

Combustion of natural gas mixed with air in spark ignition engine

Abstract: The taken subject matter is aimed to show all fundamental changes in the combustion process of air – natural gas mixture in comparison to air – gasoline mixture combustion in the engine. Air – CNG mixture creates worse conditions for spark flashover due to higher resistance than air – gasoline mixture.

Key words: ignition discharge, ignition voltage

Spalanie mieszanki gazu ziemnego z powietrzem w silniku o zapłonie iskrowym

Streszczenie: Podjęta tematyka ma na celu pokazanie wszystkich istotnych zmian w procesie spalania powietrza i gazu ziemnego w porównaniu do spalania mieszanki powietrza i benzyny w silniku. Mieszanka powietrza z CNG stwarza gorsze warunki do przeskoków iskry, z powodu większej oporności niż mieszanka powietrza z benzyną.

Słowa kluczowe: wyładowanie zapłonowe, napięcie zapłonu

Coraz częściej stosowane gazy CNG i LNG do napędu samochodów użytkowych to już powoli codzienność, koszt użytkowania takiego pojazdu jest znacznie niższy w porównaniu z silnikiem benzynowym czy nawet nowoczesnym dieslem.

Gaz ziemny jest naturalną mieszaniną węglowodorów powstałą w ciągu milionów lat z rozkładu materii organicznej, takiej jak drzewa i zwierzęta. Zgromadzony jest on typowo pod ziemią w zbiornikach - kieszeniach gazowych lub uwięziony w podłożu, takim jak piasek lub ropa naftowa i jest ekstrahowany bądź jako produkt uboczny ekstrakcji ropy naftowej lub odrębnie jako gaz surowy.

Głównym składnikiem gazu ziemnego jest metan, który zazwyczaj stanowi ponad 90% gazu przesyłanego rurociągiem. Inne węglowodory występujące w niewielkich ilościach w gazie ziemnym, to etan, propan i butan.

CNG (ang. Compressed Natural Gas) oznacza *sprężony gaz ziemny*; termin używany jest do metanu lub gazu ziemnego sprężonego do podwyższonego ciśnienia (typowo 250 bar). Gaz ziemny pozostaje w stanie gazowym przez cały okres procesu sprężania.

W celu zmaksymalizowania ilości gazu przechowywanego w danej objętości (powiedzmy zbiorniku paliwa) gaz jest sprężany do bardzo wysokich ciśnień i przechowywany w specjalnych butlach.

1. Zalety stosowania gazu ziemnego do zasilania silników spalinowych

Jedną z zalet paliw gazowych jest ich wysoka liczba oktanowa. Wartość liczby oktanowej wszystkich węglowodorów z rodziny parafin zawsze przewyższa 100. Pozwala to stosować wyższe stopnie sprężania i tym samym uzyskiwać wyższą moc silnika. Takie właściwości nie są jednak w praktyce w pełni wykorzystywane przez silniki zasilane benzyną

(pełne wykorzystanie nastąpiłoby, gdyby stopień sprężania był wyższy a układ dolotowy specjalnie zaprojektowany – jednak wtedy nie byłoby możliwości zasilania tych silników benzyną). Znaczy to, że w praktyce rezygnuje się z pełnych zalet zasilania gazowego, by umożliwić zasilanie silnika również benzyną. Nie dzieje się tak jednak bez strat mocy silnika benzynowego zasilanego paliwem gazowym.

Efektywniejszy proces spalania paliw gazowych spowodowany jest tym, że:

- paliwa gazowe szybko ulegają całkowitemu wymieszaniu z powietrzem, dając w konsekwencji mieszanki bardziej jednorodnej i zapewniając tym samym bardziej równomierny rozdział mieszanki paliwowo-powietrznej na poszczególne cylindry (dzięki temu praca silnika jest spokojniejsza, co minimalizuje hałas),
- spalanie paliw gazowych jest całkowite – bez strat na wylocie, dymu i sadzy, osadów węglowych w komorze spalania,
- w przypadku zasilania paliwami gazowymi, nie następuje kondensacja paliwa ciekłego na ściankach cylindra, w połączeniu z brakiem osadów węglowych powoduje to mniejsze zanieczyszczenie oleju silnikowego (dzięki temu olej zachowuje dłużej właściwości smarujące, zapewniając trwałość silnika większą niż kiedy silnik pracuje na benzynie

Przyczyną spadku mocy silnika zasilanego paliwem gazowym może być natomiast niższa wartość opałowa mieszanek gazowo-powietrznych oraz niższy stopień napełniania cylindrów, cylindrów także zbyt późny zapłon.

