

## OPPORTUNITY OF GAS LEAN MIXTURES COMBUSTION IN SI ENGINE

**Arkadiusz Kociszewski, Karol Cupiał, Arkadiusz Jamrozik**

*Politechnika Częstochowska, Instytut Maszyn Tłokowych i Techniki Sterowania  
Al. Armii Krajowej 21, 42-200 Częstochowa, tel.: (34) 3250503, tel/fax: (34) 3250507  
e-mail: kocisz@imc.pcz.czest.pl, cupial@imc.pcz.czest.pl, jamrozik.@imc.pcz.czest.pl*

### **Abstract**

*The results of research concerning the combustion of lean mixture propane-butane gas in multipoint spark ignition engine were described in the paper. Indicated work, indicated efficiency, combustion duration of 50% fuel, non-repeatability of indicated work and toxic components emission were presented. Measured toxic components concentration was compared with currently TA-Luft regulations and EURO IV standards.*

## MOŻLIWOŚCI SPALANIA GAZOWYCH MIESZANEK ZUBOŻONYCH W SILNIKU ZI

### **Streszczenie**

*W artykule zamieszczono wyniki badań silnika z zapłonem wielopunktowym zasilanego mieszkanką ubogą gazu propan-butan z powietrzem. Przedstawiono takie parametry jak sprawność i praca indykowana, ką t trwania spalania 50% paliwa, niepowtarzalność pracy indykowanej oraz toksyczność spalin. Zmierzone wartości składników toksycznych przyrównano do obowiązujących norm emisji zawartych w przepisach TA-Luft oraz w normach EURO IV.*

### **1. Wstęp**

W Instytucie Maszyn Tłokowych i Techniki Sterowania Politechniki Częstochowskiej prowadzone są badania silnika ZI zasilanego ubogimi mieszkankami homogenicznymi paliwa gazowego (propan-butan). Spalanie mieszanek o współczynniku nadmiaru powietrza  $\lambda \leq 2,0$  odbywa się dzięki zastosowaniu wielopunktowego zapłonu. Pozwoliło to znacznie zmniejszyć niepowtarzalność pracy indykowanej w poszczególnych cyklach oraz poprawić podstawowe parametry pracy silnika w porównaniu z silnikiem o klasycznym, jednoświecowym zapłonie.

### **2. Stanowisko badawcze**

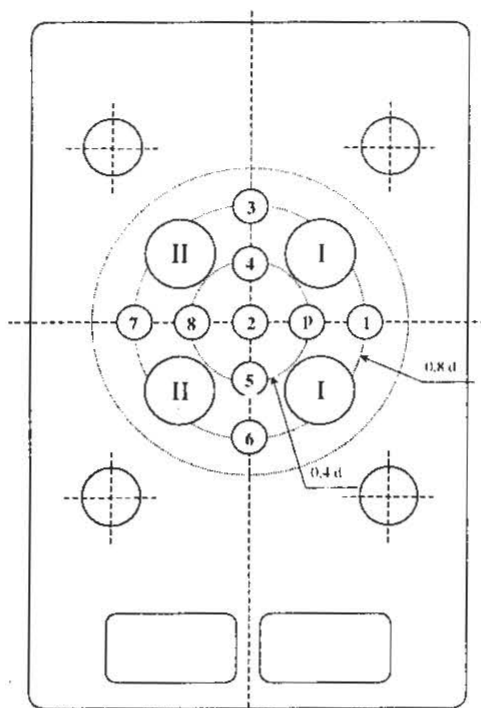
Silnik eksperymentalny powstał na bazie jednostki seryjnej, wysokoprężnej S320 ER (WSW ANDORIA), która po przebudowie pracuje jako silnik o zapłonie iskrowym [6]. W silniku tym, którego średnica cylindra wynosi 120 mm, całkowicie zmieniono głowicę montując w niej cztery zawory (dwa dolotowe i dwa wylotowe) oraz osiem świec zapłonowych. Ich rozmieszczenie w głowicy przedstawia rys. 1.

