

DUAL FUEL TURBOCHARGED CI ENGINE EQUIPPED WITH COMMON RAIL SYSTEM FUELLED WITH NATURAL GAS AND DIESEL OIL

Ryszard Wołoszyn

Radom Technical University
Institute of Maintenance of Vehicles and Machines
Al. Chrobrego 45, 26-600 Radom, Poland
tel.: +48 3617630, fax: +48 3617644
e-mail: rw@pr.radom.pl

Abstract

The bi-fuel supply of CI engine gives the possibility for the utilization of alternative fuels with low cetane number. The one from the group of many alternative fuels possible to the utilization, fuel which is possible to ignite in the combustion chamber of CI engine by piloting dose of diesel fuel is the natural gas. The paper presents some concepts of dual fuelling of turbocharged CI engine with natural gas and diesel oil. The experiments are carried out on the engine with common rail system which works together with gas fuel system (gas injection). Gas is injected to inlet channel when the inlet valve is open. For the purpose of the concept choice for the selection doses sizes of separate fuels and the selection of the optimum quantity of air delivered to the engine combustion chamber for different engine loads and speeds, several number of the load characteristics of conventionally powered engine with factory fuel system and exhaust recirculation switched on and the series of load characteristics with the exhaust recirculation switched off was performed, in order to allow elimination of exhaust recirculation influence on the process of combustion and on the dual fuel system engine parameters during investigations. The load characteristics of dual fueled powered engine are carried out presently. Conclusions from the comparison of the measured parameters will be utilized in the design and the development of control algorithm for injection of both fuels, and also air flow control in the induction system and exhaust through the turbine.

Keywords: dual fueling of CI engine, alternative fuel, concept of fuelling with natural gas and diesel oil

TURBODOŁADOWANY SILNIK O ZAPŁONIE SAMOCZYNNYM Z UKŁADEM „COMMON RAIL” ZASILANY DWUPALIOWO GAZEM ZIEMNYM I OLEJEM NAPĘDOWYM

Streszczenie

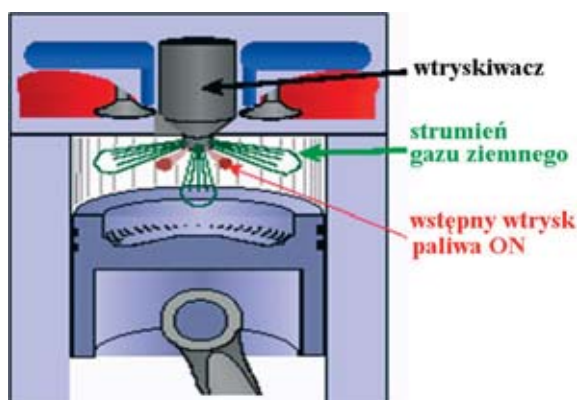
Zasilanie dwupaliwowe silnika o zapłonie samoczynnym daje możliwość wykorzystania alternatywnych paliw o niskiej liczbie cetanowej. Jednym z możliwych do wykorzystania paliw alternatywnych, które można zapalać w komorze spalania silnika o ZS dawką pilotującą oleju napędowego jest gaz naturalny. W artykule przedstawiono koncepcje zasilania doładowanego silnika z zapłonem samoczynnym gazem ziemnym i olejem napędowym. Prowadzone prace wykonano na silniku z układem zasilania common rail współpracującym z gazowym układem zasilania (wdmuchu gazu) do kanału dolotowego w fazie otwarcia zaworu dolotowego. W celu dokonania wyboru koncepcji doboru wielkości dawek poszczególnych paliw oraz ustalenia optymalnej ilości powietrza dostarczanego do komory spalania silnika dla różnych obciążeń i prędkości obrotowych silnika wykonano szereg charakterystyk obciążeniowych silnika zasilanego konwencjonalnie fabrycznym układem zasilania oraz włączoną recyrkulacją spalin oraz serię charakterystyk obciążeniowych z wyłączoną recyrkulacją spalin, tak aby było możliwe wyeliminowanie wpływu recyrkulacji na proces spalania i parametry silnika w układzie dwupaliwowym w czasie jego badań. Obecnie wykonywane są charakterystyki obciążeniowe silnika zasilanego dwupaliwowo. Wnioski z porównania mierzonych parametrów będą wykorzystane w konstrukcji i opracowaniu algorytmu sterowania wtryskiem obydwu paliw, jak również przepływem powietrza w układzie dolotowym i spalin przez turbinę.

