

Michał FILIPIAK*
Jarosław JAJCZYK*

BADANIE UKŁADU TURBODOŁADOWANIA W SILNIKACH SPALINOWYCH ZS

W artykule przedstawiono budowę układu turbodoładowania silników spalinowych. Szczególną uwagę zwrócono na opis budowy turbosprężarki. Opiszano najważniejsze czujniki (czujnik ciśnienia doładowania oraz przepływomierz powietrza) i elementy wykonawcze sterujące kierownicami spalin w turbosprężarce. Wskazano możliwe awarie, które występują w układach turbodoładowania silników spalinowych oraz kroki, jakie należy podjąć w celu przeprowadzenia diagnostyki układu. W ostatniej części pracy przeprowadzono badania w warunkach pełnego obciążenia silnika. Badania wykonano dla dwóch silników turbodoładowanych.

SŁOWA KLUCZOWE: silnik turbodoładowany, turbosprężarka, przepływomierz powietrza, czujnik ciśnienia, diagnostyka silnika

1. WSTĘP

Rozwój turbosprężarek w motoryzacji rozpoczął się w tym samym czasie co rozwój silników spalinowych. Już w roku 1885 Gottlieb Daimler, konstruktor silnika spalinowego o zapłonie iskrowym a w 1896 Rudolf Diesel, wynalazca silnika o zapłonie samoczynnym, rozważali sposoby podwyższenia mocy i zmniejszenia zużycia paliwa. Brano pod uwagę podniesienie mocy przez wstępne zwiększenie ciśnienia powietrza. Za wynalazcę turbosprężarki uznaje się szwajcarskiego wynalazcę Alfreda Büchi. W 1905 roku opisał on w patencie budowę oraz zasadę działania turbiny napędzanej gazami spalinowymi. W 1925 roku jako pierwszy połączył turbosprężarkę z układem wydechowym silnika osiągając 40% wzrost mocy. Pierwsze silniki turbodoładowane były stosowane dla silników o dużych pojemnościach.

W ostatnich latach zauważa się trend do zmniejszania pojemności silników spalinowych z jednoczesnym utrzymaniem lub zwiększaniem mocy silnika. Możliwe jest to m.in. poprzez zastosowanie turbosprężarek. Głównym celem tego zabiegu jest zmniejszenie zużycia paliwa, co skutkuje mniejszym zanie-

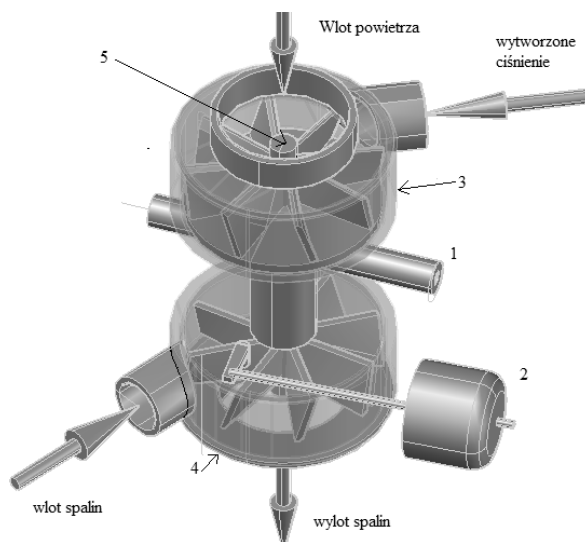
* Politechnika Poznańska.

czyszczeniem środowiska naturalnego. Największą popularność turbosprężarki zyskały w samochodach z silnikami o zapłonie samoczynnym. Poza zwiększeniem mocy uzyskuje się również zwiększenie prędkości obrotowej silnika. Turbosprężarki w silnikach o zapłonie iskrowym zostały wprowadzone do produkcji seryjnej około 10 lat temu.

Wprowadzenie turbosprężarek do pojazdów ma niestety również pewne wady. Silnik jest wyposażony w dodatkowe układy sterowania i regulacji, co w przypadku awarii generuje dodatkowe koszty naprawy. Turbosprężarka jest urządzeniem precyzyjnym pracującym w ekstremalnych warunkach. Jest narażona na wysokie temperatury gazów spalinowych i wytwarza wysokie ciśnienie. Niewłaściwa eksploatacja lub zastosowanie niewłaściwych środków smarowania może powodować wystąpienie usterki.

