

Andrzej RÓŻYCKI<sup>1</sup>

### **EMISJA TURBODOŁADOWANEGO SILNIKA O ZAPŁONIE SAMOCZYNNYM ZASILANEGO DWUPALIWOWO**

*W artykule opisano wyniki badań pełnogabarytowego dwupaliwowego czterocylindrowego turbodoładowanego silnika o zapłonie samoczynnym. Badania miały na celu ustalenie maksymalnego udziału paliwa CNG w mieszance dostarczanej do cylindra silnika.*

*Analiza wyników badań wykazała, że udział energetyczny CNG w ładunku dostarczonym do cylindra może wynosić maksymalnie 45%. Przy takim poziomie udziału CNG uzyskuje się 15% zmniejszenie momentu maksymalnego w stosunku do zasilania fabrycznego. Znaczemu zwiększeniu ulega emisja niespalonych węglowodorów. Stężenia pozostałych głównych składników spalin osiągają wartości na poziomie emitowanym przez silnik zasilany fabrycznie.*

### **THE EMISSION OF THE DUAL-FUEL TURBO DIESEL ENGINE**

*The article describes the results of four-cylinder dual fuel turbo diesel engine. The aim of the study was to determine the maximum participation of the CNG fuel mixture supplied to the cylinder of the engine.*

*The analysis of the results showed that the proportion of energetic CNG in the load supplied to the cylinder can reach a maximum of 45%. At that level of CNG participation 15% reduction in maximum torque is achieved in relation to the standard supply. The emission of unburned carbohydrates undergoes a significant increase. The concentrations of the other major components of exhaust gases reach the values at the level emitted by the standard powered engine.*

#### **1. WSTĘP**

Ogólnościatowy trend do ograniczania zużycia paliw ropopochodnych zwiększa zainteresowanie zastosowaniem paliw alternatywnych do zasilania silników spalinowych. Jednym z głównych paliw alternatywnych jest gaz ziemny [1]. Zastosowanie gazu ziemnego do zasilania silników spalinowych jest ograniczone przez dystrybucję. Z tego powodu preferowane są rozwiązania pozwalające na zasilanie jednopaliwowe (paliwem konwencjonalnym lub alternatywnym) oraz dwupaliwowe (jednoczesne zasilanie obydwoma rodzajami paliw lub tylko olejem napędowym) [2]. Pierwszy z wymienionych

---

<sup>1</sup>Andrzej Różycki, Politechnika Radomska, Instytut Eksploatacji Pojazdów i Maszyn, Ul. Chrobrego 45  
26-600 Radom, e-mail: andrzej.rozycki@pr.radom.pl

układów ma szerokie zastosowanie w silnikach o zapłonie iskrowym, drugi jest stosowany w silnikach o zapłonie samoczynnym. Zasilanie dwupaliwowe w silniku o ZS polega na wtrysku niewielkiej dawki oleju napędowego, której samozapłon inicjuje spalanie gazu. W rozwiązaniu tym olej napędowy podawany jest przez konwencjonalny układ wtryskowy. Paliwo gazowe może być dostarczane do kolektora dolotowego (np. wtrysk pośredni) lub do cylindra (wtrysk bezpośredni).

