

Piotr **STRYJEK**
Tomasz **NIKISZ**
Krzysztof **SYKULSKI**
Michał **SOWA**

ELEKTRONICZNE UKŁADY STEROWANIA SILNIKAMI SPALINOWYMI W ASPEKCIE REALIZACJI FUNKCJI SPECJALNYCH W POJAZDACH WOJSKOWYCH

Streszczenie. Nowoczesne układy sterowania pracą silników spalinowych dają bardzo szerokie możliwości kształtowania ich charakterystyk. Dodatkowe funkcje specjalne pozwalają na zwiększenie możliwości taktycznych pojazdu, szczególnie w warunkach ekstremalnych. Pozwalają także na ułatwienie i usprawnienie diagnostyki silnika i zespołu napędowego. Systemy takie powinny być jednak odporne na działanie coraz bardziej zaawansowanej broni, wykorzystującej na przykład impuls elektromagnetyczny do niszczenia podzespołów elektroniki pojazdów przeciwnika.

Słowa kluczowe: pojazdy wojskowe, silniki spalinowe, sterowanie.

1. WSTĘP

Pojazdy wojskowe powinny cechować się nie tylko niezawodnością i odpornością na eksploatację w trudnych warunkach środowiskowych, ale również umożliwiać kontynuację ich eksploatacji w sytuacjach uszkodzeń niektórych podzespołów. Z kolei łatwość napraw takich podzespołów jest kluczowa dla szybkiego przywrócenia zdolności bojowej pojazdu.

Obecnie pojazdy wojskowe są wyposażane w coraz bardziej zaawansowane systemy elektroniczne. Dotyczy to nie tylko systemów uzbrojenia i wyposażenia specjalistycznego, ale także układów sterowania silnikami spalinowymi. Na rynku pojazdów wojskowych praktycznie brak jest obecnie pojazdów wyposażonych w silniki spalinowe, których sterowanie opierałoby się w całości na regulatorach mechanicznych. Znaczący rozwój układów sterowania opartych o moduły elektroniczne w pojazdach cywilnych spowodował, że to właśnie te pojazdy wyznaczają często aktualny poziom techniki, a nie pojazdy wojskowe, które do tej pory uważane były za bardziej zaawansowane. Z tego względu rozwiązania pojazdów cywilnych, w tym ich układy sterowania pracą silników są często adaptowane do potrzeb wojskowych. Autorzy artykułu postarali się przeanalizować zagrożenia, ale także i zalety nowoczesnych elektronicznych układów sterowania pracą silników spalinowych wykorzystywanych w pojazdach wojskowych.

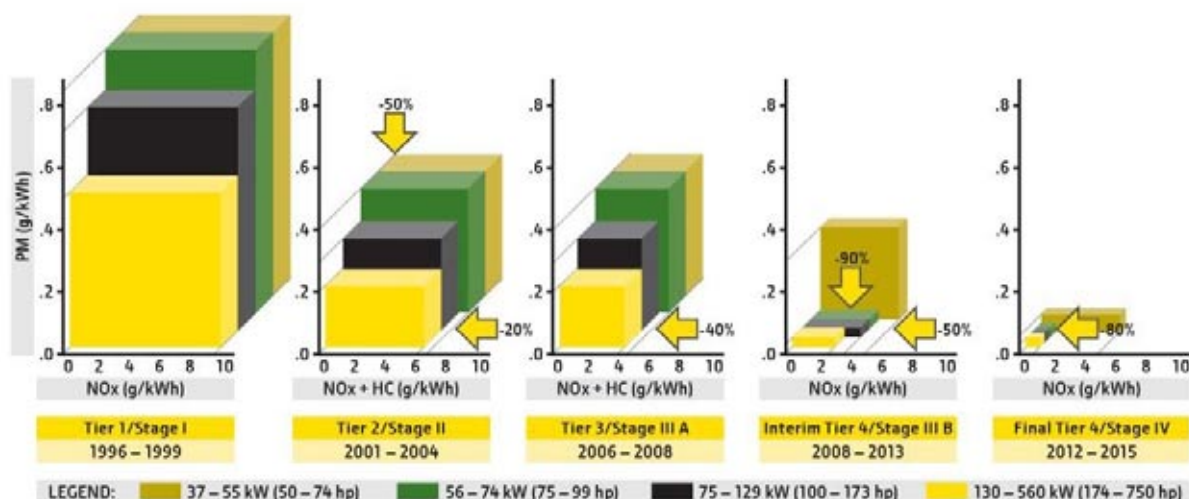
2. FUNKCJE SPECJALNE W STEROWANIU SILNIKAMI SPALINOWYMI

Znaczący rozwój elektroniki sterującej pracą silników spalinowych był podyktowany kilkoma względami. Do głównych należy zaliczyć:

- dążenie do zwiększania mocy jednostkowej silników;
- konieczność kształtowania najkorzystniejszej charakterystyki prędkościowej momentu obrotowego;
- dążenie do zwiększenia niezawodności układów sterowania;
- konieczność spełnienia bieżących norm emisji spalin.