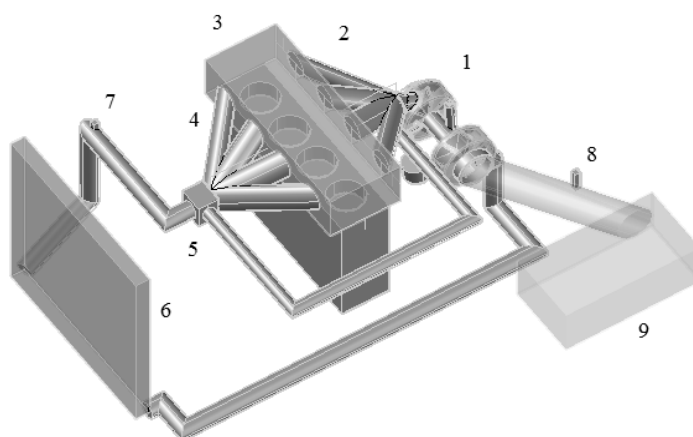
2. BUDOWA UKŁADU DOŁADOWANIA

Silniki turbodoładowane posiadają turbosprężarkę (rys. 1) zamontowaną w kolektorze dolotowym. Wirnik turbosprężarki jest napędzany przez gazy spalinowe odprowadzane z silnika przez kolektor wydechowy. Prędkość obrotowa wirnika mieści się w zakresie od około 100 do 300 tys. obr/min (w samochodach o sportowych osiąгах). Regulacja ciśnienia doładowania jest realizowana za pomocą siłownika (membranowego lub elektrycznego), który steruje kierownicami spalin. Spotyka się również starsze rozwiązania z zaworem upustowym [3, 4].



Rys. 1. Budowa turbosprężarki: 1 – króciec doprowadzenia oleju, 2 – siłownik membranowy, 3 – sprężarka, 4 – turbina, 5 – wirnik

Układ turbodoładowania silnika składa się z kilku głównych elementów przedstawionych na rysunku 2. Masa zasysanego poprzez filtr powietrza jest określana z wykorzystaniem przepływomierza. Sprężone w turbosprężarce powietrze ma podwyższoną temperaturę i objętość dlatego jest schładzane w chłodnicy (intercooler). Po schłodzeniu i określaniu ciśnienia doładowania powietrze jest doprowadzane kolektorem dolotowym do cylindrów silnika. W kolektorze dolotowym umiejscowiony jest również zawór EGR pozwalający na realizację recyrkulacji spalin [2].



Rys. 2. Budowa układu turbodoładowania: 1 – turbosprężarka, 2 – kolektor wydechowy, 3 – silnik, 4 – kolektor dolotowy, 5 – zawór recyrkulacji spalin (EGR), 6 – intercooler, 7 – czujnik ciśnienia, 8 – przepływomierz powietrza, 9 – filtr powietrza

Po uruchomieniu silnika kierownice spalin w turbinie zostają maksymalnie wystawione w celu nakierowania spalin na łopatki wirnika. W fazie przyspieszania siłownik (membranowy lub elektromagnetyczny) odpowiednio steruje dopływ spalin do wirnika ograniczając jego obroty, a tym samym ciśnienie doładowania. Niedopuszczalne jest przekroczenia ciśnienia ponad zadane. W przypadku awarii układu sterowania kierownice są całkowicie otwarte przekierowując dopływ spalin do rury wydechowej. W przypadku turbosprężarek z zaworem upustowym spaliny wychodzące z kolektora wydechowego przy zamkniętym zaworze upustowym są przekierowane bezpośrednio na turbinę. W fazie ograniczenia ciśnienia zawór upustowy otwiera się a w wyniku tego spaliny są odprowadzane do rury wydechowej.

W układzie doładowania powietrza może dojść do wielu awarii, m.in. takich jak:

- nieszczelność w układzie wysokiego ciśnienia,

- nieszczelność w układzie recyrkulacji spalin (EGR),
- awaria siłownika membranowego lub elektrycznego,
- awaria w układzie sterowania siłownika membranowego,
- błędne wskazania czujnika ciśnienia doładowania,
- błędne wskazania przepływomierza powietrza,
- brak dopływu powietrza do silnika (zabrudzony filtr powietrza),
- nieprawidłowe wyregulowanie kierownic spalin.