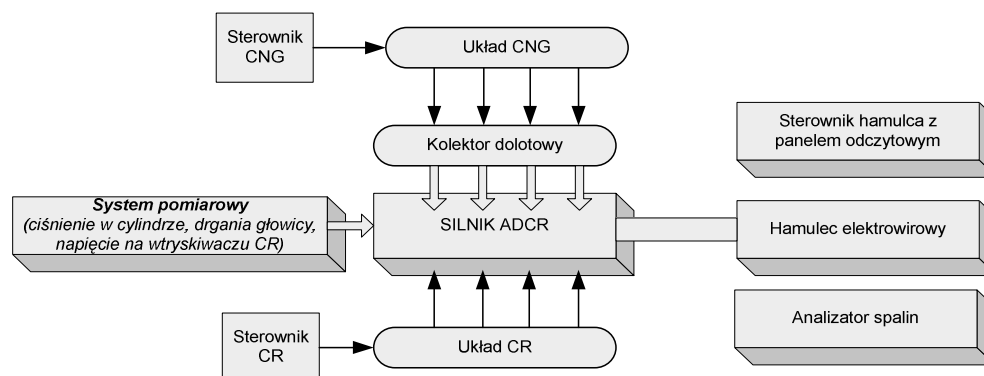
W artykule przedstawiono wyniki badań przedstawiające emisję podstawowych składników spalin przy zasilaniu fabrycznym i dwupaliwowym. Badania wykonywane były w ramach pracy [3], której celem była adaptacja turbodoładowanego silnika do dwupaliwowego zasilania olejem napędowym i gazem ziemnym. Koncepcja zasilania dwupaliwowego opierała się na założeniu, że olej napędowy będzie dostarczany za pomocą fabrycznie montowanego na silniku układu common rail zaś CNG będzie dostarczane za pomocą opracowanego w ramach pracy [3] układu wtrysku pośredniego. Przeprowadzone badania miały na celu ustalenie optymalnych udziałów energetycznych oleju napędowego i CNG w ładunku dostarczanym do cylindra. Optymalizacja miała na celu osiągnięcie parametrów zewnętrznych silnika zbliżonych do nominalnych podawanych przez producenta silnika przy maksymalnie dużym udziale energetycznym CNG. Regulację ilości paliw dostarczanych do silnika realizowano za pomocą dwóch niezależnych od siebie układów zasilania. Dawkę oleju napędowego inicjującą zapłon podawano za pomocą fabrycznego układu common rail. Do dostarczania CNG wykorzystano wielopunktowy układ wtrysku pośredniego wykonany w ramach pracy [3].

Uzyskane w wyniku optymalizacji parametry regulacyjne (udział energetyczny CNG i wielkość dawki inicjującej spalanie) pozwoliły na osiągnięcie momentów obrotowych porównywalnych do uzyskiwanych przy zasilaniu fabrycznym w całym zakresie prędkości obrotowych. Udziały CNG w ładunku dostarczanym do cylindra sięgały 60%. Sprawności ogólne były porównywalne dla tych samych parametrów pracy silnika i osiągały wartości rzędu 40%.

Badania silnika zasilanego dwupaliwowo przeprowadzono dla prędkości obrotowej odpowiadającej maksymalnemu momentowi obrotowemu, która wynosiła  $n = 2000$  obr/min. Dawkowanie oleju napędowego ustawione było w ten sposób, że zapewniało pracę silnika przy obciążeniach 20Nm ( $p_e=0,1$ MPa), 40Nm ( $p_e=0,21$ MPa) i 100Nm ( $p_e=0,52$ MPa). Ustawienie to realizowano przez odpowiednie wychylenie pedału gazu. Pozostałą część obciążenia uzyskiwano przez zwiększanie ilości CNG dostarczanej do cylindra aż do uzyskania wyraźnego spadku sprawności silnika oraz zwiększającego się hałasu emitowanego przez silnik świadczącego o jego nienormalnej pracy (stuk lub twarde spalanie). Uzyskane obciążenia dla dawki oleju napędowego, przy której silnik osiągał obciążenie  $p_e=0,52$ MPa pozwalało na osiągnięcie wyższych obciążeń w stosunku do zasilania standardowego. Jednakże silnik pracował twarde ze słyszalnym stukiem. Odnośnie do emisji spalin, w obszarze normalnej pracy silnika (bez twardej pracy i stuku) zarysowuje się wyraźny wzrost poziomu stężeń niespalonych węglowodorów. Zadymienie spalin i stężenia tlenków azotu utrzymuje się na poziomie zbliżonym do poziomu, jaki występuje przy zasilaniu fabrycznym.

