

Jerzy DUTCZAK*

Silnik ZI zasilany za pomocą wtrysku ciekłego propanu lub ciekłego butanu do kolektora dolotowego

W artykule przedstawiono wyniki badań symulacyjnych i hamownianych silnika ZI zasilanego wtryskowo ciekłą mieszaniną propanu i butanu oraz czystym propanem i czystym butanem. Porównanie wybranych wskaźników roboczych silnika dla poszczególnych przypadków zasilania potwierdziło możliwość wykorzystania ciepła parowania paliwa do poprawy napełnienia cylindra, a w wyniku tego procesu – poprawy wskaźników efektywnych. Zastosowanie zasilania wtryskowego skroplonym gazem w fazie ciekłej pozwoliło na uzyskanie korzystniejszych wskaźników roboczych silnika niż przy zasilaniu benzyną. W badaniach zastosowano zmodyfikowany, fabryczny układ jednopunktowego wtrysku benzyny oraz własny sterownik umożliwiający zarządzanie układem zasilania silnika.

Słowa kluczowe: silnik ZI, zasilanie silnika, wtrysk gazu, ciekły gaz, propan, butan

SI engine fuelled by injection of pure propane or pure butane into the intake manifold

The results of the simulation and the test stand investigations of the 170.A1 engine fed by the injection of a liquid phase of propane-butane or pure propane and pure butane have been reported in the article. A modified serial single point gasoline injection system and an engine controller of own design engine have been used and discussed. The Comparison of selected engine parameters for given cases of fuelling confirmed the possibility of the use of the evaporating heat of fuel to improve the cylinder filling. The effective parameters of an engine fuelled with pure propane or pure butane were more beneficial than for gasoline fuelling.

Key words: SI engine, engine fuelling, gas injection, liquid gas, propane, butane

1. Wstęp

Silnik zasilany propanem-butanem w postaci gazowej charakteryzuje się mniejszymi wartościami momentu obrotowego i mocy niż silnik zasilany benzyną. W przypadku silników zasilanych paliwem gazowym albo benzyną spadek mocy jest negatywnie odbierany przez użytkowników pojazdów. Zastosowanie układów zasilania paliwem gazowym IV generacji, a więc systemów wielopunktowego, sekwencyjnego wtrysku (wdmuchu) gazu do kolektora dolotowego nie zmienia tej sytuacji. Paliwo gazowe zajmuje w mieszance znaczną objętość, zmniejszając tym samym ilość powietrza doprowadzaną do cylindra, co ma istotny wpływ na ilość ciepła wydzieloną w procesie roboczym. Zastosowanie wtrysku skroplonego gazu w fazie ciekłej pozwala wykorzystać ciepło parowania do obniżenia temperatury ładunku, zwiększenia jego gęstości i w efekcie zwiększenia masy ładunku doprowadzanego do cylindra.

2. Badania symulacyjne

W Zakładzie Silników z Zapłonem Iskrowym Politechniki Krakowskiej został opracowany program symulacyjny procesów roboczych silnika spalinowego, wykorzystywany do obliczeń dotyczących m.in. zasilania silnika paliwem gazowym. Istnieje możliwość rozszerzania podstawowego modułu programu o nowe procedury dotyczące np. parametrów konstrukcyjnych konkretnego silnika lub wyliczania niestandardowych wielkości charakteryzujących obieg pracy [8]. Program symulacyjny wzbogacono o część obejmującą tworzenie mieszanki opartą na matematyczno-fizycznym modelu tego procesu.

1. Introduction

The engines fuelled with the gaseous phase of propane-butane have lower torque and power values than the engines fuelled with gasoline. In the case of engines fed with LPG, the noticeable power decrease in comparison to gasoline feeding is negatively perceived by car users. The use of generation IV LPG supply systems i.e. multipoint sequential LPG injection into the inlet manifold, does not change the situation. LPG fuel takes a significant volume in the mixture, reducing the amount of air supplied into the engine cylinders, which essentially affects the heat release degree. The injection of liquid phase propane-butane enables the utilization of the evaporating heat of fuel to decrease the charge temperature and, hence, to increase its density and mass of the cylinder charge.

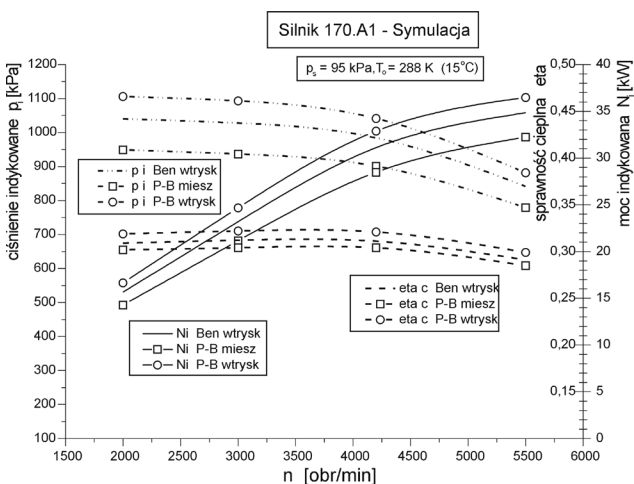
The subject of the investigation presented in this article is to determine the influence of type of liquid phase gaseous fuel injected into the inlet manifold, on selected work parameters of combustion engines.

2. Simulation works

In the Spark Ignition Engines Department of Cracow University of Technology a simulation program of work processes of combustion engines has been developed, later applied to the calculations among the others concerned LPG fuelling of an engine. There is a possibility of extension of the basic program module with new procedures related to the design parameters of a given engine or enumerating non standard values describing the engine work cycle. The simulation program has been extended with the unit containing

Model tworzenia mieszanki obejmuje zjawisko parowania (wrzenia) wtryskiwanego gazu oraz wymianę ciepła między tworzoną ładunkiem a ścianami kanału dolotowego. Założono różne udziały masowe propanu i butanu w mieszaniu a także zasilanie tylko propanem albo butanem.

