

Sławomir WIERZBICKI

Michał ŚMIEJA

Rafał GRZESZCZYK

PTNSS–2013–SC–089

Integrated control of a test stand for compression ignition engines in a fast prototyping environment

Abstract: Proper performance of combustion engine tests requires ensuring and maintaining fixed set load values. For laboratory tests, the best solution is the use of engine test beds. Currently applied test bed solutions ensure automatic precise control and monitoring of individual brake parameters due to the use of microprocessor controlled systems. This article presents a system built on the basis of the LabVIEW programming environment enabling the integration of the engine test bed control system with the engine fuel feed control system.

Keywords: compression ignition engine control, engine test bed, CAN network, LabVIEW

Zintegrowane sterowanie stanowiskiem badawczym silników o ZS w środowisku fast prototyping

Streszczenie: Prawidłowe prowadzenie badań silników spalinowych wymaga zapewnienia i utrzymywania stałych zadanych wartości obciążeń. W przypadku badań laboratoryjnych najlepszym rozwiązaniem jest wykorzystanie hamowni silnikowych. Współcześnie stosowane rozwiązania hamowni dzięki użyciu sterowanych mikroprocesorowo układów zapewniają automatyczne precyzyjne sterowanie i kontrolę poszczególnych parametrów hamulca. W niniejszym artykule przedstawiono zbudowany w oparciu o środowisko programistyczne LabView układ umożliwiający zintegrowanie układu sterowania hamownią silnikową z układem sterowania zasilaniem silnika.

Słowa kluczowe: sterowanie silnikiem o zapłonie samoczynnym, hamownia silnikowa, sieć CAN, LabView

1. Wprowadzenie

Jednym z podstawowych problemów podczas prowadzenia wszelkiego rodzaju badań silników spalinowych jest zapewnienie stałych warunków pomiaru. Zapewnienie zadanych, stałych parametrów pracy silnika wymaga obciążenia silnika układem zapewniającym utrzymanie zadanych warunków obciążenia [3, 5, 7, 8].

Najczęściej podczas badań silników spalinowych jako układ obciążających silnik stosuje się obecnie hamownie silnikowe. Współczesne hamownie są najczęściej rozbudowanymi układami zapewniającymi precyzyjne sterowanie według wybranego trybu pracy (np. przy stałych obrotach lub stałym obciążeniu silnika). Jednocześnie hamownie te z reguły wyposażone są w układy peryferyjne umożliwiające sterowanie elementami wykonawczymi silnika (np. położenie przepustnicy lub listwy pompy wtryskowej) w celu zapewnienia założonych warunków pomiarowych [2, 3, 8].

W przypadku prowadzenia badań silników o zapłonie samoczynnym pracujących w układzie dwupaliwowym z dawką główną w postaci paliwa gazowego, takie rozwiązanie układu obciążenia i sterowania silnika nie zapewnia stałych warunków pracy silnika z uwagi na brak równoległego stero-

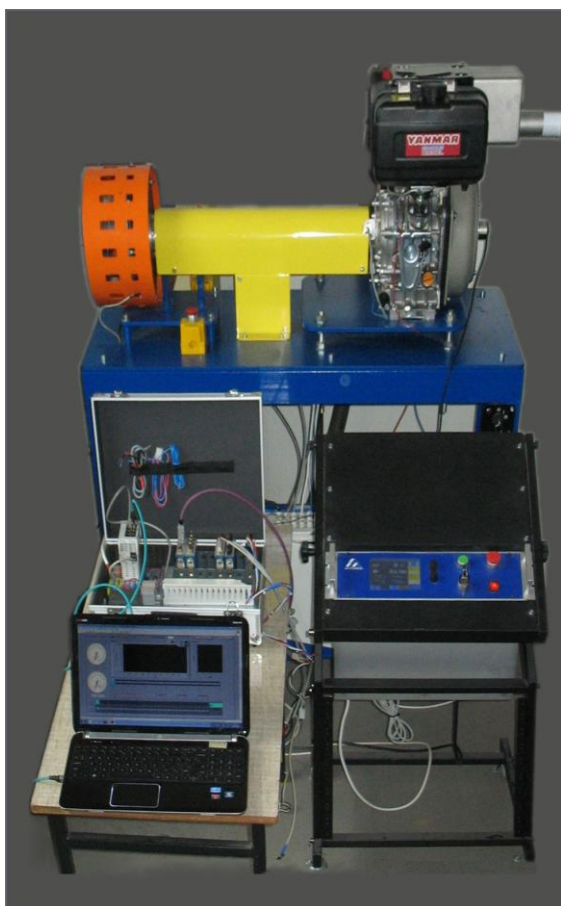
wania dawkowaniem obydwu paliw oraz uwzględnienia zadanych proporcji tych paliw [7, 8].