## 2. STANOWISKO BADAWCZE

Badania przeprowadzono na stanowisku hamulcowym (rys.1), wyposażonym w silnik o zapłonie samoczynnym Andoria ADCR i hamulec elektrowirowy firmy Automex. Parametry techniczne silnika przedstawiono w tabelicy 1.



Rys. 1. Schemat blokowy stanowiska badawczego

Tab. 1. Dane techniczne silnika ADCR

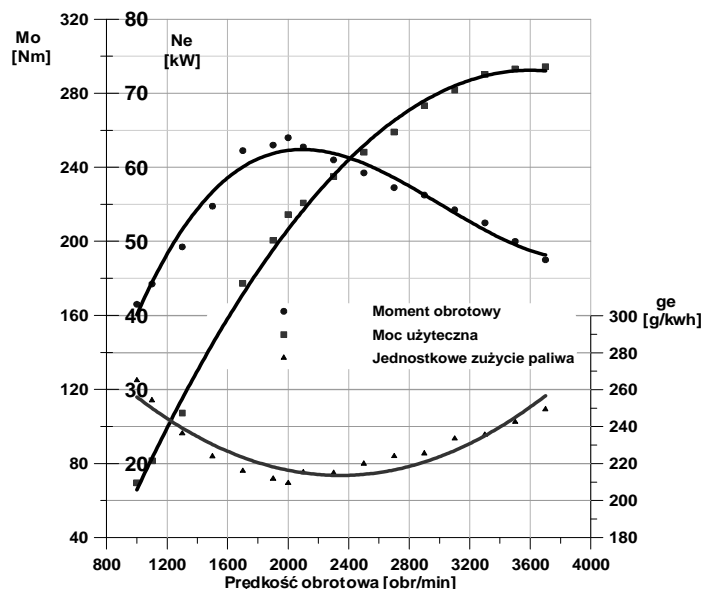
<b>Rodzaj silnika</b>	Wysokoprężny, z układem Common-Rail, turbodoładowany z intercoolerem
<b>Liczba i układ cylindrów</b>	4, rzędowy, pionowy
<b>Tryb spalania</b>	4-ro suwowy z wtryskiem bezpośrednim
<b>Średnica cylindra</b>	94 mm
<b>Skok tłoka</b>	95 mm
<b>Objętość skokowa</b>	2636 cm <sup>3</sup>
<b>Stopień sprężania</b>	17,5
<b>Układ zasilania – olej napędowy</b>	Common rail
<b>Układ zasilania – CNG</b>	Wtrysk gazu do kolektora dolotowego
<b>Moc znamionowa</b>	85 kJ/s/3700 obr/min
<b>Maksymalny moment obrotowy</b>	250Nm/(1800obr/min – 2200obr/min)

Do pomiaru parametrów szybkozmiennych użyto systemu pomiarowego, opisanego w [4], wyposażonego w kartę przetwornika analogowo-cyfrowego KPCI 3110 o szybkości próbkowania równej 1,25MHz firmy Keythley oraz w tory pomiarowe: ciśnienia w cylindrze silnika z piezokwarcowym czujnikiem 8Qp500c firmy AVL, dwukanałowego znacznika kąta obrotu wału korbowego (wyzwalanie pojedynczego pomiaru co 0,7<sup>0</sup>OWK

i cyklu pomiarowego znacznikiem GMP), toru pomiarowego drgań głowicy z czujnikiem DR 190 8092-2F firmy OPEL. Pomiary stężeń składników spalin wykonywano za pomocą analizatora AVL 4000.