W oparciu o tak zmodyfikowany program wykonano badania teoretyczne, zweryfikowane pozytywnie przez badania hamowniane [1, 2, 3, 5]. Przykładowe wyniki obliczeń dotyczących przypadku zasilania silnika 170.A1 przez wtrysk ciekłej mieszaniny propanu i butanu do kolektora dolotowego przedstawiono na rysunku 1 [6]. Wskaźniki robocze silnika zasilanego wtryskowo propanem-butanem wykazywały znaczną poprawę w porównaniu ze wskaźnikami uzyskanymi przy zasilaniu mieszalnikowym tym paliwem, prezentując również korzystniejsze wartości niż przy wtryskowym zasilaniu benzyną.



Rys. 1. Symulowana charakterystyka prędkościowa silnika 170.A1, ciśnienie w przewodzie dolotowym $p_s = 95$ kPa, temperatura otoczenia $T_o = 288$ K (15°C), zasilanie mieszalnikowe propanem-butanem, wtryskowe benzyną lub propanem-butanem, skład mieszaniny propanu i butanu 50/50

Fig. 1. Simulated engine speed characteristic of the 170.A1 engine, intake pipe pressure $p_s = 95$ kPa, ambient air temperature $T_o = 288$ K (15°C), propane-butane mixer feeding, injection feeding with gasoline or propane-butane, percentage share of propane and butane 50/50

W przypadku zasilania silnika mieszaniną propanu i butanu, doświadczalna weryfikacja badań symulacyjnych jest utrudniona przez duży rozrzut parametrów paliwa LPG dostępnego w wolnej sprzedaży w stacjach tankowania. Biorąc pod uwagę zdecydowano się zasilac silnik czystym propanem lub czystym butanem, co umożliwi założenie jednoznacznych parametrów paliwa do badań symulacyjnych i powinno ułatwić doświadczalną weryfikację wyników. Wybór czystych, głównych składników LPG daje również możliwość określenia własności silnika zasilanego każdym ze składników mieszaniny i pozwala na ustalenie istotności udziału składników na proces zasilania silnika.

W celu sprawdzenia wpływu składu mieszanki na parametry robocze silnika zasilanego gazem, badania symulacyjne przeprowadzono dla ustalonych wartości λ w przedziale od 0,8 do 1,6. Obciążenie silnika reprezentowane było przez ciśnienie w przewodzie dolotowym p_s . Obliczenia

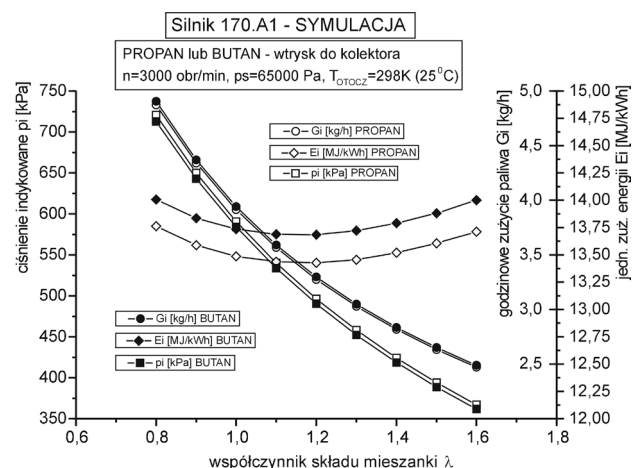
mixture formation, based on mathematical-physical model of that process.

The mixture formation model includes the phenomenon of vaporization (boiling) of injected liquid gas and heat exchange between the formed charge and the intake duct walls. An equal percentage share of propane and butane (50/50) was assumed in the fuel mixture as well as the feeding with pure propane and butane separately.

Based on such a modified program a number of theoretical investigations was performed, later positively verified by the engine tests [1, 2, 3, 5]. Exemplary results of the calculations for the case of the 170.A1 engine fuelled by intake manifold single point injection of liquid propane-butane are shown on Fig. 1 [6]. The work parameters of the engine fed by the injection of propane-butane proved a significant improvement in comparison to the parameters obtained at mixer feeding with the same fuel. The values of the above mentioned parameters were also better than for the case of engine feeding by gasoline injection.

Interesting, from the research point of view, is the checking of the effect of mixture composition on the work parameters of LPG fuelled engine. The experimental verification of the simulation works is made difficult by the big variance of the parameters of LPG available at the gas stations. The results of the test stand investigations conducted with use of the specially formulated fuel should affect the directives related to the commercial propane-butane mixture.

Taking the above into consideration, the engine was fuelled with pure propane or pure butane, which enabled unique assumptions of fuel composition for the simulation program and should make the verification of the results easier. The choice of pure main components of LPG enables the determining of the properties of an engine fuelled with each of the mixture components and enables the determining of the significance of the influence of the share of each component on the feeding process.



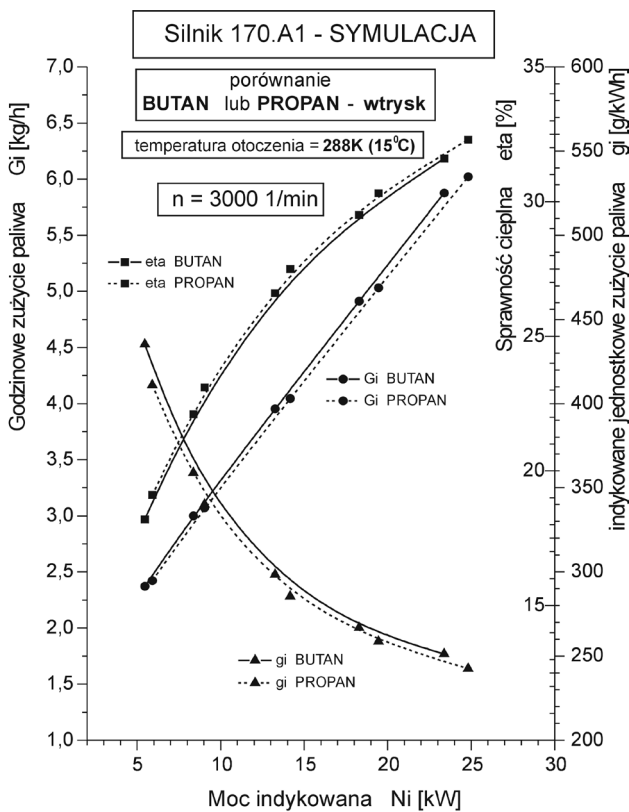
Rys. 2. Symulowana charakterystyka regulacyjna składu mieszanki λ silnika 170.A1, zasilanie propanem lub butanem, prędkość obrotowa 3000 obr/min, ciśnienie w przewodzie dolotowym 65 kPa

