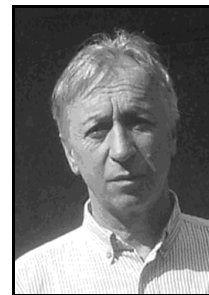


Zdzisław STELMASIAK, Tomasz KNEFEL, Jerzy LARISCHAKADEMIA TECHNICZNO-HUMANISTYCZNA W BIELSKU-BIAŁEJ,
KATEDRA SILNIKÓW SPALINOWYCH I POJAZDÓW**Sterownik do badań silników z systemem wtrysku Common Rail****Dr hab. inż. Zdzisław STELMASIAK**

Absolwent Wydziału Mechanicznego Politechniki Łódzkiej. Dyplom (1972) w zakresie silników spalinowych. Doktorat obronił w 1981 na Wydziale Mechanicznym PL. Pracę habilitacyjną w 2004 na Wydziale Budowy Maszyn i Informatyki ATH w Bielsku-Białej w dyscyplinie budowa i eksploatacja maszyn, specjalność silniki spalinowe. Jest zatrudniony w ATH. Specjalizuje się w modelowaniu procesów silnikowych, sterowaniu i zasilaniu silników paliwami alternatywnymi.

e-mail: zstelmasiak@ath.bielsko.pl**Dr inż. Jerzy LARISCH**

Absolwent Wydziału Budowy Maszyn Filii Politechniki Łódzkiej w Bielsku-Białej, dyplom w zakresie silników spalinowych. Stopień doktora uzyskał w 1999 r. w dyscyplinie budowa i eksploatacja maszyn. Jest adiunktem na Wydziale Budowy Maszyn i Informatyki w Katedrze Silników Spalinowych i Pojazdów. Zajmuje się problematyką zasilania i sterowania silników spalinowych.

e-mail: jarisch@ath.bielsko.pl**Dr inż. Tomasz KNEFEL**

Absolwent Wydziału Budowy Maszyn Filii Politechniki Łódzkiej w Bielsku-Białej, dyplom w zakresie silników spalinowych. Stopień doktora uzyskał w 1996 r. w dyscyplinie budowa i eksploatacja maszyn. Jest adiunktem na Wydziale Budowy Maszyn i Informatyki Akademii Techniczno-Humanistycznej w Bielsku-Białej w Zakładzie Silników Spalinowych. Zajmuje się zagadnieniami zasilania w paliwo silników o zapłonie samoczynnym, zwłaszcza układami wysokociśnieniowymi.

e-mail: tknefel@ath.bielsko.pl**1. Wstęp**

W Katedrze Silników Spalinowych i Pojazdów Akademii Techniczno-Humanistycznej w Bielsku-Białej opracowano i wykonano sterownik KSSiP-1, dla układu zasilania typu Common Rail, który przedstawiono w niniejszej publikacji. W silniku o zapłonie samoczynnym wyposażonym w wysokociśnieniowy, akumulatorowy układ wtrysku typu Common-Rail pojawiają się nowe możliwości sterowania parametrami procesu spalania. Wtryskiwana dawka paliwa może składać się z kilku części. Tym samym można kształtować przebieg procesów wydzielania ciepła w cylindrze silnika oraz zmieniać poziomy emisji i hałasu w poszczególnych punktach pracy silnika. Prowadzenie badań rozwojowych silników o zapłonie samoczynnym, gdzie wymagana jest duża elastyczność w doborze parametrów pracy jest utrudniona w oparciu o sterowniki fabryczne opracowane dla konkretnego modelu silnika. W warunkach badań na hamowni silnikowej sterowanie parametrami pracy silnika, w sposób umożliwiający uzyskanie pożądanej sprawności jest możliwe dzięki zastosowaniu niezależnych sterowników kontrolujących układy zasilania i osprzęt silnika. Równocześnie podczas pracy silnika przy dużym udziale stanów nieustalonych wzrastają znacznie wymagania wobec układu sterowania. Z tego powodu konieczne jest zastosowanie urządzenia sterującego, w którym możliwa jest elastyczna zmiana on-line jego parametrów we wszystkich zakresach pracy silnika. Umożliwia to opracowanie procedur strategicznych, operacyjnych i regulacyjnych dla sterownika silnika. W związku z powyższym opracowano założenia i wykonano sterownik laboratoryjny układu Common Rail, który został zastosowany i przebadany na stanowiskach w hamowniach dla kilku odmian silników. Dzięki doświadczeniom zdobytym w trakcie badań stanowiskowych układu Common-Rail i silnika o zapłonie samoczynnym współpracującego z tym sterownikiem badane są możliwości kształtowania profilu wtryskiwanej dawki, opracowywane są algorytmy pracy silnika, oraz odpowiednie procedury sterujące, obejmujące również zasilanie dwupaliwowe.

