

## DUAL-FUEL COMPRESSION IGNITION ENGINE FUELLED WITH LPG INJECTION AT LIQUID STATE

**Sławomir Luft**

*Radom Technical University  
ul. B.Chrobrego 45, 26-600 Radom, Poland  
tel.: +48 48 3617642, 3617643, 3617645, fax: +48 48 3617644  
e-mail: iepim@pr.radom.pl*

### **Abstract**

*In the Department of Internal Combustion Engines and Automobiles in Technical University of Radom C.I. engine has been modified to dual fuelling. As the main fuels liquefied petroleum gas (LPG), injected to the suction manifold at liquid state, have been used. Diesel fuel has been used to initiate the combustion process only.*

*At the beginning, the ignition dose of diesel fuel have been optimised considering: maximum engine torque, maximum overall efficiency and emission of exhaust gases. After this, some investigations of standard diesel engine and modified one have been carried out. Test of engines consisted in preparation of load characteristics of specific energy consumption as well as CO, NO<sub>x</sub>, HC and smoke emissions. The results of investigations of dual fuel and standard engines have been compared.*

**Keywords:** *diesel engines, dual-fuel engines, the power with the propane butane supply, emission, fuel consumption*

## DWUPALIWOWY SILNIK O ZAPŁONIE SAMOCZYNNYM ZASILANY WTRYSKOWO PALIWEM LPG W FAZIE CIEKŁEJ

### **Streszczenie**

*W Zakładzie Silników Spalinowych i Pojazdów Politechniki Radomskiej zmodyfikowano silnik o zapłonie samoczynnym w celu uzyskania zasilania dwupaliwowego. Jako paliwo główne stosowana była mieszanina propanu-butanu (LPG) wtryskiwana do kolektora dolotowego w fazie ciekłej. Olej napędowy używany był jedynie do zainicjowania procesu spalania. W pierwszej fazie badań dobrano wielkość dawki inicjującej zapłon oraz kąt wyprzedzenia wtrysku tej dawki z punktu widzenia osiągnięcia możliwie dużej wartości momentu obrotowego, sprawności ogólnej oraz zachowania możliwie niskiego poziomu emisji składników spalin w badanych wersjach silnika dwupaliwowego. Sporządzono charakterystyki obciążeniowe jednostkowego zużycia energii oraz zawartości CO, CO<sub>2</sub>, HC i NO<sub>x</sub> i zadymienia. Wyniki badań wersji dwupaliwowych oraz standardowej zostały porównane.*

**Słowa kluczowe:** *silniki wysokoprężne, silniki dwupaliwowe, zasilanie propanem butanem, emisja spalin, zużycie paliwa*

### **1. Wprowadzenie**

W Zakładzie Silników Spalinowych i Pojazdów Politechniki Radomskiej im. K. Pułaskiego od szeregu lat prowadzone są badania silnika o zapłonie samoczynnym zasilanego dwupaliwowo.

Zmodyfikowano układ zasilania standardowego rozwiązania silnika o zapłonie samoczynnym tak by paliwo zastępcze dostarczane było do kolektora dolotowego silnika. W

suwie dolotu i sprężania paliwo to mieszając się z powietrzem tworzy jednorodną mieszaninę. Jej zapłon inicjowany jest od wtryskiwanej dawki oleju napędowego.

Takie rozwiązanie systemu spalania przybliża go do wymienianego coraz częściej jako przyszłościowego rozwiązania HCCI (homogeneous-charge compression ignition) [1]. Należy zauważyć, że za przyjęciem opisanej koncepcji zasilania przemawia szereg pozytywnych cech, takich jak:

- łatwość adaptacji silnika o ZS do spalania paliw o wysokiej wartości liczby oktanowej i małej wartości liczby cetanowej,
- łatwość rozruchu silnika (na oleju napędowym),
- poprawa sprawności ogólnej silnika,
- poprawa składu spalin,
- możliwość stosowania różnych paliw (benzyn, alkoholi, LPG, gazu ziemnego i in.) dotychczas stosowanych do silników o ZI,
- łatwy sposób kontroli i sterowania początkiem procesu spalania.

Celowość przyjętej koncepcji wydaje się być uzasadniona i potwierdzona licznymi publikacjami zawierającymi wyniki badań przeprowadzonych w krajowych i zagranicznych ośrodkach badawczych [2], [3], [4], [5], [6].

Do badań podstawowych przystosowano jednocyldrowy silnik 1HC102 o pojemności skokowej  $V = 0,98 \text{ dm}^3$ , wtrysku bezpośrednim do komory spalania usytuowanej w tłoku, stopniu sprężania  $\varepsilon = 17$ , mocy znamionowej  $N = 11 \text{ kW}$  przy prędkości obrotowej  $n = 2200 \text{ obr/min}$ . W wyniku dotychczasowych badań hamownianych przeanalizowano wpływ stosowania kilku rodzajów paliw na podstawowe parametry eksploatacyjne oraz skład spalin silnika. Do zasilania silnika stosowano:

- alkohol metylowy odparowany w odparowywaczu i dostarczony do kolektora dolotowego w fazie gazowej,
- alkohol metylowy wtryskiwany do kolektora dolotowego w fazie ciekłej,
- mieszaninę propan-butan (LPG) odparowaną w parowniku i dostarczoną do kolektora dolotowego w fazie gazowej.