Silnik zasilono, poprzez mieszalnikową instalację gazową, ubogą mieszkanką paliwa gazowego (LPG) i powietrza o współczynniku nadmiaru powietrza zmieniającym się w zakresie od 1,2 do 2,0. Do budowy instalacji gazowej wykorzystano podzespoły firmy TARTARINI, takie jak reduktor-parownik typ G79-SE, elektromagnetyczny zawór odcinający typ 3G oraz zawór dozujący.

Do reduktora-parownika doprowadzono gorącą wodę z instalacji chłodzącej silnik, a jej obieg został wymuszony przez pompę cyrkulacyjną. Zastosowano mieszalnik stałoprze-

lotowy o średnicy dyszy 60 mm przystosowany do istniejącego już gaźnika, a do pomiaru zużycia gazu wykorzystano przepływomierz zliczający objętość gazu firmy INTERGAZ typ BK-G1.6. Skład mieszanki palnej ustalano za pomocą zaworu dozującego odparowany gaz propan-butan. Instalacja zapłonowa została skonstruowana w ten sposób, że każdą świecę zaopatrzone w oddzielny moduł tranzystorowy z cewką o niskiej rezystancji. Układ ten umożliwiał wybranie dowolnej liczby i kombinacji czynnych świec zapłonowych.

Do indykowania wykorzystano system do pomiarów i rejestracji wielkości szybkozmiennych, który opracowano i zbudowano w IMTiTS [1,4].



Rys. 1. Rozmieszczenie świec w głowicy (p – czujnik ciśnienia, I – zawory dolotowe, II – zawory wylotowe, d – średnica cylindra)

Fig. 1. Spark plug location legend in engine head (p – pressure transducer, I – inlet valves, II – outlet valves, d – cylinder bore)

Parametrami silnika, które nie podlegały zmianie podczas przeprowadzonego eksperymentu były:

- stopień sprężania: 8,5,
- prędkość obrotowa silnika: 1000 obr/min,
- obciążenie silnika: wartość maksymalna.

Zmieniano wspomniany wcześniej współczynnik nadmiaru powietrza ( $\lambda = 1,2 \dots 2,0$ ), liczbę i umiejscowienie czynnych świec zapłonowych oraz kąt wyprzedzenia zapłonu, którego optymalną wartość ustawiano dla każdej kombinacji świec.

### 3. Przebieg eksperymentu

Mając na uwadze wcześniejsze badania jakie przeprowadzono na tym silniku [5], pomiary wykonano dla czterech świec zlokalizowanych centralnie (nr 2, 4, 5, 8), która to kombinacja okazała się najkorzystniejsza ze względu na parametry pracy silnika oraz dla jednej, środkowej świecy (nr 2) jako klasycznego układu umieszczenia świecy w komorze spalania silnika tłokowego. Dla każdej z nastaw składu mieszanki przy danej konfiguracji świec, rejestrowano 95 kolejnych cykli pracy silnika co  $1^\circ$  OWK przy wykorzystaniu programu [4]. Jednocześnie dokonywano pomiaru zawartości składników toksycznych w spalinach analizatorem spalin RADIOTECHNIKA typ AI9600. Współczynnik nadmiaru powietrza zmieniano w

zakresie  $\lambda = 1,2 \dots 2,0$  z krokiem 0,2. Bogatsze mieszanki nie były stosowane ze względu na występowanie spalania stukowego w silniku, które miało miejsce przy  $\lambda = 1,0 \dots 1,1$ .

Przy każdym zubożeniu mieszanki optymalizowano kąt wyprzedzenia zapłonu w celu osiągnięcia najkorzystniejszych parametrów pracy silnika. Główną uwagę zwrócono na pracę i sprawność indykowaną oraz na zawartość toksycznych składników w spalinach. Wraz ze wzrostem zubożenia mieszanki zapłon musiał pojawiać się wcześniej w celu osiągnięcia prawidłowego przebiegu procesu spalania.