2. Cel badań i opis stanowiska badawczego

Celem opisanych w artykule prac było opracowanie układu zapewniającego pomiar i sterowanie hamownią silnikową z poziomu zintegrowanego układu sterowania hamownią i układem sterowania doprowadzania gazu o zmiennym składzie chemicznym jak również wtryskiem dawki pilotującej o założonych parametrach [5, 8].

Jako obiekt prowadzonych badań wybrano jednocylindrowy silnik o zapłonie samoczynnym YANMAR obciążany hamownią silnikową typu AMX211 firmy AUTOMEX (rys. 1).

Podstawowe dane techniczne silnika YANMAR przedstawiono w tabeli 1, natomiast podstawowe dane techniczne hamowni AMX211 przedstawiono w tabeli 2.



Rys. 1. Widok silnika YANMAR zamontowanego na hamowni silnikowej AMX211

Fig. 1. View of the YANMAR engine on the testing bench AMX211

Tabela 1. Podstawowe parametry techniczne silnika YANMAR [6]

Table. 1. Basic technical parameters of the engine YANMAR [6]

Typ silnika	L100N6CA1T1CAID
Pojemność skokowa	534 cm ³
Stopień sprężania	20
Średnica/skok tłoka	86 / 75 mm
Moc max.	7,4 kW
Max. moment obrotowy	27 Nm
Max. prędkość obrotowa	3600 min ⁻¹
Rodzaj wtrysku	bezpośredni
Układ chłodzenia	powietrzem

Tabela 2. Podstawowe parametry techniczne hamowni silnikowej AMX211 [2]

Table. 2. Basic technical parameters of engine test bench AMX211 [2]

Model	EMX – 10/18 000
Rodzaj hamulca	elektrowirowy
Max. moc	10 kW
Max. moment obrotowy	50 Nm
Max. prędkość obrotowa	18 000 min ⁻¹
Rodzaj chłodzenia	powietrzem

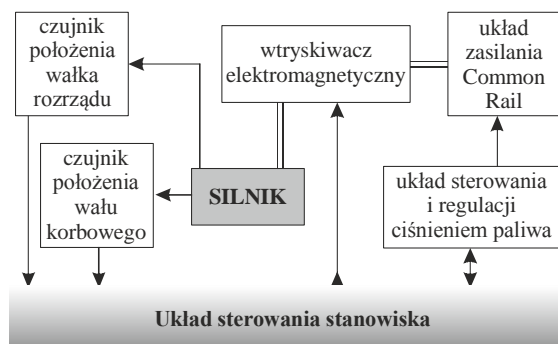
Standardowo opisywana hamownia wraz z oprogramowaniem przystosowana jest do badania silników o zapłonie iskrowym. W tym celu układ sterowania hamownią wyposażony jest w regulatory PID umożliwiające pracę z hamulca wraz z silnikiem w następujących trybach [2]:

- **tryb 1** – stabilizacja zadanych obrotów silnika poprzez prąd wzbudzenia hamulca – ustawienie zadanego kąta otwarcia przepustnicy;
- **tryb 2** – stabilizacja zadanego momentu silnika poprzez prąd wzbudzenia hamulca – ustawienie zadanego kąta otwarcia przepustnicy;
- **tryb 3** – stabilizacja zadanych obrotów silnika poprzez prąd wzbudzenia hamulca – stabilizacja momentu poprzez położenie przepustnicy;
- **tryb 4** – stabilizacja zadanego momentu silnika poprzez prąd wzbudzenia hamulca – stabilizacja obrotów poprzez położenie przepustnicy;
- **tryb 5** – stabilizacja momentu silnika poprzez prąd wzbudzenia hamulca według charakterystyki kwadratowej ($M \sim n^2$), ustawienie zadanego kąta otwarcia przepustnicy.

Z uwagi, na fakt, iż celem prowadzonych prac jest prowadzenie badań nad zasilaniem silników o zapłonie samoczynnym zasilanych w układzie dwupaliwowym, funkcje układu sterowania przepustnicą zastąpiono wchodzącym w skład stanowiska badawczego dedykowanym układem sterowania ciśnieniem paliwa i pracą wtryskiwacza. Z powyższych względów zastosowany podczas badań silnik YANMAR poddano istotnym modyfikacjom:

- w celu precyzyjnego określenia położenia wału korbowego zainstalowano na jego przedłużeniu optyczny enkoder inkrementalny o rozdzielczości 1024 impulsy na jeden obrót wału korbowego;
- identyfikację suwu sprężania w cylindrze uzyskano poprzez zastosowanie dwustanowego czujnika indukcyjnego monitorującego pracę dźwigniki zaworu ssącego;
- wchodzący w skład oryginalnego wyposażenia wtryskiwacz mechaniczny zastąpiono wtryskiwaczem elektromagnetycznym przystosowanym do pracy w układzie Common Rail zasilanymi z odrębnej części stanowiska badawczego;
- na układzie dolotowym silnika zamontowano instalacje przygotowania paliwa gazowego o założonym składzie chemicznym;

Przeływ informacji sterujących silnikiem przedstawiono na rys. 2.



Rys. 2. Schemat modyfikacji osprzętu silnika na potrzeby prowadzonych badań

Fig. 2. Diagram of modifications engine equipment due to research stage

W skład opisywanego stanowiska wchodzi hamulec elektrowirowy stanowiący obciążeniem silnika. Hamulec steruje moduł pomiarowy do którego podłączone są wszystkie czujniki pomiarowe jak również jest on jednocześnie elementem wykonawczym sterowania hamulcem. Moduł pomiarowy połączony jest za pomocą sieci CAN z modułem sterującym wyposażonym w panel dotykowy zapewniający wybór trybu pracy oraz konfigurację stanowiska. Dodatkowo moduł sterujący może być poprzez sieć Ethernet połączony z komputerem PC dzięki czemu możliwe jest sterowanie stanowiskiem z poziomu specjalnej aplikacji.

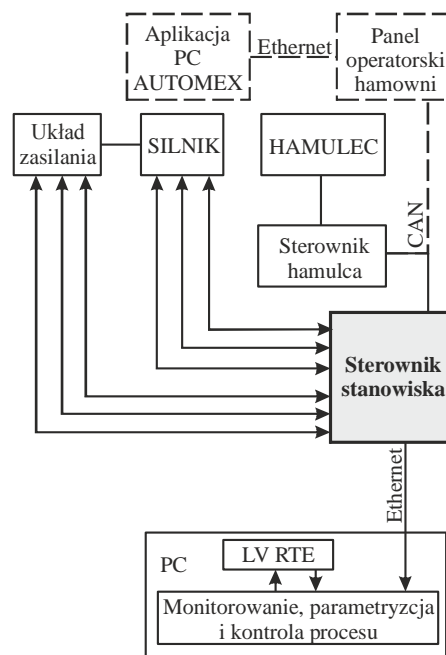
3. Zintegrowany system sterowania i rejestracji danych

