

## Dual fuelling of truck CI engine with diesel oil and mixture of propane and butane

*Abstract: This paper gives an dual fuel diesel oil simultaneously with vaporized LPG for truck engine. Showing the benefits of lower coast fuel consumption examined experimentally.*

Keywords: fuel supply, alternative fuels, LPG

### Dwupaliwowy układ zasilania silnika o zapłonie samoczynnym olejem napędowym oraz mieszaniną propanu i butanu do samochodu ciężarowego

*Streszczenie: W artykule przedstawiono zasadę działania dwupaliwowego zasilania jednocześnie olejem napędowym i odparowanym LPG silnika samochodu ciężarowego. Pokazano korzyści wynikające ze zużycia tańszego paliwa zbadane doświadczalnie.*

Słowa kluczowe: układ zasilania paliwem, paliwa alternatywne, LPG

#### 1. Wstęp

Pierwsze sterowane elektronicznie układy jednoczesnego zasilania olejem napędowym i mieszaniną odparowanego propanu oraz butanu (ON i LPG) pojawiły się w Stanach Zjednoczonych w 1999 r. Inspiracją ich wprowadzenia były spodziewane oszczędności kosztów paliw w firmach transportowych. Liczono na poprawę sprawności silników przez skrócenie procesu spalania [7]. W tym samym okresie nastąpił intensywny rozwój układów typu pompa przewód wtryskiwacz i układów akumulacyjnych w silnikach samochodów użytkowych. Uzyskane pozytywne zmiany parametrów pracy silników w tych nowoczesnych układach odsunęły na dalszy plan prace nad układami zasilania dwupaliwowego. Silniki trakcyjne wymagają regulacji składu mieszanki dla zmieniającego się obciążenia. W latach 90-tych przy powszechnie stosowanych pompach wtryskowych było to trudne.

W ostatnich latach zmienia się skład olejów napędowych przez dodawanie biokomponentów. Są to najczęściej estry kwasów tłuszczowych oleju rzepakowego, które mają niektóre gorsze właściwości jako paliwa dla silników z zapłonem samoczynnym [8]. Lepszym paliwem ze względu na osiągnięte parametry użytkowe i ekologiczne silnika jest gazowa mieszanina propanu i butanu. Niestety, to paliwo jest uzyskiwane z ropy naftowej, jest go mało - około 2% masy ropy naftowej poddanej rafinacji i jest coraz szerzej wykorzystywane w gospodarstwach domowych, transporcie i przemyśle. Odparowane LPG nie ulega samozapłonowi przy parametrach termodynamicznych panujących w komorze spalania silnika ZS i konieczne jest jednoczesne wtryskiwanie dawki inicjującej oleju napędowego.

Spalanie odparowanego LPG wraz z olejem napędowym w porównaniu do zasilania tylko olejem napędowym zmniejsza emisję cząstek stałych w spalinach, zmniejsza zanieczyszczenie oleju silnika a przede wszystkim zmniejsza koszty eksploatacji oraz zwiększa moc silnika. Celem tego artykułu jest wyjaśnienie zasad budowy układu zasilania ON i LPG oraz wskazanie różnic w parametrach pracy silników zasilanych konwencjonalnie i dwupaliwowo.

#### 2. Założenia konstrukcyjne dwupaliwowego układu wykorzystującego LPG

Podstawowym paliwem jest olej napędowy. Objętość skroplonego LPG używanego jednocześnie z olejem napędowym nie przekracza 30% całej objętości obu paliw.

Dodatkowy układ zasilania odparowanym LPG działa na podobnej zasadzie co takie układy w silnikach z zapłonem iskrowym.