## 4. Wyniki eksperymentu

### 4.1. Parametry pracy silnika a zubożenie mieszanki

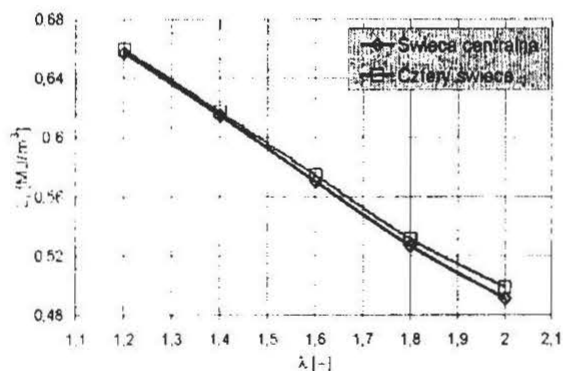
Na podstawie danych otrzymanych podczas badań, wykreślono krzywe przedstawiające zmiany podstawowych parametrów pracy silnika w zależności od stopnia zubożenia mieszanki palnej. Pod uwagę wzięto pracę i sprawność indykowaną, kąt trwania spalania 50% paliwa (mierzony od chwili wyładowania iskrowego) oraz niepewtarzalności kolejnych cykli pracy silnika odniesioną do pracy indykowanej, a wyznaczoną z zależności:

$$COV_{I_i} = \frac{\sigma_{I_i}}{\bar{p}_{I_i}} \cdot 100\%,$$

w której:

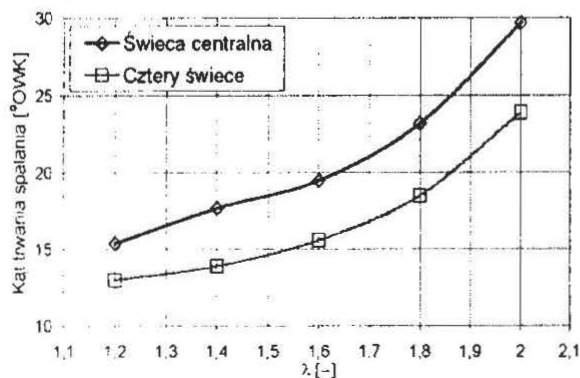
$\sigma_{I_i}$  – odchylenie standardowe pracy indykowanej,

$\bar{p}_{I_i}$  – wartość średnia pracy indykowanej dla kolejnych cykli pracy silnika.



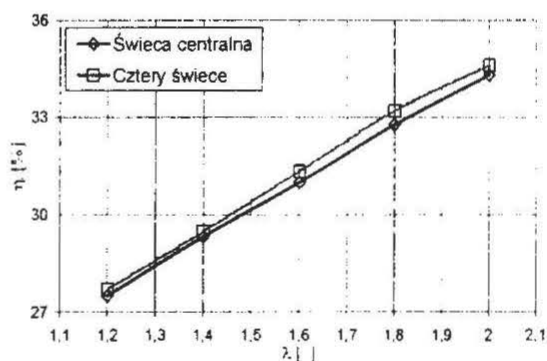
Rys. 3. Praca indykowana w funkcji współczynnika nadmiaru powietrza

Fig. 3. Indicated work versus excess air factor



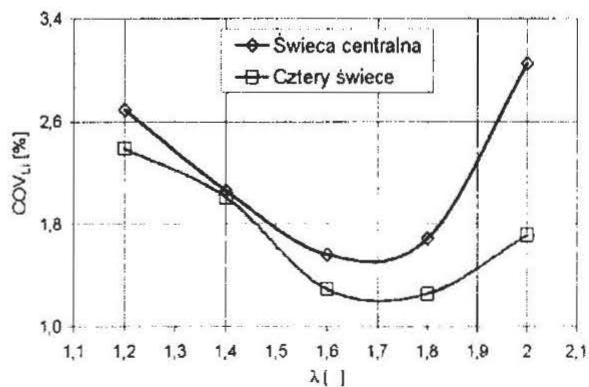
Rys. 5. Kąt trwania spalania ( $\alpha_{50\%} - \alpha_{zapłonu}$ ) w funkcji współczynnika nadmiaru powietrza

Fig. 5. Combustion duration ( $\alpha_{50\%} - \alpha_{ignition}$ ) versus excess air factor



Rys. 4. Sprawność indykowana w funkcji współczynnika nadmiaru powietrza

Fig. 4. Indicated efficiency versus excess air factor



Rys. 6. Niepowtarzalność obiegu silnika w funkcji współczynnika nadmiaru powietrza