Możliwe jest jednak zoptymalizowanie nastaw regulacyjnych silnika na paliwie gazowym (pod warunkiem pracy tylko na tym paliwie) przez:

- wyłączenie podgrzewania kolektora ssącego,
- przeregulowanie termostatu, aby silnik pracował przy temperaturze 10-15 st. C niższej niż na benzynie
- zmniejszenie odstępu elektrod świec zapłonowych,
- zastosowanie wyższych napięć zapłonowych,
- przyspieszenie zapłonu,
- dostosowanie wydajności układu dolotowego do rodzaju paliwa gazowego.

Poprawną pracę na obu paliwach (w przypadku silników pracujących alternatywnie na benzynie i paliwie gazowym) uzyskuje się poprzez zachowanie danych regulacyjnych dla paliwa płynnego. Układy zasilania działające na zasadzie wtrysku paliwa (analogicznie do wtrysku benzyny) pozwalają zoptymalizować dawkę, moment wtrysku oraz zapłonu, wykorzystując w pełni zalety paliwa gazowego.

Korzyści jakie niesie z sobą stosowanie do napędu pojazdów gazu ziemnego w postaci gazowej CNG lub ciekłej LNG niesie ze sobą pewne różnice w pracy silnika, a zatem konieczne jest stosowanie specjalnych olejów silnikowych w celu prawidłowej i długotrwałej eksploatacji silników.

Napędzanie pojazdów gazem ziemnym może zmniejszyć lub wyeliminować:

- emisje ołowiu i tlenku węgla z silników benzynowych
- emisje zanieczyszczeń stałych z silników wysokoprężnych
- poziomy hałasu silników wysokoprężnych

Stosowanie gazu ziemnego powoduje znaczne redukcje stężeń szkodliwych składników w spalinach w odniesieniu do paliw tradycyjnych tj. benzyny i oleju napędowego takie jak:

- dwutlenek węgla – redukcja o 22-24% w porównaniu ze stosowaniem benzyny, 10% w porównaniu z olejem napędowym,
- tlenki azotu – redukcja o 83% w porównaniu z benzyną, 80% w porównaniu z olejem napędowym,
- węglowodory – redukcja o 88% w porównaniu z benzyną, 80% w porównaniu z olejem napędowym,
- benzen – redukcja o 99% w porównaniu z benzyną, 97% w porównaniu z olejem napędowym,
- ołów – redukcja o 100% w porównaniu z benzyną,
- siarka – prawie 100% redukcja w porównaniu z benzyną i olejem napędowym.

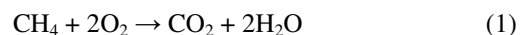
Niektóre właściwości gazu ziemnego mają bezpośredni wpływ na pracę silnika:

- mała wrażliwość na spalanie stukowe dzięki wysokiej liczbie oktanowej,
- łatwość mieszania się z powietrzem (zwłaszcza przy zimnym silniku), pozwalająca uzyskać jednorodną mieszanekę palną,

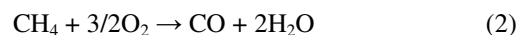
- wysoka prędkość spalania umożliwiająca stosowanie w silnikach szybkoobrotowych,
- wartość opałowia zbliżona do mieszanek benzynowo - powietrznej, co w praktyce oznacza zachowanie osiągnięć silnika,
- temperatura samozapłonu umożliwiająca stosowanie CNG i biogazu do jednostek wysokoprężnych,
- możliwość spalania ubogich mieszanek dzięki szerokim granicom zapłonu,
- niski poziom emisji cząstek stałych (brak dymienia), CO₂, bardzo niska zawartość związków siarki i ołowiu oraz przeważnie mniejsza masa spalin.

