

ENGINE 6C107 FUELLED WITH LPG

Wojciech Bardziński

Przemysłowy Instytut Motoryzacji, ul. Jagiellońska 55, 03-301 Warszawa,
e-mail: bls_pimot@go2.pl, tel. (022) 8112897

Andrzej Żółtowski

Instytut Transportu Samochodowego, ul Jagiellońska 80, 03-301 Warszawa,
e-mail: andzol@its.waw.pl, tel. (022) 8113231 wew. 195

Abstract

The paper contains description of 6C107 Diesel engine fuel system conversion into gaseous system fuelled with LPG. It describes changes has been made in construction of the engine and problems with its emission to conform EURO III requirements.

SILNIK 6C107 ZASILANY GAZEM PROPAN-BUTAN

Streszczenie

W referacie omówiono założenia konstrukcyjne i zmiany wprowadzone w silniku 6C107 niezbędne do przystosowania tego silnika do zasilania gazem propan-butan; przedstawiono wybrane wyniki badań stanowiących tego silnika, ze szczególnym uwzględnieniem możliwości spełnienia przez ten silnik wymogów EURO III.

1. Wstęp

Od połowy lat dziewięćdziesiątych w Polsce rozpoczął się burzliwy, lecz nie zawsze skoordynowany rozwój zasilania LPG pojazdów mechanicznych: samochodów osobowych, dostawczych i ciężarowych oraz maszyn roboczych (wózków widłowych i transportowych). Znacznie częściej zasilanie LPG jest stosowane w samochodach osobowych i dostawczych niż w samochodach ciężarowych.

Paliwo gazowe LPG - odpad poprodukcyjny w procesie przetwarzania ropy naftowej - ma pod względem ekologicznym szereg zalet w stosunku do benzyn i oleju napędowego, a w sprzedaży detalicznej jest wyraźnie tańsze od paliw tradycyjnych (benzyna, olej napędowy). Z tego powodu stosowanie LPG do zasilania silników pojazdów ciężarowych i autobusów wydaje się atrakcyjne.

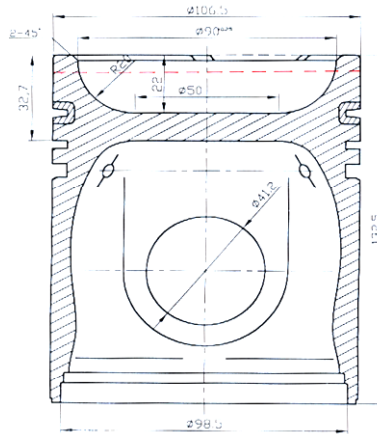
2. Silnik 6C107 zasilany LPG

Koncepcja zastosowania silnika zasilanego paliwem LPG do napędu autobusu miejskiego AUTOSAN A 10-10M powstała jako wynik prac prowadzonych w Przemysłowym Instytucie Motoryzacji oraz w firmie NGV AUTOGAS w ramach projektu celowego nr 2647/C T-12-9/2000 i obejmowała następujące zagadnienia techniczne:

- opracowanie projektu zabudowy osprzętu instalacji gazowej w autobusie,
- opracowanie adaptacji silnika o ZS typu 6C107 do zasilania LPG,
- modyfikacja bądź opracowanie osprzętu silnika w postaci układów: zasilania gazem, paliwowego, zapłonowego, chłodzenia i wydechowego, dostosowanych do zasilania silnika paliwem gazowym,
- badania optymalizacyjne silnika pod kątem spełnienia wymogów Euro III, w tym dobór parametrów regulacyjnych oraz dobór reaktora katalitycznego,

- wykonanie prototypu autobusu AUTOSAN A10-10M zasilanego LPG oraz jego badania eksploatacyjne.

W niniejszym artykule zostały omówione zagadnienia związane z opracowaniem koncepcji, adaptacją i badaniami stanowiskowymi silnika 6C107 zasilanego LPG oraz porównano osiągi silnika zaadaptowanego do zasilania gazem z osiągi silnika o ZS produkowanego seryjnie.



