

## The criteria of fuelling the dual-fuel SI engine with gasoline and methanol

*In the paper are discussed test results of dual fuel spark ignition engine with multipoint injection of alcohol and gasoline in area of inlet valve. Engine fuelling was accomplished through a prototype fuel supply system comprising duplex injectors controlled electronically. Implemented system enables fuelling of the engine with pure gasoline, with pure methanol, or simultaneous combustion of the both fuels mixture with any fraction of the alcohol. The tests were performed on four cylinder, spark ignition engine of Fiat 1100 MPI type. In the paper are presented criteria to be fulfilled in dual fuel spark ignition engine run on gasoline and methyl alcohol. The criteria were developed on the base of engine testing performed on engine dynamometer. When developing the criteria, one took assumption of energetic equity of fuel doses in traditional and dual fuel supply system in every operational point of the engine. The second criterion consisted in maintaining a minimal elementary dose of gasoline and alcohol injectors, which would assure stable operation of the engine. In result of the performed analysis one proposed a map of possible ranges of dual fuel feeding of the engine with methyl alcohol and gasoline.*

Key words: dual fuel engine, methyl alcohol, criteria of fuelling, elementary dose, biofuels

### Kryteria dwupaliwowego zasilania silnika ZI benzyną i metanolem

*W artykule przedstawiono wyniki badań dwupaliwowego silnika o zapłonie iskrowym z wielopunktowym wtryskiem alkoholu i benzyny w okolicy zaworu dolotowego. Zasilanie silnika realizowano przez prototypowy układ dolotowy zawierający podwójne wtryskiwacze sterowane elektronicznie. Zastosowany system umożliwia zasilanie silnika benzyną lub alkoholem oraz równoczesne spalanie mieszaniny obydwu paliw o dowolnym udziale alkoholu. Badania wykonano na 4-cylindrowym silniku o zapłonie iskrowym Fiat 1100 MPI. W artykule przedstawiono kryteria, jakie należy przyjmować przy stosowaniu dwupaliwowego zasilania silnika o zapłonie iskrowym przy używaniu benzyny i alkoholu metylowego. Kryteria opracowano na podstawie badań hamownianych silnika. Przy opracowaniu kryteriów przyjęto założenie równości energetycznej dawek paliwa z zasilaniem tradycyjnym i dwupaliwowym w każdym punkcie pracy silnika. Drugim kryterium było zachowanie minimalnej dawki jednostkowej wtryskiwacza benzyny i alkoholu, zapewniającej stabilną pracę silnika. W wyniku przeprowadzonej analizy zaproponowano mapę możliwych zakresów dwupaliwowego zasilania silnika alkoholem metylowym i benzyną.*

Słowa kluczowe: silnik dwupaliwowy, alkohol metylowy, kryteria zasilania, dawka jednostkowa, biopaliwa

### 1. Introduction

The first usable combustion engine was constructed by Étienne Lenoir in the year 1860 [17]. More than 150 years have been passed since this event and during this period of time the engine became an object of permanent improvements, conformed to petroleum-based fuels mainly. During considerable amount of this time the engine was developed in direction of improvement of its performance. Only later, when problems of limited resources of crude oil were commenced to be considered, investigations also comprised not only performance parameters, but also fuel consumption. Nowadays, a third direction has emerged as a significant issue of engine development, forced by necessity of natural environment protection, putting emphasis on reduction of toxic emissions of exhaust gases, like carbon oxide, hydrocarbons, nitrogen oxides and solid particulates. Not without a meaning is also emission of carbon dioxide, although not toxic, but having substantial effect of creation of the greenhouse effect.

Having expectations formulated in such way, more and more heed is focused on search after alternative fuels, which would be not pro-ecological only, but also competi-

### 1. Wprowadzenie

Pierwszy użyteczny silnik spalinowy został zbudowany przez Étienne Lenoira w 1860 roku [17]. Od tego wydarzenia minęło ponad 150 lat i przez ten czas silnik spalinowy stawał się obiektem ciągłych udoskonaleń podporządkowanych głównie paliwom ropopochodnym. Przez znaczną część tego okresu silnik rozwijany był w kierunku poprawy jego osiągnięć. Dopiero później, gdy zaczęto zauważać problem ograniczonych zasobów ropy naftowej, badaniami objęto nie tylko parametry zewnętrzne, ale również zużycie paliwa. Obecnie istotny jest jeszcze trzeci kierunek rozwoju silnika, wymuszony koniecznością ochrony środowiska naturalnego, kładący nacisk na zmniejszenie emisji toksycznych składników spalin, takich jak: tlenek węgla, węglowodory, tlenki azotu i cząstki stałe. Znaczenie ma również emisja dwutlenku węgla, który, choć nietoksyczny, ma duży wpływ na tworzenie się efektu cieplarnianego.

Przy tak postawionych oczekiwaniach, obecnie coraz większą wagę zwraca się na poszukiwania alternatywnych paliw, które byłyby nie tylko proekologiczne, ale również konkurencyjne cenowo w odniesieniu do paliw ropopochodnych. W związku z tym w ostatnich latach, w wielu

tive in price with respect to petroleum-based fuels. Due to it, in many regions worldwide a considerable amount of attention is retained to investigations on adaptation of combustion engine to run on biofuels. Subject matter of a recent publications shows, that methyl and ethyl alcohol could be considered as one from the most promising and future-oriented biofuels, creating serious alternative for the petroleum-based fuels. Interest in the biofuels comprises also such areas as search after raw-materials to production of the alcohols, development of technology of their production, especially second generation ethyl alcohol, specific fuel supply and control systems, and design changes of the engines fed with alcohols.

Usage of alcohol fuels doesn't belong to new issues, because such fuels have been used for dozens of years [1–6] while the beginnings are connected with supplying of the first combustion engines at beginning of the previous century. Special intensity of such tendencies occurred during the first and the second World War, what was connected with shortage of the fuels, and during seventies of the previous century, what was caused by serious fuel crisis and rapid growth of petroleum price. The alcohol fuels, however, never became commonly used as engine fuels, and as soon as the situation in the world underwent normalization, one always came back to petroleum-based fuels. Probably it resulted from disadvantages of the alcohols, from engine design, and from fuel supply and control systems of the engines, optimized for traditional fuels mainly. In time when tetraethyl lead was phased out as addition increasing octane number of the gasoline, as a suitable substitutes came out methyl and ethyl alcohols, which have been used as additions to the gasoline to this day. Due to fact that phenomenon of foliation of gasoline-alcohol mixtures, especially in low temperatures and in presence of water, constitutes the main problem of the alcohols, concentration of the alcohol was limited to a few percent. Such contents was increased with use of a stabilizing agents like ethers, but concentration of the alcohol in the mixtures never exceeded over a dozen volumetric percent.

