



## **Badanie właściwości ekologicznych silnika samochodowego o zapłonie iskrowym zasilanego mieszanką propan-butan**

*Piotr Piątkowski, Tadeusz Bohdal  
Politechnika Koszalińska*

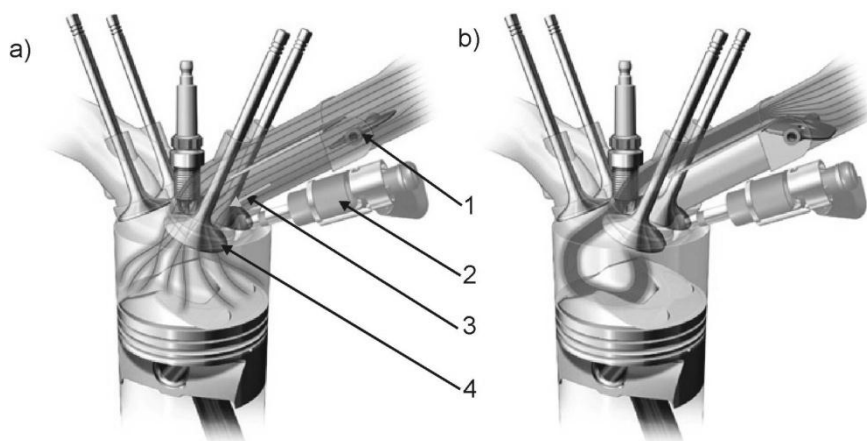
### **1. Wprowadzenie**

Właściwości paliwa oraz sposób tworzenia mieszanki palnej silnika wywiera zdecydowany wpływ na parametry jego pracy. W przypadku silników ZI (z zapłonem iskrowym) stosowano i stosuje nadal się dwa rodzaje systemów zasilania mianowicie gaźnikowy i wtryskowy. Obecnie układami dominującymi są systemy elektronicznie sterowanego wtrysku przerywanego. Systemy wtryskowe współcześnie są zintegrowane z układami zapłonowymi i systemami sterującymi procesem wymiany ładunku. Są one odpowiedzialne za przygotowanie i zapłon mieszanki palnej. Wtrysk paliwa może odbywać się pośrednio do kolektora dolotowego lub bezpośrednio do komory spalania (rys. 1).

Jednym z warunków optymalnej pracy silnika w zadanych warunkach jest odpowiednio przygotowana i dostarczona porcja mieszanki paliwowej – powietrznej, która znajdzie się w obiegu spalinowego silnika tłokowego. Jej skład jest jednym z czynników, decydujących o przebiegu

procesu spalania, co bezpośrednio przekłada się na takie parametry jak; moc efektywna, moment obrotowy, jednostkowe zużycie paliwa i składniki spalin. Parametry te odzwierciedlają pośrednio układ sterowania silnikiem oraz budowę samego silnika pod względem efektywności jego pracy i zdolności dostosowania się do zmiennych warunków zewnętrznych.

Obecnie ze względów ekonomicznych i ekologicznych coraz więcej pojazdów zasilanych jest paliwem alternatywnym dla benzyny [4, 5, 8]. Jest to najczęściej mieszanina propanu i butanu znane jako LPG (Liquid Petroleum Gas – ciekłe paliwo gazowe). Systemy zasilania tym paliwem mają różne postacie ewolucji technicznej.



**Rys. 1.** Dopływ ładunku w silniku o wtrysku bezpośrednim paliwa w zależności od trybu pracy; a – mieszanina homogeniczna, b – mieszanina uwarstwiona, 1 – przepustnica kierująca, 2 – wtryskiwacz, 3 – linie obrazujące kierunek przepływu świeżego ładunku, 4 – zawór dolotowy [9]

**Fig. 2.** The combustion charge inflow in the direct fuel injection engine by the type of work; a – homogenous charge, b – stratified charge, 1 – steering throttle, 2 – injector, 3 – charge inflow directions line, 4 – intake valve

Najczęściej stosowane ze względów ekonomicznych (stosunkowo niska cena montażu i elementów składowych) są układy zasilania LPG pierwszej i drugiej generacji. Ze względu na wymogi norm czystości spalin [1, 4, 5] oraz uzyskiwane wartości parametrów pracy silnika układami wiodącymi są układy zasilania wtryskowego.