Fig. 2. Simulated regulation characteristic of the 170.A1 engine, injection fuelling with pure propane or pure butane, ambient air temperature 298K (25°C), engine speed 3000 1/min, inlet duct pressure 65 kPa

wykonano dla temperatury otoczenia 288 K (25°C). Obniżenie temperatury ładunku w wyniku parowania paliwa, przy zasilaniu propanem wynosiło 26,3°C, a przy zasilaniu butanem 24,1°C.

Przykładową charakterystykę porównawczą składu mieszanki λ silnika 170.A1 zasilanego wtryskowo czystym propanem lub czystym butanem dla średniego obciążenia silnika $p_s = 65$ kPa przedstawiono na rysunku 2 [7].

Na rysunku 3 przedstawiono charakterystykę obciążeniową sporządzoną na podstawie danych uzyskanych z symulacji [6]. Wybrana temperatura otoczenia, w której prowadzono obliczenia zapewniała całkowite odparowanie dawki, zarówno propanu jak i butanu.



zasilanie wtryskowe czystym propanem lub czystym butanem, temperatura otoczenia 288 K (15°C), współczynnik nadmiaru powietrza $\lambda = 1$, prędkość obrotowa wału korbowego silnika $n = 3000$ obr/min

Fig. 3. Simulated load characteristic of the 170.A1 engine fuelled with pure propane or pure butane injection into the inlet duct, ambient air temperature 288K (15°C), air excess coefficient $\lambda = 1$, engine speed $n=3000$ 1/min

Temperatura wrzenia butanu wynosi około 273 K (0°C). Jeżeli proces zasilania silnika butanem będzie przebiegał przy temperaturze otoczenia niższej od 298 K (+25°C), należy się spodziewać, że nie cała dawka butanu odparuje w przewodzie dolotowym, a zatem obniżenie temperatury ładunku osiągnie wartość mniejszą niż w przedstawionych wyżej wynikach. Obliczone wartości temperatury ładunku silnika 170.A1 zasilanego czystym propanem lub czystym butanem w zależności od temperatury otoczenia przedstawiono na rysunku 4 [6].

The simulation investigations have been conducted for the values of air excess coefficient λ in the range from 0.8 to 1.6.

The engine load was represented by the intake manifold duct pressure p_s . The calculations have been done for the ambient air temperature 298 K (25°C). The charge temperature decreased as an effect of fuel vaporization and reached for the case of propane feeding 26.3 K and for the case of butane feeding 24.1 K.

The simulated exemplary comparative characteristic of the air excess coefficient λ realized for the 170.A1 engine fuelled with pure propane or pure butane injection has been presented on Fig. 2.

Fig. 3 shows the load characteristic drawn up based on the simulation data. The chosen ambient air temperature for which the calculations were made enabled the total vaporization of both propane and butane. Vaporization temperature of butane equals approximately 273 K (0°C). If the feeding process runs at the ambient temperature lower than 298 K (+25°C), one should expect that not all the butane dose will evaporate in the intake duct and, hence, the charge temperature drop will reach the value lower than in shown results.

The calculated values of charge temperature of the 170.A1 engine fed with pure propane or pure butane versus ambient air temperature are presented in Fig. 4 [6].

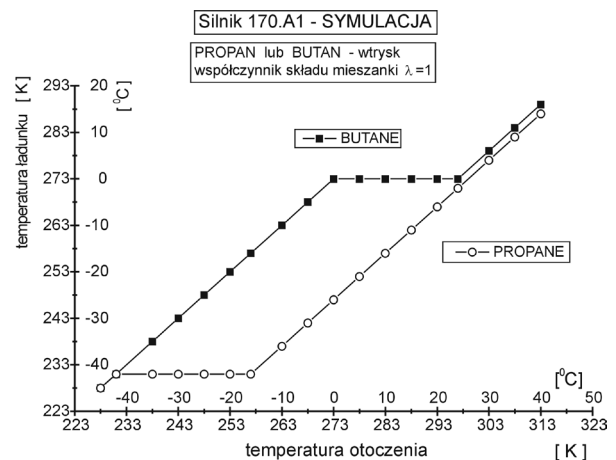


Fig. 4. Expected values of charge temperature of the 170.A1 engine fuelled with pure propane or pure butane, air excess coefficient $\lambda = 1$

Fig. 4. Expected values of charge temperature of the 170.A1 engine fuelled with pure propane or pure butane, air excess coefficient $\lambda = 1$

3. Conclusions from the simulation works

Work parameters of the engine fed by the injection of propane-butane proved the advantageous values in comparison to the parameters proved for mixer feeding with that fuel as well as for gasoline injection feeding.

Feeding of an engine by means of the liquid propane injection into the inlet duct doesn't essentially affect the differences in values of the mean indicated pressure P_i and the indicated power N_i in comparison to the case of butane feed-

3. Wnioski z badań symulacyjnych

Wskaźniki robocze silnika zasilanego wtryskowo propanem-butanem wykazywały korzystniejsze wartości w porównaniu ze wskaźnikami uzyskanymi przy zasilaniu mieszalnikowym tym paliwem, jak również przy wtryskowym zasilaniu benzyną.