W niniejszym artykule przedstawione są wyniki badań wstępnych silnika przy zasilaniu paliwem LPG wtryskiwanym w fazie ciekłej do kolektora dolotowego.

Za tak przyjętą koncepcją przemawia:

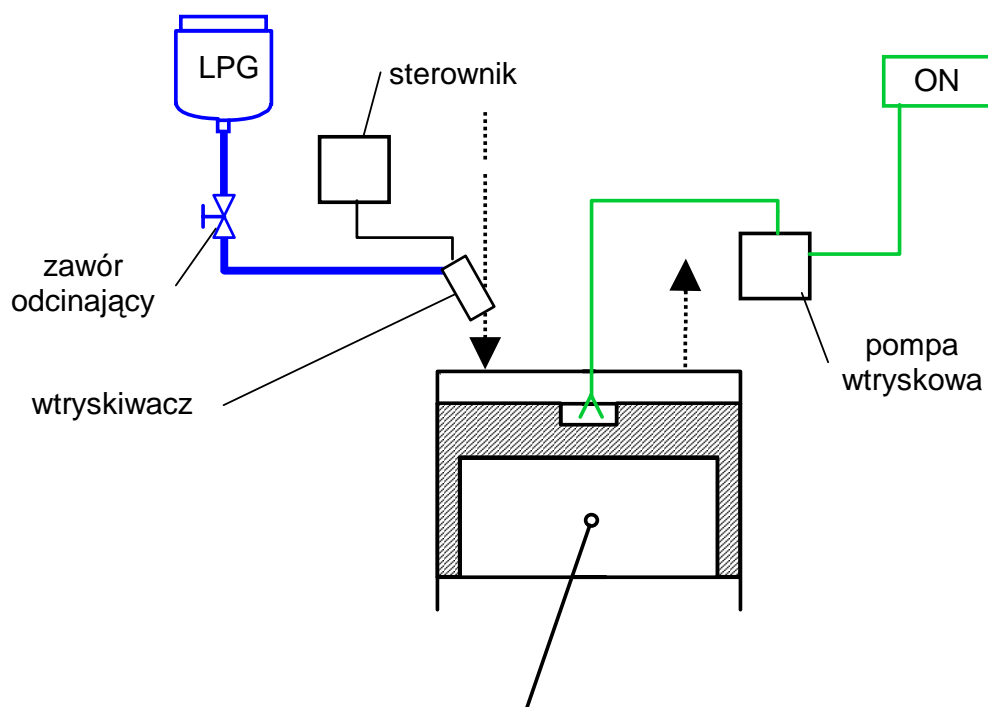
- przewidywana poprawa napełnienia cylindra w wyniku schładzania ładunku powietrza procesem odparowania paliwa LPG,
- przewidywane obniżenie temperatury w procesie spalania sprzyjające obniżeniu emisji tlenków azotu oraz poprawa sprawności ogólnej silnika,
- precyzja sterowania wielkością dawki paliwa LPG, a także możliwość synchronizacji procesu wtrysku paliwa LPG z fazami otwierania zaworu dolotowego,
- przewidywane zapobieżenie możliwości występowania samozapłonów oraz spalania stukowego mieszaniny LPG i powietrza (w wyniku obniżenia temperatur obiegu).

W artykule przedstawiono wyniki badań silnika 1HC102 uzyskane w wyniku sporządzania charakterystyk obciążeniowych dla prędkości obrotowych  $n = 1600 \text{ obr/min}$  i  $n = 1800 \text{ obr/min}$  dla dwóch różnych regulacji kąta wyprzedzenia wtrysku inicjującej zapłon dawki oleju napędowego  $\alpha_{i1} = 30^\circ \text{ OWK}$  przed GMP i  $\alpha_{i2} = 20^\circ \text{ OWK}$  przed GMP. Pierwsza z tych wartości jest charakterystyczna dla standardowej wersji silnika 1HC102, druga zaś wynika z badań optymalizacyjnych silnika dwupaliwowego wykonanych pod kątem możliwości uzyskania możliwie dużej mocy, poprawy sprawności ogólnej oraz poprawy składu spalin w porównaniu z wersją standardową.

Uzyskane wyniki w postaci charakterystyk obciążeniowych porównano z odpowiednimi charakterystykami dla silnika zasilanego standardowo.

## 2. Opis systemu zasilania paliwem LPG w fazie ciekłej

Schemat wtryskowego układu zasilania paliwem LPG przedstawiono na rys. 1.