W celu umożliwienia prowadzenia badań silników o ZS zasilanych dwupaliwowo, konieczne było opracowanie zintegrowanego układu sterowania nie tylko hamulcem silnika ale również układem doprowadzającym paliwo gazowe jak i dawkę pilotującą paliwa ciekłego. Analizując dostępne na rynku rozwiązania wykorzystywane do sterowania tak złożonymi układami zdecydowano się na wykorzystanie programowalnych platform Compact Rio firmy National Instruments. O wyborze zdecydowały następujące przesłanki:

- łatwość rozbudowy układu o kolejne moduły;
- możliwość aplikacji różnych układów sterujących – pozwalających na zintegrowanie układu sterowania hamownią z układem doprowadzającym paliwo gazowe jak również z układem sterowania wtryskiem dawki pilotującej;
- duża różnorodność kart wejść/wyjść umożliwiająca dowolną konfigurację układu sterująco-pomiarowego;
- możliwość pracy w trybie RealTime co zapewnia sterowanie i pomiar parametrów w czasie rzeczywistym;

Wysoka złożoność stanowiska tak ze względu na obecność dużej ilości współpracujących obiektów jak i ilość danych wymagających przetwarzania

implikuje określony sposób komunikacji między poszczególnymi elementami. Na stanowisku badawczym jak przedstawiono na rys. 3 wykorzystano rozwiązanie opierające się zarówno o bezpośrednie rejestrowanie sygnałów przez wejścia kart pomiarowych sterownika stanowiska jak i przesyłanie informacji przez magistrale danych. Dobór zastosowanych protokołów sieciowych uzależniono od wymaganego w konkretnych przypadkach poziomu determinizmu czasowego oraz przepustowości sieci.



Rys. 3. Schemat komunikacji pomiędzy elementami stanowiska badawczego

Fig. 3. Communication between elements of test stand

Pełniący funkcje głównego interfejsu operatora oraz miejsca gromadzenia danych komputer klasy PC realizuje swoje zadania z wykorzystaniem LabView RunTimeEngine pod kontrolą systemu operacyjnego Windows.

Z uwagi na wystarczającą prędkość przesyłu danych służących do wizualizacji archiwizacji i parametryzacji procesu wykorzystano sieć ethernet TCP/IP do połączenia z głównym sterownikiem stanowiska opartym o sterownik NI cRIO-9073. Ten typ transmisji szeroko rozpowszechniony ze względu na zastosowanie np. w tzw. LAN (Local Area Network) odgrywający jednak również znaczącą rolę w automatyce przemysłowej, cechuje się znaczną przepustowością przy wysokiej odporności na zakłócenia i możliwości aplikacji na dużych dystansach. Istotnym ograniczeniem pozostaje jednak w tym przypadku niski poziom determinizmu czasowego przepływu danych związany z dostępem do łącza typu CSMA/CD (Carrier Sense Multiple Access / with Collision Detection). Z tego powodu wymiana danych pomiędzy sterownikiem głównym