2. Zapłon mieszanek gazu ziemnego z powietrzem

Gaz ziemny spala się wolniej niż benzyna lub olej napędowy, co zmniejsza zużycie i zwiększa trwałość silnika. Przy wystarczającym dostępie powietrza metan spala się całkowicie, co można zapisać równaniem reakcji (1):



Przy ograniczonym dostępie powietrza spalanie przebiega inaczej, produktami reakcji mogą być wówczas tlenek węgla (2) lub sadza (3):



Samochody zasilane gazem są bardziej narażone na wszelkie nieprawidłowości występujące w działaniu układu zapłonowego. Niezawodny zapłon to: cewka zapłonowa, przewody zapłonowe i świeca. Dlatego tak wiele zależy od właściwego doboru tych elementów.

Do wytworzenia iskry zdolnej do zapłonu mieszanek gazowej potrzeba nieco więcej energii niż do zapłonu benzyny. Ponieważ jednak każdy układ zapłonowy projektowany jest z dużym zapasem, a różnica w jego obciążeniu podczas pracy na gazie bywa niewielka, znosi on nowe warunki bez problemu. Większy kłopot wiąże się z przesyłaniem prądu, za co odpowiedzialne są przewody zapłonowe: wyeksploatowane "zabierają" nawet 50% energii. Dlatego w autach ze zużytym układem zapłonowym może być korzystne zmniejszenie odległości elektrod (nie więcej niż 10-15%). W sytuacji, gdy napięcie dostarczane do świecy jest zbyt niskie, ułatwia to przeskoczenie iskry. Staje się ona jednak

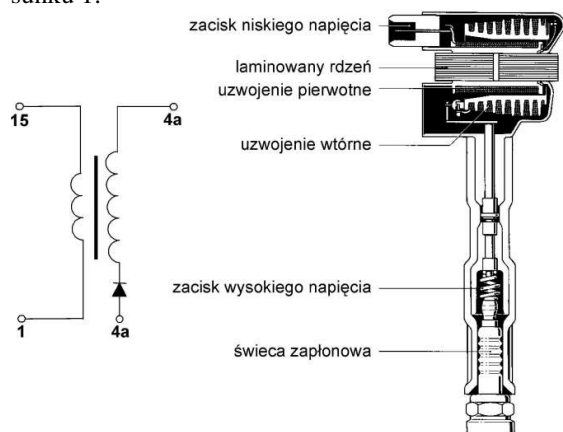
mniejsza i bardziej skupiona, przez co przy wysokich obrotach osiągi mogą się pogarszać.

Drugi problem to podwyższona temperatura spalania podczas zasilania gazem. Teoretycznie wymaga to zastosowania świec o innej ciepłocie, czyli zdolności do pracy w innym zakresie temperatur.

Silnikowi wystarcza do normalnej pracy aparat zapłonowy z rozdzielaczem i cewką. Ale jeśli oddzielna cewka zapłonowa znajduje się nad każdym cylindrem, moment zapłonu może być precyzyjniej określony i znika niebezpieczeństwo "ucieczki" prądu wysokiego napięcia

Pojedyncza cewka zapłonowa dla czterech lub więcej cylindrów bardzo szybko osiąga stan, w którym prawidłowe wypełnianie zadań przekracza jej możliwości. Zbyt krótki robi się czas pomiędzy poszczególnymi impulsami, by wygenerować prąd o wystarczająco wysokim napięciu. Stąd to, co kiedyś było zarezerwowane tylko dla silników wyczynowych - jedna cewka zapłonowa na każdy cylinder - stało się dziś standardem. Takie pojedyncze cewki umieszczone są albo bezpośrednio nad świecą albo oddzielnie, w pobliżu silnika, połączone kablami wysokiego napięcia ze swymi świecami. Oczywiście, pojedyncze cewki także muszą "wiedzieć", kiedy nadchodzi czas na wygenerowanie impulsu zapłonowego. Obliczenia te oparte są na informacjach, jakie moduł otrzymuje od kilku sensorów, przekazujących mu dane o pracy silnika i życzeniach kierowcy (ustawienie pedału gazu). W ten sposób ustalany jest optymalny moment zapłonu mieszanki.

Budowę cewki pojedynczej przedstawiono na rysunku 1.