Wszystkie powyższe przesłanki powodowały konieczność coraz precyzyjniejszego sterowania procesem spalania. Konieczne było także uwzględnianie warunków, spalania (temperatury, ciśnienia) z uwzględnieniem wyników procesu spalania (sondy lambda, dodatkowe czujniki reaktora katalitycznego itp.). Ograniczenia możliwości regulatorów mechanicznych uniemożliwiają spełnienia wyżej wymienionych i różnorodnych wymagań.

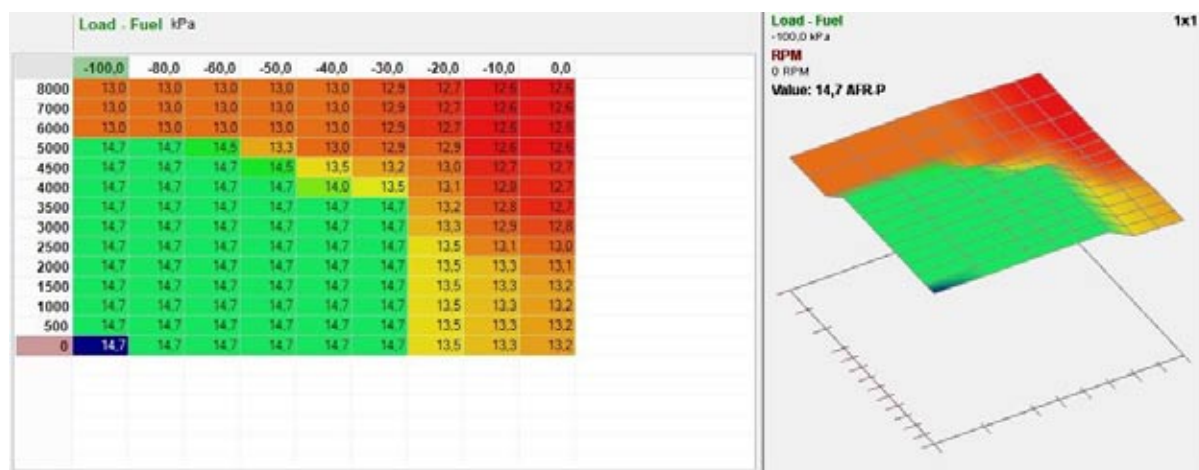
Przykładem obrazującym wzrost wymagań dla sterowania silnikami jest sukcesywne ograniczanie poziomu dopuszczalnej emisji składników spalin. Na rysunku 1 pokazano jak w ciągu ostatnich dwóch dekad zaostrzeniu uległy normy emisji toksycznych składników spalin. Dopuszczalne poziomy stężenie NO_x i HC zmalały o rząd wartości, co jest już trudne do spełnienia przez czołowych producentów pojazdów. Podkreślić należy, że przedstawione zmiany odnoszą się do normy dotyczącej pojazdów pozadrogowych tzw. STAGE, (wprowadzona w Europie dyrektywa 97/68/EC), a nie normy EURO (dyrektywa 91/441/EC) dotyczącej zdecydowanie największej liczby samochodów codziennego użytku, osobowych i ciężarowych. Mimo że w wymaganiach taktyczno-technicznych dla pojazdów wojskowych o wysokiej mobilności lub pojazdów inżynierskich w dalszym ciągu obowiązuje norma EURO 3, to bardziej zasadne wydawałoby się rozważyć stosowanie normy z poziomami STAGE, ze względu na wyrażenie dopuszczalnych poziomów emisji zanieczyszczeń w odniesieniu do kWh, co bardziej odpowiada rzeczywistym warunkom pracy pojazdów.



