

ANALIZA MOŻLIWOŚCI ZASILANIA BIOGAZEM SPALINOWYCH NAPEŁDÓW ŚRODKÓW TRANSPORTU

Prof. dr hab. inż. Kazimierz LEJDA, Dr inż. Hubert KUSZEWSKI, Dr inż. Artur JAWORSKI

W artykule przedstawiono przykładowe metody zasilania trakcyjnych silników spalinowych biogazem. Opisano wybrane systemy zasilania biogazem, zawarto problemy dotyczące zastosowania nieoczyszczonego biogazu jako paliwa silnikowego oraz główne zalety stosowania biogazu uszlachetnionego w aplikacjach napędowych środków transportu.

1. PROBLEMY ZASILANIA BIOGAZEM „SUROWYM” SILNIKÓW SPALINOWYCH

Biogaz to produkt biologicznego rozkładu substancji organicznych przeprowadzany przez bakterie anaerobowe w warunkach beztlenowych. Źródłem biogazu są: wysypiska śmieci, oczyszczalnie ścieków, biogazownie, a także miejsca, w których proces fermentacji metanowej odbywa się samoczynnie. Biogaz w swoim składzie zawiera zanieczyszczenia, które pogarszają jego właściwości jako paliwa do silnika spalinowego. Przeciętny skład biogazu zestawiono w tabeli 1.

Tabela 1. Przeciętny skład biogazu [3,4,5]

Stężenie składników biogazu								
CH ₄ [%v/v]	CO ₂ [%v/v]	N ₂ [%v/v]	O ₂ [%v/v]	H ₂ S [ppm]	CO [%v/v]	H ₂ [%v/v]	O ₂ [%v/v]	Inne związki (H ₂ O, NH ₃ , C ₂ H ₆ , wyższe węglowodory, dioksyny i furany)
30÷80	19÷40	1÷78	19÷40	0÷850	0÷3	0÷3	0÷21	H ₂ O – nasycona, pozostałe od kilku do kilkuset ppm

Zawartość zanieczyszczeń, do których należą CO₂, H₂S, H₂O, N₂, O₂, NH₃ powoduje obniżenie wartości opałowej (liczby Wobbego) biogazu w relacji do głównego składnika energetycznego tj. metanu CH₄. Wartość opałowa biogazu, zależna jest od jego składu, co jest związane ze źródłem biogazu. Jej średnie wartości zawierają się w przedziale od ok. 12 do ok. 30 MJ/m³. Zastosowanie surowego, nieoczyszczonego biogazu do zasilania silnika spalinowego wiąże się z obniżeniem wartości parametrów użytkowych uzyskiwanych przez silnik. Ponadto, zmienny skład biogazu komplikuje pracę silnika z uwagi na zmianę liczby oktanowej, co z kolei wymaga odpowiedniej regulacji kąta wyprzedzenia zapłonu i stopnia sprężania silnika. Obniżenie wartości opałowej biogazu wiąże się m.in. z następującymi skutkami [5]:

- wzrostem jednostkowego zużycia paliwa przez silnik,
- spadkiem emisji NO_x,
- spadkiem maksymalnego ciśnienia i maksymalnej temperatury w komorze spalania,
- spadkiem prędkości wywiązywania ciepła,
- spadkiem mocy użytecznej silnika,
- spadkiem momentu obrotowego silnika.

Optymalne wykorzystanie biogazu do zasilania silnika wymaga jego uszlachetnienia, polegającego na usunięciu bądź obniżeniu zawartości zanieczyszczeń. Konieczność oczyszczenia biogazu przy jego zastosowaniu jako paliwa do silnika spalinowego jest związana głównie z wymaganiami jakościowymi odnośnie jego składu stawianymi przez producentów silników, wymaganiami jakościowymi określonymi w normach, jak również z wymaganiami odnośnie norm emisji związków toksycznych.

Zanieczyszczenia zawarte w biogazie mają także niekorzystny wpływ na żywotność silnika. Szczególnie niekorzystnym z uwagi na trwałość silnika jest siarkowodór H_2S i amoniak NH_3 . Ich niszczące działanie wiąże się z korozją podzespołów silnika, m.in. elementów układu zasilania paliwem, układu dolotowego, układów T-P-C, łożysk, wałów korbowych i wałków rozrządu oraz zaworów. Zasiarczenie biogazu jest również niekorzystne z uwagi na jego niszczące działanie na reaktory katalityczne.

Z uwagi na rosnące wymagania ekologiczne odnośnie emisji związków toksycznych przez silniki spalinowe bardzo istotne jest zapewnienie stałego składu paliwa. Zmiana składu biogazu wiąże się z odmiennymi właściwościami fizykochemicznymi, które mają wpływ na cykl roboczy silnika. Wiąże się to ze zmianą szybkości wywiązywania ciepła w procesie spalania, zmianą współczynnika składu mieszanki, przyrostem ciśnienia i temperatury w cylindrze silnika, ze zmianą odporności na spalanie stukowe oraz powstawaniem związków toksycznych. Uzyskanie parametrów użytkowych silnika na optymalnym poziomie przy zmiennym składzie biogazu jest bardzo trudne. Wymaga to bowiem odpowiedniego sterowania kątem wyprzedzenia zapłonu (kątem wyprzedzenia wtrysku), dawkowaniem paliwa oraz stopniem sprężania silnika.

