



Układ elektronicznego sterowania silnikiem ciągnika gąsienicowego „MTLB-MORS”

MIROŚLAW KARCZEWSKI

Wojskowa Akademia Techniczna, Wydział Mechaniczny,
Instytut Pojazdów Mechanicznych i Transportu,
00-908 Warszawa, ul. S. Kaliskiego 2

Streszczenie. W referacie przedstawiono wyniki prac nad opracowaniem elektronicznego układu sterowania silnika ciągnika gąsienicowego „MTLB-MORS”. Opisano zastosowane rozwiązania zespołów układu sterowania i ich rozmieszczenie w pojeździe. Omówiono strukturę układu sterowania oraz algorytmy sterowania silnikiem.

Słowa kluczowe: silniki spalinowe, regulator elektroniczny, sterowanie silnikiem

Symbole UKD: 621.43

1. Wprowadzenie

Układy elektronicznego sterowania silnikami są obecnie coraz powszechniej stosowane w tłokowych silnikach spalinowych. Mogą one występować jako układy autonomiczne [1, 2] lub stanowić podzespół systemu elektronicznego sterowania całym pojazdem. Regulatory elektroniczne w znacznym stopniu ułatwiają spełnienie wzrastających wymagań ekologicznych i utrzymanie pełnej sprawności silników przez ich diagnozowanie podczas pracy. Bardzo szybkie rozpowszechnianie elektronicznych układów regulacji silnika spalinowego następuje równocześnie z rozwojem techniki mikroprocesorowej i pozwala na uwzględnianie coraz większej liczby sygnałów wejściowych [2].

Obecnie w nowoczesnych silnikach spalinowych stosowane są coraz bardziej skomplikowane mikroprocesorowe systemy sterowania i kontroli warunków pracy. Aktualne trendy skupiają się szczególnie na wzroście dokładności systemów. Wymagania dla tych układów są podyktowane ich jak największą efektywnością.

Aby spełnić wymagania niskiego zużycia paliwa przez silnik, ograniczonej emisji związków toksycznych, urządzenia muszą pracować z wysoką niezawodnością w szerokim zakresie zmian warunków otoczenia zarówno w stanach ustalonych, jak i nieustalonych pracy silnika.

W Zakładzie Silników Pojazdów Mechanicznych Wydziału Mechanicznego WAT opracowano układ elektronicznego sterowania silnikiem o zapłonie samoczynnym z rzędową pompą wtryskową. Układ ten został przebadany na stanowisku dynamometrycznym, a rezultatem tych badań było opracowanie algorytmów sterowania silnikiem oraz dobranie optymalnych wartości współczynników transmitancji układu sterowania. Eksperymentalną weryfikację układu przeprowadzono na gąsienicowym transporterze opancerzonym „MTLB-MORS”, napędzanym turbodoładowanym silnikiem SW-680 [6, 7].

2. Cel i zakres pracy

Celem pracy było opracowanie elektronicznego układu sterowania silnikiem o zapłonie samoczynnym SW-680, wykorzystywanego do napędu różnych odbiorników mocy.

Założono, że układ powinien realizować następujące zadania:

- mierzyć na bieżąco wielkości charakteryzujące pracę silnika,
- wybierać algorytmy sterowania silnikiem odpowiednio do warunków jego pracy,
- zapewniać niezawodny rozruch silnika w każdych warunkach,
- ograniczać maksymalną prędkość obrotową silnika i utrzymywać prędkość obrotową biegu jałowego,
- utrzymywać zadawaną prędkość obrotową,
- korygować maksymalną dawkę w funkcji prędkości obrotowej i ciśnienia w kolektorze dolotowym (napełnienia cylindrów powietrzem),
- zapewnić odpowiednio szybką zmianę prędkości obrotowej silnika przy minimalnej liczbie przeregulowań,
- sygnalizować przekroczenie stanów granicznych,
- mieć możliwość komunikacji z komputerem nadrzędnym oraz innymi sterownikami (np. układem sterowania kątem wyprzedzenia wtrysku paliwa).