Streszczenie

W Katedrze Silników Spalinowych i Pojazdów Akademii Techniczno-Humanistycznej w Bielsku-Białej opracowano i wykonano sterownik do badań silników o zapłonie samoczynnym wyposażonych w układy zasilania typu Common Rail. W niniejszej publikacji przedstawiono opis sterownika oraz na przykładzie menu jego sposób działania i możliwości badawcze. Sterownik umożliwia na pracującym silniku zmianę kąta wyprzedzenia i ciśnienia wtrysku, wielkości dawki i jej podział na pięć dawek częściowych o dowolnym profilu wtrysku. Umożliwia to prowadzenie badań związanych z analizą i optymalizacją procesu spalania w silniku. W publikacji przedstawiono również wybrane algorytmy sterowania silnika. W oparciu o doświadczenia zdobywane na hamowni silnikowej sterownik ten jest w dalszym ciągu rozwijany w zakresie optymalizacji procedur strategicznych, operacyjnych i regulacyjnych, których celem jest wdrożenie elektronicznego układu sterującego dla zastosowań trakcyjnych.

Słowa kluczowe: silnik o zapłonie samoczynnym, common rail, sterownik silnika.

Research Programmer for Common Rail Injection System**Abstract**

In the Chair of Internal Combustion Engines and Vehicles of the Technical University in Bielsko-Biala the programmer for examinations Diesel engines equipped with Common-Rail was made. It is presented in the paper. Operation and options of the controller are showed on the example of the menu. Executed and put into practice controller of the system Common-Rail makes it possible to examine and analyse the combustion process in the engine. The aim of the tests there is the change of the character of the dose of the injection and other parameters of the injection. Some algorithms of the control of the engine speed were also restated. Basing on this experience the engine test bench controller has been developed, allowing the optimization of strategy, operation and regulating procedures. Next the optimal solution of the electronic steering setup could be put into practice also for traction applications. Device parameters and features of the driver are shown on the example of the menu.

Keywords: Diesel engines, Common Rail, electronic control unit.

2. Realizacja techniczna sterownika

Aby sterownik laboratoryjny spełniał stawiane przed nim wymagania, powinien realizować sterowanie układem wtryskowym, według określonych, innych dla każdego stanu pracy silnika, założonych schematów wtrysku paliwa. W trakcie prac nad sterownikiem kierowano się następującymi założeniami:

1. Sterowanie, co najmniej czterema wtryskiwaczami, w kolejności, w jakiej pracują na silniku oraz możliwość zmiany konfiguracji wtrysku.
2. Możliwość zapewnienia czasów otwarcia wtryskiwacza rzędu 100 μ s, oraz czasów między końcem wtrysku jednej części dawki, a początkiem następczej o około 200 μ s.

- Możliwość podziału dawki wtrysku, na co najmniej 5 faz (Multi-Jet).
- Niezależna regulacja ciśnienia wtrysku.
- Synchronizacja sterownika przy pomocy czujników reluktancyjnych i hallotronowych.
- Programowanie on-line i obsługa sterownika z poziomu komputera klasy PC – konfigurowanie początków i czasów trwania poszczególnych części dawek.
- Możliwość podłączenia oscyloskopu w celu monitorowania przebiegów sterujących wtryskiwaczami.
- Przygotowanie off-line co najmniej 5 profili wtrysku paliwa i zastosowanie on-line wybranego profilu bez konieczności zastrzymania silnika
- Przystosowanie urządzenia do wysokich natężeń prądu sterującego rzędu 30 A

Na rys. 1 przedstawiono widok sterownika, KSSiP-1 umieszczonego na stanowisku badawczym.