### 3. OSIĄGI I EMISJA SILNIKA ZASILANEGO STANDARDOWO

W celu oceny możliwości zasilania dwupaliwowego silnika ADCR wykonano badania hamowniane polegające na pomiarach mocy, momentu, zużycia paliwa, emisji składników spalin oraz ciśnień w cylindrze przy zasilaniu standardowym (układ common rail). Na podstawie otrzymanych wyników sporządzono charakterystykę prędkościową (rys.2). Z charakterystyki prędkościowej wynika, że silnik osiąga maksymalny moment i maksymalną sprawność przy prędkości około 2000obr/min a maksymalną moc przy prędkości 3700obr/min (w warunkach badań hamownianych uzyskano moc 74 kW, czyli o około 10 kW mniejszą od podawanej przez producenta).



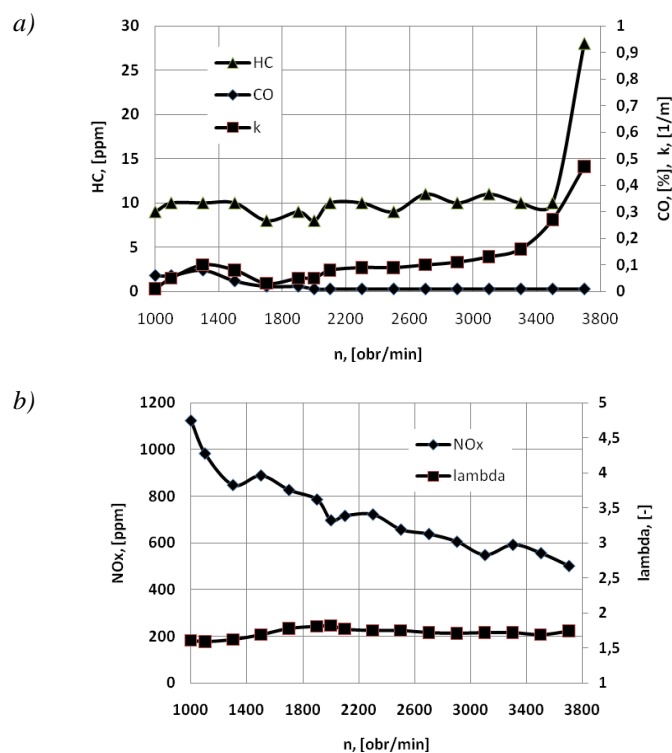
Rys. 2. Charakterystyka prędkościowa

Zmiany stężeń podstawowych składników spalin i współczynnika nadmiaru powietrza przedstawiono na wykresach (rys.3a i rys.3b).

Jak widać na wykresie (rys.3a) stężenia niespalonych węglowodorów i zadymienia spalin utrzymują się na stałym poziomie aż do prędkości obrotowej silnika  $n = 3400$ , a następnie szybko wzrastają. Zjawisko to może być związane ze wydłużaniem się czasu spalania oraz ze zbyt małą intensywnością mieszania się powietrza ze strugami wtryskiwanego paliwa.

Stężenia tlenków azotu wykazują tendencję malejącą. Może to świadczyć o zmniejszaniu się maksymalnych temperatur spalania w miarę wzrostu prędkości obrotowej

silnika (rys.3b). Na uwagę zasługuje zachowanie się współczynnika nadmiaru powietrza  $\lambda$ . Jak można zauważyć w całym zakresie prędkości obrotowej utrzymuje on stałą wartość na poziomie 1.8.



Rys.3. Zmiany stężeń: a) tlenku węgla CO, niespalonych węglowodorów HC i zadymienia spalin k, b) tlenków azotu NOx i współczynnika nadmiaru powietrza  $\lambda$