Rys. 1. Porównanie norm emisji spalin dla pojazdów użytkowych w okresie od 1996 r. do 2015 r. [3]

W pamięci układów sterujących silnikami i całymi zespołami napędowymi zapisanych jest wiele danych, na podstawie których, w zależności od informacji o stanie pracy silnika (dane z czujników), aktywowane są zespoły wykonawcze (wtryskiwacze, zawory itp.). Są one często wizualizowane podczas pracy nad zmianami w oprogramowaniu silników w postaci graficznych zależności tzw. „map”. Są one najczęściej prezentowane w trójwymiarowym układzie współrzędnych, z których dwa wymiary to moment obrotowy i prędkość obrotowa silnika (pole pracy silnika), a wymiarem trzecim jest nastawa zespołu wykonawczego układu. Dane te nie są na ogół prostymi i gładkimi funkcjami matematycznymi, a ich kształt i forma dobierane są eksperymentalnie. Jest to znacząca przewaga nad regulatorami mechanicznymi lub pneumatycznymi, które mimo często skomplikowanej budowy i wrażliwości na zużywanie się elementów mechanicznych, a także występowaniu luzów, pozwalały tylko na przybliżoną realizację prostych funkcji sterowania (np. korekta maksymalnej dawki paliwa bądź ograniczenie prędkości obrotowej silnika).

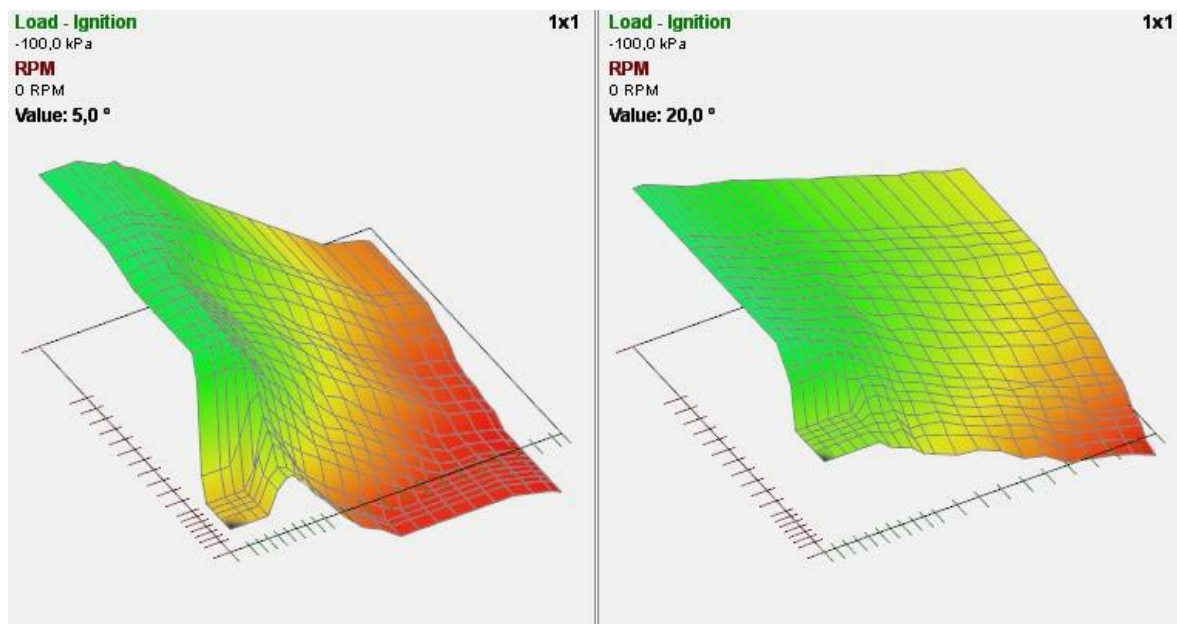
Elektroniczne układy sterowania umożliwiają jednocześnie wiele funkcji, które z jednej strony pozwalają na zachowanie odpowiedniego poziomu emisji zanieczyszczeń i zużycia paliwa, a z drugiej na rozwijanie odpowiedniej mocy znamionowej lub momentu obrotowego. Przykład takiej mapy sterowania silnikiem pokazano na rysunku 2. Na lewym rysunku widoczna jest tabela optymalnych wartości, na prawym pokazano wizualizację graficzną tej powierzchni (jest to skan z programu specjalistycznego, gdzie stosowane są oznaczenia: LOAD/obciążenie, RPM/obr/min, AFR/skład mieszanki wyrażony stosunkiem powietrza do paliwa).