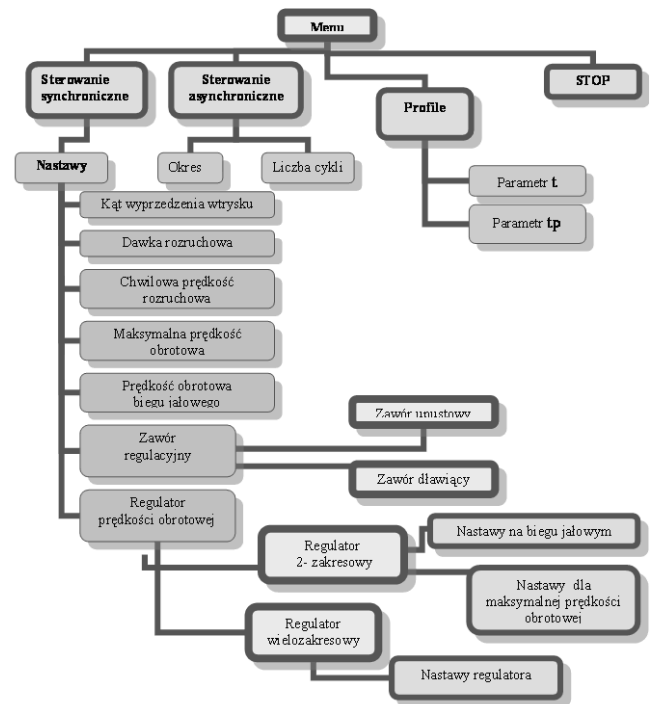
Rys. 1. Widok sterownika KSSiP-1
Fig. 1. View of the driver type KSSiP-1

Sterownik wyposażony jest w następujące przyłącza zamontowane na tylnej ścianie urządzenia:

- Gniazda wtryskiwaczy: wtrysk 1, wtrysk 2, wtrysk 3, wtrysk 4. Gniazda te służą do połączenia wtryskiwaczy silnika. Impulsy sterujące są przesunięte względem siebie w następujący sposób:
 - wtrysk 1 – 0 stopni,
 - wtrysk 2 – 180 stopni,
 - wtrysk 3 – 360 stopni,
 - wtrysk 4 – 540 stopni.
- Gniazdo do podłączenia czujnika ciśnienia szyny Common Rail. Dokładność pomiaru ciśnienia wynosi około $\pm 2\%$.
- Gniazdo do podłączenia czujnika prędkości obrotowej typu reluktancyjnego.
- Gniazdo czujnika fazy rozrządu do podłączenia czujnika typu HALL.
- Gniazdo sterujące zaworem regulacji ciśnienia w układzie, oznaczone STER. ZAW CIŚN.

Komunikacja sterownika z komputerem zapewniona jest przez port szeregowy. Połączenie działa w trybie on-line, czyli zapewnia stały nadzór – monitoring nad sterownikiem. Port szeregowy zapewnia możliwość podpinania urządzenia bez konieczności wyłączenia komputera PC oraz sterownika.

W sterowniku zastosowano menu wielopoziomowe za pomocą, którego można dokonać wszystkich nastaw bezpośrednio na urządzeniu, lub wykorzystując komputer klasy PC. Dzięki rozbudowanemu oknu dialogowemu, osoba prowadząca badania ma wiele możliwości kształtowania przebiegu oraz czasu wtrysku. Strukturę menu sterownika przedstawiono na rys. 2.



Rys. 2. Struktura menu sterownika KSSiP-1
Fig. 2. Structure of the menu of the driver KSSiP-1

Na wyświetlaczu sterownika pojawiają się następujące informacje:

- N - aktualna prędkość obrotowa w obr /min;
- $P=0$ - aktywny nr profilu, w tym wypadku aktywny jest profil nr 0;
- (*) - znak, którego zmiana informuje o poprawnej synchronizacji sterownika z układem rozrządu;
- P - ciśnienie paliwa w szynie COMMON RAIL, w bar;
- Td - całkowity czas impulsu prądowego (czas otwarcia wtryskiwacza).