## 2. Przedmiot badań i stanowisko badawcze

Przymiotem badań był czterosurowy tłokowy silnik spalinowy z zapłonem iskrowym zasilany metodą pośredniego wtrysku wielopunktowego. Przeprowadzono adaptację układu zasilania w paliwo silnika do zasilania fazą ciekłą LPG. Tak zbudowany układ miał za zadanie wtryskiwać do kolektora dolotowego mieszanek propan-butan w stanie ciekłym. Następnie, w wyniku rozprężania, paliwo zmieniało stan skupienia na gazowy i w takiej postaci trafiało do komory spalania silnika. Dla porównania wyników badań przedstawiono także wyniki badań parametrów pracy silnika zasilanego benzyną przez system wtrysku jednopunktowego oraz gazem przez zastosowanie układu mieszalnikowego drugiej generacji. Wykonano pomiary podstawowych parametrów pracy silnika takich jak: moc efektywna, moment obrotowy, jednostkowe zużycie paliwa oraz określono zawartość składników spalin takich jak, tlenek i dwutlenek węgla, węglowodory, tlen oraz określono współczynnik nadmiaru powietrza lambda ( $\lambda$ ). Podczas badań posłużono się [2, 7, 8]:

- hamownią silnikową Automex wyposażoną w urządzenia kontrolno sterujące AMX211 oraz AMX201,
- czterogazowym analizatorem spalin Grundig LS 5000,
- paliwomierzem Automex AMX 212F.

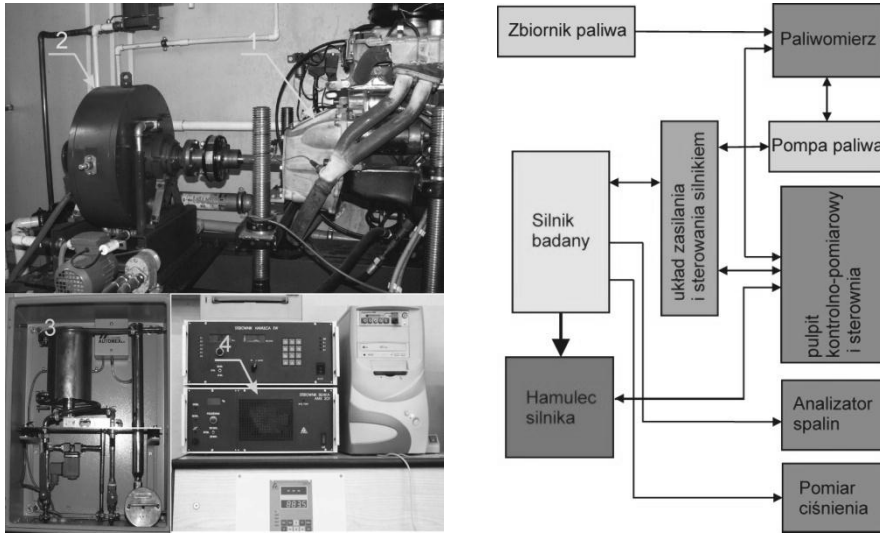
Schemat oraz zdjęcia wybranych elementów stanowiska badawczego przedstawiono na rysunku 2.

## 3. Wyniki adaptacji silnika FSO CE do zasilania mieszaną propan-butan w fazie ciekłej

Na podstawie pomiarów eksperymentalnych są wykonano charakterystyki prędkościowe mocy pełnej i mocy dławionych (niepełnego otwarcia przepustnicy), silnika zasilanego benzyną oraz LPG stosownie do metody zasilania.