Rys. 1. Schemat dwupaliwowego układu zasilania silnika o ZS z wtryskowym systemem doprowadzania LPG do kolektora dolotowego w fazie ciekłej

Fig. 1. The schema of dual-fuel feed system of diesel engine with injection's system of butane propane supply for intake manifold in liquid phase

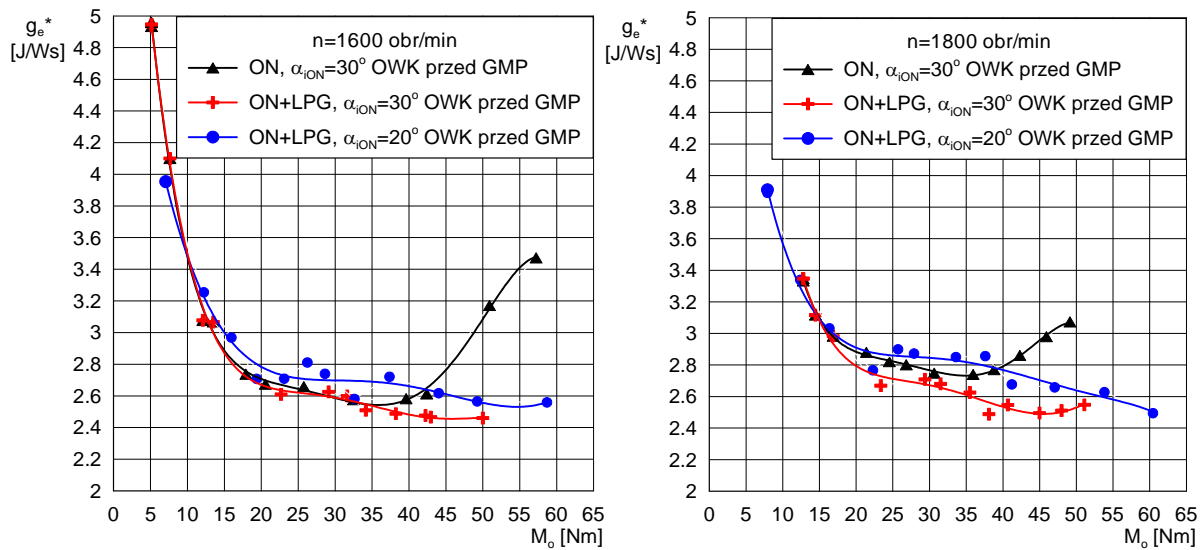
Paliwo LPG wtryskiwane jest do kolektora dolotowego fazy ciekłej przy użyciu wtryskiwacza, którego czas otwarcia oraz początek wtrysku zadawany jest sterownikiem elektronicznym.

Zmiana czasu otwarcia pozwala na dobór wielkości dawki LPG. Wybór chwili początku wtrysku daje możliwość synchronizacji wtrysku paliwa LPG z czasem otwarcia zaworu dolotowego.

W omawianej wersji rozwiązania układu zasilania regulacja mocy odbywa się na zasadzie zmiany składu mieszaniny paliwa LPG i powietrza. Towarzyszy temu znaczny zakres zmian składu mieszaniny LPG - powietrze – od bardzo ubogiego przy obciążeniach średnich, charakteryzującego się wartością współczynnika nadmiaru powietrza  $\lambda > 10$ , do składu  $\lambda = 2,5-3,5$  przy obciążeniu znamionowym silnika w zależności od wartości inicjującej zapłon dawki oleju napędowego. Warto tu zauważyć, że w warunkach obciążeń zbliżonych do znamionowych mieszanina LPG i powietrza jest stosunkowo uboga ( $\lambda = 2,5-3,5$ ), co ma duże korzystne znaczenie z punktu widzenia odsunięcia niebezpieczeństwa występowania przedwczesnych samozapłonów oraz zjawiska spalania stukowego tej mieszaniny po rozpoczęciu procesu spalania dawki oleju napędowego.

## 3. Wyniki badań w zakresie osiąarów silnika

Jak wspomniano we wprowadzeniu badania przeprowadzono w warunkach sporządzania charakterystyk obciążeniowych. Charakterystyki obciążeniowe jednostkowego zużycia energii zestawiono na rys. 2.



Rys. 2. Charakterystyki obciążeniowe jednostkowego zużycia energii dla wersji standardowej silnika zasilanego olejem napędowym, wersji dwupaliwowej z regulacją kąta wyprzedzenia wtrysku dawki inicjującej zapłon  $\alpha_{i1} = 30^\circ$  OWK przed GMP i wersji dwupaliwowej z regulacją kąta wyprzedzenia wtrysku dawki inicjującej zapłon  $\alpha_{i2} = 20^\circ$  OWK przed GMP

Fig. 2. Load engine performance of the specific energy consumption of for the standard- version of the engine supplied with diesel oil, the version of dual-fuel regulation of injection advance angle of initiating dose of ignition  $\alpha_{i1} = 30^\circ$  CA before TDC and the version dual-fuel with injection advance angle of initiating dose of ignition regulation  $\alpha_{i2} = 20$  CA before TDC

Dla dokonania porównań przyjęto parametr jednostkowego zużycia energii ze względu na różne wartości opałowe zastosowanych paliw (ON i LPG).

