

DUAL-FUEL FEEDING DIESEL ENGINE BEHIND ASSISTANCE CNG WITH LIQUID DOSE PILOTING FUEL RENEWABLE

**Andrzej Piętak, Sławomir Wierzbicki
Maciej Imiolek, Maciej Mikulski**

*University of Warmia and Mazury in Olsztyn
Oczapowskiego Str. 2, 10-719 Olsztyn, Poland
Faculty of Technical Sciences
Mechatronic Faculty
Słoneczna Str. 46 A, 10-710 Olsztyn
tel.: 089 524 51 01, fax: 089 524 51 50
e-mail: mechatronika@uwm.edu.pl*

Abstract

It discusses different construction solutions of dual – fuel engines. It shows influence parameters decisive about combustion different fuels in dual- fuel engine. It says about the way to adaptation 1.9 TDI engine to feeding with liquid piloting dose (ethyl ester of higher Fatty Acid) and indirect injection dose of methane. It discuss specific steer of engine feeding with two fuels procedures, pay special attention on cooperation original inject pump controller with work out by authors controller methane quantity. It shows comparative examinations results braking this engine. Examinations were made with using automatical engines test bench AVL with PUMA system. Indicate, that two-fuel supplying is advantageous than supplying of engine car fuel from the point of view of lowest emission of harmful association, especially in range of fumigation particularly exhaust fumes and level of oxide of carbon. These research have exerted necessity of precise steering of overtake brake piloting dose corner from the point of view of appearing problems with excessive emission of noise related with combustion and raising medias temperature exactly in range of nominal load. Results of these examinations could be instruction to further works in range of realising feeding diesel engines method fuels gas II generation source from gasification other organical biomass pyrolysis.

Keywords: automatic ignitions engine, dual – fuel feeding, CNG, steering, renewable fuel

DWUPALIWOWY SILNIK O ZAPŁONIE SAMOCZYNNYM DO ZASILANIA BIOPALIWOWYCH AGREGATÓW PRĄDOTWÓRCZYCH

Streszczenie

Omówiono różne rozwiązania konstrukcyjne silników o zasilaniu dwupaliwowym. Przedstawiono wpływ parametrów decydujących o spalaniu różnych paliw w silniku dwupaliwowym. Opisano sposób adaptacji silnika 1.9 TDI do zasilania dawką pilotującą (ester etylowy wyższych kwasów tłuszczowych) i wtryskiwanym pośrednio metanem. Omówiono specyficzne procedury sterowania silnika zasilanego dwoma paliwami, zwracając szczególną uwagę na współpracę oryginalnego sterownika pompy wtryskowej z opracowanym przez autorów sterownikiem ilości metanu. Przedstawiono porównawcze wyniki badań hamownianych tego silnika. Badania zrealizowano przy wykorzystaniu zautomatyzowanej hamowni silnikowej AVL z systemem PUMA. Wskazano, że zasilanie dwupaliwowe jest korzystniejsze niż zasilanie silnika olejem napędowym ze względu na niższą emisję związków szkodliwych, szczególnie w zakresie zadymienia spalin i poziomu dwutlenku węgla. Badania te wykazały także konieczność precyzyjnego sterowania kątem wyprzedzenia wtrysku dawki pilotującej ze względu na pojawiające się problemy z nadmierną emisją hałasu związanego ze spalaniem i podniesieniem temperatury mediów szczególnie w zakresie obciążeń nominalnych. Wyniki tych badań mogą stanowić wskazówkę do dalszych prac w zakresie realizacji metod zasilania silników o ZS paliwami gazowymi 2-generacji pochodzącymi ze zgazowania lub pirolizy biomasy organicznej.

Słowa kluczowe: silnik o zapłonie samoczynnym, zasilanie dwupaliwowe, CNG, sterownice, paliwa odnawialne

1. Wprowadzenie

Kurczące się zasoby ropy naftowej, a także innych paliw kopanych oraz coraz większa troska o środowisko naturalne wymuszają poszukiwanie nowych, tańszych i bardziej ekologicznych źródeł energii.