Słowa kluczowe: dwupaliwowe zasilanie silnika wysokoprężnego, alternatywne paliwo, koncepcje zasilania gazem ziemnym i olejem napędowym

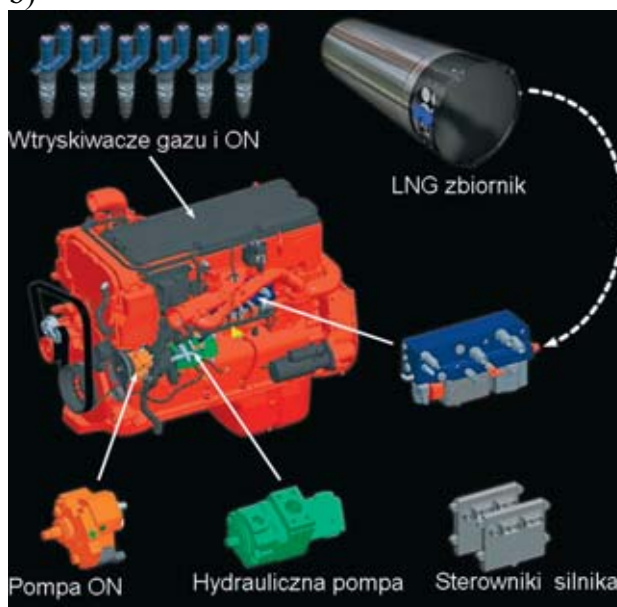
1. Dwupaliwowe zasilanie silnika wysokoprężnego

Zasilanie dwupaliwowe silnika o zapłonie samoczynnym daje możliwość wykorzystania alternatywnych paliw o niskiej liczbie cetanowej. Jednym z możliwych do wykorzystania paliw alternatywnych, które można zapalać w komorze spalania silnika o ZS dawką pilotującą oleju napędowego jest gaz naturalny. Najbardziej znane rozwiązanie dwupaliwowego układu zasilania opracowane zostało przez firmę Westport i dalej rozwijane jest przez firmę Cummins, który wdrożył koncepcję dwupaliwowego zasilania silnika gazem ziemnym i olejem napędowym w silnikach stosowanych również do pojazdów trakcyjnych. Przykładem jest tu silnik DFNG 10 umożliwiający wtrysk dawki pilotującej oleju napędowego tuż przed wtryskiem gazu bezpośrednio do cylindra. Takie rozwiązanie układu zasilania zapewnia także smarowanie paliwem elementów końcówki wtryskiwacza. Ze względu na problemy związane z kontrolą procesu spalania zależnego między innymi od wzajemnej proporcji paliw oraz ilości powietrza dostarczonego do komory spalania w stanach przejściowych silnik dwupaliwowy łatwiej jest zastosować do pracy w warunkach stacjonarnych (np. jako część składowa agregatu prądotwórczego).

a)



b)



Rys. 1. Dwupaliwowy układ w zasilania gdzie: a - dwudrożny wtryskiwacz oleju napędowego i gazu ziemnego do komory spalania, b - elementy składowe silnika zasilanego dwupaliwowo wraz ze zbiornikiem skroplonego gazu ziemnego

Fig. 1. Dual fuel system: a – two-ways injector of diesel oil and natural gas for direct injection of fuels, b – elements of dual fuel engine together with LNG tank

2. Gaz ziemny jako paliwo wykorzystywane do dwupaliwowego zasilania silnika o ZS

Właściwości gazu ziemnego i w porównaniu do oleju napędowego zestawiono w Tab. 1.