Zasilanie silnika przez wtrysk ciekłego propanu do przewodu dolotowego nie powoduje zasadniczych różnic w wartości średniego ciśnienia indykowanego P_i oraz mocy indykowanej N_i w porównaniu z przypadkiem zasilania butanem. Różnica na korzyść propanu wynosi jedynie około 1,2%. Jednostkowe zużycie energii dla propanu ma wartość mniejszą (średnio o ok. 1,86%) w porównaniu do jednostkowego zużycia energii dla butanu. Należy podkreślić, że obliczenia prowadzono przy założeniu jednakowych wartości parametrów regulacyjnych silnika takich, jak kąt wyprzedzenia zapłonu i czas spalania mieszanki dla obu paliw. Na tym etapie prac nie dysponowano jeszcze danymi eksperymentalnymi.

Mimo większej wartości ciepła parowania propanu niż butanu, zasilanie wtryskowe propanem nie powodowało obniżenia temperatury ładunku w stopniu wpływającym znacząco na zwiększenie napełnienia cylindra w porównaniu z zasilaniem butanem. Temperatura ładunku doprowadzanego do silnika zasilanego propanem była niższa jedynie o 2,2°C w porównaniu z przypadkiem zasilania butanem.

4. Badania hamowniane

Obiektem badań był silnik 170.A1, którego dane konstrukcyjne i regulacyjne wykorzystano do symulacji. Silnik zamontowano na stanowisku pomiarowym i wyposażono w standardową fabryczną instalację wtryskowego zasilania benzyną, a następnie w opracowany we własnym zakresie wtryskowy układ zasilania ciekłym paliwem gazowym, tj. propanem-butanem, czystym propanem albo czystym butanem. Silnik był konstrukcyjnie przeznaczony do zasilania za pomocą jednopunktowego wtrysku paliwa i zachowano ten system w całym badaniach. Widok ogólny stanowiska pomiarowego przedstawiono na rysunku 5.



Kys. 5. Stanowisko pomiarowe z silnikiem 170.A1
Fig. 5. Test stand with the 170.A1 engine

ing. The advantageous difference for propane is only about 1.2%. The specific energy consumption for propane has a lower value (on average about 1.86%) in comparison to the specific energy consumption for butane. One should note that the calculations were done at assumption of equal values of engine regulation parameters i.e. the ignition advance angle and the time of combustion for both fuels. On this stage there were no experimental data enabling precise assumptions.

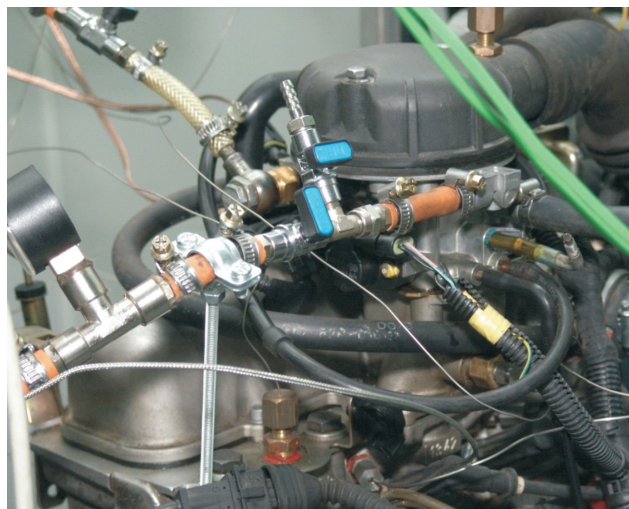
Despite a higher value of vaporization heat of propane as opposed to butane, the injection feeding with propane did not significantly affect the decrease of charge temperature for the improvement of cylinder filling in comparison to the injection feeding of butane. The temperature of charge entering a cylinder of an engine fed with propane was lower only about 2.2 K than in the case of butane.

4. Test stand investigations

The object of investigations was the 170.A1 engine, whose design and regulation data have been used for the simulation. The engine was mounted on a test stand and equipped with a standard, factory-made gasoline injection system. Then the engine was fitted with a liquid gas injection system of own design provided for the feeding with the propane-butane mixture, pure propane or pure butane. A single point injection feeding was constructively provided for this engine and such a system has been used for the whole investigation.

The general view of the test stand is presented in Fig. 5.

In order to eliminate the vaporization of liquid gas in the injector supplying ducts, a pump that increases the fuel pressure to about 0.9 MPa and a waste-way system with adjustable pressure valve were applied. The propane-butane mixture (LPG) came from the general accessible gas station and the chemical composition of that fuel was not determined. Pure propane and pure butane had the purity degree of a reference gas. The engine investigations for gasoline feeding have been conducted for the purpose of comparison.



Kys. 6. Elementy układu zasilania silnika ciekłym gazem
Fig. 6. Elements of the liquid gas feeding system

W celu wyeliminowania zjawiska parowania skroplonego gazu w przewodach zasilających wtryskiwacz zastosowano pompę zasilającą podnoszącą ciśnienie paliwa do ok. 0,9 MPa oraz układ przelewowy w obwodzie wtryskiwacza z zaworem regulującym ciśnienie.

Mieszanka propanu i butanu (LPG) pochodziła z ogólnej dostępnej stacji tankowania i nie określano jej szczegółowego składu chemicznego. Czysty propan i czysty butan posiadał stopień czystości odpowiadający gazowi wzorcowemu. Badania przy zasilaniu benzyną zostały wykonane dla celów porównawczych.

Podczas wszystkich badań mierzono stężenie składników spalin za pomocą analizatora Horiba MEXA 1500GH, do którego prowadzono próbki spalin pobierane przed lub za reaktorem katalitycznym.

5. Metodyka badań hamownianych

Jako reprezentatywne dla zakresu pracy silnika wybrano trzy wartości prędkości obrotowej wału korbowego, tj.: 2500, 3500 oraz 4500 obr/min.

Pomiary przeprowadzono przy pełnym otwarciu przepustnicy dla wartości współczynnika nadmiaru powietrza λ od 0,9 do 1,2 a więc z przedziału zapewniającego poprawną pracę silnika.