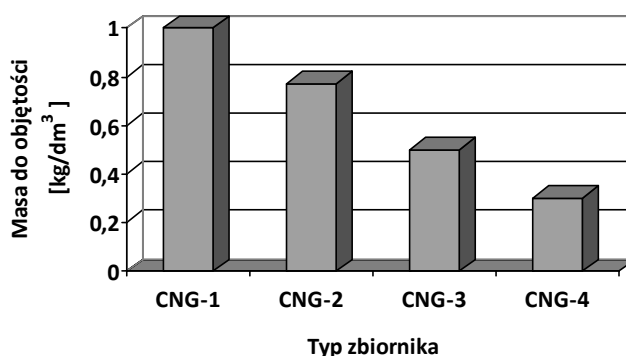
2. MOŻLIWOŚCI ZASILANIA SILNIKÓW TRAKCYJNYCH BIOGAZEM OCZYSZCZONYM

Zasilanie trakcyjnych silników spalinowych biogazem uzdatnionym o dużej zawartości metanu jest możliwe, w sposób analogiczny do systemów zasilania metanem [1,6,7,8,9,12]. Z uwagi na niską gęstość energii zawartej w paliwie w warunkach normalnych niezbędne jest jego sprężenie do wysokiego ciśnienia (około 200 bar) lub skroplenie, aby zgromadzić na pojeździe niezbędną ilość paliwa zapewniającą wymagany zasięg. Wiąże się to z systemem magazynowania paliwa, który w przypadku biogazu sprężonego (Compressed Natural Biogas - CNB) realizowany jest przez zespół zbiorników zaliczanych do 4 grup [2]:

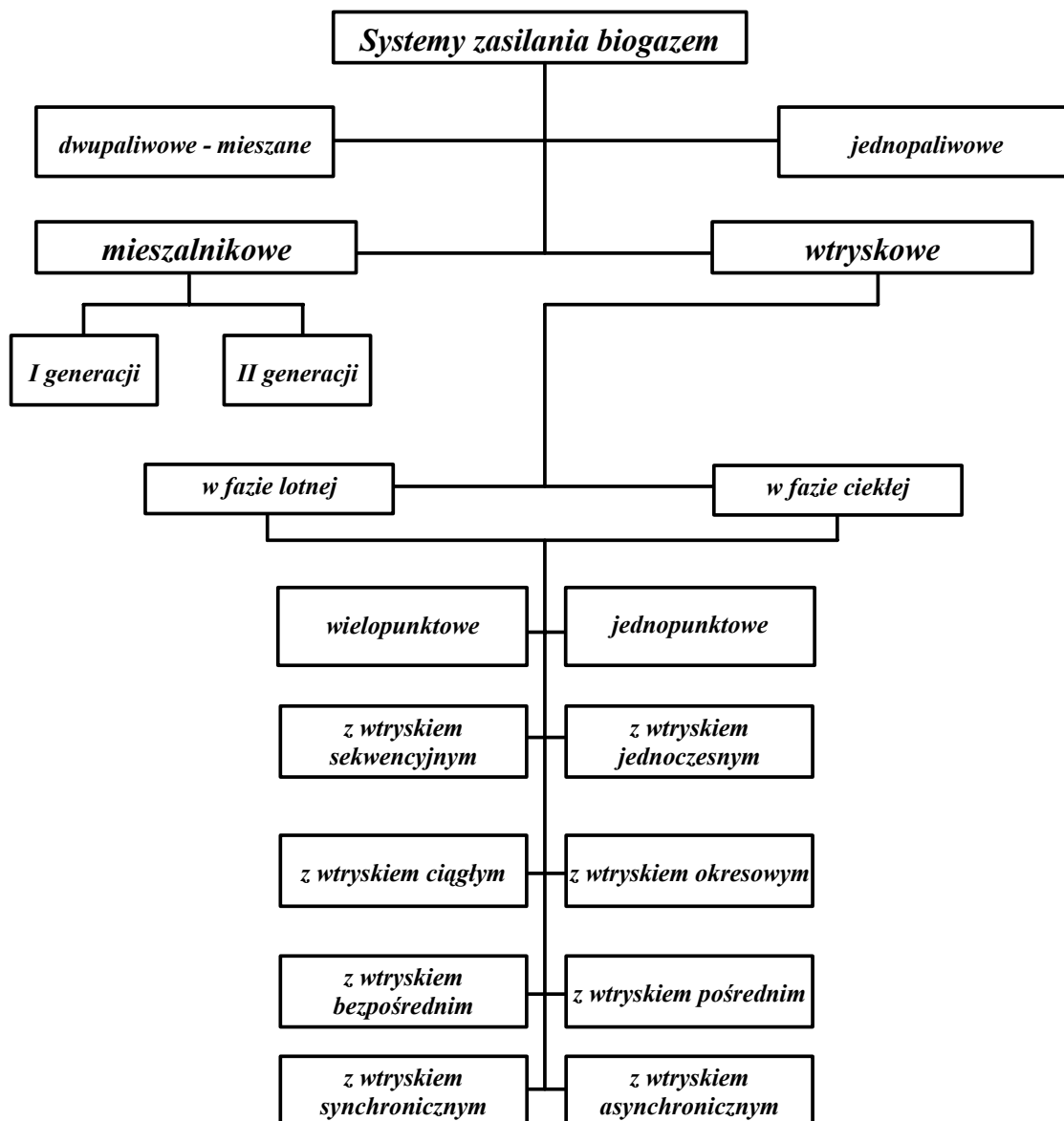
- CNG-1 – zbiorniki stalowe,
- CNG-2 – zbiorniki stalowe wzmocnione obwodowo kompozytami,
- CNG-3 – zbiorniki ze stopów metali całkowicie oplecione kompozytami,
- CNG-4 – zbiorniki całkowicie kompozytowe.

