliwa, jak i emisję cząstek stałych. Aby uniknąć tego zjawiska, w mapach jednostki sterującej wprowadza się dolne ograniczenie czasu przebywania powyżej podwyższonego progu, co zmniejsza elastyczność zarządzania wielokrotnymi wtryskami. Występowanie fuzji wtryskowej jest związane głównie z opóźnieniem czasowym między sygnałem elektrycznym elektromagnesu, a otwarciem i zamknięciem dyszy. Stwierdzono [5], że

wartość progowa czasu fuzji silnie się zmniejsza, szczególnie z opóźnieniem zamknięcia dyszy. Oceniono eksperymentalnie zależność funkcjonalną opóźnienia otwarcia i zamknięcia dyszy, od czasu załączania elektromagnesu i nominalnego ciśnienia szyny. Czasowy czas wtrysku skorelowano z czasem załączania i ciśnieniem szyny.

W przypadku wykorzystania elektromagnetycznych wtryskiwaczy paliwa bardzo ważne jest wstępne forsowanie napięciem cewki wtryskiwacza aby pokonać bezwładność rdzenia a następnie obniżyć napięcie zasilania do wartości nominalnych w celu podtrzymywania otwarcia iglicy wtryskiwacza. Na rysunku 1 przedstawiono pojedynczy cykl otwierania wtryskiwacza metodą wieloimpulsową, która pozwala uzyskać krótkie czasy wtrysku. Po wstępnym otwarciu wtryskiwacza maksymalnym natężeniem prądu następuje wielokrotne włączanie i wyłączenie prądu zasilającego z dużą częstotliwością tzw. dithering.



Rys.1. Typowe przebiegi zmian napięcia i prądu w układzie sterowania wtryskiwaczem

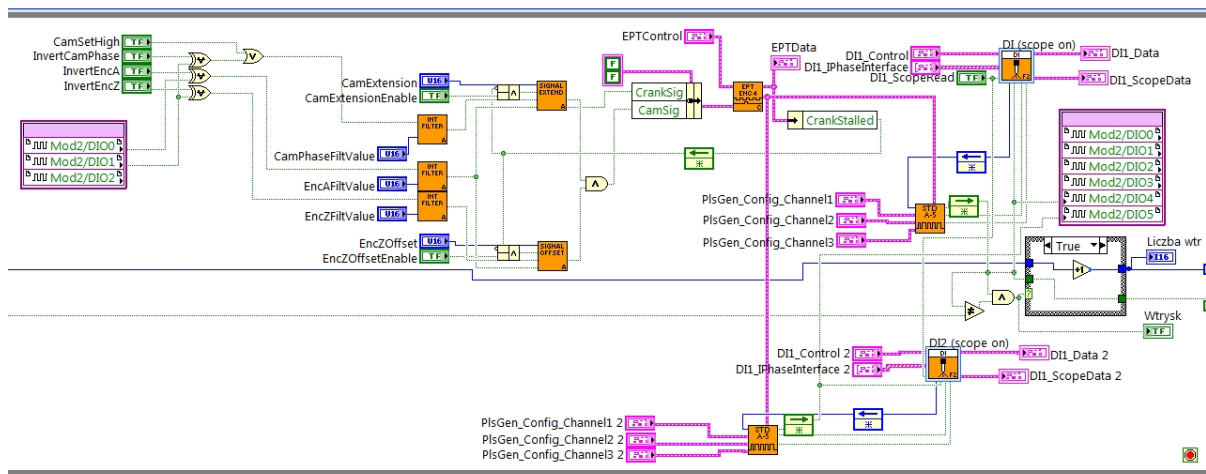
Dostępne komercyjne układy sterowania wtryskiem do zasilania silników z zapłonem samoczynnym nie nadają się do zaimplementowania w badawczych stanowiskach

silnikowych. Moduł elektroniczny (CPU) jak i algorytm sterowania nie jest dostępny do modyfikacji i nie pozwala na dowolne zmiany jego parametrów. Celem prezentowanej pracy było zbudowanie systemu do realizacji wtrysku wielokrotnego w silniku o zapłonie samoczynnym na bazie programowalnego sterownika Compact RIO obsługiwane przez oprogramowanie LabVIEW. Tego typu system ma bardzo dużą elastyczność programowania parametrów napięciowych oraz prądowych układu wtryskowego w poszczególnych jego fazach. Dlatego pozwala na realizację różnorodnych prac badawczych mających na celu optymalizację strategii wtrysku paliwa.