Polska zgodnie z obowiązującą dyrektywą Nr 2001/77/WE Parlamentu Europejskiego i Rady Europy z dnia 27 września 2001 roku w sprawie „wspierania produkcji na rynku wewnętrznym energii elektrycznej wytwarzanej ze źródeł odnawialnych” zobowiązana jest wytwarzać 7,5% energii elektrycznej wytworzonej w źródłach odnawialnych do końca 2010 roku.

Kolejnym ważnym dokumentem, który wymusza poszukiwanie alternatywnych źródeł energii jest „Protokół z Kioto”, w którym sygnatariusze tego protokołu, w tym Polska, zobowiązały się do redukcji do 2012 roku własnych emisji o wynegocjowane wartości zestawione w załączniku do protokołu (co najmniej 5% poziomu emisji z 1990) m.in. dwutlenku węgla, metanu, tlenku azotu – gazów emitowanych przez silniki powodujących efekt cieplarniany.

Do 2020 roku Unia Europejska postawiła krajom członkowskim następujące cele:

- redukcja o 20% emisji gazów cieplarnianych w stosunku do poziomu emisji z 1990 r.,
- udział energii odnawialnej w bilansie finalnej energii - 20%,
- o 20% zwiększenie efektywności energetycznej,
- udział biopaliw w ogólnej konsumpcji paliw transportowych musi wynieść co najmniej 10%.

Biorąc pod uwagę przedstawione wyżej wymagania niezbędne staje się poszukiwanie nowych technologii i metod wytwarzania energii elektrycznej z odnawialnych źródeł energii.

Jednym z możliwych sposobów zagospodarowania odpadów pochodzenia rolniczego i komunalnego (paliw drugiej generacji) jest przetwarzanie odpadów tych na biogaz, a następnie zasilanie tym gazem silników spalinowych napędzających agregaty prądotwórcze lub użycie go do napędu środków transportu.

Biogaz wytwarzany poprzez zgazowywanie odpadów komunalnych i rolniczych to mieszanina gazów palnych takich jak: wodór, metan, tlenek węgla o łącznej zawartości tych składników przekraczającym nawet 75%. Pozostałe niepalne składniki nieczyszczonego biogazu to przede wszystkim: dwutlenek węgla, azot. Zawartość poszczególnych gazów palnych w biogazie jest ściśle uzależniona od technologii zgazowywania oraz od surowca wejściowego który poddawany jest zgazowywaniu.

Podstawowe właściwości palnych składników biogazu zamieszczono w Tab. 1. W tabeli tej zamieszczono również, dla porównania, niektóre własności fizyczne oleju napędowego stosowanego do zasilania silników o zapłonie samoczynnym.

Tab. 1. Podstawowe właściwości palnych składników biogazu
Tab. 1. Basic features of combustive biogas components

	ON	CH ₄	CO	H ₂
Wartość opałowa	42500 kJ/kg	50 049 kJ/kg	12 690 kJ/kg	120 000 kJ/kg
		35 897 kJ/m ³	15 860 kJ/m ³	10 800 kJ/m ³
Gęstość	830 kg/m ³	0,7168 kg/m ³	1,2500 kg/m ³	0,0899 kg/m ³
Temperatura zapłonu	220°C	537°C	605°C	585°C

Z uwagi na temperaturę zapłonu biogaz podobnie jak gaz ziemny (CNG lub LNG) oraz gaz LPG nie może być zastosowany jako jedyne paliwo do zasilania silnika o zapłonie samoczynnym. Jediną metodą umożliwiającą zasilanie silników z ZS paliwami gazowymi jest równoczesne dwupaliwowe zasilanie silnika. W rozwiązaniach tych do komory spalania silnika zasysana jest przygotowana wstępnie w kolektorze mieszanka powietrza z paliwem gazowym, pod koniec suwu sprężania do cylindra wtryskiwana jest niewielka dawka paliwa w celu wywołania efektu

samozapłonu.

