

Dawid HOLISZ<sup>1</sup>

Opiekun naukowy: Tomasz KNEFEL<sup>2</sup>

## **ELEKTRONICZNY STEROWNIK WYSOKOCIŚNIENIOWEGO UKŁADU ZASILANIA COMMON RAIL DO ZASTOSOWAŃ WARSZTATOWYCH**

**Streszczenie:** Praca jest poświęcona tematyce sterowania układem zasilania w paliwo silnika o zapłonie samoczynnym. Przedstawiono projekt sterownika wysokociśnieniowego układu typu Common Rail oraz opisano układy składające się na urządzenie. Przedstawiono zestawienie elementów i zespołów, z których wykonano sterownik. Opisano zaimplementowane oprogramowanie. Zawarto również wybrane wyniki badań weryfikacyjnych oraz możliwy zakres zastosowań sterownika.

**Słowa kluczowe:** silnik o zapłonie samoczynnym, algorytmy sterujące

## **ELECTRONIC CONTROLLER FOR HIGH-PRESSURE COMMON RAIL SUPPLY SYSTEM TO WORKSHOP APPLICATIONS**

**Summary:** The work is related to the subject of controlling the fuel supply system of the self-ignition engine. The design of the high-pressure Common Rail controller was presented and the systems that make up the device were described. A list of elements and assemblies from which the controller was made is presented. The implemented software is described. The selected results of the verification tests and the possible range of controller applications were also included.

**Keywords:** Diesel engine, control algorithms

---

<sup>1</sup> Akademia Techniczno-Humanistyczna, Wydział Budowy Maszyn i Informatyki, specjalność: specjalność: Automatyka Elektrotechniczna i Systemy Informatyczno-Pomiarowe, dawidholisz@vp.pl

<sup>2</sup> dr hab. inż. prof. ATH, Akademia Techniczno-Humanistyczna, Wydział Budowy Maszyn i Informatyki, knefel@ath.bielsko.pl

## 1. Wstęp i cel pracy

Postęp technologiczny pozwolił na wprowadzenie wielu zmian w dziedzinie motoryzacji. Innowacje w inżynierii materiałowej, a przede wszystkim w elektrotechnice i elektronice, dały możliwość wprowadzenia szeregu nowych, udoskonalonych i zmodernizowanych rozwiązań. Jednak największa zmiana dokonała się w systemach sterowania oraz kontroli pracy silników o zapłonie samoczynnym (ZS). Każdy produkowany aktualnie silnik jest wyposażony w elektroniczny sterownik ECU (Electronic Control Unit). Odpowiada on za pracę jednostki napędowej we wszystkich przewidzianych konstrukcyjnie obszarach pracy. Za pomocą sterownika zadaje się i analizuje wiele wielkości, w tym dwie najważniejsze: dawkę paliwa i kąt wyprzedzenia wtrysku. Jednak fabryczne sterowniki nie zapewniają możliwości badania i sprawdzania aparatury zasilającej silnik w paliwo na stanowisku probierczym. Zapisane w nich algorytmy sterowania nie są przygotowane do prowadzenia testów kontrolnych. Oczywiście można nabyć specjalistyczne urządzenia do sprawdzania elementów układów zasilających, jednak są one bardzo drogie. Silniki o zapłonie samoczynnym współczesnych samochodów osobowych prawie wyłącznie są zasilane w paliwo za pomocą systemów Common Rail.

Celem pracy było zaprojektowanie i wykonanie elektronicznego sterownika wysokociśnieniowego sterownika układu zasilania Common Rail do zastosowań warsztatowych. Należało również przeprowadzić stanowiskowe badania urządzenia, wprowadzić ewentualne modyfikacje oraz wykonać pomiary przebiegów sterujących, umożliwiającą określenie zakresu stosowania sterownika.