Fig. 6. Non-repeatability of engine cycles versus excess air factor

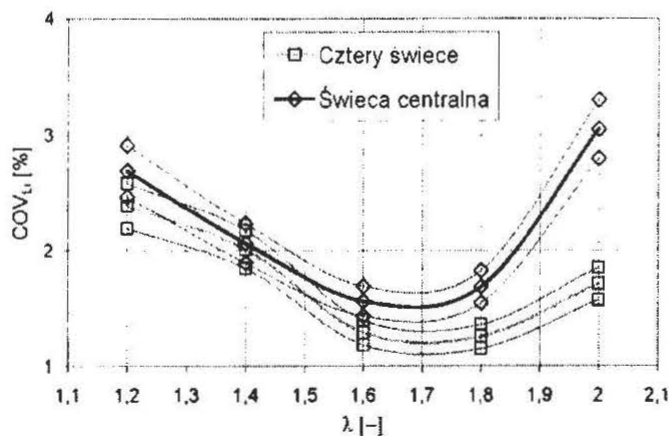
Zwiększenie współczynnika nadmiaru powietrza spowodowało spadek pracy indykowanej (rys. 3), gdzie od wartości  $\lambda = 1,2$  do  $2,0$  zmalała ona o ok.  $0,15 \text{ MJ/m}^3$ , a różnice pomiędzy dwoma kombinacjami świec były w tych przypadkach niewielkie i wyniosły maksymalnie 1,5% na korzyść czterech świec zapłonowych. To obniżenie pracy indykowanej miało związek ze zmniejszaniem się wartości opałowej mieszanki palnej w miarę jej zubożania, z wydłużającym się czasem trwania spalania (rys. 5) oraz z większymi wartościami współczynnika niepowtarzalności  $\text{COV}_{\text{Li}}$  (rys. 6). Kąt trwania spalania swą maksymalną wartość wynoszącą ok.  $30^\circ$  OWK osiągnął dla  $\lambda = 2,0$  przy świecy centralnej, również niepowtarzalność pracy indykowanej dla tego przypadku była na najwyższym poziomie i wyniosła 3,1%.

Sprawność indykowana (rys. 4) rosła w miarę wzrostu współczynnika nadmiaru powietrza i wartość maksymalną 34,6% osiągnęła dla  $\lambda = 2,0$  przy układzie czterech świec zapłonowych. W całym zakresie składu mieszanki, dla tego układu świec, otrzymano nieco wyższe wartości sprawności indykowanej.

Włączenie jednej lub czterech świec zapłonowych miało znaczący wpływ na niepowtarzalność pracy indykowanej w kolejnych cyklach pracy silnika (rys. 6). W całym przedziale zubożenia mieszanki współczynnik  $\text{COV}_{\text{Li}}$  był najniższy dla silnika pracującego z czterema świecami. Przy najuboższej mieszance ( $\lambda = 2,0$ ) osiągnął on wartość 1,7%, natomiast dla świecy centralnej wyniósł już 3,1%. Biorąc pod uwagę cały zakres zmian składu mieszanki, najniższa niepowtarzalność wystąpiła przy  $\lambda = 1,8$  i wyniosła 1,2%.

Analiza powyższa wykazała, że silnik z zapłonem wielopunktowym zasilany mieszaniną gazów propan-butan osiągał zadowalające parametry pracy nawet przy ładunkach bardzo ubogich ( $\lambda = 2,0$ ). Wprawdzie spadek pracy indykowanej, w porównaniu z  $\lambda = 1,2$ , był tutaj rzędu 25% ale sprawność indykowana osiągnęła tu swoje maksimum równe 34,6%.

Jako, że jednym z podstawowych kryteriów oceny poprawności działania silnika spalinowego jest niepowtarzalność obiegów jego pracy, dlatego dla współczynnika  $\text{COV}_{\text{Li}}$  wyznaczono 95-procentowe przedziały ufności przy poszczególnych pomiarach – rys. 7.