Obecnie w kilku ośrodkach naukowych prowadzone są badania nad wykorzystaniem paliw gazowych (najczęściej LPG i CNG) do zasilania silników spalinowych o ZS. Wśród najważniejszych kierunków prowadzonych badań należy wymienić:

- zasilanie silników LPG, CNG, LNG (zasilanie dwupaliwowe) [1-3, 9],
- zasilanie silników biogazem (poprzez modyfikację silnika: zmiana stopnia sprężania oraz montaż dodatkowego układu zapłonowego) [5],
- zasilanie silników zmodyfikowanym LPG i NG (stosowanie dodatków umożliwiających samozapłon) [9].

W systemach dwupaliwowego zasilania silnika o zapłonie samoczynnym wykorzystuje się bezpośredni lub pośredni wtrysk sprężonego gazu do komory spalania. Aby mógł nastąpić zapłon niezbędna jest dawka pilotująca oleju napędowego. W dwupaliwowych silnikach o ZS paliwo gazowe może zmieniać swoje właściwości w pewnym zakresie. Aby uzyskać porównywalne parametry pracy silnika jak przy zasilaniu ON układ sterujący musi na podstawie informacji z czujników kontrolować w sposób ciągły skład gazu i odpowiednio do warunków pracy silnika dobierać kąt początku wtrysku, wielkość dawki pilotującej i wielkość dawki głównej. Przy odpowiednich algorytmach sterowania można uzyskać optymalny proces spalania przy możliwie niskich dawkach pilotujących, niższą emisję zanieczyszczeń i porównywalne osiągi.

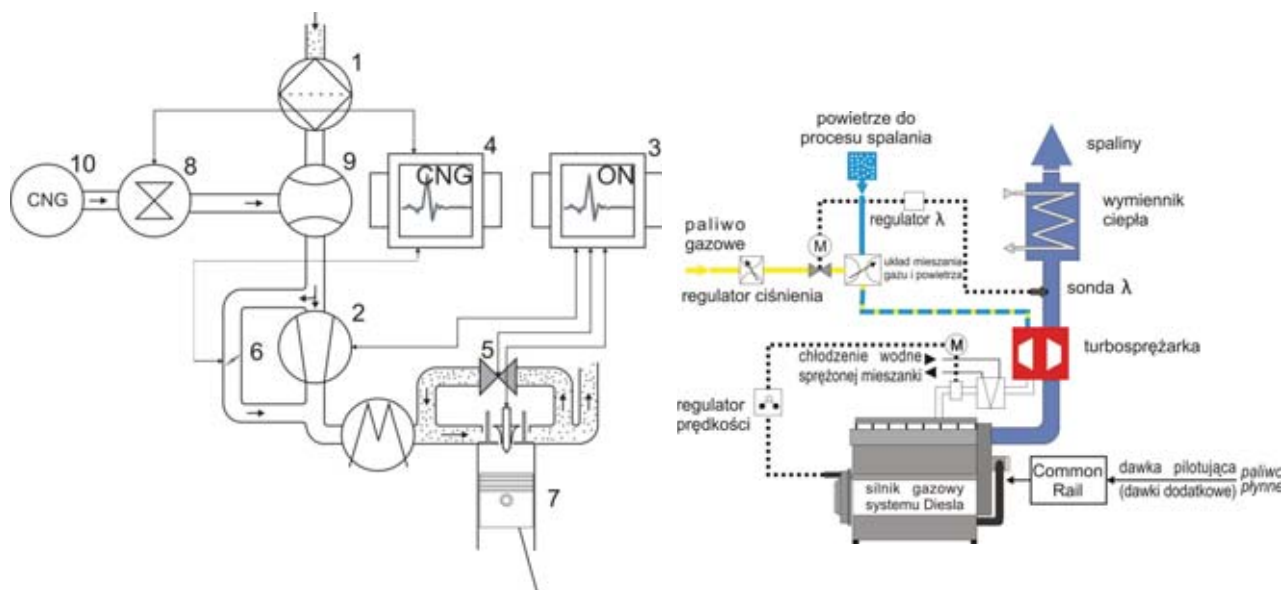
W zależności od sposobu zasilania dwupaliwowych silników CNG można wyróżnić następujące rozwiązania:

1. Układ zasilania z wtryskowym systemem doprowadzenia metanu do kanału dolotowego przed sprężarką - dawka główna CNG wtryskiwana jest do kanału dolotowego przed sprężarką za pomocą dodatkowego wtryskiwacza gazowego. W kanale gaz miesza się z masą doprowadzonego powietrza a następnie mieszanka trafia przez układ doładowania do cylindra. Wraz ze zmianą prędkości obrotowej sprężarki nie zmienia się stosunek powietrze-gaz, zmienia się ilość doprowadzonej mieszanki do cylindra. W cylindrze następuje sprężenie mieszanki, a w końcowej fazie sprężania wtryskiwana jest dawka pilotująca oleju napędowego, która inicjuje zapłon mieszaniny powietrze - metan.
2. Układ zasilania silnika z wtryskowym systemem doprowadzenia metanu do kanału dolotowego za sprężarką. Dawka gazu podawana jest do sprężonego powietrza. W takim układzie stosunek powietrze-gaz zmienia się w zależności od obciążenia sprężarki. Podobnie jak w pierwszym rozwiązaniu mieszanka powietrze-gaz jest sprężana w cylindrze, a w końcowej fazie sprężania wtryskiwana jest dawka pilotująca oleju napędowego, która inicjuje zapłon.
3. Układ zasilania silnika z wtryskiem sprężonego metanu bezpośrednio do cylindra. Gaz i ON jest wtryskiwany do cylindra przy zastosowaniu wtryskiwacza dwudrożnego. Na końcu suwu sprężania następuje wtrysk dawki pilotującej oleju napędowego, która w wyniku samozapłonu zapala się powodując zapłon wtryskiwanej dawki głównej metanu.
4. Układ zasilania silnika z wtryskowym systemem doprowadzenia metanu do kanału dolotowego przed sprężarką z przepustnicą w kanale obejściowym sprężarki. Dawka gazu podawana jest do sprężonego powietrza. W takim układzie stosunek powietrze-gaz nie zmienia się. Natomiast jest możliwość sterowania wielkością dawki mieszanki przy zmiennych warunkach pracy sprężarki.

2. Badania silnika o ZS zasilanego ON + CNG

W Katedrze Mechatroniki UWM w Olsztynie prowadzone są badania nad zasilaniem silnika 1.9 TDI z elektronicznym układem sterowania EDC i rozdzielaczową pompą wtryskową VE w układzie dwupaliwowym, sprężonym gazem ziemnym i dawką inicjującą oleju napędowego (CNG+ON).

Badania wykonano na stanowisku hamownianym AVL 230 kW z systemem „Puma Open”. Przy modernizacji silnika kierowano się zasadą najmniejszej ingerencji w oryginalne wyposażenie układu zasilania i wyposażenie silnika. Modernizacja obejmowała adaptację oryginalnego układu zasilania paliwem poprzez zmianę sposobu sterowania pompą wtryskową umożliwiającą zmianę wielkości dawki paliwa, kąta i czasu wtrysku w układzie dwupaliwowym. Silnik wyposażono również w dodatkowy układ zasilania i sterowania paliwem gazowym. W skład układu wchodził zbiornik ze sprężonym CNG, zawór główny, elektrozawory odcinające paliwo, dwuzeregowy reduktor i wtryskiwacz gazu do kolektora dolotowego przed sprężarką, układ pomiarowy do określania wielkości zadanej dawki paliwa.



