

Effect of dual fuelling on selected operating parameters and emission of a turbocharged compression ignition engine

Abstract: The paper presents results of investigation aimed to determine an effect of the maximum CNG share in the total fuel charge delivered into the cylinder of a turbocharged compression ignition engine operating in a dual fuel mode on phenomena that occur during the combustion process and on the harmful exhaust emission.

Pressure courses and engine head vibrations were analysed. It was stated that in the case of an excessive CNG energy share increase, the maximum pressures and the rate of pressure rise increase at first. Further increase of the CNG energy share leads to heavy engine head vibrations.

Pressure measurements were done in the first cylinder. The analysis of engine head vibrations comprised all engine cylinders. Analysis of the harmful exhaust emission showed a significant increase of unburnt hydrocarbon emission. Emissions of other principal pollutants reached values comparable with those obtained at standard fuelling.

Keywords: knock, hard engine operation, dual-fuel engine, CNG, engine head vibrations, hydrocarbons, harmful exhaust emission

Wpływ zasilania dwupaliwowego na wybrane parametry pracy i emisję turbodoładowanego silnika o ZS

Streszczenie: W artykule przedstawiono wyniki badań, które miały na celu określenie wpływu maksymalnego udziału paliwa CNG w całkowitym paliwie dostarczanym do cylindra silnika na zjawiska zachodzące w procesie spalania oraz na poziom emitowanych składników szkodliwych spalin.

Analizie zostały poddane zarejestrowane przebiegi ciśnień i drgania głowicy. Stwierdzono, że przy nadmiernym wzroście udziału energetycznego CNG w pierwszej kolejności dochodzi do nadmiernego wzrostu ciśnienia maksymalnych i szybkości narastania ciśnienia. Dalszy wzrost udziału energetycznego CNG prowadzi do pojawienia się silnych drgań głowicy.

Pomiary ciśnienia wykonywane były w pierwszym cylindrze. Analiza drgań głowicy obejmowała wszystkie cylindry silnika. Analiza emisji składników szkodliwych wykazała, że znacznemu zwiększeniu ulega emisja niespalonych węglowodorów HC. Stężenia pozostałych głównych składników spalin osiągają wartości na poziomie emitowanym przez silnik zasilany standardowo.

Słowa kluczowe: stuk, twarda praca, silnik dwupaliwowy, CNG, drgania głowicy, węglowodory, składniki szkodliwe spalin

1. Wstęp

Gaz ziemny, ze względu na wysoką liczbę oktanową ($LO \approx 130$) jest uznawany za jedno z głównych paliw alternatywnych (w stosunku do paliw ropopochodnych) wykorzystywanych do zasilania silników o ZI.

Duża odporność na spalanie stukowe stwarza korzystne warunki do zastosowania tego paliwa do zasilania silników o ZS. Korzyści jakie niesie za sobą wykorzystanie CNG do zasilania silników o ZS związane są ze znaczną redukcją tlenków azotu NO_x i cząstek stałych [1], [2].

W artykule opisano badania przeprowadzone na pełnogabarytowym turbodoładowanym silniku z układem zasilania składającym się ze standardowego układu common-rail i układu wtrysku pośredniego paliwa CNG do kanałów dolotowych.

Istotą tego typu zasilania jest to, że inicjacja spalania następuje od odpowiednio dobranej dawki oleju napędowego. Następnie płomień rozprzestrzenia się na otaczającą strugi wtryskiwanego oleju napędowego homogeniczną mieszaninę CNG - powietrze.

Minimalna wartość inicjującej zapłon dawki oleju napędowego powinna zapewniać pewny zapłon ładunku w cylindrze oraz efektywne chłodzenie końcówek wtryskiwaczy układu common rail. Regulacja udziału CNG w ładunku powinna doprowadzić do uzyskania obciążenia silnika na poziomie zbliżonym do zasilania standardowego.

Wymaga to jednak stosowania dużych udziałów CNG, które mogą prowadzić do powstawania niekorzystnych zjawisk w procesie spalania, takich jak: nadmierny wzrost ciśnienia maksymalnego w cylindrze, twarda praca (zbyt szybkie narastanie ciśnienia) i stuk.

Celem opisywanych badań było ustalenie obszaru pracy silnika zasilanego dwupaliwowo. Wielkościami, które podlegały regulacji były: udział energetyczny CNG w całkowitym ładunku oraz wielkość inicjującej zapłon dawki ON. Wartości kątów początku wtrysku i podział inicjujących zapłon dawek ON był realizowany zgodnie z mapami zapisanymi przez producenta w komputerze sterującym pracą silnika.

Do określenia maksymalnego poziomu udziału CNG w całkowitym paliwie wykorzystano następujące parametry procesu roboczego:

- maksymalne ciśnienie spalania P_{max} ,
- szybkość narastania ciśnienia $\Delta P/\Delta \varphi$,

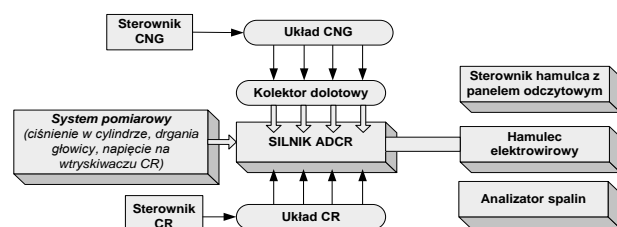
stuk kontrolowany był przez wskaźnik intensywności stuku WISG obliczany z zależności uwzględniającej pomierzone maksymalne amplitudy drgań głowicy reprezentowane przez sygnał napięciowy z czujnika stuku.

