

## Selected problems of adaptation car diesel engine for dual fuel supplying

*The paper presents the results of work related to the adaptation of the Fiat 1.3 MultiJet engine for dual fuel supplying - compressed natural gas CNG and diesel. The primary objective of this work was to perform research on the effect of a small additive of natural gas for smoke opacity in variable operating conditions of the engine. It required in addition to the construction changes associated with the installation of the gas supply system, the correction parameters of exhaust gas recirculation and air volume. Research was carried out in the operating points characteristic for the NEDC driving test. Selection of measurement points was made by the criterion of the highest share in the NEDC homologation test covering the entire field of engine operation during the performance test on a chassis dynamometer. The studies used the energy share of gas due to gas injector opening time – 2ms. Smoke opacity were analyzed in a mass scale [mg/m<sup>3</sup>].*

Key words: dual-fuel supply, compressed natural gas, share of gas, smoke opacity

### Wybrane problemy adaptacji samochodowego silnika o zapłonie samoczynnym do zasilania dwupaliwowego

*W artykule przedstawiono wyniki prac związanych z adaptacją silnika Fiat 1.3 MultiJet do zasilania dwupaliwowego – sprężonym gazem ziemnym CNG i olejem napędowym. Podstawowym celem prac była realizacja badań dotyczących wpływu niewielkiego dodatku gazu ziemnego na zadymienie spalin w zmiennych warunkach pracy silnika. Wymagało to oprócz zmian konstrukcyjnych związanych z instalacją systemu zasilania gazem, również korekcy parametrów recyrkulacji spalin i ilości powietrza doprowadzonego do silnika. Badania przeprowadzono w punktach pracy silnika odwzorowujących test jezdny NEDC. Dobór punktów pomiarowych został dokonany wg kryterium największego udziału w teście homologacyjnym NEDC, obejmujących całe pole pracy silnika wykorzystywane przy realizacji testu wykonywanego na hamowni podwozowej. W badaniach stosowano udziały energetyczne gazu w wynikające z czasu otwarcia wtryskiwaczy gazu – 2ms. Analizowano zadymienie spalin w skali masowej [mg/m<sup>3</sup>].*

Słowa kluczowe: dwupaliwowe zasilanie, sprężony gaz ziemny, udział gazu, zadymienie spalin

### 1. Wstęp

Zasilanie dwupaliwowe stosowane jest obecnie w silnikach o zapłonie samoczynnym różnych wielkości i zastosowań [1, 2, 4, 6, 12–14]. W silnikach tych często stosowany jest oryginalny system wtryskowy stosowany przy zasilaniu tradycyjnym, co pozwala na zamienne zasilanie samym olejem napędowym lub dwupaliwowo - gazem i olejem napędowym [3, 7, 15, 16].

Gaz ziemny sprężony CNG może być dostarczany do nowoczesnego silnika ZS dwoma metodami:

- przez wtrysk gazu do kolektora dolotowego - najczęściej wielopunktowy indywidualnie na każdy cylinder (nowoczesne silniki trakcyjne i małe generatorowe),
- wtrysk bezpośredni do komory spalania pozwalający uzyskiwać duże sprawności ogólne silnika i dużą zamienność paliwa ciekłego przez gaz.

Dwupaliwowe silniki ZS wykazują szereg istotnych zalet w stosunku do silników o zapłonie iskrowym zasilanych jednopaliwowo samym gazem: wykazują większą sprawność i mniejszą wrażliwość na skład mieszaniny powietrze – paliwo (zależną również od jakości gazu ziemnego) co w przypadku dużych pojazdów powoduje zmniejszenie kosztów eksploatacji silnika [1, 3, 13, 14]. Do zalet tych silników należy zaliczyć dodatkowo

ograniczenie hałaśliwości pracy i emisji cząstek stałych (również dla dużych udziałów oleju napędowego) [7, 14, 15]. Z tego powodu interesującym zagadnieniem może być zastosowanie tego systemu zasilania dla mniejszych silników ZS, stosowanych w samochodach osobowych, których ilość z uwagi na znaczne nasycenie motoryzacją w Europie jest znacząca. Należy jednak podkreślić, że silniki ZS samochodów osobowych są z reguły bardziej skomplikowane konstrukcyjnie od silników stosowanych w transporcie ciężkim, co nie pozostaje bez wpływu na ich adaptację do zasilania dwupaliwowego.

Mimo zastosowania najnowocześniejszych osiągnięć technologicznych, konstrukcyjnych i elektronicznego sterowania małych silników ZS, występują ciągle problemy spełnienia wymogów w zakresie toksyczności spalin [5, 8–10, 13]. Dotyczy to w głównej mierze emisji cząstek stałych PM. Ograniczenie tej emisji wymusza stosowanie w układach wylotowych systemów filtracji cząstek stałych wychwytyjących cząstki o bardzo małych rozmiarach, stwarzających w eksploatacji istotne opory przepływu i wymagających częstego oczyszczania [5, 9, 10]. W nieustalonych warunkach miejskich, przy krótkich przebiegach i eksploatacji silnika w niskich temperaturach filtry cząstek stałych stwarzają utrudnienia eksploatacyjne i w warunkach krajowych niestety są często usuwane, o

czym świadczą liczne ogłoszenia firm zajmujących się takimi usługami. Samochody pozbawione w ten sposób filtrów cząstek stałych nie spełniają norm toksyczności nie tylko w zakresie cząstek stałych ale również innych składników toksycznych.

Czynniki te ograniczają obecnie dalszy rozwój samochodowych silników o zapłonie samoczynnym i ich maksymalnych parametrów użytkowych, zwłaszcza tych o małych pojemnościach skokowych.