Rys. 2. Charakterystyka optymalnego stosunku powietrza do paliwa dla silnika o zapłonie iskrowym w zależności od obciążenia i prędkości obrotowej silnika (AFR = 14,7 odpowiada $\lambda=1$)

Dane pokazane na rysunku 2 pochodzą z silnika o zapłonie iskrowym o objętości skokowej 2000 cm³ stosowanego w pojeździe osobowym. Analizując te dane, można zauważyć, że konstruktor zakłada pracę silnika na mieszance stechiometrycznej (tzn. współczynnik nadmiaru powietrza do paliwa Air Fuel Ratio (ARF) = 14,7 co odpowiada $\lambda=1$) jedynie dla częściowego obciążenia silnika. W zakresie prędkości obrotowej silnika do około 5000 obr./min i maksymalnego obciążenia silnika do ok. 70% momentu maksymalnego sterownik zapewnia stechiometryczny skład mieszanki, co jest wymagane dla prawidłowej pracy trójfunkcyjnego reaktora katalitycznego. Powyżej tych wartości następuje wzbogacenie mieszanki, przez co chwilowo wzrasta poziom emisji szkodliwych składników spalin, ale jednocześnie uzyskiwana jest wyższa moc.

Bardziej zaawansowane sterowania występują w pojazdach sportowych, które mają możliwość pracy na różnych programach mocy. Zmianie ulega wtedy wiele czynników wpływających na pracę silnika (zamiana map). Na rysunku 3 pokazano przykładowo mapy sterowania kątem wyprzedzenia zapłonu tego samego silnika pojazdu sportowego, pozwalającego na uzyskanie mocy maksymalnej odpowiednio 206 kW i 309 kW.



Rys. 3. Porównanie mapy zapłonu (kąta wyprzedzenia zapłonu w funkcji obciążenia i prędkości obrotowej silnika 4G63T o mocy znamionowej 206 kW i 309 kW

Tego typu rozwiązania stosowane są także w pojazdach wojskowych. Przykładem jest kołowy transporter opancerzony Rosomak (rys. 3). Jest on napędzany sześciocylindrowym silnikiem o zapłonie samoczynnym, o objętości skokowej wynoszącej $11,7 \text{ dm}^3$. W zależności od warunków operacyjnych silnik może pracować w dwóch trybach mocy: tzw. bojowej i ekologicznej.

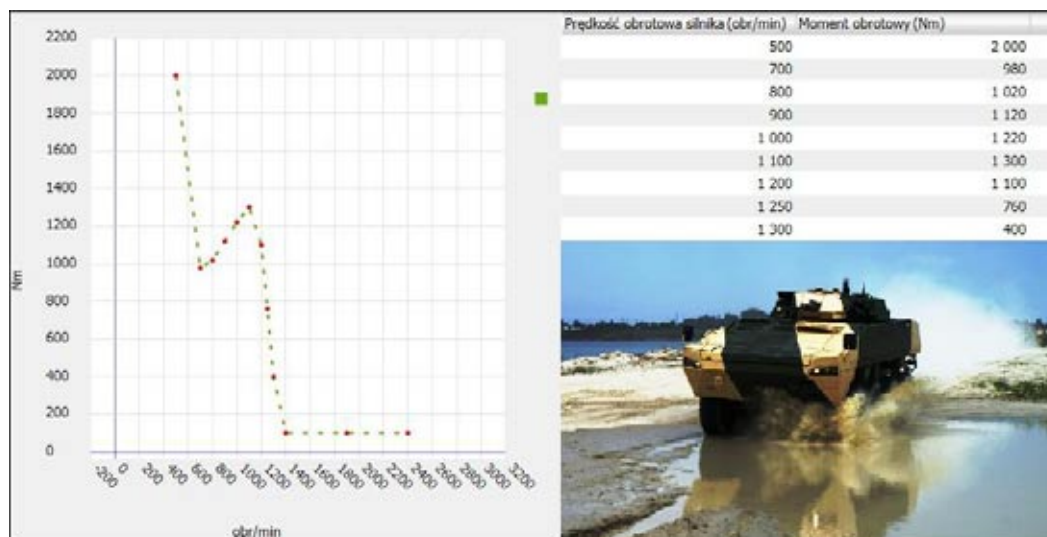
W trybie bojowym, silnik osiąga moc maksymalną 360 kW i maksymalny moment obrotowy $1970 \text{ N}\cdot\text{m}/1500 \text{ obr}/\text{min}$. W trybie podstawowym (ekologicznym), moc zostaje ograniczona do 294 kW i moment obrotowy do $1670 \text{ N}\cdot\text{m}/1500 \text{ obr}/\text{min}$. Przełączanie pomiędzy poszczególnymi trybami pracy następuje poprzez naciśnięcie odpowiedniego przełącznika.