Parametry regulacyjne dobierano w taki sposób aby wartości liczbowe ww. parametrów procesu roboczego i wskaźnika intensywności stuku WISG nie przekraczały wartości maksymalnych występujących przy zasilaniu standardowym.

W trakcie badań analizowana była również emisja: tlenku węgla, tlenków azotu NO_x , niespalonych węglowodorów oraz zadymienie spalin.

2. Stanowisko badawcze

Badania przeprowadzono na stanowisku hamulcowym (rys.1), wyposażonym w silnik o zapłonie samoczynnym Andoria ADCR i hamulec elektrowirrowy firmy Automex [3]. Parametry techniczne silnika przedstawiono w tablicy 1.



Rys.1. Schemat blokowy stanowiska badawczego

Do pomiaru parametrów szybkozmiennych użyto systemu pomiarowego, opisanego w [3], wyposażonego w kartę przetwornika analogowo-cyfrowego KPCI 3110 o szybkości próbkowania równej 1,25MHz firmy Keythley oraz w tory pomiarowe:

- ciśnienia w cylindrze silnika z piezokwarcowym czujnikiem 8Qp500c firmy AVL i wzmacniaczem ładunku wyposażonym w 100kHz filtr dolnoprzepustowy,
- toru pomiarowego drgań głowicy z czujnikiem DR 190 8092-2F firmy OPEL.

Zapis ww. sygnałów do pamięci komputera był synchronizowany sygnałem z dwukanałowego

znacznika kąta obrotu wału korbowego (wyzwalanie pojedynczego pomiaru co 0,7 °OWK i wyzwalanie cyklu pomiarowego znacznikiem GMP).

Pomiary stężeń składników spalin wykonywano za pomocą analizatora AVL 4000.

3. Przebieg badań

Badania oparto na pomiarach ciśnienia w cylindrze i pomiarach amplitudy drgań głowicy w wybranych punktach charakterystyk obciążeniowych sporządzanych dla prędkości $n = 2000 \text{ obr/min}$ (prędkość momentu maksymalnego dla zasilania standardowego).

Tablica 1. Dane techniczne silnika ADCR

Rodzaj silnika	Wysokoprężny, turbodoładowany z intercoolerem spełniający normę EURO IV
Liczba i układ cylindrów	4, rzędowy, pionowy
Tryb spalania	4-ro suwowy z wtryskiem bezpośrednim
Średnica cylindra	94 mm
Skok tłoka	95 mm
Objętość skokowa	2636 cm ³
Stopień sprężania	17,5
Układ zasilania – olej napędowy	Common rail
Układ zasilania – CNG	Wtrysk gazu do kolektora dolotowego
Moc znamionowa	85 kJ/s/3700 obr/min
Maksymalny moment obrotowy	250Nm/(1800obr/min – 2200obr/min)

Wykonano cztery charakterystyki. Jedną wykonano dla zasilania standardowego. Trzy pozostałe wykonano dla zasilania dwupaliwowego, każda przy innej wartości inicjującej zapłon dawki oleju napędowego. Dawki te wynosiły odpowiednio: $d1 = 12,6 \text{ mg/cykl}$ ($M_o = 20 \text{ Nm}$, $p_e = 0,1 \text{ MPa}$); $d2 = 15,2 \text{ mg/cykl}$ ($M_o = 40 \text{ Nm}$, $p_e = 0,21 \text{ MPa}$) i $d3 = 23,4 \text{ mg/cykl}$ ($M_o = 100 \text{ Nm}$, $p_e = 0,52 \text{ MPa}$). Ilość CNG w ładunku dostarczonym do cylindra była zwiększana aż do wyraźnego wzrostu poziomu hałasu emitowanego przez silnik spowodowanego twardą pracą silnika bądź stukiem.

W każdym punkcie charakterystyki obciążeniowej obliczane były wymienione we wstępie parametry procesu spalania i wskaźnik intensywności stuku WISG.

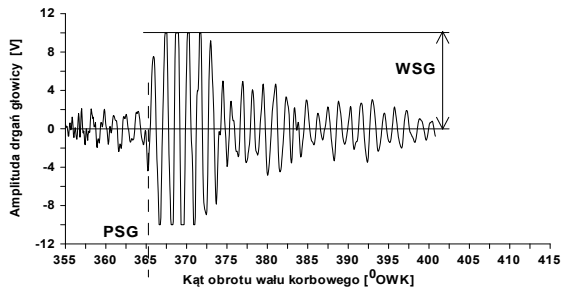
Wskaźnik intensywności stuku w WISG obliczany był z zależności (2)[4], [5]:

$$WISG = \frac{L_{WSG}}{N_{cykli}} \quad (2)$$

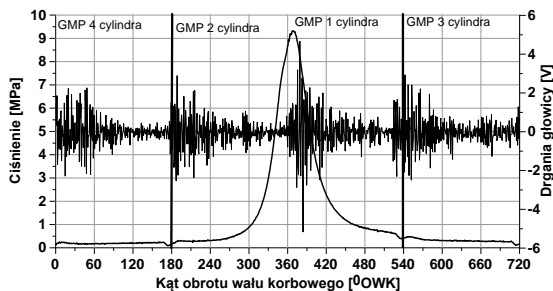
gdzie:

- L_{WSG} - liczba cykli pracy z wartością WSG przekraczająca poziom graniczny WSG_GR
- N_{cykli} - liczba analizowanych cykli pracy,
- WSG_GR - wartość graniczna wskaźnika stuku WSG.