Konieczność spełnienia norm toksyczności spalin w zakresie Euro VI poważnie zwiększa koszty wytwarzania i eksploatacji silników ZS, co niekorzystnie wpływa na zainteresowanie potencjalnych nabywców samochodów z tymi sprawnymi silnikami. Z uwagi na koszty zakupu i eksploatacji istnieje pogląd, że silniki ZS opłacalne są jedynie przy dużych przebiegach rocznych i przewadze eksploatacji pozamiejskiej.

Jednym ze sposobów zmniejszenia emisji PM, może być adaptacja silników ZS do zasilania dwupaliwowego poprzez dodatkowe zasilanie, przykładowo zakresie udziału energetycznego do 30%, gazem ziemnym, czystym metanem, lub też innymi gazami (wodór, LPG) [2, 6, 13, 16]. Szczególnie atrakcyjny wydaje się przy tym gaz ziemny sprężony ze względu na niską cenę (od wielu dekad na całym świecie ponad dwukrotnie niższą w stosunku do paliw ropopochodnych) posiadający dużą zawartość metanu 94÷96%Vol.

Prezentowana praca dotyczy adaptacji seryjnego, samochodowego, doładowanego silnika o zapłonie samoczynnym Fiat 1.3 MJT do zasilania dwupaliwowego CNG, oraz problemów związanych z tym zasilaniem. W adaptowanym silniku zastosowano zaawansowane elektroniczne sterowanie wielu parametrów. W sterowniku silnika zakodowano wyniki wielostronnych i kosztownych badań co pozwala osiągać optymalne parametry użytkowe, ekonomiczne i ekologiczne w zmiennych warunkach obciążenia i prędkości obrotowej. Dlatego ingerencja zewnętrzna przez dodanie strumienia gazu do zasilania nie jest zagadnieniem prostym technicznie.

Z uwagi na powyższe wykonana adaptacja silnika Fiat 1.3 MJT obejmuje nie tylko instalację dodatkowego systemu zasilania gazem CNG, ale również opracowanie metodyki sterowania osprzętem silnika (recyrkulacja, stopień doładowania, zmiany podziału dawki itp.) w warunkach pracy silnika na hamowni doświadczalnej. W czasie prowadzenia badań konieczne jest monitorowanie pracy silnika za pomocą elektronicznych układów śledzących aktualny stan parametrów sterujących, w tym monitorowanie fabrycznego sterownika silnika, monitorowanie procesu wtrysku gazu, oraz monitorowanie w zakresie diagnostyki OBD i CAN. Podstawowe znaczenie ma tutaj monitorowanie parametrów pracy silnika mających najwięk-

szy wpływ na emisję spalin w tym między innymi, stopnia doładowania i udziału recyrkulacji spalin. W związku z powyższym niezbędna staje się kontrola tych dwóch ostatnich parametrów niezależnie od fabrycznego sterownika. Umożliwia to opracowanie procedur strategicznych, operacyjnych i regulacyjnych dotyczących wszystkich zakresów jego pracy i wynikających z zasilania dwupaliwowego. Przedstawione rozwiązania konstrukcyjne dają pogląd odnośnie wymagań dotyczących doboru aparatury zasilającej CNG i określają również wymagania odnośnie sterowników silnika dla użytkowników proponowanego sposobu zasilania.

## 2. Problematyka adaptacji silnika do zasilania dwupaliwowego

Obiektem adaptacji do zasilania dwupaliwowego był silnik o zapłonie samoczynnym FIAT 1.3 MJT z bezpośrednim, wysokociśnieniowym wtryskiem Common Rail drugiej generacji z systemem wielokrotnego wtrysku paliwa tzw. MultiJet. Sterownik centralny dostosowuje w sposób ciągły schemat podziału, ilość wtryskiwanych dawek oraz ilość dostarczanego paliwa na cykl, dla każdego cylindra. Silnik Fiat 1.3 MJT to 4-cylindrowa jednostka w układzie rzędowym, o pojemności skokowej 1248 cm<sup>3</sup>. Układ doładowania wyposażony jest w sprężarkę o zmiennej geometrii Zastosowano chłodzenie powietrza doładowującego. Układ wylotowy silnika wyposażony jest w system recyrkulacji spalin EGR z zaworem sterowanym elektronicznie i chłodzeniem spalin recyrkulowanych. Ich przepływ między kolektorem wylotowym przed turbiną, a kolektorem dolotowym następuje w wyniku różnicy ciśnień. Silnik spełnia limity emisji normy Euro 4, bez stosowania filtra cząstek stałych. W tabeli 1 przedstawiono podstawowe dane techniczne silnika.

Tabela 1. Dane techniczne silnika Fiat 1.3 MJT [17]

Typ silnika	1.3 MJT
Średnica x skok tłoka	69,6 x 82 mm
Pojemność skokowa	1248 cm <sup>3</sup>
Ilość cylindrów	4
Układ cylindrów	rzędowy
Stopień sprężania	18
Moc maksymalna	51 kW przy 4000 obr/min
Moment maksymalny	180 Nm przy 1750 obr/min
Układ wtryskowy	Common Rail
Ilość zaworów na cylinder	4
Typ rozrządu	DOHC
System recyrkulacji spalin	zawór EGR