stanowiska a sterownikiem hamowni w związku z koniecznością synchronizacji pracy układów akwizycji danych zrealizowana została w oparciu o protokół CAN (Controller Area Network). Opracowana przez producenta hamowni warstwa aplikacji na tym odcinku uwzględnia dwa sposoby inicjacji transmisji tj.: transmisja wyzwalana zdarzeniem (event triggered) oraz transmisja wyzwalana zgodnie z przyjętym reżimem czasowym (time triggered) [1, 3]. Bieżące wartości wielkości opisujących stan układu hamulec – silnik takie jak prędkość obrotowa moment na wale czy aktualny tryb sterowania przesyłane są do sterownika hamulca w sposób cykliczny w określonych momentach czasowych wg reguły „time triggered”. Żądanie zmiany parametrów, nastaw czy trybu pracy sterownika hamulca realizowane jest natomiast w trybie „event triggered”. Dla zachowania wysokiego poziomu wiarygodności i bezpieczeństwa każda informacja wysyłana do sterownika hamulca potwierdzana jest przez niego informacją zwrotną. Dostęp sterownika stanowiska do magistrali w celu wysyłania żądań zapewniony jest dzięki typowemu dla CAN mechanizmowi arbitrażu. Identyfikatorki ramek żądań, przesyłanych w kierunku: sterownik stanowiska → sterownik hamulca, nadają tym komunikatom wyższy priorytet niż w kierunku przeciwnym, (w którym odbywa się komunikacja cykliczna). Pewnym odstępstwem od klasycznego wykorzystania CAN (znanym jednak z niektórych aplikacji jak np. CanOpen), jest wykorzystanie części pola danych ramki do identyfikacji przesyłanej wiadomości. Przyjęta stała długość pola danych ramki to 8 bajtów, z których bajt najbardziej znaczący zawiera wspomniany identyfikator podczas gdy pozostałe bajty przypisane są w zależności od formatu i rodzaju przesyłanych danych. Przykład ramki żądania ustawienia momentu obrotowego oraz potwierdzenia przedstawiono w tabeli 3.

Tabela 3. Przykładowa ramka CAN żądania ustawienia momentu obrotowego oraz jego potwierdzenia
Table 3. Example of request CAN frame - torque setting with confirmation

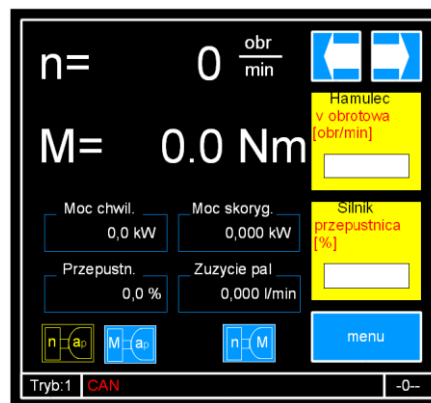
ID	Stała wartość	Wartość				Stała wartość	Stała wartość
0xFD	0x00	0x.....	0x.....	0x.....	0x.....	0x00	0x00
0x7D	0x00	0x.....	0x.....	0x.....	0x.....	0x00	0x00

Zastosowana na stanowisku hamowni aplikacja umożliwia monitorowanie wielu dodatkowych sygnałów takich jak np. wartości temperatury czy ciśnienia oraz ujęcie ich w transmisji CAN. Ze względu na możliwość wystąpienia niepożądanych opóźnień, na opisywanym stanowisku badawczym sygnały te pozyskiwane są jednak bezpośrednio z przetworników na wejścia głównego modułu sterującego.

Wymiana danych między panelem sterowania a sterownikiem hamulca, oparta na komunikacji zgodnej z protokołem CAN, pozwala na „zdublowanie funkcji panelu operatorskiego (rys. 4) przez interfejs systemu sterującego stanowiska badawczego.

Ważną funkcjonalnością zastosowanej sieci CAN jest możliwość parametryzacji regulatorów sterownika hamulca ze względu na własności dynamiczne współpracującego z nim silnika, co dla przedstawionej w artykule konfiguracji pozwoliło na korektę pierwotnych nastaw w zakresie dużych obciążeń dla zastosowanej jednostki napędowej.

Zgodnie z przyjętymi założeniami o uniwersalności stanowiska w zakresie jego modyfikacji przygotowane w środowisku LabView oprogramowanie obejmuje rozbudowany interfejs sterujący, którego przykładowy ekran przedstawiono na rys. 5, zawierający takie elementy jak wskaźniki aktualnego momentu i prędkości obrotowej, wykres przebiegu momentu i prędkości obrotowej w funkcji czasu, kontrolki zadawania momentu i obrotów, kontrolki zadawania czasu wtrysku i kąta wyprzedzenia wtrysku paliwa ciekłego, kontrolki zadawania proporcji gazów.