Przyjęto, że układ elektronicznego sterowania silnikiem powinien spełnić następujące wymagania:

- regulator będzie zastosowany do rzędowej pompy wtryskowej,
- jako zespół wykonawczy zostanie wykorzystany siłownik elektromagnetyczny,
- zespół wykonawczy sterowany będzie za pomocą mikrokontrolera poprzez stopień mocy,

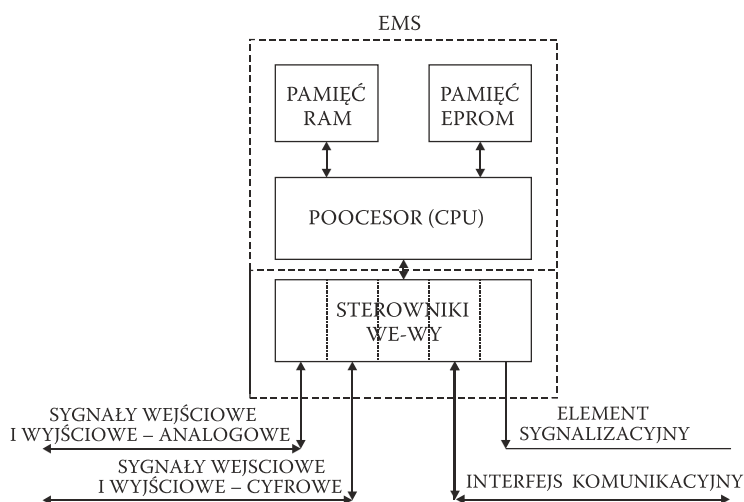
- układ sterowania będzie składał się z jednego sterownika, który będzie spełniał zadania regulatora prędkości obrotowej i korektora dawki paliwa,
- sterownik elektroniczny powinien mieć możliwość prostej konfiguracji torów pomiarowych (możliwość zmiany liczby i rodzaju sygnałów wejściowych i wyjściowych) oraz rozbudowy i modernizacji algorytmów sterowania,
- powinien być przystosowany do pracy w zakresie temperatury -40 do $+85^{\circ}\text{C}$.

Spełnienie tych założeń i wymagań było możliwe przez zastosowanie układu mikroprocesorowego, charakteryzującego się modułową budową o dużej liczbie elementów peryferyjnych oraz łatwego do programowania w warunkach laboratoryjnych.

Przyjęto, że opracowany układ sterowania będzie miał budowę zbliżoną do podobnych rozwiązań stosowanych przez firmy światowe [1, 2, 5]. Powinien składać się z następujących elementów konfigurowanych w zależności od potrzeb:

- elektronicznego cyfrowego modułu sterującego (EMS),
- modułów układów wejścia-wyjścia (wejścia i wyjścia napięciowe, dwustanowe, wejścia częstotliwościowe i termoelementowe),
- układu zasilania,
- modułów do komunikacji z innymi urządzeniami,
- elementów do komunikacji z kierowcą pojazdu.

Blokowy schemat funkcjonalny sterownika (modułu sterowania prędkością obrotową silnika) pokazano na rysunku 1.



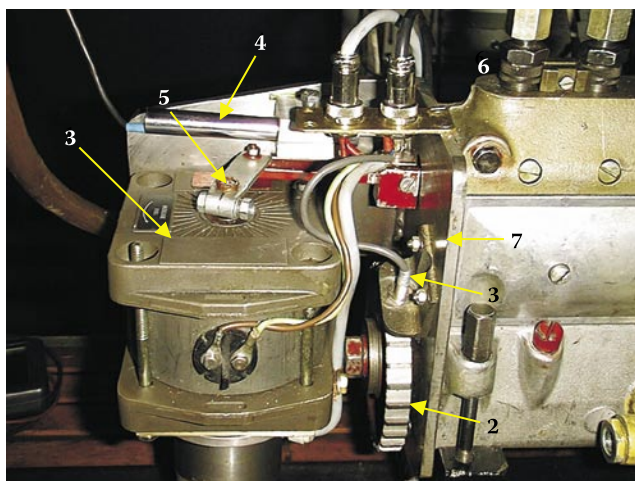
Rys. 1. Schemat blokowy sterownika elektronicznego

3. Układ sterowania silnikiem

Opracowanie elektronicznego układu sterowania silnikiem SW-680 podzielono na dwa etapy. W pierwszym dokonano modernizacji pompy wtryskowej P-56, która polegała na zastąpieniu regulatora mechanicznego nastawnikiem elektromagnetycznym. W drugim etapie dobrano mikrokontroler jednoukładowy, opracowano algorytmy sterowania i niezbędne oprogramowanie.

