

Marek BRZEŻAŃSKI
Jerzy CISEK
Wojciech MAREK
Tadeusz PAPUGA

PTNSS–2013–SC–192

Investigation of the combustion engine fuelled with hydrogen

Abstract: The results of the investigations of SI engine fuelled with hydrogen have been presented in article. The idea of hydrogen feeding system and the aim and methodology of carried out measurement have been also described. Obtained results have been compared to the results of tests carried out during natural gas feeding of the some engine.

Keywords: hydrogen, SI combustion engine

Badania silnika zasilanego wodorem

Streszczenie: W artykule zaprezentowano wyniki badań silnika o zapłonie iskrowym zasilanego wodorem. Przedstawiono koncepcję systemu zasilania wodorem oraz cel i metodykę przeprowadzonych pomiarów. Uzyskane wyniki porównano do wyników badań prowadzonych podczas zasilania silnika gazem ziemnym.

Słowa kluczowe: wodór, silnik spalinowy o zapłonie iskrowym

1. Wstęp

Poszukiwanie i wykorzystanie nowych paliw do zasilania silników spalinowych jest ważnym celem naukowym i gospodarczym, prowadzącym do racjonalizacji wykorzystania różnych źródeł energii. Niektóre z niekonwencjonalnych paliw nie nadają się z różnych przyczyn do zastosowania w pojazdach trakcyjnych, natomiast mogą być wykorzystane w zastosowaniach energetycznych. Do tego typu paliw zaliczyć można różnego typu substancje palne, będące produktem odpadowym niektórych procesów przemysłowych. Jednym z tego typu paliw jest wodór przemysłowy lub gazy, zawierające jego duży udział. Zwykle tego typu odpadowe paliwa są wykorzystywane co najwyżej do celów grzewczych, lecz często są bezpowrotnie tracone przez wypalanie. Ich zagospodarowanie dla celów małej energetyki wydaje się być racjonalnym rozwiązaniem, tym bardziej, że tego typu system pozwala na elastyczne dopasowanie rodzaju energii do aktualnych potrzeb. Odpowiada to współczesnym tendencjom do dywersyfikacji źródeł energii. Odpowiednio przystosowany, tłokowy silnik spalinowy współpracujący z generatorem prądu może być zarówno źródłem ciepła, jak i źródłem energii elektrycznej.

2. Cel i metodyka badań

Zasadniczym celem badań było określenie przez pomiary i obliczenia wpływu zasilania wodorem na parametry energetyczne i ekologiczne silnika spalinowego.

Konieczne stało się rozpoznanie nowych problemów wynikających ze współpracy silnika z generatorem prądu, a także osiągnięcie w badaniach

możliwie korzystnych wskaźników roboczych silnika. Wszystkie pomiary silnikowe dotyczące parametrów energetycznych i emisji toksycznych składników spalin zrealizowano przy stałej prędkości obrotowej silnika wynoszącej 1500 1/min i zmienianym obciążeniu silnika. Warunki te odpowiadają pracy silnika w agregacie prądotwórczym.

Spośród parametrów regulacyjnych badanego silnika, które musiały zostać dopasowywane do rodzaju badanego paliwa należały przede wszystkim:

- kąt wyprzedzenia zapłonu α_{wz} ,
- współczynnik nadmiaru powietrza λ ,

Oba te parametry mają bardzo istotny wpływ na przebieg procesu spalania w cylindrze silnika, z czego wynika następnie zarówno wartość uzyskiwanych parametrów energetycznych jak i emisji toksycznych składników spalin. Ponadto oddziałują intensywnie na wartość temperatury spalin – wprost poprzez temperaturę spalania oraz pośrednio, ze względu na usytuowanie i długość procesu spalania. W przypadku prowadzonych badań ma to kluczowe znaczenie ze względu na postawione przez producenta silnika kryterium maksymalnej temperatury spalin. W przypadku badanego silnika temperatura spalin nie może przekroczyć wartości 700 °C ze względu na wytrzymałość termiczną turbosprężarki (turbiny), co jest istotne przy ustalaniu maksymalnej mocy silnika zasilanego danym typem paliwa. Dodatkowo, zarówno wartość współczynnika nadmiaru powietrza λ , jak i szczególnie wartość kąta wyprzedzenia zapłonu α_{wz} mają ścisły związek z pojawiającym się zjawiskiem spalania stukowego. Z tego powodu dla badanego paliwa i dla każdego punktu pracy silnika (obciąże-

nia), oba te parametry regulacyjne ustawiane były indywidualnie.