Z zamieszczonych wykresów wynika, że silnik zasilany dwupaliwowo charakteryzuje się wyższymi wartościami osiąganego maksymalnego momentu obrotowego w porównaniu z wersją standardową i jednocześnie poprawą sprawności ogólnej (obniżenia jednostkowego zużycia energii) wyraźnie widoczną w obszarze pełnych obciążeń.

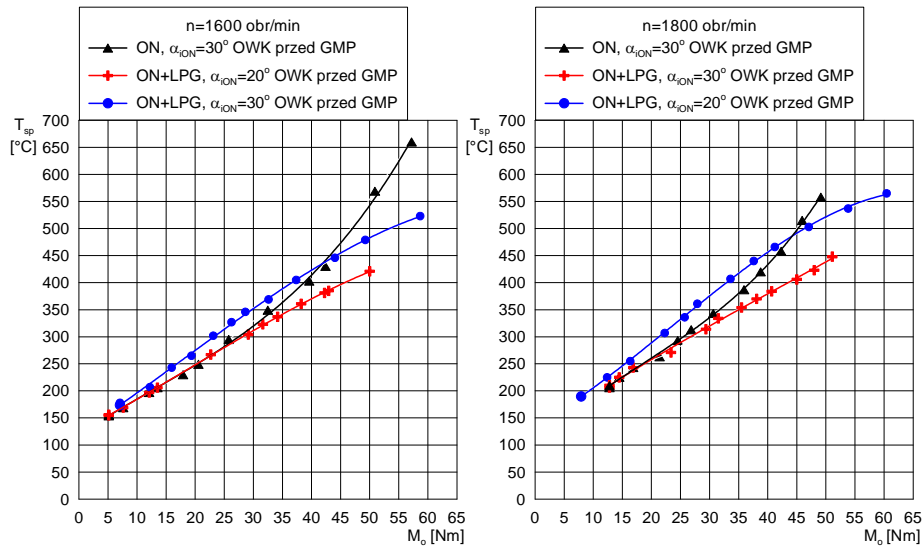
Należy tu dodać, że ograniczeniem momentu obrotowego w przypadku silnika standardowego jest wyraźne pojawienie się dymienia silnika, zaś w przypadku silnika dwupaliwowego jego twarda praca zbliżająca proces spalania do stukowego. Należy tu zauważyć, że zmiana regulacji początku wtrysku inicjującej zapłon dawki oleju napędowego w silniku dwupaliwowym z  $\alpha_{i1} = 30^\circ$  OWK przed GMP na  $\alpha_{i2} = 20^\circ$  OWK przed GMP skutkuje wzrostem osiąganego momentu obrotowego powyżej wartości charakterystycznej dla silnika standardowego. Towarzyszy temu niestety nieznaczny wzrost jednostkowego zużycia energii (nieznaczne pogorszenie sprawności ogólnej).

O ile bowiem opóźnienie początku wtrysku inicjującej zapłon dawki oleju napędowego do  $\alpha_{i2} = 20^\circ$  OWK przed GMP przesuwając proces spalania w kierunku suwu rozprężania obniża wartość ciśnień maksymalnych obiegu odsuwa niebezpieczeństwo pojawienia się spalania stukowego i pozwala w ten sposób na uzyskanie wyższych obciążeń silnika (większych wartości momentu obrotowego), to jednocześnie skutkuje wzrostem temperatury spalin, a zatem wzrostem strat wylotowych i w efekcie wpływa na podwyższenie wartości jednostkowego zużycia energii (rys. 3).

Poprawa sprawności ogólnej silnika dwupaliwowego, według wstępnej oceny autora opartej na analizie procesu spalania w silnikach dwupaliwowych zasilanych odparowanym LPG [7], [8], [9] wynika ze wzrostu sprawności cieplnej.

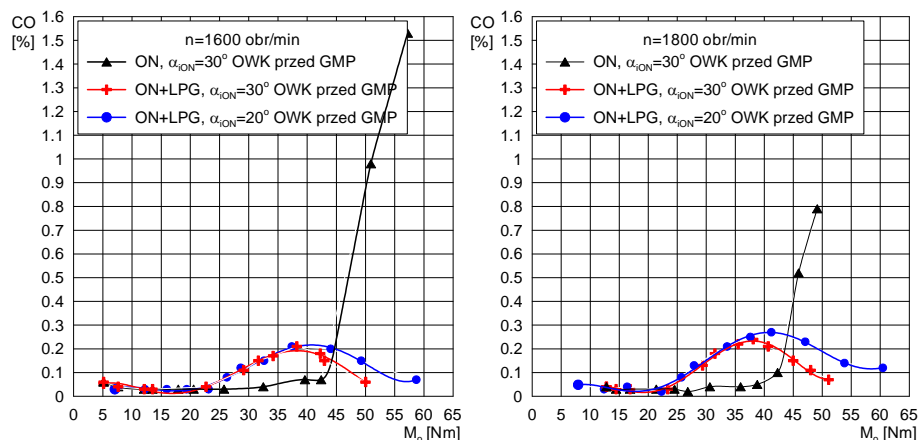
#### 4. Wyniki badań w zakresie zawartości składników w spalinach

W trakcie sporządzenia charakterystyk obciążeniowych jednostkowego zużycia energii mierzono zawartość składników w spalinach oraz ich zadymienie. Do tego celu wykorzystano zestaw diagnostyczny AVL DiGas 465 oraz analizatory Beckman 951 ( $\text{NO}_x$ ) i 402 (HC). Wyniki zestawiono na rys. 4 - 8.