Działanie układu można skontrolować poprzez odczyt informacji z dwóch podstawowych czujników. Są nimi czujnik ciśnienia doładowania oraz przepływomierz powietrza. W nowszych rozwiązaniach stosuje się ponad to czujnik położenia siłownika podciśnieniowego, czujnik stopnia otwarcia zaworu recyrkulacji spalin oraz czujnik prędkości obrotowej wirnika turbiny.

Czujniki ciśnienia dzielą się na czujniki pomiaru bezpośredniego oraz pośredniego. Do pomiaru bardzo wysokich ciśnień (większych od 1000 MPa) stosowane są rezystory, których rezystancja jest zależna od ciśnienia (efekt objętościowy – pomiar bezpośredni). Do pomiaru ciśnień o mniejszej wartości stosuje się czujniki przeponowe, pojemnościowe lub tensometryczne (pomiar pośredni). Najbardziej rozpowszechnione są czujniki przeponowe, które mierzą ciśnienie za pomocą czujnika siły lub czujnika odkształceń [1, 6].

Przepływomierze służą do pomiaru masy przepływającego powietrza i są najbardziej precyzyjnymi czujnikami zastosowanymi w pojazdach. W procesie spalania stosunek masowy powietrza i paliwa odgrywa istotną rolę. W silnikach o zapłonie iskrowym wartość zmierzona przez przepływomierz jest miarą obciążenia silnika natomiast w silnikach wysokoprężnych strumień powietrza jest regulowany za pomocą zaworu recyrkulacji spalin. Wyróżniamy przepływomierze spiętrzające (objętościowe – obecnie rzadko stosowane) oraz przepływomierze z gorącym elementem (drutem lub płytką). Zakres mierzonej maksymalnej masy powietrza zależny jest od mocy silnika i wynosi około 250÷1200 kg/h. Dokładność pomiaru wynosi ok. 1÷2%. Daje to przy stosunku około 1:100 minimalnego do maksymalnego przepływu powietrza dokładność rzędu $2 \cdot 10^{-4}$ mg/skok tłoka [1, 9, 10].

3. DIAGNOSTYKA UKŁADU

Usterka w działaniu układu doładowania silnika powoduje występowanie niesprawności, które mogą objawiać się m.in. ograniczeniem mocy, niestabilną pracą i często sygnalizowane są lampką kontrolną awarii (MIL – ang. *Malfunction Indicator Lamp*). Diagnozę rozpoczyna się od sprawdzenia czy jest to niesprawność stała czy tymczasowa. W kolejnym kroku należy sprawdzić stan filtra powietrza i dokonać oględzin układu dolotowego w poszukiwaniu nieszczelności (wypiętych lub pękniętych rur). Kolejnym krokiem jest sprawdzenie

działania układu sterowania kierownic spaliny. Po uruchomieniu silnika siłownik membranowy powinien zmienić swoje położenie w stosunku do stanu początkowego (powinien się wciągnąć lub wysunąć). Po wyłączeniu silnika siłownik powinien wrócić do stanu początkowego. Należy również sprawdzić kody błędów zapisane w pamięci sterownika silnika. W przypadku stwierdzenia błędów należy przywrócić sprawność uszkodzonych elementów. Nieodczoną operacją jest wykonanie testu elementów wykonawczych. Zbadać należy zawór EGR (jednocześnie odczytując masę przepływającego powietrza) oraz siłownik membranowy (obserwując ciśnienie doładowania silnika).