Podstawowe założenia konstrukcyjne układu zasilania olejem napędowym i LPG:

- zapłon paliwa pochodzi od samozapłonu oleju napędowego,
- układ może działać bez doprowadzania LPG - nie ma zmiany konstrukcji podstawowego układu zasilania olejem napędowym,
- odparowany gaz jest doprowadzany do kolektora dolotowego przed turbosprężarką,
- dawkowanie gazu sterowane jest zaworami elektromagnetycznymi czas otwarcia zaworów gazowych jest funkcją obciążenia silnika i prędkości obrotowej,

- regulacja ilości wtryskiwanego oleju napędowego następuje na podstawie pomiaru położenia pedału przyspieszenia,
- zabezpieczeniem silnika przed przekroczeniem maksymalnej prędkości obrotowej jest zatrzymanie dopływu gazu,
- zabezpieczeniem silnika przed przekroczeniem zaprogramowanej temperatury spalin jest przez zmniejszanie dopływu gazu po osiągnięciu tej temperatury,
- włączenie układu gazowego jest możliwe w stanie cieplnym silnika umożliwiając całkowite odparowanie gazu przed wprowadzeniem go do kolektora dolotowego,

- zatrzymanie dopływu gazu przy biegu jałowym silnika i przy hamowaniu silnikiem,
- wykorzystanie w konstrukcji elementów instalacji LPG produkowanych masowo dla zmniejszenia kosztów przystosowania układu zasilania.

### 3. Przykład instalacji w samochodzie ciężarowym

Schemat funkcjonalny układu zasilania silnika ZS do samochodu użytkowego zaprezentowano na rys 3.1. Rozmieszczenie elementów dodatkowego układu zasilania w samochodzie ciężarowym przedstawia rys. 3.2.

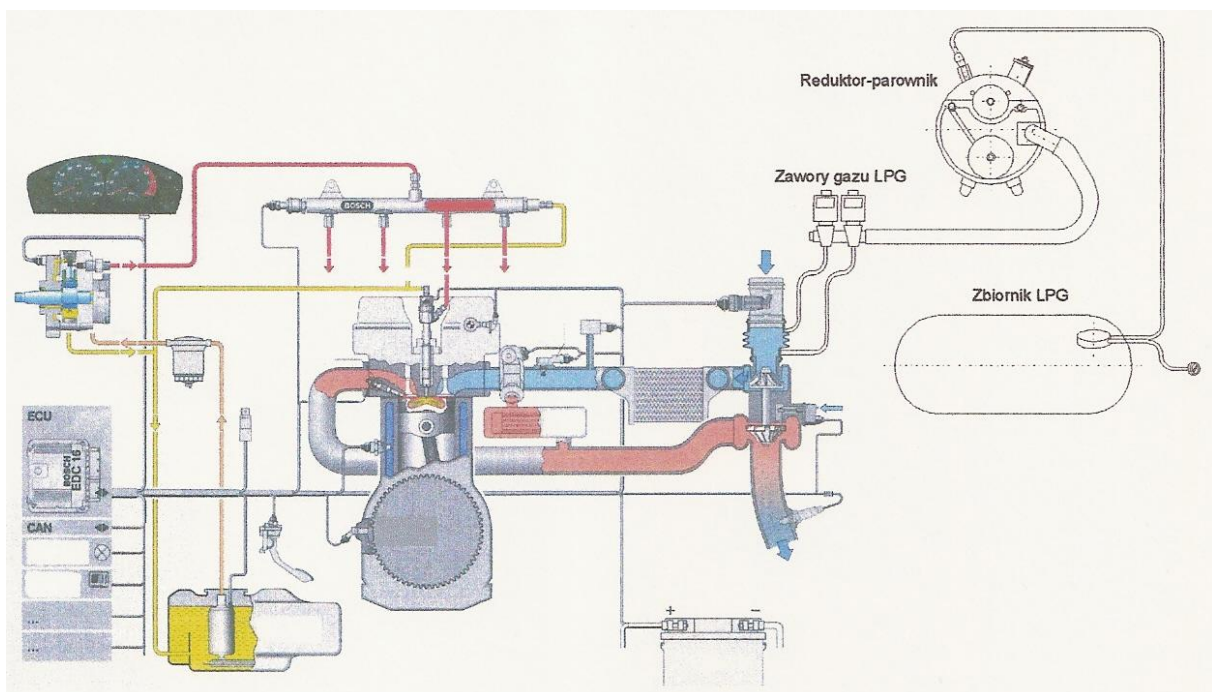


Fig. 3.1. Draft of Bi-fuel system DEGAMIX of Elpigaz

*Rys. 3.1. Schemat funkcjonalny układu zasilania dwupaliwowego DEGAMIX firmy Elpigaz na tle podstawowego układu zasilania*