Rys.1. Schemat elektryczny i przekrój cewki pojedynczej firmy Bosch

Figure 1. Electrical scheme and cross section of induction coil Bosch company

Stosowana jest w układach zapłonowych, w których każdemu cylindrowi przyporządkowana jest indywidualna cewka zapłonowa wraz z końcówką mocy sterowaną przez sterownik. Wszystkie cewki zespolone są zwykle w jednej wspólnej kasie umieszczonej bezpośrednio nad świecami zapłonowymi w głowicy silnika.

Z uwagi na brak przewodów wysokiego napięcia cewki te mogą posiadać szczególnie małe wymiary (średnica pojedynczej cewki zespolonej 22 – 29mm) przy jednoczesnym generowaniu w uzwojeniu wtórnym maksymalnego napięcia, które może dochodzić do 45 kV. Duża energia iskry osiągnięta jest praktycznie w całym zakresie prędkości obrotowych silnika. Ze względu na niebezpieczeństwo przeskoaku iskry podczas zamykania obwodu pierwotnego (generowane wówczas napięcie osiąga wartość: 1-3 kV) okazało się koniecznym zastosowanie diody w obwodzie wtórnym cewki zapłonowej. Umożliwia ona przepływ prądu tylko przy napięciu powstającym w chwili przerywania obwodu pierwotnego.

Parametry cewki:

- energia 35 – 80mJ
- napięcie między elektrodami świecy do 45kV
- prąd uzwojenia pierwotnego do 15A
- rezystancja uzwojenia pierwotnego poniżej 1Ω

3. Pojazdy zasilane gazem ziemnym

Paliwem alternatywnym dla pojazdów NGV (ang. Natural Gas Vehicles) jest sprężony gaz ziemny (CNG) lub rzadziej, skroplony (LNG). Obecnie istnieją trzy rozwiązania techniczne układów zasilania silników pojazdów gazem ziemnym:

- pojazdy jednopaliwowe – mono-fuel dedykowane tylko do gazu ziemnego,
- pojazdy dwupaliwowe – bi-fuel (CNG/ benzyna),
- pojazdy dwupaliwowe dual fuel (CNG + ON)

Pojazdy jednopaliwowe napędzane są tylko gazem ziemnym. Obecnie już firmy motoryzacyjne produkują samochody przystosowane do zasilania gazem ziemnym (Honda, Fiat, VW, Opel) Pojazdy na paliwo podwójne napędzane są gazem CNG, ale zachowują zdolność do użycia benzyny jako paliwa rezerwowego. Silnik może być zasilany jednym lub drugim paliwem, ale nie jednocześnie obydwoimi paliwami.

Silniki na paliwo dualne pochodzą od silników wysokoprężnych. Niewielka ilość oleju napędowego stanowi źródło pilotujące zapłon. Podstawowe paliwo – gaz ziemny mieszany jest z napływającym powietrzem. Zapłon w silnikach dualnych następuje samoczynnie przez sprężanie i nie wymagają one świec zapłonowych.

Silniki zasilane gazem pracujące według obiegu Otto - podobnie jak konwencjonalne silniki zasilane benzyną wykorzystują do zapłonu mieszanki gazowo-powietrznej wyładowanie elektryczne pomiędzy elektrodami świecy zapłonowej. Mieszanka palna jest tworzona zazwyczaj poza cylindrem silnika lub w cylindrze w trakcie procesu dołotu.

Z uwagi na właściwości gazu ziemnego, zwłaszcza dużą wartość energii aktywacji zapłonu, układy zapłonowe tych silników charakteryzują się wysoką energią wyładowania (napięcie fazy przebiecia wy-

ładowania elektrycznego na elektrodach świecy zapłonowej ma wartość min. 30 kV). Ze względu na dużą odporność na spalanie stukowe gazu ziemnego, wolnossące silniki ZI zasilane gazem ziemnym mają stopień sprężania $\varepsilon=11-13$.

Silniki zasilane gazem ziemnym o zapłonie iskrowym można ze względu na sposób tworzenia mieszaniny palnej podzielić na dwie grupy: silniki o tworzeniu mieszaniny palnej poza cylindrem i silniki z bezpośrednim wtryskiem paliwa do cylindra. Obecnie najbardziej rozpowszechnione są silniki ZI zasilane gazem ziemnym z tworzeniem mieszaniny palnej poza cylindrem. Wśród tej grupy silników można wyróżnić dwa typy:

- silniki zasilane mieszankami stechiometrycznymi,
- silniki zasilane mieszankami ubogimi.