Rodzaj zbiornika wiąże się z jego masą. Na rys. 1 przedstawiono porównanie masy zbiornika w relacji do jego pojemności wodnej dla poszczególnych typów zbiorników wysokociśnieniowych.

Na rys. 2 przedstawiono możliwe rozwiązania systemów zasilania biogazem.



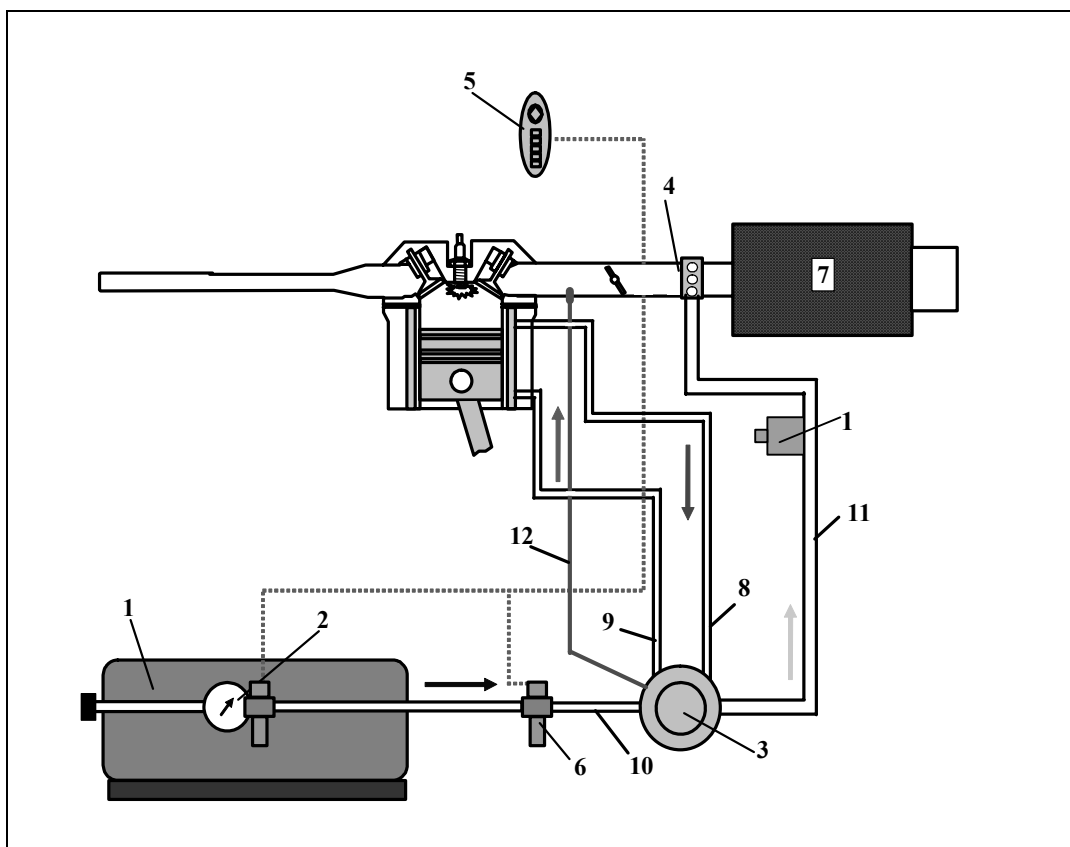
Rys. 1. Porównanie mas zbiorników wysokociśnieniowych



Rys. 2. Możliwe systemy zasilania biogazem

Zasilanie w systemie jednopaliwowym, z uwagi na wysoką temperaturę samozapłonu metanu, realizowane jest w układzie zapłonu iskrowego. Silniki zasilane jednopaliwowo biogazem są jednostkami o ZI lub w przypadku silników o ZS muszą być odpowiednio przekonstruowane. Dotyczy to m.in. obniżenia stopnia sprężania silnika, usunięcia układu zasilania ON i zamontowanie układu zasilania biogazem, zamontowanie układu zapłonowego (często stosuje się adaptację gniazd do świec zapłonowych w otworach, w których umieszczone były wtryskiwacze ON).