Realizacja tych zadań wymagała zapoznania się z zagadnieniami teoretycznymi odnośnie sterowania silnikiem, a w szczególności sterowania wtryskiem i pomiarem ciśnienia paliwa. Niezbędna była również wiedza z zakresu elektroniki, obsługi urządzeń pomiarowych oraz informatyki.

## 2. Projekt i wykonanie sterownika

Wysokociśnieniowe układy zasilania Common Rail do sterowania wykorzystują układy elektroniczne, za pomocą których są w stanie wpływać na otwarcie oraz zamknięcie wtryskiwaczy. Dla elektromagnetycznych wtryskiwaczy jedynym możliwym sposobem wysterowania wtrysku jest załączenie cewki za pomocą impulsu o dużej wartości prądu sterującego. Rozwiązania układów sterowania wtryskiwaczy opierają się na podziale na część niskonapięciową, odpowiadającą za kontrolę pracy wtryskiwaczy oraz stronę mocy, którą, stanowią układy wykonawcze. Głównymi elementami części układu wykonawczego są tranzystory bipolarne oraz tranzystory mocy typu MOSFET. Odpowiadają one za podawanie dużych wartości natężenia prądu bezpośrednio na styki cewki wtryskiwacza. Rozwiązanie takie nosi nazwę "klucza tranzystorowego". Klucz tranzystorowy jest to układ przełączający. Zasada jego działania opiera się na dwóch stanach tranzystora – przerwy i nasycenia. Pod wpływem doprowadzonego sygnału (napięcia) tranzystor ulega wysterowaniu i przechodzi ze stanu przerwy, poprzez stan aktywny, do nasycenia. Po zaniku napięcia sterującego tranzystor wraca do stanu przerwy. Podczas przerwy tranzystora, posiada on wysoką rezystancję przez co nie przepuszcza dalej żadnego sygnału.

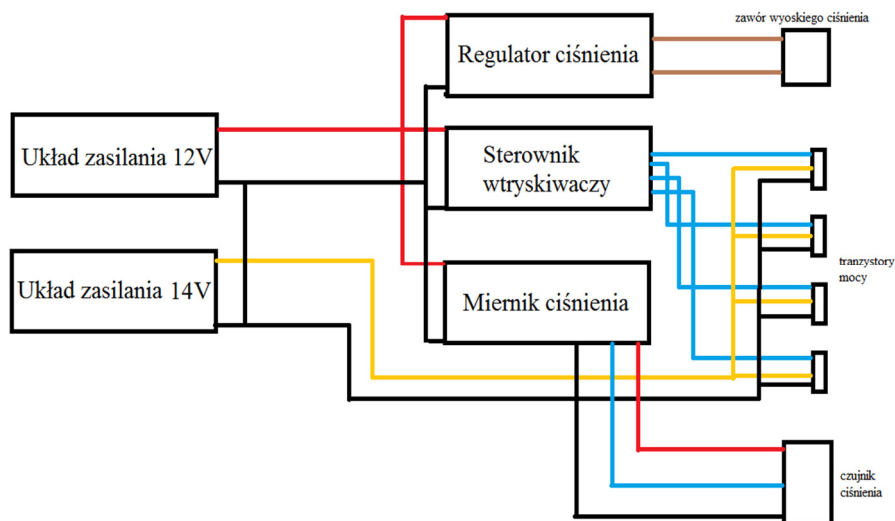
Można ten stan uznać jako przerwę w układzie. Natomiast, gdy tranzystor jest nasycony to posiada niską rezystancję i jest widziany przez układ jako zwarcie i przepuszcza sygnał dalej. Idealny klucz tranzystorowy powinien przełączać niemal natychmiast i posiadać bardzo stromą charakterystykę przejściową.