Rys. 4. Kołowy transporter opancerzony Rosomak

Zastosowany system sterowania pozwala na zwiększenie współczynnika mocy do masy pojazdu z około 13 kW/t do blisko 16 kW/t dla wersji bojowej. Zwiększenie mocy znamionowej silnika o ponad 20% przekłada się w praktyce na poprawę osiągnięć pojazdu w warunkach bojowych. W trybie podstawowym, uzyskiwana jest znacząca redukcja poziomu zanieczyszczeń w spalinach kosztem mniejszej mocy maksymalnej [1].

Poza możliwościami ustawiania różnych programów sterowania pracą silnika, niezwykle ważne jest również zapewnienie możliwości pracy silnika w przypadku częściowego uszkodzenia jego osprzętu. Obecnie stosowane systemy sterowania silnikami korzystają z sygnałów pochodzących z dziesiątków czujników i zespołów wykonawczych. O ile w pojazdach cywilnych uszkodzenie nawet mniej istotnego podzespołu może powodować wyłączenie pojazdu z eksploatacji bez żadnych konsekwencji, o tyle pojazdy wojskowe powinny być zdolne do bezpiecznego odjazdu z miejsca zagrożenia nawet kosztem ryzyka uszkodzenia układu napędowego (np. przegrzanie silnika po uszkodzeniu układu chłodzenia). Przykłady powyższych rozwiązań sterownika silnika pojazdu KTO Rosomak przedstawiono na rysunkach 5 i 6. Wyłączone są funkcje sygnalizacji wysokiej temperatury płynu chłodzącego, zwiększone są górne wartości temperatury cieczy chłodzącej, a jednocześnie ograniczona jest prędkość obrotowa i maksymalny moment obrotowy czyli zmniejszona intensywność wydzielania ciepła. Zapewnia to przejazd pojazdu do bezpiecznego miejsca z mniejszą prędkością.



Rys. 5. Funkcja ograniczania momentu obrotowego silnika w stanach awaryjnych

Reakcja w przypadku wysokiej temperatury płynu...			
Wysoka temperatura płynu chłodzącego - ograniczeni...	Aktywne	Aktywne	▼
Wysoka temperatura płynu chłodzącego - wyłączenie...	Nieaktywne	Nieaktywne	▼
Wysoka temperatura płynu chłodzącego - wyłączenie...	Nieaktywne	Nieaktywne	▼
Górna wartość graniczna dla włączenia alarmu spowo...	105	105	▼ ▲ °C
Dolna wartość graniczna dla włączenia alarmu spowo...	104	104	▼ ▲ °C
Reakcja w przypadku niskiego ciśnienia oleju			
<input type="button" value="Wykonaj"/> <input type="button" value="Wyczyść"/> <input type="button" value="Anuluj"/>			

Rys. 6. Funkcja programowania stanów alarmowych temperatury cieczy chłodzącej

Większość zabezpieczeń pojazdu jest niejawna, ale jak pokazano istnieje możliwość kształtowania przez producenta np. poziomów stanów alarmowych lub poziomu zabezpieczeń przed uszkodzeniem w trybach serwisowych (np. wartości ograniczenia momentu obrotowego silnika). Jest to o tyle istotne, że pozwala na zwiększenie możliwości taktycznej pojazdów, w szczególności w warunkach bojowych, gdzie bezpieczeństwo załogi jest dużo ważniejsze od trwałości sprzętu. Zmiany tego typu mogą być dokonywane jedynie przez wysoko wyspecjalizowany personel serwisowy.