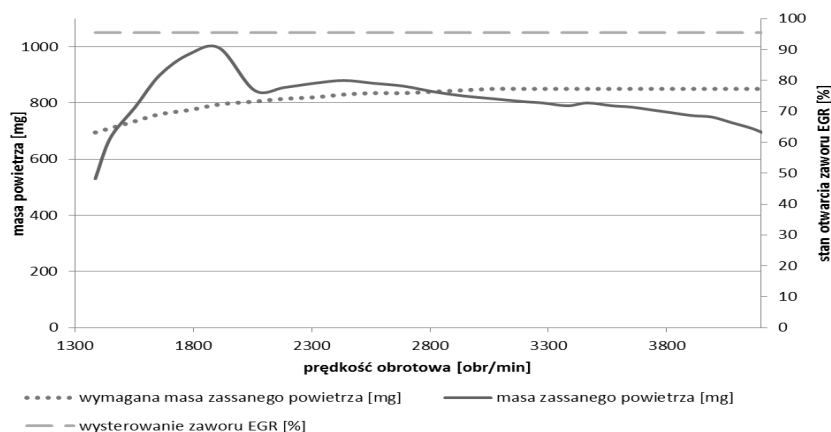
Kolejnym krokiem pozwalającym na zlokalizowane usterki jest przeprowadzenie badań diagnostycznych w warunkach rzeczywistych (test dynamiczny). W tym teście określa się charakterystykę pracy turbosprężarki w funkcji prędkości obrotowej. Po osiągnięciu przez silnik temperatury pracy (zazwyczaj ok. 90°C) przeprowadza się rejestrację ciśnienia doładowania przy maksymalnym obciążeniu silnika. Wykonanie tej procedury wymaga użycia specjalistycznego diagnostyki [5,7,8] umożliwiającego rejestrację w czasie parametrów rzeczywistych silnika. Jeśli ciśnienie w początkowej fazie przyspieszania jest zaniżone świadczy to o nieszczelności w układzie dolotowym, nieprawidłowym sterowaniu turbosprężarki lub nieprawidłowym działaniu przepływomierza powietrza. W przypadku wystąpienia zawyżenia ciśnienia powyżej prędkości obrotowej około 2000 obr/min, mamy do czynienia z tzw. „przeładowaniem turbiny”, co może doprowadzić do jej uszkodzenia. Przyczyną tego stanu może być awaria w układzie sterowania kierownicami spaliny (zacinanie się siłownika).

4. BADANIA UKŁADU TURBOSPŘĘŻARKI

Badania układu sprężania zostały przeprowadzone na przykładzie dwóch modeli silników wysokoprężnych o mocy 105 i 170 KM. W każdym z tych silników były zastosowane turbosprężarki ze zmienną geometrią (VTG – ang. *Variable Turbo Geometry*). Badania miały na celu porównanie wartości zadanych przez układ sterowania silnikiem z wartościami zmierzonymi przez czujniki. Badania przedstawiają próby dynamiczne przeprowadzone na maksymalnym przyspieszaniu.

a) Silnik 1.9 TDI (105 KM)

Pierwsze badania, które przeprowadzono dotyczyły silnika 1.9 TDI o mocy 105 KM. Podczas próby silnik obciążono maksymalnym momentem. Zarejestrowane przebiegi przedstawiono na rysunkach 3 i 4.



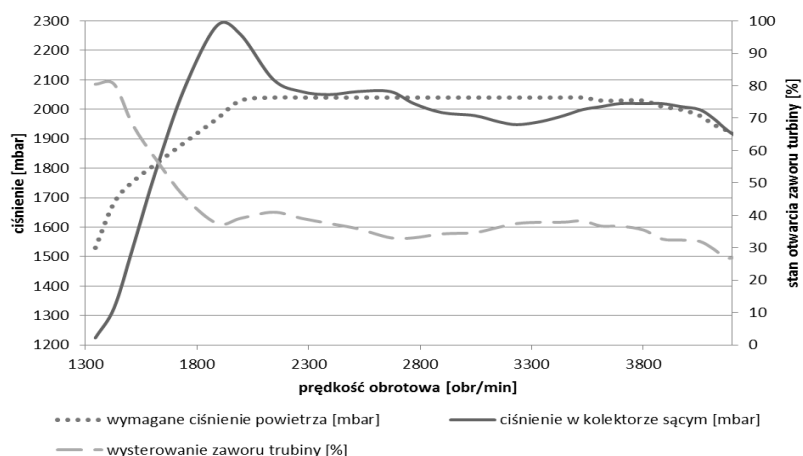
Rys. 3. Masa zassanego powietrza na skok tłoka i stopień zamknięcia zaworu EGR w funkcji prędkości obrotowej w silniku 1.9 TDI

Podczas próby zawór EGR był wysterowany na poziomie 95% (rys. 3). Oznacza to maksymalne zamknięcie zaworu i świadczy o dostarczaniu do cylindrów powietrza bez recyrkulacji spalin. Pozostałe dwa przebiegi przedstawiają wartość masy powietrza przypadającą na skok tłoka. Jeden przebieg przedstawia wartość zadaną przez sterownik silnika, której osiągnięcie jest wymagane do uzyskania maksymalnego momentu. Drugi przebieg przedstawia masę powietrza dostarczoną do silnika zmierzoną za pomocą przepływomierza powietrza. Mniejsza wartość masy powietrza zassanej od wartości zadanej może powodować dymienie silnika i skutkować ograniczeniem mocy.