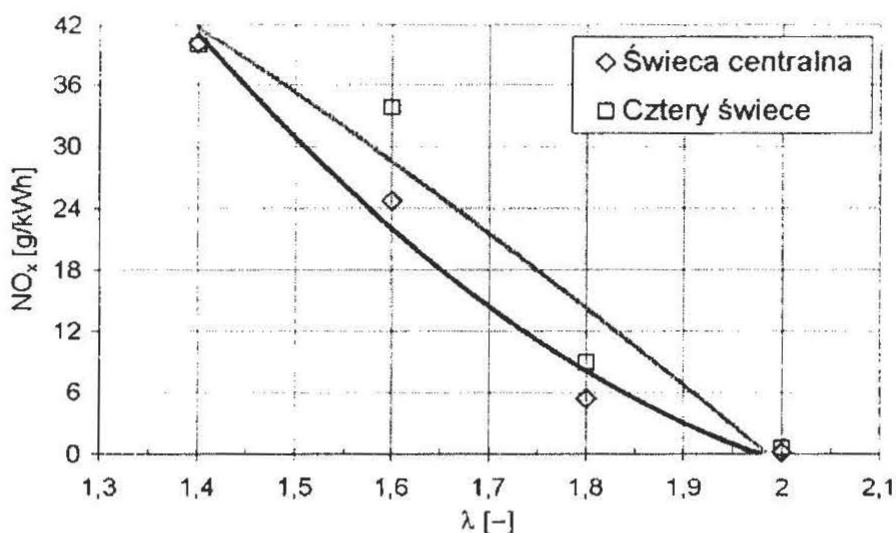
Rys. 7. Niepowtarzalność obiegu silnika z zaznaczonymi przedziałami ufności  
 Fig. 7. Non-repeatability of engine cycles with confidence intervals

Szerokość przedziałów ufności współczynnika niepowtarzalności dla poszczególnych pomiarów, w całym zakresie współczynnika  $\lambda$ , była jednakowa dla obu konfiguracji świec zapłonowych i wyniosła 8,3% wartości współczynnika  $\text{COV}_{\text{Li}}$ . Dla mieszanek bogatszych ( $\lambda = 1,2$  i  $1,4$ ) silnik jedno- i czteroświecowy pracował z podobną niepowtarzalnością, wartości współczynnika  $\text{COV}_{\text{Li}}$  były zbliżone, przedziały ufności pokryły się ze sobą. Dopiero od  $\lambda$

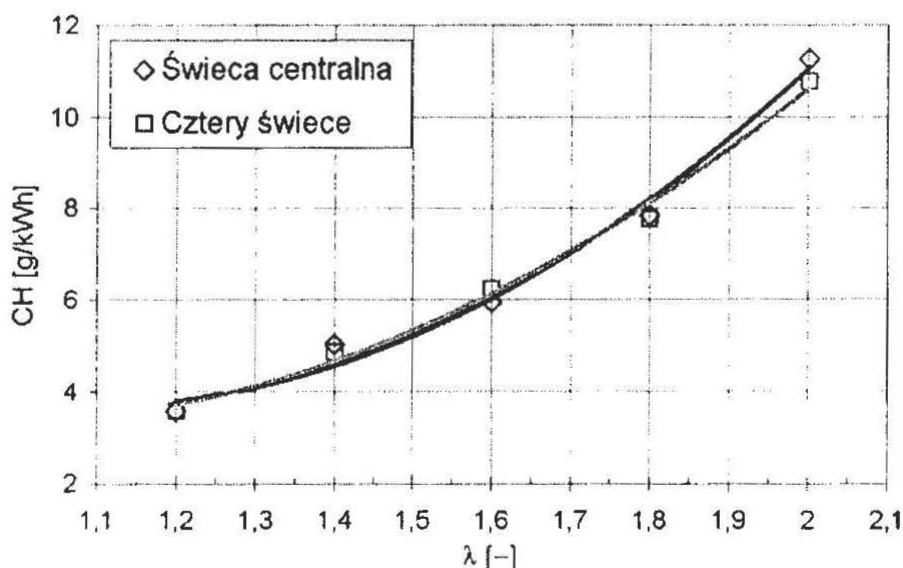
$\geq 1.6$  silnik z czterema świecami pracował ze znacznie mniejszą niepowtarzalnością obrotu niż silnik jednoświecowy.