3.1. Układ sterowania położeniem listwy zębatej pompy wtryskowej

Do sterowania położeniem listwy zębatej pompy wtryskowej zastosowano nastawnik elektromagnetyczny Woodward typu 524 z obrotowym rdzeniem umieszczonym na wale (rys. 2). O wyborze zadecydowała dostępność tego nastawnika oraz jego parametry techniczne i wymiary umożliwiające zamontowanie w miejsce regulatora mechanicznego pompy P-56 bez wprowadzania zmian w osprzęcie silnika SW-680.



Rys. 2. Siłownik typu 524 zamontowany na pompie wtryskowej P-56: 1 — nastawnik; 2 — koło nadajnika prędkości obrotowej; 3 — czujnik prędkości obrotowej; 4 — czujnik położenia listwy zębatej; 5 — dźwignia napędu listwy zębatej; 6 — złącza kablowe; 7 — podstawa nastawnika

Nastawnik zamontowano w miejsce regulatora mechanicznego pompy P-56. W tym celu wykonano podstawę z dwóch płyt stalowych, do których został przymocowany nastawnik oraz uchwyty do mocowania czujnika prędkości obrotowej i przemieszczenia listwy zębatej pompy wtryskowej. Do podstawy zamontowano także złącze kablowe do połączenia nastawnika ze sterownikiem. Całość została przykryta osłoną.

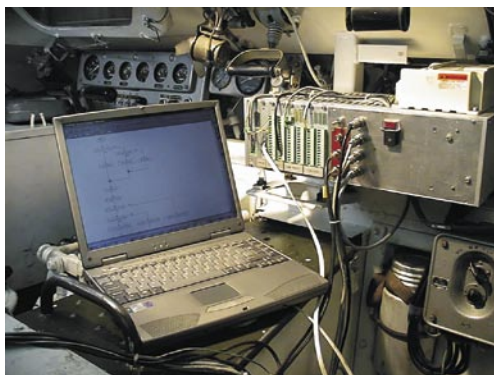
Na wałku krzywkowym pompy wtryskowej, w miejscu bezwładników regulatora mechanicznego zamocowano koło zębate służące jako nadajnik prędkości obrotowej wałka krzywkowego pompy.

3.2. Zespół sterowania z mikrokontrolerem jednoukładowym

Biorąc pod uwagę przeznaczenie opracowywanego układu sterowania, podczas doboru mikrokontrolera (sterownika) przyjęto następujące kryteria:

- układ powinien zapewnić dużą szybkość przetwarzania sygnałów wejściowych i generowania sygnałów wyjściowych (sterujących) podawanych do członów wykonawczych,
- układ powinien zapewnić możliwość uwzględniania kilkunastu sygnałów wejściowych przy wykorzystaniu kart kontrolera i różnych czujników,
- mikrokontroler powinien być zasilany z sieci pokładowej pojazdu (24 VDC),
- układ musi być odporny na wstrząsy oraz zmienne warunki otoczenia w zakresie temperatur od -40 do $+85^{\circ}\text{C}$,
- układ powinien zapewnić możliwość prostego wprowadzania zmian do procedur i parametrów sterowania podczas badań stanowiskowych i eksploatacyjnych.

Do sterowania silnikiem SW 680/59 wybrano standardowy modułowy sterownik firmy PEP typu IUC 900 z rodziny CXC. Mikrokontroler przeznaczony jest do programowania w językach wysokiego poziomu.



Rys. 3. Sterownik IUC 9000 z zamontowanym zasilaczem, kartą procesora oraz kartami rozszerzającymi. Widoczny komputer przenośny wykorzystywany do modyfikacji oprogramowania

Podstawowym elementem była karta procesora IUC-32, która w zależności od potrzeb może być wyposażona w procesor Motorola MC68360/25 MHz lub MC68EN360/33 MHz. Są to mikroprocesory dwuprocesorowe. Transmisję danych

realizuje RISC-CPU, pozostawiając procesorowi głównemu wykonywanie zadań aplikacyjnych.

Zastosowana karta IUC-32 zawierała procesor Motorola MC68EN360-33 MHz, 4 MB RAM z możliwością rozszerzenia do 16 MB, 1 MB SRAM z podtrzymaniem bateryjnym oraz 1 MB Flasf-EPROM, dwa łącza szeregowo, kontroler przerwań, izolowany 24-bitowy licznik.