Układy mieszalnikowe występują zarówno w instalacjach jednopaliwowego zasilania gazem oraz w układach dwupaliwowych typu dual-fuel [7]. Schemat blokowy typowej instalacji mieszalnikowej (I generacji) przedstawiono na rys. 3.

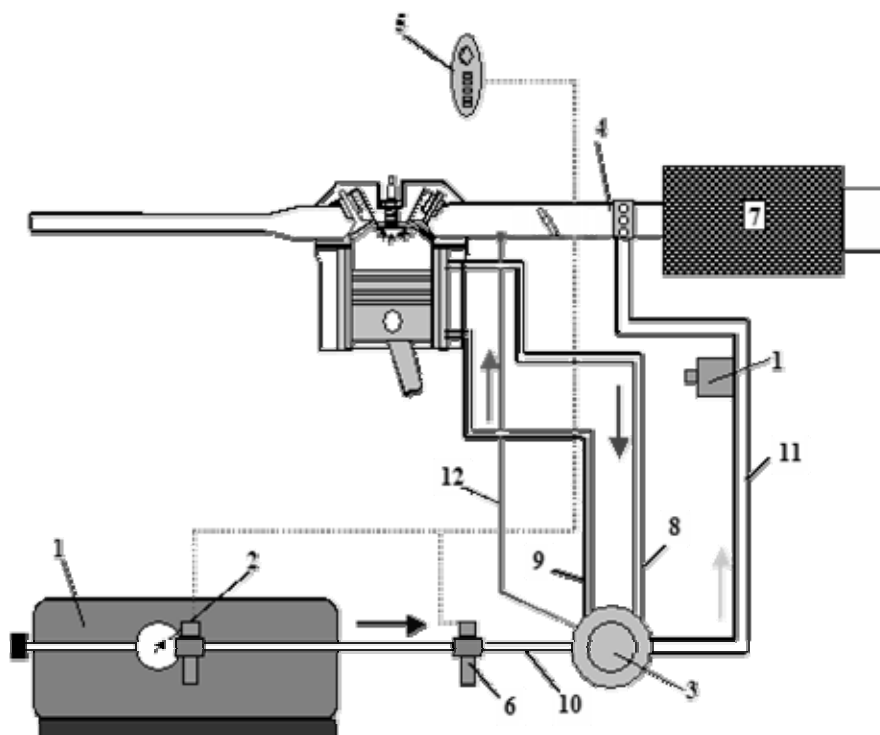


Rys. 3. Schemat układu zasilania mieszalnikowego I generacji: 1-zbiornik paliwa, 2-wielozawór zbiornika, 3-reduktor, 4-mieszalnik, 5-centralka, 6-elektrozawór, 7-filtr powietrza, 8-przewód doprowadzający ciecz z układu chłodzenia silnika do reduktora, 9-przewód odprowadzający ciecz z reduktora do układu chłodzenia silnika, 10-przewód doprowadzający biogaz do reduktora, 11-przewód doprowadzający biogaz do mieszalnika, 12- przewód podciśnienia, 13 - ręczny zawór główny

W mieszalniku, do którego gaz jest zasysany z reduktora, zostaje on zmieszany z powietrzem i jako mieszanka dostarczony do silnika. Ilość mieszanki paliwowo – powietrznej, która trafia do silnika, jest zależna od kąta uchylenia przepustnicy. Regulacja mocy silnika w tym prostym układzie ma charakter ilościowy. Jakość dostarczanej mieszanki palnej nie podlega tu regulacji, a jest jedynie wypadkową wynikającą z doboru mieszalnika dla danego typu silnika. Tym samym osiągi dynamiczne silnika, jego sprawność, poziom zużycia paliwa i wielkość emisji związków toksycznych w spalinach są zależne od właściwego doboru podstawowych elementów układu zasilania, oprócz wspomnianych wcześniej parametrów biogazu.

Rozwój gazowych układów zasilania, wywołany między innymi wzrostem wymagań w zakresie ograniczenia emisji związków toksycznych w spalinach, doprowadził do powstania i rozpowszechnienia się układów z ilościowo – jakościową regulacją mieszanki. Układy takie różnią się od opisanego wyżej układu podstawowego tym, że pomiędzy reduktorem a mieszalnikiem umieszczony jest zawór regulacyjny (attuator), którego elementem wykonawczym jest silnik krokowy.