Podsumowując, istniały trzy kryteria doboru wymienionych parametrów regulacyjnych silnika, dla których dobierano wartość obciążenia silnika przy zasilaniu określonym paliwem.

- max. temperatura spalin silnika nie może przekroczyć 700 °C,
- nie może występować anomalia spalania w postaci spalania stukowego,
- nie może zachodzić zjawisko cofania się płomienia do kolektora dolotowego.

Pomiary stężenia toksycznych składników spalin prowadzono aparaturą pomiarową zgodną z obowiązującymi aktualnie normami: ISO/CD 8178-1 (RIC engines-Exhaust emissions measurement, edycja 11.XI.1992) oraz ECE - R49/2 (Uniform provisions concerning the approval of compression ignition (C.I.) engines and vehicles equipped with C.I. engines with regard to the emissions of pollutants by the engine). Badano i rejestrowano wartość stężenia: tlenku węgla CO, węglowodorów THC, tlenku azotu NO i dwutlenku węgla CO₂ i tlenu O₂.

Ponadto badano i rejestrowano wpływ badanego paliwa na pozostałe parametry silnika takie jak: moment obrotowy i moc, zużycie paliwa, sprawność ogólna obiegu, współczynnik nadmiaru powietrza λ, temperatura spalin.

Typowym wskaźnikiem roboczym silnika, szczególnie dla jednostki pracującej przy stałej prędkości obrotowej (n=1500 1/min) i zmiennym obciążeniu, jest godzinowe zużycie paliwa G_p. W odniesieniu do paliw ciekłych najczęściej posługujemy się wartościami G_p wyrażonymi w kilogramach (kg) zużytego paliwa na godzinę pracy silnika, natomiast w przypadku paliw gazowych objętościowo, w normalnych metrach sześciennych (Nm³) na godzinę. Dla paliw o różnej wartości opałowej G_p nie jest parametrem porównawczym, dlatego posługiwano się również wartościami sprawności ogólnej η_o silnika.

3. Stanowisko pomiarowe i badania silnika zasilanego wodorem

Badania silnika zasilanego wodorem przeprowadzono na specjalnym stanowisku badawczym w Laboratorium Katedry Silników Spalinowych Politechniki Krakowskiej. Z uwagi szczególne własności paliw gazowych zastosowano zabezpieczenia przed ewentualnymi nieszczelnościami instalacji paliwowej dostarczającej gaz ziemny lub wodór do badanego silnika, stosując specjalny przewód o podwójnych ścianach. Ponadto stanowisko wyposażono w instalację odprowadzającą ciepło i odsysającą opary z nad stanowiska badawczego. W pomieszczeniach laboratorium umieszczono czujniki stężenia metanu i wodoru. Zasadnicze elementy laboratoryjnego stanowiska hamownianym:

- turbodoładowany silnik wysokoprężny MAN E 2876 E 312,
- elektrowirowy hamulec silnikowy firmy AVL, typ B350,
- masowa, komputerowa, dynamiczna miernica paliwa firmy AVL, typ AVL4210,
- objętościowa miernica zużycia gazu ziemnego,
- system pomiarowy do określania stężenia gazowych składników spalin – AVL Bench Emissions System CEB II,
- stanowisko pomiarowe do określania: temperatury spalin, otoczenia, ciśnienia i wilgotności powietrza pobieranego przez silnik, współczynnika nadmiaru powietrza λ.