Układy sterowania wtryskiwaczami elektromagnetycznymi wykorzystywanymi przez koncerny samochodowe, opierają się na wykorzystaniu dwóch tranzystorów doysterowania pracy jednej cewki. Jednym z nich jest układ sterowania pracą cewki za pomocą tzw. układu Darlingtona wykorzystującego dwa tranzystory bipolarne. Pozwala on na przepuszczenie dużych wartości prądu, dając możliwość sprawnego załączania elektrozaworu wtryskiwacza. Wzmocnienie podawanego sygnału sterującego jest iloczynem wzmocnień obu tranzystorów. Wadami tego rozwiązania jest duży czas wyłączenia tranzystorów przez co tranzystory pozostają otwarte i nadal podają prąd na cewkę wtryskiwacza. Innymi wadami są wysokie napięcie sterujące wymagane do otwarcia tranzystorów oraz brak możliwości przełączania tranzystorów przy wysokich częstotliwościach.

Innym rozwiązaniem jest wykorzystanie do sterowania cewkami elektrozaworów wtryskiwaczy tranzystorów polowych. Tutaj istnieje możliwość podziału wtryskiwanej dawki paliwa na kilka części, co nie było wykonalne w układzie wykorzystującym tranzystory bipolarne. Sterowanie dużymi wartościami prądu jest możliwe przy niskich napięciach sterujących. Zapewnia to szybką reakcję układu na impuls wywołujący zadziałanie wtryskiwacza. Największą zaletą tego układu jest stworzenie warunków, w których cewka elektrycznie nie jest podłączona ani do zasilania ani do masy układu. Sprawia to, że energia zgromadzona w cewce nie zostaje rozproszona, a dzięki temu natężenie prądu uzyskuje dużą pochodną w czasie. To sprawia, że elektrozawór może zadziałać dużo szybciej przy otwarciu jak i zamknięciu.

W projekcie elektronicznego sterownika wysokociśnieniowego układu zasilania Common Rail założono, że do sterowania pracą wtryskiwaczy zostaną wykorzystane tranzystory polowe. Dokonano funkcjonalnego podziału na cztery układy. Pierwszy układ odpowiada za sterowanie pracą wtryskiwaczy, modyfikację parametrów generowanego impulsu oraz wyświetlanie aktualnie zadanych parametrów. Drugi układ umożliwia odczyt wartości ciśnienia z czujnika zabudowanego w wysokociśnieniowym zasobniku oraz wprowadzenie charakterystyk umożliwiających odczyt z różnego typu czujników. Trzeci układ oparty został na generatorze sygnału PWM (Pulse Width Modulation), dzięki któremu jest możliwa regulacja ciśnienia za pomocą regulatora zamontowanego na pompie wtryskowej. Czwarty układ to układ mocy, który zapewnia odpowiednią ilość energii do zasilania zarówno tranzystorów mocy sterujących elektrozaworami wtryskiwaczy, jak i regulatora ciśnienia PWM. Wszystkie układy zostały zmontowane w jednej zwartej obudowie wykonanej ze szkła akrylowego. Układy sterownika wtryskiwaczy oraz miernika ciśnienia bazują na mikrokontrolerach z rodziny ATmega32A-PU. Wykorzystanie tych mikrokontrolerów umożliwiło napisanie kodów programów, które odpowiadały za prawidłową pracę poszczególnych układów. Jednocześnie mikrokontrolery zapewniły wyświetlanie wybranych parametrów na wyświetlaczach oraz ich modyfikacje, dzięki sygnałom wejściowym zadawanym za pomocą przycisków. W tylnej części obudowy przewidziano montaż wszystkich wejść oraz

wyjąć, wykorzystywanych do pracy sterownika. Ogólny schemat sterownika układu Common Rail przedstawiono na rys. 1.