Rys. 1. Schemat układu zasilania i sterowania CNG i ON w badanym silniku. 1 - filtr powietrza, 2 - zespół doładowania z chłodzeniem, 3 - zewnętrzny układ regulacji zasilania ON, 4 - zewnętrzny układ regulacji zasilania CNG, 5 - układ recyrkulacji spalin, 6 - przepustnica ładunku, 7 - cylinder silnika, 8 - wtryskiwacz gazu, 9 - kanał wtrysku gazu

Fig. 1. Scheme of feeding and steering CNG and ON system in tested engine. 1 - air filter, 2 - turbocharger with intercooler, 3 - external regulation ON feeding system, 4 - external regulation CNG feeding system, 5 - exhaust gas recirculation system, 6 - throttle, 7 - engine cylinder, 8 - CNG injector, 9 - CNG injection inlet

Sterowanie układem zasilania gazu jest obsługiwane przez zewnętrzny układ sterujący, którym w sposób płynny można zadawać dawkę gazu uwzględniając parametry pracy silnika. Metan podawany jest do kolektora dolotowego przed sprężarką. Badania prowadzone są przy wykorzystaniu dwóch niezależnych układów regulacyjnych - pompą wtryskową typu VE wtryskującą ON i układ doprowadzenia metanu. Celem badań jest opracowanie algorytmów i układu sterowania który będzie kompleksowo obsługiwał elektronicznie sterownie układów zasilania CNG i ON w systemie dwupaliwowym. Stanowisko badawcze wyposażone jest w: system analizy spalin AMA I60 oraz system automatyzacji akwizycji wyników pomiarów PUMA Open wraz z kontrolerami większości urządzeń. W hamowni zainstalowano część mechaniczną stanowiska (hamulec wraz z badanym obiektem) wraz z niezbędnymi instalacjami (paliwowa, gazowa, przeciwpożarowa, chłodzenie) i osprzętem:

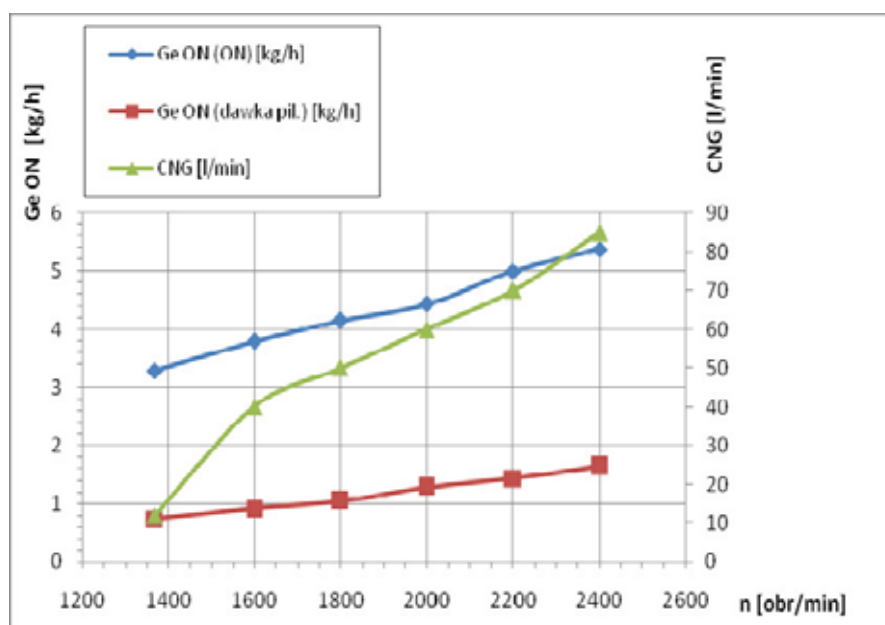
- system sterownia prędkością obrotową silnika THA100,
- układ pomiaru zużycia paliwa w postaci wagi paliwowej AVL 735S,
- układ pomiaru przepływu powietrza (przepływomierz, filtr, tor pomiarowy),
- układ próbkowania spalin (Smart Sampler),
- układ do pomiaru cząstek stałych,

- opacymetr do pomiaru zadymienia spalin.



