

ANALIZA PORÓWNAWCZA SILNIKÓW Z KLASYCZNYMI I ALTERNATYWNYMI UKŁADAMI ZASILANIA

Dariusz Szpica, Jarosław Czaban

Katedra Pojazdów Samochodowych, Politechnika Białostocka

Streszczenie. W artykule przedstawiono charakterystyki zewnętrzne silników z klasycznymi układami wtryskowymi benzyny SPI, MPI i MPI, które wyposażono w alternatywne układy zasilania LPG I, II i IV generacji. Badania przeprowadzone na hamowni podwoziowej pozwoliły wykazać różnice świadczące o adekwatności zastosowanego układu.

Słowa kluczowe: silnik spalinowy, układ zasilania, LPG

WSTĘP

Jednym z najczęściej stosowanych sposobów obniżenia kosztów eksploatacji pojazdów jest stosowanie dodatkowych (alternatywnych) układów zasilania. Istotne jest, aby koszt dodatkowej instalacji zasilającej, jak też paliwa alternatywnego był jak najniższy oraz znacząco nie wpływał na właściwości trakcyjne pojazdu i poziom emisji toksycznych składników spalin. Najnowsze konstrukcje silników spalinowych charakteryzują się niskim zużyciem paliwa, przy zachowaniu na wysokim poziomie wartości wskaźników zewnętrznych, takich jak moc, czy moment obrotowy, a emitowane przez nie toksyczne składniki spalin nie przekraczały norm dopuszczanych przepisami. Do najczęściej stosowanych paliw alternatywnych zaliczyć można LPG, CNG, LNG, wodór, a także estry olejów roślinnych.

W przypadku silników o ZI najszerze zastosowanie znalazły układy zasilania gazem. Układy zasilania LPG generacji I (mieszalnikowe) stosuje się jako rozwiązanie alternatywne dla układów zasilania gaźnikowych i MPI bez sondy lambda i katalizatora. Gaz doprowadzany jest centralnie poprzez mieszalnik, a układ dolotowy dozuję mieszaninę palną do poszczególnych cylindrów. Charakteryzuje je brak możliwości permanentnej regulacji składu mieszaniny palnej i dostosowania do zmiennych warunków obciążenia silnika. Korekta składu mieszaniny palnej dokonywana jest za pomocą dławika (oporu miejscowego) o ręcznie regulowanej konduktancji podczas montażu, przeglądów technicznych i czynności serwisowych.

Układy zasilania LPG generacji II różnią się od I tym, że układ mechanicznej regulacji składu mieszaniny palnej zastąpiono dławikiem ze sterowaną elektrycznie konduktancją, za pracę którego odpowiedzialny jest elektroniczny układ sterujący. Dławik umożliwia permanentną regulację w czasie pracy silnika. Układy tego typu przeznaczo-

ne są do silników wyposażonych w adaptacyjne układy zasilania (ocena procesu spalania poprzez sondę lambda). Dodatkowy układ elektroniczny sterujący ilością gazu poprzez człon wykonawczy, jakim jest dławik pozwala na ograniczenie poziomu emisji toksycznych składników spalin, a także zmniejsza zużycia gazu, jednocześnie polepszając właściwości dynamiczne silnika.

Układy zasilania LPG generacji IV stosuje się jako alternatywne źródło zasilania pojazdów wyposażonych w silniki o ZI z sekwencyjnym wtryskiem benzyny, zaawansowane technicznie, bardzo często wyposażone w system diagnostyki pokładowej OBD. Sterowanie wtryskiwaczami gazu w układach IV generacji, zwanych także SGI, odbywa się przy użyciu oryginalnych sygnałów sterujących wtryskiwaczami benzyny (oddzielnie dla każdego cylindra), z drugiej zaś strony oryginalny moduł elektroniczny dokonuje analizy sygnałów zebranych z czujników kontrolnych w silniku. Układy tego typu są zamienne, czyli istnieje możliwość przemontowania do innego pojazdu bez konieczności dodatkowych przeróbek.

Celem pracy jest porównanie zmian wartości momentu obrotowego i mocy względem prędkości obrotowej silnika przy obu rodzajach układu zasilania.