Duże znaczenie z zakresu ekologii ma tutaj struktura metanu, w której stosunek masowy wodoru do węgla jest znacznie korzystniejszy niż dla oleju napędowego. Ilość dwutlenku węgla powstała w wyniku uzyskania, 1 MJ energii ze spalania gazu ziemnego wynosi (w zależności od jego składu) od 38-50 g, podczas gdy ta sama energia uzyskana ze spalania oleju napędowego skutkuje emisją aż 72 g CO₂ do atmosfery.

Szczególnie ważne z punktu widzenia wykorzystania gazu ziemnego do zasilania dwupaliwowego silnika o ZS są granice palności. Granice palności gazu ziemnego zawarte są pomiędzy $\lambda_g = 2,1$ oraz $\lambda_d = 0,7$. To determinuje proporcje gazu ziemnego do powietrza

w jednorodnej mieszance podawanej do cylindra, która następnie zapalana jest przez wtrysniętą dawkę oleju napędowego. Temperatura samozapłonu gazu ziemnego wynosi ok. 550[°C]. Dzięki temu że jest ona tak wysoka oraz że zdolność gazu do samozapłonu jest niska gaz może być na ogół powtarzalnie zapalany przez dawkę oleju napędowego inicjującą zapłon gazu.

Tab. 1. Porównanie właściwości gazu ziemnego i oleju napędowego
Tab. 1. Comparison of properties of natural gas and diesel oil

Porównywalne parametry	Gaz ziemny	Olej napędowy
Masowy udział węgla [%]	73,3	85,9
Masowy udział wodoru [%]	23,9	14,0
Masowy udział tlenu [%]	0,4	0,05
Stosunek węgla do wodoru	0,25-0,33	0,16
Masa molowa [kg/kmol]	17-20	~170
Gęstość w temp. 0 °C i ciśnieniu 1,013 bar [kg/m ³]	~0,83	840
Temperatura samozapłonu mieszanki [°C]	540-560	320-330
Liczba oktanowa	120-130	-
Liczba cetanowa	-	52-56
Teoretyczne zapotrzebowanie powietrza	17,2	14,5
Graniczne składy zapłonu mieszanki	0,7-2,1	0,19-0,98
Wartość opałowa paliwa [MJ/kg]	38-50	42,6
Zawartość metanu [%]	80-99	-
Zawartość etanu [%]	2,7-4,6	-
Zawartość azotu [%]	0,1-15	-
Zawartość dwutlenku węgla [%]	1-5	-
Zawartość siarki [ppm]	<5	<50
Ilość CO ₂ powstała w wyniku procesu spalania paliwa, w którym uzyskano 1 MJ energii cieplnej [g/MJ]	38-50	72