Procesor zawierał kompletny system operacyjny OS-9 i był gotowy do programowania oraz ładowania kodu aplikacji. Niezależnie od sposobu programowania ISaGRAF, czy ANSI C/C++, kod aplikacji był łatwo ładowalny i uruchamiany. Wbudowane mechanizmy wymiany oprogramowania zapewniają łatwą aktualizację oprogramowania w przyszłości.

Do budowy układu sterowania zastosowano następujące moduły, które realizowały poszczególne funkcje:

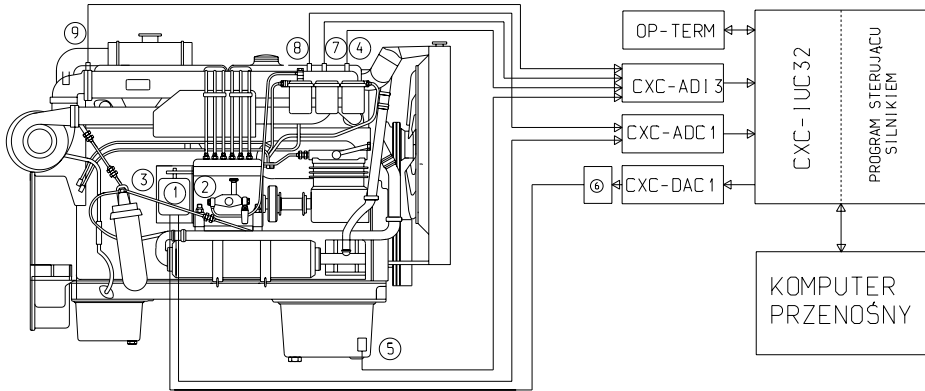
- IUC-32 — element bazowy, zawierający procesor, pamięć i układy komunikacji,
- CXM-DIN2 — 24 wejścia cyfrowe 24 V, izolowane galwanicznie,
- CXM-ADC1 — 8 wejść analogowych 12 bit, 0-10 V, izolowanych galwanicznie,
- CXM-DAC1 — 4 wyjścia analogowe 12 bit, 0-10 V, izolowane galwanicznie,
- CXM-ADI3 — 16 wejść termoparowych, 16 bit, izolowanych galwanicznie,
- OP-TERM — terminal, operatorski 2 * 24 znaki, 16 przycisków.

Do załadowywania i modyfikacji oprogramowania tego sterownika służył komputer przenośny. Za jego pomocą zmieniano kolejne wersje oprogramowania w pamięci sterownika. Istniała także możliwość zmiany w czasie prac niektórych stałych, co ułatwiło przeprowadzenie badań. Komputer komunikował się ze sterownikiem za pośrednictwem łącza RS-232.

Jako miernik prędkości obrotowej zastosowano przetwornik reluktancyjny typu OMRON E2EG-X1 z wbudowanym układem formowania sygnału oraz układem samodiagnostyki czujnika.

Terminal operatorski OP-TERM pozwolił na programowalne sterowanie regulatorem, zmianę trybu pracy silnika, a także na komunikowanie operatorowi pojazdu stanów pracy silnika, np. przekroczenie dopuszczalnej temperatury cieczy chłodzącej.

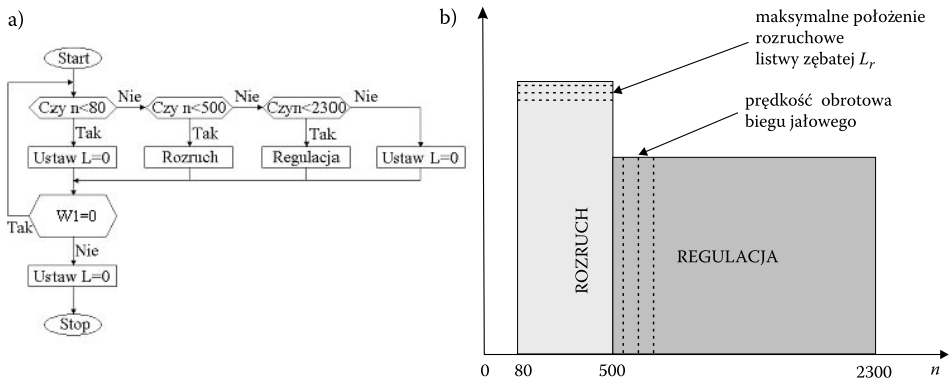
Wykonane podczas realizacji pracy oprogramowanie sterownika zostało w większości przypadków napisane w języku Flow Chart. Za pomocą dostępnych bloków funkcyjnych narysowano algorytm opracowanego programu, a następnie bloki akcji i warunku wypełniono instrukcjami. Do tego celu wykorzystany został język Structure Text z pakietu programistycznego IsaGRAF.