From viewpoint of engine applications much more advantageous is usage of the alcohols as a individual fuel, because it enables to take full advantage of high knocking resistance of the alcohol, allowing increase of compression ratio, growth of overall efficiency and unit power output of the engine [3, 4, 6]. This direction is especially developed in Brazil, however is also present in USA, New Zealand and Sweden, among others [1, 5, 16, 19, 20].

Except foliation of the alcohol-gasoline mixtures, low volatility of vapors creates the second main disadvantage of the alcohols, what at below zero ambient temperatures can lead to lack of ignition [7, 8, 9, 18].

The disadvantages discussed above do not have a more important significance in prototype fuelling system developed in the presented work [11, 12, 15]. The system is based on the Dual Fuel System, i.e. engine fuelling system with two fuels. The system consists in injection of the fuels in area of inlet valve by two injectors controlled electronically. Mixing

regionach świata, dużo uwagi przywiązuje się do badań nad przystosowaniem silnika spalinowego do zasilania biopaliwami. Tematyka opublikowanych w ostatnim okresie prac wskazuje na to, że alkohole etylowy i metylowy mogą być jednymi z najbardziej obiecujących i przyszłościowych biopaliw, stanowiących istotną alternatywę dla paliw ropopochodnych. Zainteresowanie nimi obejmuje takie obszary, jak poszukiwania surowców do produkcji alkoholi, rozwój technologii ich wytwarzania, szczególnie II generacji alkoholu etylowego, specjalistyczne systemy zasilające i sterujące, zmiany konstrukcyjne silników zasilanych alkoholami.

Zastosowanie paliw alkoholowych nie jest nowym zagadnieniem, gdyż były one stosowane od kilkudziesięciu lat [1–6], a początki związane były z zasilaniem pierwszych silników spalinowych na początku ubiegłego wieku. Szczególne nasilenie tych tendencji występowało w okresach I i II wojny światowej, co związane było z brakiem paliw oraz w latach siedemdziesiątych ubiegłego wieku, co było spowodowane poważnym kryzysem paliwowym oraz gwałtownym wzrostem cen ropy naftowej. Paliwa alkoholowe jednak nigdy nie przyjęły się do powszechnego stosowania i gdy tylko sytuacja na świecie ulegała normalizacji, zawsze wracano do paliw ropopochodnych. Prawdopodobnie wynikało to z wad, jakie mają alkohole oraz z konstrukcji silników, ich zasilania i sterowania. Silniki były głównie optymalizowane dla paliw tradycyjnych. W okresie, kiedy wycofano czteroetylek ołowiu, jako dodatek zwiększający liczbę oktanową benzyn, dobrym jego zamiennikiem okazały się alkohole etylowy i metylowy, które są stosowane jako dodatki benzyn także obecnie. Ponieważ podstawowym problemem alkoholi jest zjawisko rozwarstwiania się mieszanek benzynowo-alkoholowych, zwłaszcza w niskich temperaturach i w obecności wody, stężenie alkoholu było ograniczone do kilku procent. Zawartość tę podwyższano za pomocą stabilizatorów, takich jak etery, lecz stężenie alkoholu w mieszankach nadal nie przekraczało kilkunastu procent objętościowych.

Z punktu widzenia zastosowań silnikowych znacznie korzystniejsze jest stosowanie alkoholi jako paliwa samoistnego, bowiem pozwala to w pełni wykorzystać dużą odporność przeciwstukową alkoholu, umożliwiającą zwiększenie stopnia sprężania, wzrost sprawności ogólnej i mocy jednostkowej silnika [3, 4, 6]. Kierunek ten jest szczególnie rozwinięty w Brazylii, ale występuje również między innymi w USA oraz Nowej Zelandii i Szwecji [1, 5, 16, 19, 20].

Oprócz rozwarstwiania się mieszanin alkohol-benzyna drugą główną wadą alkoholi jest niska lotność par, co przy minusowych temperaturach otoczenia może prowadzić do braku zapłonu [7–9, 18].

Omówione wyżej wady nie mają większego znaczenia w prototypowym systemie zasilania, opracowanym w ramach niniejszej publikacji [11, 12, 15]. Jest on oparty na systemie Dual Fuel – system dwupaliwowego zasilania silnika. System ten polega na wtrysku paliw w okolice zaworu dolotowego dwoma wtryskiwaczami sterowanymi elektronicznie. Mieszanie obydwu paliw odbywa się w cylindrze bezpośrednio przed spalaniem. Zaproponowany system umożliwia zasilanie silnika samym alkoholem lub

of the both fuels occur in cylinder directly before combustion. Proposed system enables engine run on pure alcohol, on pure gasoline, or on alcohol-gasoline mixture with any fraction of the alcohol. Among obvious advantages of this system, one should specify a possibility of engine start-up on pure gasoline (in this respect the gasoline features better start-up properties than alcohols), and its subsequent operation on any fractions of the both fuels, depending on engine rotational speed and load.

## 2. Research stand

The tests were performed on four cylinder spark ignition engine with multipoint injection of the Fiat 1100 type. Technical data of the engine are specified in the Table 1.

Table 1. The technical data of Fiat 1100 MPI engine  
Tabela 1. Dane techniczne silnika Fiat 1100

|  |                         |
|--|-------------------------|
| Engine type/typ silnika  | Fiat 1100 MPI           |
| Bore x stroke/średnica cylindra x skok                                       | 70 x 72 mm              |
| Swept capacity/pojemność skokowa   | 1108 cm <sup>3</sup>    |
| Compression ratio/stopień sprężania  | 9.6                     |
| Rated power/rotational speed/moc znamionowa/prędkość obrotowa                | 40 kW/5000 rpm/obr/min  |
| Maximal torque/rotational speed/maksymalny moment obrotowy/prędkość obrotowa | 88 N·m/3000 rpm/obr/min |

Scheme of prototype suction manifold is presented in the Fig. 1, while adaptation of the fuel rail is shown in the Fig. 2.