Rys. 1. Adaptowany tłok silnika o stopniu sprężania 8,5
Fig. 1. The adapted engine piston of 8.5 compression degree

Doświadczenia wielu firm, poparte analizą techniczno-ekonomiczną i odnotowane w literaturze przedmiotu, wskazują, że adaptacja silnika o zapłonie samoczynnym do zasilania gazem powinna wiązać się z całkowitą zamianą systemu spalania z zapłonu samoczynnego na zapłon iskrowy i ze zrezygnowaniem z dwupaliwowości takiego silnika. Adaptacja ta powoduje na tyle nieodwracalne zmiany, że niemożliwy staje się powrót do zasilania olejem napędowym przerobionego silnika.

W ramach adaptacji seryjnego (o ZS) silnika 6C107 do zasilania LPG rozwiązano szereg problemów konstrukcyjnych, czego wynikiem było wprowadzenie następujących zmian:

- Komora spalania w postaci wgłębienia w tłoku (rys.1). W celu obniżenia stopnia sprężania silnika do wartości ok. $\epsilon \approx 9$, powiększono objętość oryginalnej komory poprzez splanowanie denka tłoka.
- W głowicach silnika, poprzez nagwintowanie gniazd wtryskiwaczy gwintem M12×1,25, zapewniono możliwość instalacji świec zapłonowych.
- Układ dolotowy: seryjny kolektor dolotowy (odlewany) zastąpiono dostosowanym do zasilania gazem spawanym kolektorem, z gałęziami o jednakowych długościach, zapewniającym jednakowy rozdział mieszanki palnej pomiędzy wszystkie cylindry. Układ wyposażono w mieszalnik konstrukcji firmy NGV AUTOGAS z wymienną zwężką oraz przepustnicą sterowaną elektrycznie w zakresie małych kątów wychyleń (do regulacji prędkości obrotowej biegu jałowego i podczas hamowania silnikiem).
- Elektroniczny układ zapłonowy firmy NGV AUTOGAS o napięciu wtórnym 30kV, z sześcioma cewkami zapłonowymi, wyposażony w zintegrowany system automatycznej regulacji kąta wyprzedzenia zapłonu, uwzględniający zmiany prędkości obrotowej wału korbowego. Sygnał sterujący przeskokiem iskry pomiędzy elektrodami świecy zapłonowej pochodził z czujnik indukcyjnego współpracującego z kołem sygnałowym umieszczonym na wałku napędowym pompy wtryskowej. Zastosowano specjalne przewody wysokiego napięcia odporne na przebicia i świece zapłonowe firmy BRISK typu 1BR12S.

- Układ sterujący dawkowaniem paliwa: samoadaptacyjny ze sterowaniem mikroprocesorowym, wyposażony w sondę lambda.
- Układ zasilania gazowego: wyposażony w dwa równolegle połączone reduktory ciśnienia firmy LANDI (rozwiązanie to pozwoliło na zastosowanie mniejszych pod względem przepustowości reduktorów, które są dostępne na rynku i charakteryzują się dobrą jakością wykonania i powtarzalnością charakterystyk). Sterowanie dawkowaniem gazu realizowano za pomocą zaworu dławiącego napędzanego silnikiem krokowym. Układ ten sterowany mikroprocesorem odtwarzał z elektronicznej pamięci mapę wymaganych dawek paliwa i kątów wyprzedzenia zapłonu oraz korygował dawkę na podstawie sygnałów generowanych przez sondę lambda, umieszczoną w kolektorze wydechowym przed reaktorem katalitycznym.
- Układ wylotowy: zainstalowano reaktor katalityczny potrójnego działania (redukująco-utleniający), co efektywnie zmniejszyło emisję CO, NO_x, HC.
- Układ chłodzenia: ze względu na fakt odprowadzania do układu chłodzenia przez silnik o zapłonie iskrowym większej ilości ciepła niż ma to miejsce w silniku o ZS, co ma związek z większą powierzchnią komór spalania, większymi temperaturami czynnika roboczego oraz mniejszą sprawnością cieplną obiegu Otto, niezbędne było zastosowanie w autobusie wydajniejszej chłodnicy, przy zachowaniu jej dotychczasowych wymiarów gabarytowych.

Na rys. 1 przedstawiono przekrój tłoka, zaadaptowanego do zasilania silnika gazem. Zmniejszenie stopnia sprężania uzyskano przez roztoczenie komory spalania do objętości około 130 cm³ (dla $\epsilon=9,5$). Linią przerywaną ukazano obniżenie denka tłoka dla $\epsilon=8,5$.