Żądana zmiana parametrów regulacyjnych układu zasilania silnika odbywała się przy wykorzystaniu sterownika, którym zastąpiono fabryczny moduł sterujący. Układ sterownika został zbudowany w oparciu o laboratoryjny, komputerowy system przetwarzający sygnały elektryczne firmy National Instruments. System ten był wyposażony dodatkowo w karty pomiarowe typu zegar/licznik oraz wielofunkcyjną kartę pomiarową DAQ. Program obsługi sterownika został napisany w oparciu o środowisko LabVIEW. Interfejs użytkownika tego sterownika przedstawiono na rysunku 7.

W czasie badań hamownianych wykonano pomiary umożliwiające sporządzenie charakterystyk regulacyjnych kąta wyprzedzenia zapłonu dla różnych rodzajów paliwa. W oparciu o charakterystyki regulacyjne kąta wyprzedzenia zapłonu wykonano zestaw charakterystyk regulacyjnych składu mieszanki obejmujących typowe wskaźniki robocze silnika odpowiadające optymalnej wartości kąta wyprzedzenia zapłonu.

Sporządzono również charakterystyki regulacyjne przedstawiające przebiegi zmian stężenia składników spalin.

Wybrane przykłady charakterystyk regulacyjnych składu mieszanki λ silnika 170.A1 dla prędkości obrotowej wału korbowego silnika $n = 3500$ obr/min przedstawiono na rys. 8–11.

Podczas wszystkich badań rejestrowano temperaturę powietrza zasysanego do układu dolotowego oraz temperaturę ładunku bezpośrednio za wtryskiwaczem (pod przepustnicą) i temperaturę ładunku w obu gałęziach kolektora dolotowego. Na tej podstawie sporządzono charakterystyki zawierające przebiegi zmian temperatury w przewodach dolotowych i odpowiadających im zmian współczynnika napełnienia cylindra jako funkcje składu mieszanki. Przykładowe charakterystyki przedstawiono na rysunkach 12 i 13.

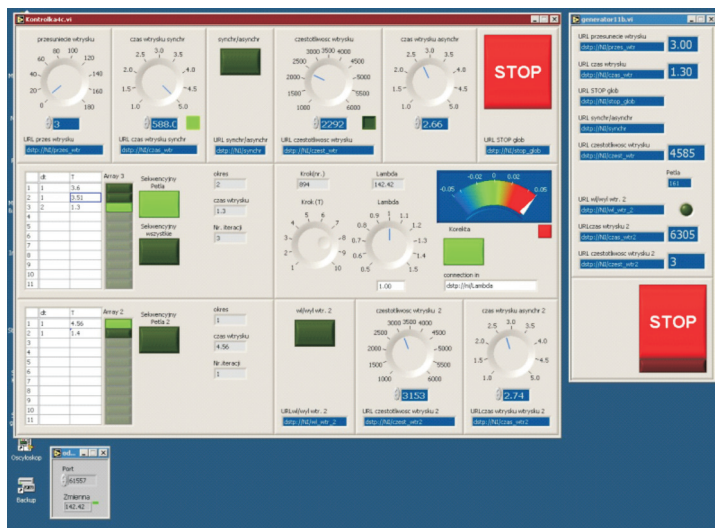
During all the investigations the concentration of exhaust gas components by Horiba MEXA 1500GH analyser were measured. The exhaust gas specimens were collected before and after the catalytic converter.

5. Methodology of the test stand investigations

As the representative for the work range of the engine three values of crank speed, i.e.: 2500 1/min, 3500 1/min and 4500 1/min were selected.

Measurements were done at full throttle opening for values of air excess coefficient from the range of 0.9 to 1.2, i.e. from the range of correct engine work.

The desired change of the regulation parameters of the engine feeding system was realized by use of own controller, which replaced a factory-made control unit. The controller system has been built on the base of a laboratory computer system by the National Instruments Company. The mentioned system was additionally equipped with measuring boards of clock/counter type and multifunctional measuring board DAQ. The program of the controller was written based on the LabVIEW environment. The user interface of that controller is presented in Fig. 7.



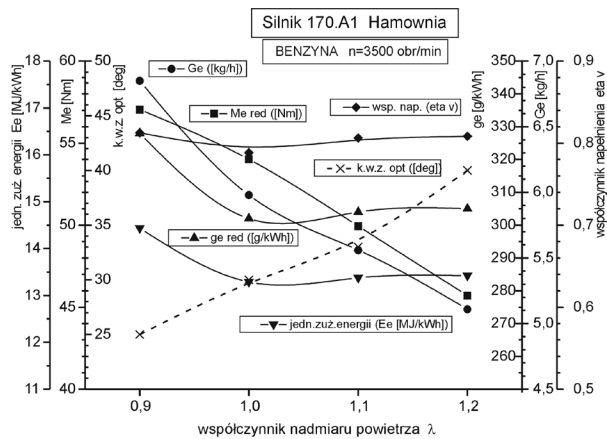
Rys. 7. Interfejs użytkownika programu sterującego pracą wtryskiwacza

Fig. 7. User interface of the injector steering program

During the test bed investigations measurements were done that enabled the preparation of the set of regulation characteristics of the ignition advance angle for different kinds of fuel. Based on the regulation characteristics of the ignition advance angle the set of regulation characteristics of excess air coefficient has been prepared which contained typical work parameters of an engine corresponding to the optimal value of the ignition advance angle. The regulation characteristics presenting the courses of changes of the concentration of exhaust gas components were prepared as well.