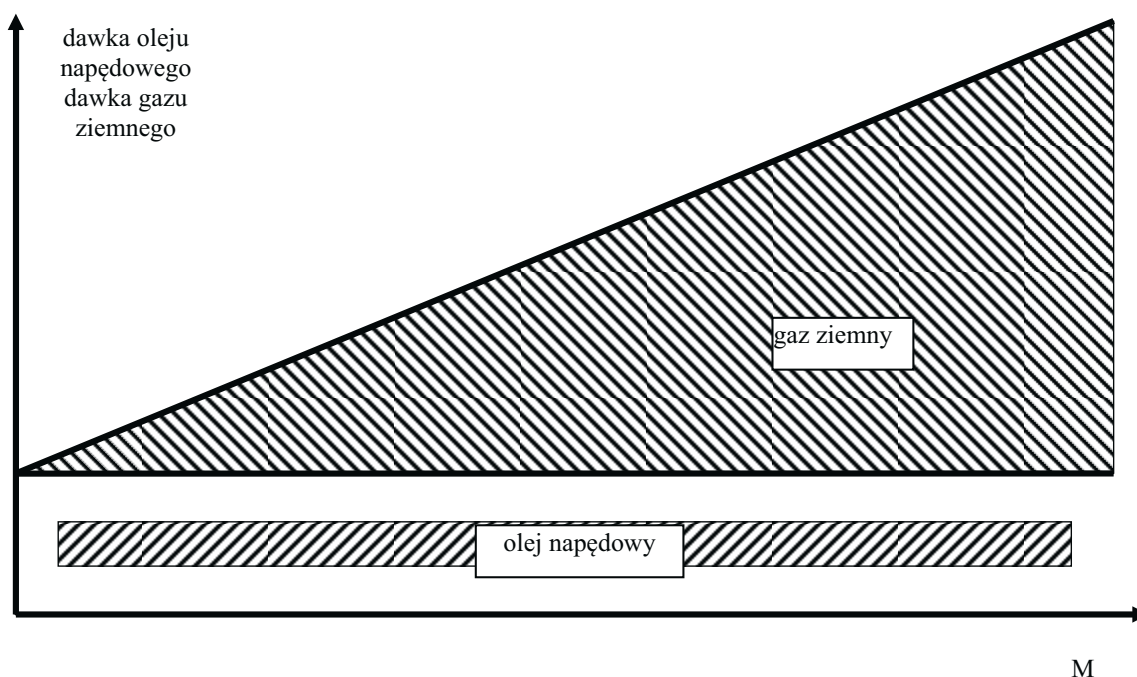
Bardzo ważna jest wysoka wartość opałowa gazu ziemnego, gdyż dzięki niej możliwe jest częściowe skompensowanie spadku mocy silnika zasilanego gazem wynikające ze spadku napełniania w stosunku do zasilania konwencjonalnego olejem napędowym.

3. Wybór koncepcji dwupaliwowego zasilania silnika ADCR gazem ziemnym i olejem napędowym

Podstawowym problemem jaki należy rozwiązać w układzie dwupaliwowego zasilania silnika o zapłonie samoczynnym jest opracowanie metody uzyskania mocy z silnika w różnych stanach jego pracy w wykorzystaniu dwóch paliw. Dotyczy to szczególnie ustalenia wzajemnej proporcji paliw podawanych do cylindra w stanach różnych obciążeń silnika. Istnieje wiele możliwości ustalenia wzajemnych proporcji podawanych paliw.

W pierwszym przypadku można założyć stałą dawkę pilotującą oleju napędowego i wzrost mocy silnika poprzez zwiększanie dawki gazu. W tym dawka pilotująca może być ustalona na poziomie ok. 5-10% wartości energetycznej obydwu paliw, a wzrost mocy silnika uzyskiwany jest poprzez zwiększenie udziału gazu w mieszance palnej. W tym przypadku ze względu na granice

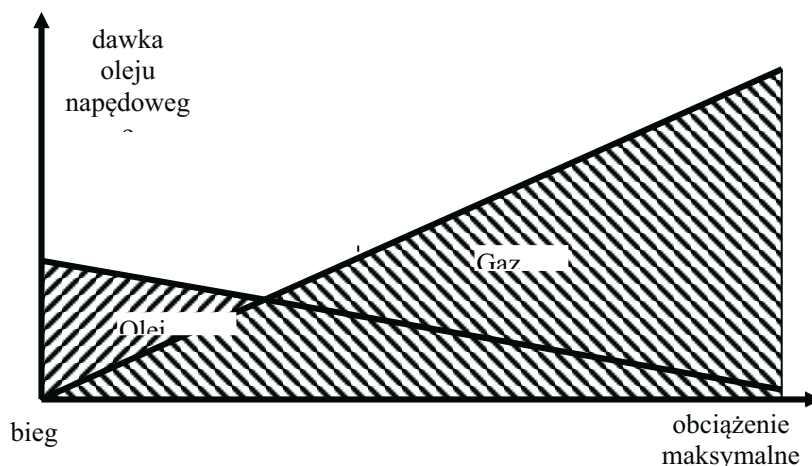
palności gazu należy ograniczać ilość powietrza jaka dostaje się do cylindra silnika poprzez zastosowanie przepustnicy powietrza w układzie dolotowym silnika. Może to również mieć wpływ na pracę turbosprężarki, którą można wyposażyć w dodatkowy lub zmodyfikowany układ upustu spalin lub upust powietrza za sprężarką (Rys. 2.).