3. Badania stanowiskowe silnika



Rys.2. Silnik 6C107 na stanowisku hamownianym
Fig. 2 Engine 6C107 mounted at braking device station.

Na rys. 2 przedstawiono silnik 6C107 zaadaptowany do zasilania LPG, ustawiony na stanowisku hamownianym. Na pierwszym planie są widoczne sterowniki układów paliwowego i zapłonowego.

Badania silnika przeprowadzono w Przemysłowym Instytucie Motoryzacji w Warszawie na stanowisku hamownianym wyposażonym w:

- hamulec elektrowirowy firmy Schenck typu W-260 i komputerowy układ sterujący

firmy Schenck-Pegasus, sprzęgnięty z systemem automatyzacji sterowania hamulcem i akwizycji danych pomiarowych X-One, pozwalającym na rejestrację wyników pomiarów;

- zestaw analizatorów do pomiarów stężeń CO₂, CO, HC, NO_x w spalinach,
- zestaw termometrów i termopar do pomiaru temperatur,
- układ do indykowania silników spalinowych typu Indiscop 647 firmy AVL, współpracujący z przetwornikiem piezoelektrycznym umieszczonym w świecy zapłonowej typu 6117A17 firmy Kistler.

Badania silnika wykonano dla dwóch wartości stopnia sprężania silnika, $\epsilon=9,5$ i $8,5$. Większa, wyjściowa wartość stopnia sprężania ($\epsilon=9,5$) zapewniała wyższą sprawność i moc silnika. W trakcie badań okazało się jednak, że ze względów ekologicznych konieczne było obniżenie stopnia sprężania do wartości $\epsilon=8,5$, zapewniającej zmniejszenie nadmiernej emisji tlenków azotu.

W tabelicy 1 porównano osiągi silnika 6C107 zasilanego paliwem gazowym (przy $\epsilon=9,5$) z osiąganymi seryjnie produkowanego silnika o ZS.

Tablica 1. Porównanie osiągnięć silnika 6C107 zasilanego LPG i silnika 6CT107 w wersji ZS
 Table 1. Comparison between the output of the 6C107 engine powered with LPG and 6CT107 engine of ZS version

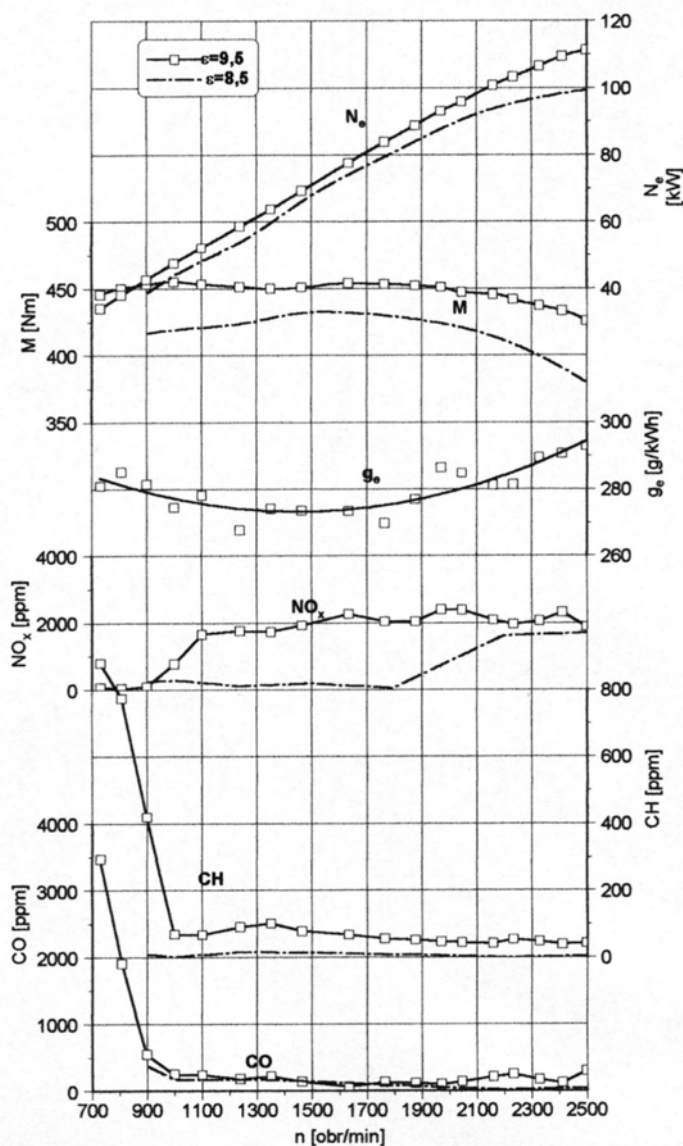
	6CT107	6C107 LPG
Moc znamionowa [kW]:	110,5	111,3
Prędkość znamionowa n_N [obr/min]:	2600	2500
Maksymalny moment obrotowy [Nm]:	490,5	455
Prędkość momentu maksymalnego (n_M) [obr/min]:	1600	1000
Minimalne jednostkowe zużycie paliwa (g_{emin}) na charakterystyce zewnętrznej [g/kWh]:	258	273
M_{max}/M_N :	1,12	1,07
n_N/n_M :	1,62	2,5
współczynnik elastyczności:	1,88	2,67