Wskaźnik stuku WSG przyjmowany był jako maksymalna dodatnia wartość amplitudy sygnału z czujnika stuku (rys.2) określana w okresie spalania każdego z czterech cylindrów (rys.3).



Rys.2. Drgania głowicy w czasie spalania z zaznaczonymi wskaźnikami PSG (początek stuku) i WSG



Rys.3. Przykładowe wyniki pomiarów ciśnienia i drgań głowicy przy zasilaniu fabrycznym: a) pełny cykl pracy odpowiadający pierwszemu cylindrowi

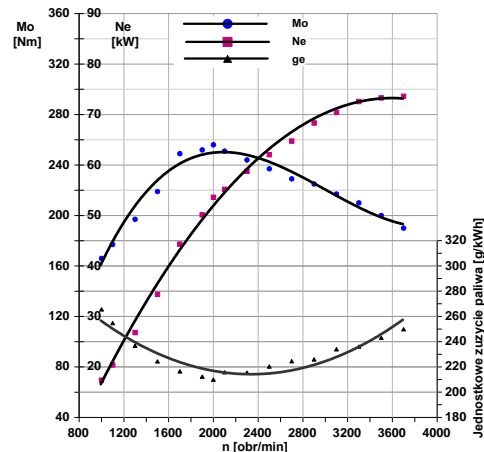
Wartość graniczna wskaźnika stuku WSG_GR określana była jako wartość maksymalna amplitudy sygnału z czujnika stuku dla zasilania standardowego. W punkcie pracy silnika odpowiadającym maksymalnemu obciążeniu wartość WSG_GR = 3,5V. Metodę ustalania maksymalnej amplitudy sygnału opisano w [4], [5], [6].

Liczba analizowanych kolejnych cykli pracy wynosiła $N_{cykli} = 10$. Wartość N_{cykli} ustalono arbitralnie, powinna być ona ustalona w trakcie badań trwałościowych silnika.

4. Wyniki badań

W celu oceny możliwości zasilania dwupaliwowego silnika ADCR przy jak największym udziale CNG w całkowitym paliwie wykonano badania hamowniane polegające na pomiarach mocy, momentu, zużycia paliwa, emisji składników spalin oraz ciśnień w cylindrze przy zasilaniu standardowym (układ common rail). Na podstawie

otrzymanych wyników sporządzono charakterystykę prędkościową (rys.4). Z charakterystyki prędkościowej wynika, że silnik osiąga maksymalny moment i maksymalną sprawność przy prędkości około $n=2000$ obr/min a maksymalną moc przy prędkości $n=3700$ obr/min (w warunkach badań hamownianych uzyskano moc $Ne=74$ kW, czyli o około 10 kW mniejszą od podawanej przez producenta).



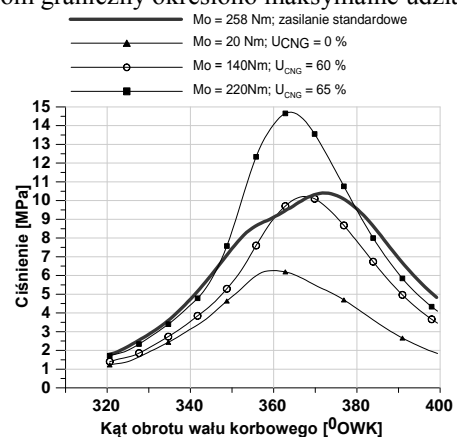
Rys. 4. Charakterystyka prędkościowa

Analizę wpływu zasilania na wybrane parametry pracy i emisję przeprowadzono bazując na charakterystykach obciążeniowych sporządzanych dla prędkości obrotowej $n = 2000$ obr/min (prędkość maksymalnego momentu obrotowego)

4.1. Wybrane parametry procesu spalania

4.1.1. Maksymalne w cylindrze

Przy zasilaniu standardowym i maksymalnym obciążeniu ($Mo = 258$ Nm, $n = 2000$ obr/min) maksymalne ciśnienie w cylindrze wynosiło około $P_{max} = 10$ MPa (rys.5). Przyjmując tą wartość za poziom graniczny określono maksymalne udziały