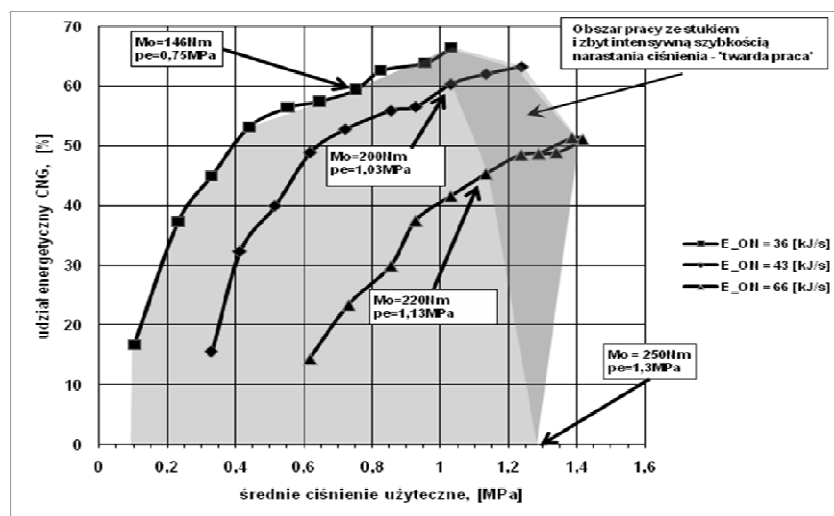
#### 4. OSIĄGI I EMISJA SILNIKA ZASILANEGO DWUPALIOWO

Ostateczną ocenę możliwości prostej adaptacji silnika ADCR do zasilania dwupaliwowego oparto na koncepcji zakładającej współpracę fabrycznego układu zasilania CR z układem wtrysku pośredniego CNG. W związku z powyższym wykonano serię prób polegających na zwiększaniu dawki energetycznej CNG w ładunku przy utrzymywaniu stałej (inicjującej zapłon) dawki oleju napędowego. Regulacja dawki oleju napędowego odbywała się poprzez odpowiednie wychylenie pedału gazu (ustawienie wartości oporności na wejściu do sterownika CR). Wartość energetyczna dawki ON kontrolowana była za pomocą wartości momentu obrotowego (obciążenia silnika) i sekundowego zużycia paliwa.

Badania przeprowadzono dla prędkości 2000obr/min (prędkość momentu maksymalnego) i trzech dawek oleju napędowego inicjujących zapłon. Obciążenia silnika wynosiły odpowiednio: 20Nm ( $p_e = 0,1$ MPa, dawka energetyczna  $E_{ON} = 36$  kJ/s), 40Nm

( $p_e = 0,21\text{MPa}$ , dawka energetyczna  $E_{ON} = 43\text{ kJ/s}$ ) oraz  $100\text{Nm}$  ( $p_e = 0,52\text{MPa}$ , dawka energetyczna  $E_{ON} = 66\text{ kJ/s}$ ). Ilość CNG w ładunku dostarczanym do cylindra była zwiększana aż do wyraźnego wzrostu poziomu hałasu emitowanego przez silnik spowodowanego twardą pracą silnika bądź stukiem.

Zmiany obciążenia silnika wywołane zmianami dawek energetycznych oleju napędowego i CNG przedstawiono na rys. 5. Kolorem jasnoszarym zaznaczono obszar normalnej pracy silnika zaś kolorem ciemnoszarym obszar maksymalnie możliwych do osiągnięcia obciążeń silnika. Maksymalny moment, jaki można uzyskać przy tego typu zasilaniu wyniósł  $M_o = 220\text{Nm}$  ( $p_e = 1,13\text{ MPa}$ ). Dalsze zwiększanie ilości gazu w ładunku skutkowało twardą pracą silnika i stukiem.



Rys. 5. Obszar pracy silnika przy zasilaniu dwupaliwowym. Prędkość obrotowa  $n = 2000\text{obr/min}$

Wartości maksymalnych ciśnień we wszystkich analizowanych przypadkach zawierają się w okolicy  $10\text{MPa}$  (tak samo jak dla zasilania standardowego) lub są nieco niższe.