Silniki zasilane mieszankami stechiometrycznymi ($\lambda=1,000\pm 0,003$), ang. SNGE – (stoichiometric natural gas engines), charakteryzują się większą emisją tlenków azotu NO_x , które są redukowane w utleniająco-redukującym reaktorze katalitycznym. Wymaga to stosowania układu regulacji składu mieszanki paliwowo-powietrznej, który utrzymuje stałą wartość współczynnika nadmiaru powietrza w całym zakresie obciążeń i prędkości obrotowej silnika. W tym celu w układzie wylotowym silnika znajduje się sonda lambda, która na podstawie zawartości tlenu w spalinach informuje sterownik silnika o aktualnym składzie mieszanki paliwowo-powietrznej. Spalanie mieszanek stechiometrycznych pozwala najefektywniej wykorzystywać pojemność skokową silnika.

Silniki zasilane mieszankami ubogimi, ang. LBNGE – (lean-bur natural gas engines), z uwagi na szerokie granice zapalności gazu ziemnego, mogą pracować przy wartości współczynnika nadmiaru powietrza $\lambda=1,4-1,7$ bez konieczności stosowania uwarstwienia ładunku. Zastosowanie uwarstwienia pozwala na jeszcze większe rozszerzenie zakresu zapalności ładunku. Proces spalania ubogich mieszanek gazu ziemnego i powietrza odbywa się ze znacznie niższymi temperaturami. Pozwala to znacznie ograniczyć emisję tlenków azotu bez konieczności stosowania kosztownych utleniająco-redukujących reaktorów katalitycznych.

Ponieważ mieszanki ubogie charakteryzują się mniejszą skłonnością do spalania stukowego, dlatego silniki zasilane mieszankami $\lambda=1,4-1,7$ mają zazwyczaj wysoki stopień sprężania ($\varepsilon=11-15$, zależnie średnicy cylindra i ciśnienia doładowania), wysokoenergetyczny układ zapłonowy i komorę spalania o dużym zawirowaniu ładunku, co pozwala na znaczne skrócenie czasu propagacji płomienia do skrajnych części komory spalania. Silniki te mają zazwyczaj wysoki stopień doładowania i chłodzenie ładunku cylindra.

Mieszalnikowy układ zasilania silnika spalającego gaz ziemny wykorzystuje zazwyczaj klasyczną zwężkę Venturiego, która pozwala uzyskać

w ładunku cylindra stały stosunek objętości paliwa do powietrza. Jest to najprostszy układ zasilania gazem silników ZI, który ze względu na trudności w spełnieniu obowiązujących obecnie norm czystości spalin został zastąpiony przez elektronicznie sterowany układ wtryskowy. W celu zapewnienia warunków współpracy utleniająco-redukującego reaktora katalitycznego z silnikiem zasilanym gazem ziemnym z mieszalnikowym układem zasilania, stosowane są rozwiązania polegające na sterowaniu ilością doprowadzanego do mieszalnika paliwa gazowego za pomocą zaworu otwieranego silnikiem krokowym. Silnik ten jest uruchamiany ze sterownika na podstawie sygnału z sondy lambda. Pozwala to na utrzymywanie składu mieszanki w założonym przedziale i zapewnienie wysokiej sprawności redukcji toksycznych składników spalin w reaktorze katalitycznym. Należy podkreślić, że mieszalnikowy układ zasilania paliwem gazowym jest kłopotliwy w jednostkach turbodoładowanych, ponieważ ze względu na nadciśnienie panujące między turbosprężarką a kolektorem dolotowym, tradycyjny, podciśnieniowy mieszalnik, musi być umieszczony przed turbosprężarką. Powoduje to, że w turbosprężarce jest sprężana palna mieszanka gazowo-powietrzna. Rozwiązaniem dla turbodoładowanych silników zasilanych gazem ziemnym] z mieszalnikowym układem zasilania są specjalne mieszalniki nadciśnieniowe, które wytwarzają mieszankę palną pomimo nadciśnienia panującego w układzie dolotowym.