Z tabelicy 1 wynika, że w wyniku adaptacji silnika do zasilania LPG wzrosła jego moc znamionowa do 111,3 kW (o 0,8 kW więcej niż w silniku 6C107 o zapłonie samoczynnym). Można przypuszczać, że dzięki temu maksymalna prędkość jazdy autobusu z silnikiem zaadaptowanym do zasilania LPG będzie porównywalna z maksymalną prędkością autobusu produkowanego seryjnie.

Chociaż wartość maksymalnego momentu obrotowego silnika zasilanego LPG jest większa o około 5% od wartości maksymalnego momentu obrotowego wolnossącego silnika 6C107, jest jednak mniejsza o 35,5 Nm (około 10%) od momentu obrotowego wersji doładowanej tego silnika. Fakt ten może się odbić niekorzystnie na dynamice autobusu z silnikiem zasilanym LPG. Jednak ze względu na korzystniejszy - z punktu widzenia własności trakcyjnych pojazdu - przebieg momentu obrotowego w silniku zasilanym gazem w stosunku do przebiegu momentu w silniku o ZS oraz z powodu większej elastyczności silnika zasilanego gazem fakt obniżenia wartości maksymalnej momentu obrotowego silnika zasilanego LPG nie powinien odbić się w znaczący sposób na rzeczywistych własnościach trakcyjnych autobusu. Większa elastyczność silnika zasilanego LPG (lepsze dostosowywanie się silnika do zmiennych obciążeń) w praktyce może powodować mniejszą częstość zmian biegów przez kierującego pojazdem.

Na rys. 3 przedstawiono charakterystykę zewnętrzną silnika 6C107 zasilanego LPG dla dwóch stopni sprężania (8,5 i 9,5). Chęć dostosowania silnika do spełnienia wymagań EURO II wymusiła konieczność zmniejszenia stopnia sprężania do wartości 8,5, co spowodowało spadek mocy (w stosunku do $\epsilon=9,5$) o 2% przy $n=1500$ obr/min i aż o 8% przy $n=2500$

obr/min (do wartości 102 kW, to jest wartości zbliżonej do wolnossącej wersji silnika 6C 107 o zapłonie samoczynnym).