Rysunek 1. Schemat blokowy sterownika układu zasilania Common Rail

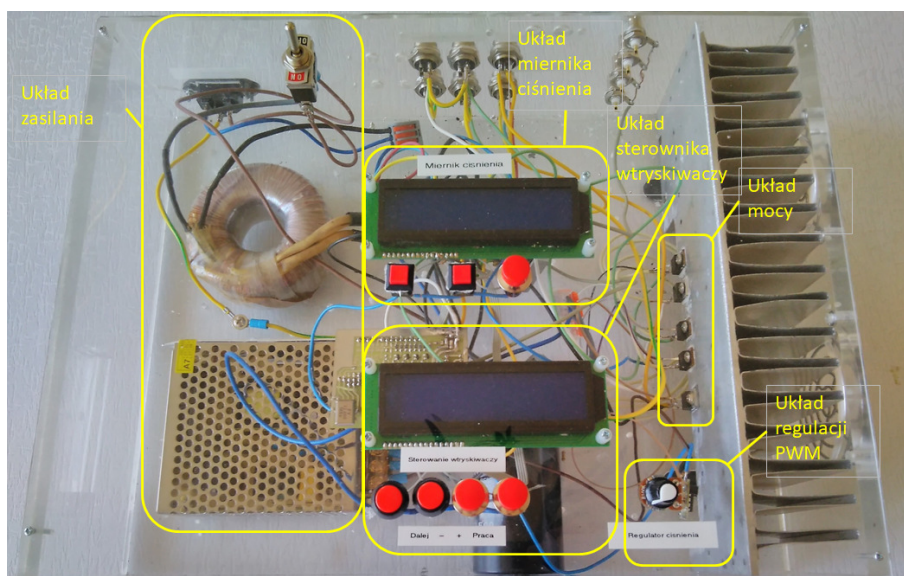
(linie koloru czerwonego – zasilanie 12 V, linie koloru czarnego – masa układu, linie koloru pomarańczowego – zasilanie 28 V, linie koloru niebieskiego – sygnały sterujące, linie koloru brązowego – sygnał PWM)

W oparciu o przedstawiony projekt zbudowano sterownik, a do jego budowy wykorzystano następujące elementy: zasilacz impulsowy, transformator toroidalny, mostek prostowniczy, kondensator filtrujący, gniazda techniczne, tranzystory MOSFET IRF540, wyświetlacze LCD, mikrokontrolery ATmega32, płytki drukowane, elementy bierne SMD, kwarcowy generator częstotliwości, przyciski zwierne, potencjometry, radiator oraz przewody połączeniowe.

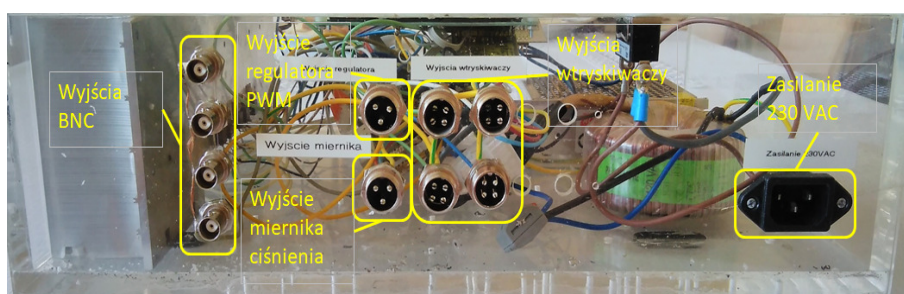
Wszystkie elementy wykorzystane przy budowie sterownika zostały dobrane na podstawie obliczeń i z nadmiarem zapewniają przeniesienie zadanych parametrów (obciążenia, moce). Tę właściwość można wykorzystać przy rozbudowie układu lub zmianie jego parametrów. Zasilacz impulsowy 12 V o mocy 60 W zapewnia zasilanie dla układów cyfrowych sterownika wtryskiwaczy oraz miernika ciśnienia, pobierających łącznie 10 W. Dodatkowo zapewnia zasilanie dla dwóch wyświetlaczy LCD (3 W) oraz regulatora ciśnienia, dla którego maksymalny pobór mocy przy wypełnieniu sygnału PWM to 20 W. W skrajnych przypadkach zasilacz impulsowy jest w stanie wysterować pracę jednego wtryskiwacza przy zachowaniu właściwych parametrów. Zasilacz dla układu mocy dobrany został na podstawie sygnałów jakie może wygenerować sterownik wtryskiwaczy. Graniczne wartości sygnałów, jakie można wygenerować przy użyciu sterownika dla poszczególnych wtryskiwaczy, to czas otwarcia 5000  $\mu$ s przy częstotliwości 50 Hz. Oznacza to pobór prądu przez cztery wtryskiwacze przez 20 ms. Przyjmując przebieg idealny, prostokątny, przebieg sygnału i napięcie w instalacji samochodowej 12 V, dla sygnału prądowego podawanego na cewki wtryskiwaczy można uznać wartość 10 A za maksymalną. W takich warunkach wymagane jest zastosowanie układu zasilania o mocy 120W.