Rys. 3. Przebieg zamiany temperatury spalin badanych wersji silnika

Fig. 3. The course of temperature variation of exhaust gases examined versions of the engine

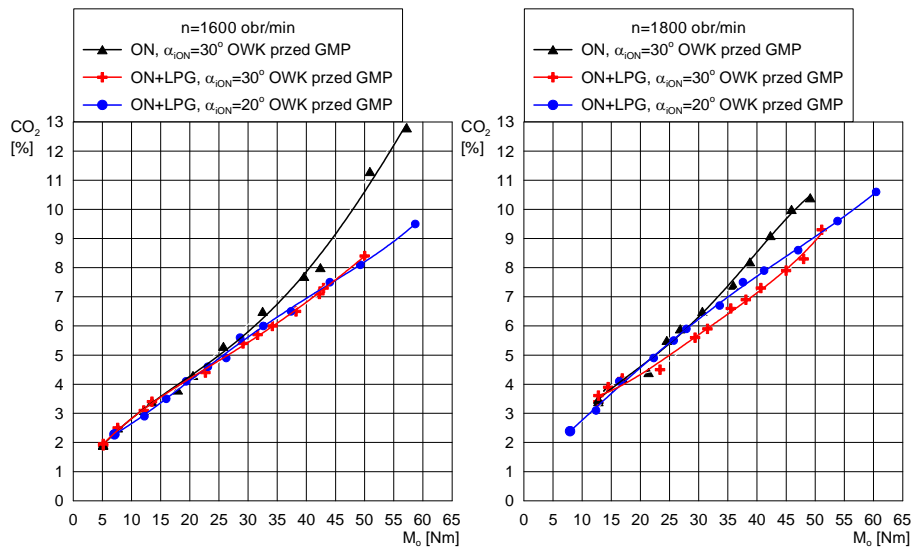


Rys. 4. Porównanie zawartości CO w spalinach zarejestrowanej w warunkach sporządzania charakterystyk obciążeniowych silnika zasilanego standardowo olejem napędowym oraz dwupaliwowo z wtryskiem LPG w fazie ciekłej

Fig. 4. The comparison of the CO content in exhaust gases registered in conditions of preparing of load performance of engine supplied standard diesel oil and dual-fuel propane butane with injection in liquid phase

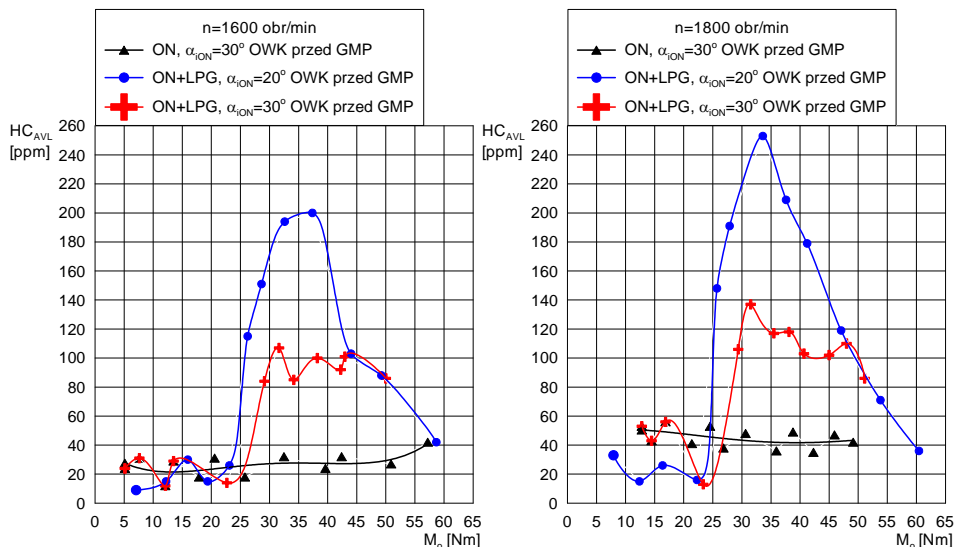
Dla lepszego zrozumienia i przeanalizowania zmian zawartości poszczególnych składników w spalinach warto przytoczyć wykresy zmienności wartości współczynnika nadmiaru powietrza (sumarycznego dla obu paliw). Wykresy te zamieszczone zostały na rys. 9. Charakterystyki zmienności zawartości CO w spalinach wykazują, że silnik zasilany dwupaliwowo w obszarze częściowych obciążeń cechuje się większą wartością zawartości CO w spalinach niż silnik zasilany standardowo. Sytuacja ulega wyraźnej zmianie na korzyść silnika zasilanego dwupaliwowo przy obciążeniach zbliżonych do maksymalnych. Wzrost

zawartości CO w spalinach silnika dwupaliwowego w obszarze częściowych obciążeniach wynika zdaniem autora z niecałkowitego spalania bardzo ubogiej mieszaniny LPG i powietrza, w tej części komory spalania, która nie jest objęta strugą i obszarem palności dawki oleju napędowego. Sprzyja temu niekorzystny kształt komory spalania poza częścią kulistą w tłoku prowadzący najprawdopodobniej do wygaszania płomienia.