W trybie tym za pomocą zadajników: *Zadajnik Ciśnienia* oraz *Zadajnik Dawki* możliwa jest zmiana „on-line” odpowiednio parametrów: ciśnienia paliwa oraz całkowitej wielkości dawki paliwa. Diody świecące informują o pracy odpowiednich wtryskiwaczy. Poruszanie się po strukturze menu możliwe jest dzięki klawiszom: *ZWIĘKSZ*, *ZMNIJSZ*, *REZYGNUJ* i *AKCEPTUJ*. Sterowanie synchroniczne to podstawowy tryb pracy sterownika, który umożliwia sterowanie silnikiem o zapłonie samoczynnym. Sterowanie asynchroniczne to funkcja przewidziana do testowania wtryskiwaczy na stanowisku probierczym. Za pomocą zadajników możliwe jest nastawienie ciśnienia paliwa z zakresu 0÷1669 bar oraz czasu otwarcia wtryskiwacza z zakresu 0÷4092 μ s. Po naciśnięciu klawisza *AKCEPTUJ* sterowanie zostaje wyłączone i zliczanie czasu zatrzymane.

Kąt wyprzedzenia wtrysku zdefiniowany jest następująco:

$$\alpha_{ww} = \alpha - \alpha_n$$

gdzie:

- α - stały kąt wynikający z położenia czujnika magnetycznego względem GMP silnika,
- α_n - nastawa kąta wyprzedzenia wtrysku w sterowniku.

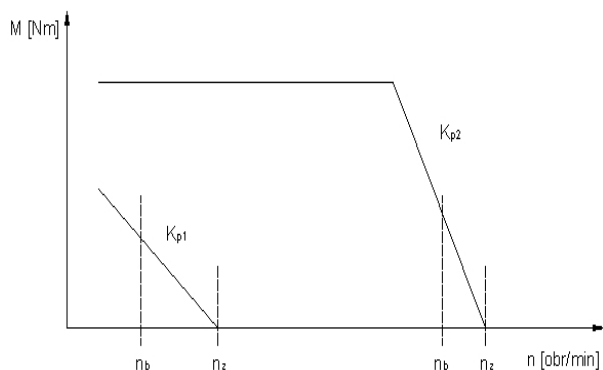
W związku z przeznaczeniem sterownika do pracy na hamowni silnikowej, oraz do badań silnika w stanach ustalonych przyjęto proporcjonalną regulację prędkości obrotowej silnika według formuły:

$$T_w = Kp(n_z - n_b)$$

gdzie:

- T_w - czas wtrysku,
- n_z - zadana prędkość obrotowa,
- n_w - chwilowa prędkość obrotowa,
- Kp - współczynnik proporcjonalny regulatora.

Nastawy regulatora dwuzakresowego sprowadzają się do doboru współczynników regulatora i zakresów regulowanych prędkości, co przedstawiono na rys. 3.



Rys. 3. Schemat dwuzakresowego regulatora prędkości obrotowej
Fig. 3. Scheme of 2 speed controller

Dla badań silnika pracującego w warunkach zmiennego obciążenia zastosowano regulator wielozakresowy typu MULTI-P. Nastawy regulatora wielozakresowego obejmują dobór współczynników proporcjonalnych zawartych między $Kp1$ i $Kp2$ i zmieniających się w funkcji zdanej prędkości obrotowej silnika. W doborze regulatora wykorzystano zalecenia z pracy [4].

Dawkę rozruchową zadaje się procentowo w stosunku do dawki maksymalnej np. 10%, 20%, 50%, itp. Dawka maksymalna wynika z maksymalnego czasu otwarcia wtryskiwacza, który wynosi 4092 μ s.