3. FUNKCJE SPECJALNE W SERWISOWANIU SILNIKÓW

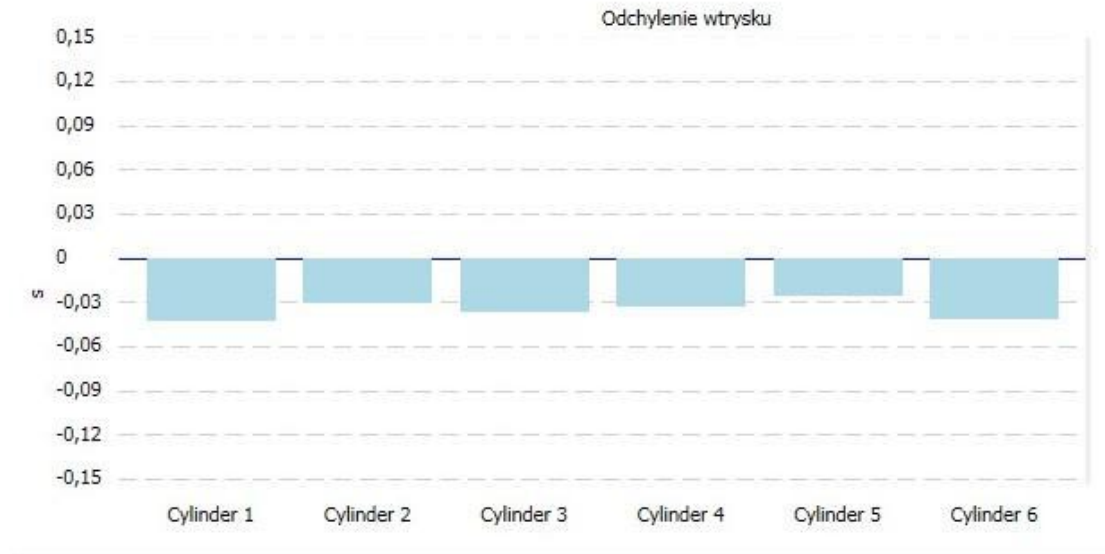
Diagnozowanie elektronicznych układów sterowania silnikami nie ogranicza się do odczytu błędów zapamiętanych w pamięci operacyjnej sterowników. Obecne układy wyposażone są w bardzo silne narzędzia diagnostyczne, które pozwalają na znaczące przyspieszenie procesu diagnozy. Aby korzystać z tych funkcji, konieczne jest wyposażenie jednostek remontowych w specjalistyczne urządzenia diagnostyczne i przeprowadzenie procesu przeszkolenia ich załóg. Przykładem takiego mobilnego centrum naprawy pojazdów wojskowych jest wóz rozpoznania technicznego na podwoziu KTO Rosomak (rys. 7).



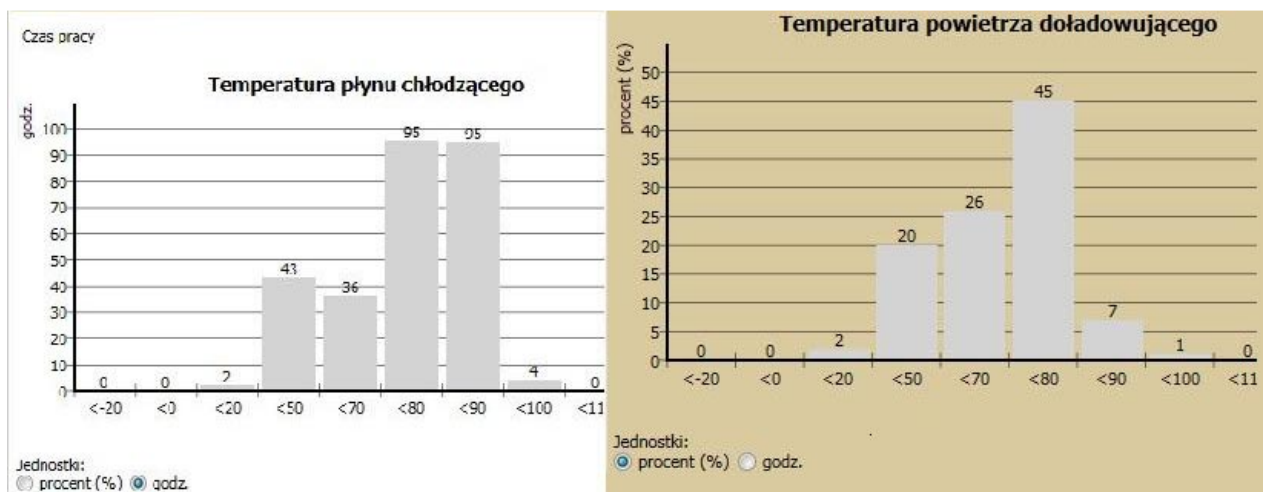
Rys. 7. KTO Rosomak w wersji WRT (Wóz Rozpoznania Technicznego) [4]