Rys. 4. Schemat układu sterowania SW-680 z wykorzystaniem sterownika CXC: 1 — nastawnik typu 524; 2 — pompa wtryskowa; 3 — czujnik prędkości obrotowej; 4 — czujnik temperatury cieczy chłodzącej; 5 — czujnik temperatury oleju; 6 — wzmacniacz pośredni nastawnika 524; 7 — czujnik temperatury powietrza w kolektorze dolotowym; 8 — czujnik ciśnienia w kolektorze dolotowym; 9 — czujnik temperatury spalin w kolektorze wylotowym

W opracowanym algorytmie przyjęto, że kierowca pojazdu będzie sterował silnikiem za pomocą pedału przyspieszenia (położenie **P**) oraz przełącznika dwustanowego w_1 , umożliwiającego unieruchomienie silnika. W czasie pracy silnika będzie mierzona jego prędkość obrotowa (poprzez pomiar prędkości obrotowej wałka krzywkowego pompy wtryskowej), temperatura T_o , ciśnienie — P_d w kolektorze dolotowym oraz temperatura cieczy chłodzącej silnik T_{ch} .

Algorytm programu głównego w zapisie programowym przedstawiono na rysunku 5. Program rozpoczynał pracę z chwilą podjęcia przez kierowcę czynności uruchomienia silnika i włączenia zasilania. Wtedy uruchamiany był mikrokontroler,



Rys. 5. Algorytm głównego programu sterującego (a) oraz charakterystyka statyczna regulatora (b)

który ładował system operacyjny oraz program sterujący silnikiem wraz z jego podprogramami. Praca programu trwała do chwili wyłączenia silnika za pomocą przełącznika w_1 .

Program sterownika został podzielony na trzy podstawowe bloki, które odpowiadały poszczególnym stanom pracy silnika:

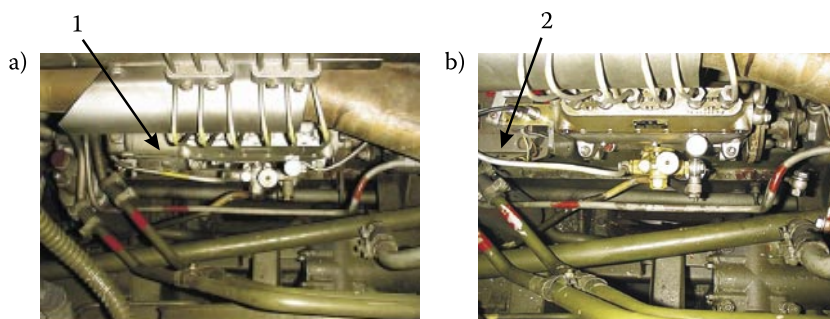
- program główny (wczytanie danych, wybór podprogramu w zależności od prędkości obrotowej),
- podprogram rozruch — realizacja rozruchu silnika,
- podprogram regulacja — sterowanie silnikiem w zakresie użytecznych prędkości obrotowych, utrzymywanie zadanej prędkości biegu jałowego (w zależności od temperatury silnika) oraz korekcja dawki paliwa.

4. Rozwiązanie regulatora dla ciągnika gąsienicowego

Prace związane z przygotowaniem ciągnika do elektronicznego sterowania obejmowały:

- zastąpienie fabrycznej pompy wtryskowej pompą z zamontowanym nastawnikiem elektromagnetycznym zamiast regulatora mechanicznego,
- wyposażenie silnika w czujniki oraz układy umożliwiające rejestrację podstawowych parametrów pracy silnika.