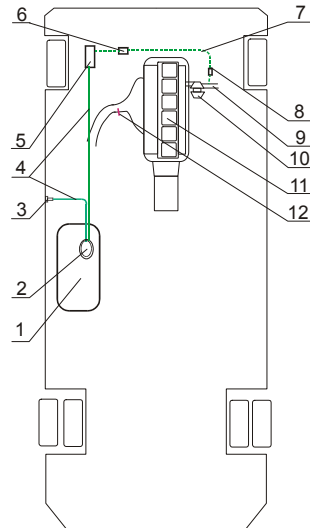


Fig. 3.2. Additional LPG fuel system elements location in truck 1 - LPG tank, 2 - multivalve, 3 - refueling, 4 - liquid LPG pipelines, 5 - evaporator, 6 - fuel and MAP sensor, 7 - evaporated LPG pipelines, 8 - LPG injector, 9 - aircolector, 10 - turbocharger, 11 - engine, 12 - thermocouple thermometer

*Rys. 3.2 Rozmieszczenie dodatkowych elementów zasilania paliwem LPG w samochodzie ciężarowym 1 - zbiornik LPG, 2 - wielozawór, 3 - zawór tankowania, 4 - rurociągi płynnego LPG, 5 - reduktor - parownik, 6 - przetwornik ciśnienia różnicowego, 7 - rurociągi gazowego LPG, 8 - zawór elektromagnetyczny LPG, 9 - kolektor powietrza, 10 - turbosprężarka, 11 - silnik, 12 - termometr termoelektryczny*

Niewielka ilość dodawanego paliwa gazowego umożliwia zastosowanie zbiornika LPG o małej objętości. Przykładowy montaż zbiornika pokazano na rys. 3.3. Przy zbiorniku o małej objętości elementy instalacji LPG nie zmniejszają ładowności samochodów ciężarowych. Potrzeba tankowania LPG przy pokazanym na rysunku zbiorniku jest mniej częsta niż tankowania ON.

Reduktor - parownik wymaga doprowadzenia ciepła dla odparowania LPG (rys. 3.4). Ciepło pobierane jest z układu chłodzenia silnika spalinowego. Można dokonać podłączenia obiegu ogrzewania reduktora - parownika do układu chłodzenia sprężarki powietrza albo nagrzewnicy kabiny.



Fig. 3.3. The additional LPG tank in the tractor

*Rys. 3.3. Dodatkowy zbiornik paliwa LPG w ciągniku siodłowym*



Fig. 3.4. The example of the evaporator montage in bus

*Rys. 3.4. Przykład zamocowania reduktora-parownika w autobusie*





Fig. 3.5. The example of gas valves location and gas inlet in the tractor

Rys. 3.5. Przykład umiejscowienia zaworów gazu i doprowadzenia gazu w ciągniku siodłowym



Fig. 3.6. The example of exhaust thermometer montage

Rys. 3.6. Przykład umiejscowienia termometru spalin

Zawory elektromagnetyczne dozujące gaz, jeden albo dwa, umieszcza się przed wirnikiem sprężarki (rys. 3.5). Termometr zabezpieczający silnik przed przekroczeniem dopuszczalnej temperatury spalin mierzy temperaturę możliwie blisko wylotu gazu z turbiny (rys. 3.6).

#### 4. Układ sterowania

Sterowanie dawką dodatkowego paliwa wykorzystuje elementy stosowane w instalacjach LPG silników z zapłonem iskrowym. Idea sterowania odbiega jednak od stosowanych obecnie układów sekwencyjnego podawania gazu. Nie obserwuje się pracy podstawowego układu zasilania lecz buduje własny układ oparty o tablicowe charakterystyki czasów otwarcia zaworów gazowych. Wybór wiersza tablicy następuje przez pomiar prędkości obrotowej; kolumnę tablicy wybiera się na podstawie pomiaru ciśnienia doładowania - silniki doładowane albo położenia pedału przyspieszenia - silniki niedoładowane. Przykład macierzy dawek paliwa prezentuje rys. 4.1.