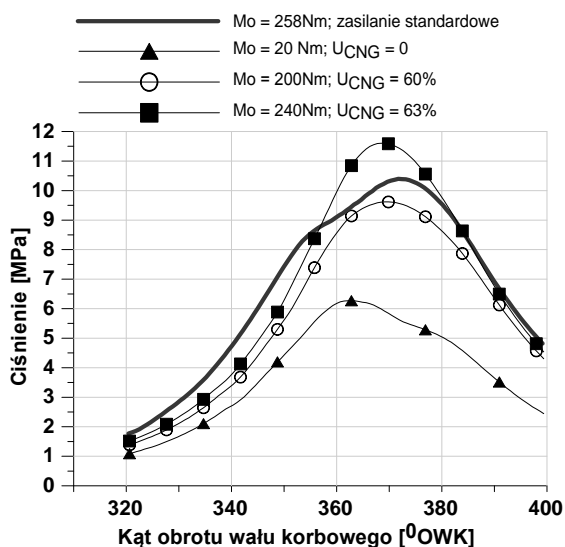


Rys.5. Fragmenty zarejestrowanych otwartych wykresów indykatorowych przy zasilaniu standardowym (linia ciągła) i maksymalnym obciążeniu oraz przy zasilaniu dwupaliwowym i różnych udziałach CNG. Dawka oleju napędowego inicjująca

spalanie $d1 = 12,6$ mg/cykl, prędkość obrotowa $n = 2000$ obr/min
energetyczne CNG w całkowitym paliwie przy zasilaniu dwupaliwowym.

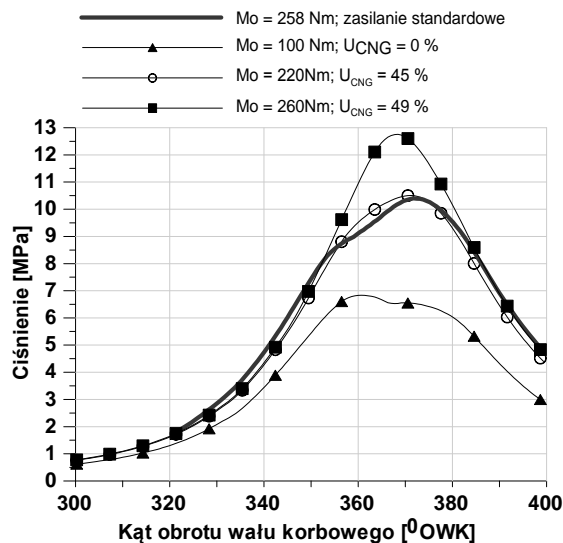
Zastosowanie dawki oleju napędowego inicjującej spalanie $d1 = 12,6$ mg/cykl umożliwiło osiągnięcie przez silnik momentu $M_o = 220$ Nm przy udziale $U_{CNG} = 65\%$. Wartość ciśnienia maksymalnego obiegu osiągnęła poziom $P_{max} = 15$ MPa (rys.5). Jest to poziom przekraczający o około 50% wartość graniczną. Udział energetyczny CNG, który zapewnia dopuszczalne wartości ciśnienia maksymalnego wyniósł dla założonej dawki inicjującej spalanie $U_{CNG} = 56\%$. Moment obrotowy obniżył się do poziomu $M_o = 140$ Nm.

W celu zwiększenia momentu obrotowego konieczne było zwiększenie wartości oleju napędowego dawki inicjującej spalanie. Wartość $d2 = 15,2$ mg/cykl umożliwiła osiągnięcie obciążenia $M_o = 240$ Nm ale również, jak w poprzednim przypadku, przy znacznym przekroczeniu ciśnienia maksymalnego $P_{max} = 12$ MPa (rys.6). Prawidłowa praca silnika możliwa była przy udziale CNG wynoszącym $U_{CNG} = 60\%$. Wartość udziału CNG była taka sama, jak w poprzednim przypadku jednak obciążenie wzrosło do poziomu $M_o = 220$ Nm.



Rys.6. Fragmenty zarejestrowanych otwartych wykresów indyktorowych przy zasilaniu standardowym (linia ciągła) i maksymalnym obciążeniu oraz przy zasilaniu dwupaliwowym i różnych udziałach CNG. Dawka oleju napędowego inicjująca spalanie $d1 = 15,2$ mg/cykl, prędkość obrotowa $n = 2000$ obr/min

Największy moment obrotowy $M_o = 260$ Nm silnik zasilany dwupaliwowo uzyskał przy dawce inicjującej $d3 = 23,4$ mg/cykl i udziale energetycznym CNG $U_{CNG} = 49\%$. Podobnie, jak w poprzednich przypadkach poziom ten został osiągnięty kosztem znacznego wzrostu ciśnienia maksymalnego $P_{max} = 12,8$ MPa (rys.7).