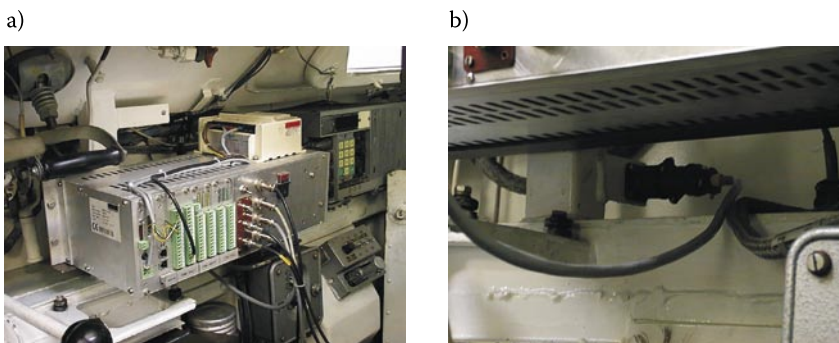
W trakcie realizacji pierwszego etapu wymontowano fabryczną pompę wtryskową z regulatorem mechanicznym (rys. 6a) i zamontowano w jej miejsce pompę wtryskową tego samego typu z zamontowanym nastawnikiem elektromagnetycznym (rys. 6b). Ze względu na kształt nastawnika, konieczna była niewielka korekta ustawienia przewodów olejowych przy filtrze oleju układu smarowania silnika.



Rys. 6. Komora silnikowa transportera MTLB MORS: a) pompa z regulatorem mechanicznym (1); b) pompa z zamontowanym nastawnikiem elektromagnetycznym (2)

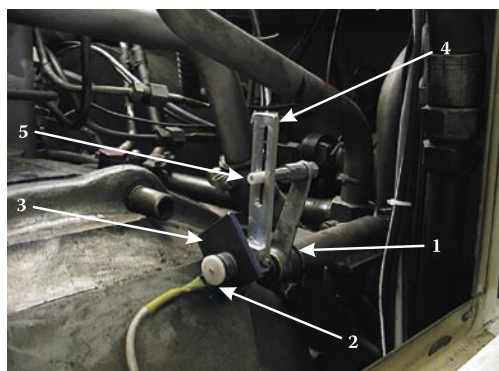
Sterownik pompy wtryskowej zamontowano w przedziale kierowania pojazdu nad obudową układu przeniesienia mocy z silnika do skrzyni biegów (rys. 7a). Miejsce montażu sterownika zapewniało łatwy dostęp do tego urządzenia podczas

wprowadzania zmian w oprogramowaniu sterującym pompą wtryskową oraz umożliwiało awaryjne wyłączenia w przypadku stwierdzenia nieprawidłowości w działaniu silnika lub układu regulacji (rys. 7a). Sterownik zasilany był z instalacji elektrycznej pojazdu przez gniazdo umieszczone poniżej (rys. 7b).



Rys. 7. Sterownik zamontowany w przedziale kierowania pojazdu: a) widok sterownika; b) podłączenie zasilania układu do sieci pokładowej pojazdu

Zamontowanie tzw. „elektronicznego pedału przyspieszenia” polegało na demontażu ostatniego cięgła układu sterowania dźwignią regulatora mechanicznego. Następnie w osi dźwigni pośredniej (1) układu sterowania zamontowano pozycjoner składający się z potencjometru (2) przymocowanego do wspornika oraz dźwigni łączących potencjometr z cięgłem (rys. 8). Do dźwigni pośredniej (4) przymocowano zabierak (5) wchodzący w wycięcie dźwigni potencjometru. Wspornik przykręcono do obudowy sprzęgła. Naciśnięcie przez kierowcę pedału



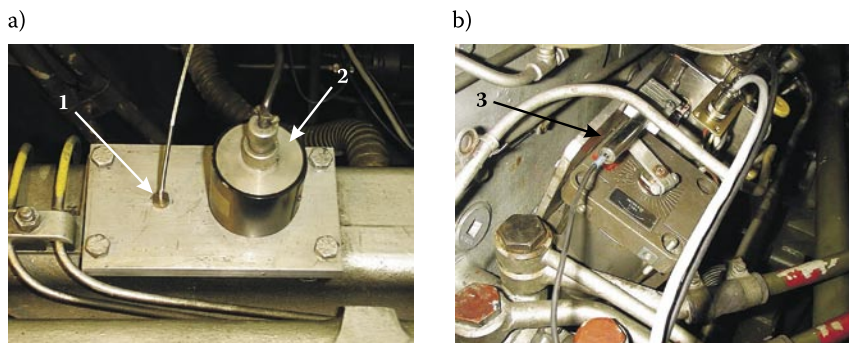
Rys. 8. Potencjometr położenia „pedału przyspieszenia” zamontowany w pojeździe: 1 — dźwignia pośrednia układu sterowania podaniem paliwa; 2 — potencjometr; 3 — wspornik; 4 — dźwignia potencjometru; 5 — zabierak

podania paliwa powodowało obrót dźwigni (1), która poprzez zabierak obracała dźwignię (4), a tym samym zmieniała się rezystancja potencjometru (2).