Jako obiekt badań wybrano 6-cylindrowy, doładowany silnik typu MAN E2876 LE302 o objętości skokowej V_s =12,82 dm³, który w konfiguracji fabrycznej zasilany jest mieszalnikowo gazem ziemnym i przeznaczony do napędu generatora prądu (rys.1).



Rys.1. Silnik MAN na stanowisku badawczym

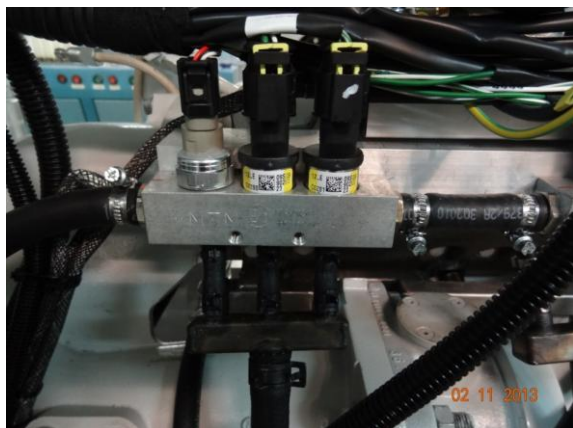
Podstawowe parametry techniczne silnika MAN E2876 LE302 zamieszczono w tabeli.

Charakterystyka silnika typu MAN E2876 LE302	
1. Rodzaj zapłonu	iskrowy, 4-suw.,
2. Układ cylindrów	R, pionowy
3. Liczba cylindrów	6
4. Średnica tłoka	128 mm
5. Skok tłoka	166 mm
6. Objętość skokowa	12,82 dm ³
7. Geom. stopień sprężania	11
8. Moc zn. na gazie ziemnym	200 kW
9. Znamionowa prędkość obr.	1500 1/min
10. Maksymalny moment obr.	1280 Nm
11. Zużycie gazu ziemnego (dane fabryczne)	58 Nm ³ /h

Wiązki butli ciśnieniowych (200 bar) z paliwem gazowym umieszczone były na zewnątrz budynku laboratorium. System reduktorów (I i II-stopnia), zaworów, zaworów bezpieczeństwa i linii gazowej pozwalał na dostarczenie gazu ziemnego lub wodoru do instalacji zasilającej silnika pod odpowiednim

ciśnieniem. Skonstruowano i zbudowano w tym celu specjalną instalację paliwową o konfiguracji zbliżonej do systemu zasilania typu Common Rail, której elementy przedstawiono na rys.2.

Wodór, znajdujący się w szynie paliwowej, zasiliał pod ciśnieniem wtryskiwacze paliwa. Do sterowania wielkością dawki paliwa gazowego, wyprzedzeniem zapłonu, otwarciem przepustnicy oraz składem mieszanki palnej (współczynnikiem nadmiaru powietrza λ) skonstruowano i stosowano specjalny, programowalny sterownik silnika, opracowany w programie LabView.



Rys.2. Segment szyny paliwowej zasilającej silnik MAN wodorem



Rys. 3. Widok ogólny panelu sterowania programowalnego sterownika silnika MAN

Sterownik wyposażono w czujnik spalania stukowego, który jednoznacznie wyznaczał granicę stuku dla każdego z cylindrów, we wszystkich analizowanych warunkach pracy silnika. Przebieg spalania w każdym z cylindrów był ponadto nadzorowany przez termopary, umieszczone w kanale wylotowym każdego z cylindrów, bezpośrednio przy wylocie spalin z głowicy. Zbudowano odpowiedni panel sterowania, którego widok zewnętrzny obrazuje rys.3.

Oryginalne świece zapłonowe, zalecane przez firmę MAN podczas zasilania gazem zimnym, podczas zasilania wodorem zastąpiono świecami typu NGK BCRE527Y, w których kanał iskrowy był bardziej wysunięty z głąb komory spalania (rys. 4). Zmiana ta została przeprowadzona na podstawie badań doświadczalnych i przyniosła istotną poprawę inicjacji zapłonu ubogiej mieszanki wodoru z powietrzem.