Układ wielopunktowego wtrysku gazu do kolektora dolotowego silnika zasilanego gazem jest obecnie najbardziej popularnym typem układu zasilania gazem silników o zapłonie iskrowym. W układzie zasilania tych silników do regulacji dawkowania paliwa wykorzystywane są elektromagnetycznie otwierane wtryskiwacze o ciśnieniu zasilania 3-9 bara. Stosowane są dwa rodzaje wtryskiwaczy. Wtryskiwacze pierwszej grupy mają konstrukcję dokładnie taką samą jak w układach zasilania benzyną. Jediną różnicą są materiały gniazda i iglicy wtryskiwacza. W układach zasilania gazem ziemnym stosuje się specjalne tworzywa sztuczne na iglicę i gniazdo iglicy.

Zapobiega to szybkiemu zużyciu wtryskiwacza, gdyż brak tłumiącego oddziaływania ciekłego paliwa np. benzyny, powodowałoby twarde osiadanie iglicy na gnieździe i szybkie zużycie współpracujących elementów. Wtryskiwacze drugiej grupy zostały opracowane specjalnie do gazu ziemnego. Dzięki obwodowemu przepływowi paliwa wokół iglicy można uzyskiwać duże natężenie przepływu przy niewielkich rozmiarach wtryskiwacza oraz precyzyjne dawkowanie paliwa. Jest to bardzo istotne w dużych silnikach, gdyż mała gęstość gazu ziemnego uniemożliwiałaby realizację wielopunktowego wtrysku sekwencyjnego. Wtryskiwacze w tym układzie zasilania są osadzone w kolektorze dolotowym, tuż przy głowicy i zasilane ze wspólnej

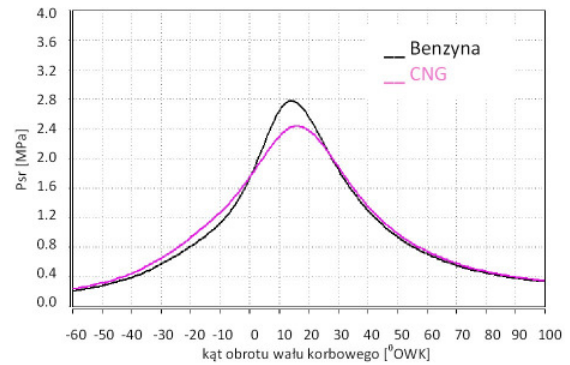
listwy, w której zainstalowane są czujniki ciśnienia i temperatury paliwa gazowego, w celu ustalenia rzeczywistej dawki paliwa.

Układ jednopunktowego wtrysku gazu do kolektora dolotowego silnika zasilanego gazem jest prostszym rozwiązaniem niż układ wtrysku wielopunktowego. Układ wtryskowy w tym przypadku jest wykonany w postaci bloku, w którym zgrupowanych jest kilka wtryskiwaczy.

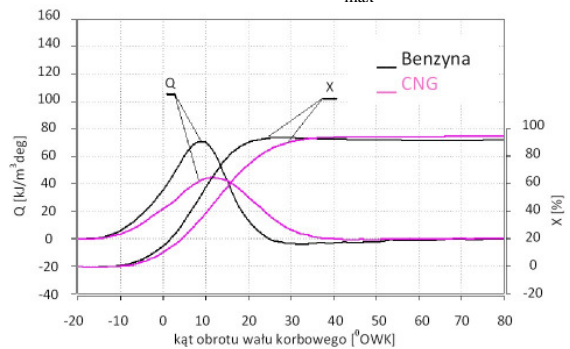
Najczęściej liczba wtryskiwaczy w bloku wtryskowym jest większa niż liczba cylindrów silnika. Mają one różne wydajności w celu zapewnienia prawidłowego dawkowania zarówno przy małych i dużych obciążeniach silnika. Rozwiązanie to jest popularne w dużych silnikach ($V_{ss} > 9 \text{ dm}^3$), gdyż z uwagi na trudności w dawkowaniu paliwa przez jeden wtryskiwacz, konieczne jest zastosowanie więcej niż jeden wtryskiwacz na cylinder silnika. Trudność ta wynika z tego, że mała gęstość gazu ziemnego wymaga stosowania wtryskiwacza o wysokiej wydajności, tak aby czas trwania wtrysku paliwa był odpowiednio krótki (krótszy niż czas trwania procesu dolotu). W silniku wolnossącym blok wtryskowy usytuowany jest przed przepustnicą, natomiast w silnikach turbodoładowanych spotyka się dwa rozwiązania: blok usytuowany między turbosprężarką a przepustnicą np. silniki MAN lub przed turbosprężarką np. silniki Volvo. W tym drugim rozwiązaniu w turbosprężarce sprężana jest palna mieszanka paliwowo-powietrzna.