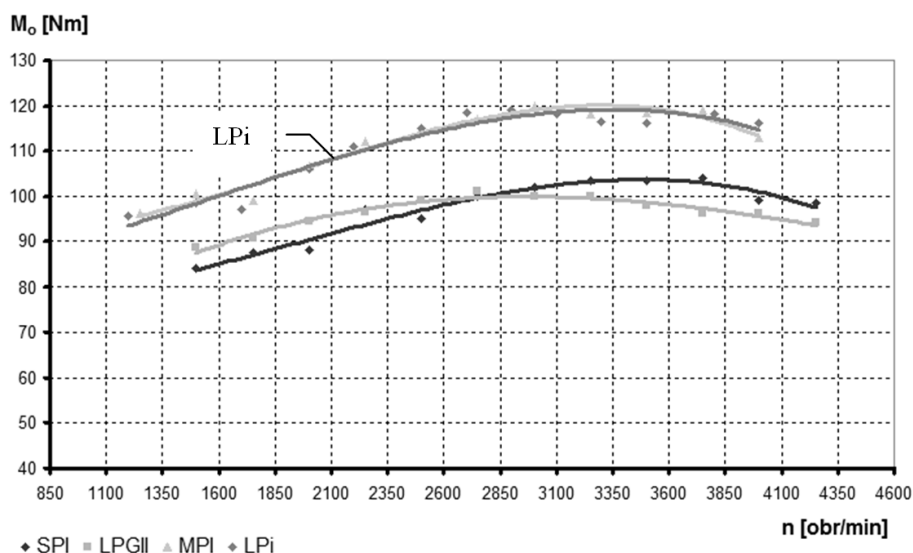
W przedstawionych poniżej analizach, posłużono się skrótami informującymi o metodzie zasilania silnika i rodzaju paliwa, które oznaczają: *SPI* – system zasilania silnika benzyną metodą wtrysku pośredniego, przerywanego jednopunktowego,

- LPGII* – jako oznaczanie układu zasilanie mieszanką propan-butan drugiej generacji (układ mieszalnikowy ze sprzężeniem zwrotnym lambda),
- MPI* – system zasilania benzyną metodą wtrysku pośredniego przerywanego wielopunktowego,
- LPi* – system zasilania mieszanką propan-butan w fazie ciekłej metodą wtrysku pośredniego przerywanego wielopunktowego.



**Rys. 2.** Schemat stanowiska badawczego; 1 – badany silnik, 2 – hamlec elektrowirowy, 3 – paliwomierz, 4 – urządzenia kontrolno sterujące hamowni  
**Fig. 2.** Engine test stand scheme; 1 – tested engine, 2 – engine brake, 3 – fuel consumption meter, 4 – steering desk

Zestawienie charakterystyk prędkościowych momentu i mocy maksymalnej (rys. 3 i 4) wykazuje znaczną różnicę w ich przebiegu i wartości ze względu na rodzaj układu zasilania. Systemy wtrysku wielopunktowego uzyskano wyższą wartość mocy w mierzonych stanach pracy silnika. Zasilanie silnika benzyną oraz LPG w stanie ciekłym za pomocą wielopunktowego wtrysku pośredniego, nie wykazuje znacznych różnic w charakterze zmian i wartości momentu obrotowego. Zależność ta wykazuje, że adaptacja silnika do zasilania gazem propan-butan w stanie ciekłym nie wpływa ujemnie na parametry użytkowe pracy, związane z dynamiką silnika.