METODYKA BADAŃ

Badania porównawcze przeprowadzono na hamowni podwoziowej LPS 3000, wyposażonej dodatkowo w analizator spalin MTG 5 firmy MAHA. Pomiary mocy i momentu obrotowego przeprowadzano w zakresie prędkości obrotowych: od odpowiadającej 50 km/h do prędkości obrotowej odpowiadającej załamaniu krzywej mocy. Próbę przeprowadzano na biegu IV, wykorzystując standardowe oprogramowanie hamowni.

Tabela 1. Dane techniczne pojazdów uczestniczących w badaniach

Table 1. Technical data of the tested vehicles

Pojazd	Typ silnika	Objętość skokowa cm ³	Podstawowy układ zasilania	Alternatywny układ zasilania LPG	Przebieg tys. km	Rok prod.
VW Golf 1.8 GT	R4	1800	SPI	I generacja	230	1987
Opel Omega 2.0	R4	2000	MPI	I generacja	200	1997
VW Golf 1.8 16V	R4	1800	MPI	I generacja	200	1989
Audi 80 2.3 E	R5	2300	MPI	I generacja	200	1990
Mazda 626 1.8*	R4	1800	MPI	II generacja	210	1993
Fiat Punto 1.216V	R4	1200	MPI	II generacja	100	2000
Honda Civic 1.4	R4	1400	MPI	II generacja	170	1998
Nissan Almera 1.4	R4	1400	MPI	II generacja	45	1998
Daewoo Nubia 2.0	R4	2000	MPI	II generacja	84	2001
Skoda Felicia 1.3	R4	1300	MPI	II generacja	112	1997
Opel Astra II 1.6	R4	1600	MPI	IV generacja	50	2003
Seat Ibiza 1.4i	R4	1400	MPI	IV generacja	20	2002
Audi A3 1.8T	R4, T	1800	MPI	IV generacja	118	2001

* zamontowany dodatkowy trójnik w układzie dolotowym.

Pomiar każdorazowo powtarzano trzykrotnie. Analiza otrzymanych wyników pozwoliła stwierdzić, iż różnice wartości maksymalnych nie przekraczały 1% z kolejno następujących po sobie pomiarów, co jest zgodne z dokładnością deklarowaną przez producenta hamowni, wynoszącą maksymalnie 3%.

Badania porównawcze układów zasilania klasycznego i alternatywnego przeprowadzono na grupie pojazdów, których dane techniczne zawarto w tabeli 1.

WYNIKI BADAŃ WŁASNYCH I ICH ANALIZA

W analizie porównawczej operuje się wartościami maksymalnymi mocy i momentu jako punktem odniesienia, choć nie zawsze świadczy to o poprawnym doborze zasilania alternatywnego. Wyniki badań na hamowni przedstawiono w tabeli 2. Analizie poddano wybranych reprezentantów poszczególnych grup.

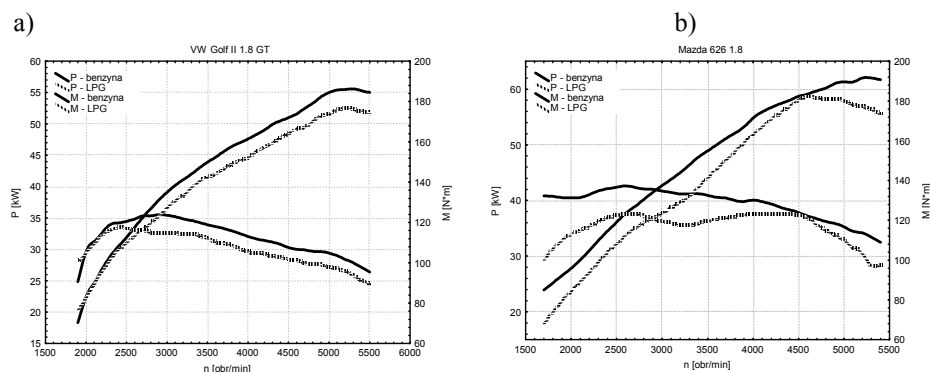
Tabela 2 Procentowe różnice wartości maksymalnych mocy i momentu obrotowego badanych silników przy zasilaniu klasycznym i alternatywnym