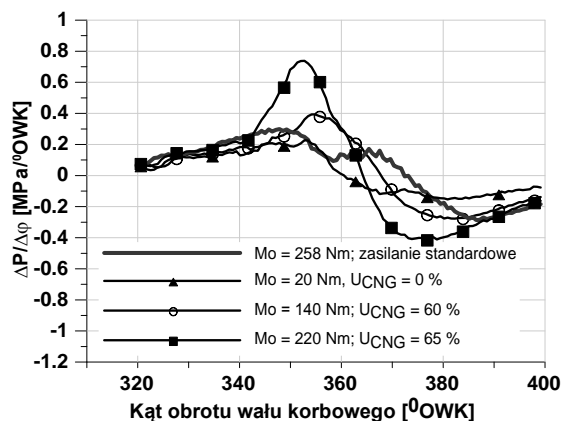
Rys.7. Fragmenty zarejestrowanych otwartych wykresów indyktorowych przy zasilaniu standardowym (linia ciągła) i maksymalnym obciążeniu oraz przy zasilaniu dwupaliwowym i różnych udziałach CNG. Dawka oleju napędowego inicjująca spalanie $d1 = 23,4$ mg/cykl, prędkość obrotowa $n = 2000$ obr/min

Poziom ciśnienia maksymalnego poniżej wartości granicznej osiągnięto przy udziale CNG wynoszącym $U_{CNG} = 45\%$. Dla tej wartości uzyskano obciążenie na poziomie $M_o = 220$ Nm.

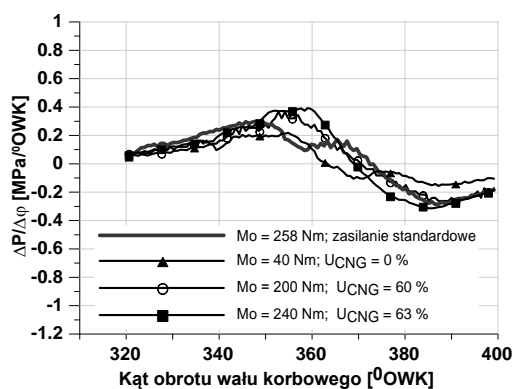
4.1.2. Szybkość narastania ciśnienia

Konsekwencją wysokich ciśnień maksymalnych obiegu pracy jest twarda praca silnika objawiająca się dużymi wartościami szybkości narastania ciśnienia. Przy zasilaniu standardowym szybkość narastania ciśnienia nie przekracza wartości $\Delta P/\Delta \varphi = 0,3$ MPa/ $^{\circ}$ OWK w całym zakresie obciążień silnika.

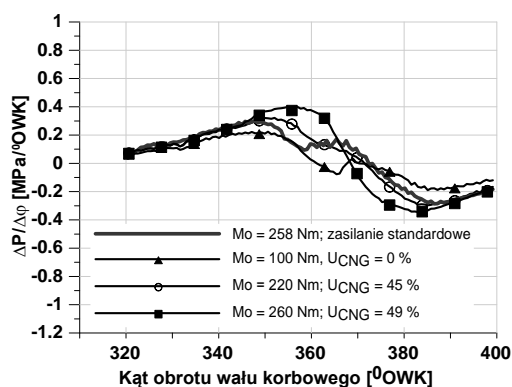
Szybkość narastania ciśnienia na tym poziomie jest uważana za miękką pracę silnika [7]. Analizując przebiegi szybkości narastania ciśnienia dla ww. trzech dawek oleju napędowego inicjujących spalanie (rys.8, rys.9, rys.10), podobnie jak w przypadku ciśnień maksymalnych, obciążenia i udziały energetyczne CNG w całkowitym paliwie wynoszą odpowiednio: $M_o = 140$ Nm, $U_{CNG} = 60\%$ dla dawki $d1 = 12,6$ mg/cykl, $M_o = 200$ Nm, $U_{CNG} = 60\%$ dla dawki $d2 = 12,6$ mg/cykl, $M_o = 220$ Nm, $U_{CNG} = 45\%$ dla dawki $d3 = 23,4$ mg/cykl.



Rys.8. Szybkości narastania ciśnienia przy zasilaniu standardowym (linia ciągła) i maksymalnym obciążeniu oraz przy zasilaniu dwupaliwowym i różnych udziałach CNG. Dawka oleju napędowego inicjująca spalanie $d1 = 12,6$ mg/cykl, prędkość obrotowa $n = 2000$ obr/min



Rys.9. Szybkości narastania ciśnienia przy zasilaniu standardowym (linia ciągła) i maksymalnym obciążeniu oraz przy zasilaniu dwupaliwowym i różnych udziałach CNG. Dawka oleju napędowego inicjująca spalanie $d2 = 15,2$ mg/cykl



Rys.10. Szybkości narastania ciśnienia przy zasilaniu standardowym (linia ciągła) i maksymalnym obciążeniu oraz przy zasilaniu dwupaliwowym i różnych udziałach CNG. Dawka oleju napędowego inicjująca spalanie $d3 = 23,4$ mg/cykl, prędkość obrotowa $n = 2000$ obr/min

Maksymalny udział CNG prowadzi do zwiększenia szybkości narastania ciśnienia aż do wartości $\Delta P/\Delta\varphi = 0,7$ MPa/°OWK odpowiedzialnej za twarzą pracę silnika.