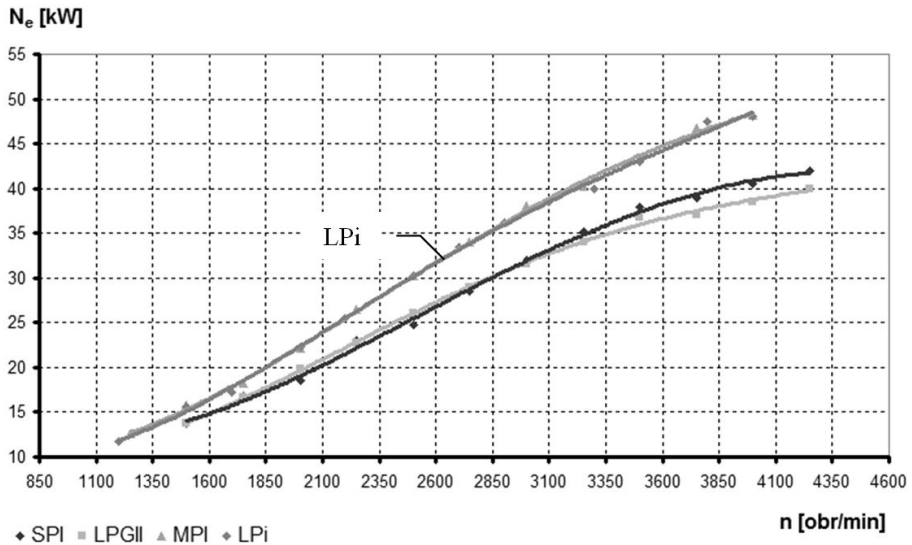
**Rys. 3.** Charakterystyki prędkościowe momentu obrotowego ( $M_o$ ) przy pełnym otwarciu przepustnicy dla różnych systemów zasilania benzyną i LPG;  $n$  – prędkość obrotowa

**Fig. 3.** Impact of properties of fuel system on engine torque ( $M_o$ );  $n$  – engine speed

Właściwości mechaniczne silnika zasilanego mieszanką propan-butan uzyskane zostały w przypadku algorytmu sterowaniu układu (ECU), przystosowanego do zasilania benzyną. Dopasowanie układu sterowania odbyło się tylko w oparciu o działanie układu adaptacyjnego sterownika benzynowego. Odpowiedni dobór wartości parametrów sterowania, takich jak; kąt wyprzedzenia zapłonu, czas otwarcia wtryskiwacza, mogłoby odpowiednio poprawić przebieg i wartość tych wielkości.

Podobny efekt zmian momentu i mocy silnika zaobserwowano także podczas sporządzania charakterystyk mocy dławionych [2, 7].

Przebieg wartości mocy i momentu obrotowego dla zasilania benzyną jak i mieszanki propan-butan nie wykazują większych różnic. Świadczy to o możliwości wykorzystania algorytmu sterowania wykorzystującego paliwo tradycyjne, do zastosowania go w przypadku zasilania mieszanką propan-butan.



**Rys. 4.** Charakterystyka prędkościowa mocy efektywnej ( $N_e$ ) przy pełnym otwarciu przepustnicy dla różnych systemów zasilania benzyną i LPG;  $n$  – prędkość obrotowa

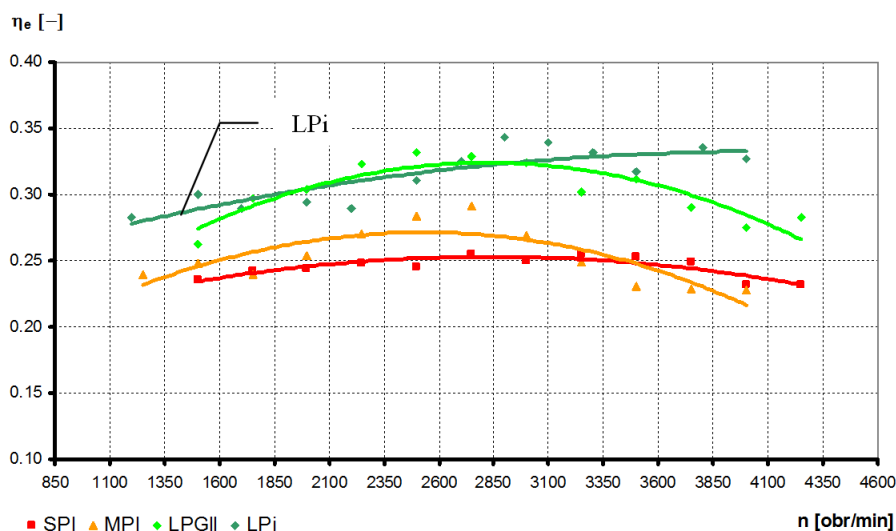
**Fig. 4.** Impact of properties of fuel system on engine power ( $N_e$ );  $n$  – engines speed