Table 2. Percentage differences in the values and turning moment of the maximum power and torque of the tested engine fed with traditional and alternative fuels

Pojazd	Podstawowy układ zasilania	Alternatywny układ zasilania LPG	% różnica wartości względem wartości maksymalnej	
			moc	moment obr.
VW Golf 1.8 GT	SPI	I generacja	5,40	5,03
Opel Omega 2.0	MPI	I generacja	9,10	3,87
VW Golf 1.8 16V	MPI	I generacja	6,13	10,8
Audi 80 2.3 E	MPI	I generacja	9,20	7,10
Mazda 626 1.8	MPI	II generacja	8,40	10,40
Fiat Punto 1.216V	MPI	II generacja	12,05	2,31
Honda Civic 1.4	MPI	II generacja	6,07	5,89
Nissan Almera 1.4 GX	MPI	II generacja	18,03	6,54
Daewoo Nubia 2.0	MPI	II generacja	12,33	6,73
Skoda Felicia 1.3	MPI	II generacja	16,01	9,31
Opel Astra II 1.6	MPI	IV generacja	6,13	10,8
Seat Ibiza 1.4i	MPI	IV generacja	-2,62*	-1,92*
Audi A3 1.8T	MPI	IV generacja	7,07	4,75

* znak minus oznacza wyższe wartości przy zasilaniu LPG.

Na rys. 1a przedstawiono porównawcze charakterystyki zewnętrzne silnika pojazdu VW Golf 1.8GT, klasycznie wyposażonego w centralny układ wtryskowy benzyny SPI i alternatywnie w układ zasilania LPG generacji I. Widoczna jest zgodność wartości zarówno mocy, jak i momentu obrotowego w zakresie 1800...2400 (obr/min). Natomiast w wyższym zakresie prędkości obrotowych występują narastające rozbieżności, osiągające w punkcie mocy maksymalnej 3 kW różnicy (5,4% w stosunku do zasilania benzynowego). Początkowa zgodność wartości może wynikać z faktu, iż przy pełnym otwarciu przepustnicy, w zakresie niskiej prędkości obrotowej, będącej wynikiem dużego obciążenia, występuje niewielkie podciśnienie w układzie dolotowym (-0,02 MPa), przez co przepustowość reduktora-parownika gazu oscyluje w granicach wartości maksymalnej.



Rys. 1. Porównawcze charakterystyki zewnętrzne silnika: a) VW Golf 1.8GT; klasyczny układ zasilania SPI, alternatywny układ zasilania LPG I generacji; b) Mazda 626 1.8; klasyczny układ zasilania SPI MPI, alternatywny układ zasilania LPG II generacji

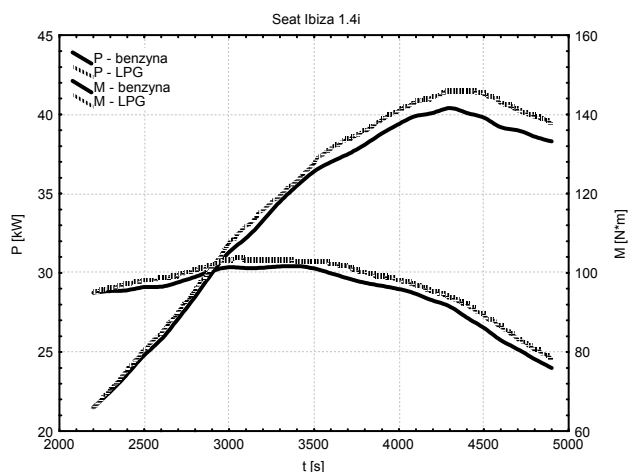
Fig. 1. Comparative of external characteristics of an engine: a) VW Golf 1.8GT; traditional feeding system SPI, alternative feeding system LPG of the I st generation; b) Mazda 626 1.8; traditional feeding system SPI MPI, alternative feeding system LPG of the II nd generation