Rys. 2. Koncepcja zmiany obciążenia przez zmiany wielkości dawki gazu ziemnego przy stałej dawce oleju napędowego

Fig. 2. The concept of regulation of dual fuel engine load by change of natural gas dose with constant diesel oil dose

Drugi wariant zasilania polegać może na dostarczaniu zmiennej dawki oleju napędowego i dostosowanej do wymagań związanych z obciążeniem silnika dawki gazu. Przyjęcie takiej koncepcji zasilania wymaga również dostosowania parametrów pracy zespołu turbodoładowującego oraz zapewnienia możliwości sterownia ilością powietrza (Rys. 3.).



Rys. 3. Koncepcja zmiany obciążenia przez zmiany wielkości dawki gazu ziemnego i oleju napędowego

Fig. 3. The concept of regulation of dual fuel engine load by change of natural gas dose and diesel oil dose

Wybór jednego z wariantów zasilania zostanie dokonany w oparciu o badania silnika w tym analizę procesu spalania różnych proporcji paliw przy różnych obciążeniach silnika zasilanego dwupaliwowo.

4. Stanowisko badawcze

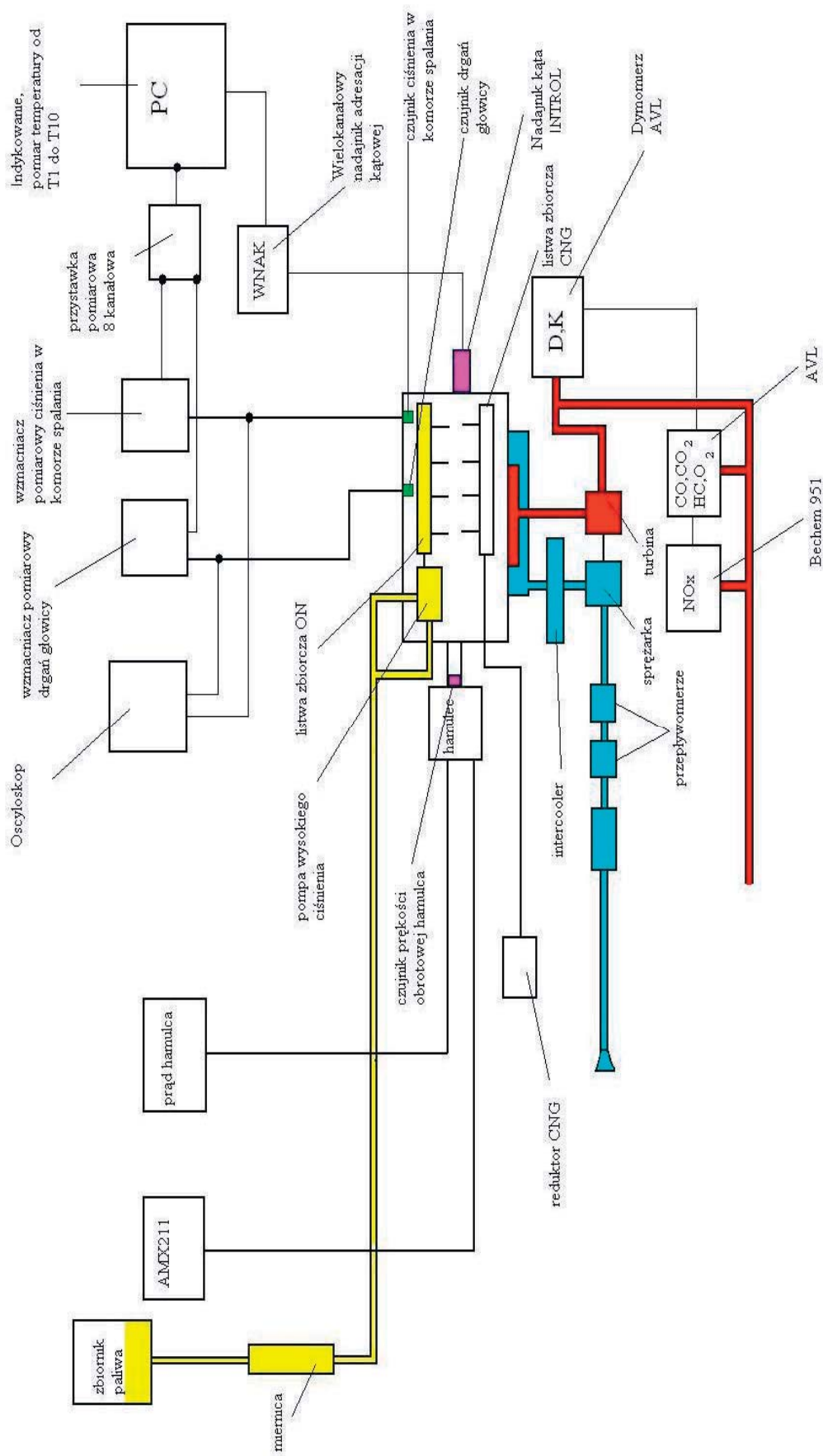
W Laboratorium Alternatywnego Zasilania Silników Wysokoprężnych w IEPiM PR prowadzone są prace badawczo-rozwojowe nad adaptacją turbodoładowanego silnika o zapłonie samoczynnym do zasilania dwupaliwowego gazem ziemnym i olejem napędowym. Do tej pracy wybrany został silnik ADCR z układem zasilania common rail, którego podstawowe parametry przy zasilaniu olejem napędowym zestawiono w Tab. 2.