Mapa składu mieszanki z uwzględnieniem obrotów

Obciążenie TPS (%)	Obroty silnika							
	900	1000	1500	2000	2500	3500	4000	5000
0	0.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0
14	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	32.0	32.0
29	20.0	20.0	20.0	32.0	34.0	38.0	40.0	40.0
43	20.0	20.0	28.0	34.0	34.0	34.0	52.0	52.0
57	20.0	20.0	32.0	44.0	44.0	44.0	60.0	60.0
71	20.0	20.0	32.0	48.0	48.0	60.0	64.0	64.0
86	20.0	20.0	38.0	48.0	48.0	64.0	64.0	64.0
100	20.0	20.0	38.0	48.0	48.0	64.0	64.0	64.0

Fig. 4.1. Screen scan from calibration program for fuel dose matrix programming. Engine revolution speed in rows and acceleration pedal position in columns

Rys. 4.1. Widok ekranu z programu do wpisywania macierzy dawek paliwa w polu pracy silnika. W wierszach zmienia się prędkość obrotowa silnika a w kolumnach położenie potencjometru pedału przyspieszenia

Przy podawaniu jednocześnie dwóch paliw istnieje niebezpieczeństwo przeciążenia cieplnego lub mechanicznego silnika. Aby zabezpieczyć silnik przed awarią mierzone są temperatura spalin i prędkość obrotowa. Graniczną wartość temperatury spalin wpisuje się przy przyjęciu parametrów pracy po zamontowaniu instalacji. Przykład wpisanych parametrów prezentuje rys. 4.2.



Fig. 4.2. Data input in LPG installation control program

Rys. 4.2. Wpisane do programu sterującego parametry pracy instalacji LPG [2]

Przy zasilaniu silnika dwoma paliwami istnieje niebezpieczeństwo wystąpienia spalania stukowego. To groźne zjawisko jest trudno wykrywalne w silnikach ZS. Zwykle nie przekraczanie proporcji udziału masowego LPG do oleju napędowego około 30% gwarantuje skuteczny samozapłon.

Instalacja elektryczna jest podobna do powszechnie znanych z układów zasilania LPG do silników ZI. Występuje jeden dodatkowy pomiar - temperatury spalin za turbosprężarką. Pomiar prędkości obrotowej jest też wykonany alternatywnie za pomocą sygnału obrotomierza samochodu albo przez pomiar pulsacji napięcia alternatora. Układ sterowania pracuje przy napięciu 12 V. Z powodu napięcia sieci samochodów ciężarowych 24 V wymagana jest przetwornica napięcia 24V/12 V.

## 5. Wstępne badania parametrów pracy silników zasilanych dwupaliwowo

Po zamontowaniu instalacji LPG w samochodzie ciężarowym marki DAF przeprowadzono badania, za pomocą drogowej hamowni bezwładnościowej firmy Dynomet, mające na celu sprawdzenie jak użycie dwóch rodzajów paliw wpływa na moment obrotowy i moc użyteczną. Zarejestrowane charakterystyki prędkościowe silnika pokazano na rys. 5.1.

Przedstawione charakterystyki wykazują znaczące (o ponad 10%) zwiększenie momentu obrotowego szczególnie przy małych prędkościach obrotowych oraz wynikające z tego zwiększenia - zwiększenie mocy. Wzrost mocy może jednak