Zastosowanie takiego rozwiązania ograniczyło do minimum zmiany w oryginalnym układzie sterowania podawaniem paliwa, a ponadto kierowca nie odczuwał różnic w sposobie sterowania pojazdem, ponieważ skok pedału i siła potrzebna do jego przemieszczenia były takie same.

Potencjometr typu A-5 o rezystancji 100 k Ω zasilany był napięciem 10 V ze stabilizatora napięcia μ A 7810 zabudowanego w obudowie regulatora. Zastosowanie stabilizatora scalonego eliminowało zakłócenia spowodowane zmianami napięcia w sieci elektrycznej pojazdu.

Do pomiaru ciśnienia w kolektorze dolotowym zastosowano czujnik tensometryczny. Obok zamontowano termoparę do pomiaru temperatury powietrza dolotowego (rys. 9a). Do pomiaru położenia listwy sterującej pompy zastosowano czujnik indukcyjny, którego rdzeń przymocowano do mechanizmu dźwigniowego listwy zębatej (rys. 9b). Wszystkie bieżące parametry pracy silnika rejestrowano za pomocą rejestratora, który składał się z komputera typu PC III Portable i modułu kontrolno-pomiarowego APCI 3120 z przetwornikiem analogowo-cyfrowym.

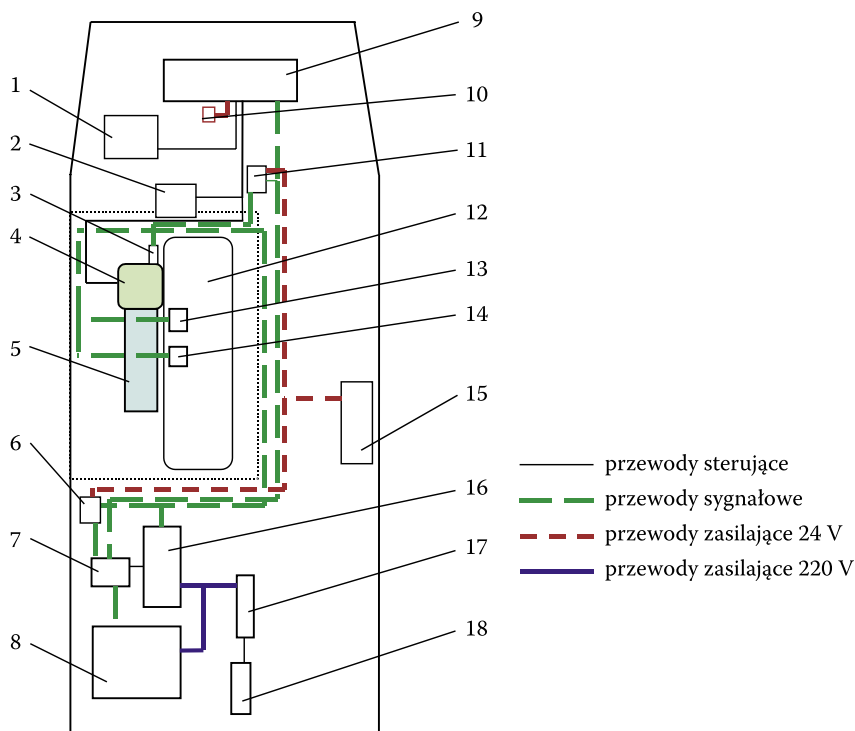


Rys. 9. Układy pomiaru parametrów pracy silnika: a) czujniki ciśnienia (1) i temperatury (2) w kolektorze dolotowym silnika; b) czujnik położenia listwy zębatej (3) zamontowany na pompie wtryskowej

Do rejestracji bieżących parametrów pracy silnika zastosowano przenośny rejestrator składający się z komputera typu PC III Portable wyposażonego w moduł kontrolno-pomiarowy APCI 3120 z przetwornikiem analogowo-cyfrowym.