Stwierdzono różnicę w wartości wskaźnika sprawności energetycznej. Obie metody zasilania mieszanką propan-butan wykazały większą sprawność w stosunku do zasilania benzynowego (rys. 5). Wynika to między innymi z następujących przyczyn:

- podatności na zmianę stanu skupienia,
- wartości opałowej,
- opóźnienia zmiany fazy skupienia (delay time),
- masy jednostkowej paliwa,
- podatności na wymieszanie z powietrzem,
- różnej temperatury spalania,
- stopnia napełnienia cylindrów,
- inne.

W przypadku zasilania mieszanką propan-butan drugiej generacji, wykres wyznaczony na podstawie punktów pomiarowych zakreślony jest

na mniejszym promieniu, niż to reprezentują pozostałe metody zasilania. Związane jest to z charakterystyką działania takiego układu zasilania. Jest to typowy układ mechanicznej regulacji dawki paliwa gazowego z zastosowanym systemem korekcji elektronicznej, ze sprzężeniem zwrotnym Lambda. Układ taki posiada wszelkie cechy regulacji mechanicznej. Pewne usprawnienie zapewnia korekta elektroniczna, która znacznie poprawia pracę podstawowego systemu regulacji.

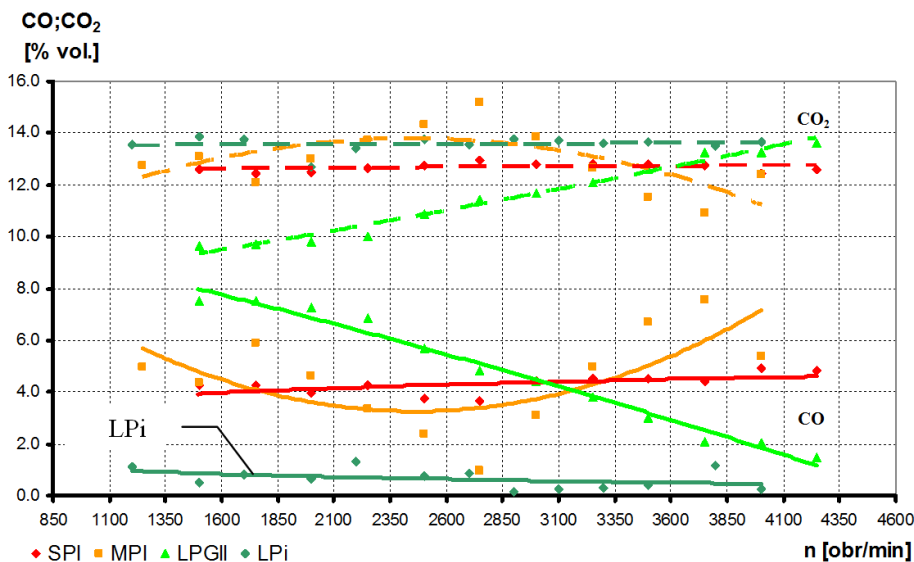


**Rys. 5.** Zależność sprawności energetycznej ( $\eta_e$ ) od prędkości obrotowej ( $n$ ) przy pełnym otwarciu przepustnicy w różnych systemach zasilania benzyną i LPG

**Fig. 5.** Impact of properties of fuel system on the engines efficiency ( $\eta_e$ ) at full load;  $n$  – engine speed