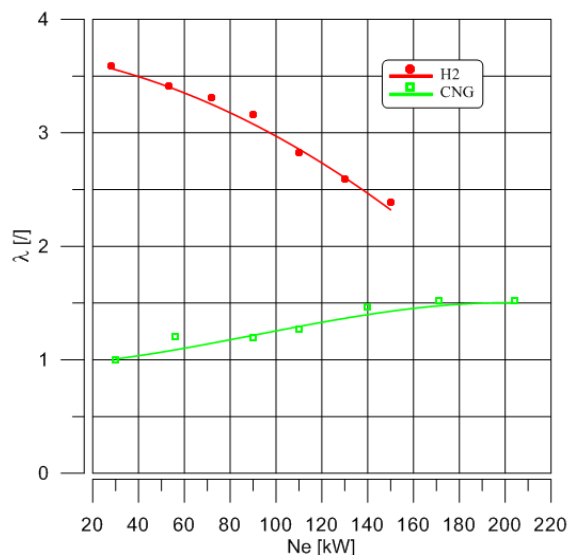


Rys.4. Fabryczna i specjalna świeca zapłonowa stosowana w badaniach w głowicy silnika MAN

4. Wyniki i analiza badań silnikowych

4.1. Badania parametrów roboczych silnika

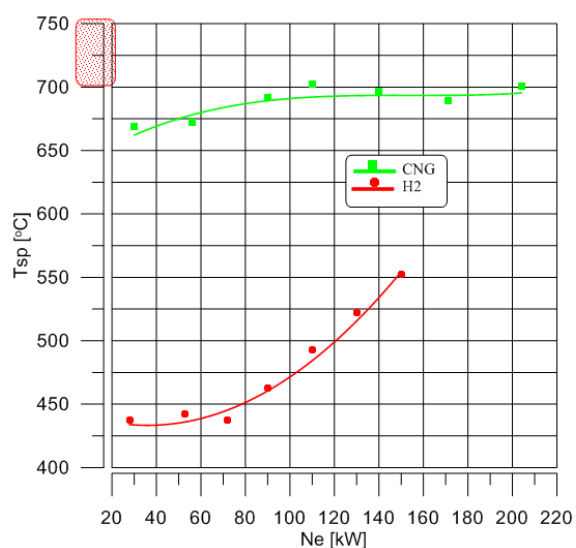
Ponieważ testowane paliwa gazowe – wodór i gaz ziemny mają zupełnie inne właściwości, szczególnie w odniesieniu do zastosowania jako paliw w silniku spalinowym, istotnym zagadnieniem jest dobór odpowiedniego składu mieszanki (rys. 5). W tym przypadku kryterium oceny pracy silnika podczas zasilania wodorem stanowiła granica spalania stukowego, oceniana czujnikiem stuku oraz temperaturą spalin, która dla badanego silnika nie mogła przekroczyć wartości 700 °C.



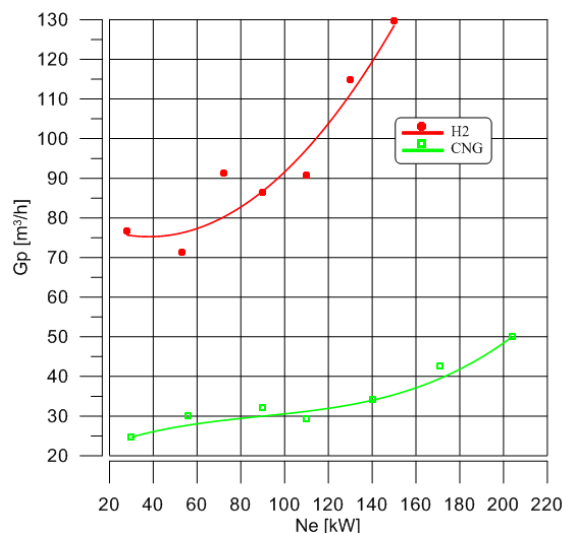
Rys.5. Charakterystyka składu mieszanki silnika MAN zasilanego gazem ziemnym albo wodorem ($n=1500$ 1/min)