W przedstawianej adaptacji silnika gaz ziemny CNG traktuje się jako zasilnie paliwem uzupełniającym. Oznacza to, że gaz nie zastępuje w całości

paliwa ciekłego, tak jak to ma miejsce w przypadku gazowych silników o zapłonie iskrowym. W warunkach trakcyjnych ograniczenie dawki oleju napędowego uzyskuje się zwykle za pomocą odpowiednich emulatorów (ciśnienia wtryskiwanego paliwa i/lub położenia pedału gazu). Powoduje to redukcję momentu obrotowego silnika wynikającego z wtrysku oleju napędowego. W celu utrzymania bieżącego obciążenia silnika dozuje się paliwo zastępcze w formie sekwencyjnego wtrysku pośredniego odpowiedniej ilości gazu. W rezultacie prowadzi to do przywrócenia pierwotnej z punktu widzenia mocy charakterystyki silnika (takiej, jak przy zasilaniu wyłącznie olejem napędowym). W warunkach pracy silnika na hamowni silnikowej, gdzie analizuje się dokładnie wybrane punkty pracy silnika i gdzie stosuje się sterowanie hamulca dynamometrycznego nie ma potrzeby stosowania emulacji i manualnie steruje się ilością paliwa zastępczego (CNG). Najważniejsze wymagania wobec urządzeń umożliwiających pośredni wtrysk gazu do silnika (do kolektora dolotowego) są następujące:

- indywidualny wtryskiwacz gazu dla każdego cylindra,
- odpowiednia synchronizacja wtrysku gazu z fazami rozrządu silnika,
- możliwość sterowania wieloma wtryskiwaczami.
- możliwość korekcji dawki wtryskiwanego gazu w funkcji ciśnienia paliwa, położenia pedału przyspiesznika, prędkości obrotowej silnika, ciśnienia powietrza w kolektorze dolotowym oraz temperatury gazu,
- magistrala CAN do połączenia z OBD pojazdu,
- zabezpieczenia przed zbyt wysokimi obrotami silnika, zbyt wysoką temperaturą spalin oraz niekontrolowanym spalaniem stukowym,
- kontrola mocy silnika za pomocą odpowiednich algorytmów sterowania,
- monitorowanie pracy urządzenia,
- łatwość konfiguracji urządzenia.

Osprzęt umożliwiający instalację systemu zasilania produkowany jest przez wielu producentów. Dla niniejszej adaptacji wybrano konfigurację osprzętu zaproponowaną przez firmę EuropeGAS w postaci systemu sekwencyjnego wtrysku gazu Oscar-N Diesel SAS, który jest nowoczesnym i uniwersalnym układem [18]. System ten umożliwia współpracę z każdym rodzajem silnika o zapłonie samoczynnym niezależnie od ilości cylindrów, ich układu, sposobu doprowadzania powietrza czy systemu wtrysku paliwa. Ponadto system ten umożliwia pracę silnika zasilanego gazem ziemnym CNG lub gazem LPG po zastosowaniu odpowiednich elementów składowych [15, 18].

Rysunek 1 przedstawia ideowy schemat montażu, a także elementarne komponenty instalacji dla przykładowego silnika 8 cylindrowego [18].

Adaptacja systemu zasilania z poziomu producenta instalacji gazowej nie wymaga znaczącej ingerencji w osprzęt fabrycznego silnika. Sprowadza się do instalacji dodatkowych przewodów (płyn chłodzący, gaz, powietrze) i przewodów elektrycznych łączących osprzęt instalacji CNG z silnikiem. Poważniejsza ingerencja dotyczyła prototypowego kolektora dolotowego i była związana z montażem wtryskiwaczy gazu, szyny gazowej, przewodów gazowych łączących wtryskiwacz gazu z kanałami zaworów dolotowych na poszczególnych cylindrach oraz dysz gazowych na zakończeniu przewodów. Widok prototypowego kolektora pokazano na rys. 2.

Zastosowano wtryskiwacze firmy Hana typ H2000 z możliwością wymiany średnicy dysz doprowadzających gaz do kolektora dolotowego. Wydatek gazu dobrano tak aby możliwe było zasilanie silnika samym CNG w całym polu jego pracy. Na rys. 3 przedstawiono prototypowy kolektor zamontowany na silniku. Należy podkreślić, że montaż prototypowego kolektora nie zwiększa wymiarów zewnętrznych silnika co nie powinno utrudnić montażu dwupaliwowego silnika w samochodach różnych typów i marek. Wykonanie adaptacji kolektora nie jest trudne technicznie i może być przeprowadzone przez zakłady o średnim poziomie technicznym uprawnione do montażu instalacji CNG.