Jednym z najistotniejszych szybkozmiennych parametrów pracy silnika jest przebieg ciśnienia w komorze spalania. Dzięki niemu możemy zaobserwować procesy, które zachodzą wewnątrz cylindra silnika, a na które ma wpływ między innymi rodzaj paliwa. W oparciu o te informacje możemy wyznaczyć przebiegi temperatury oraz wywiązywania się ciepła w czasie procesu spalania.

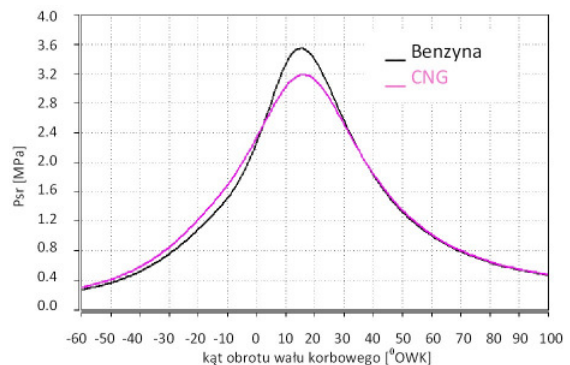
W ramach badań założonych w projekcie wyznaczono uśrednione przebiegi ciśnień w komorze spalania silnika zasilanego benzyną oraz porównawczo CNG. Badania realizowano na silniku o ZI wyposażonym w świece zapłonowe zaprojektowane i wykonane we współpracy z Iskra sp z o.o. Kielce dla spalania gazu ziemnego. W oparciu o te dane wyznaczono charakterystyki wydzielającego się ciepła w komorze spalania Q oraz współczynnika wydzielającego się ciepła X . Przykładowe wyniki rejestracji ciśnienia w komorze silnika oraz wydzielającego się ciepła pokazano na rys. 2 – 5.



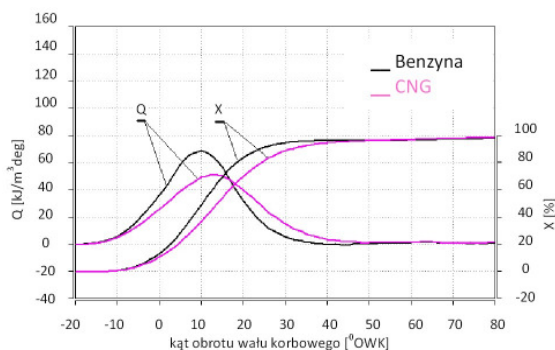
Rys. 2. Przebiegi ciśnienia czynnika roboczego w komorze spalania dla prędkości obrotowej wału korbowego $n=1500 \text{ obr/min}$ i obciążeniu $25\% M_{\max}$
Fig. 2. Run of the working medium pressure in combustion chamber at rotational speed 1500 rpm of crankshaft and a load of $25\% M_{\max}$



Rys. 3. Rzeczywiste przebiegi prędkości wydzielania się ciepła oraz współczynnika wydzielającego się ciepła dla dwóch paliw: benzyny oraz CNG przy $n=1500 \text{ obr/min}$ i obciążeniu $25\% M_{\max}$
Fig. 3. Actual mileage rate of heat release and the coefficient of heat evolved for the two fuels: gasoline and CNG at 1500 rpm and a load of $25\% M_{\max}$



Rys. 4. Przebiegi ciśnienia czynnika roboczego w komorze spalania dla prędkości obrotowej wału korbowego $n=2500 \text{ obr/min}$ i obciążeniu $50\% M_{\max}$
Figure 4. Run of the working medium pressure in combustion chamber at rotational speed 2500 rpm of crankshaft and a load of $50\% M_{\max}$



Rys. 5. Rzeczywiste przebiegi prędkości wydzielania się ciepła oraz współczynnika wydzielającego się ciepła dla dwóch paliw: benzyny oraz CNG przy $n=2500$ obr/min i obciążeniu $50\%M_{max}$