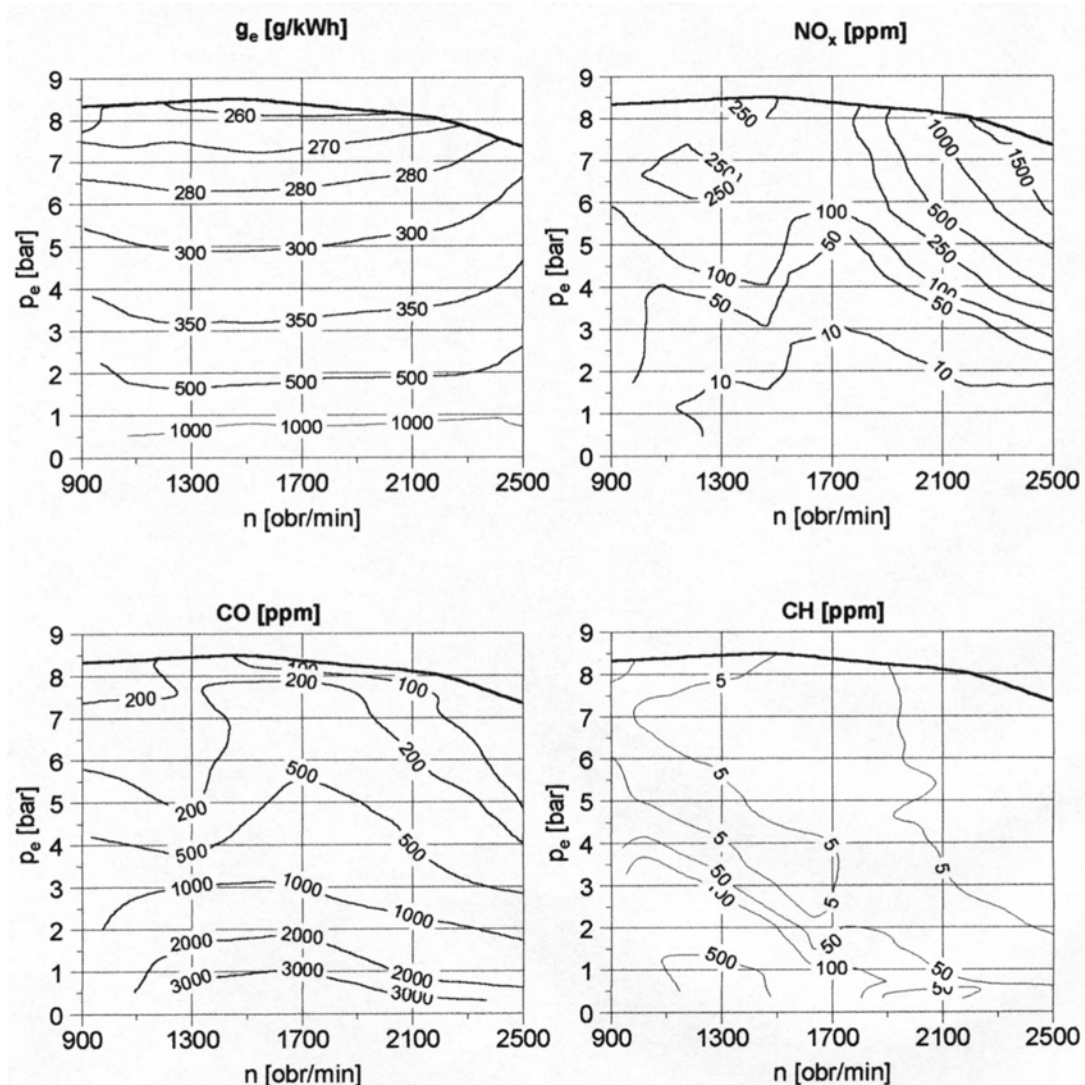


Rys. 3. Charakterystyka zewnętrzna silnika 6C107 zasilanego LPG
 Fig. 3. Outer characteristics of 6C107 engine powered with LPG

Charakterystykę ogólną oraz stężenia CO, HC i NO_x w spalinach silnika adaptowanego przedstawiono na rys. 4. W tabelicy 2 przedstawiono wyniki badań emisji silnika w 13-o fazowym teście wg regulaminu 49 ECE. Emisję badanego silnika oceniano na podstawie stacjonarnego 13-o fazowego cyklu, gdyż nie dysponowano hamulcem elektrycznym, który pozwoliłby na wykonanie dynamicznego testu ETC przeprowadzanego w warunkach nieustalonych.

Ze względu na wysoką wartość liczby oktanowej paliw gazowych, paliwa te mogą być spalane w silnikach o względnie dużej wartości stopnia sprężania. Wymagania EURO III w regulaminie 49 ECE zostały tak ustanowione, że aby je spełnić silnik pracujący pod pełnym obciążeniem musi charakteryzować się stężeniem NO_x w spalinach poniżej 1000 ppm. Jest to wymaganie dość trudne do spełnienia zważywszy, że w nie oczyszczonych spalinach (przed reaktorem katalitycznym) stężenie NO_x może przekroczyć wartość 2000 ppm (co miało

miejsce przy stopniu sprężania 9,5). Wymaga to od konstruktora silnika kompromisu pomiędzy sprawnością a emisją, i - jeśli nie stosuje się recyrkulacji spalin - konieczne staje się odprężenie silnika i opóźnienie zapłonu.