4.1.3. Wskaźnik intensywności stuku

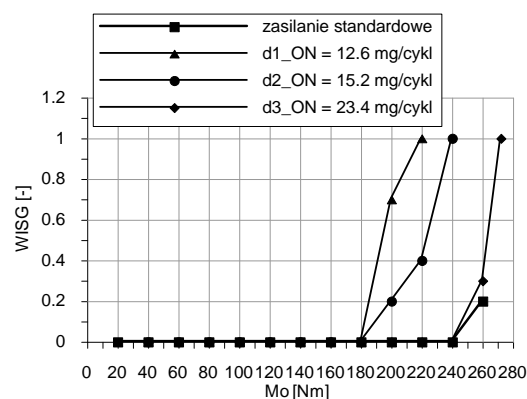
Wskaźnik intensywności stuku WISG przy zasilaniu standardowym w całym zakresie pracy silnika zasilanego standardowo nie przekraczał poziomu 0,2. Wartość tą uznano za graniczny poziom stuku.

Wskaźniki WISG dla analizowanych przypadków (zależnych od wartości inicjujących zapłon dawek ON) osiągają wartości graniczne WISG=0,2 przy wartościach momentów obrotowych: $Mo=180$ Nm dla $d1 = 12,6$ mg/cykl, $Mo=200$ Nm dla $d2 = 15,2$ mg/cykl i $Mo=220$ Nm dla $d1 = 23,4$ mg/cykl. Wszystkie ww. wartości momentów obrotowych są wyższe od momentów określonych z warunku ciśnień maksymalnych.

Wynika z powyższego, że decydującym o maksymalnym udziale CNG w całkowitym paliwie jest maksymalne ciśnienie w cylindrze. Wzrost poziomu intensywności stuku zachodzi przy znacznym przekroczeniu ciśnień maksymalnych.

Analiza przebiegów ciśnienia i szybkości narastania ciśnienia wykazuje, że za stuk odpowiada (w przypadku badanego silnika) nadmierna wartość szybkości narastania ciśnienia $\Delta P/\Delta\varphi > 0,4$ MPa/°OWK.

Na przebiegach ciśnienia w cylindrze w okresie spalania nie zauważono wysokoczęstotliwościowych pulsacji wskazujących na spalanie stukowe.

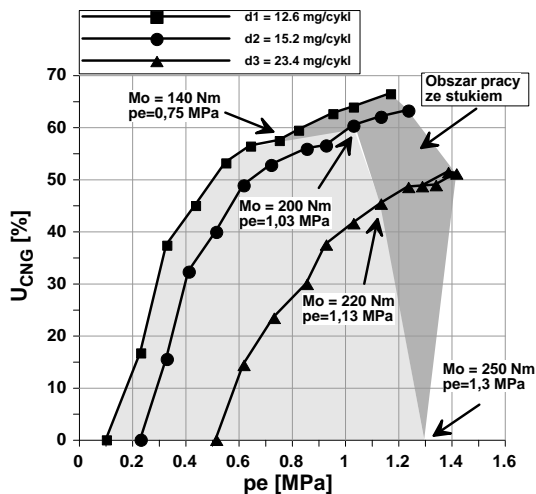


Rys.11. Zależność wskaźnika intensywności stuku od obciążenia przy zasilaniu standardowym i zasilaniu dwupaliwowym przy różnych wielkościach dawki oleju napędowego inicjującej spalanie, prędkość obrotowa $n = 2000$ obr/min

4.2. Obszar pracy silnika z dopuszczalnym udziałem CNG w całkowitym paliwie

Zmiany obciążenia silnika przy prędkości $n = 2000$ obr/min dla inicjujących zapłon dawek oleju napędowego wynoszących: $d1 = 12,6$ mg/cykl, $d2 = 15,2$ mg/cykl i $d3 = 23,4$ mg/cykl i różnych udziałach energetycznych CNG przedstawiono na

rys. 5. Bazując na analizach przeprowadzonych w rozdziale 2 określono zakresy pracy silnika z dopuszczalnym udziałem CNG w paliwie całkowitym.



Rys.12. Charakterystyka obciążeniowa udziałów energetycznych CNG w całkowitym paliwie przy różnych wartościach inicjujących zapłon dawek ON, prędkość obrotowa $n = 2000$ obr/min

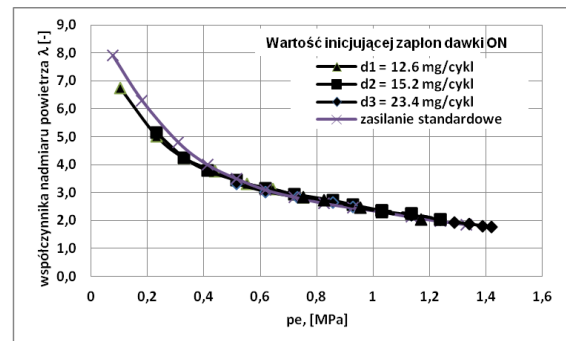
Obszar ten zaznaczono na wykresie kolorem jasnoszarym. Obszar pracy z udziałami CNG, przy których silnik pracuje ze stukiem zaznaczono kolorem ciemnoszarym.

Maksymalny udział energetyczny CNG wyniósł $U_{CNG} = 60\%$ moment, jaki uzyskano był równy $M_o = 220$ Nm ($p_e = 1,13$ MPa). Możliwe było dalsze zwiększanie U_{CNG} (do wartości $U_{CNG} = 65\%$) ale skutkowało to pojawianiem się zjawiska stuków.