Początkowe przekroczenie wartości zadanej jest spowodowane przez gwałtowne natarcie gazów wylotowych na wirnik turbiny. Sytuacja ta nie kwalifikuje się do stwierdzenia błędu w pracy silnika, ale niebezpiecznie zbliża się do granicy przeładowania (przekroczenie dopuszczalnego ciśnienia w kolektorze dolotowym). W idealnych warunkach wartość zmierzona powinna oscylować wokół wartości zadanej, lecz w warunkach rzeczywistych wiele elementów wykonawczych ma wpływ na sterowanie (np. stan zaworu sterującego siłownikiem membranowym czy pompy podciśnieniowej, której wydajność decyduje o dynamice zadziałania siłownika). Przy prędkości ok. 2000 obr/min zaobserwowano ograniczenie masy zasysanego powietrza (zmiana położenia kierownic spalin w turbosprężarce).

Na rysunku 4 przedstawiono przebiegi procentowego wysterowania turbosprężarki oraz zadanego i zmierzonego ciśnienia doładowania. Przebiegi te zarejestrowano równocześnie z przebiegami zamieszczonymi na rysunku 3. Można zauważyć, że wskaźnik wysterowania zaworu turbosprężarki początkowo był całkowicie otwarty. Oznacza to, że kierownice turbosprężarki ustawione były

tak, aby strumień gazów wylotowych maksymalnie napędzał wirnik turbosprężarki. Wraz ze wzrostem prędkości obrotowej rośnie prędkość spalin i pomimo wzrostu wymaganego ciśnienia zmniejszeniu ulega wysterowanie zaworu turbiny, a przez to ograniczenie ciśnienia doładowania.



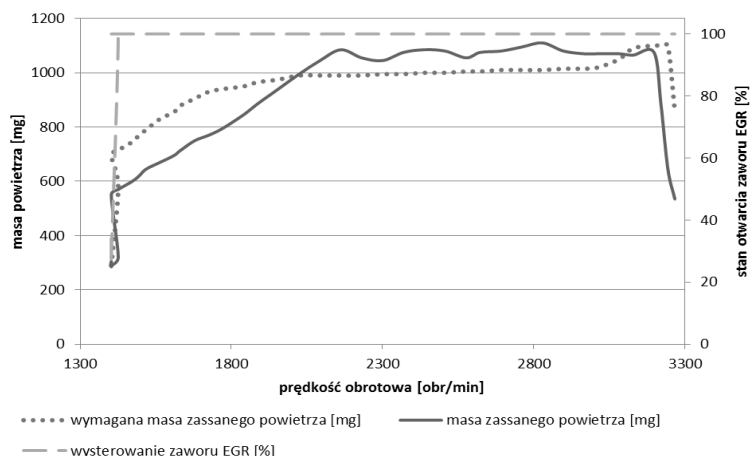
Rys. 4. Ciśnienie doładowania i stopień otwarcia zaworu regulacji kierownic spalin w funkcji prędkości obrotowej w silniku 1.9 TDI

Od prędkości około 2000 obr/min następuje ograniczenie wartości wymaganego ciśnienia do wartości około 2050 mbar. W dalszej części przebiegu zauważa się, że dzięki skutecznej regulacji wysterowaniem zaworu turbosprężarki uzyskano w kolektorze dolotowym wartość ciśnienia doładowania na wymaganym poziomie. Porównując przebieg można zaobserwować, że zmiana wysterowania zaworu turbiny skutkuje z pewnym opóźnieniem zmianami w przebiegu ciśnienia w kolektorze ssącym.

b) Silnik 2.0 TDI (170 KM)