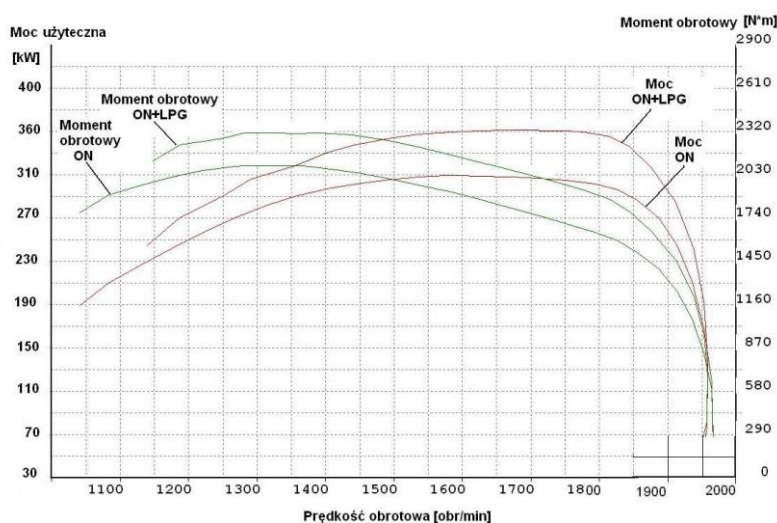


Figure 5.1. The velocity characteristics of the torque and power of the engine of the car DAF powered ON and ON and LPG

Rys. 5.1. Charakterystyki prędkościowe momentu obrotowego i mocy użytecznej silnika samochodu DAF zasilanego ON oraz ON i LPG

powodować zmniejszenie trwałości silnika. Taka zmiana charakterystyki spowodowała zmianę sposobu wybierania przełożeń w skrzyni biegów podczas jazdy.

Ważnym parametrem pracy układów napędowych samochodów jest zużycie paliwa. Pomiary zużycia paliwa w samochodzie ciężarowym marki DAF prowadzono w grudniu 2011 i styczniu 2012 metodą dopełniania zbiorników. Wyniki uśrednionych wartości zużycia paliwa przedstawia rys. 5.2. Trasa 1 miała długość 1110 km, trasa 2 - 1185 km a trasa 3 - 554 km. Około połowy przebiegu samochód pokonał z ładunkiem o masie (21-25) Mg a połowę tylko z pustą naczepą.

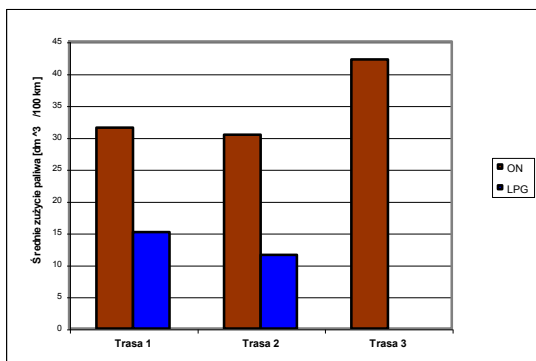


Fig. 5.2. Average unit fuel consumption for 3 routes - DAF truck

*Rys. 5.2. Średnie jednostkowe zużycie paliw na 3 trasach - samochód ciężarowy marki DAF*

Zgromadzone dane umożliwiły oszacowanie zmniejszenia kosztów przy zastosowaniu dwu paliw. Na trasie 1 zmniejszenie wyniosło 7,7 % (+/- 0,5 %) a na trasie 2 14,6 % (+/- 0,5 %) w stosunku do kosztów użycia tylko ON - trasa 3.

Podobne pomiary (za pomocą przepływomierzy) przeprowadzono w samochodzie ciężarowym marki MAN przewożącym ładunek na tej samej trasie 3 krotnie. Ładunek miał masę 22,1 Mg przy pierwszym i trzecim przejeździe, 17,1 Mg przy drugim przejeździe. Wyniki pomiarów prezentuje rys. 5.3.

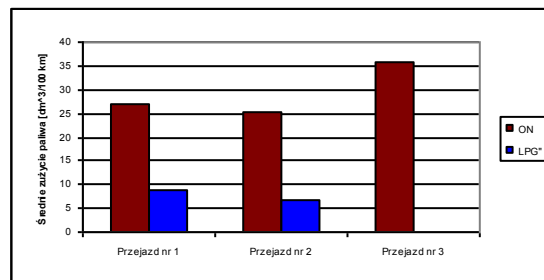


Fig. 5.3. Average unit fuel consumption for 3 routes - MAN truck

*Rys. 5.3. Średnie jednostkowe zużycie paliw na 3 trasach - samochód ciężarowy marki MAN*

W przypadku samochodu MAN jadącego tę samą trasę 1 z tą samą masą ładunku raz przy użyciu tylko oleju napędowego i powtórnie przy użyciu obu paliw nastąpiło zmniejszenie kosztów paliwa o 12,4 % przy przyjęciu cen paliwa w styczniu 2012 roku. Przy zwiększeniu masy ładunku na tej samej trasie wzrósł udział LPG w całkowitej ilości spalane go paliwa nie przekraczając 25% (objętościowo cieczy).