Rys. 4. Charakterystyka ogólna silnika 6C107 zasilanego LPG: przebieg jednostkowego zużycia paliwa [g/kWh] oraz stężenia CO, HC, NO_x [ppm] w spalinach

Fig. 4. Overall characteristics of 6C107 engine powered with LPG: course of unitary use of fuel [g/kWh] and concentration of CO, HC, NO_x [ppm] in exhaust fumes

Zmniejszenie stopnia sprężania w badanym silniku z 9,5 do 8,5 spowodowało zmniejszenie emisji NO_x o 3,3 g/kWh. Kolejne obniżenie emisji NO_x o dalsze 3,2 g/kWh udało uzyskać się w wyniku opóźnienia kąta wyprzedzenia zapłonu o 9° OWK w stosunku do wartości optymalnej ze względu na moc silnika. Z danych zawartych w tablicy 2 wynika, że zastosowanie stopnia sprężania równego 8,5 oraz kąta wyprzedzenia zapłonu równego 11° OWK sprawia, że badany silnik w tej kompletacji spełnia wymagania EURO II. Okazało się, że przy tym stopniu sprężania dla uzyskania zadawalającej emisji dodatkowo musiał być opóźniony zapłon o 9° OWK w stosunku do wartości, przy której silnik uzyskiwał najwyższą moc.

Zastosowanie recyrkulacji spalin, której stopień intensywności oceniono na 2 %, pozwoliło na dalsze obniżenie emisji NO_x (tablica 3). Wywołała ona jednak spadek mocy silnika do 99

kW, a więc w przybliżeniu w stopniu równym stopniowi recyrkulacji. Wyniki przedstawione w tabeli 3 wskazują, że tak zmodyfikowana wersja silnika spełnia poziom wymagań EURO III dotyczących emisji CO, CH i NO_x w 13-o stopniowym teście stacjonarnym (wartości dopuszczalne: NO_x=5,0 g/kWh, CO=2,1 g/kWh i CH=0,66 g/kWh).

Tablica 2. Wyniki badań jednostkowej emisji (w g/kWh) silnika 6C107 zasilanego gazem propan-butan według regulaminu 49/02 dla różnych stopni sprężania (ϵ) i różnych wartości kąta wyprzedzenia zapłonu (Θ)

Table 2. The results of research of unitary emission of fumes (in g/kWh) of 6C107 engine powered with propane-butane according to regulation 49/02 for various compression degrees (ϵ) and angles of ignition precedence (Θ)

składnik spalin	$\epsilon = 8,5$		$\epsilon = 9,5$ ($\Theta = 20^0$ OWK)
	$\Theta = 11^0$ OWK	$\Theta = 20^0$ OWK	
NO _x	5,30	7,51	10,8
CO	0,78	0,52	1,9
CH	0,07	0,06	0,23

Tablica 3. Wpływ recyrkulacji spalin na emisję silnika 6C107 zasilanego LPG

Table 3. Influence of fumes re-circulation on emission of 6C107 engine powered with LPG

składnik spalin	emisja jednostkowa [g/kWh]
NO _x	4,85
CO	0,79
CH	0,08

4. Wnioski

- W adaptacjach silników o zapłonie samoczynnym do zasilania mieszanką stechiometryczną (np. LPG) niezbędne jest stosowanie reaktora katalitycznego potrójnego działania oraz układu precyzyjnie utrzymującego skład mieszanki paliwowo-powietrznej.
- Zagadnienie stabilności i precyzji regulacji składu mieszanki paliwowo-powietrznej nabiera szczególnego znaczenia podczas prowadzenia badań emisji w warunkach nieustalonych.
- W silnikach adaptowanych do zasilania gazowego najpoważniejszym problemem do rozwiązania jest zapewnienie emisji tlenków azotu na wymaganym poziomie.
- Silnik 6C 107 zasilany LPG o stopniu sprężania $\epsilon=8,5$ spełnia wymagania homologacyjne EURO II dotyczących emisji CO, CH i NO_x.
- W badaniach według 13-o stopniowego testu badany silnik spełnia wymagania EURO III dotyczące emisji CO, CH i NO_x.