Rys. 2. Wygląd stanowiska z widocznym hamulcem i badanym obiektem
Fig. 2. Stand appearance with visible break and tested object

W ramach badań przeprowadzono testy silnika zarówno przy zasilaniu tradycyjnym (olej napędowy, jak i dwupaliwowym (dawka pilotująca oleju napędowego + metan). W przypadku zasilania dwupaliwowego dobierano wielkość dawki pilotującej w ten sposób, aby zapewnić równomierną pracę silnika na biegu jałowym, przy prędkości 1300 obr/min, bez udziału metanu. Sterownik hamulca utrzymywał zadaną prędkość obrotową silnika, co przy zwiększaniu dawki gazu powodowało wzrost obciążenia. Dla tak wykonywanych pomiarów rejestrowano zużycie ON, metan, moc i moment obrotowy w badanych zakresach. Wybrane wyniki zaprezentowano na Rys. 3-5.

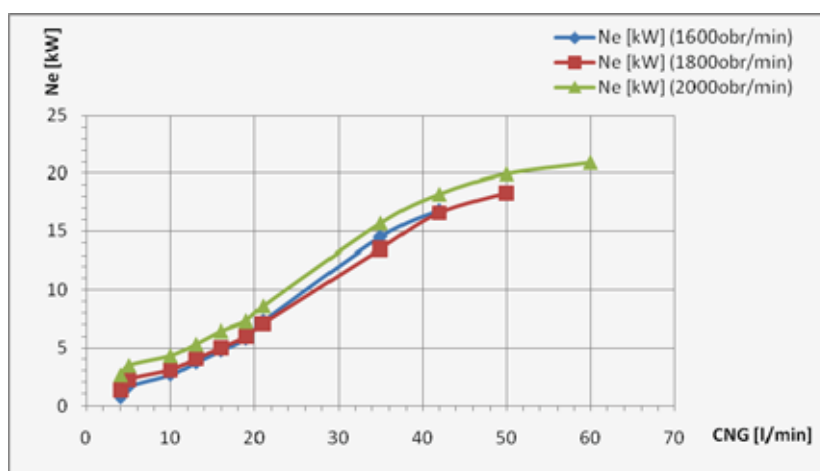


Rys. 3. Zużycie oleju napędowego przy zasilaniu jednopaliwowym oraz zużycie oleju napędowego (dawka pilotująca) i CNG przy zasilaniu dwupaliwowym. Wykres sporządzony dla maksymalnych wartości obciążenia

Fig. 3. DF consumption with single fuel and DF, consumption by piloting dose and CNG for dual fuel feeding. Graph made for maximum load

Z przeprowadzonych badań wynika, że przy zasilaniu jedno i dwupaliwowym

w przedstawionej konfiguracji silnik zasilany gazem jest w stanie osiągnąć wyższą moc niż w przypadku zasilania tylko i wyłącznie olejem napędowym. Przy zasilaniu olejem napędowym zwiększanie dawki, od pewnego punktu, nie prowadziło do wzrostu mocy silnika. W przypadku zasilania dwupaliwowego zwiększanie ilości gazu od pewnego punktu powodowało spadek mocy silnika. Zachowanie takie najprawdopodobniej wynika z samej koncepcji układu zasilania CNG. Przy danej prędkości obrotowej ilość pobieranego powietrza zależy od ilości dostarczanego gazu. Przy zbyt dużych dawkach metanu ilość powietrza staje się prawdopodobnie niewystarczająca do spalania gazu, co owocuje spadkiem mocy. Przy wyższych prędkościach obrotowych (począwszy od 2000 obr/min) zwiększanie ilości gazu ponad granice maksymalnych osiągnięć powodowało jednocześnie spadek równomierności pracy silnika i drastyczny wzrost temperatury cieczy chłodzącej, którego chłodnica nie była w stanie skompensować. Pojawia się także spalanie stukowe przy wysokich dawkach metanu, dużych prędkościach obrotowych i dużych obciążeniach.