Detailed description of design changes incorporated in the engine are presented in the work [10].

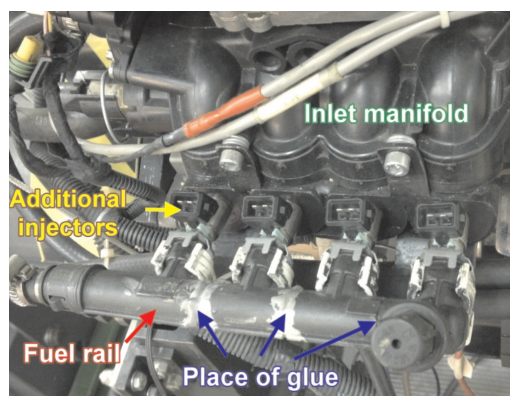


Fig. 2. Adaptation of the fuel rail

Rys. 2. Adaptacja szyny paliwowej

## 3. The experimental results and discussion

The tests of the engine operated with dual fuel supply system were performed with 20, 40, 60, 80 and 100 % fractions of methyl alcohol, calculated energetically in complete field of engine operation, i.e. for range of engine rotation speed of 1500–5000 rpm and change of engine load from minimal to maximal one. Injection advance angle was identical like in case of gasoline fuelling. The gasoline was injected by additionally installed injector, while the alcohol was injected by factory-made injector.

benzyną oraz mieszaniną benzyna-alkohol o dowolnym udziale alkoholu. Wśród niewątpliwych zalet tego systemu należy wymienić możliwość uruchamiania silnika na samej benzynie (benzyna pod tym względem wykazuje lepsze właściwości rozruchowe od alkoholi) oraz dalszą jego pracę na dowolnych udziałach obydwu paliw, zależnie od prędkości obrotowej i obciążenia silnika.

## 2. Stanowisko badawcze

Badania przeprowadzono na 4-cylindrowym silniku o zapłonie iskrowym z wielopunktowym wtryskiem paliwa typu Fiat 1100. Dane techniczne silnika zamieszczono w tabeli 1.

Schemat prototypowego kolektora dolotowego przedstawiono na rys. 1, a adaptację szyny paliwowej na rys. 2.

Szczegółowy opis zmian dokonanych w silniku przedstawiono w pracy [10].

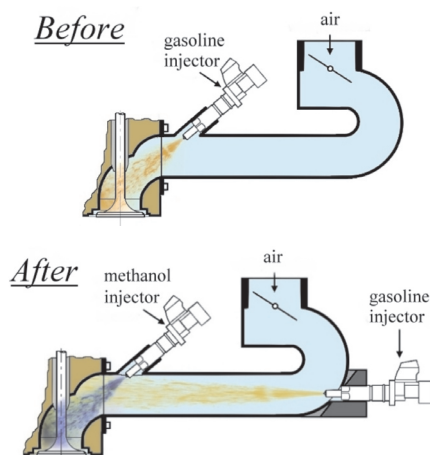


Fig. 1. Scheme of prototype inlet manifold of the Fiat 1100 MPI engine  
Rys. 1. Schemat prototypowego kolektora dolotowego silnika Fiat 1100 MPI

## 3. Analiza wyników badań

Badania zasilanego silnika dwupaliwowego wykonano przy udziałach alkoholu metylowego 20 %, 40 %, 60 %, 80 % i 100 %, liczonych energetycznie w całym polu pracy silnika, tj. dla zmian prędkości obrotowej 1500–5000 obr/min oraz zmian obciążenia od minimalnego do maksymalnego. Kąt wyprzedzenia wtrysku był identyczny jak przy zasilaniu benzyną. Benzyna była wtryskiwana przez wtryskiwacz dodatkowy, a alkohol – przez wtryskiwacz fabryczny.

Podstawowym kryterium przyjętym do badań był warunek równości energetycznej dawek, polegający na tym, że suma energii dawek obydwu paliw wtryskiwanych równocześnie dla systemu dwupaliwowego była równa energetycznej dawce benzyny dla tradycyjnego zasilania silnika (1). W badaniach zastosowano alkohol metylowy.

Przy założeniu, że sprawność silnika nie ulegnie zmianie oznacza to spełnienie równania (1), gdzie:  $q_b$  – dawka jednostkowa benzyny przy zasilaniu tradycyjnym samą benzyną [mm<sup>3</sup>/cykl],  $q'_b$  – dawka jednostkowa benzyny przy zasilaniu dwupaliwowym [mm<sup>3</sup>/cykl],  $q'_m$  – dawka jednostkowa metanolu przy zasilaniu dwupaliwowym [mm<sup>3</sup>/cykl],  $H_b$ ,  $H_m$  – wartości opałowe benzyny i metanolu.



As the main criterion to the investigations was taken condition of energetic equity of the doses, consisting in assumption that sum of energy of the both fuels doses injected simultaneously in the dual fuel system was equal to energetic dose of the gasoline in traditional fuelling of the engine (1). To the investigations one used the methyl alcohol.

Having assumption that efficiency of the engine doesn't undergo changes, it denotes fulfillment of the following equity:

$$q_b \cdot H_b = q'_b \cdot H_b + q'_m \cdot H_m \quad (1)$$

where:  $q_b$  – elementary dose of gasoline at traditional feeding with gasoline only [ $\text{mm}^3/\text{cycle}$ ],  $q'_b$  – elementary dose of gasoline at dual fuel feeding [ $\text{mm}^3/\text{cycle}$ ],  $q'_m$  – elementary dose of methanol at dual fuel feeding [ $\text{mm}^3/\text{cycle}$ ],  $H_b$ ,  $H_m$  – caloric values of gasoline and methanol.

$$q'_b = q_b \cdot (1 - U_m) \quad (2)$$

$$q'_m = q_b \cdot U_m \cdot (H_b/H_m) \quad (3)$$

where:  $U_m$  – fraction of the methanol.

Using the equations 2 and 3, one calculated doses of the gasoline  $q'_b$  and the methanol  $q'_m$  for any fraction of the methanol and, for any basic dose  $q_b$ .