Rys. 4. Widok panelu sterowania hamowni silnikowej AMX211 [2]

Fig. 4. View of control panel engine testing bench AMX211 engine [2]



Rys. 5. Widok okna programu sterującego pracą hamowni AMX211

Fig. 5. View window control work engine test bench AMX211

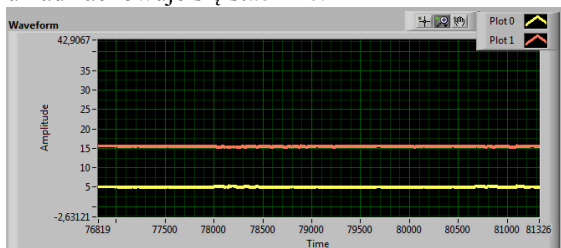
4. Testowanie oprogramowania

W celu sprawdzenia poprawności działania zbudowanego układu sterującego wykonano szereg badań w trakcie których dokonywano zmian ustawień hamulca obciążającego silnik.

Przeprowadzone badania miały na celu ocenę przydatności opracowanego układu sterowania do prowadzenia badań nad dwupaliwowym zasilaniem silników o zapłonie samoczynnym przy zmiennym składzie paliwa gazowego.

Przedstawione poniżej wyniki pomiarów uzyskano podczas badania silnika YANMAR zasilanego oryginalnym mechanicznym układem zasilania.

Na rys. 6 przedstawiono zarejestrowane przebiegi zmian prędkości obrotowej silnika oraz momentu obrotowego obciążającego silnik podczas zmian trybu pracy hamulca. Podczas zarejestrowanego pomiaru zmieniano dwukrotnie tryb pracy pomiaru między trybem 3 (przy stałych obrotach silnika) oraz trybem 4 (przy stałym momencie na wale silnika). Z przedstawionego przebiegu wyraźnie widać, iż podczas zmian trybu pracy hamulca cały układ zachowuje się stabilnie.

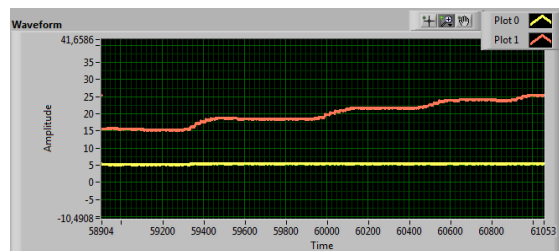


Rys. 6. Przebieg zmian prędkości obrotowej silnika (kolor czerwony) oraz momentu obrotowego (kolor żółty) podczas zmian trybu pracy hamulca

Fig. 6. Waveform chart of rotation speed (red) and torque (yellow) during switching the brake work mode

W dalszej kolejności przeprowadzono badania mające na celu sprawdzenie zachowania się badanego układu hamulec – silnik o zapłonie samoczynnym pracującym w wybranym trybie stabilizacji jednego z parametrów hamulca. Na rys. 7 przedstawiono przebieg zmian prędkości obrotowej sil-

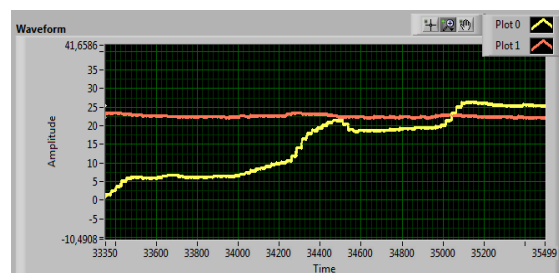
nika oraz jego momentu obrotowego przy założonym stałym momencie obciążenia. Z przedstawionego na wykresie przebiegu widać, iż układ zachowuje się stabilnie w przypadku zmiany nastaw listwy dawkującej paliwo.