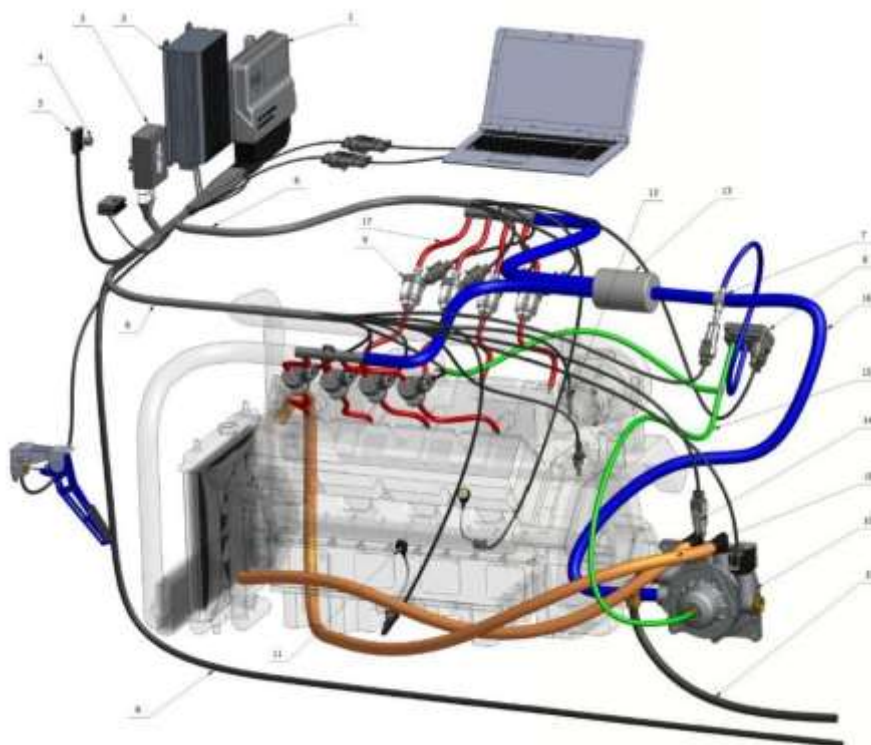
Zastosowany w instalacji gazowej reduktor CNG zapewnia stałe ciśnienie gazu w stosunku do ciśnienia w kolektorze dolotowym oraz wydatek niezależny od obciążenia silnika. Reduktor ogrzewany jest płynem z układu chłodzenia silnika. W instalacji zastosowano dwustopniowy reduktor marki Tomasetto model A12 przewidziany do sekwencyjnego wtrysku gazu ziemnego. Ciśnienie wyjściowe gazu można nastawić w granicach 0,1–0,25 MPa. Maksymalne ciśnienie wejściowe do reduktora wynosi 26 MPa, wydajność 35 kg/h dla metanu, pobór mocy 17 W.

Zastosowany w systemie różnicowy czujnik ciśnienia dokonuje pomiarów ciśnienia doładowania oraz ciśnienia gazu dopływającego do wtryskiwaczy. W celu pomiaru ciśnienia doładowania połączono króciec czujnika z kolektorem dolotowym oraz z komorą sterującą reduktora gazowego. Natomiast w celu pomiaru ciśnienia gazu, połączono króciec czujnika z trójnikiem pomiarowym zamontowanym w przewodzie gazowym, pomiędzy filtrem gazu a listwą wtryskiwaczy. Zastosowany w systemie różnicowy czujnik ciśnienia dokonuje pomiarów ciśnienia doładowania oraz ciśnienia gazu dopływającego do wtryskiwaczy. W celu pomiaru ciśnienia doładowania połączono króciec czujnika z kolektorem dolotowym oraz z komorą sterującą reduktora gazowego. Natomiast w celu pomiaru ciśnienia gazu, połączono króciec czujnika z trójnikiem pomiarowym zamontowanym w prze-

wodzie gazowym, pomiędzy filtrem gazu a listwą wtryskiwaczy.

Przy pośrednim wtrysku gazu do kolektora, przy dużych udziałach gazu i wysokich obciążeniach silnika może dochodzić do spalania stukowego co wiąże się ze zwiększonym obciążeniem cieplnym silnika, szczególnie zaworów wylotowych i korony

tłoka. Grozi to uszkodzeniem silnika, a dodatkowo zmniejszeniem jego sprawności ogólnej i zwiększeniem emisji toksycznych składników spalin. Zewnętrznym objawem spalania stukowego jest wzrost drgań silnika prowadzący do zwiększenia jego hałaśliwości zewnętrznej.



Rys. 1. Schemat montażu instalacji zasilania CNG OSCAR-N Diesel SAS [18]:  
1 - sterownik, 2 - zasilanie systemu- przetwornica 24V/12V - DC/DC, 3 - emulator TPS, 4 - buzzer, 5 - przełącznik,  
6 - wiązka przewodów, 7 - trójnik pomiarowy, 8 - MAP sensor, 9 - wtryskiwacze, 10 – reduktor, 11 - czujnik stuku,  
12 - termopara, 13 - filtr fazy lotnej, 14 - czujnik temperatury reduktora, 15 - przewód - ciśnienie kolektora,  
16, 17 - przewody niskiego ciśnienia gazu, 18 - przewód - podgrzewanie reduktora,  
19 - przewód wysokociśnieniowy - doprowadzenie gazu z butli



Rys. 2. Kolektor dolotowy silnika Fiat 1.3 MJT z wtryskiwaczami gazu (kolektor przed montażem)



Rys. 3. Sposób zamontowania i podłączenia listwy wtryskiwaczy gazu na silniku:

- 1 - doprowadzenie gazu o niskim ciśnieniu,
- 2- listwa wtryskiwaczy gazowych, 3- przewód sterujący wtryskiwaczem gazowym, 4- wyjście gazu z wtryskiwacza do kolektora dolotowego

Spalanie stukowe powoduje również istotny wzrost temperatury spalin co może powodować uszkodzenia zespołu turbosprężarki. Z tego powodu w silnikach gazowych powinny być montowane czujniki stuku i temperatury spalin przed turbosprężarką.

Czujniki spalania stukowego oraz temperatury spalin informują o wpływie wtryskiwanego CNG na proces spalania zachodzący w dwupaliwowym silniku. W przypadku pojawienia się zjawiska spalania detonacyjnego, lub podwyższonej temperatury spalin, system monitorowania zmniejsza odpowiednio czas otwarcia wtryskiwaczy gazowych, a co za tym idzie zmniejsza udział gazu. W adaptacji zastosowano jeden piezokwarcowy czujnik bezwładnościowy dający sygnał napięciowy proporcjonalny do przyspieszeń masy bezwładnej (proporcjonalnych do amplitudy drgań). Procedura pomiaru drgań stosowana w systemie wtrysku gazu umożliwia jedynie ocenę porównawczą.