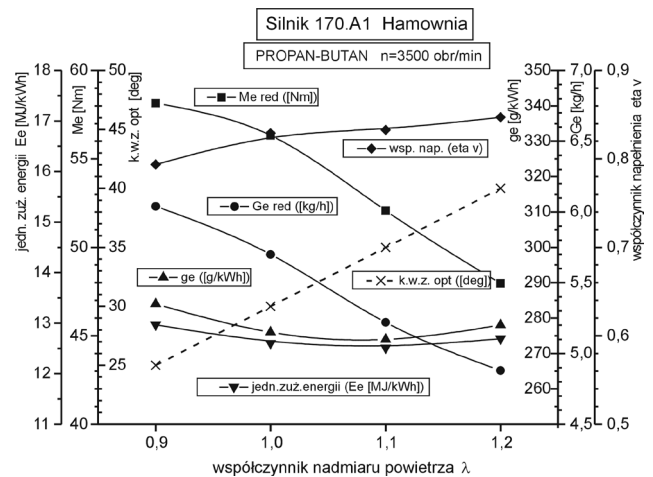
Selected examples of the regulation characteristics of excess air coefficient λ of the 170.A1 engine for engine speed $n = 3500$ 1/min have been presented in Fig. 8–11.

During all the investigations the temperature of air taken in the inlet duct, the temperature of charge close to the injector (under throttle) and the charge temperature in both branch-



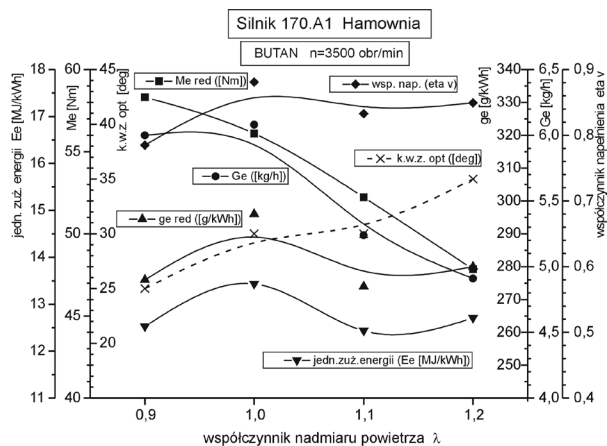
Rys. 8. Charakterystyka regulacyjna składu mieszanki λ silnika 170.A1, prędkość obrotowa wału korbowego silnika $n = 3500$ obr/min, pełne otwarcie przepustnicy, zasilanie wtryskowe benzyną

Fig. 8. Regulation characteristic of the 170.A1 engine, engine speed $n = 3500$ 1/min, full load, gasoline feeding



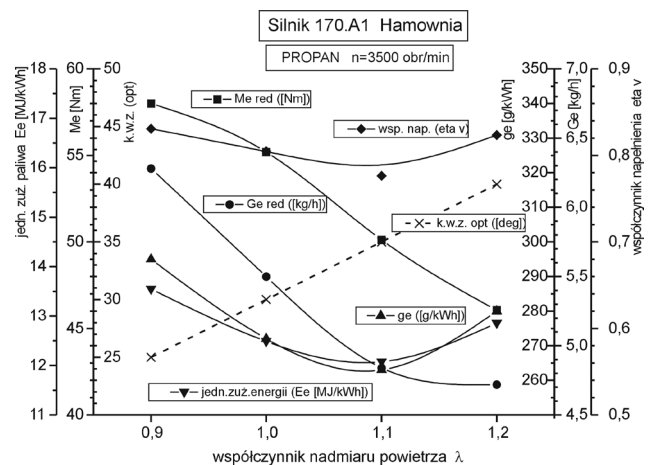
Rys. 9. Charakterystyka regulacyjna składu mieszanki λ silnika 170.A1, prędkość obrotowa wału korbowego silnika $n = 3500$ obr/min, pełne otwarcie przepustnicy, zasilanie wtryskowe propanem-butanem

Fig. 9. Regulation characteristic of the 170.A1 engine, engine speed $n = 3500$ 1/min, full load, propane-butane feeding



Rys. 10. Charakterystyka regulacyjna składu mieszanki λ silnika 170.A1, prędkość obrotowa wału korbowego silnika $n = 3500$ obr/min, pełne otwarcie przepustnicy, zasilanie wtryskowe butanem

Fig. 10. Regulation characteristic of the 170.A1 engine, engine speed $n = 3500$ 1/min, full load, butane feeding



Rys. 11. Charakterystyka regulacyjna składu mieszanki λ silnika 170.A1, prędkość obrotowa wału korbowego silnika $n = 3500$ obr/min, pełne otwarcie przepustnicy, zasilanie wtryskowe propanem

Fig. 11. Regulation characteristic of the 170.A1 engine, engine speed $n = 3500$ 1/min, full load, propane feeding

6. Wnioski

Stosując wtryskowe zasilanie silnika ZI ciekłym paliwem gazowym uzyskano korzystniejsze wskaźniki robocze w porównaniu z wtryskowym zasilaniem silnika benzyną.

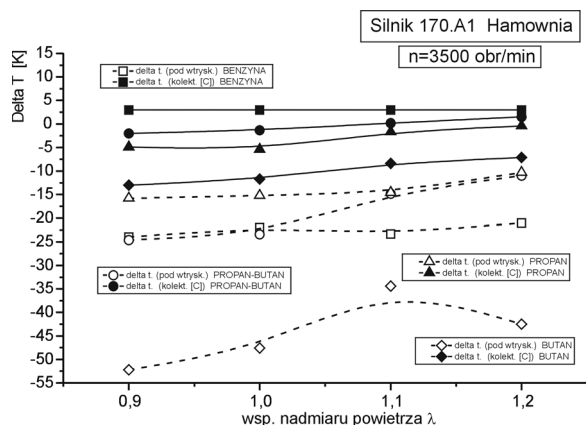
– Zasilanie silnika 170.A1 ciekłym propanem-butanem, czystym butanem lub czystym propanem za pomocą jednopunktowego układu wtrysku do kolektora dolotowego spowodowało generalnie poprawę wskaźników roboczych w porównaniu do wartości uzyskanych przy zasilaniu benzyną w całym zakresie badanych wartości współczynnika składu mieszanki, tj. $\lambda = 0,9-1,2$. Poprawa wskaźników roboczych spowodowana była przez obniżenie temperatury ładunku na skutek gwałtownego parowania (wrzenia) wtryskiwanego gazu, który pobierał ciepło od napływającego powietrza. Przyrost wartości momentu użytecznego (M_e) wynosił średnio ok. 3–4% dla wszystkich rodzajów paliw, osiągając maksymalną wartość ok. 12% dla przypad-

es of the intake manifold have been recorded. Based on the above, the characteristics including the courses of changes of the temperature in the inlet ducts and the corresponding changes of the coefficient of cylinder filling h_v as a function of air excess coefficient have been prepared. Exemplary characteristics have been shown in Fig. 12 and Fig. 13.