Powstawanie tego zjawiska tłumaczyć może również fakt, iż LPG charakteryzuje się wyższą liczbą oktanową niż benzyna [Majerczyk i Taubert 2003]. Istotne jest również to, że gaz ma większą zdolność mieszania się z powietrzem w przypadku małego natężenia przepływu czynnika transportującego mieszaninę palną (w tym przypadku powietrza). Narastająca różnica w wartościach mocy i momentu obrotowego przy wyższych prędkościach obrotowych może wynikać z faktu nieodpowiedniej regulacji składu mieszaniny palnej, co w przypadku układów I generacji dokonywane jest okresowo, a także z faktu, iż LPG charakteryzuje się niższą wartością opałową niż benzyna [Majerczyk i Taubert 2003]. Ważne jest również to, że reduktor-parownik ma ograniczoną przepustowość i zdolność rozprężania gazu ciekłego, co bezpośrednio wpływa na wartości maksymalne mocy i momentu obrotowego. Prawdopodobnie za najważniejszy czynnik odpowiedzialny za różnicę w wartościach maksymalnych mocy i momentu obrotowego należy uznać fakt, iż gaz zajmuje większą objętość cylindra niż ma to miejsce w przypadku benzyny, przez co generuje się zjawisko braku tlenu niezbędnego w procesie spalania, znajdujące bezpośrednie odzwierciedlenie w spadku wyżej wymienionych wskaźników zewnętrznych.

Silnik pojazdu Mazda 626 1.8 klasycznie wyposażony jest w wielopunktowy układ wtryskowy benzyny MPI, natomiast jako alternatywny układ zasilania zastosowano II generację LPG. W układzie II generacji występuje sprzężenie zwrotne pomiędzy dławikiem z elektrycznie sterowaną konduktancją, odpowiedzialnym za skład mieszaniny paliwowo-powietrznej, a sondą lambda mierzącą ilość tlenu w spalinach.

W przypadku tego silnika (rys. 1b) widoczne jest zmniejszenie wartości zarówno mocy, jak i momentu obrotowego, z różnicą wartości maksymalnej mocy wynoszącą 5,2 kW (8,4%) względem zasilania benzynowego. Widoczne jest zbliżenie wartości otrzymanych przy dwóch układach zasilania w punkcie odpowiadającym 4600 obr/min. Wyrównanie mocy i momentu obrotowego w tym miejscu spowodowane było najprawdopodobniej zmianami w układzie dolotowym silnika. Zamontowano w nim specjalny trójkąt zabezpieczający elementy układu dolotowego przed „cofnięciem płomienia”.

Dodatkowy element zmienił charakterystykę układu dolotowego w sensie dynamicznym, co przy dużych prędkościach przepływu powietrza odznaczać się mogło lepszym napełnieniem cylindrów i w efekcie chwilowym przyrostem mocy [Rawski i Szpica 2004]. Należy nadmienić, że przejście z układu zasilania MPI benzyny na centralny układ zasilania gazem spowodowało obecność gazu prawie w całym układzie dolotowym, a nie tylko (jak to ma miejsce w przypadku MPI) w okolicach kanałów dolotowych.



Rys. 2. Porównawcze charakterystyki zewnętrzne silnika pojazdu Seat Ibiza 1.4 przy układzie zasilania klasycznym MPI i alternatywnym LPG generacji IV