Struktura systemu do realizacji wtrysku wielokrotnego na bazie programowalnego sterownika Compact RIO

Sterownik Compact RIO [6] jest produktem firmy NI (National Instruments). Jego programowanie jest wspomagane przez środowisko LabVIEW i NI Linux Real-Time. W skład opracowanego systemu wtrysku wielokrotnego wchodzi:

- Sterownik NI cRIO-9024 z procesorem 800 MHz, pamięcią 4 GB + 512 MB pamięci podręcznej DDR2, 2xEthernet, USB, RS232, serwer WWW,
- Szyna NI cRIO-9114, zawierająca osiem slotów na moduły oraz układ Virtex-5 FPGA
- 2 moduły NI 9751 [7] sterowania wtryskiem bezpośrednim do 3 wtryskiwaczy elektromagnetycznych lub 2 piezoelektrycznych, z możliwością programowania 8 faz wtrysku, napięcie 190 V, max. prąd 40 A,
- Moduł 9401, 8 DIO
- Oprogramowanie sterownika w środowisku LabVIEW:
 - program dla układu FPGA umieszczonego w cRIO, pracujący w systemie operacyjnym czasu rzeczywistego,
 - nadrzędny program obsługi w systemie Microsoft Windows.



Rys.2. Schemat blokowy programu sterowania modułów wtrysku paliwa

Compact RIO jest to system czasu rzeczywistego zaprojektowany z myślą o zastosowaniach przemysłowych składający się ze sterownika i wymiennych modułów wejść-wyjść cyfrowych oraz analogowych. Sterownik cRIO sprawdza się najlepiej w miejscach, gdzie niezbędna jest wysoka niezawodność, wydajność oraz praca w czasie rzeczywistym. Przemysłowa obudowa Compact RIO zawiera wbudowany układ FPGA, który łączy się w bezpośredni sposób z modułami I/O (wejścia/wyjścia). Programowanie układów FPGA oraz aplikacji czasu rzeczywistego jest możliwe dzięki użyciu LabVIEW [8]. Różnorodne moduły I/O pozwalają na kondycjonowanie

sygnałów pomiarowych z różnego typu czujników, sterowanie elementami wykonawczymi lub wymianę informacji poprzez typowe interfejsy cyfrowe. Dzięki wymienności modułów I/O oraz możliwości tworzenia własnego oprogramowania Compact RIO posiada znaczną elastyczność zastosowań. Stosuje się go do sterowania w czasie rzeczywistym, automatyzacji pomiarów, zwłaszcza tych wymagających przeprowadzenia złożonej analizy wyników [9].

Wykorzystane w pracy moduły NI 9751 sterowania wtryskiem bezpośrednim pozwalają na programowe określenie do ośmiu faz w każdym impulsie sterującym

wtryskiem. Fazy te są realizowane sekwencyjnie i dla każdej z nich można zadać wartości górnego i dolnego poziomu prądu ditheringu, czas trwania fazy i wybrać obwód zasilania – wysokim napięciem lub napięciem akumulatora. Obwód zasilania wysokiego napięcia powinien być używany tylko wtedy kiedy jest to konieczne, i w takim stopniu aby nie przeciążyć układu zasilania. Prąd solenoidu jest kontrolowany za pomocą podwójnego obwodu sprzężenia zwrotnego z komparatorem dla górnego i dolnego progu ditheringu. Moduł wyposażony jest w obwody pomiarowe prądu i napięcia, które są wykorzystywane do wykrywania błędów.