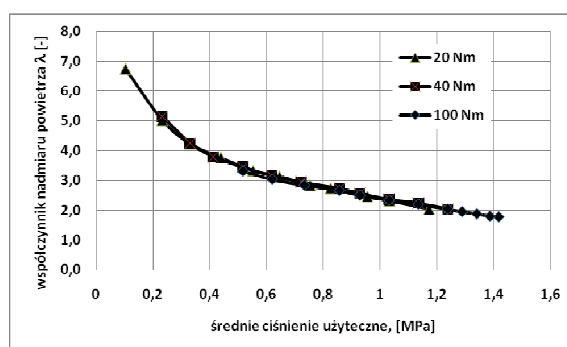
Zastosowanie fabrycznego sterownika układu CR powoduje, że maksymalne chwilowe szybkości narastania ciśnienia  $(dp/d\varphi)_{\max}$  nie przekraczają wartości  $0,35\text{MPa}^{\circ}\text{OWK}$  a więc mieszczą się w granicach uznawanych za normalną pracę silnika [5] i są podobne do wartości osiągniętych przy zasilaniu standardowym.

Jak wspomniano powyżej nadmierne zwiększanie udziału energetycznego CNG w ładunku skutkuje nagłym wzrostem ciśnień maksymalnych obiegu (powyżej  $10\text{ MPa}$ ) i szybkości narastania ciśnienia ( $dp/d\varphi_{\max} > 0,6\text{ MPa}^{\circ}\text{OWK}$ ) (rys.5. kolor ciemnoszary). W efekcie można było zaobserwować wzrost hałasu emitowanego przez silnik.

Wspomniane powyżej zwiększenie hałasu może być wywołane wysokoczęstotliwościowymi drganiami głowicy (około  $7\text{kHz}$ ) związanymi z pulsacjami ciśnienia lub dużą szybkością narastania ciśnienia [6].

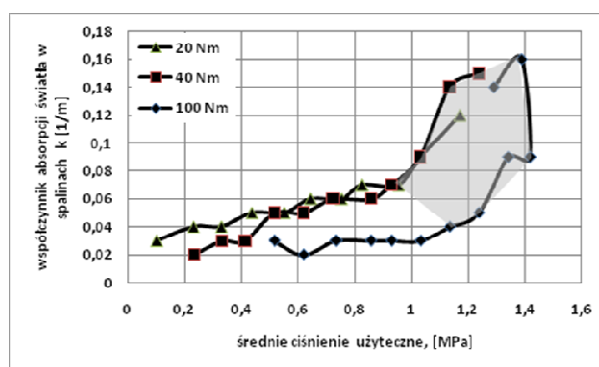
W trakcie badań silnika zasilanego dwupaliwowo mierzony był współczynnik nadmiaru powietrza oraz dokonywano pomiaru stężeń głównych składników toksycznych spalin (tlenku węgla CO, niespalonych węglowodorów HC, zadymienia spalin i tlenków azotu NO<sub>x</sub>).

Na wykresie (rys.6) przedstawiono zmiany współczynnika powietrza  $\lambda$ . W opisywanych powyżej trzech przypadkach udziałów CNG w ładunku silnik pracuje z nadmiarem powietrza w zakresie od  $\lambda=7$  (małe obciążenie) do około  $\lambda=2$  przy pełnym obciążeniu i maksymalnym udziale CNG. Wynika z powyższego, że przy dużych udziałach CNG ilość powietrza dostarczana do cylindra jest wystarczająca do zupełnego i całkowitego spalania zarówno CNG, jak i oleju napędowego.