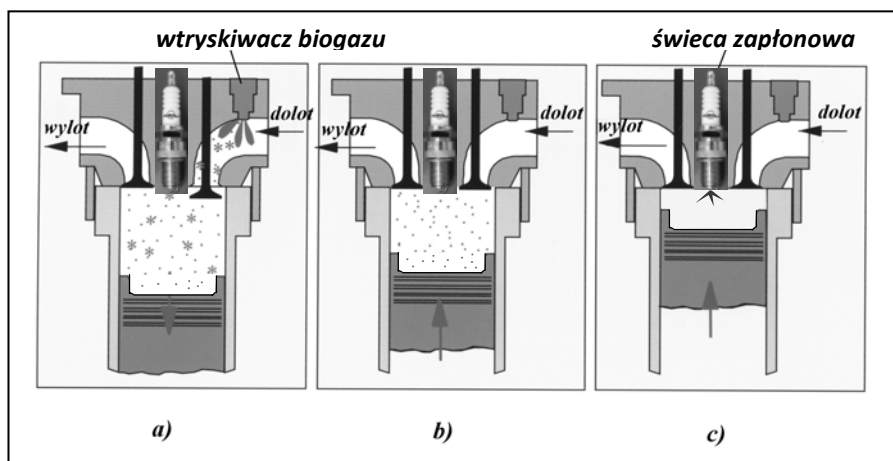
Dla samochodów ciężarowych i autobusów zaleca się aktualnie stosowanie systemów jednopaliwowych, opracowanych dla przekonstruowanych silników wysokoprężnych z obniżonym stopniem sprężania i wprowadzonym zapłonem iskrowym. Takie rozwiązania są optymalne pod względem sprawności i dają najlepsze efekty przy minimalizacji emisji składników toksycznych spalin. W układach tych dużą rolę odgrywają systemy elektroniczne. Przykład takiego układu określanego układem II generacji jest system, który ilustruje rys. 4.



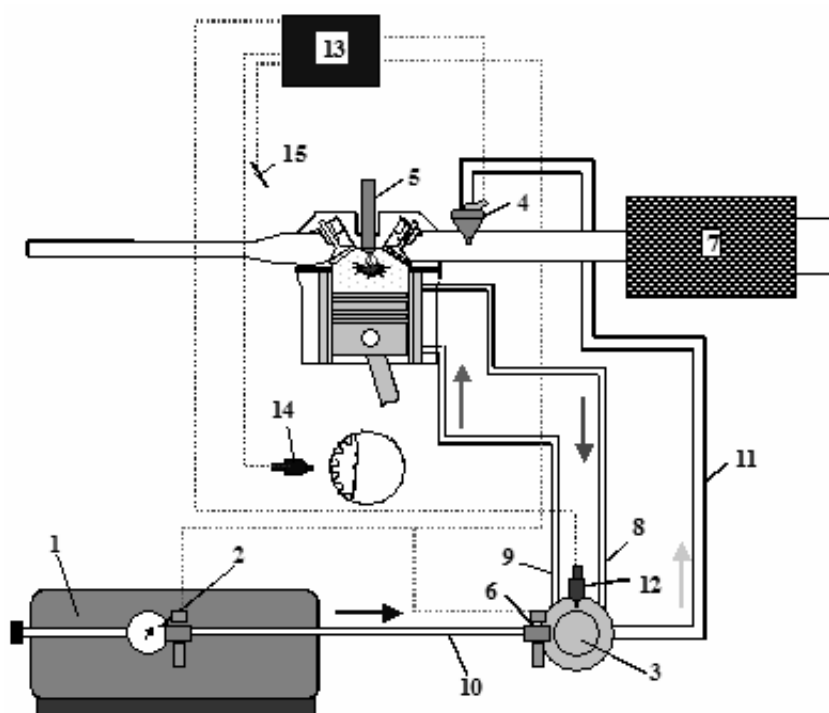
Rys. 4. Schemat układu zasilania mieszalnikowego II generacji: 1-zbiornik paliwa gazowego, 2-zawór zbiornika, 3-reduktor, 4-mieszalnik, 5-centrałka, 6-elektrozawór, 7-filtr powietrza, 8-przewód doprowadzający ciecz z układu chłodzenia silnika do reduktora, 9-przewód odprowadzający ciecz z reduktora do układu chłodzenia silnika, 10-przewód doprowadzający biogaz do reduktora, 11-przewód doprowadzający biogaz do mieszalnika, 12-czujnik temperatury, 13-sterownik układu, 14-czujnik prędkości obrotowej, 15-czujnik tlenu, 16-regulator dawki gazu, 17-czujnik położenia przepustnicy

Praca aktuatora jest kontrolowana przez elektroniczny moduł sterujący, który na podstawie analizy zbieranych sygnałów i porównania ich z wartościami zadanymi, wysyła sygnał ustalający odpowiednie położenie silnika krokowego. Podstawowym sygnałem wejściowym jest sygnał z sondy lambda, pozwalający odróżnić mieszankę bogatą od ubogiej. Celem takiego układu jest utrzymanie współczynnika nadmiaru powietrza λ w granicach $0,98 \div 1,02$, czyli praktycznie zapewnienie mieszanki okołostechiometrycznej. Innymi sygnałami wejściowymi są: sygnał położenia przepustnicy (TPS), sygnał prędkości obrotowej, sygnał temperatury silnika oraz sygnał podciśnienia w kolektorze dolotowym. Systemy takie nazywane są skrótowo L.E.S. (*Lambda Ecologic System*).

Wtryskowe systemy zasilania biogazem, zależnie od miejsca dostarczanego gazu, mogą być typu pośredniego lub bezpośredniego. W systemie pośrednim indywidualne wtryskiwacze wtryskują gaz do ramion kolektora dolotowego. Schematy wybranych faz pracy silnika w tym systemie dla silnika o ZI przedstawia rys. 5. W przypadku silnika o ZS (rys. 6) zasilanie jest realizowane w układzie dual-fuel (przy jednoczesnym zasilaniu gazem i olejem napędowym).