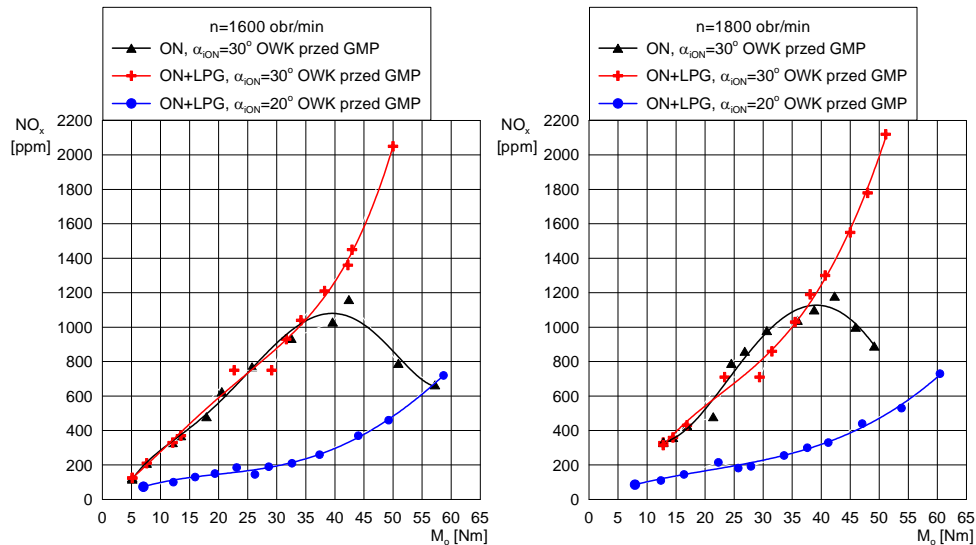
Rys. 5. Porównanie zawartości  $CO_2$  w spalinach zarejestrowanej w warunkach sporządzania charakterystyk obciążeniowych silnika zasilanego standardowo olejem napędowym oraz dwupaliwowo z wtryskiem LPG w fazie ciekłej

Fig. 5. The comparison of the  $CO_2$  content in exhaust gases registered in conditions of preparing of load performance of engine supplied standard diesel oil and dual-fuel propane butane with injection in liquid phase



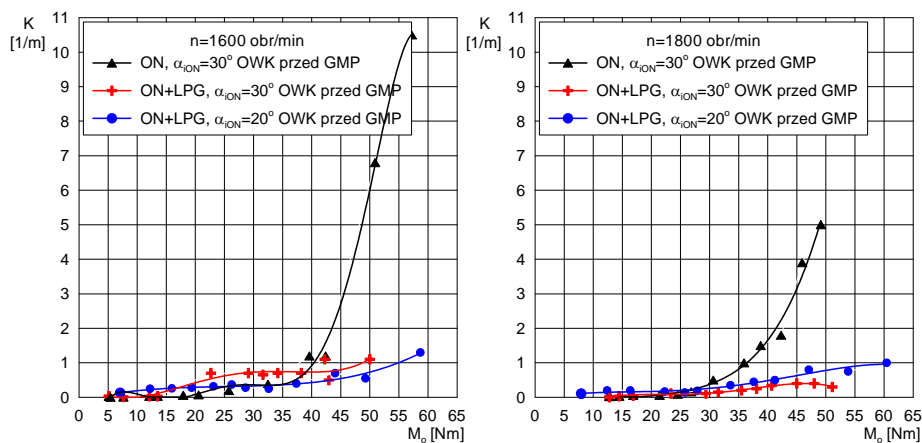
Rys. 6. Porównanie zawartości HC w spalinach zarejestrowanej w warunkach sporządzania charakterystyk obciążeniowych silnika zasilanego standardowo olejem napędowym oraz dwupaliwowo z wtryskiem LPG w fazie ciekłej

Fig. 6. The comparison of the HC content in exhaust gases registered in conditions of preparing of load performance of engine supplied standard diesel oil and dual-fuel propane butane with injection in liquid phase



Rys. 7. Porównanie zawartości  $NO_x$  w spalinach zarejestrowanej w warunkach sporządzania charakterystyk obciążeniowych silnika zasilanego standardowo olejem napędowym oraz dwupaliwowo z wtryskiem LPG w fazie ciekłej

Fig. 7. The comparison of the  $NO_x$  content in exhaust gases registered in conditions of preparing of load performance of engine supplied standard diesel oil and dual-fuel propane butane with injection in liquid phase