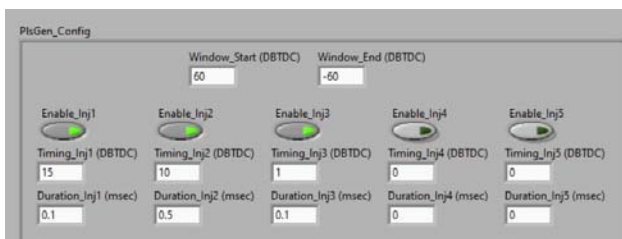
Opis programu sterującego

Program do obsługi wtryskiwacza przez sterownik CompactRIO składa się z dwóch zasadniczych części. Pierwsza to program dla układu FPGA realizującego obsługę modułów I/O sterownika w czasie rzeczywistym, który po kompilacji zapisywany jest w matrycy FPGA. Druga część to aplikacja operatorska uruchamiana na komputerze w systemie Microsoft Windows. Na rysunku 2 przedstawiono fragment programu do obsługi sterownika cRIO.

Głównym zadaniem tego programu jest generowanie - zgodnie z zadanymi parametrami sekwencji wtrysków - sygnałów sterujących wtryskiwaczami. Sygnały te muszą być zsynchronizowane z chwilowym położeniem wału korbowego silnika. Jest to możliwe dzięki umieszczoneму na wale rozrządu silnika enkoderowi, z którego sygnały przez moduł NI 9401 są kierowane do sterownika cRIO.

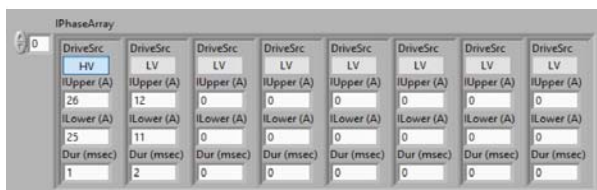
Nadrzędnym programem jest aplikacja pracująca na komputerze połączonym ze sterownikiem cRIO, służąca do modyfikacji parametrów sekwencji wtrysków oraz obserwowania przebiegów napięcia i prądu w obwodach sterujących wtryskiwaczami. Program ten jest obsługiwany z poziomu systemu Windows i pozwala na wszechstronne programowanie sekwencji wtrysków dla dwóch modułów sterujących, z których każdy może obsługiwać do trzech wtryskiwaczy.

Na rys.3 przedstawiono panel programu pozwalający zadawać parametry do pięciu dawek wtryskiwanego paliwa. Należy w nim podać kąty początkowe dla każdej dawki i czas jej trwania.



Rys.3. Panel zadawania parametrów sekwencji wtrysków

Rys. 4 przedstawia inny panel programu do programowania parametrów napięciowych i prądowych do ośmiu faz wtrysku. Dla każdej z nich można zadać wartości górnego i dolnego poziomu prądu ditheringu, czas trwania fazy i wybrać obwód zasilania – wysokim napięciem lub napięciem akumulatora.



Rys.4. Panel programowania parametrów napięciowych i prądowych do ośmiu faz wtrysku

Podstawowy panel do sterowania modułami wtryskiwaczy widoczny jest na rys.5. Można tu włączać poszczególne wtryskiwacze, ustawić poziom wysokiego napięcia otwierającego wtryskiwacze, wymuszać pojedyncze wtryski oraz kontrolować rzeczywiste parametry elektryczne modułów sterowania i korzystać z bieżącej ich diagnostyki.

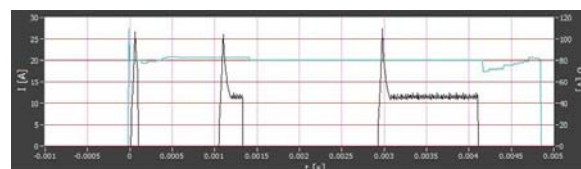


Rys.5. Podstawowy panel do sterowania modułami wtryskiwaczy

Wyniki testowania układu wtrysku wielokrotnego

Przeprowadzone próby działania opisanego układu potwierdziły jego pełną funkcjonalność i przydatność do realizacji różnorodnych strategii wtrysku wielokrotnego. W ramach wstępnych badań działania systemu sprawdzono jaki jest wpływ parametrów napięciowych i prądowych na jego pracę. Rysunki 6-11 ilustrują przebiegi napięcia i prądu w obwodzie sterowania wtryskiwaczem w przypadku wtrysku wielokrotnego składającego się z dawki pilotującej, dawki początkowej i dawki głównej. Istotnym parametrem sygnału sterującego jest możliwość zastosowania impulsu forsującego o zwiększonej wartości podczas otwierania wtryskiwacza – co pozwala na skrócenie czasu jego otwarcia a zarazem umożliwia precyzyjniejsze jego sterowanie. Porównanie reakcji prądowej wtryskiwacza w przypadku stosowania podwyższonego napięciowego impulsu wymuszającego i przy braku tego impulsu przedstawiają parę rysunków: 6-7, 8-9, 10-11. Pierwszy z każdej pary rysunków to przypadek z impulsem wymuszającym otwarcie wtryskiwacza.