In the Fig. 3 are presented changes of the elementary doses of the engine operated on the gasoline.

From the analysis is seen that the elementary doses are dependent from engine load, and only slightly (probably within measurement error limits) change together with change of engine speed. Because of the fact that for the doses smaller than  $5 \text{ mm}^3/\text{cycle}$ , the injectors operate unstably, one assumed that in case of dual fuel supply, minimal doses of the methanol and the gasoline should not be smaller than  $5 \text{ mm}^3/\text{cycle}$ .

Making use of the equations 2 and 3, one has written a table of elementary doses of the methanol and the gasoline for dual fuel engine. On their basis one has eliminated such diagrams, for which the elementary doses were smaller than  $5 \text{ mm}^3/\text{cycle}$ , what means unstable operation of the injectors and possibility of non-uniform engine operation. Because of nearly twice bigger elementary doses of the methanol, area on unstable operation of methanol's injector was very small and comprised only small engine loads and small fractions of the methanol.

In the Fig. 4 are presented changes of methanol dose  $q'_m$  and gasoline dose  $q'_b$  in function of elementary dose at traditional fuelling. Value of gasoline dose  $q_b$  corresponds to change of engine load, what results from the Fig. 3. With red color horizontal lines are marked minimal doses required from viewpoint of correct engine operation under load. From the characteristics is seen that exists a problem of methanol injection in case of small fractions of methanol only, and only in area of the lowest engine loads. Problem of gasoline injection is present nearly in complete range of engine loads, depending on fraction of the alcohol.

Basing on the function of gasoline's dose size in relation to engine load for traditional fuelling system (Fig. 5), one

Za pomocą równań (2) i (3) obliczono dawki benzyny  $q'_b$  i metanolu  $q'_m$  dla dowolnego udziału metanolu oraz dowolnej dawki bazowej  $q_b$ , przy czym  $U_m$  – udział metanolu.

Na rysunku 3 przedstawiono zmiany dawek jednostkowych przy zasilaniu silnika benzyną.

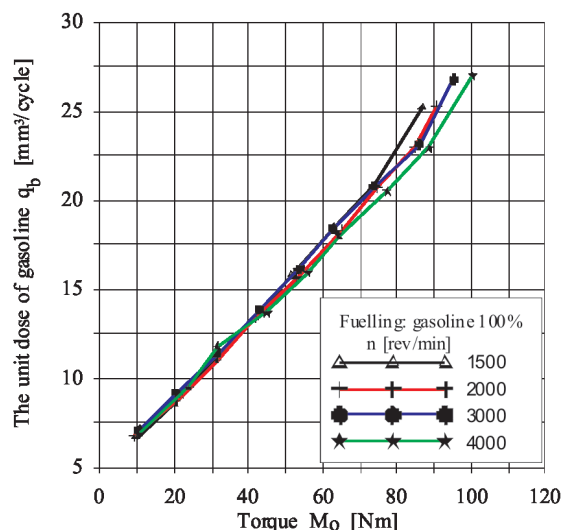


Fig. 3. Changes of elementary doses size in function of the Fiat 1100 MPI engine load at traditional fuelling of the engine

Rys. 3. Zmiany wielkości dawek jednostkowych w funkcji obciążenia silnika Fiat 1100 MPI przy tradycyjnym zasilaniu silnika

Z analizy wynika, że dawki jednostkowe zależą od obciążenia silnika i tylko nieznacznie (prawdopodobnie w granicach błędów pomiarów) zmieniają się wraz ze zmianą prędkości obrotowej. Z uwagi, iż dla dawek mniejszych niż  $5 \text{ mm}^3/\text{cykl}$  wtryskiwacze pracują niestabilnie, przyjęto założenie, że przy zasilaniu dwupaliwowym minimalne dawki metanolu i benzyny nie powinny być mniejsze niż  $5 \text{ mm}^3/\text{cykl}$ .

Wykorzystując wzory (2) i (3), sporządzono tablice dawek jednostkowych metanolu oraz benzyny dla zasilania dwupaliwowego. Na ich podstawie wyeliminowano te zakresy, dla których dawki jednostkowe były mniejsze od  $5 \text{ mm}^3/\text{cykl}$ , co oznacza niestabilną pracę wtryskiwaczy oraz możliwość nierównomiernej pracy silnika. Z uwagi na prawie dwukrotnie większe dawki jednostkowe metanolu zakres niestabilnej pracy wtryskiwacza metanolu był niewielki i obejmował jedynie małe obciążenia silnika i niewielkie udziały metanolu.

Na rysunku 4 przedstawiono zmiany dawek metanolu  $q'_m$  i benzyny  $q'_b$  w funkcji dawki jednostkowej benzyny przy zasilaniu tradycyjnym. Wartość dawki benzyny  $q_b$  odpowiada zmianie obciążenia silnika, co wynika z rys. 3. Liniami poziomymi w kolorze czerwonym zaznaczono minimalne dawki wymagane z punktu widzenia poprawnej pracy silnika pracującego pod obciążeniem. Z charakterystyk tych wynika, że istnieje problem wtrysku metanolu tylko dla małych udziałów alkoholu i to tylko w obszarze najniższych obciążeń silnika. Problem wtrysku benzyny występuje prawie w całym obszarze obciążeń silnika zależnie od udziału alkoholu.

Na podstawie funkcji wielkości dawki benzyny w zależności od obciążenia silnika dla tradycyjnego systemu