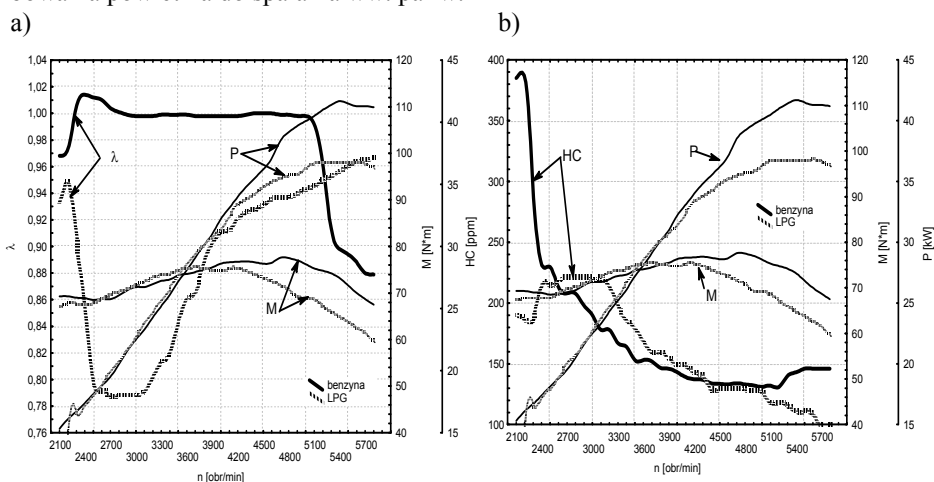
Fig. 2. Comparative external characteristic of engine of a Seat Ibiza 1.4 at the traditional feeding system MPI and the alternative one LPG of the IV th generation

Kolejnym z pojazdów poddanym analizie był Seat Ibiza 1.4. Jego silnik z wielopunktowym sekwencyjnym układem wtryskowym benzyny otrzymał zamiennie sekwencyjny układ wtryskowy gazu. Widoczna jest (rys. 2) relacja pomiędzy wartościami mocy i momentu obrotowego przy obu układach zasilania. Jak już wspomniano wcześniej, tego typu układ zasilania gazem (SGI) ściśle współpracuje z elektronicznym modulem sterującym wtryskiem benzyny. Ważne jest również to, iż układ SGI pozwala na zachowanie norm dotyczących emisji toksycznych składników spalin Euro 3 i 4. Jak widać na rys. 2 alternatywny układ zasilania LPG przewyższa pod względem wartości maksymalnych mocy i momentu obrotowego klasyczny układ benzynowy. Różnica w tym przypadku wynosi 1,1 kW (2,7%) w stosunku do mocy maksymalnej przy zasilaniu benzynowym. Tak dobre efekty uzyskano przy zastosowaniu dodatkowego urządzenia przetwarzającego sygnał z sondy lambda do sterowania dawką LPG. Z drugiej zaś strony, stwierdzono podwyższone stężenie węglowodorów w spalinach przy zasilaniu LPG, wynoszące maksymalnie (przy niskiej prędkości obrotowej i dużym obciążeniu) 200 ppm.

Istotnym wskaźnikiem, który należy poddać analizie przy porównywaniu układów zasilania jest wartość współczynnika nadmiaru powietrza λ . Dla porównania przedstawiono wartości tego współczynnika w zależności od prędkości obrotowej silnika pojazdu Fiat Punto 1.2. Biorąc pod uwagę zasilanie benzynowe, widoczna jest oscylacja w okolicach mieszanki stechiometrycznej ($\lambda = 1$) do prędkości obrotowej ok. 5200 obr/min, powyżej tej prędkości widoczne jest znaczne wzbogacanie mieszanki w

celu osiągnięcia mocy maksymalnej. Sonda lambda w tym przypadku wysyła stały sygnał (wyłącza się z pracy), a układ sterowania przechodzi do trybu, w którym jako główny cel stawia osiągnięcie mocy maksymalnej. Taki stan pracy sondy lambda ma miejsce również podczas gwałtownych przyspieszeń i dużych obciążeń, dając kierowcy pełną zdolność manewrowania (np. wyprzedzanie), przy podwyższonym poziomie emisji toksycznych składników spalin.

Przy zasilaniu gazem LPG (rys. 3a) widoczne jest znaczne wzbogacenie mieszanki palnej przy dużym obciążeniu i małej prędkości obrotowej, będące reakcją reduktora na spadające podciśnienie w układzie dolotowym i przejście w stan maksymalnej przepustowości. Znaczne wzbogacenie mieszanki palnej (λ – rys. 3a) skutkuje zrównaniem się wartości mocy i momentu obrotowego przy zasilaniu LPG i benzynowymi, jednakże towarzyszy temu podwyższone stężenie węglowodorów w spalinach (rys. 3b). Istotne jest również to, że w górnym zakresie prędkości obrotowych mieszanka palna LPG-powietrze jest uboższa niż paliwowo-powietrzna, co wynika z teoretycznego zapotrzebowania powietrza do spalania ww. paliw.