Oczywiście są to wartości dla przebiegów idealnych, których nie można uzyskać ze względu np. na pochodną prądu w czasie, który ładuje cewkę. Dla zapewnienia prawidłowej pracy układu użyto zasilacza o napięciu 14 V generującego 120W. Umożliwia to prawidłową pracę tranzystorów mocy sterujących wtryskiwaczami. Użycie takiej mocy zapewnia ograniczenie nasycenie się rdzenia transformatora, a to zabezpiecza układ przed powstawaniem zbędnych sygnałów na wyjściach mikrokontrolera.

Sterownik przedstawiono na rys. 2 i 3.



Rysunek 2. Widok sterownika z podziałem na układy



Rysunek 3. Tylna ściana sterownika z gniazdami wejść i wyjść

W projekcie jako tranzystorów mocy użyto tranzystorów polowych MOSFET z kanałem typu N. Zapewniają one podpięcie jednego ze styków cewki wtryskiwacza, bezpośrednio do zasilania. Parametry samego tranzystora pozwalają na kluczkowanie cewki przy dużych częstotliwościach. Dodatkowo posiadają one bardzo krótkie czasy załączania rzędu 11 ns oraz wyłączania w granicach 50 ns. Zastosowanie mikrokontrolera zapewniło czasy przełączania wyjść w granicach 50 ns. Suma obu czasów, podzielona przez najkrótszy czas załączenia wtryskiwacza wynoszący 10  $\mu$ s,

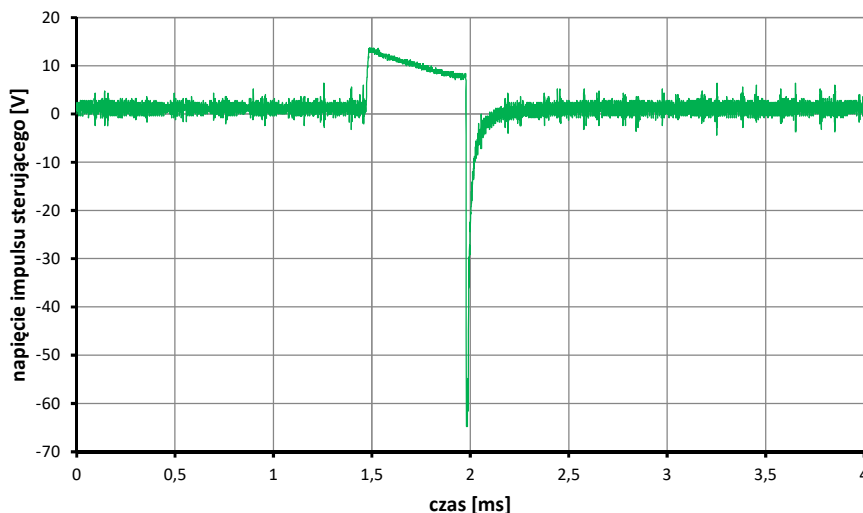
pozwała uzyskać przesunięcie fazowe w granicy 1 %. Biorąc pod uwagę czas jednego pełnego obrotu wału korbowego przy prędkości biegu jałowego 800 obr/min, wynoszącym 75 ms, wartość przesunięcia fazowego jest pomijalna.