Zachodzi tu także pewna niekonsekwencja. Związana ona jest ze sprawnością i wartością mocy w przypadku układu II-giej generacji zasilania LPG. Z rysunku 5 wynika, że sprawność silnika w tym przypadku jest wyższa, niż w przy zasilaniu benzyną, natomiast wartości mocy i momentu obrotowego są niższe. Powodem tej niekonsekwencji jest stopień wykorzystania energii chemicznej mieszanki benzynowo-powietrznej oraz gazowo-powietrznej. Pomimo szeregu niekorzystnych właściwości układu zasilania drugiej generacji mieszanką propan-butan, paliwo, które dostarczone zostało do komory spalania jest lepiej (pełniej)

wykorzystane. Niższe wartości mocy i momentu związane są z masą paliwa napływającego do cylindra w czasie cyklu ssania. Stosunkowo mała masa przypadająca na jednostkę objętości niesie ze sobą mniejszą ilość energii chemicznej do zamiany na energię mechaniczną.



**Rys. 6.** Charakterystyka zawartości tlenu i dwutlenku węgla w spalinach w funkcji prędkości obrotowej wału dla pełnego otwarcia przepustnicy i przy zastosowaniu różnych metod zasilania benzyną i LPG; n – prędkość obrotowa  
**Fig. 6.** Impact of properties of fuel system on the emissions level of carbon monoxide and dioxide at full load; n – engine speed

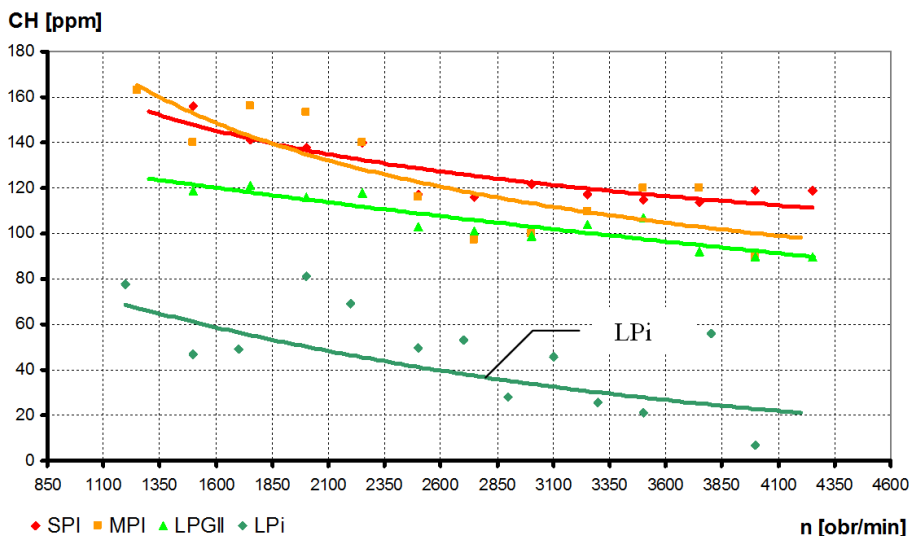
Z wykresu  $\eta_e = f(n)$  przedstawionego na rysunku 5 wynika także wpływ stanu skupienia i rozdrobnienia paliwa na jednorodność mieszanki paliwowo-powietrznej. Problem ten jest podejmowany przez wielu badaczy [2, 3], którzy wykazali, iż ma on istotny wpływ na przebieg procesu spalania i na wartości parametrów użytkowych oraz ekologiczno-ekonomicznych silnika. W przypadku mieszanki gazowego LPG i powietrza, wymieszanie następowało najlepiej. Wynikiem tego jest wartość sprawności energetycznej silnika zasilanego tą metodą. Natomiast przebieg krzywej związany jest z układem regulacji dawki paliwa gazowego.