Na rys. 6 przedstawiono charakterystykę obciążeniową badanego silnika, odpowiednio podczas zasilania gazem ziemnym albo wodorem. Ze względu na różną wartość opałową mieszanek: wodorowo-powietrznej i gazu ziemnego z powietrzem, którymi był zasilany badany silnik, należy się liczyć z dużą różnicą w wartości godzinowego zużycia paliwa (rys. 6).

Różnice w wartości składu mieszanki zasilającej silnik były również przyczyną różnicy wartości wydzielania ciepła w cylindrze i temperatury procesu spalania. Podczas, gdy spalanie mieszanki gazu ziemnego z powietrzem ograniczone było maksymalną, dopuszczalną temperaturą spalin wynoszącą 700 °C, to zasilając silnik ubogą mieszanką wodoru z powietrzem temperatura spalin osiągała znacząco mniejszą wartość (rys. 7).

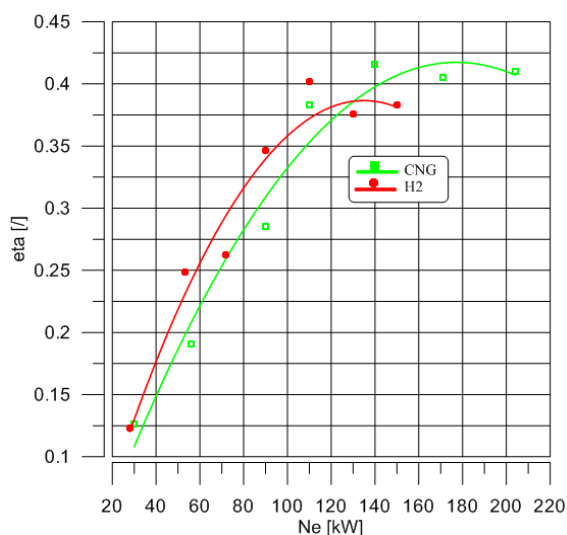


Rys.6. Temperatura spalin silnika MAN zasilanego gazem ziemnym albo wodorem ($n=1500$ 1/min)



Rys.7. Charakterystyka obciążeniowa silnika MAN zasilanego gazem ziemnym albo wodorem ($n=1500$ 1/min)

Jednym z najważniejszych parametrów roboczych silnika jest jego sprawność ogólna silnika (rys. 8). Większa wartość sprawności ogólnej dla silnika zasilanego gazem ziemnym wynika głównie z mniejszego udziału mocy strat mechanicznych w stosunku do rozwijanej mocy efektywnej. Biorąc pod uwagę stałą wartość oporów mechanicznych silnika, jak również mniejszą moc indykowaną, rozwijaną przez silnik zasilany wodorem, wynikiem jest mniejsza wartość sprawności ogólnej. W obu rozpatrywanych przypadkach sprawność ogólna silnika jest jednak duża i podczas zasilania gazem ziemnym jej maksymalna wartość wynosi ok. 42% a podczas zasilania wodorem ok. 37%.

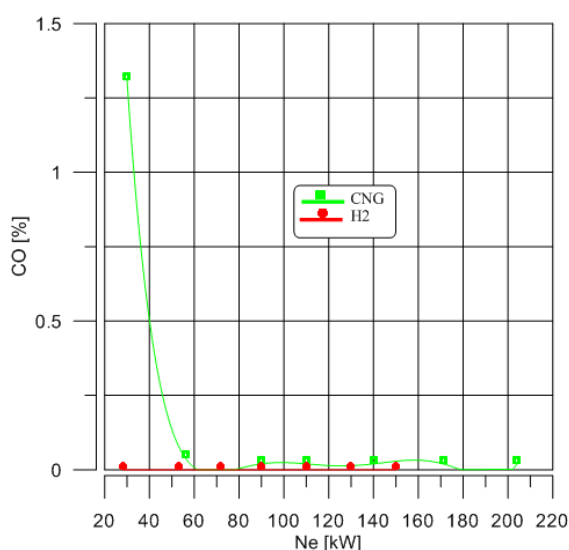


Rys.8. Sprawność ogólna silnika MAN zasilanego gazem ziemnym albo wodorem ($n=1500$ 1/min)