### 3. Stanowiskowe badania sterownika

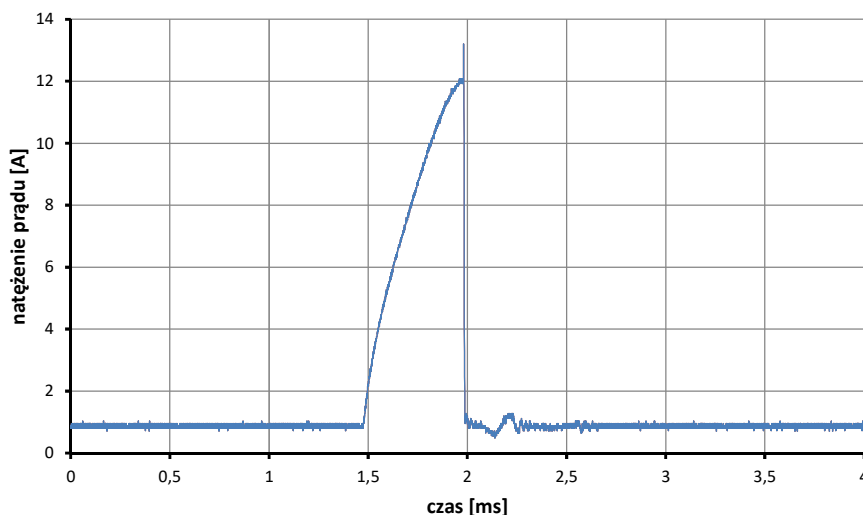
Po wykonaniu sterownika przystąpiono do stanowiskowych prób urządzenia. Rejestrowano charakterystyki prądowe oraz napięciowe cewek wtryskiwaczy, wykonane dla różnych częstotliwości oraz zadanych czasów otwarcia czasów otwarcia.

Badania przeprowadzono w Laboratorium Sterowania i Zasilania Silników Spalinowych Akademii Techniczno-Humanistycznej w Bielsku-Białej. Laboratorium wyposażone jest w stół probierczy, na którym zamontowane są pompa wysokociśnieniowa, zasobnik wysokiego ciśnienia, wtryskiwacze elektromagnetyczne, regulator, czujnik ciśnienia oraz naczynia pomiarowe. Pomiary przebiegów napięcia oraz natężenia prądu przepływających przez cewkę wtryskiwacza zostały zarejestrowane za pomocą oscyloskopu cyfrowego TEKTRONIX TDS 3014. Oscyloskop został połączony z komputerem za pomocą interfejsu RS232, a przy wykorzystaniu specjalistycznego oprogramowania WaveStar 2.0 możliwe było zapisanie zmierzonych przebiegów w arkuszu kalkulacyjnym.

Wszystkie pomiary zostały przeprowadzone przy wartościach ciśnienia paliwa w zasobniku wynoszącym około 65MPa. Wybrane przebiegi natężenia prądu i napięcia sterującego otwarciem wtryskiwacza przedstawiono na rys. 4 i 5.



Rysunek 4. Przebieg natężenia prądu sterującego w zależności od czasu dla częstotliwości 5 Hz i czasu otwarcia 500  $\mu$ s



Rysunek 5. Przebieg napięcia sygnału sterującego w zależności od czasu dla częstotliwości 5 Hz i czasu otwarcia 500  $\mu$ s