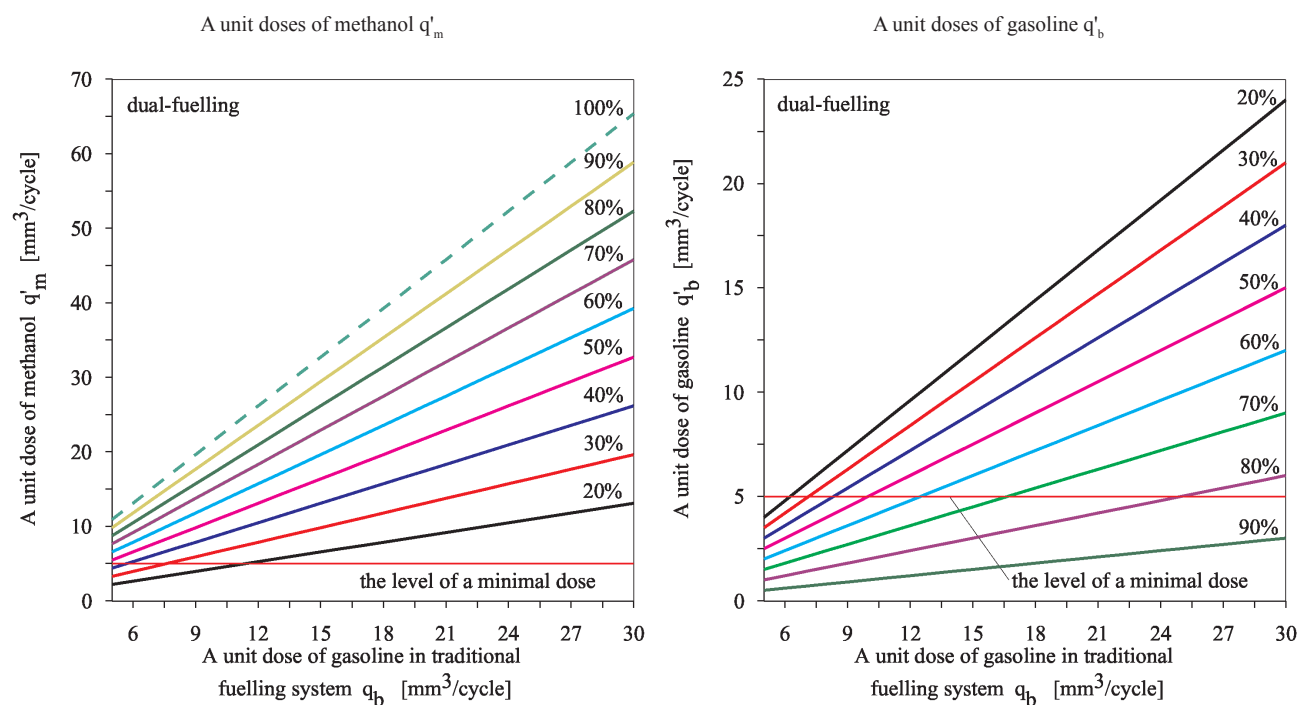


Fig. 4. Changes of elementary doses of methanol and gasoline at dual fuel supply

Rys. 4. Zmiany dawki jednostkowej metanolu i benzyny przy zasilaniu dwupaliwowym

prepared joint characteristics of elementary doses injection of the both fuels for the dual fuel system, which are presented in the Fig. 6.

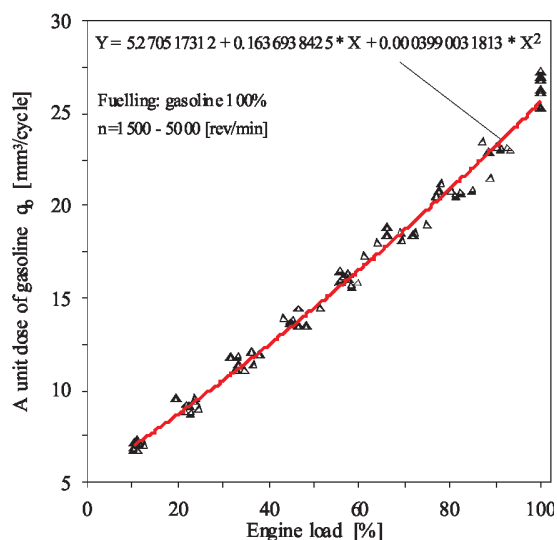


Fig. 5. Changes of elementary doses of gasoline  $q_b$  in relation to engine load for traditional fuelling

Rys. 5. Zmiana dawki jednostkowej benzyny  $q_b$  w funkcji obciążenia silnika zasilanego tradycyjnie

From the Fig. 6 is seen, that together with growth of alcohol fraction the elementary dose of the gasoline is more and more restricted by the criterion on minimal dose of injection. In such situation there existed a need of development of a plan of engine fuelling in dual fuel system. In order to perform it, one elaborated a joint characteristics of

zasilania (rys. 5) sporządzono wspólne charakterystyki wtrysku dawek jednostkowych obydwu paliw dla systemu dwupaliwowego, które przedstawiono na rys. 6.

Z rysunku 6 wynika, że wraz ze wzrostem udziału alkoholu dawka jednostkowa benzyny jest coraz bardziej ograniczona kryterium minimalnej dawki wtrysku. W takiej sytuacji zaistniała potrzeba opracowania planu zasilania silnika w systemie dwupaliwowym. W tym celu wykonano wspólną charakterystykę dawek jednostkowych metanolu  $q'_m$  i benzyny  $q'_b$ , na której kryterium minimalnej dawki wprowadzono, podnosząc poziomą płaszczyznę  $p_e-U_m$  o 5 jednostek do góry – rys. 7.

W wyniku przecięcia trzech płaszczyzn otrzymano zakresy możliwej pracy silnika z zachowaniem kryterium minimalnej dawki jednostkowej wtryskiwaczy  $q_{m,b} > 5 \text{ mm}^3/\text{cykl}$ . W polu oznaczonym tylko niebieską linią silnik teoretycznie powinien być zasilany samą benzyną. Tylko kolorem zielonym oznaczono obszar, w którym silnik teoretycznie powinien pracować na czystym metanolu. Z kolei pole otoczone czarną linią oznacza obszar, dla którego praca silnika może odbywać się w systemie dwupaliwowym.

Na rysunku 8 przedstawiono proponowane zakresy pracy badanego silnika z uwzględnieniem wpływu zasilania dwupaliwowego na sprawność ogólną i emisję toksycznych składników spalin. Wynika z nich, że możliwe są następujące obszary pracy:

- pole niebieskie (obciążenie silnika mniejsze niż 25 %) – zasilanie samą benzyną,
- pole zielone – zasilanie samym metanolem,
- pole w kratkę zielono-niebieską – zasilanie dwupaliwowe o dowolnym udziale metanolu w zakresie 20 %–70 %.