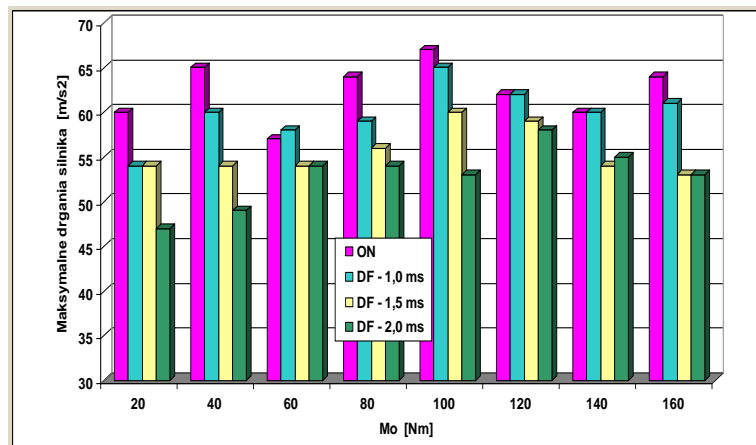


Rys. 4. Miejsce zamocowania czujnika spalania stukowego

W celu otrzymania bezwzględnego wymiaru drgań czujnik należy wycechować. W trakcie prowadzonej porównawczej analizy drgań podczas badań trzy podstawowe parametry czujnika stukowego, takie jak wzmacnienie, częstotliwość rezonansowa i czas integracji utrzymywano na stałym poziomie.

Miejsce zamontowania czujnika spalania stukowego do korpusu silnika w pobliżu miski olejowej przedstawia rys. 4 (zaznaczono strzałką). Natomiast czujnik temperatury spalin zamontowano w przewodzie spalin przed turbosprężarką.

Na rys. 5 przedstawiono porównanie maksymalnych drgań zarejestrowanych przy pomocy czujnika spalania stukowego w czasie badań wstępnych silnika zasilanego tradycyjnie i dwupaliwowo dla różnych czasów otwarcia wtryskiwaczy gazu, co odpowiada różnym udziałom gazu w całkowitej dawce energii dostarczanej do silnika.



Rys. 5. Porównanie maksymalnych drgań silnika Fiat 1.3 MJT zasilanego tradycyjnie i dwupaliwowo, dla różnych czasów otwarcia wtryskiwacza gazu 1,0÷2,0 ms: prędkość obrotowa silnika 3500 obr/min

Z porównania danych na rys. 5 wynika, że mimo zasilania gazowego praca silnika jest równomierna czego objawem są mniejsze drgania mierzone przez czujnik stuku. Drgania maksymalne silnika zależą od ilości gazu dostarczanego do silnika i wyraźnie maleją z jego wzrostem. Przy czasie otwarcia wtryskiwacza gazu 2,0 ms (udział gazu w zakresie 25,6÷46,5%) dla prędkości obrotowej 3500 obr/min w całym zakresie zmian obciążenia uzyskano wyraźnie mniejsze drgania silnika co świadczy o spokojniejszej jego pracy.

Adaptacja silnika obejmuje również nie przewidywane przez producenta instalacji gazowej opracowanie i zastosowanie niezbędnych ingerencji w niezależne od kontrolera silnika sterowanie osprzętem silnika (recyrkulacja, doładowanie). Podczas badań stwierdzono, że również przy dodatkowym zasilaniu CNG, istotny wpływ na wartość zadymienia oraz zawartość sadzy w spalinach ma zmiana

przekroju przepływu zaworu EGR. Zdecydowano się na skokowe zmiany poziomu recyrkulacji spalin. W tym celu do kontroli poziomu recyrkulacji spalin wykorzystano serwisowe uszczelki dławiące wykonane z materiału odpornego na temperaturę oraz szkodliwe działanie spalin. Serwisowe uszczelki dławiące są wykonane z otworami o różnych średnicach i są montowane za zaworem recyrkulacji spalin (na rys. 6 zaznaczono strzałką). Uszczelki przedstawiono na rys. 7. Najlepsze rezultaty uzyskano stosując dławienie recyrkulacji uszczelką z jednym otworem przelotowym  $\phi 8$  mm. Całkowite zasłonięcie przekroju kanału dolotowego zaworu EGR, lub wyłączenie zaworu EGR nie jest możliwe, ponieważ sterownik silnika wykrywa błąd układu EGR.



Rys. 5. Miejsce mocowania uszczelki do zmiany poziomu recyrkulacji spalin



Rys. 6. Uszczelki do zmiany poziomu recyrkulacji spalin

Dodatek gazu do silnika powoduje zmniejszenie przez sterownik fabryczny dawki jednostkowej oleju czemu towarzyszy z reguły, szczególnie przy większych obciążeniach silnika, zmniejszenie ciśnienia doładowania i współczynnika nadmiaru powietrza. Powoduje to niekorzystny wpływ na zadymienie spalin i emisję cząstek stałych PM. W punktach pracy, w których nie występowało zmniejszenie wydatku powietrza, lub było ono minimalne obserwowano zmniejszenie zadymienia spalin zwiększające się wraz ze wzrostem udziału gazu. Zmiany ciśnienia doładowania, a tym samym ilości jednostkowej powietrza w cyklu, monitoro-

wano przez rejestrację parametrów regulacyjnych i rzeczywistych fabrycznego sterownika silnika Fiat 1.3 MultiJet.

Niekorzystną zmianę średniego współczynnika nadmiaru powietrza dla całego ładunku, starano się ograniczyć przez ręczną zmianę parametrów regulacyjnych turbosprężarki tak, aby ilość zasysanego przez silnik powietrza przy zasilaniu olejem napędowym i dwupaliwowym były możliwie zbliżona.