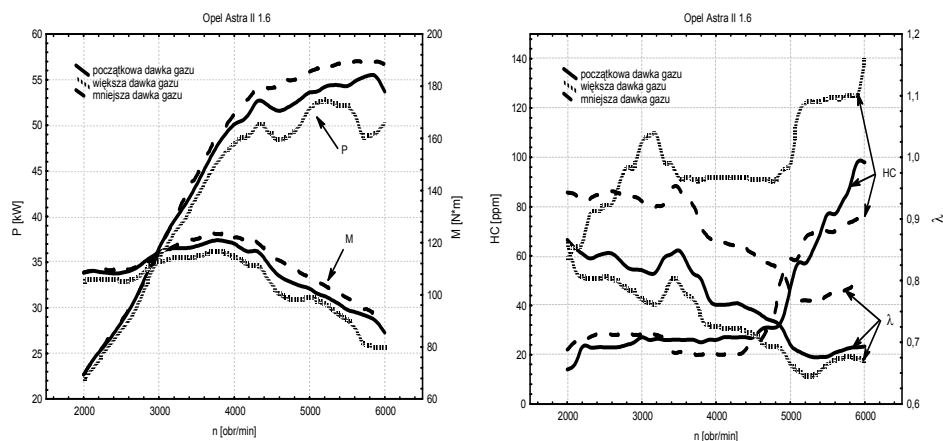
Rys. 3. Porównanie wartości współczynnika nadmiaru powietrza λ i stężenia HC w zależności od prędkości obrotowej silnika pojazdu Fiat Punto 1.2, przy układzie zasilania klasycznym MPI i alternatywnym LPG generacji II, z nałożoną charakterystyką zewnętrzną

Fig. 3. Comparison of of air excess coefficient and concentration coefficient HC in dependance on the rotation speed of a Fiat Punto 1.2 engine at the traditional feeding system MPI and the alternative one LPG of II nd generation with an imposed external characteristics

PODSUMOWANIE

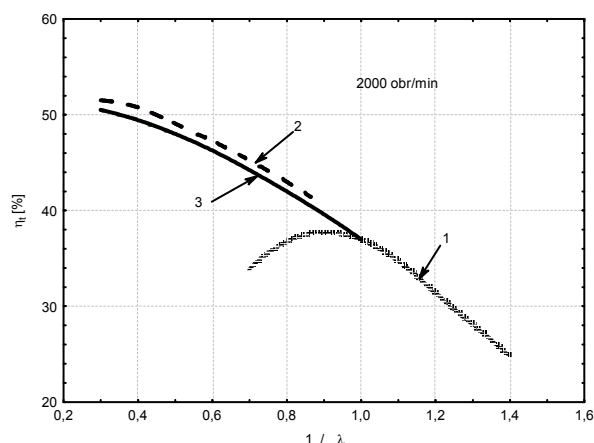
W wyniku przeprowadzonej analizy charakterystyk zewnętrznych można stwierdzić, iż silnik o zapłonie iskrowym wyposażony alternatywnie w układ zasilania LPG nie osiąga wartości maksymalnych takich wielkości, jak moc, czy moment obrotowy.

Za główne przyczyny tego stanu rzeczy można uznać różnice w wartościach opałowych obu paliw i nieodpowiedni dobór przepustowości reduktora-parownika. Istnieją wąskie przedziały prędkości obrotowej i obciążenia, gdzie układ zasilania gazowy przewyższa benzynowy. Okupione jest to jednak dużym zużyciem LPG i podwyższonym stężeniem węglowodorów w spalinach.



Rys. 4. Charakterystyki porównawcze dla różnych nastaw dawki LPG

Fig. 4. Comparative characteristics for different settings of LPG dose



Rys. 5. Sprawność cieplna silników tłokowych o postępowo-zwrotnym ruchu tłoka [Jarosiński 1996].