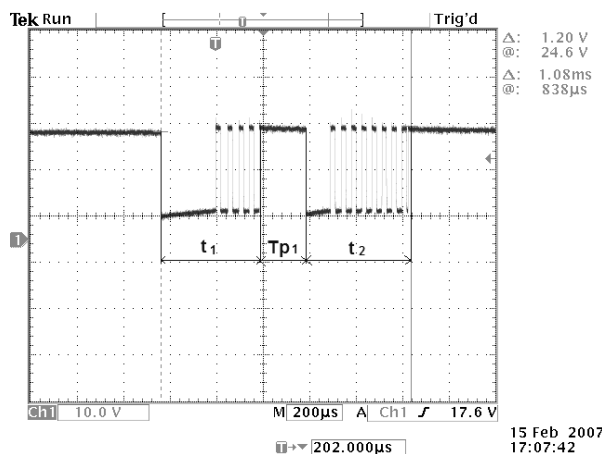
Nastawa maksymalnej prędkości dawki rozruchowej – nastawa prędkości, poniżej której będzie podawana stała dawka paliwa wynikająca z nastawy dawki rozruchowej. Prędkość tę określa się z zakresu 0÷1000 obr/min. Maksymalna prędkość rozruchowa nie może wchodzić w zakres pracy regulatora biegu jałowego.

Wybór zaworu regulacji ciśnienia polega na wybraniu typu zaworu regulacji ciśnienia w układzie Common Rail, w zależności od budowy układu:

- zawór dławiący – w przypadku, gdy zawór dławiący (regulujący ciśnienie) montowany jest w pompie wysokociśnieniowej układu CR,
- zawór upustowy – w przypadku, gdy zawór upustowy montowany jest na szynie Common Rail.

Wybór aktualnego profilu dawki. Możliwe jest wstępne ustawienie pięciu różnych kombinacji wtrysków i szybka ich wymiana za pomocą menu. Sterownik KSSiP 1 umożliwia realizację zmiany charakteru dawki wtrysku poprzez podział sygnału sterującego wtryskiwaczami na pięć części. Czas wtrysku t_n każdej z części stanowi procentowy udział czasu trwania całkowitej dawki wtrysku T_d zadawanej przez sterownik.

Na rys. 4 pokazano przykład zmiany charakteru wtryskiwanej dawki przez podział sygnału napięciowego na dwie części w proporcji 50%/50%, co zarejestrowano na oscyloskopie.

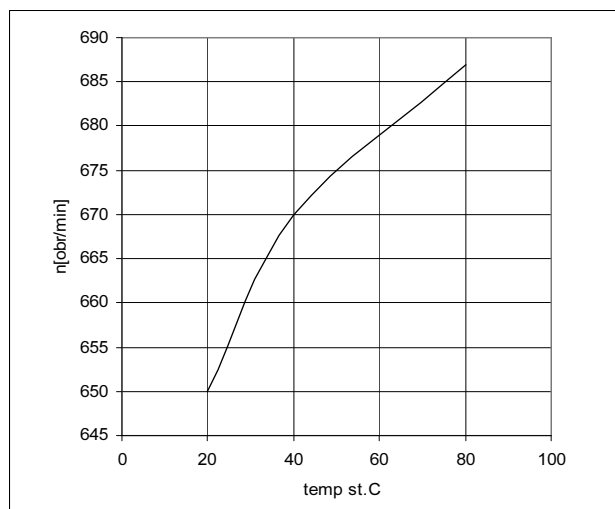


Rys. 4. Sygnał sterowania wtryskiwaczem zarejestrowany przez oscyloskop:
 t_1 – czas wtrysku pierwszej części dawki, t_2 – czas wtrysku drugiej części dawki, T_{p1} – czas przerwy po pierwszej części dawki

Fig. 4. Signal of the injector control registered by the oscilloscope: t_1 - the time of the injection of the first part of the dose, t_2 - time of the injection of the other part of the dose, T_{p1} - altarpiece of the time-out after the first part of the dose