4.3. Charakterystyki obciążeniowe współczynnika nadmiaru powietrza oraz emisji składników szkodliwych spalin

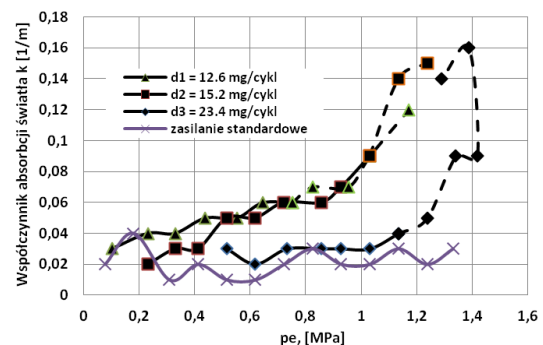
W trakcie badań silnika zasilanego dwupaliwowo mierzony był współczynnik nadmiaru powietrza oraz dokonywano pomiaru stężeń głównych składników toksycznych spalin (tlenku węgla CO, niespalonych węglowodorów HC, zadymienia spalin i tlenków azotu NOx).

Na wykresie (rys.6) przedstawiono zmiany współczynnika nadmiaru powietrza λ . W opisywanych powyżej trzech przypadkach (różne inicjujące zapłon dawki ON) silnik pracuje z nadmiarem powietrza w zakresie od $\lambda = 7$ (małe obciążenie) do wartości około $\lambda = 2$ przy pełnym obciążeniu i maksymalnym udziale CNG w całkowitym paliwie. Wynika z powyższego, że przy dużych udziałach CNG ilość powietrza dostarczana do cylindra jest wystarczająca do pełnego i całkowitego spalania zarówno CNG, jak i oleju napędowego.



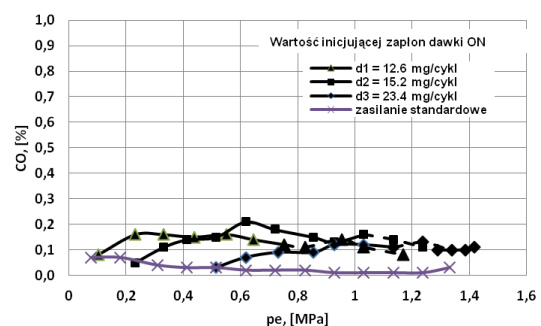
Rys.13. Charakterystyki współczynnika nadmiaru powietrza λ . Prędkość obrotowa $n = 2000$ obr/min

Analiza zmian współczynnika absorpcji światła w spalinach k (rys.14) wykazuje, że ilość niespalonego węgla w całym zakresie obciążeń silnika i prędkości obrotowej $n = 2000$ obr/min pracującego w obszarze prawidłowego spalania (bez stuków) jest wyższa od wartości uzyskiwanej przy zasilaniu standardowym ale nie przekracza wartości $k = 0,1$ 1/m. Poziom ten jest dużo niższy od wartości uważanej za dopuszczalną dla turbodoładowanych silników o ZS ($k < 3,0$ 1/m).



Rys.14. Charakterystyki współczynnika absorpcji światła k . Prędkość obrotowa $n = 2000$ obr/min

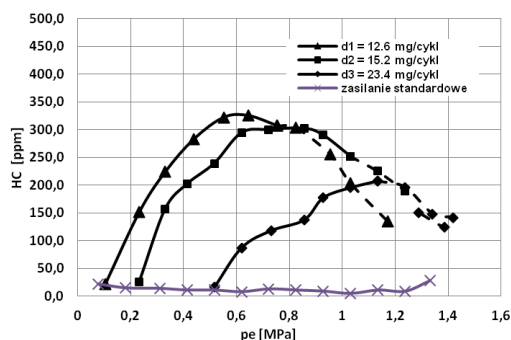
Zmiany stężenia tlenku węgla CO osiągają wartość 0,2% a więc są nierzadnie większe od poziomu stężeń osiąganego przez silnik zasilany standardowo.



Rys.15. Charakterystyki emisji tlenku węgla CO. Prędkość obrotowa $n = 2000$ obr/min

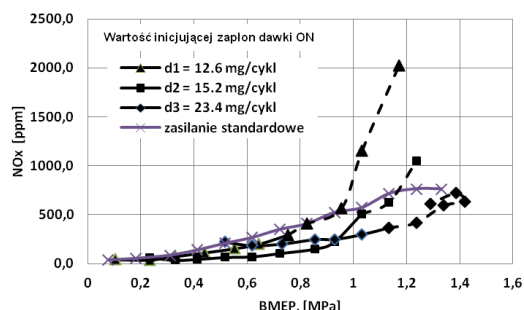
Niekorzystnie w porównaniu do silnika jednopaliwowego przedstawia się emisja

węglowodorów HC (rys.16). W silniku zasilanym jednopaliwowo poziom stężeń węglowodorów dla punktu pracy silnika odpowiadającemu maksymalnemu momentowi obrotowemu ($n=2000\text{obr/min}$) osiąga wartość 30 ppm. Przy zasilaniu dwupaliwowym wartości te są dużo większe. Osiągają wartość około 330 ppm w obszarze pracy z normalnym przebiegiem procesu spalania tj. bez stuku i twardej pracy. Stężenia węglowodorów w obszarze pracy ze stukiem i twardą pracą zaznaczone są linią przerywaną.