4.2. Badanie właściwości ekologicznych silnika

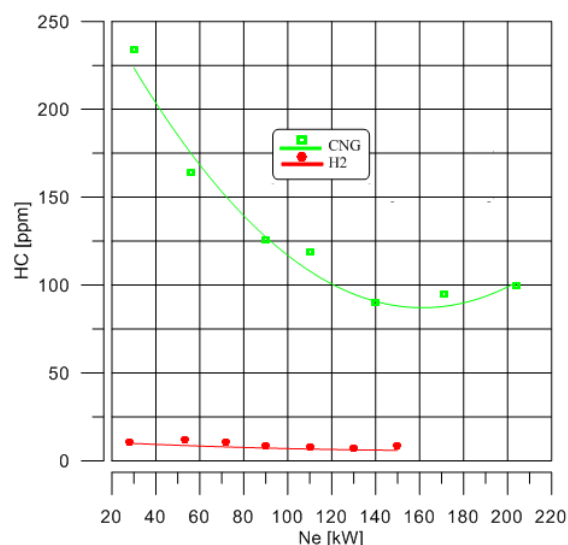
Równocześnie z pomiarami parametrów roboczych silnika MAN prowadzono pomiary stężenia wybranych gazowych składników spalin. Jest to zasadne nie tylko z punktu widzenia obowiązkowych norm i limitów emisji toksycznych składników spalin obowiązujących w Unii Europejskiej, ale również jest niezbędne do oceny i analizy przebiegu procesu spalania w cylindrze silnika. Stężenie tlenu w spalinach silnika pozwoliło również na obliczenie współczynnika nadmiaru powietrza λ (rys.5), którego wartości mają kluczowe znaczenie dla spalania paliwa i emisji toksycznych składników spalin. Zmiana parametrów roboczych silnika realizowana była metodą ilościowo-jakościową i ten sposób regulacji miał także wpływ na rozwój reakcji spalania i stężenie poszczególnych składników spalin.

Na rys. 9 zaprezentowano krzywe stężenia tlenu węgla podczas zasilania silnika MAN gazem ziemnym lub wodorem. Podczas zasilania silnika gazem ziemnym zanotowano dużą wartość stężenia tlenu węgla podczas pracy silnika z małym obciążeniem. Ponieważ podczas pracy z małym obciążeniem był on zasilany mieszanką o składzie zbliżonym do stechiometrycznego, a ponadto występowała mała wartość ciśnienia i temperatury ładunku, efektem było niecałkowite i niezupełne spalanie i zwiększenie stężenia tlenu węgla w spalinach. Podczas pracy z większym obciążeniem stężenie tlenu węgla osiągało bardzo małą wartość rzędu setnych części procenta. Podczas zasilania silnika wodorem stężenie tlenu węgla było pomijalnie małe i wynikało głównie ze spalania oleju smarującego.