Fig. 5. Actual mileage rate of heat release and the coefficient of heat evolved for the two fuels: gasoline and CNG at 2500 rpm and a load of $50\%M_{max}$

W wyniku analizy badań zaobserwowano, iż maksymalne wartości ciśnień wyznaczone w tych samych warunkach prędkościowo-obciążeniowych pracy silnika są większe od 7% do 35% na korzyść benzyny. Zauważono także, że ze wzrostem obciążenia silnika różnica ciśnień czynnika roboczego między badanymi paliwami zwiększa się. Analogiczną relację odzwierciedla przebieg wywiązywania się ciepła, który wyznaczany był w oparciu o uśrednione ciśnienia czynnika roboczego w komorze spalania.

Podczas zasilania silnika paliwem CNG zaobserwowano także późniejszy zapłon mieszanki paliwowo-powietrznej w porównaniu do benzyny od 1 do 9°OWK (kąt wzrasta wraz z zwiększeniem prędkości obrotowej silnika oraz zmniejszaniem obciążenia). Najistotniejszym rezultatem tych badań jest fakt, że kąt trwania całego procesu spalania dla tych samych warunków prędkościowo-obciążeniowych był dłuższy podczas zasilania silnika paliwem CNG od 6 do 24°OWK. Powoduje to dłuższy czas oddziaływania niekorzystnych warunkach temperaturowych na świecę.

Podsumowanie

Moda na ekologię oraz względy ekonomiczne przyczyniły się do tego, że w komunikacji miejskiej w Polsce wykorzystuje się coraz więcej autobusów zasilanych CNG. Dzięki swojej specyfice silniki CNG są cichsze i przede wszystkim ich spaliny zawierają mniej toksycznych związków niż silniki Diesla. Na świecie jest obecnie około 1,5 miliona pojazdów zasilanych CNG

Przy zastosowaniu paliwa gazowego do napędu silnika samochodowego zalecane i wymagane jest dostosowanie w nim układu zapłonu dla zapewnienia prawidłowej jego pracy, w tym przewodów wysokiego napięcia i świec zapłonowych.

Właściwy dobór świec zapłonowych jest bardzo ważnym czynnikiem zapewniającym prawidłową pracę silnika z zachowaniem czystości spalin i oszczędnego zużycia paliwa. Konstrukcja świecy zapłonowej stosowanej w silniku zasilanym gazem ziemnym ma zapewnić zapłon mieszanki w szerokim zakresie nadmiaru powietrza w cylindrze. Ponadto świeca powinna charakteryzować się:

- wysoką trwałością,
- niezawodnością i skutecznością zapłonu,
- dostępną ceną.

BIBLIOGRAFIA

1. Ambrozik A.: Wybrane zagadnienia procesów cieplnych w tłokowych silnikach spalinowych. Wyd. Politechnika Świętokrzyska, Kielce 2003
2. Baczewski K., Kałdoński T.: „Paliwa do silników o zapłonie iskrowym”, WKŁ 2005
3. Bosch R. GmbH: „Automotive Electric/Electronic Systems”
4. Demidowicz R.: „Zapłon, WKiŁ, Warszawa 1993
5. Merkiś J., Pielecha I. „Alternatywne paliwa i układy napędowe pojazdów”, Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, Poznań 2004r.
6. Rutkowski M., Rutkowski J.: NGV w Polsce. Zeszyt Naukowo -Techniczny Oddziału Krakowskiego SITK nr 60, Kraków 1998, s. 51-62.

www.bosch.pl
www.iskra-kielce.pl
www.ngkntk.pl

Mr Stanisław Kruczyński, DSc., DEng. – Professor in the Faculty of Mechanical Engineering at Warszawa University of Technology.

Dr hab. inż. Stanisław Kruczyński – profesor na Wydziale Mechanicznym Politechniki Warszawskiej

Mr Ryszard Wołoszyn, DEng. – Mechanical Engineering at Radom University of Technology.

Dr inż. Ryszard Wołoszyn – adiunkt na Wydziale Mechanicznym Politechniki Radomskiej

Mr Marek Stępniewski, DEng. – Mechanical Engineering at Radom University of Technology.

Dr inż. Marek Stępniewski – adiunkt na Wydziale Mechanicznym Politechniki Radomskiej