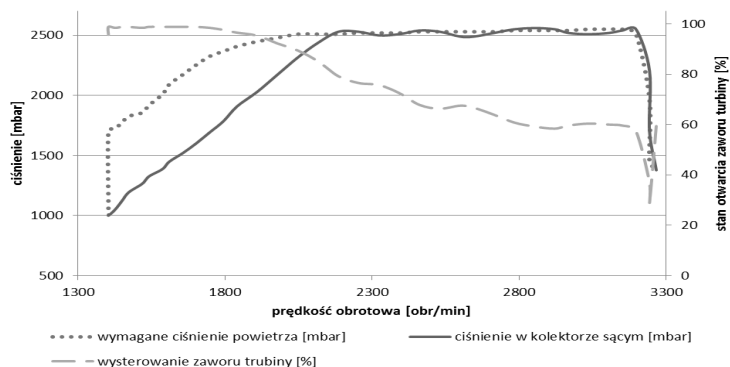
Drugim badanym obiektem był silnik 2.0 TDI 170 KM (większa pojemność i moc silnika). Pomiary, które wykonano przebiegały w podobny sposób jak w pierwszym przypadku. Na rysunku 5 przedstawiono zarejestrowane przebiegi wysterowania zaworu EGR oraz zadanego i zmierzonego wydatku powietrza.

W momencie zadania wysokiego momentu obrotowego (początek rejestracji sygnałów) następuje gwałtowne zamknięcie zaworu EGR w celu umożliwienia dostarczenia do silnika czystego powietrza. W czasie przyspieszania do prędkości ok. 2000 obr/min zaobserwowano niewystarczającą wartość zasysanego powietrza w stosunku do wartości wymaganej (rys. 5).



Rys. 5. Masa zassanego powietrza na skok tłoka i stopień zamknięcia zaworu EGR w funkcji prędkości obrotowej w silniku 2.0 TDI

Zbyt mała wartość dostarczonego powietrza skutkuje zaniżonym ciśnieniem doładowania w stosunku do wymaganego, pomimo maksymalnego iysterowania kierownic turbosprężarki (rys. 6). Od prędkości około 2000 obr/min zauważyć można zbliżanie się do siebie przebiegów wydatku powietrza zadanego i zmierzonego (rys. 5) oraz ciśnienia zadanego i zmierzonego (rys. 6). Jednocześnie następuje zamykanie zaworu turbosprężarki mające na celu ograniczenie wydatku powietrza. Przy prędkości około 2200 obr/min następuje zrównanie ciśnienia zmierzonego z zadaniem. W dalszej części przebiegu ciśnienia doładowania oscyluje wokół wartości zadanej co oznacza, że układ sterowania bardzo dobrze reguluje dopływ spalin do wirnika turbosprężarki.



Rys. 6. Ciśnienie doładowania i stopień otwarcia zaworu regulacji kierownic spalin w funkcji prędkości obrotowej w silniku 2.0 TDI

Pomimo występowania w początkowej fazie przyspieszania (do około 2000 obr/min) rozbieżności pomiędzy zadanymi a zmierzonymi wartościami przepływu powietrza i ciśnienia sterownik silnika nie wykrył usterki w układzie i nie wygenerował błędu.

5. PODSUMOWANIE

Silniki turbodoładowane w dzisiejszych czasach są bardzo popularne zarówno w pojazdach o zapłonie samoczynnym jak i iskrowym. Poprawnie działający układ dostarcza wiele korzyści zarówno ekonomicznych jak i ekologicznych. Silniki turbodoładowane charakteryzują się większym momentem obrotowym i mocą z jednoczesnym ograniczeniem zużycia paliwa. Z tego powodu w ostatnich latach zaczęto stosować seryjnie w niektórych markach pojazdów turbosprężarki w silnikach benzynowych.

Diagnostyka układu turbodoładowania jest istotnym elementem w procesie naprawy układu. Ze względu na skomplikowaną budowę układu sterowania, powiązanego z wieloma układami, do prawidłowej diagnostyki wymaga się odpowiedniej wiedzy oraz sprzętu diagnostycznego. Występujące chwilowe braki mocy silnika powracające po ponownym rozruchu silnika lub pojawiające się syczenie z okolic silnika jest jednym z objawów niesprawności w układzie. Większym problemem dla użytkowników silników turbodoładowanych stają się wycieki oleju ze zużytych uszczelnień wirnika lub odpowietrznika silnika (tzw. odma) doprowadzające do powstawania osadu na zaworze recyrkulacji spalin powodując jego niepoprawną pracę.