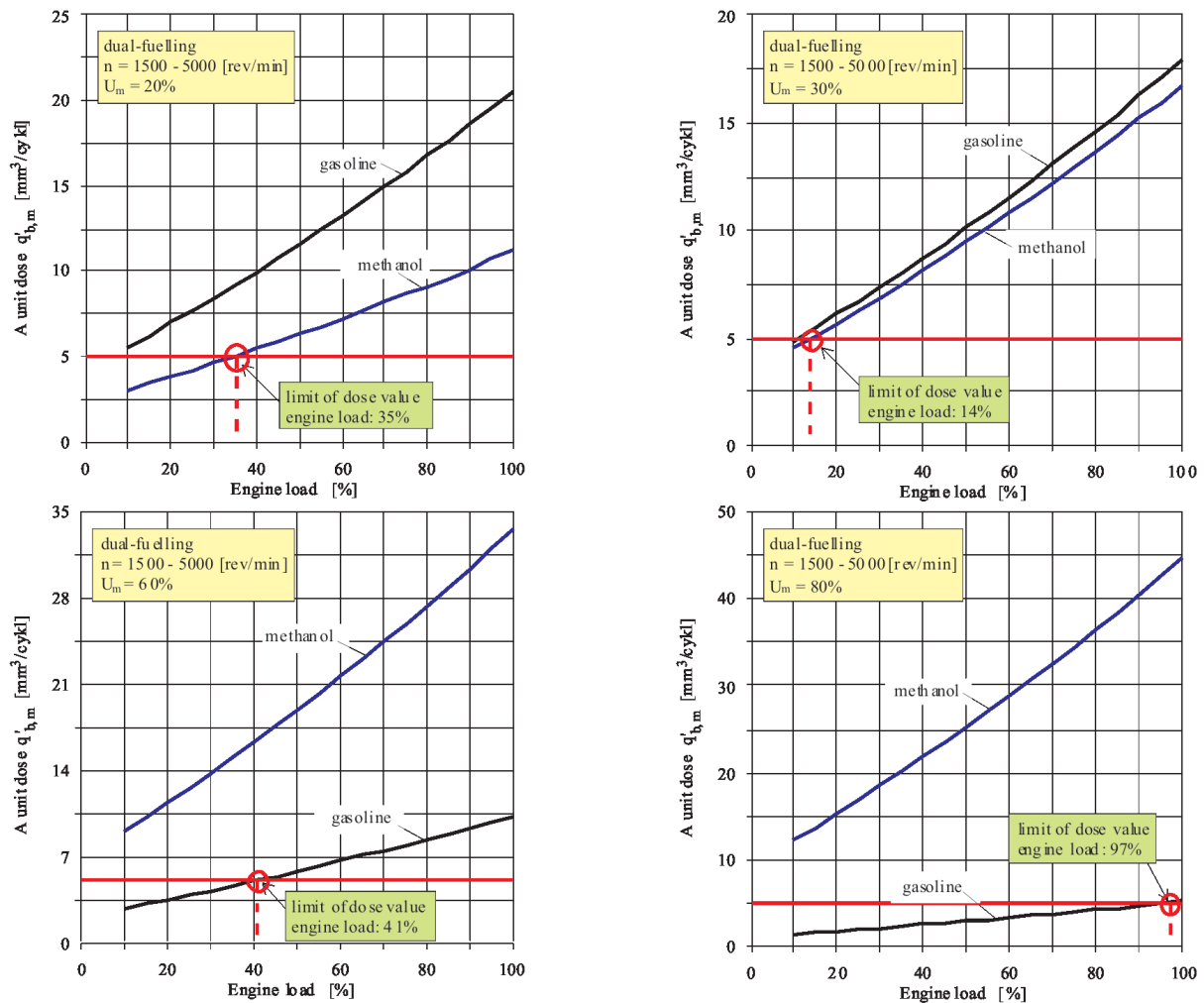


Fig. 6. Changes of elementary doses of methanol and gasoline for dual fuel supply of the Fiat 1100 MPI engine, for various fractions of the methanol

Rys. 6. Zmiany dawek jednostkowych metanolu i benzyny przy dwupaliwowym zasilaniu silnika Fiat 1100 MPI dla różnych udziałów metanolu

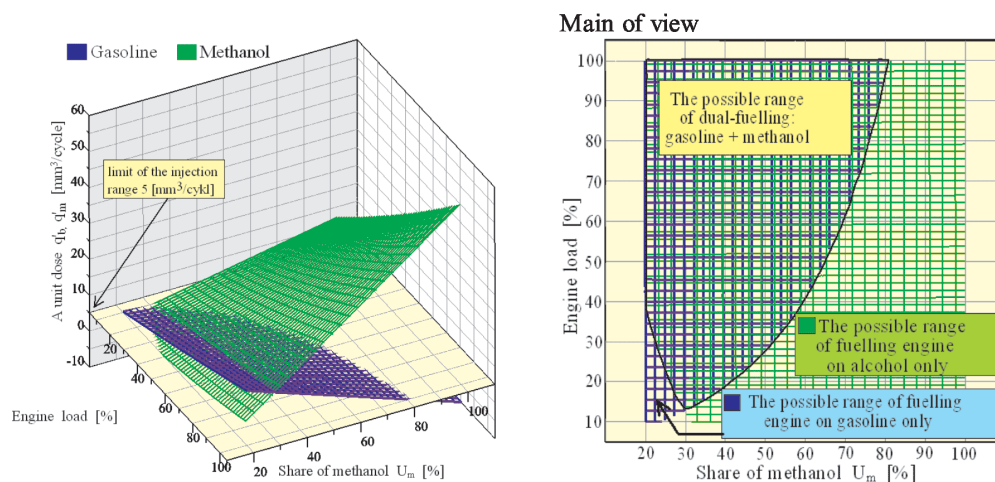


Fig. 7. Limitations of dual fuel supply according to criterion of maintained elementary doses of the fuels, greater than 5 mm³/cycle

Rys. 7. Ograniczenia zasilania dwupaliwowego według kryterium zachowania dawki jednostkowej paliw większej od 5 mm³/cykl

elementary doses of the methanol  $q'_{b,m}$  and the gasoline  $q'_{b,g}$ , on which criterion of minimal dose was introduced, elevating horizontal plane  $p_e$ - $U_m$  upwards with 5 units – Fig. 7.