Conclusions

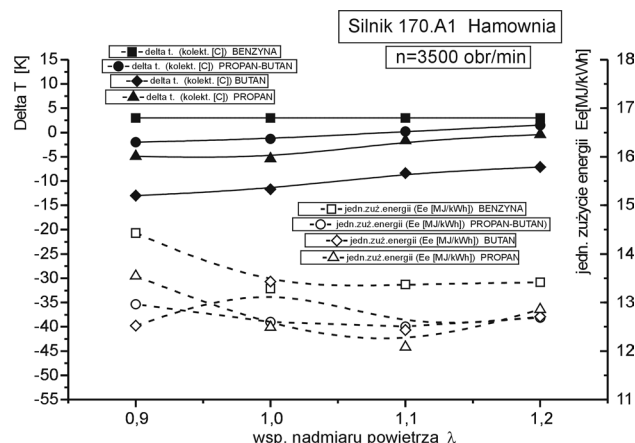
The application of liquid gas injection feeding in the SI engines resulted in advantageous work parameters in comparison to gasoline injection feeding.

– Feeding of the 170.A1 engine with liquid propane-butane, pure butane or pure propane by means of single point injection into the intake manifold resulted in a general improvement of work parameters in comparison to the val-



Rys. 12. Zmiana temperatury ładunku ΔT , zmierzona dla różnych rodzajów paliwa, jako różnica między temperaturą ładunku pod wtryskiwaczem lub w kanale dolotowym, a temperaturą otoczenia; prędkość obrotowa wału korbowego silnika $n = 3500$ obr/min, pełne otwarcie przepustnicy

Fig. 12. Change of the charge temperature ΔT , measured for different kinds of fuel as the difference between the charge temperature below the injector or in the inlet duct and the ambient air temperature, engine speed $n = 3500$ 1/min, full load



Rys. 13. Zmiana temperatury ładunku ΔT , zmierzona dla różnych rodzajów paliwa, jako różnica między temperaturą ładunku w kanale dolotowym a temperaturą otoczenia i odpowiadające jej jednostkowe zużycie energii E_e ; prędkość obrotowa wału korbowego silnika $n = 3500$ obr/min, pełne otwarcie przepustnicy

Fig. 13. Change of the charge temperature ΔT , measured for different kinds of fuel as the difference between the charge temperature in the inlet duct and the ambient air temperature, and the corresponding specific energy consumption E_e ; engine speed $n = 3500$ 1/min, full load

ku zasilania silnika czystym propanem przy współczynniku nadmiaru powietrza $\lambda = 1,1$.

Przyrost wartości współczynnika napełnienia cylindra (η_v) wynosił 3÷6%.

Przyrost sprawności ogólnej wyrażonej jednostkowym zużyciem energii (E_e) wynosił 5÷7%.

- Dla badanych paliw gazowych maksymalne zmierzone obniżenie temperatury ładunku między kanałem dolotowym a temperaturą zasysanego do układu dolotowego powietrza wynosiło 16 K ($\Delta T = -16$ K) i miało miejsce dla przypadku zasilania silnika czystym butanem przy prędkości obrotowej wału korbowego silnika $n = 4500$ obr/min.
- W przypadku zasilania silnika benzyną we wszystkich przypadkach następowało ogrzewanie ładunku w kanałach dolotowych o ok. 2,5÷5 K ($\Delta T = 2,5\div 5$ K). Należy wnioskować, że ciepło parowania benzyny nie wystarczało do uzyskania ujemnej wartości ΔT .
- Zjawisko okresowego tworzenia się lodu w obszarze przepustnicy przy zasilaniu butanem powodowało zmniejszenie współczynnika napełnienia cylindra (η_v) na skutek dławienia przepływu ładunku. Podniesienie temperatury zasysanego do układu dolotowego powietrza do ok. 67°C pozwoliło na przeprowadzenie pomiarów, nie eliminując całkowicie zjawiska. Ustalenie tak wysokiej temperatury tworzenia ładunku wpłynęło jednak na współczynnik napełnienia, niwelując częściowo zysk w postaci wzrostu gęstości na skutek procesu parowania gazu.
- Uzyskano częściową zgodność wyników badań symulacyjnych i hamownianych. Rozbieżności spowodowane były między innymi przez wyżej wspomniane zjawiska towarzyszące zasilaniu silnika butanem oraz niewystarczającą ilość danych eksperymentalnych dla programu symulacyjnego.

ues obtained at the gasoline feeding in the whole range of investigated air excess coefficient i.e. $\lambda = 0.9\div 1.2$. The improvement of work parameters was caused by the charge temperature drop as the effect of abrupt vaporization (boiling) of the injected gas, due to heat from the inducted air. The increment of the value of effective torque M_e numbered on average about 3÷4% for all kinds of fuel, reached the maximum value of about 12% for the case of engine feeding by pure propane at the air excess coefficient $\lambda = 1.1$. The increment of value of the cylinder filling coefficient η_v numbered about 3÷6%. The increment of the value of engine efficiency expressed by specific energy consumption E_e numbered about 5÷7%.