Tab. 2. Dane techniczne silnika ADCR Andora Mot.
Tab. 2. Tab. 2 Technical data of ADCR engine from Andoria Mot

Nazwa	Opis
Rodzaj silnika	Wysokoprężny, 4-suwowy, turbodoładowany, z intercoolerem
Wtrysk paliwa	Układ zasobnikowy paliwa „Common Rail”
Ilość i układ cylindrów	4 cylindry układ rzędowy, pionowy
Średnica cylindra / Skok tłoka	94/95 mm
Objętość skokowa	2636 cm ³
Stopień sprężania	17,5:1
Znamionowa moc* / prędkość obrotowa	85 kW/3700 obr/min
Maksymalny moment obrotowy* / prędkość obrotowa	250 Nm / 1800-2200 obr/min
Minimalna prędkość obrotowa biegu jałowego	750 obr/min
Jednostkowe zużycie paliwa przy momencie maksymalnym silnika*	210 g/kWh
Ciśnienie oleju w rozgrzanym silniku (w zakresie 1500 - 3700 obr/min)	0,25 – 0,50 MPa
Ciśnienie oleju w rozgrzanym silniku na biegu jałowym	min. 0,1 MPa
Maksymalna dopuszczalna temperatura oleju w magistrali	ciągła 130°C (krótkotrwale 140°C)
Maks. dopuszczalna temp. cieczy chłodzącej w układzie zamkniętym (0,12 MPa)	105°C
Zalecana optymalna temperatura cieczy chłodzącej	80 – 90°C
Luz zaworowy dla zaworów ssących i wydechowych	0,2 mm (na zimnym silniku)
Kolejność wtrysku	1-3-4-2