Po podniesieniu stopnia sprężania o 1,5–2 jednostki istnieje możliwość osiągnięcia jeszcze lepszych parametrów pracy silnika, lecz w takiej sytuacji korzystnie jest

As result of intersection of the three planes one received ranges of possible engine operation with maintained criterion of minimal elementary dose of the injectors  $q_{m,b} > 5 \text{ mm}^3/\text{cycle}$ . In the field marked with blue line only, the engine should be supplied theoretically with the gasoline only. With the green color only was marked area, in which the engine should theoretically operate on pure methanol. And in turn, the area enclosed with black line denotes the area for which engine operation can occur in dual fuel system.

In the Fig. 8 are shown proposed ranges of investigated engine operation, taking into consideration of an effect of dual fuel supply on overall efficiency and emission of toxic components of exhaust gases. From these ranges is seen that the following areas of engine operation are possible:

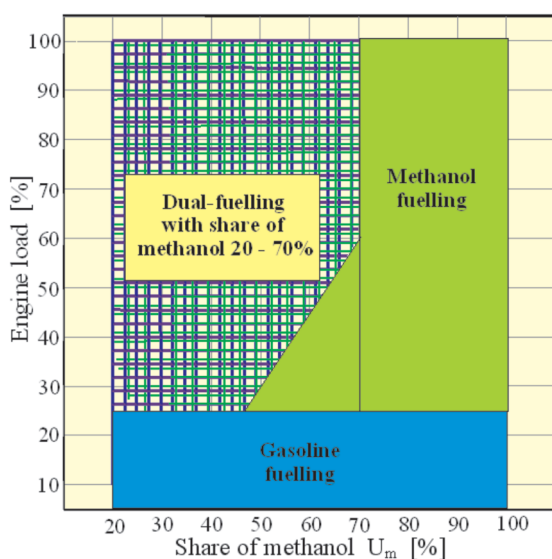


Fig. 8. Proposed ranges of engine fuelling in dual fuel system

Rys. 8. Proponowane zakresy zasilania silnika w systemie dwupaliwowym

- blue field (engine load lower than 25 %) – run on gasoline only,
- green field – run on methanol only,
- field with green and blue check – dual fuel supply with any fraction of methanol in range of 20–70 %.

In case of the compression ratio increased with 1.5–2 units, there exists a possibility of even better parameters of engine operation, however, in such situation it is advantageous to enlarge area of engine run on pure methanol with area of 85 %–100 % engine load. The plan of such engine feeding in dual fuel system with increased compression ratio is depicted in the Fig. 9.

#### 4. Conclusions

Based on results of the performed investigations, one formulated the following conclusions of a general character. It has been ascertained that the dual fuel system discussed in the present paper:

- enables engine operation at high fractions of the methanol without problem of foliation of gasoline-alcohol mixture,

powiększyć obszar zasilania silnika samym metanolem o obszar obciążeń silnika 85 %–100 %. Plan takiego zasilania silnika w systemie dwupaliwowym o podwyższonym stopniu sprężania przedstawiono na rys. 9.

#### 4. Podsumowanie

Na podstawie wyników badań sformułowano następujące wnioski o charakterze ogólnym. Stwierdzono, że zaprezentowany w niniejszej pracy system dwupaliwowy:

- umożliwia stosowanie dużych udziałów metanolu bez problemu rozwarstwiania się mieszaniny benzynowo-alkoholowej,
- pozwala na elastyczne dopasowywanie mapy zasilania silnika, biorąc pod uwagę stężenia spalin, osiągi i zalety obu paliw,
- daje możliwość równoczesnego zasilania silnika z obydwojema paliwami o zmiennym udziale alkoholu,

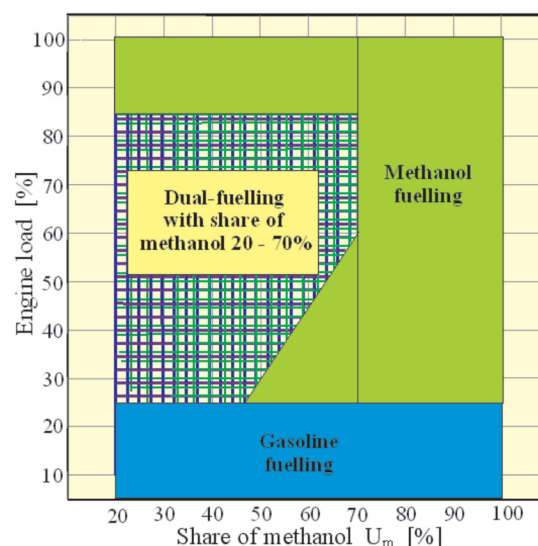


Fig. 9. Proposed ranges of engine fuelling in dual fuel system with increased compression ratio

Rys. 9. Proponowane zakresy zasilania silnika w systemie dwupaliwowym o zwiększonym stopniu sprężania

- umożliwia pracę silnika na samej benzynie lub samym alkoholu,
  - pozwala na pełniejsze wykorzystanie wysokiej LO metanolu (w obszarach zasilania samym alkoholem), zwłaszcza przy podwyższeniu stopnia sprężania o 1,5–2 jednostki.
- Ponadto w innych publikacjach [10–16] stwierdzono, że:
- dwupaliwowe zasilanie silnika benzyną i alkoholem metylowym daje możliwość poprawy parametrów silnika – sprawności ogólnej, maksymalnej mocy i maksymalnego momentu obrotowego, emisji THC,  $\text{NO}_x$  i  $\text{CO}_2$ .
  - im wyższy udział alkoholu w całkowitej dawce, tym lepsze osiągi silnika – dla czystego alkoholu największe,
  - poziomy stężenie THC były niższe niż podczas spalania benzyny dla wszystkich udziałów, dla czystego alkoholu były 2–3 razy niższe,
  - stężenia  $\text{NO}_x$  przy zasilaniu dwupaliwowym były mniejsze tylko dla niskich i średnich obciążeń silnika oraz dla czystego



- enables flexible matching of fuel supply map, taking into consideration concentration of exhaust gases, performance, and advantages of the above fuels,
- provides possibilities of simultaneous fuelling of the engine with the both fuels with changing fraction of the alcohol,
- enables engine operation on pure gasoline only, or on pure methanol only,
- enables more complete utilization of high octane number of the methanol (in areas of fuelling with the alcohol only), especially at compression ratio increased with 1.5–2 units.