Chcąc potwierdzić prawidłowość wprowadzanych nastaw sterownika układu LPG przeprowadzono porównawcze badania emisji toksycznych składników spalin zgodnie z regulaminem 83 EKG ONZ. Jako obiekt badań posłużył samochód dostawczy marki Mercedes model Sprinter. Dla pojazdów o takiej masie (klasy N2) powinno się wykonać testy emisyjne zgodnie z regulaminem 49.04 EKG ONZ [6]. Przeprowadzone pomiary miały potwierdzić tylko właściwe proporcje obu paliw stąd ich porównawczy charakter. Pomiary nie sprawdzały spełnienia przepisów o zawartości toksycznych składników w spalinach. Wyniki pomiarów przedstawiono na rys. 5.4.

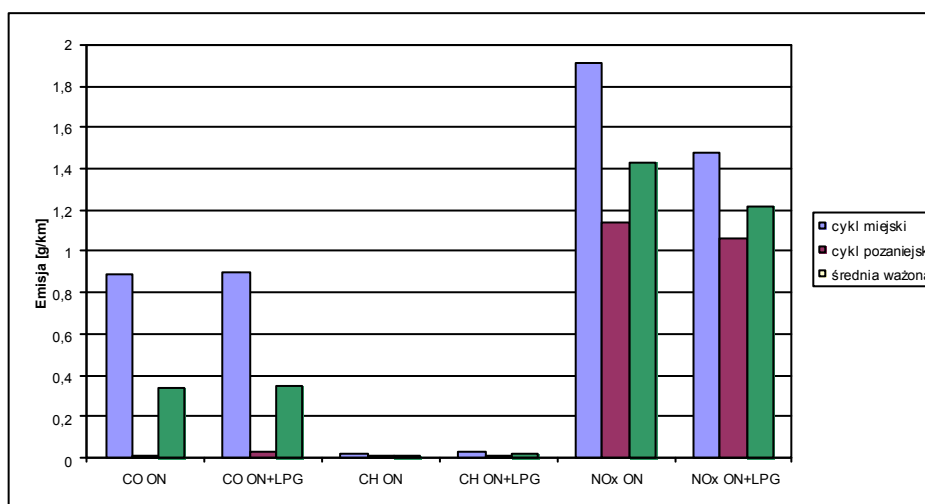


Fig. 5.4. Traffic toxic exhaust emissions at power diesel oil or diesel oil and LPG

*Rys. 5.4. Drogowe emisje toksycznych składników spalin przy zasilaniu ON albo ON i LPG*

---

Nastąpiło korzystne znaczące zmniejszenie emisji drogowej tlenków azotu. Jednocześnie wzrosła ilość emitowanych węglowodorów i tlenku węgla. Względne zwiększenie emisji tych składników spalin są jednak znacznie mniejsze niż zmniejszenie się emisji tlenków azotu.

## 6. Podsumowanie

Przedstawione wstępne wyniki pomiarów wskazują na pozytywne aspekty zastosowania dwupaliwowego zasilania ON i LPG. Stwierdzono zwiększenie momentu obrotowego silnika w całym zakresie prędkości obrotowych. Niestety pomiary wykonano tylko w jednym samochodzie ciężarowym o masie własnej 8500 kg. Najważniejszym efektem zmian jest zmniejszenie kosztów eksploatacji wynikające z różnic ceny ON i LPG. Nie sprawdzono wpływu stosowania dwu paliw na zużycie części silników.

Kolejnym etapem rozwoju tych układów zasilania może być wprowadzenie czujników spalania stukowego zabezpieczających silnik przed zniszczeniem.