Rys.16. Charakterystyki emisji węglowodorów HC. Prędkość obrotowa $n=2000\text{ obr/min}$

Poziom stężenie tlenków azotu NO_x (rys.17) w obszarze pracy silnika bez stuków i twardej pracy jest niższe od poziomu osiąganego przy zasilaniu standardowym w punkcie pracy silnika odpowiadającemu maksymalnemu obciążeniu



Rys.17. Charakterystyki emisji tlenków azotu NO_x . Prędkość obrotowa $n=2000\text{ obr/min}$.

5. Wnioski

Na podstawie powyżej omówionych wyników analiz można sformułować następujące wnioski:

- głównym parametrem procesu spalania ograniczającym udział energetyczny CNG w ładunku dostarczanym do cylindra jest nadmierny wzrost (ponad poziom ustalony dla silnika zasilanego standardowo) maksymalnego ciśnienia spalania,
- o spalaniu ładunku bez zjawiska stuków (w zakresie dopuszczalnych obciążeń silnika zasilanego dwupaliwowo) świadczy również poziom wskaźnika intensywności stuków, który nie przekracza poziomu dla silnika zasilanego standardowo,
- przy pełnym obciążeniu silnika zasilanego dwupaliwowo współczynnik nadmiaru powietrza osiąga wartość około $\lambda = 2$ a więc silnik pracuje z nadmiarem powietrza,
- uzyskana duża wartość współczynnika nadmiaru powietrza mimo wtrysku pośredniego CNG do cylindra jest spowodowana doładowaniem silnika,
- praca silnika przy nadmiarze powietrza znajduje potwierdzenie na wykresach stężeń tlenu węgla oraz tlenków azotu; poziom emisji tych związków jest porównywalny do poziomu uzyskiwanego przy zasilaniu fabrycznym (jednopaliwowym),
- przy zasilaniu dwupaliwowym poziom zadymienia spalin (spalanie niecałkowite) jest porównywalny do uzyskiwanego przy zasilaniu fabrycznym,
- niekorzystny pod względem emisji jest poziom stężeń węglowodorów, który jest wynikiem dużego przekroczenia zaworów ssących i wydechowych (typowe rozwiązanie konstrukcyjne w silnikach turbodoładowanych), powodującym przepływ CNG bezpośrednio z kanałów dolotowych do wylotowych,

Nomenclature/Skróty i oznaczenia

CNG	Compressed Natural Gas/ <i>sprężony gaz ziemny</i> ,	WSG	Wskaźnik stuków,
d1,d2,d3	Inicjujące zapłon dawki ON,	WISG	Wskaźnik intensywności stuków,
Pmax	Ciśnienie maksymalne obiegu pracy,	WSG_GR	Wartość graniczna wskaźnika stuków WSG,
$\Delta P/\Delta \varphi$	Szybkość narastania ciśnienia,	N_{cykli}	Liczba analizowanych cykli pracy,
Ne	Moc użyteczna,	L_{WSG}	Liczba cykli pracy z wartością WSG przekraczającą poziom graniczny (WSG_GR),
Mo	Moment obrotowy,		
U_{CNG}	Udział energetyczny CNG w całkowitym paliwie,		

Bibliography/*Literatura*

- [1] Kusaka J., Daisho Y., Kihara R., Saito T., Nakayama S.: Combustion and exhaust gas emissions characteristics of diesel engine dual-fueled with natural gas. Proc. of 4th International Symposium COMODIA, 1998, pp. 555-560.
- [2] Kowalewicz A., Pawlak G., Wołoszyn R., Różycki A., Duchniak P.: Adaptacja turbodoładowanego silnika do dwupaliwowego zasilania gazem ziemnym i olejem napędowym. Projekt badawczy. Nr 4T12D00230.
- [3] Różycki A.: Mikrokomputer system for measurement of high speed parameters for IC engines, Bratislava 2001 8th EAEC Congress, Bratislava 2001, paper n° SAITS 01196.
- [4] Różycki A.: Knocking combustion intensity index in a dual-fuel compression ignition engine, III Międzynarodowy Kongres Silników Spalinowych – PTNSS KONGRES 2009, Opole 2009, PTNSS–2009–SC–04, PTNSS–2009–SC–165
- [5] Różycki A.: Analiza drgań głowicy silnika wysokoprężnego zasilanego dwupaliwowo, Journal of KONES Internal Combustion Engines, Warsaw 2006
- [6] Szwaja S.: Studium pulsacji ciśnienia spalania w tłokowym silniku spalinowym zasilanym wodorem. Seria monografie nr 182. Wydawnictwo Politechniki Częstochowskiej. Częstochowa 2010.
- [7] Wajand J., A.: Silniki o zapłonie samoczynnym, WNT, Warszawa 1980

Mr Różycki Andrzej, DEng. –
Lecturer in the Faculty of
Mechanical Engineering at
Radom University of Techno-
logy.

*Dr inż. Andrzej Różycki –
adiunkt na Wydziale Mecha-
nicznym Politechniki Radom-
skiej.*