Moreover, in the publications [10–16] one has confirmed that:

- dual fuel fuelling of the engine with gasoline and methyl alcohol gives opportunity of improved engine performance – overall efficiency, maximal power output and maximal torque, emissions of THC, NO<sub>x</sub> and CO<sub>2</sub>,
- the higher fraction of the alcohol in total dose the better engine performance – for pure alcohol the performance is the best,
- levels of THC concentrations were lower than during combustion of gasoline in case of all fractions, in case of pure alcohol where 2–3 times lower,
- NO<sub>x</sub> concentrations at dual fuel feeding were lower only in case of low and medium engine loads, and in case of pure alcohol were considerably lower with 40–60 % in complete field of the operation,
- CO concentrations:
  - at dual fuel feeding, were lower in area of higher loads,
  - in case of pure alcohol, levels of the concentrations were comparable to results obtained for the gasoline,
- at combustion of the methanol are present considerable differences with respect to combustion of the gasoline. The combustion occurred more dynamically at the beginning of the process and lasted shorter. In result, higher maximal pressures and higher rates of pressure growth are present.

Zdzisław Stelmasiak, DSc, DEng. – Professor in the Faculty of Mechanical Engineering and Computer Sciences at Technical University of Bielsko-Biala.

*Dr hab. inż. Zdzisław Stelmasiak – profesor na Wydziale Budowy Maszyn i Informatyki Akademii Techniczno-Humansytecznej w Bielsku-Bialej.*

e-mail: [zstelmasiak@ath.bielsko.pl](mailto:zstelmasiak@ath.bielsko.pl)



Janusz Semikow, DEng. – doctoral student in the Faculty of Mechanical Engineering and Computer Sciences at Technical University of Bielsko-Biala.

*Dr inż. Janusz Semikow – doktorant na Wydziale Budowy Maszyn i Informatyki Akademii Techniczno-Humansytecznej w Bielsku-Bialej.*

e-mail: [jsemikow@poczta.onet.pl](mailto:jsemikow@poczta.onet.pl)



- stężenia CO:
  - przy zasilaniu dwupaliwowym były niższe w obszarze wyższych obciążeń,
  - dla czystego alkoholu poziomy stężenie były porównywalne do wyników uzyskanych dla benzyny.
- przy spalaniu metanolu występują znaczne różnice w stosunku do spalania benzyny. Spalanie przebiegało bardziej dynamicznie na początku procesu i trwało krócej. W efekcie występują wyższe ciśnienia maksymalne i wyższe szybkości przyrostu ciśnienia.

## Bibliography/Literatura

1. Merksiz J., Pielecha I.: Alternatywne napędy pojazdów. Wyd. Politechniki Poznańskiej, Poznań 2006.
2. Baczewski K., Kołdoński T.: Paliwa do silników o zapłonie iskrowym. WKiŁ, W-wa 2005.
3. Kowalewicz A.: Metanol jako paliwo do silników spalinowych. Silniki Spalinowe nr 3-4, 1992.
4. Kotowski W., Klimiec J., Marcjasz-Siemiatkowska I.: Możliwości wykorzystania metanolu i jego pochodnych jako paliw silnikowych. Przemysł Chemiczny nr 80/1/2001.
5. Lotko W.: Studium zastosowań paliw alternatywnych w silnikach o zapłonie samoczynnym. Wyd. Politechniki Radomskiej, 1999.
6. Jakubowski J.: Silniki samochodowe zasilane paliwami zastępczymi. WKiŁ, 1987.
7. Maćkowski J.: Spalanie paliw naftowych zawierających dodatek etanolu w silnikach o ZI. część 1 i 2. Paliwa, oleje i smary w eksploatacji, nr 114 i 115, 2003.
8. Maćkowski J.: Wady paliw tlenowych. część 2 i 3. Paliwa, oleje i smary w eksploatacji, nr 73 i 74, 2000.
9. Majoch A. I.: Etanol w paliwach za i przeciw. część 1 i 2. Paliwa, oleje i smary w eksploatacji, nr 73 i 74, 2000.
10. Stelmasiak Z., Larisch J., Semikow J.: Preliminary tests on dual fuel spark ignition engine fuelled with methanol and gasoline, Combustion Engines, No 3/2008, pp. 24-33, 2008.
11. Stelmasiak Z., Larisch J., Semikow J.: Analysis of a chosen combustion parameters of dual fuel SI engine fuelled with alcohol and gasoline, Combustion Engines, No 2, pp. 26-36, 2009.
12. Stelmasiak Z., Larisch J., Semikow J.: Some aspects of dual fuelling SI engine with gasoline and alcohol. 12th EAEC European Congress Bratislava EAEC 2009, June 29-July 1, 2009.
13. Stelmasiak Z., Semikow J.: The possibilities of improvement of spark ignition engine efficiency trough dual fueling of methanol and gasoline. Combustion Engines, No 3/2010, pp. 59-67, 2010.
14. Stelmasiak Z., Semikow J.: Niektóre aspekty zasilania paliwami alkoholowymi silników o zapłonie iskrowym, Logistyka nr 6/2011.
15. Stelmasiak Z.: A New Concept of Dual Fuelled SI Engines Run on Gasoline and Alcohol, The Archives of Transport, nr 2/2011, pp. 73-85, 2011 r.
16. Pietras D., Gilowski T., Knefel T.: A program to analyze the combustion process in diesel engine, Combustion Engines No. 3/2011 (146), ISSN 0138-0346.
17. [en.wikipedia.org/wiki/Alcohol\\_fuel#Alcohol\\_in\\_Brazil](http://en.wikipedia.org/wiki/Alcohol_fuel#Alcohol_in_Brazil)
18. [http://pl.wikipedia.org/wiki/%C3%89tienne\\_Lenoirwww.ciop.pl/10060](http://pl.wikipedia.org/wiki/%C3%89tienne_Lenoirwww.ciop.pl/10060)
19. [www.ciop.pl/10060](http://www.ciop.pl/10060)
20. [www.en.wikipedia.org/wiki/Common\\_ethanol\\_fuel\\_mixtures](http://www.en.wikipedia.org/wiki/Common_ethanol_fuel_mixtures)
21. [www.en.wikipedia.org/wiki/Flexible-fuel\\_vehicle](http://www.en.wikipedia.org/wiki/Flexible-fuel_vehicle)