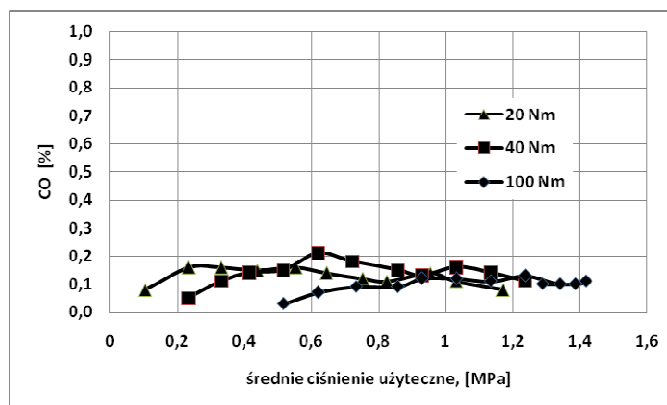
Rys.6. Zmiany współczynnika nadmiaru powietrza  $\lambda$  lambda w zależności od obciążenia

Analizując zmiany współczynnika absorpcji światła w spalinach k wynika, że ilość niespalonego węgla w całym zakresie obciążeń silnika pracującego w obszarze prawidłowego spalania nie przekracza wartości  $k = 0,1/1/m$  (maksymalna wartość zadymienia dla prędkości obrotowej odpowiadającej maksymalnemu momentowi przy zasilaniu fabrycznym).



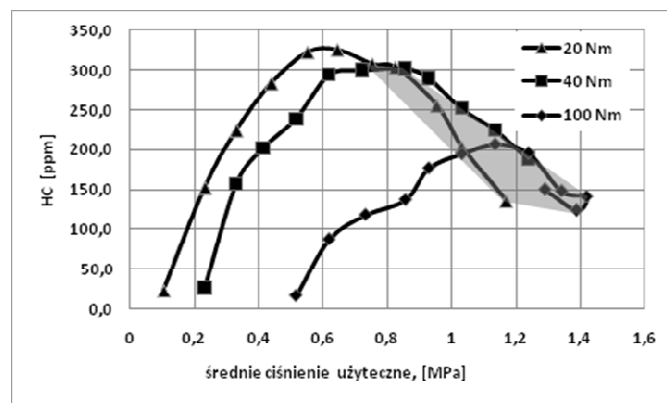
Rys.7. Zmiany zadymienia spalin w zależności od obciążenia silnika

Zmiany stężenia tlenku węgla CO dochodzą do wartości 0,2% a więc są zbliżone do poziomu stężeń osiągniętych przez silnik jednopaliwowy.



Rys.8. Zmiany stężenia tlenku węgla CO w zależności od obciążenia silnika

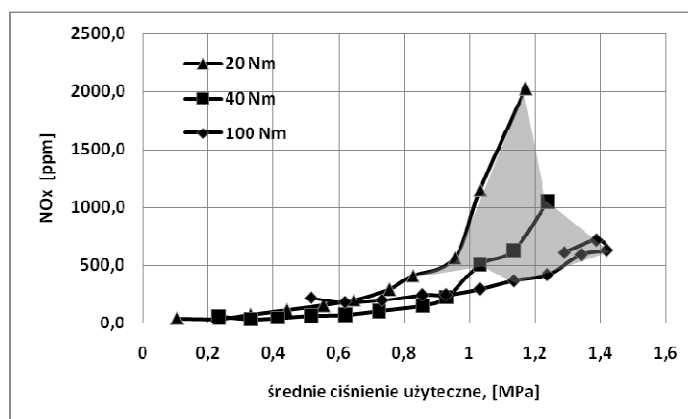
Niekorzystnie w porównaniu do silnika jednopaliwowego przedstawia się emisja węglowodorów HC (rys.9). W silniku zasilanym jednopaliwowo poziom stężenia węglowodorów dla punktu pracy silnika odpowiadającego maksymalnemu momentowi obrotowemu ( $n=2000$ obr/min) osiąga wartość 30 ppm. Przy zasilaniu dwupaliwowym wartości te są dużo większe. Osiągają wartość około 330 ppm w obszarze pracy z normalnym przebiegiem procesu spalania tj. bez stuku i twardej pracy. Stężenia węglowodorów w obszarze pracy ze stukiem i twardą pracą zaznaczone są kolorem szarym.