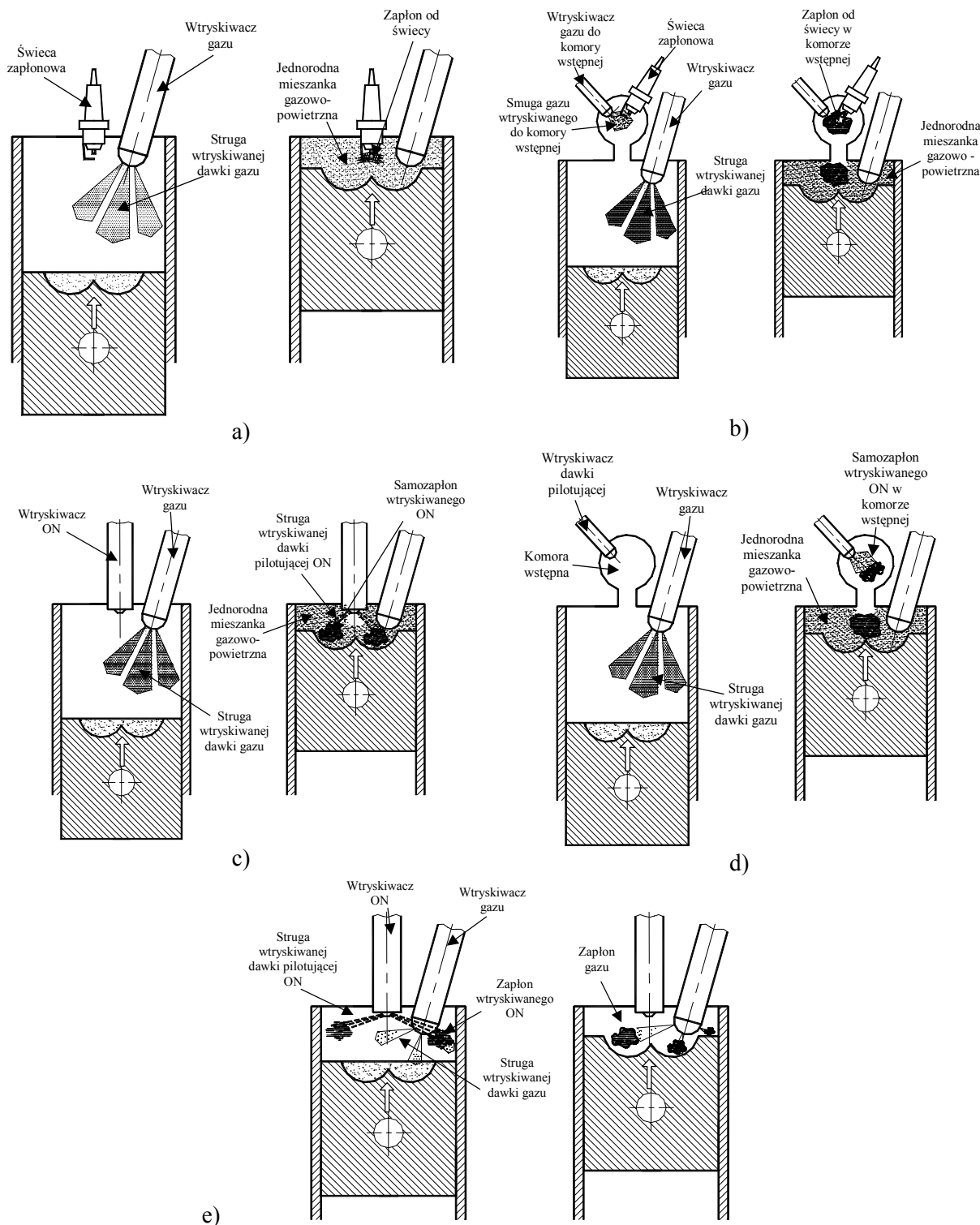
Rys. 5. Schemat wybranych faz pracy silnika o ZI zasilanego z wtryskiem biogazu do kolektora dolotowego: a) zasysanie mieszanki gazowo-powietrznej, b) sprężanie, c) przeskok iskry między elektrodami świecy zapłonowej i rozpoczęcie procesu spalania



Rys. 6. Schemat układu zasilania silnika wysokoprężnego pracującego w systemie „dual-fuel”: 1-zbiornik biogazu, 2-zawór zbiornika, 3-reduktor, 4-wtryskiwacz biogazu, 5-wtryskiwacz ON, 6-elektrozawór biogazu, 7-filtr powietrza, 8-przewód doprowadzający ciecz z układu chłodzenia silnika do reduktora, 9-przewód odprowadzający ciecz z reduktora do układu chłodzenia silnika, 10-przewód doprowadzający biogaz do reduktora, 11-przewód doprowadzający biogaz do wtryskiwacza, 12-czujnik temperatury, 13-sterownik układu gazowego, 14-czujnik prędkości obrotowej, 15-czujnik położenia przepustnicy

Na rys.7 przedstawiono przegląd systemów zasilania z wtryskiem bezpośrednim gazu w fazie lotnej do komory spalania [9]. Można w nich wyróżnić dwie zasadnicze odmiany:

- systemy z homogeniczną mieszanką gazowo-powietrzną (a do d),
- system z niejednorodną mieszanką gazowo - powietrzną (e).