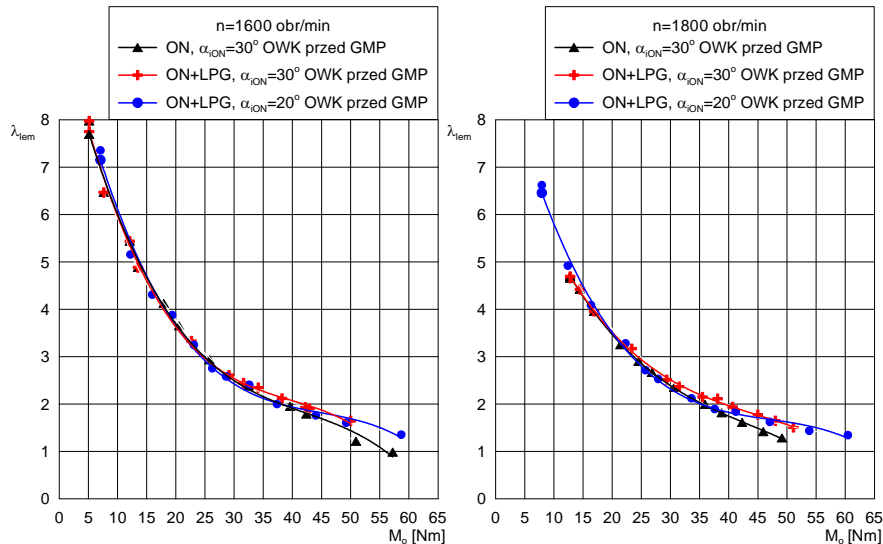
Rys. 8. Porównanie zadymienia spalin  $K$  zarejestrowanego w warunkach sporządzania charakterystyk obciążeniowych silnika zasilanego standardowo olejem napędowym oraz dwupaliwowo z wtryskiem LPG w fazie ciekłej

Fig. 8. The comparison of  $K$  exhaust gases smokiness registered in conditions of preparing of load performance of engine supplied standard diesel oil and dual-fuel propane butane with injection in liquid phase

W obszarze obciążeń zbliżonych do maksymalnych mieszanka LPG i powietrza staje się bogatsza. Wartość współczynnika nadmiaru powietrza dla silnika dwupaliwowego przyjmuje wyższe wartości (rys. 9), co jest efektem poprawy sprawności ogólnej silnika dwupaliwowego, a także schłodzenia ładunku powietrza w wyniku wtrysku LPG w fazie ciekłej. Oba te zjawiska sprzyjają całkowitemu spalaniu dawki zarówno oleju napędowego (z tytułu większej wartości  $\lambda$ ) jak i LPG z tytułu większej podatności na zapłon bogatszej w tym obszarze mieszanki LPG i powietrza.

Zawartość  $CO_2$  (rys. 5) nieznacznie zmniejsza się w przypadku zastosowania zasilania dwupaliwowego w obszarze obciążeń zbliżonych do maksymalnych. Wynika to z poprawy sprawności w tym obszarze obciążeń i zmniejszeniu sumarycznej dawki paliwa spalanej w silniku dwupaliwowym.





Rys. 9. Charakterystyki zmienności współczynnika nadmiaru powietrza  $\lambda$  dla badanych wersji silnika  
 Fig. 9. Performance of variability of air excess coefficient for examined version of the engine

Zawartość HC w spalinach silnika dwupaliwowego jest wyższa w obszarze częściowych obciążeń w porównaniu ze standardową wersją silnika. W obszarze obciążeń maksymalnych zawartości te stają się porównywalne dla obu wersji silników. Wzrost zawartości tego składnika w obszarze częściowych obciążeń wynika zdaniem autora z niecałkowitego spalania paliwa LPG (z uzasadnieniem jak w wypadku emisji CO).

Warto tu zauważyć, że poziom zawartości węglowodorów silnie zależy od przyjętej regulacji kąta wtrysku inicjującej zapłon dawki oleju napędowego. Późniejszemu wtryskowi tej dawki ( $\alpha_{i2} = 20^\circ$  OWK przed GMP) towarzyszy wyraźny wzrost zawartości HC. Wydaje się, że za to zjawisko odpowiedzialne jest przesunięcie procesu spalania w kierunku suwu wylotu. Podwyższenie zawartości HC w spalinach silnika dwupaliwowego sprzyja także fakt niecałkowitego spalania dawki oleju napędowego z tytułu jej wtrysku do mieszaniny powietrze-LPG, a nie do ładunku powietrza, jak w przypadku silnika zasilanego standardowo. Zawartość tlenków azotu w przypadku zasilania dwupaliwowego rośnie wraz ze wzrostem obciążenia. Jest to efekt wzrostu temperatury obiegu, ale także wzrostu wartości współczynnika nadmiaru powietrza  $\lambda$  (rys. 9). Wyraźne załamanie krzywej zawartości  $\text{NO}_x$  w silniku zasilanym standardowo wynika ze zbliżania do granicy dymienia tego silnika już przy obciążeniu rzędu 40-50 Nm. Widać to wyraźnie na krzywej obrazującej zadymienie spalin (rys. 8).