Wykresy zawartości tlenu i dwutlenku węgla (rys. 6) oraz nie-spalonych węglowodorów (rys. 7) potwierdzają wcześniejsze wnioski z analizy mocy i momentu obrotowego oraz sprawności energetycznej. Wyniki badań przedstawione na rysunkach 6 i 7 wykazują przydatność LPG jako paliwa do zasilania silników spalinowych, pod względem składników spalin. Bardzo korzystnie wypada metoda zasilania wtryskiem wielopunktowym z fazą ciekłą mieszanki propan-butan. Zarówno w przypadku charakterystyki zmiany zawartości tlenu węgla, jak i nie-spalonych węglowodorów wykazano najmniejszą ich koncentrację w jednostce objętości.

Zarejestrowany poziom emisji tlenu oraz dwutlenek węgla wskazują na przydatność paliwa i zastosowanej metody do zasilania silników spalinowych. Zawartość tych gazów spalinowych świadczy o wykorzystaniu energii chemicznej, jednorodności mieszanki paliwowo-powietrznej, właściwym ukształtowaniu komory spalania, czy też innych właściwościach związanych z przebiegiem procesu spalania i przygotowania mieszanki do spalania.

Na charakterystykach opisujących zawartości CO i CO<sub>2</sub>, odnoszącej się do metody zasilania za pomocą układu drugiej generacji LPG wykazana jest znaczna różnica zarówno w tendencji przebiegu charakterystyk jak i w wartościach osiąganych przez te składniki spalin silnika. Należy zaznaczyć, że przyjęty układ regulacji oparty jest na prostych zależnościach mechanicznych (tylko korygowanych w niewielkim zakresie przez układ regulacji elektronicznej ze sprzężeniem zwrotnym lambda). Pomiary przebiegały przy maksymalnym obciążeniu dla poszczególnych prędkości obrotowych. Mechanika układu sterowania okazała się niedostosowana do tak zmiennych warunków pracy i układ regulacji nie zapewniał optymalnego składu mieszanki paliwowo-powietrznej. Dopiero po osiągnięciu odpowiedniej prędkości obrotowej był on w stanie konkurować z pozostałymi metodami zasilania. Stąd wniosek, że należy bardzo dokładnie dobierać elementy składowe układu zasilania oraz dokonać regulacji tak, aby możliwe było zapewnienie optymalnego składu mieszanki palnej pod względem zarówno emisji składników spalin jak i parametrów użytkowych silnika.



**Rys. 7.** Zależność zawartości węglowodorów (CH) od prędkości obrotowej silnika dla 100% otwarcia przepustnicy przy zasilaniu benzyną i LPG przy różnych systemach zasilania; n – prędkość obrotowa

**Fig. 7.** Impact of properties of fuel system on level of hydrocarbons emission (HC) at full load; n – engine speed

Charakterystyka przedstawiona na rysunku 7 odzwierciedla zmianę zawartości węglowodorów w spalinach silnika zasilanego benzyną i mieszanką propan-butan, dozowaną za pomocą różnych metod zasilania, w przypadku pełnego obciążenia silnika. W tych warunkach pracy układ i metoda zasilania mają wpływ na kształtowanie wartości parametrów pracy silnika. Czynniki te są tak ważne, ponieważ progiem decyzyjnym jest zachowanie maksymalnej mocy efektywnej silnika, przy umiarkowanym poziomie emisji spalin. Przebieg zmiany zawartości węglowodorów świadczy o walorach użytkowych metody zasilania, jak i samego paliwa. Powodem tego są właściwości paliwa oraz metoda zasilania. Pojawia się jednak, dodatkowe zjawisko o szczególnym nasileniu, tylko dla tej metody i paliwa zasilającego. Zjawisko to, związane jest ze zmianą ciśnienia paliwa gazowego (proces rozprężania).