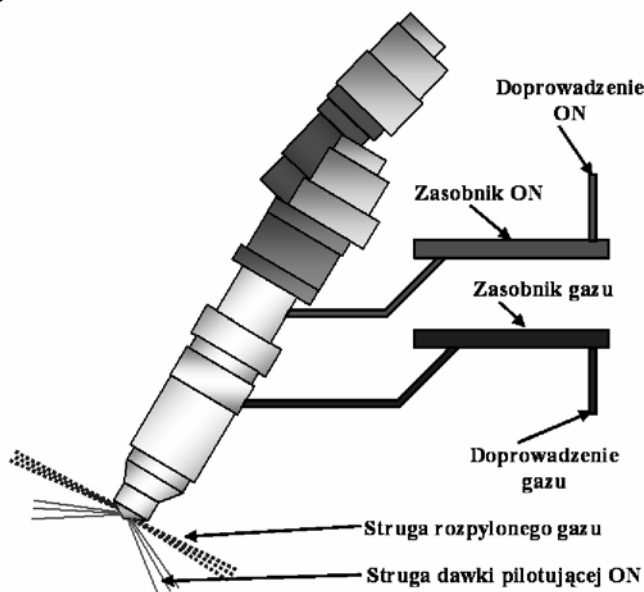


Rys. 7. Możliwe systemy spalania z wtryskiem biogazu: a) z komorą otwartą i zapłonem iskrowym - SIOC (Spark-Ignited Open Chamber), b) z komorą wstępną i zapłonem iskrowym – SIPC (Spark-Ignited Precombustion Chamber), c) dwupaliwowy konwencjonalny – CDF (Conventional Dual-Fuel), d) dwupaliwowy z bardzo małą dawką pilotującą wtryskiwaną do komory wstępnej – MPPC (Micro-Pilot Dual Fuel), e) dwupaliwowy z heterogeniczną mieszanką gazowo-powietrzną i wysokociśnieniowym wtryskiem gazu – LaCHIP (Late-Cycle High Ignition Pressure)

Układy "dual-fuel" dzielą się na konwencjonalne systemy "dual-fuel" (CDF - *Conventional Dual-Fuel*), w których dawka ON może zmieniać się od pilotującej, inicjującej zapłon do pełnej (100 % przy zasilaniu wyłącznie na ON) oraz na systemy z dawką pilotującą o wielkości 1-5 % (MPOC – *Mini-Pilot Open Chamber Dual-Fuel*). W przypadku systemu z komorą wstępną MPPC

(*Micro-Pilot Dual Fuel*) dawka wtryskiwanego ON inicjująca zapłon jednorodnej mieszanki gazowo-powietrznej jest ograniczona poniżej 1 %. System LaCHIP (*Late-Cycle High Ignition Pressure*) z niejednorodną mieszkanką gazowo-powietrzną działa również w systemie "dual-fuel", ale przy wtrysku wysokociśnieniowym paliwa gazowego w końcowej fazie suwu sprężania. Stopień sprężania w tym silniku jest taki sam jak dla silników o ZS. ON jest wtryskiwany do komory spalania przed GMP i następuje jego samozapłon. Następnie wtryskiwany jest gaz ziemny, który ulega zapłonowi. Dawka wtryskiwanego ON w tym systemie zawiera się w granicach od 1 do 10 % całkowitej energii obu paliw.

Przy zasilaniu gazem silnika wysokopięnego do najnowszych rozwiązań należy wtrysk bezpośredniego gazu w fazie lotnej przez wtryskiwacz dwupaliwowy. Schemat tego typu wtryskiwacza ilustruje rys. 8.



Rys. 8. Schemat wtryskiwacza dwupaliwowego systemu Westport HPDI

W systemie Westport HPDI gaz ziemny sprężony do wysokiego ciśnienia wtryskiwany jest bezpośrednio do cylindra przez dwupaliwowy wtryskiwacz w końcowej fazie suwu sprężania [13,14]. Wtryskiwana dawka pilotująca ON w tym systemie nie przekracza 10 % całkowitej dawki paliwa. System ten zapewnia uzyskanie parametrów użytkowych silnika na poziomie przy zasilaniu wyłącznie ON [13].