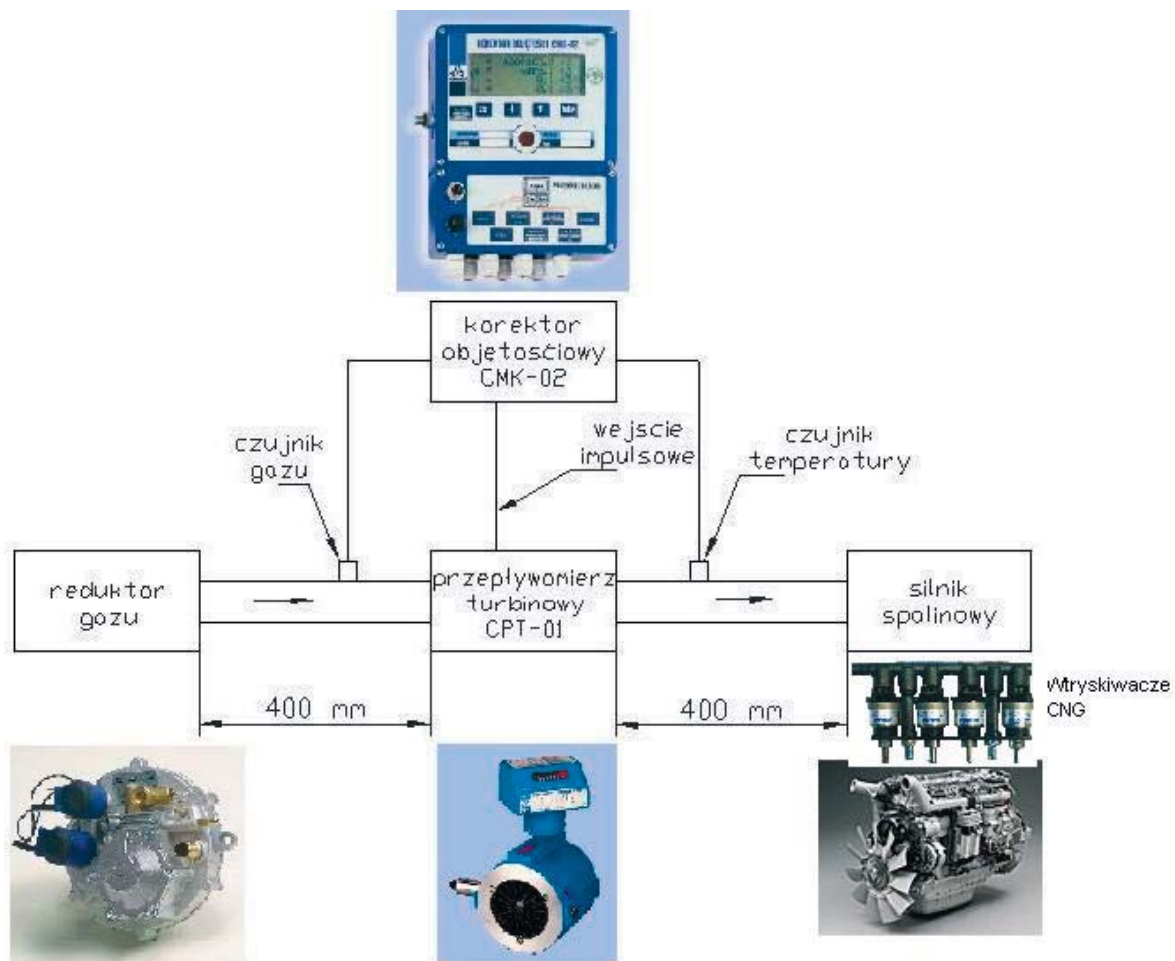
Na bazie tego silnika w ramach realizowanego w Instytucie grantu zostało wykonane stanowisko badawcze, którego schemat przedstawiony jest na Rys. 4.