Rys. 4. Zużycie CNG w funkcji Ne dla różnych prędkości obrotowych, przy stałej dawce pilotującej ON
 Fig. 4. CNG consumption to Ne function for different RPM by still ON piloting dose

Przeprowadzone badania wpływu zmiany kąta wyprzedzenia wtrysku (Rys. 5) sugerują, że tego niekorzystnego zjawiska można uniknąć poprzez odpowiednio regulując kąt wyprzedzenia wtrysku dawki pilotującej. Zmieniając wspomniany parametr można wyraźnie zwiększyć maksymalną moc silnika przy danej prędkości obrotowej, w stosunku do konfiguracji, w której parametr ten nie był regulowany.

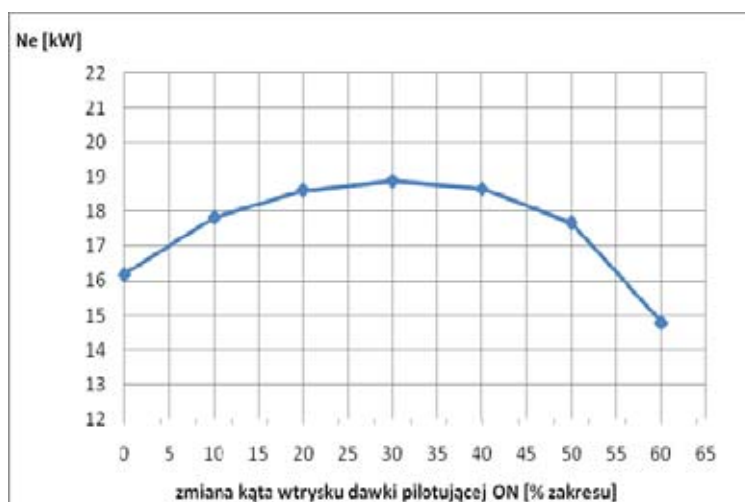
Badania porównawcze zużycia gazu i oleju napędowego w przypadku zasilania jedno i dwupaliwowego (Rys. 3) prowadzi do wniosku, że przy pracy dwupaliwowej zużycie oleju napędowego nie przekracza 30% zużycia przy zasilaniu tradycyjnym. Zużycie gazu natomiast nie przekroczyło przy maksymalnych obciążeniach i maksymalnej prędkości (w zakresie badanych wartości) wartości $1 \text{ m}^3/\text{h}$. Daje to wyraźne korzyści ekonomiczne przy stosowaniu zasilania dwupaliwowego.

Z Rys. 4 wynika ponadto, że zużycie gazu w zastosowanej instalacji zależy w bardzo niewielkim stopniu od prędkości obrotowej, a głównie od obciążenia silnika.

3. Podsumowanie

Badania były prowadzone przy dawce pilotującej zmienianej w bardzo wąskim zakresie, a realizacja zmiany obciążenia odbywała się głównie przez zmianę ilości doprowadzonego metanu. Na występujące zjawisko spalania stukowego reagowano zmianą wielkości dawki pilotującej i zmianą kąta wyprzedzenia wtrysku. W czasie badań uzyskano charakterystyki na podstawie których można określić zużycie ON, CNG, moc i moment w badanych zakresach, przy

zasilaniu dwupaliwowym oraz wpływ kąta wyprzedzenia wtrysku na charakter pracy silnika.