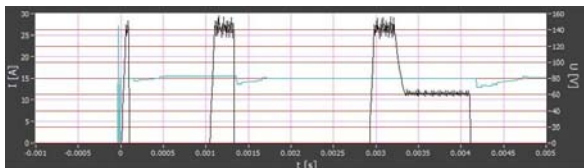
Przebiegi na rysunkach 6-7 zarejestrowano przy prądzie otwarcia równym 25 A i napięciu podtrzymania 80 V. Widoczne jest, że podanie podwyższonego napięciowego impulsu wymuszającego otwarcie wtryskiwacza pozwala na szybszy spadek prądu w obwodzie wtryskiwacza z poziomu otwarcia równego 25 A do poziomu podtrzymania równego 12 A. Jest to bardzo korzystne, ponieważ pozwala na znaczne zmniejszenie obciążenia układu zasilania oraz obniżyć temperaturę pracy wtryskiwacza.



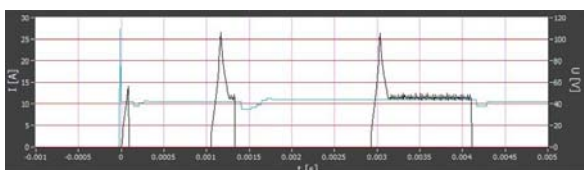
Rys.6. Przebiegi napięcia i prądu przy wtrysku wielokrotnym z impulsem wymuszającym otwarcie wtryskiwacza. Prąd otwarcia 25 A, napięcie podtrzymania 80 V

Przebiegi na rysunkach 8-9 zarejestrowano przy prądzie otwarcia równym 25A i napięciu podtrzymania 40V. Również w tym przypadku podanie podwyższonego napięciowego impulsu wymuszającego pozwala na szybszy

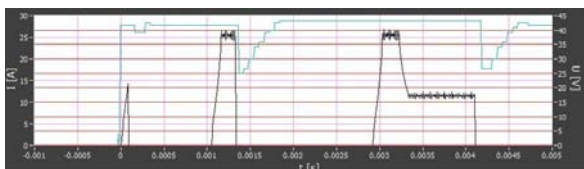
spadek prądu w obwodzie wtryskiwacza z poziomu otwarcia równego 25A do poziomu podtrzymania równego 12A. Można również zauważyć, że niższe niż w poprzednim przykładzie napięcie podtrzymania powoduje, że we wtrysku pilotującym maksymalne natężenie prądu nie osiąga zadanej wartości.



Rys.7. Przebiegi napięcia i prądu przy wtrysku wielokrotnym bez impulsu wymuszającego otwarcie wtryskiwacza. Prąd otwarcia 25 A, napięcie podtrzymania 80 V

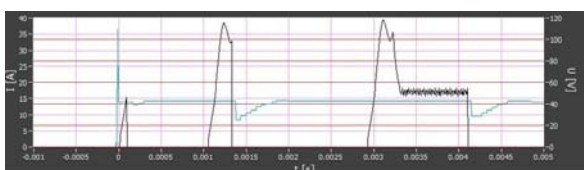


Rys.8. Przebiegi napięcia i prądu przy wtrysku wielokrotnym z impulsem wymuszającym otwarcie wtryskiwacza. Prąd otwarcia 25 A, napięcie podtrzymania 40 V

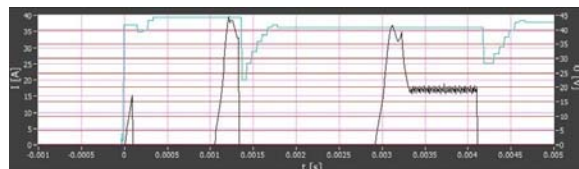


Rys.9. Przebiegi napięcia i prądu przy wtrysku wielokrotnym bez impulsu wymuszającego otwarcie wtryskiwacza. Prąd otwarcia 25 A, napięcie podtrzymania 40 V