Dwupaliwowe zasilanie olejem napędowym i gazem jest też stosowane przez samych producentów samochodów. Przykładem jest system FM MethaneDiesel [3] firmy Volvo, gdzie gaz ziemny jest paliwem podstawowym (do 95%) a

zapłon inicjuje tak jak opisano poprzednio olej napędowy. Niestety ze względu na ograniczoną sieć stacji tankowania płynnego metanu samochody są oferowane tylko w Szwecji, Wielkiej Brytanii i Holandii a produkcja tych samochodów wynosi około 100 sztuk rocznie.

Występująca w Polsce gęstość rozmieszczenia terytorialnego stacji tankowania LPG ułatwia użytkowanie samochodów z tym paliwem. Zainteresowanie zasilaniem dwupaliwowym z użyciem gazów jest znikome w transporcie i rolnictwie [4]. Ilość LPG jest nieporównanie mniejsza od zasobów metanu i w przyszłości przeważać będą układy zasilania gazem ziemnym. Problemem adaptacji eksploatowanych silników do zasilania dwupaliwowego olejem napędowym i metanem jest wysoki koszt wykonania [5]. Alternatywnym dla zasilania olejem napędowym i LPG jest zasilanie sprężonym gazem ziemnym. Gaz ziemny ze względu na zasoby w przyrodzie jest uważany za paliwo o większym zastosowaniu w przyszłości niż LPG. W transporcie problemem jest mały zasięg samochodu zasilanego sprężonym metanem przy stosunkowo ciężkich zbiornikach [9]. Nowe układy sterowania pracą silników dają jednak większe możliwości uzyskania poprawy parametrów pracy silnika przy zasilaniu gazami [10,11,12].

## Bibliography/Literatura

- [1] Elpigaz: Instrukcja montażu systemu zasilania gazem DEGAMIX
- [2] Elpigaz: Instrukcja obsługi programu DEGAMIX wersja 1.3.
- [3] <http://www.volvotrucks.com/trucks/poland-market/pl-pl/trucks/volvo-fm-methanediesel/Pages/volvo-fm-methanediesel.aspx>.
- [4] Lejda K., Jaworski A.: Zasilanie gazowe silników rolniczych MOTROL, 2006, 8, s. 131–138
- [5] Lejda K., Jaworski A.: Problemy zasilania gazowego silników rolniczych. MOTOROL, 2005/7
- [6] Merkisz J., Pielecha J., Radzimirski S.: Pragmatyczne podstawy ochrony powietrza atmosferycznego w transporcie drogowym. Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej Poznań 2009.
- [7] Luft S., Skrzek T.: Dwupaliwowy silnik o zapłonie samoczynnym - przegląd wybranych wyników badań. Czasopismo Techniczne Mechanika 3-M/2012, Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej s. 169-182
- [8] Baczewski K., Kałdoński T.: Paliwa dla silników o zapłonie samoczynnym WKiŁ Warszawa 2008
- [9] Stelmasiak Z.: Wybrane problemy stosowania gazu ziemnego do zasilania silników o zapłonie samoczynnym. Archiwum Motoryzacji 2006/1 s. 13-30
- [10] Stelmasiak Z.: Matysiak M.: Możliwości wykorzystania dwupaliwowego silnika ZS zasilanego głównie gazem ziemnym CNG w transporcie kołowym. Logistyka 3/2012
- [11] Kowalewicz A.: Adaptacja silnika wysokoprężnego do zasilania gazem naturalnym. Czasopismo Techniczne Mechanika 7-M/2008, Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej s. 67-78.
- [12] Stelmasiak Z.: Possibility of improvement of some parameters of dual fuel CI engine by pilot dose division.

---

Mr Zbigniew Kneba, DSc., DEng. –  
Adiunkt in the Faculty of Mechanical  
Engineering at Gdansk University of  
Technology.

*Dr hab. inż. Zbigniew Kneba – adiunkt na  
Wydziale Mechanicznym Politechniki  
Gdańskiej.*



Mr Bogusław Skarpetowski, Msc., Eng. –  
SKA-TECH Gdańsk

*Mgr inż. Bogusław Skarpetowski –SKA-  
TECH Gdańsk*