3. PODSUMOWANIE

Biogaz jest jednym z paliw odnawialnych, który po odpowiednim przygotowaniu może być użyty do zasilania trakcyjnych silników spalinowych. Do podstawowych korzyści wynikających z zasilania silników trakcyjnych biogazem oczyszczonym (uzdatnionym), zawierającym niemal wyłącznie metan, należą:

- biogaz jest paliwem odnawialnym,
- cena biogazu jest niższa od cen paliw tradycyjnych,
- zasilanie biogazem umożliwia obniżenie emisji związków toksycznych oraz cieplarnianego CO₂,
- biogaz, z uwagi na wysoką temperaturę zapłonu metanu oraz granice wybuchowości w powietrzu (5-15% obj.), przy gęstości niższej od powietrza, jest paliwem bezpiecznym,
 - możliwość zastosowania do silników przystosowanych do zasilania CNG,
 - możliwość spalania mieszanek ubogich,
- przy stosowaniu biogazu skroplonego, duża gęstość zmagazynowanej energii w jednostce objętości (ok. 1,5 objętości etyliny oraz 1,7 objętości ON), umożliwia zwiększenie zasięgu pojazdu przy małej objętości zajmowanej przez zbiornik paliwa,

- przy stosowaniu biogazu skroplonego istnieje możliwość dystrybucji analogicznie do tradycyjnych paliw ropopochodnych (przewożenie autocysternami na stację paliw),
- przy stosowaniu biogazu skroplonego, czas tankowania jest porównywalny do czasu tankowania ON lub etyliny.

Biorąc pod uwagę założenia odnośnie rozwoju sektora biogazowni w Polsce [10,11], można prognozować także jego szersze stosowanie jako paliwa w transporcie.

LITERATURA

- [1] Acker G., Liss W., Moulton D., Okazaki S.: Fuel Issues for Liquefied Natural Gas Vehicles. SAE 922360, str. 1869-1884.
- [2] Błażejowski W., Kaleta J.: Kompozytowe zbiorniki paliw gazowych w pojazdach. Silniki gazowe 2003. Zeszyt Naukowy Politechniki Częstochowskiej nr 25 pod red. Dużyński A. Wydawnictwo Politechniki Częstochowskiej. Częstochowa 2003.
- [3] Cupiał K., Pyrc M., Jamrozik A., Tutak W., Kociszewski A.: Problemy oczyszczania gazu generatorowego o dużej zawartości pyłów i smół pogazowych. Silniki gazowe. Wybrane zagadnienia. Monografia nr 183 pod red. Dużyński A. Wydawnictwo Politechniki Częstochowskiej. Częstochowa 2010.
- [4] Daraż W.: Doświadczenia z eksploatacji agregatu prądotwórczego JMS-312 zasilanego gazem składówiskowym. Silniki gazowe. Wybrane zagadnienia. Monografia nr 183 pod red. Dużyński A. Wydawnictwo Politechniki Częstochowskiej. Częstochowa 2010.
- [5] Januła J., Teodorczyk A.: Wpływ składu paliwa biogazowego na parametry pracy tłokowego silnika spalinowego. Silniki gazowe 2003. Zeszyt Naukowy Politechniki Częstochowskiej nr 25 pod red. Dużyński A. Wydawnictwo Politechniki Częstochowskiej. Częstochowa 2003.
- [6] Lejda K., Jaworski A.: LNG – alternatywne paliwo przyszłościowe dla autobusów miejskich. Mat. Międz. Konf. Naukowo-Technicznej nt. Prezentacja autobusów zasilanych gazem ziemnym. Zeszyt Naukowo-Techniczny Oddziału SITKom w Krakowie, Przemysł, z. 70, str. 49-59, 1999.
- [7] Lejda K., Jaworski A.: Systemy zasilania silników samochodowych w aspekcie właściwości użytkowych i toksyczności spalin. Prace Akademii Transportu Ukrainy – Centrum Zachodnie, No. 9, Lwów 2002.
- [8] Litzke W.L., Wegrzyn J.: Natural Gas as a Future Fuel for Heavy-Duty Vehicles. SAE TECHNICAL PAPER SERIES 2001-01-2067.
- [9] Meyers D.P., Bourn G.D., Hedrick J.C., Kubesch J.T.: Evaluation of Six Natural Gas Combustion Systems for LNG Locomotive Applications. SAE 972967, str. 1531-1544.
- [10] Ministerstwo Rolnictwa i Rozwoju Wsi, Założenia Programu rozwoju biogazowni rolniczych, stanowiące propozycję Ministra Rolnictwa i Rozwoju Wsi przekazaną Ministrowi Gospodarki do programu „Innowacyjna Energetyka, Rolnictwo Energetyczne”, Warszawa, maj 2009.
- [11] Narodowy Fundusz Ochrony Środowiska i Gospodarki Wodnej. Ekspertyza. Ocena Strategii rozwoju energetyki odnawialnej oraz kierunki rozwoju energetycznego wykorzystania biogazu wraz z propozycją działań. Warszawa 2005.
- [12] Williams G.: Commercial LNG Fuel Systems For Class 8 Trucks. Global Heavy Duty Programs. Westport Innovations Inc. 2006
- [13] Westport and Cryostar SAS Complete Agreement for LNG Tank Pump Technology. www.greencarcongress.com/lng/index.html
- [14] www.westport.com

ANALYSIS OF COMBUSTION ENGINES FUELLING METHODS BY BIOGAS OF MEANS OF TRANSPORT

The article presents examples of the biogas fuelling methods of traction engines. Describes some of the biogas power systems, problems relating to the use of crude biogas as a motor fuel and the main advantages of the use of upgraded biogas in the transport applications.