Na podstawie otrzymanej charakterystyki napięciowej (rys. 4) odczytano czas narastania napięcia, którego wartość wyniosła 18  $\mu$ s. Jest to czas zwiększania napięcia do wartości napięcia źródła zasilania. Czas wysterowania zaworu jest nieznacznie dłuższy od tego, który został zaimplementowany do sterownika. Czas rozładowania cewki to zaledwie 2  $\mu$ s. Łączny czas wysterowania zaworu wyniósł 509  $\mu$ s. Otrzymany wynik jest czasem dłuższym niż czas wprowadzony do sterownika. Można przypuszczać, że zwiększenie czasu jest związane z przełączaniem wyjść tranzystora oraz mikrokontrolera w stan niski. W chwili wyłączenia sygnału sterującego na cewce wytworzył się impuls o wartości 75 V. Impuls wynika ze zjawiska samoindukcji cewki. Tak duża wartość wyindukowanego napięcia świadczy o bardzo szybkim zaniku prądu w cewce elektrozaworu. Czas zaniku prądu w cewce odczytany z przebiegu charakterystyki (rys. 5) wyniósł 10  $\mu$ s. Powstały impuls w chwili wyłączenia zasilania na cewce może świadczyć o niepełnym wysterowaniu zaworu. Daje to informacje o zbyt krótkim czasie wysterowania zaworu. Odpowiedzialnym za tak długi czas narastania prądu w obwodzie cewki może być niewystarczający układ zasilania lub zbyt krótki czas zwiększenia napięcia w układzie.

### Uwagi końcowe i wnioski z pracy

Przeprowadzone badania umożliwiły sprawdzenie poprawności działania elektronicznego sterownika wysokociśnieniowego układu zasilania Common Rail. Przebieg badań pozwolił na sprawdzenie wszystkich czterech układów znajdujących się w sterowniku.

Na podstawie porównania opracowanego miernika ciśnienia z miernikiem zamontowanym w laboratorium można wnioskować, że uzyskane wyniki pomiaru są zgodne z rzeczywistymi parametrami zasilanego układu. Uzyskane wyniki nie

odbiegają od siebie, różnice wynikają z czułości układu pomiarowego oraz braku możliwości skalibrowania czujnika w stałych warunkach ciśnienia. Układ regulacji ciśnienia PWM zapewnił wystarczającą ilość mocy do sterowania pracą zaworu regulatora oraz dał możliwość płynnej regulacji ciśnienia w układzie.

Wykonany elektroniczny sterownik wysokociśnieniowego układu zasilania Common Rail pozwolił na przeprowadzenie badań, na podstawie, których można wyciągnąć następujące wnioski:

- układ zapewnia regulację czasu otwarcia zaworu wtryskiwaczy w zakresie od 100  $\mu$ s do 5000  $\mu$ s,
- umożliwia odzworowanie warunków pracy silnika dzięki przesunięciu kątowym pomiędzy poszczególnymi wtryskiwaczami oraz symulację pracy przy różnych prędkościach obrotowych z przedziału 240 obr/min do 6000 obr/min,
- uzyskane czasy otwarcia nie odbiegają od wartości wprowadzonych do sterownika, co wpływa na wysoką dokładność pomiarów,
- umożliwia diagnozę cewki wtryskiwacza w warunkach warsztatowych bez konieczności podłączania go do układu zasilania wysokiego ciśnienia,
- sterownik może posłużyć jako narzędzie do diagnozy stanu wtryskiwacza,
- wykorzystanie jednego tranzystora polowego do sterowania pracą wtryskiwacza uniemożliwiła uzyskanie szybkich zmian przyrostu wartości prądu w obwodzie cewki wtryskiwacza, przez fizyczne stałe podłączenie cewki do masy układu,
- oprogramowanie sterownika zapewnia prawidłową pracę i funkcjonalność układu.