Mimo obaw u wielu użytkowników nowoczesnych pojazdów o niezawodność rozbudowanych układów elektronicznych mają one także szereg zalet ułatwiających eksploatację pojazdów. Na przykład funkcje specjalne takich układów pozwalają na wykonanie wielu sprawdzeń stanu technicznego silnika, bez konieczności montowania na nim dodatkowego oprzyrządowania. Przykładem może być pomiar ciśnienia sprężania cylindrów silnika bez konieczności montażu manometrów. Na podstawie aktywowania testerem diagnostycznym specjalnej funkcji, rejestrowana jest chwilowa prędkość poruszania się tłoka. Podobnie, na podstawie odchyłek w sterowaniu poszczególnymi wtryskiwaczami paliwa, możliwa jest wstępna diagnostyka układu paliwowego, bez konieczności demontażu jego poszczególnych elementów i sprawdzania wtryskiwaczy na specjalistycznych stanowiskach [2]. Ma to szczególne znaczenie w przypadku obsługiwanego pojazdu na poligonach i w warunkach bojowych (np. misje), gdzie może wystąpić wiele nieprzewidywanych uszkodzeń pojazdów i ich silników. Wtedy można w bardzo szybki sposób potwierdzić lub wykluczyć usterkę. Funkcje te są aktywowane z poziomu testera diagnostycznego, a cały proces diagnostyczny trwa kilka minut.

Bardzo pomocne są także zapisywane w sterowniku dane dotyczące warunków pracy pojazdu. Na podstawie tych danych może odtworzyć, w jakich warunkach pracował pojazd i jak mogły te warunki wpływać na jego sprawność lub zużycie silnika. Na przykład na rys. 9. przedstawiony jest wykres wartości temperatury powietrza doładowującego oraz cieczy chłodzącej silnik pojazdu KTO Rosomak w czasie jego eksploatacji. Na podstawie tych zarejestrowanych danych pracownicy serwisu mogą dostosować zakres obsługi oraz wykryć przekroczenia parametrów granicznych, które mogą spowodować uszkodzenia podczas eksploatacji pojazdu.

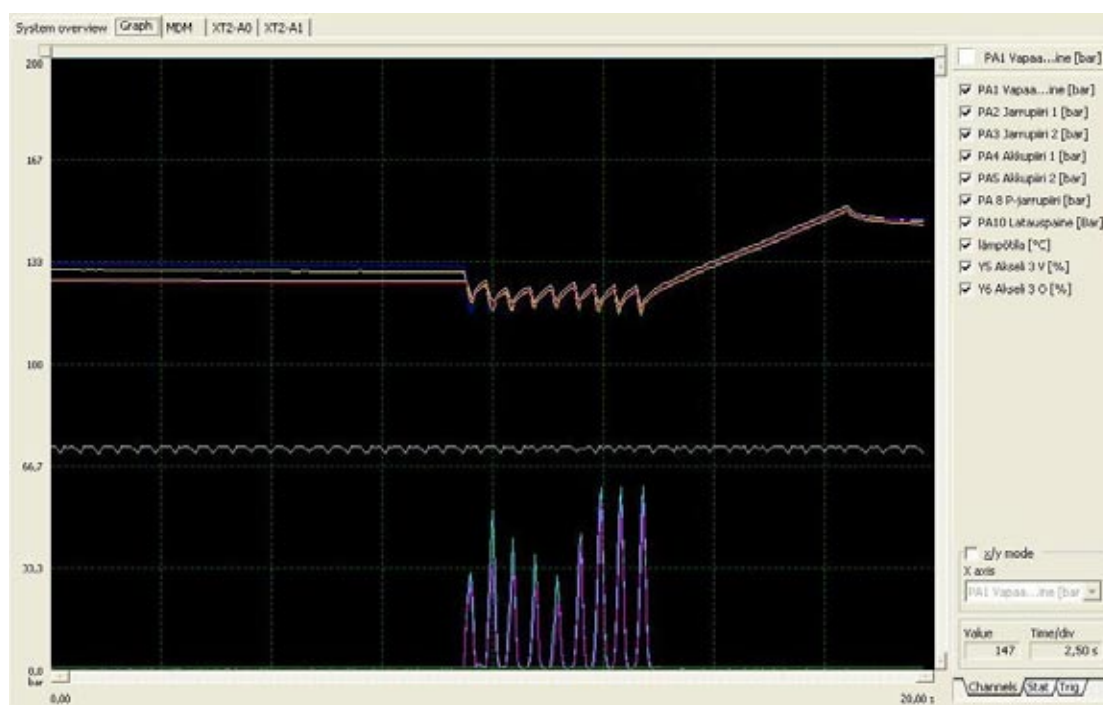


Rys. 8. Widok z programu serwisowego – porównanie odchylenia czasu wtrysku paliwa dla poszczególnych cylindrów