Poprawnie przeprowadzona diagnostyka układu daje jednoznaczne wyniki odnośnie działania elementów wykonawczych. Odczytana ilość pobranego powietrza i wytworzonego ciśnienia doładowania w próbie dynamicznej pozwala na określenie przyczyn powstania awarii w układzie. Do prawidłowego zdiagnozowania silnika niezbędne są m.in. informacje o zakresach pomiarowych badanych elementów. Niestety w niektórych przypadkach sama diagnoza nie wystarcza. Czasami niezbędne jest wymontowanie elementów wykonawczych i sprawdzenie ich działania poza pojazdem. W takim przypadku należy wziąć pod uwagę warunki panujące w czasie jazdy. Bardzo dużą rolę mogą odgrywać ekstremalne warunki, które w dużej mierze zależą od temperatury.

Wyniki przeprowadzonych w pracy badań podczas dynamicznego przyspieszania wykazały w obu przypadkach niewielkie rozbieżności pomiędzy wartościami oczekiwanymi zaprogramowanymi w pamięci sterownika a wartościami zmierzonymi. Zwłaszcza w początkowej fazie przyspieszania (do około 2000 obr/min) zaobserwowano zaniżone wartości wydatku powietrza oraz ciśnienia w kolektorze ssącym. Może to świadczyć o pewnym stopniu zużycia badanych układów. Jednak, pomimo stwierdzenia tych rozbieżności, jednostki sterujące pracą silnika nie wykryły tych sytuacji jako usterek w układzie sterowania doładowaniem.

LITERATURA

- [1] Bosch Team, Czujniki w pojazdach samochodowych, Informator Techniczny Bosch, Wydawnictwa Komunikacji i Łączności, Warszawa 2014.
- [2] Bosch Team, Układy wtryskowe Unit Injector System/Unit Pump System (UIS/UPS), Informator Techniczny Bosch, Wydawnictwa Komunikacji i Łączności, Warszawa 2014.
- [3] Bosch Team, Sterowanie silników o zapłonie iskrowym. Zasada działania. Podzespoły, Informator Techniczny Bosch, Wydawnictwa Komunikacji i Łączności, Warszawa 2013.
- [4] Bosch Team, Sterowanie silników o zapłonie samoczynnym, Informator Techniczny Bosch, Wydawnictwa Komunikacji i Łączności, Warszawa 2014.
- [5] Filipiak M., Jajczyk J., Nawrowski R., Putz Ł.: Urządzenia diagnostyczne w pojazdach samochodowych, Poznan University of Technology Electrical Engineering Academic Journals, zeszyt 69, Poznań, kwiecień 2012, s. 227–234.
- [6] Herner A., Riehl H.J., Elektrotechnika i elektronika w pojazdach samochodowych, Wydawnictwa Komunikacji i Łączności, Warszawa 2002.
- [7] KTS 570 User Manual.
- [8] Myszkowski S., Poradnik serwisowy. Diagnostyka pokładowa. Standard OBD II/EODB, Instalator Polski, Warszawa 5/2003.
- [9] Sitek K., Syta S., Pojazdy samochodowe. Badania stanowiskowe i diagnostyka, Wydawnictwa Komunikacji i Łączności, Warszawa 2011.
- [10] Trzeciak K., Diagnostyka samochodów osobowych, Wydawnictwa Komunikacji i Łączności, Warszawa 2010.

TESTING THE TURBOCHARGED ENGINE SYSTEM IN INTERNAL COMBUSTION ENGINES CI

The article presents the construction of a turbo engines. Particular attention was paid to the description of the construction of the turbocharger. Describes the most important sensors (sensor boost pressure and air flow) and actuators control series of movable vanes exhaust gas turbocharger. It indicated possible failures that occur in turbocharging systems of internal combustion engines and the steps to be taken in order to perform system diagnostics. In the last part of the work carried out tests under full load. The study was performed for two turbocharged engines

(Received: 12. 02. 2017, revised: 27. 02. 2017)