## 4. 2. Toksyczność spalin

Dla każdego punktu pomiarowego, na który składał się odpowiedni skład mieszanki oraz konfiguracja świec zapłonowych, dokonywano pomiaru zawartości składników toksycznych w gazach wylotowych silnika badawczego. Analizator spalin podawał m.in. wartości stężenia tlenków azotu, niespalonych węglowodorów oraz tlenku węgla, dla których wykonano charakterystyki emisji jednostkowej w g/kWh, w funkcji współczynnika nadmiaru powietrza – rys. 8...10.

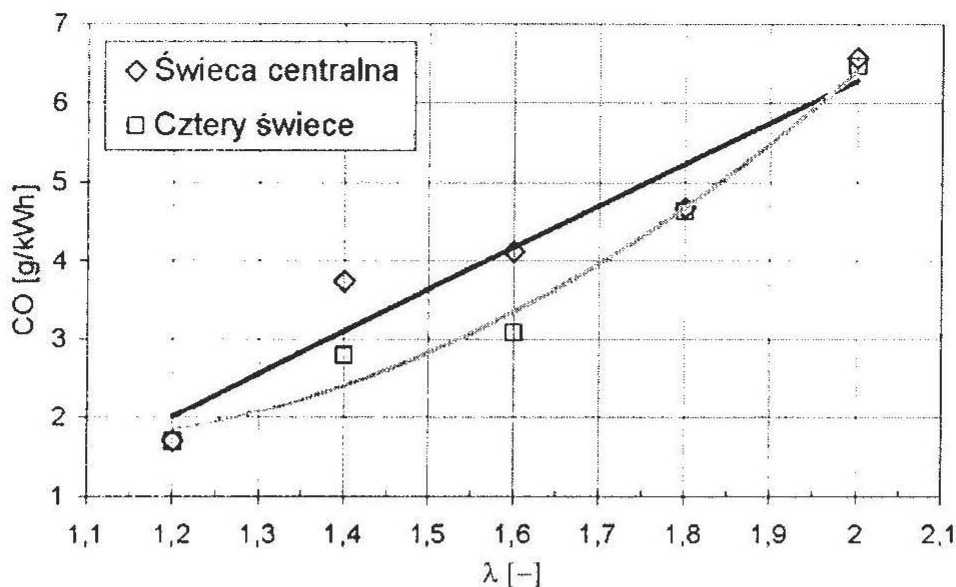


Rys. 8. Zależność stężenia NO<sub>x</sub> w spalinach od składu mieszanki  
Fig. 8. Mixture composition influence on NO<sub>x</sub> emission



Rys. 9. Zależność stężenia CH w spalinach od składu mieszanki  
Fig. 9. Mixture composition influence on CH emission





Rys. 10. Zależność stężenia CO w spalinach od składu mieszanki  
 Fig. 10. Mixture composition influence on CO emission

Wraz ze wzrostem zawartości powietrza w mieszance palnej nastąpiło znaczne ograniczenie tworzenia się tlenków azotu (rys. 8). Najniższą produkcję tego związku wykazała konfiguracja z jedną świecą zapłonową usytuowaną centralnie w komorze cylindra. Dla maksymalnego zubożenia mieszanki stężenie  $\text{NO}_x$  zmalało tutaj do 0,14 g/kWh, a dla porównania przy  $\lambda = 1,4$  wyniosło ono 40 g/kWh. Jednak przy tym umiejscowieniu świecy uzyskano nieco niższą pracę i sprawności indykowaną oraz dość wysoką niepowtarzalność pracy indykowanej w porównaniu do konfiguracji czteroświecowej. Zwiększenie liczby pracujących świec zapłonowych spowodowało przyrost zawartości tlenków azotu w spalinach, dla  $\lambda = 2,0$  wyniósł on 0,5 g/kWh, a przy mieszankach bogatszych różnice te były znacznie większe. Dla przykładu, przy współczynniku nadmiaru powietrza 1,8 emisja  $\text{NO}_x$  w spalinach dla jednej świecy wyniosła 5,4 g/kWh, natomiast dla czterech świec już 8,9 g/kWh.