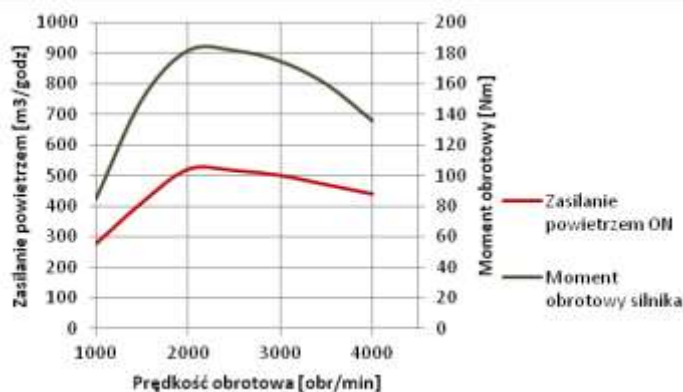


Rys. 7. Sterownik PWM do kontroli ciśnienia doładowania

Kontrola stopnia doładowania w wybranym punkcie pracy silnika realizowana jest przez dodatkowy zawór elektropneumatyczny włączony w obwód sterowania siłownikiem pneumatycznym turbosprężarki. Zawór elektropneumatyczny sterowany jest za pomocą niezależnego od systemu sterowania silnika zadajnika impulsów PWM, który wykonano do tych celów w Katedrze Silników Spalinowych i Pojazdów Akademii Techniczno-Humanistycznej w Bielsku-Białej (rys.8). Zastosowany system sterowania umożliwia żadaną zmianę ciśnienia doładowania w ramach charakterystyki sprężarki. Dodatkowy zawór elektropneumatyczny do niezależnego sterowania doładowaniem silnika (stosuje się go wyłącznie wtedy gdy wymagana jest zmiana ciśnienia doładowania w badanym punkcie pracy), przedstawiono na rys. 9.

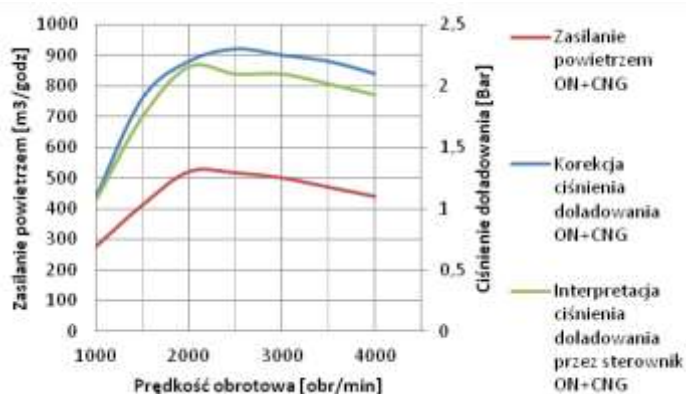


Rys. 8. Dodatkowy zawór elektropneumatyczny kontroli doładowania: strzałką oznaczono dodatkowy zawór elektropneumatyczny



Rys. 9. Wydatek powietrza i moment obrotowy silnika przy zasilaniu olejem napędowym

Podczas badań wstępnych wykonano pomiary ciśnienia doładowania w funkcji prędkości obrotowej i momentu obrotowego silnika. W wyniku przeprowadzonych doświadczeń stwierdzono że istnieje możliwość korygowania ciśnienia doładowania w zakresie, który nie powoduje przejścia oryginalnego systemu sterowania silnika w stan awaryjny, jednocześnie pozwalając na dodatkowe napełnianie silnika powietrzem. Ilość zużywanego przez silnik powietrza w przypadku dodatkowego zasilania gazem była porównywalna do napełniania silnika pracującego na oleju napędowym, co uzyskano korygując ciśnienie doładowania. Na przykładowych charakterystykach prędkościowych przedstawiono metodykę postępowania w celu utrzymania właściwego współczynnika nadmiaru powietrza. Na rys. 10 przedstawiono na tle momentu obrotowego rzeczywiste wartości zużycia powietrza przy zasilaniu silnika olejem napędowym. Na rys. 11 przedstawiono wymaganą korekcję ciśnienia doładowania przy zasilaniu olejem napędowym i zasilaniu CNG przy stałym czasie otwarcia wtryskiwaczy CNG, w stosunku do ciśnienia doładowania interpretowanego przez sterownik silnika i wynikającego ze zmniejszenia dawki wtrysku ON w wyniku dodatkowego zasilania CNG.



Rys. 10. Wydatek powietrza z korekcją ciśnienie doładowania

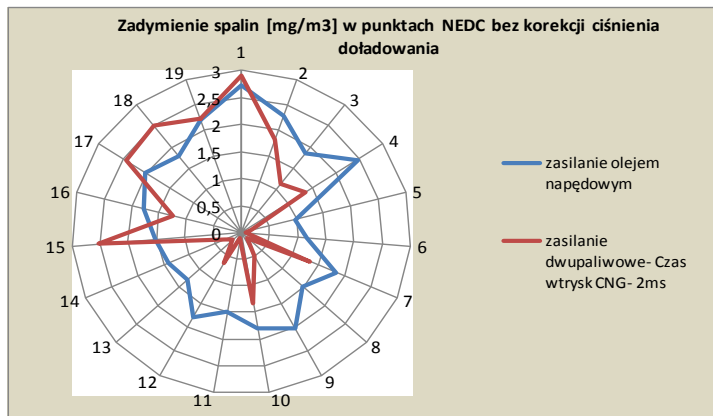
W wyniku takiej korekcji zostaje utrzymana wymagana wartość współczynnika nadmiaru powietrza, podobna jak przy zasilaniu olejem napędowym.