5. Podsumowanie

W referacie przedstawiono układ elektronicznego sterowania silnikiem o zapłonie samoczynnym opracowany dla silnika wysokoprężnego SW-680, wykorzystywanego do napędu pojazdu „MTLB-MORS”. Silnik tego pojazdu



Rys. 10. Schemat rozmieszczenia elementów układów: sterującego i pomiarowego: 1 — przenośny mikrokomputer; 2 — pozycjoner położenia pedału; 3 — czujnik położenia listwy; 4 — nastawnik pompy; 5 — pompa wtryskowa; 6 — przetwornik temperatury; 7 — szyna przyłączeniowa; 8 — rejestrator komputerowy; 9 — sterownik; 10 — gniazdo zasilania sterownika; 11 — mostek indukcyjny; 12 — silnik; 13 — czujnik ciśnienia w kolektorze dolotowym; 14 — czujnik temperatury; 15 — akumulatory pokładowe; 16 — kasetka z mostkiem tensometrycznym; 17 — przetwornica 12/220 V; 18 — dodatkowy akumulator

wyposażono w pompę wtryskową z nastawnikiem elektromagnetycznym, czujnik położenia pedału przyspieszenia oraz zespół przyrządów kontrolno-pomiarowych. Poszczególne elementy układu kontrolno-pomiarowego zamontowano w przedziale napędowym i desantowym pojazdu.

Wyniki badań eksploatacyjnych pojazdu „MTLB-MORS” z regulatorem elektronicznym potwierdziły prawidłową pracę regulatora prędkości obrotowej i korektora dawki paliwa. Na podstawie badań eksploatacyjnych stwierdzono, że kierowanie pojazdem z regulatorem elektronicznym odbywało się bez żadnych zastrzeżeń, pojazd prawidłowo reagował na polecenia kierowcy, a skorygowana dawka paliwa umożliwiła uzyskanie większej elastyczności silnika.

Wykonany układ elektronicznego sterowania silnikiem został zbudowany w technice cyfrowej i wykorzystuje tylko minimalne możliwości takiego układu.

Możliwe jest rozbudowanie układu o procedury sterowania innymi układami silnika (np. układem rozrządu, chłodzenia, doładowania) oraz procedury diagnozowania poszczególnych układów silnika

Artykuł wpłynął do redakcji 23.11.2005 r. Zweryfikowaną wersję po recenzji otrzymano w kwietniu 2006 r.

LITERATURA

- [1] G. DORNA, P. KLAUS, *Koncepcja sterownika silnika diesla z wykorzystaniem mikroprocesora 80C535*, II Sympozjum Naukowe „Automatyzacja pracy silników wysokopiętnych AUTOMA-SIL 94”, Poznań, 1994.
- [2] N. HIKOSAKA, *A wiew of the Future of Automotive Diesel Engines*, SAE 972682.
- [3] M. KARCZEWSKI, M. RAJEWSKI, L. SZCZĘCH, J. WALENTYNOWICZ, *Opracowanie elektronicznego układu sterowania silnikiem o zapłonie samoczynnym i jego eksperymentalna weryfikacja*, sprawozdanie z projektu badawczego KBN nr 9T12D.
- [4] M. KARCZEWSKI, J. WALENTYNOWICZ, *Algorytmy sterowania silników o zapłonie samoczynnym z regulatorem elektronicznym*, V Sympozjum Naukowe „Automatyzacja pracy silników spalinowych — AUTOMA-SIL ‘99’”, Poznań, 11/1999.
- [5] M. KARCZEWSKI, *Układ sterowania silnikiem SW-680 z wykorzystaniem mikrosterownika CXC*, Sympozjum NT „Problemy eksploatacji zespołów napędowych pojazdów wojskowych”, Wrocław, 05/2000.
- [6] M. KARCZEWSKI, *Sterowanie silnikiem o zapłonie samoczynnym za pomocą regulatora elektronicznego*, rozprawa doktorska, WAT, Warszawa, 2005.
- [7] M. KARCZEWSKI, *Układ elektronicznego sterowania pompą wtryskową silnika transportera opancerzonego „MTLB-MORS”*, IX Międzynarodowe Sympozjum IPM, WAT, Rynia, 2005.

M. KARCZEWSKI

Electronic control system of engine for armoured tracked vehicle “MTLB-MORS”

Abstract. Designing of the electronic governor for diesel engine and its verification in laboratory and operation states was the aim of this paper. The engine SW-680 was equipped with sensor kids for measuring of parameters necessary for engine steering and its diagnosing. Procedures and programs of engine steering during start and working in engine speed range and torque range were developed. The factors of steering function (controller transmittance) were matched on the ground of experimental results.

Keywords: combustion engine, electronic governor, engine steering

Universal Decimal Classification: 621.43