Podczas procesu spalania wytwarzane były również węglowodory, których zawartość w spalinach rosła wraz ze wzrostem stopnia zubażania mieszanki – rys. 9. Działo się tak m.in. ze względu na spowolnienie procesu spalania w takich warunkach oraz na możliwość występowania cykli bez spalania, co doprowadziło do nie spalania części węglowodorów. Największa zawartość CH wystąpiła przy maksymalnym współczynniku nadmiaru powietrza ( $\lambda = 2,0$ ) i wyniosła 11,3 g/kWh dla centralnej świecy zapłonowej, a różnice pomiędzy poszczególnymi układami świec były niewielkie.

Emisja jednostkowa tlenku węgla w silniku zasilanym gazem LPG nie przekraczała 7 g/kWh – rys. 10. Najniższym stężeniem tego związku charakteryzowała się konfiguracja czterech świec zapłonowych przy  $\lambda = 1,4$  i 1,6, gdzie emisja jednostkowa CO wyniosła odpowiednio 2,8 oraz 3,1 g/kWh.

Stężenia toksycznych składników spalin, jakie otrzymano podczas badań silnika zasilanego gazem LPG, pracującego bez katalizatora, porównano z dopuszczalnymi wartościami emisji związków toksycznych, które zawarto w rozporządzeniu TA-Luft [2] (tabela 1) oraz w normach EURO IV [3] (tabela 2). Dla porównania emisji silnika badawczego z rozporządzeniem TA-Luft, uzyskane stężenia  $\text{NO}_x$  oraz CO zredukowano do 5% zawartości tlenu w spalinach.

Tabela 1. Porównanie toksyczności spalin silnika badawczego z wartościami dopuszczonymi przez TA-Luft [2] dla gazowych silników stacjonarnych

Table 1. Comparison of toxic components concentration of test engine exhaust gas with TA-Luft [2] regulations concerning stationary engine

$\lambda$	Silnik badawczy				TA-Luft	
	NO <sub>x</sub> [g/m <sup>3</sup> ]		CO [g/m <sup>3</sup> ]		NO <sub>x</sub> [g/m <sup>3</sup> ]	CO [g/m <sup>3</sup> ]
	Jedna świeca	Cztery świece	Jedna świeca	Cztery świece		
$\lambda = 1,2$	Przekroczony zakres pomiarowy analizatora spalin		0,21	0,21	0,25	0,3
$\lambda = 1,8$	0,7	1,2	0,62	0,62		
$\lambda = 2,0$	0,02	0,082	0,85	0,85		

Tabela 2. Porównanie toksyczności spalin silnika badawczego z wartościami dopuszczonymi przez EURO IV [3] dla samochodowych silników zasilanych paliwami gazowymi

Table 2. Comparison of toxic components concentration of test engine exhaust gas with EURO IV [3] standards concerning motor-car gas engine

$\lambda$	Silnik badawczy jedna świeca [g/kWh]			Silnik badawczy cztery świece [g/kWh]			EURO IV [g/kWh]		
	NO <sub>x</sub>	CH	CO	NO <sub>x</sub>	CH	CO	NO <sub>x</sub>	CH	CO
$\lambda = 1,2$	–	3,6	1,7	–	3,6	1,7	3,5	0,55	4,0
$\lambda = 1,8$	5,4	7,9	4,7	8,9	7,8	4,6			
$\lambda = 2,0$	0,14	11,3	6,6	0,6	10,8	6,4			

Dla silnika zasilanego gazem propan-butan i pracującego bez katalizatora, w normie przyjętej przez TA-Luft były stężenia NO<sub>x</sub> dla  $\lambda = 2,0$  oraz CO dla  $\lambda = 1,2$  (zarówno dla jednej jak i dla czterech świec zapłonowych), natomiast w EURO IV mieściła się zawartość NO<sub>x</sub> dla  $\lambda = 2,0$  oraz CO dla  $\lambda = 1,2$ . Należy jednak zaznaczyć, że pomiary toksyczności spalin silnika eksperymentalnego prowadzone były w warunkach odbiegających od wymogów norm EURO IV, gdyż prowadzono je tylko w jednym punkcie pracy silnika przy pełnym obciążeniu, a nie w cyklu programowych zmian obciążenia wymaganym w testach w ramach EURO IV.