W celu porównania zadymienia spalin dla badanego silnika wytypowano 20 punktów, które odpowiadają testowi NEDC w warunkach zarówno zmiennej jak i stałej prędkości jazdy, w których uwzględniono zmiany ciśnienia doładowania [11]. Wytypowane punkty pracy silnika przedstawiono w tab. 2.

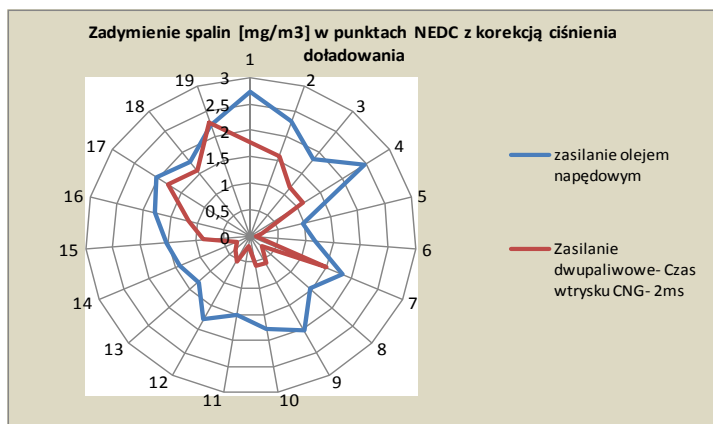
Tabela 2. Wytypowane punkty pracy silnika [11]

Lp.	Prędkość obrotowa [obr/min]	Moment obrotowy [Nm]	Prędkość jazdy [km/h/bieg]
1	820	45	
2	850	20	
3	1050	15	
4	1250	20	
5	1400	40	
6	1550	4	35/III
7	1590	10	50/IV
8	1650	37	
9	1730	11	70/V
10	1740	26	
11	1800	38	
12	1920	3	15/I
13	2050	26	
14	2200	4	50/III
15	2260	4	32/II
16	2400	55	
17	2500	34	100/V
18	2700	73	
19	2930	80	
20	3020	55	120/V

Przykładowe porównanie zadymienia spalin przy zasilaniu olejem napędowym i zasilaniu dwupaliwowym, bez i z korekcją ciśnienia doładowania przedstawiono na rys. 12 i 13. W przedstawionych na rysunkach badaniach stosowano fabryczny sterownik silnika i czas otwarcia wtryskiwaczy CNG - 2,0 ms.



Rys. 11. Zadymienie spalin bez korekcji ciśnienia doładowania



Rys. 12. Zadymienie spalin z korekcją ciśnienia doładowania

Porównanie zadymienia przedstawione na rys 12 i 13, wskazuje na korzystny wpływ zasilania CNG na zadymienie spalin szczególnie w zakresie niskich obciążeń typowych dla jazdy miejskiej. Ma to istotne znaczenie z punktu widzenia eksploatacji i trwałości filtra cząstek stałych oraz emisji spalin w czasie jego oczyszczania. Wymaga to jednak modyfikacji algorytmu sterowania silnikiem uwzględniającego utrzymanie współczynnika nadmiaru powietrza przy zasilaniu dwupaliwowym takiego samego jak przy zasilaniu tradycyjnym.

### 3. Wnioski

Adaptacja współczesnych silników trakcyjnych o zapłonie samoczynnym do zasilania dwupaliwo-

wego wymaga dobrego przygotowania obsługi w zakresie procesów spalania i sterowania silnika. Musi ona uwzględnić takie parametry jak zmienny podział dawki oleju napędowego, zmienny stopień doładowania i recyrkulacji spalin, zagadnienia obciążenia cieplnego silnika i warunki spełnienia norm toksyczności spalin.

Adaptacja nowoczesnego silnika Fiat 1.3. MJT wykonana w pracy pokazała, że mimo skomplikowanego sterowania fabrycznego silnika możliwa jest praca przy zasilaniu gazem w pełnym zakresie zmian prędkości obrotowej i obciążenia pod warunkiem pewnych modyfikacji parametrów sterownika fabrycznego.

Badania wstępne wykazały, że możliwe jest utrzymanie a nawet nieznaczny wzrost parametrów użytkowych silnika takich jak moment obrotowy i moc użytkowa w zakresie najczęstszej jego pracy przy zasilaniu gazem. Wskazuje to na możliwość utrzymania parametrów trakcyjnych pojazdów na niezmiennym poziomie.

Badania drgań silnika wskazują na spokojniejszą pracę silnika zasilanego dwupaliwowo, szczególnie przy większych udziałach gazu. Może to sugerować zachowanie trwałości silnika na niezmiennym poziomie.

Istotną korzyścią zasilania dwupaliwowego jest znaczące zmniejszenie zadymienia spalin prowadzące do wydłużenia okresów oczyszczania filtra cząstek stałych PDF i wydłużenia jego żywotności. Ma to istotne znaczenie przy jazdach miejskich, szczególnie w okresach zimowych przy niedostatecznie dogrzanym silniku.

**Praca była wykonywana w ramach projektu badawczego nr PBS1/A6/13/2012 pt. „Ograniczenie zadymienia spalin i emisji cząstek stałych w spalinach samochodowych silników o zapłonie samoczynnym za pomocą dodatku gazu ziemnego CNG” finansowanego przez NCBiR.**

### Literatura

- [1] Barroso P, Ribas x, Domingues J, De Sella E, Garcia J M.: Study of dual-fuel (diesel+natural gas) particle mater and CO2 emissions of a heavy-duty diesel engine during transient operation. Combustion Engines; 2/2013 (153) ISSN 0138-0346: 28-39.
- [2] Clark N N, Atkinson Chr M, Atkinson R J, McDaniel T, Park T.: Optimized Emission Reduction Strategies for Dual Fuel Compression Ignition Engines Running on natural Gas and Diesel. <http://www.cemr.wvu.edu> 2002: 1-6.