Polega ono na tym, że w momencie, w którym paliwo zaczyna wpływać z wtryskiwacza zmniejsza się jego ciśnienie. Paliwo zaczyna gwałtownie wrzeć i podczas tej przemiany fazowej pobiera ciepło z oto-

czenia (reakcja endotermicznego rozprężania). W wyniku tego zjawiska temperatura otoczenia gwałtownie spada, przez co zmniejsza się lokalnie ciśnienie w kolektorze dolotowym. Wskutek tego następuje napływ świeżego powietrza do strefy zmiany fazowej paliwa. Skutkuje to zwiększoną gęstością mieszanki paliwowo-powietrznej, oczekującej na zassanie do komory spalania. Obniża się temperatura wewnątrz komory spalania i dzięki temu, w tej samej objętości, przy zadanej masie paliwa, większa jest ilość tlenu w mieszance. Skutkuje to tym, że paliwo ma lepszy „dostęp” do tlenu i lepiej się spala, a dyfuzja wzajemna odparowanego paliwa i powietrza dodatkowo poprawia przebieg tego procesu. Potwierdzają to wyniki badań zawartości tlenku i dwutlenku węgla w spalinach przedstawione na rysunku 6, gdzie system wtrysku wielopunktowego fazy ciekłej LPG przyczynił się do osiągnięcia najniższego poziomu emisji tlenku węgla, natomiast zawartość dwutlenku węgla utrzymywała się poniżej wartości 14% udziału objętościowego.

#### **4. Podsumowanie**

Podsumowując przedstawione wyniki badań eksperymentalnych stwierdzono że:

1. zasilanie silnika ZI metodą wtrysku wielopunktowego fazy ciekłej LPG pozwala nie zmniejszyć wartości mocy i momentu obrotowego silnika w odniesieniu do zasilania benzyną,
2. metoda wtrysku fazy ciekłej LPG charakteryzuje się najniższym poziomem emisji tlenku węgla i węglowodorów,
3. zasilanie wtryskowe fazą ciekłą LPG pozwala uzyskać wyższe wartości sprawności energetycznej silnika,
4. algorytm sterowania silnikiem stworzony dla układu zasilania benzyną może być z powodzeniem wykorzystany do sterowania gazowym układem zasilania,
5. stosując wtryskiwacze LPG o podobnych parametrach elektrycznych jak wtryskiwacze benzynowe można wykorzystać sterownik benzynowy jako układ sterownia wtryskiwaczami gazowymi.

## Literatura

1. Dz. U. nr 154 z 29.12.2001.
2. **Bohdal T., Piątkowski P., Lewkowicz R.:** *Thermoecological assessment of I.C. engine efficiency*. Heat Transfer and Renewable Sources of Energy 2006.
3. **Lenz H.P. at all:** *Mixture formation in Spark-Ignition engines*, SAE-Springer Verlag, Wien-New York 1992.
4. **Luft S.:** *Podstawy budowy silników*. WKŁ Warszawa 2003.
5. **Majerczyk A., Taubert Sł.:** *Układy zasilania gazem propan-butan*, WKŁ Warszawa 2003.
6. **Piåtkowski P.:** *Sprawozdanie z badañ silnika tåokowego silnika spalino-wego zasilanego fazå ciekåå LPG*. Politechnika Koszaliñska. Koszalin 2006. praca niepublikowana.
7. **Piåtkowski P.:** *Zasilanie ciekåym gazem – czy to tylko ekonomia?* WUPK Koszalin 2005.
8. [www.automobilesreview.com](http://www.automobilesreview.com)

## Testing of Ecological Properties of Spark Ignition Engine Fed with LPG Mixture

### Abstract

Attribute of the study was four-stroke piston internal combustion engine with spark ignition fed by indirect multipoint injection method. Adaptation of the engine fuel supply was conducted in order to feed the engine with liquid phase LPG.

Engine fed by multiple injection of the liquid phase LPG has not reduced values of power and torque in relation to petrol.

Method of injection of liquid phase LPG is characterized by the lowest level of carbon monoxide and hydrocarbons emission.

Supply with liquid phase LPG injection allows to achieve higher energy efficiency of the engine.

Engine control algorithm developed for petrol supply system can be successfully used to control the gas supply system.

Application of LPG injectors with similar electrical characteristics as gasoline injectors allows to use petrol controller as a gas injectors controlling system.