Najważniejszym z punktu widzenia współpracy układu „common rail” oraz układu zasilania gazem ziemnym jest system sterowania dawkami poszczególnych paliw tj. ich wielkością oraz momentem wtrysku. Do tego celu użyte zostały specjalnie przygotowane sterowniki umożliwiające precyzyjne sterowanie dawką oleju napędowego oraz gazu ziemnego podawanego przez wtryskiwacze zamocowane w kolektorze dolotowym. Ze względu na precyzję dozowania paliwa gazowego w układzie dwupaliwowym wykorzystano wtryskiwacze gazu Keyhin charakteryzujące się liniową zależnością wydatku w funkcji czasu otwarcia. Do pomiaru zużycia powietrza wykorzystano termoanemometr umożliwiający masowy pomiar ilości dostarczanego powietrza do silnika. A zużycie gazu jest mierzone za pomocą przepływomierza turbinowego współpracującego korektorem objętościowym.



Rys.4. Schemat stanowiska badawczego silnika ADCR. Kolor żółty – układ paliwowy, kolor niebieski – układ zasilania powietrzem, kolor czerwony – układ wydechowy, kolor zielony – czujniki, kolor fioletowy – nadajniki
 Fig. 4 Test stand for ADCR engine. Yellow – fuel system, blue – air supply, red – exhaust system, green – sensors, violet – emitters

Silnik ADCR wyposażony został w dodatkowy układ zasilania gazem ziemnym, którego schemat przedstawiono na Rys. 5.



Rys. 5. Elementy składowe układu zasilania gazem ziemnym silnika ADCR
Fig. 5 Elements of gas fuel system for ADCR engine

5. Metodyka i cel badań silnika

W celu dokonania wyboru koncepcji doboru wielkości dawek poszczególnych paliw oraz ustalenia optymalnej ilości powietrza dostarczanego do komory spalania silnika dla różnych obciążeń i prędkości obrotowych silnika (opisanych w punkcie 3) wykonano szereg charakterystyk obciążeniowych silnika zasilanego konwencjonalnie fabrycznym układem zasilania oraz włączoną recyrkulacją spalin oraz serię charakterystyk obciążeniowych z wyłączoną recyrkulacją spalin, tak aby było możliwe wyeliminowanie wpływu recyrkulacji na proces spalania i parametry silnika w układzie dwupaliwowym w czasie jego badań. Obecnie wykonywane są charakterystyki obciążeniowe silnika zasilanego dwupaliwowo. Wnioski z porównania mierzonych parametrów będą wykorzystane w konstrukcji i opracowaniu algorytmu sterowania wtryskiem obydwu paliw, jak również przepływem powietrza w układzie dolotowym i spalin przez turbinę.

Literatura

- [1] Pawlak, G., Wołoszyn, R. i in., *Opracowanie metody laboratoryjnego pomiaru zużycia gazu w aspekcie silnika dwupaliwowego (ON i CNG)*, Praca własna Nr 2544/24/B, Politechnika Radomska 2007.
- [2] Stelmasiak, Z., *Studium procesu spalania gazu w dwupaliwowym silniku o zapłonie samoczynnym zasilanym gazem ziemnym i olejem napędowym*, Wydawnictwo ATH,

Bielsko-Biała 2003.

- [3] Wołoszyn, R., *Dwupaliwowe zasilanie silnika o zapłonie samoczynnym olejem napędowym i gazem ziemnym*, Rozdział monografii. Bezpieczeństwo i ekonomika użytkowania samochodów ciężarowych i autobusów. Pod redakcją Ryszarda Wołoszyna i Grzegorza Pawlaka. Wydawnictwo Politechnika Radomska 2007.