Przebiegi na rysunkach 10-11 zarejestrowano przy prądzie otwarcia równym 40 A i napięciu podtrzymania 40V. W tym przypadku podanie podwyższonego napięciowego impulsu wymuszającego nie zmienia zasadniczo wartości prądu w obwodzie wtryskiwacza. Oznacza to, że w tym przypadku impuls napięciowy nie był wystarczający do szybszego otwarcia wtryskiwacza. Podobnie jak w poprzednim przykładzie zbyt niskie napięcie podtrzymania powoduje, że we wtrysku pilotującym maksymalne natężenie prądu nie osiąga zadanej wartości.



Rys.10. Przebiegi napięcia i prądu przy wtrysku wielokrotnym z impulsem wymuszającym otwarcie wtryskiwacza. Prąd otwarcia 40 A, napięcie podtrzymania 40 V



Rys.11. Przebiegi napięcia i prądu przy wtrysku wielokrotnym bez impulsu wymuszającego otwarcie wtryskiwacza. Prąd otwarcia 40 A, napięcie podtrzymania 40 V

Wnioski

Przeprowadzone próby modyfikacji parametrów przebiegów napięciowych i prądowych w układzie sterowania wtryskiwaczem potwierdziły przydatność systemu do realizacji różnorodnych strategii wtrysku wielokrotnego. Ma to na celu optymalizację zasilania silnika o zapłonie samoczynnym. Pozwoliły również ocenić jakie wartości napięcia i prądu w obwodzie wtryskiwacza zapewniają optymalną pracę systemu wtrysku wielokrotnego.

Autorzy: dr inż. Michał Gruca, Politechnika Częstochowska, Katedra Maszyn Ciepłych, al. AK 21, 42-201 Częstochowa, E-mail: michal.gruca@pcz.pl; dr inż. Michał Pyrc, Politechnika Częstochowska, Katedra Maszyn Ciepłych, al. AK 21, 42-201 Częstochowa, E-mail: michal.pyrc@pcz.pl; dr inż. Borys Borowik, Politechnika Częstochowska, Katedra Automatyki, Elektrotechniki i Optoelektroniki, al. AK 17, 42-200 Częstochowa, E-mail: borys.borowik@pcz.pl.

LITERATURA

- [1] Mohan B, Yang W, Kiang Chou S. Fuel injection strategies for performance improvement and emissions reduction in compression ignition engines—A review. *Renew Sustain Energy Rev* 28: (2013); 664-76.
- [2] K. Panda, A. Ramesh: Diesel injection strategies for reducing emissions and enhancing the performance of a methanol based dual fuel stationary engine, *Fuel* 289 (2021) 119809.
- [3] S. Ouchikh, M.S. Lounici, K. Loubar, L. Tarabet, M Tazerout: Effect of diesel injection strategy on performance and emissions of CH4/diesel dual-fuel engine. *Fuel* 308 (2022) 121911
- [4] Y. Wu, P. Wang, S.M. Farhan, J. Yi, L. Lei: Effect of post-injection on combustion and exhaust emissions in DI diesel engine. *Fuel Process Technol.*, 258 (2019), Article 116131
- [5] A. Catina, A. Ferrari and E. Spessa, Numerical-experimental study and solution to reduce the dwell time threshold for fusion-free consecutive injections in a multijet solenoid-type C.R. system, *ASME Internal Combustion Engine Division Spring Technical Conference*, 16 (2006) 317–332.
- [6] <http://www.ni.com/white-paper/52251/en/>
- [7] Technical Communications, NI 9751 USER MANUAL, NI Powertrain Controls Direct Injector Driver Module, © (2013) National Instruments
- [8] Tłaczała W. Środowisko LabVIEW w eksperymencie wspomaganym komputerowo. *Wyd. Naukowo Techniczne Warszawa* (2002)
- [9] Łukaszewski R., Bilski P., Mroczek K.: Wykorzystanie w dydaktyce rekonfigurowanych przyrządów pomiarowo-sterujących i systemów wbudowanych, *PAK* (2011) nr 11A.