Rys. 9. Wykresy zapisane w pamięci sterownika wybranego pojazdu KTO Rosomak

Bardzo dużo informacji diagnostycznych dostarcza także wbudowana w urządzenia serwisowe funkcja graficznych oscyloskopów, która jest bardzo często pomijana przez mniej doświadczonych techników. Pozwala ona na wizualizację przebiegów sygnałów z poszczególnych czujników w pewnym okresie i porównanie bieżących wartości z przebiegami wzorcowymi (rys. 10). W bardzo prosty sposób można zauważyć brak prawidłowego działania niektórych podzespołów lub elementów (np. zaworu) i podjąć decyzję o jego wymianie, bez prowadzenia dalszych sprawdzeń. Jest to często bardzo ważne w naprawie pojazdu w warunkach misji zagranicznych, gdzie dostęp do specjalistycznych stanowisk jest ograniczony.



Rys. 10. Przebieg sygnałów z zespołów układu hamulcowego podczas próby wydatku (opis kanałów nie jest tłumaczony)

4. WNIOSKI

1. Nowoczesne układy sterowania pracą silników spalinowych dają szerokie możliwości kształtowania ich charakterystyk i sprawdzania stanu technicznego. W artykule opisano jedynie wybrane możliwości tego typu. Funkcje elektronicznych układów sterowania pozwalają na usprawnienie diagnostyki oraz jej skrócenie, co w warunkach misji wojskowej nabiera kluczowego znaczenia. Rozwiązania te wymagają odpowiednio wysokiego poziomu wyszkolenia załogi i techników zajmujących się obsługiwaniem pojazdów.
2. Obecnie użytkowane w wojsku pojazdy o wysokiej mobilności przewidują eksploatację w warunkach częściowego uszkodzenia osprzętu silnika i pojazdu (np. KTO Rosomak) z jednoczesnym przestrzeganiem określonych procedur postępowania.
3. Wymagania na pojazdy wojskowe często opisują zagadnienia związane z eksploatacją w stanach zagrożenia w sposób nie do końca precyzyjny. Ma to szczególne znaczenie w dobie rozwoju coraz bardziej zaawansowanej broni wykorzystującej na przykład impuls elektromagnetyczny, którego celem jest zniszczenie podzespołów elektroniki pojazdów przeciwnika.

5. LITERATURA

- [1] J. Merkisz, I. Pielecha, J. Pielecha, M. Szukalski „Emisja spalin z wozów bojowych Rosomak w warunkach poligonowych” Zeszyty Naukowe Marynarki Wojennej ROK LII nr 1 (184), 2011.
- [2] M. Karczewski, L. Szczęch, J. Walentynowicz „Diagnozowanie zintegrowanego zespołu napędowego KTO Rosomak” Zeszyty Naukowe WSOWL Nr 2 (168) 2013.
- [3] https://www.deere.com/en_US/media/images/services_and_support/emissions_information/understanding_emission_regulations/epa_eu_nonroad_chart_950x505.jpg, [dostęp: 16.02.2016 r.].
- [4] <http://www.altair.com.pl/files/news/photos/13/13786/ros-wrt2.jpg>, [dostęp: 16.02.2016 r.].

ELECTRONIC CONTROL SYSTEMS OF INTERNAL COMBUSTION ENGINES WITH RESPECT TO THE IMPLEMENTATION OF SPECIAL FUNCTIONS IN MILITARY VEHICLE

Abstract. Modern systems that control the operation of internal combustion engines provide many possibilities of shaping the characteristics of such engines. Additional special functions extend the technical capabilities of a vehicle, particularly under extreme conditions. Such functions also facilitate and improve the diagnostics of the engine and the power train. These systems have to be resistant to the increasingly advanced weapons which, for instance, make use of an electromagnetic impulse to destroy the electronics of enemy vehicles.

Keywords: military vehicles, internal combustion engines, control.