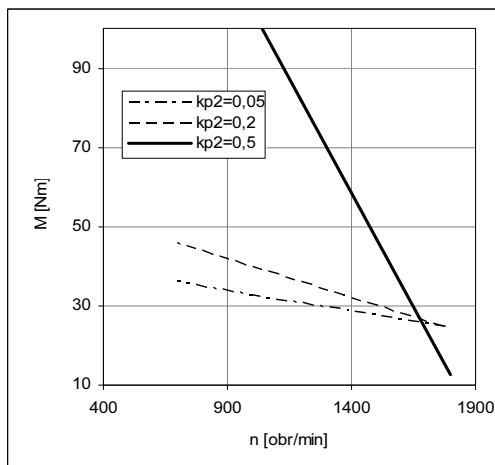
3. Badanie testowe sterownika

Opisane poniżej badania testowe sterownika wykonano na jednocylindrowym silniku badawczym SB-3.1 wyposażonym w system Common Rail z obcym napędem. Regulacja ciśnienia w zastosowanym systemie wtrysku odbywała się upustowo. Sterowanie odbywało się przez zmianę wypełnienia prostokątnego impulsu sterującego o częstotliwości fali 1000 Hz. Wypełnienie zmienia się w zakresie od 0 do 100%, gdzie 0% odpowiada ciśnieniu „0”, a 100% ciśnieniu 1600 bar. Zawór regulacyjny przy wyłączonym napięciu utrzymuje stałe ciśnienie, nie mniejsze niż 50 bar, aby umożliwić szybki rozruch silnika. Czas otwarcia wtryskiwacza dla dawki rozruchowej przyjęto na poziomie 80% dla zimnego (20°C) silnika i 50% dla ciepłego silnika (80°C) w stosunku do maksymalnego czasu otwarcia wtryskiwacza. Najłatwiejszy rozruch uzyskano stosując ciśnienie wtrysku 700 bar. Jako maksymalną prędkość rozruchową ograniczającą wzmocnienie dawki wtrysku przyjęto 500 obr/min.



Rys. 5. Prędkość obrotowa biegu jałowego w funkcji temperatury silnika dla współczynnika proporcjonalnego $Kp1=0,1$

Fig. 5. Idling adjustment versus engine's temperature

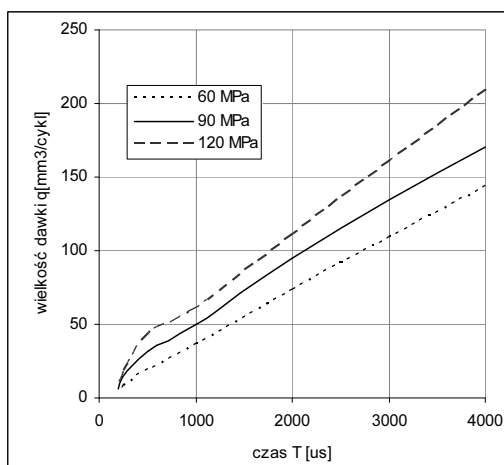


Rys. 6. Dobór współczynnika proporcjonalnego dla II zakresu pracy regulatora

Fig. 6. Selection of the proportional ratio for 2nd range of the controller work

W zależności od wybranego ciśnienia wtrysku zmienia się wymagany czas otwarcia wtryskiwacza, w zależności od obciążenia silnika. W czasie badań silnika w stanach ustalonych wykorzystuje się regulator dwuzakresowy. Podczas pracy w tym trybie obciążenie silnika między zakresami biegu jałowego i maksymalną prędkością obrotową silnika zmienia się przy pomocy *Zadajnika Dawki*. Regulacja biegu jałowego i maksymalnej prędkości obrotowej silnika odbywa się samoczynnie. Dla regulatora biegu jałowego wybrano współczynnik proporcjonalny $K_{p1}=0,1$ który stabilizuje prędkość obrotową na poziomie 687 obr/min, dla temperatury cieczy chłodzącej silnika 80°C. Na rys. 5 przedstawiono zmiany prędkości obrotowej silnika na biegu jałowym w zależności od temperatur występujących na hamowni silnikowej. Na rys. 6 przedstawiono przykład analizy drugiego zakresu pracy regulatora. Współczynnik proporcjonalny regulatora $K_{p2}=0,5$ zapewnia pokrycie pola podaży momentu obrotowego silnika w zależności od zadawanej prędkości obrotowej silnika.