- For the investigated gaseous fuels, maximum measured decrease in the charge temperature between the inlet duct and the temperature of air inducted into the inlet system amounted to 16K ($\Delta T = -16$ K). This process occurred for the case of the engine feeding with pure butane at the engine speed of $n = 4500$ 1/min.
- In all the cases of engine feeding with gasoline a warming up of the charge inside the inlet ducts occurred that amounted to about 2.5÷5 K ($\Delta T = 2.5\div 5$ K). One should deduce that the vaporization heat of gasoline was insufficient to obtain a negative value of ΔT .
- The phenomenon of periodic ice formation in the throttle zone at the case of butane feeding caused a decrease in the cylinder filling coefficient η_v as an effect of the charge flow choking. Enhancing the temperature of air flowing into the inlet duct to about 340 K (67°C) enabled the measurements to be made, not entirely eliminating the phenomenon. The assumption of such a high temperature of charge formation, however, resulted in the filling coefficient decrease, partially levelling of the advantage of mass density increase due to the gas fuel vaporization process.

- W przypadku zasilania silnika czystym propanem – nie obserwowano zakłóceń w pracy silnika. Kształt i charakter przebiegu krzywych na charakterystykach dotyczących propanu jest zbliżony do krzywych uzyskanych przy zasilaniu benzyną. Zastosowanie układu jednopunktowego wtrysku czystego propanu do kolektora dolotowego wiąże się jednak z opanowaniem procesu parowania gazu w przewodach zasilających wtryskiwacz. Aby zapobiec temu zjawisku należy zwiększyć ciśnienie w magistrali wtryskowej.
- Na podstawie przeprowadzonych badań należy sądzić, że zastosowanie układu wielopunktowego wtrysku ciekłego paliwa gazowego pozwoli na wyeliminowanie zjawiska tworzenia lodu w kanale dolotowym – szczególnie w przypadku zasilania silnika czystym butanem. Obszar parowania wtryskiwanego gazu zostanie tym sposobem przesunięty w strefę o wysokiej temperaturze. W takim przypadku będzie możliwe pełne wykorzystanie tego procesu do obniżenia temperatury ładunku i poprawy napełnienia cylindra.
- Partial compliance of the results of the simulation and the test bed investigation was obtained. The differences were caused, among others, by the above mentioned phenomena associated to the engine feeding with pure butane and insufficient experimental data for the simulation program.
- In the case of fuelling of the engine with pure propane, no disturbances in the engine work were observed. The shape and character of the course of the curves on the characteristics accomplished for propane feeding is similar to the case of gasoline feeding. The application of the system of single point injection of pure propane into the engine inlet manifold is still connected with solving the problem of liquid gas vaporization inside the supplying ducts of an injector. To prevent this phenomenon it is necessary to increase the fuel pressure inside the injection line.
- On the base of performed investigations we may suppose, that the application of multipoint liquid gas injection system will enable the elimination of the phenomenon of ice formation inside the inlet duct – particularly in the case of pure butane feeding. The area of vaporization of the injected liquid gas will then be moved to the high temperature zone. In that case it will be possible to fully use the process for the purpose of temperature decrease and cylinder filling improvement.

Podziękowania / Acknowledgments

The researches were partly supported by Polish Committee of Scientific Researches in frames of Project no 5 T12D 020 24 entitled: „Wykorzystanie ciepła parowania paliwa w celu poprawy wskaźników roboczych silnika ZI”.

Artykuł recenzowany

Literatura/Bibliography

- [1] Dutczak J.: Wstępne badania silnika ZI zasilanego wtryskowo propanem-butanem. Międzynarodowa Konferencja „Silniki Gazowe”, Częstochowa–Wyśne Rużbahy 2000.
- [2] Dutczak J., Golec K.: Spark Ignition Engine Fuelled by Means of Liquid Propane-Butane Injection, SAE Spring Fuels & Lubricants Meeting, 6-8 May 2002, Reno USA.
- [3] Dutczak J., Golec K., Papuga T.: Investigations of SI Engine Fuelled by Means of Liquid Propane-Butane Injection. XII International Scientific Meeting MVM “Motor Vehicles and Engines MVM 2002”, Kragujevac 7-9.10.2002.
- [4] Dutczak J., Golec K., Papuga T.: Niektóre problemy związane z wtryskowym zasilaniem silników ciekłym propanem-butanem. VI Międzynarodowa Konferencja Naukowa „Silniki Gazowe”, Szczyrk 2003.
- [5] Dutczak J., Golec K., Papuga T.: Wtryskowe zasilanie silnika spalinowego ciekłym propanem-butanem. VI Międzynarodowa Konferencja Naukowa „Silniki Gazowe”, Szczyrk 2003.
- [6] Dutczak J., Golec K.: Simulation of Effect of Liquid Gas Injection Feeding Conditions on Work Parameters of Spark Ignition Engine. Międzynarodowa Konferencja Naukowa „Motor Vehicles and Engines MVM 2004”, Kragujevac 4-6.10.2004.
- [7] Dutczak J.: Obliczenia wartości wybranych parametrów roboczych silnika ZI zasilanego wtryskowo propanem lub butanem, KONMOT AUTOPROGRES 2004, Czasopismo Techniczne, Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej z. 6-M/2004 – Silniki Spalinowe, t. 1.
- [8] Sim H., Lee K., Chung N., Sunwoo M.: A study on the injection characteristics of a liquid-phase liquefied petroleum gas injector for air-fuel ratio control. Journal of Automobile Engineering, vol. 219, no. D8, August 2005.
- [9] Brzeżański M., Dutczak J., Golec K., Papuga T.: Zero-Dimensional Model of Combustion Engine Work Processes in Works of Spark Ignition Engines Department of Cracow University of Technology. International Congress on Combustion Engines, Szczyrk 2005.
- [10] Sprawozdanie z realizacji Projektu badawczego nr 5 T12D 020 24 pt. Wykorzystanie ciepła parowania paliwa w celu poprawy wskaźników roboczych silnika ZI, Kraków 2005.

Dr inż. Jerzy Dutczak – Adiunkt w Zakładzie Silników z Zapłonem Iskrowym Instytutu Pojazdów Samochodowych i Silników Spalinowych Politechniki Krakowskiej.
Mr Jerzy Dutczak, PhD, MEng – Tutor in the Spark Ignition Engines Department of Institute of Vehicles and Internal Combustion Engines at Cracow University of Technology.