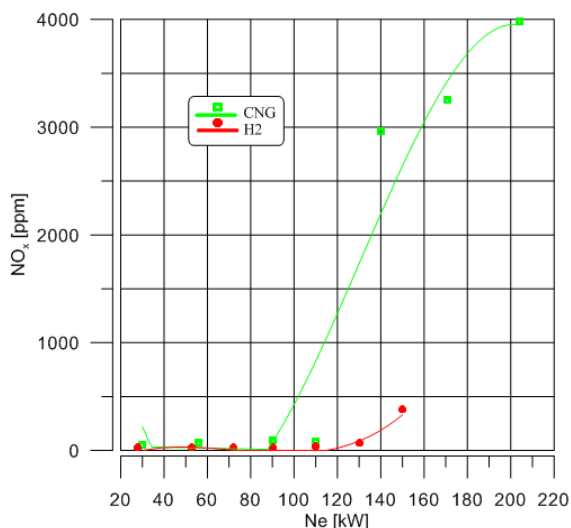
Rys.9. Wpływ obciążenia silnika na stężenie tlenu węgla CO w spalinach silnika zasilanego gazem ziemnym albo wodorem

Stężenie węglowodorów w spalinach podczas zasilania silnika gazem ziemnym było zależne od wartości współczynnika nadmiaru powietrza (rys. 5). Niewielki wzrost stężenia podczas pracy z dużym obciążeniem mógł wynikać ze zmniejszenia prędkości spalania, podczas zasilania silnika ubogą mieszanką ($\lambda \approx 1,5$). Podczas zasilania silnika wodorem stężenie węglowodorów w spalinach było pomijalnie małe i podobnie jak w przypadku stężenia tlenu węgla, wynikało głównie ze spalania oleju smarującego (rys. 10).



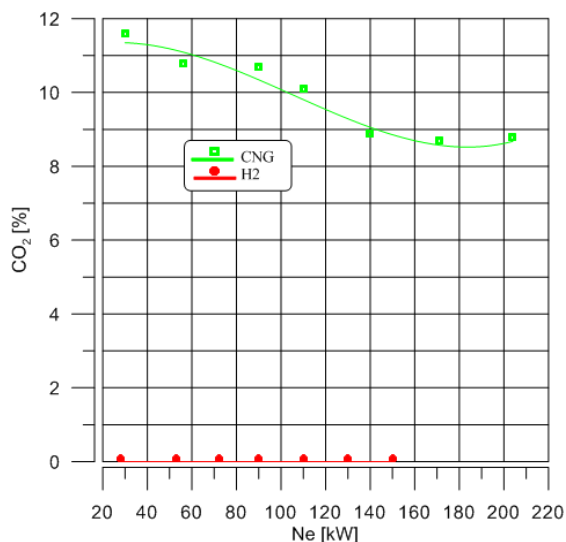
Rys.10. Wpływ obciążenia silnika na stężenie węglowodorów HC w spalinach silnika zasilanego gazem ziemnym albo wodorem

Stężenie tlenków azotu silnie rośnie podczas zwiększania obciążenia silnika zasilanego gazem ziemnym. Sprzyja temu rosnąca wartość temperatury spalania paliwa, jak również większa dostępność tlenu, ponieważ w miarę wzrostu obciążenia silnik był zasilany mieszanką o coraz większym nadmiarze powietrza. Podczas zasilania silnika wodorem niewielki wzrost stężenia tlenków azotu zanotowano jedynie przy pracy z obciążeniem bliskim maksymalnego (rys. 11).



Rys.11. Wpływ obciążenia silnika na stężenie tlenków azotu NO_x w spalinach silnika zasilanego gazem ziemnym albo wodorem

Na rys. 12 zaprezentowano wpływ obciążenia silnika zasilanego gazem ziemnym lub wodorem na stężenie dwutlenku węgla CO_2 w spalinach. Podczas zasilania gazem ziemnym stężenie dwutlenku węgla jest zależne od składu mieszanki i wartości stężenia tlenku węgla CO i węglowodorów HC w spalinach. Podczas zasilania wodorem wartość stężenia dwutlenku węgla jest pomijalnie mała, a śladowe jego wartości wynikają z obecności oleju smarującego w komorze spalania silnika.