Rys. 5. Wpływ zmiany kąta wyprzedzenia wtrysku na moc efektywną osiąganą przez silnik, dla 1800 obr/min, stałej dawce pilotującej i stałym zużyciu gazu 95 l/min

Fig. 5. Influence of injection angle change to effective power achieved by engine to 1800 RPM, still ON piloting dose and still CNG consumption 95 l/min

Na podstawie przeprowadzonych badań można stwierdzić, że w przypadku opracowania kompleksowego systemu sterowania układem zasilającym w układzie dwupaliwowym należy uwzględnić:

- wielkość dawki pilotującej;
- kąt wtrysku dawki pilotującej;
- wielkość dawki głównej metanu;
- stosunek dawki głównej do dawki pilotującej;
- wpływ wielkości i czasu wtrysku dawki pilotującej na przebieg spalania;
- współczynniki nadmiaru powietrza dla metanu i ON;
- recyrkulację spalin;
- dławienie powietrza w układzie dolotowym.

Niezależnie od powyższych parametrów, zastosowanie nawet najprostszej instalacji dwupaliwowej daje wyraźne korzyści ekonomiczne, przy bilansie zużycia obydwu paliw. Ważnym czynnikiem przemawiającym za stosowaniem układów opartych na zaprezentowanej koncepcji jest możliwość pracy zarówno w układzie dwupaliwowym jak i przy zasilaniu samym olejem napędowym. Przy czym zmiana może odbywać się w sposób płynny odpowiednio dostosowując proporcje obydwu paliw, w zależności od wymagań i trybu pracy (rozruch, grzanie silnika, przyspieszanie, praca w stanie ustalonym, schładzanie).

Oczywiste jest, że działanie współczesnego silnika musi być zoptymalizowane nie tylko pod kątem uzyskiwanej mocy w przełożeniu na wydatek ekonomiczny, ale także pod kątem emisji toksycznych składników spalin, celem spełnienia współczesnych norm europejskich w tym zakresie.

Literatura

- [1] Kowalewicz, A., *Adaptacja silnika wysokoprężnego do zasilania gazem naturalnym*, Czasopismo Techniczne, Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej, Z. 7-M, 2008.
- [2] Luft, S., Kozioł, S., *Wybrane wyniki badań dwupaliwowego silnika o ZS zasilanego głównie paliwem LPG*, Journal of Internal Combustion Engines KONES, Vol. 10, Nr 1-2, 2003.
- [3] Mbrawa, M., Milton, B. E., Casy, R. T., Miao, H., *Fuel Injection Characteristics of Diesel-*

- Stimulated natural gas combustion*, Int. J. Energy Res. 23, 1359}1371, 1999.
- [4] Cieślowski, B., Knapik, P., *Adaptacja konstrukcyjna silnika rolniczego C-385 do zasilania CNG*, Inżynieria Rolnicza, Nr 9(97), 2007.
- [5] Lejda, K., Jaworski, A., *Zasilanie gazowe silników rolniczych*, MOTROL, Nr 8, s. 131-138, 2006.
- [6] Bosch, R., *Sterowanie silników o zapłonie samoczynnym GmbH*, tłumaczenie Antoni Szulborski, 2002.
- [7] Luft, S., *Dwupaliwowy silnik o zapłonie samoczynnym z wtryskiem ciekłego LPG do kolektora dolotowego*, Wyd. Politechniki Radomskiej, 2007.
- [8] Poonia, M. P., Ramesh, A., Gaur, R. R., *Effect of intake Air Temperature and Pilot Fuel Quantity on the Combustion Characteristics of a LPG Diesel Dual Fuel Engine*, SAE Paper 982455, 1988.
- [9] Seo, A., Amano, T., Hase, K., *Study on the Ignition Mechanism of Natural Gas*, Energy Technology Research Institute, Annual Technical Report Digest, Vol. 8, 1998.