## 5. Podsumowanie badań silnika zasilanego gazem propan-butan

Eksperyment ten dowiódł, że zastosowanie paliwa gazowego jakim jest propan-butan korzystnie wpływa na proces spalania mieszanek ubogich. Silnik badawczy stabilnie pracował nawet przy maksymalnym zubożeniu ( $\lambda = 2,0$ ) bez drastycznych spadków osiągnięć, a nawet z maksymalną sprawnością obiegu jaką uzyskano podczas badań – 34,6% (cztery świece). Najniższą niepowtarzalność pracy indykowanej w kolejnych cyklach pracy dla  $\lambda = 2,0$  wykazał układ czterech świec zapłonowych i wyniosła ona 1,7%.

Biorąc pod uwagę relację pomiędzy osiąganymi silnika i toksycznością spalin można stwierdzić, że najkorzystniejszym składem mieszanki była  $\lambda = 1,8$ . Praca indykowana wyniosła tutaj 0,552 MJ/m<sup>3</sup>, sprawność indykowana była w granicach 33%, współczynnik niepo-

wtarzalności pracy indykowanej  $COV_{Li}$  był najniższy i osiągnął wartość 1,2%. Wszystkie te wartości otrzymano dla konfiguracji czterech centralnie umieszczonych świec zapłonowych.

Zapłon wielopunktowy pozwalał spalać gazowe mieszanki homogeniczne o  $\lambda = 1,8$  i  $2,0$  z zachowaniem wysokiej powtarzalności obiegów, dla której  $COV_{Li}$  nie przekraczało 1,7%, natomiast w silniku z zapłonem centralnym osiągnięcie takiej wartości  $COV_{Li}$  było możliwe tylko w zakresie mieszanek mniej ubogich o  $\lambda = 1,6$ .

Silnik z zapłonem wielopunktowym zasilany gazem z  $\lambda = 1,8$  i  $2,0$  pozwalał osiągać emisję jednostkową  $NO_x$  wynoszącą odpowiednio 8,9 oraz 0,6 g/kWh znacząco mniejszą od wartości uzyskanych dla silnika jednoświecowego pracującego z taką samą niepowtarzalnością obiegów ( $COV_{Li} = 1,6\%$ ,  $\lambda = 1,6$ ), dla którego stężenie  $NO_x$  w spalinach wyniosło 24,8 g/kWh.

Zastosowanie zapłonu wielopunktowego w silniku gazowym może być skutecznym sposobem zmniejszenia niepowtarzalności obiegów w warunkach zasilania silnika homogenicznymi mieszankami bardzo ubogimi o  $\lambda = 1,8...2,0$  i może, z tego względu, mieć wartości aplikacyjne jeżeli w toku dalszych prac zostanie obniżona emisja substancji toksycznych. Stężenie CO oraz CH można obniżyć poprzez zastosowanie katalizatora oksydacyjnego, natomiast zmniejszonej emisji tlenków azotu można oczekiwać w silniku doładowanym, który będzie mógł poprawnie pracować przy  $\lambda = 2,0$ , gdzie emisja  $NO_x$  w silniku badawczym była niższa od wartości dopuszczalnych (TA-Luft, EURO).

## Literatura

- [1] Cupiał K., „SILNIK” wersja 2001.5 - program do opracowywania wykresów indykatorowych, Instytut Maszyn Tłokowych i Techniki Sterowania, Częstochowa 2001
- [2] Die Novellierung der TA-Luft 2002 – Bedeutung für KWK-Anlagen, TA-Luft 5.4.1.4, 2002
- [3] Diesel & Gas Turbines Worldwide Catalog 2003, 68<sup>th</sup> Annual Product & Buyer's Guide For Engine Power Markets, USA 2003
- [4] Gruca M., „LCTXR” - program do rejestracji i analizy sygnałów, Instytut Maszyn Tłokowych i Techniki Sterowania, Częstochowa 2001
- [5] Kociszewski A., *Spalanie mieszanek homogenicznych w silniku tłokowym z zapłonem wielopunktowym*, Praca doktorska, Politechnika Częstochowska, 2004
- [6] Kopacz J., Kociszewski A., Katolik G., *Badawczy silnik gazowy z zapłonem wielopunktowym*, Międzynarodowa Konferencja Naukowa SILNIKI GAZOWE 1997