Rys.12. Wpływ obciążenia silnika na stężenie dwutlenku węgla u CO_2 w spalinach silnika zasilanego gazem ziemnym albo wodorem

5. WNIOSKI

Przedstawione wyniki badań wpływu zasilania silnika MAN E 2876 E 312 gazem ziemnym lub wodorem pozwalają na sformułowanie następujących najistotniejszych wniosków:

1. Pierwsza część badań, prowadzona podczas zasilania gazem ziemnym, stanowi podstawę do oceny przyjętej koncepcji układu zasilania i sterowania, oprogramowania sterującego, kompletacji podzespołów. Poprawna praca przy zasilaniu ubogą mieszanką jest efektem przyjęcia i zastosowania rozwiązań generacyjnie znacznie nowocześniejszych niż w wersji fabrycznej.
2. Wiele uwagi poświęcono doborowi parametrów regulacyjnych, takich jak kąt wyprzedzenia zapłonu, współczynnik składu mieszanki oraz doborowi typu świecy zapłonowej. Uzyskano dzięki temu korzystne wskaźniki robocze i ekologiczne silnika dla badanych paliw.
3. Wyniki badań pozwoliły na określenie strategii zasilania i sterowania. Aby zachować bezpieczną moc trwałą silnika podczas zasilania wodorem, bez niebezpieczeństwa zbliżania się do granicy anomalii spalania, przyjęto moc trwałą 150 kW, choć w badaniach przekroczono nieznacznie 160 kW.
4. Korzystne wartości sprawności ogólnej oraz właściwości ekologicznych silnika uznać można za sukces. Stężenie toksycznych składników spalin podczas zasilania silnika wodorem było wielokrotnie mniejsze, niż podczas zasilania gazem ziemnym.
5. Podczas zasilania wodorem silnik pracował bez anomalii spalania (spalanie stukowe, wypadanie zapłonów) przy indywidualnych nastawach parametrów regulacyjnych (współczynnika nadmiaru powietrza i wyprzedzenie zapłonu). Ograniczeniem dla uzyskania jeszcze korzystniejszych wyników były kryteria spalania stukowego lub temperatury spalin przed turbiną.
6. Ostateczna kwalifikacja wodoru jako paliwa do badanego typu silnika może nastąpić po wstępnym okresie eksploatacji agregatu. Należałoby zwrócić szczególnie uwagę na oddziaływanie wodoru na materiały zastosowane do budowy elementów silnika oraz własności oleju smarującego silnik, ponieważ możliwa jest zmiana właściwości oleju smarującego skutkiem uwodornienia.

Artykuł powstał w wyniku realizacji projektu: pt. „Wykorzystanie odpadowego wodoru do celów energetycznych”

(POIG.01.04.00-02-105/10)

Projekt współfinansowany z Europejskiego Funduszu Rozwoju Regionalnego, realizowany w ramach działania 1.4 Wsparcie projektów celowych Programu Operacyjnego Innowacyjna Gospodarka 2007-2013

Nomenclature/Skróty i oznaczenia

CNG Compressed Natural Gas/*sprężony gaz ziemny*

H2 Hydrogen/wodór

Mr Brzeżański Marek, DSc., DEng. – Professor in the Faculty of Mechanical Engineering at Cracow University of Technology.

Dr hab. inż. Marek Brzeżański – profesor na Wydziale Mechanicznym Politechniki Krakowskiej.



Mr Cisek Jerzy, Ph.D.M.E. – Adjunkt in the Faculty of Mechanical Engineering at Cracow University of Technology.

Dr inż. Jerzy Cisek – adiunkt na Wydziale Mechanicznym Politechniki Krakowskiej.



Mr Marek Wojciech, DSc., DEng. – Professor in the Faculty of Mechanical Engineering at Cracow University of Technology.

Dr hab. inż. Wojciech Marek – profesor na Wydziale Mechanicznym Politechniki Krakowskiej.



Mr Papuga Tadeusz, Ph.D.M.E. – Adjunkt in the Faculty of Mechanical Engineering at Cracow University of Technology.

Dr inż. Jerzy Cisek – adiunkt na Wydziale Mechanicznym Politechniki Krakowskiej.