Charakterystyczną cechą jest wyraźne zmniejszenie zawartości  $\text{NO}_x$  w spalinach silnika dwupaliwowego z „późniejszym” wtryskiem dawki oleju napędowego ( $\alpha_{i2} = 20^\circ$  OWK przed GMP). W tym przypadku przebieg spalania jest przesunięty w kierunku suwu wylotu, sam proces przebiega przy mniejszych wartościach ciśnień, a zatem także i temperatur, co sprzyja zmniejszeniu emisji  $\text{NO}_x$ .

Zadymienie spalin silnika dwupaliwowego jest wyraźnie mniejsze niż dla przypadku zasilania standardowego. Jest to cecha silników zasilanych paliwami gazowymi.

## 5. Podsumowanie

- Silnik o ZS zasilany dwupaliwowo LPG wtryskiwanym w fazie ciekłej do kolektora dolotowego charakteryzuje się poprawą sprawności ogólnej o obszarze obciążeń zbliżonych do maksymalnych, a także wzrostem mocy silnika. Należy tu dodać, że zastosowanie wtryskowej metody dostarczania paliwa LPG wpływa także na wzrostu moc



silnika dwupaliwowego w porównaniu z przypadkiem zasilania LPG z wykorzystaniem odparowywacza i mieszalnika (praca autora poz. 8 i 9 literatury).

- Silnik o ZS zasilany dwupaliwowo LPG wtryskiwanym do kolektora dolotowego w fazie ciekłej w obszarze obciążeń zbliżonych do maksymalnych w porównaniu do wersji standardowego zasilania charakteryzuje się zmniejszeniem zawartości CO, nieznacznym zmniejszeniem zawartości CO<sub>2</sub>, porównywalną zawartością HC, mniejszą zawartością NO<sub>x</sub> (po optymalizacji regulacji kąta wyprzedzenia wtrysku inicjującej zapłon dawki oleju napędowego) oraz wyraźnie zmniejszonym zadymieniem spalin.
- Silnik zasilany dwupaliwowo LPG wtryskiwanym do kolektora dolotowego w obszarze obciążeń częściowych w porównaniu do wersji standardowej zasilania charakteryzuje się podwyższoną zawartością CO i HC.

## Literatura

- [1] Takatsuto, R., Igarashi, T., Iida, N., *Auto Ignition and Combustion of DME and n-Butane/Air Mixtures in Homogeneous Charge Compression Ignition Engine*. The Fourth International Symposium COMODIA '98 Proceedings, Japan, Kyoto 1998.
- [2] Kusaka, J., Daisho, Y., Kihara, R., Saito, T., *Combustion and Exhaust Gas Emission Characteristics of a Diesel Engine Dual-Fuelled with Natural Gas*. The Fourth International Symposium COMODIA '98 Proceedings, Japan, Kyoto 1998.
- [3] Ogawa, H., Chenyu, L., Tosaka, S., Fujiwara, Y., Miyamoto, N., *Combustion Mechanism Analysis, with In-Chamber Gas Composition Measurements in a Premixed Lean Compression Ignition Engine*. The Fourth International Symposium COMODIA '98 Proceedings, Japan, Kyoto 1998.
- [4] Furutani, M., Ohta, Y., Kono, M., Hasegawa, M., *An Ultra-Lean Premixed Compression-Ignition Engine Concept and its Characteristics*. The Fourth International Symposium COMODIA '98 Proceedings, Japan, Kyoto 1998.
- [5] Stelmasiak, Z., Wojciechowska-Trombska, A., *Wpływ kąta wyprzedzenia wtrysku paliwa ciekłego na parametry pracy i emisję silnika dwupaliwowego zasilanego gazem ziemnym i olejem napędowym*. Journal of KONES. Combustion Engines, vol. 8, No 3-4, 2001.
- [6] Stelmasiak, Z., *Wpływ wielkości dawki inicjującej oleju napędowego na parametry pracy dwupaliwowego silnika zasilanego olejem napędowym i gazem ziemnym*. Journal of KONES. Combustion Engines, vol. 8, No 3-4, 2001.
- [7] Luft, S., *Dwupaliwowy silnik o zapłonie samoczynnym wybrane zagadnienia procesu spalania*. Journal of KONES vol. 11, No 3-4, 2004.
- [8] Luft, S., Michalczewski, A., *Aspekt ekologiczny dwupaliwowego zasilania silnika o zapłonie samoczynnym głównie mieszaniną gaz propan-butan (LPG)*. Materiały konferencyjne III Ogólnopolskiej Konferencji Naukowo-Technicznej Pojazd a Środowisko, Politechnika Radomska 2001.
- [9] Luft, S., Michalczewski, A., *Analiza wybranych wskaźników pracy dwupaliwowego silnika o zapłonie samoczynnym zasilanego głównie mieszaniną gazów propan-butan*. Materiały konferencji Autoprogress-KONMOT 2002.