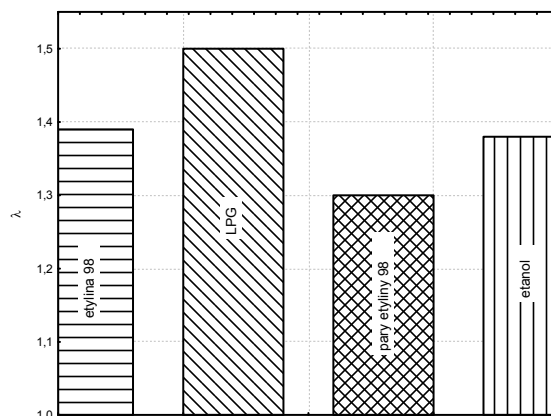
1 – silnik benzynowy, 2 – silnik wysokoprężny z komorą dzieloną, 3 – silnik wysokoprężny z bezpośrednim wtryskiem paliwa

Fig. 5. Thermal efficiency of piston engines with to-and-fro movement

1 – petrol engine, 2 – high compression engine with separated chamber, 3 – high compression engine with direct fuel injection

Jak już wspomniano, przyczyną rzutującą na rozbieżności maksymalnych wartości może być większy udział gazu w objętości mieszaniny palnej znajdującej się w cylindrze niż ma to miejsce w przypadku zasilania benzynowego. Mając to na uwadze, przeprowadzono dodatkowe badanie porównawcze, polegające na regulacji dawki gazu (rys. 4). Niewielkie stopniowe zubażanie mieszaniny palnej LPG-powietrze prowadzi do zado-

wałających wyników i to zarówno w odniesieniu do wskaźników zewnętrznych, jak też zmniejszenia zużycia gazu.



Rys. 6. Maksymalne wartości współczynnika nadmiaru powietrza przy różnych sposobach zasilania silnika [Kowalewicz i Różycki 1999]

Fig. 6. The maximum values of air excess coefficient at different engine feeding system

Uzyskane wyniki potwierdzają tezę o przyroście sprawności cieplnej silnika tłokowego w miarę przyrostu wartości współczynnika nadmiaru powietrza w ograniczonych zakresach współczynnika nadmiaru powietrza (rys. 5).

Należy pamiętać również o tym, iż nadmierne wytworzenie zbyt ubogiej mieszanki palnej LPG-powietrze może prowadzić do przekroczenia progu palności (rys. 6) i braku zapłonu, lub wystąpienia zjawiska „cofnięcia płomienia”, prowadzącego bardzo często do zniszczenia elementów układu dolotowego.

PIŚMIENNICTWO

- Instrukcje obsługi hamowni LPS 3000 i analizatora spalin MTG 5 firmy MAHA.
 Jarosiński J. 1996: Techniki czystego spalania, WNT, Warszawa.
 Majerczyk A., Taubert S. 2003: Układy zasilania propan – butan. WKiŁ, 2003.
 Kowalewicz A., Różycki A. 1999: Analiza możliwości uboższego spalania homogenicznych mieszanin paliwowo-powietrznych. KONMOT '99.
 Rawski F., Szpica D. 2004: Równomierność pracy cylindrów silnika spalinowego jako ważny czynnik w odniesieniu do ekologii i ekonomii, Archiwum Motoryzacji, 7, 2.
<http://www.elpigaz.com/>;
<http://www.vialle.pl/>;
<http://www.boschautoparts.co.uk/>.

Badania przeprowadzono na urządzeniach zakupionych w ramach grantu KBN 4372/IA/171/2003.

COMPARATIVE ANALYSIS OF ENGINES WITH TRADITIONAL
AND ALTERNATIVE FEEDING SYSTEMS

Summary. The article presents external characteristics of engines with traditional petrol injection systems SPI, MPI, which were equipped with alternative feeding systems LPG of the Ist, IInd and IVth generation.

The tests carried out in an engine testing hall allowed to show differences supporting the validity of the applied system

Key words: combustion engine, feeding system, LPG

Recenzent: prof. dr hab. Eugeniusz Krasowski