Sterownik umożliwia również badania wtryskiwaczy na stanowisku bezsilnikowym. W trybie sterowania asynchronicznego wykonano charakterystykę wtryskiwacza DB CDI 220 stosowanego w silniku SB-3.1, którą przedstawiono na rys. 7.



Rys. 7. Przykładowa charakterystyka wtryskiwacza DB CDI 220

Fig. 7. Example of injector characteristic DB CDI 220

4. Podsumowanie

Sterownik KSSiP-1 umożliwia prowadzenie prac badawczych związanych z doskonaleniem procesu spalania w silnikach o zapłonie samoczynnym z zasobnikowymi systemami zasilania typu Common Rail. Obecne oprogramowanie sterownika umożliwia otrzymywanie dowolnych charakterystyk silnikowych, związanych z badaniami wpływu kąta wyprzedzenia wtrysku i dawek wtrysku o dowolnym profilu na osiągi silnika o zapłonie samoczynnym. Sterownik KSSiP-1 został wdrożony w kilku jednostkach naukowo-badawczych w kraju.

Na obecnym etapie prac rozwojowych sterownik wykorzystywany jest z powodzeniem na stanowiskach w hamowniach, w badaniach silnika o zasilaniu dwupaliwowym i badaniach przebiegu wtrysku na stanowisku bezsilnikowym. Zebrane doświadczenia umożliwią doskonalenie sterownika, szczególnie w zakresie oprogramowania, zarówno w wersji stanowiskowej jak i przy zarządzaniu pracą silnika wielocylindrowego.

5. Literatura

- [1] Boulouchos K., Stelber H., Schubiger R., Eberle M., Lutz T.: Optimierung von Arbeits- und Brennverfahren für grössere Dieselmotoren mit Common-Rail-Einspritzung. Teil 1 MTZ 4/2000r., Teil 2 MTZ 5/2000.
- [2] Badami M., Mallamo F., Millo F. and Rossi E.: Experimental investigation on the effect of multiple injection strategies on emissions, noise and brake specific fuel consumption of an automotive direct injection common – rail diesel engine. Int. Journal of Engine Research., Vol.4, No. 4, 2003.
- [3] Larisch J., Sobieszcański M.: Impact of the Proportional Factors of Electronic Speed Governor on Diesel Engine Performance. SAE SP-1585.
- [4] Schuckert M., Schulze L., Tschoke H.: Layout a Common Rail Injection System for Diesel Engines. MTZ 12/1998.
- [5] Hoffmann K.H., Hummel K., Maderstein T., Peters A.: Das Common-Rail-Einspritzsystem – ein neues Kapitel der Deseleinspritztechnik. MTZ 10/1997.
- [6] Egler W., Fuchs W., Schmidt J.: Die simulationsgestützte Entwicklung von Hochdruckeinspritzsystemem für Dieselmotoren. MTZ 11/1997.
- [7] Egger K., Warga J., Klügl W.: Neues Common-Rail-Einspritzsystem mit Piezo-Aktorik für Pkw-Dieselmotoren. MTZ 9/2002.
- [8] Maier R., Projahn U., Krieger K.: Anforderungen an Einspritzsysteme für Nutzfahrzeug-Dieselmotoren. Teil 1 MTZ 9/2002 r., Teil 2 MTZ 10/2002.
- [9] Jorach R., Doppler H. Altmann O.: Schweröl Common-Rail Einspritzsysteme für Großmotoren. MTZ 12/2000.
- [10] Kammerdiener T., Bürgler L.: Ein Common-Rail-Konzept mit druckmodulierter Einspritzung. MTZ 04/2000.
- [11] Meyer S., Rause A., Krome D., Merker G.: Flexible Piezo common Rail System with Direct Needle Control. MTZ 02/2002.
- [12] Tonetii M.: Verso l'evoluzione del Common Rail diesel. Competitivita Centro Ricerche Fiat N. 14 –10/12/2001.
- [13] Nauman T., Pucher H.: Online-Optimierung von Common-Rail-Einspritzsystemen. MTZ 09/2003.

otrzymano / received: 17.12.2009

przyjęto do druku / accepted: 03.02.2010

artykuł recenzowany