- [3] Gebert K, Beck J, Barkhimer R L, Wong H Ch.: Strategies to Improve Combustion and Emission Characteristics of Dual-Fuel Pilot Ignited Natural Gas Engines. SAE Paper 1997; 971712: 79-87.
- [4] Kowalewicz A.: Adaptacja silnika wysoko-  
prężnego do zasilania gazem naturalnym. Cza-  
sopismo Techniczne Wydawnictwo Politech-  
niki Krakowskiej 2008; 7-M/2008: 67-78.
- [5] Kozak M.: Studium wpływu komponentów  
tlenowych oleju napędowego na emisję tok-  
sycznych składników spalin z silników o za-  
płonie samoczynnym. Monografia habilitacyj-  
na, Wydawnictwo Politechniki Poznańskie,  
Poznań 2013.
- [6] Luft S., Skrzek T.: Dwupaliwowy silnik o  
zapłonie samoczynnym – przegląd wybranych  
wyników badań. Czasopismi Techniczne Wy-  
dawnictwo Politechniki Krakowskiej, nr 3-  
M/2012.
- [7] Matyjasik M.: Aktywizacja procesu spalania  
mieszaniny gaz-powietrze w silnikach dwupa-  
liwowych przez podział dawki inicjującej ole-  
ju napędowego. Praca doktorska, Bielsko-  
Biała 2012.
- [8] Merkisz J., Daszkiewicz P., Idzior M., Bajer-  
lein M., Fuć P., Lijewski P.: Analiza ograni-  
czenia emisji toksycznych składników spalin  
dwupaliwowego silnika o zapłonie samoczyn-  
nym. Logistyka, nr 6/2014, s. 7260-7269. p-  
ISSN: 1231-5478.
- [9] Merkisz J., Pielecha J.: Emisja cząstek stałych  
ze źródeł motoryzacyjnych. - Poznań : Wy-  
dawnictwo Politechniki Poznańskiej , 2014. -  
309 s. Rok: 2014. ISBN: 978-83-7775-325-5
- [10] Merkisz J., Pielecha J., Łabędź K., Stojecki  
A.: Badania emisji spalin pojazdów o różnej  
klasie emisyjnej zasilanych gazem ziemnym.  
Prace Naukowe Politechniki Warszawskiej.  
Transport. 2013, z. 98, s. 463-472. Rok: 2013.  
ISSN: 1230-9265.
- [11] Pietras D, Sobieszcański M., Świątek A.,  
Pajdowski P.: Dobór parametrów pracy silnika  
1.3 multijet charakterystycznych dla testu  
jezdnego NEDC do badań rozwojowych.  
PTNSS P05-C065, PTNSS Kongres 2005.
- [12] Schlick H.: Potentials and challenges of gas  
and dual-fuel engines for marine applications.  
Tth CIMAC CASCADES, Busan, nr  
20141023, 2014.
- [13] Stelmasiak Z.: Studium procesu spalania gazu  
w dwupaliwowym silniku o zapłonie samo-  
czynnym zasilanym gazem ziemnym i olejem  
napędowym. Wydawnictwo ATH, Praca habi-  
litacyjna, Bielsko-Biała 2003.
- [14] Stelmasiak Z.: Dwupaliwowe silniki o zapło-  
nie samoczynnym. Wydawnictwo Naukowe  
Instytutu Technologii Eksploatacji, Biblioteka  
problemów Eksploatacji, Radom 2013.
- [15] Stelmasiak Z., Larisch J.: Dwupaliwowe zasi-  
lanie silnika Fiat 1.3 MultiJet. Logistyka  
6/2014.
- [16] Tiwari D.R., Sinha C.P.: Performance and  
Emission Study of LPG Diesel Dual Fuel En-  
gine. Internationa Journal of Engineering and  
Adanced Technology, Volume-3. Issue-3,  
February 2014, p. 198-203, 2014.
- [17] Materiały firmy FIAT AUTO POLAND,  
2014.
- [18] Materiały techniczne firmy EuropeGAS, 2013.

Zdzisław Stelmasiak, Prof. Assoc. Eng. -  
Professor in the Faculty of Mechanical Engi-  
neering at University of Bielsko-Biala  
*Prof. dr hab. inż. Zdzisław Stelmasiak, -  
kierownik Katedry Silników Spalinowych  
i Pojazdów Akademii Techniczno - Humani-  
stycznej w Bielsku-Bialej  
e-mail: zstelmasiak@ath.bielsko.pl*



Dariusz Pietras, DEng. – senior lecturer in the  
Faculty of Mechanical Engineering at Univer-  
sity of Bielsko-Biala  
*Dr inż. Dariusz Pietras – st. wykładowca na  
Wydziale Budowy Maszyn Akademii Tech-  
niczno-Humanistycznej w Bielsku-Bialej  
e-mail: dpietras@ath.bielsko.pl*



Jerzy Larisch, DSc., – Adiunkt in the Faculty  
of Mechanical Engineering at University of  
Bielsko-Biala  
*Dr inż. Jerzy Larisch – adiunkt na Wydziale  
Budowy Maszyn i Informatyki Akademii  
Techniczno-Humanistycznej  
w Bielsku-Bialej  
e-mail: jlarisch@ath.bielsko.pl*