Sterownik wysokociśnieniowego układu zasilania Common Rail może posłużyć jako baza do rozbudowy układu sterowania wtryskiwaczy. Stwarza warunki do modyfikacji kodu źródłowego, co może umożliwić podawanie paliwa w postaci dawek podzielonych na części, tak jak ma to miejsce w sterownikach silników o ZS montowanych w samochodach. Liczne modyfikacje układu zapewniły warunki do właściwej pracy wtryskiwaczy. Doświadczenia zdobyte przy budowie sterownika oraz przeprowadzaniu prób, mogą być przydatne przy budowie podobnych układów lub modyfikacji obecnego.

## LITERATURA

1. WAJAND J.A.: Silniki spalinowe małej i średniej mocy, WNT, Warszawa, 1997.
2. KNEBA Z, MAKOWSKI S.: Pojazdy samochodowe. Zasilanie i sterowanie silników, Komunikacji i Łączności, Warszawa.
3. LEŚNIAK W.: Wysokoprężne silniki samochodowe, Wydawnictwo Komunikacji i Łączności, Warszawa 1982.
4. HANS J.R, HERNER A.: Elektrotechnika i elektronika w pojazdach samochodowych, Wydawnictwo Komunikacji i Łączności Warszawa 2003.
5. SABINIOK A.: Wykonywanie montażu i demontażu układów zasilania silników z zapłonem samoczynnym, Instytut Technologii Eksploatacji – Państwowy Instytut Badawczy, Radom, 2007.
6. SOKOLIK J.: Elektrotechnika samochodowa, Wydawnictwo Szkolne i Pedagogiczne Spółka Akcyjna, Warszawa 1995.



7. DZIUBIŃSKI M, OCIOŚZYŃSKI J, WALUSIAK S.: Elektrotechnika i Elektronika Samochodowa, Wydawnictwo Uczelniane Politechniki Lubelskiej, Lublin 1999.
8. Elektroniczne sterowanie silników wysokoprężnych Układy wtryskowe Unit Injector System/ Unit Pomp System, Informator Techniczny BOSCH, Wydawnictwo Komunikacji i Łączności, 2000.
9. Elektroniczne sterowanie silników wysokoprężnych Promieniowe Rozdzielaczowe pompy wtryskowe VR, Informator Techniczny BOSCH, Wydawnictwo Komunikacji i Łączności, 2000.
10. ORZEŁOWSKI S.: Naprawa i obsługa pojazdów samochodowych, WSiP, Warszawa, 2006.
11. TRZECIAK K.: Diagnostyka samochodów osobowych. Wydawnictwo Komunikacji i Łączności, Warszawa, 1998.
12. PESZAK J.: Systemy zasilania silników samochodowych, Politechnika Śląska, Gliwice, 1992.
13. JANISZEWSKI T.: Elektroniczne układy wtryskowe silników wysokoprężnych. Wydawnictwo Komunikacji i Łączności, Warszawa, 2004.
14. Serwis internetowy :[https://wiki.cdd.no/index.php/OM\\_138](https://wiki.cdd.no/index.php/OM_138) (dostęp 2.1.2018)
15. Serwis internetowy  
[https://pl.wikipedia.org/wiki/Silnik\\_o\\_zap%C5%82onie\\_samoczynnym](https://pl.wikipedia.org/wiki/Silnik_o_zap%C5%82onie_samoczynnym) (dostęp 20.12.17)
16. Zasobnikowe układy wtryskowe CommonRail, Informator Techniczny BOSCH, Wydawnictwo Komunikacji i Łączności, 2005.
17. Serwis internetowy  
[http://www.circuitdiagramworld.com/control\\_circuit\\_diagram/TPIC46L01\\_Circuit\\_Schematic\\_for\\_Fuel\\_Injector\\_Control\\_Applic\\_15390.html](http://www.circuitdiagramworld.com/control_circuit_diagram/TPIC46L01_Circuit_Schematic_for_Fuel_Injector_Control_Applic_15390.html) (dostęp 20.04.2018)
18. Serwis internetowy: <https://sites.google.com/site/nunziodivella/home/pilotare-un-iniettore> (dostęp 20.04.2018)