Rys.9. Zmiany stężeń węglowodorów w zależności od obciążenia silnika.

Poziom stężenia tlenków azotu NOx (rys.10) w obszarze pracy silnika bez stuku i twardej pracy jest niższy od poziomu osiąganego przy zasilaniu standardowym w punkcie pracy silnika odpowiadającym maksymalnemu obciążeniu





Rys.10. Zmiany stężeń tlenków azotu w zależności od obciążenia.

## 5. WNIOSKI

Przeprowadzone badania i analiza uzyskanych wyników pozwala na sformułowanie następujących wniosków:

- zasilanie dwupaliwowe olejem napędowym (za pomocą układu common rail) i CNG (wtrysk pośredni do kanału dolotowego) pozwala na osiągnięcie obciążeń mniejszych o około 15% w odniesieniu do zasilania standardowego,
- podstawowymi ograniczeniami w zwiększaniu udziału energetycznego dawki CNG w ładunku są: nadmierny wzrost ciśnień maksymalnych w cylindrze ( $P_{max} \approx 15$  MPa) i zwiększenie szybkości narastania ciśnienia skutkującej twardą pracą silnika przechodzącą w stuk ( $0,7$  MPa<sup>0</sup>OWK),
- maksymalny udział energetyczny CNG w ładunku dostarczonym do cylindra wyniósł około 60 % przy dawce energetycznej oleju napędowego wynoszącej 36 kJ/s,
- przy pełnym obciążeniu współczynnik nadmiaru powietrza osiąga wartość około 2, czyli silnik pracuje z nadmiarem powietrza,
- uzyskana duża wartość współczynnika nadmiaru powietrza mimo wtrysku pośredniego CNG do cylindra jest spowodowana doładowaniem silnika,
- praca silnika przy nadmiarze powietrza znajduje potwierdzenie na wykresach stężeń tlenku węgla oraz tlenków azotu; poziom emisji tych związków jest porównywalny do poziomu uzyskiwanego przy zasilaniu fabrycznym (jednopaliwowym),
- przy zasilaniu dwupaliwowym poziom zadymienia spalin (spalanie niecałkowite) jest porównywalny do uzyskiwanego przy zasilaniu fabrycznym,
- niekorzystny pod względem emisji jest poziom stężeń węglowodorów, który jest wynikiem dużego przekrycia zaworów ssących i wydechowych

(typowe rozwiązanie konstrukcyjne w silnikach turbodoładowanych), powodującym przepływ CNG bezpośrednio z kanałów dolotowych do wylotowych,

## 6. BIBLIOGRAFIA

- [1] Kowalewicz A., Wojtyniak M.: *Natural gas a Fuel for Dual-Fuel Automotive Engines. A Review*. Archivum Combustionis vol 29 (2009) Nr 1-2.
- [2] Zabłocki M.: *Dwupaliwowe silniki z zapłonem samoczynnym napędzane paliwem ciekłym i gazowym*. WNT, Seria Nowa Technika. Zeszyt 80, Warszawa 1969
- [3] Kowalewicz A., Pawlak G., Wołoszyn R., Różycki A., Duchniak P.: *Adaptacja turbodoładowanego silnika do dwupaliwowego zasilania gazem ziemnym i olejem napędowym*. Projekt badawczy. Nr 4T12D00230
- [4] Różycki A.: *Microkomputer system for measurement of high speed parameters for IC engines*, Bratislava 2001 8<sup>th</sup> EAEC Congress, Bratislava 2001, paper n° SAITS 01196
- [5] Wajand J., A.: *Silniki o zapłonie samoczynnym*, WNT, Warszawa 1980
- [6] Różycki A.: *Analysis of performance of dual fuel turbocharged compression ignition engines*. 36<sup>th</sup> International Scientific Congress On Powertrain And Transport Means European Kones 2010. Jurata 2010.