Rys. 7. Przebieg zmian prędkości obrotowej silnika w trybie stabilizacji zadanej stałego momentu obrotowego silnika

Fig. 7. Waveform chart of rotation speed in mode fixed torque

Analogicznie na rys. 8 przedstawiono przebieg zmian momentu obrotowego oraz prędkości obrotowej silnika w trybie stabilizacji obrotów silnika. Podczas pomiaru zmieniano dokonywano zmian położenia listwy dawkującej paliwa, natomiast układ obciążenia stabilizował prędkość obrotową silnika za zadany poziom.



Rys. 8. Przebieg zmian momentu obrotowego silnika w trybie stabilizacji zadanej prędkości obrotowej silnika

Fig. 8. Waveform chart of torque in mode fixed rotation speed

5. Podsumowanie

Podsumowując przedstawione powyżej wyniki badań dotyczących możliwości sterowania hamownią AMX210 z wykorzystaniem opracowanego układu sterowania należy stwierdzić iż:

- istnieje możliwość sterowania parametrami pracy hamulca z wykorzystaniem zewnętrznego układu sterowania z wykorzystaniem do tego celu sieci CAN;
- opracowane rozwiązanie układu sterowania hamulcem zapewnia precyzyjną regulację i kontrolowanie podstawowych parametrów pracy hamulca (prędkość obrotowa silnika, moment obrotowy).
- układ zapewnia możliwość wyboru trybu pracy hamulca (tryb stabilizacji prędkości obrotowej silnika lub jego obciążenia);

- dzięki sterowaniu parametrami hamulca przez zewnętrzne urządzenie sterujące istnieje możliwość zintegrowania układu sterowania hamulcem z układem sterowania dwupaliwowym zasilaniem silnika o zapłonie samoczynnym.

Dalsze prace realizowane w ramach prowadzonych badań będą kontynuowane w kierunku integracji opracowanych układów sterowania obciążeniem silnika oraz układem przygotowania paliwa gazowego o założonym składzie chemicznym oraz

modułem sterowania wtryskiem dawki pilotującej oleju napędowego. Planowana jest także dalsza rozbudowa układu o układ pomiaru temperatury silnika i spalin, a także o dodatkowe czujniki np. spalania stukowego.

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

Literatura

- [1] Bartnicki, A. Rubiec, A.: *Magistrala CAN w systemach sterowania maszyn i pojazdów wojskowych*. Logistyka nr 6/2010.
- [2] *Dokumentacja hamowni silnikowej AMX211*. AUTOMEX S.A., Gdańsk 2011.
- [3] Kneba, Z. Śmieja, M.: *The use of can in automation test bench to test the engine cooling system*. Journal of KONES, Vol. 17, No. 3, 2010.
- [4] Luft, S. Skrzek, T.: *Analiza rozwiązań konstrukcyjnych układów zasilania silników o zapłonie samoczynnym*. Logistyka. 2011, nr. 6.
- [5] Mamala, J., Broł, S., Jantos, J.: *The operating parameters of internal combustion engines in the road test*. Silniki spalinowe, R. 50, nr 3/2011.
- [6] *Service manual engine YANMAR L100N*. YANMAR Corp. LTD. 2011.
- [7] Stelmasiak, Z. Knefel, T. Larisch, J.: *Sterownik do badań silników z systemem wtrysku Common Rail*. Pomiary, Automatyka, Kontrola, 2010, R. 56, nr 3, p. 217-220.
- [8] Śmieja, M., Wierzbicki, S.: *The concept of an integrated laboratory control system for a dual-fuel diesel engine*. Journal of KONES. Vol. 19. No. 3. 2012, s. 451-458.

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.



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.



Rafał Grzeszczyk, PhD, MSc, MBA – Automex sp. z o.o., Gdańsk.

Dr inż. Rafał Grzeszczyk Automex sp. z o.o., Gdańsk.

