

Combustion noise of the dual fuel turbocharged ignition engine

Abstract: The paper presents the results of the tests aimed at determining the effects of an excessive participation of CNG in the energy charge supplied to the cylinders in the occurrence of combustion noise.

Pressure processes and head vibrations were submitted to analysis. It was found that with the excessive growth of the CNG share, an excessive increase in maximum pressure and rate of pressure rising appeared in the first sequence. Further increase in the participation of CNG energy led to the appearance of strong head vibration.

Pressure measurements were performed in the first cylinder. The analysis of the head vibration embraced/involved all the cylinders of the engine. Significant differences in the level of head vibration deriving from the combustion process in each cylinder were observed. It demonstrates uneven composition of the air-CNG mixture in each cylinder.

Key words: knock, combustion noise, dual fuel engine, CNG, head vibration

Twarda praca i stuk w turbodoładowanym dwupaliwowym silniku o zapłonie samoczynnym

Streszczenie: W artykule przedstawiono wyniki badań, które miały na celu określenie wpływu udziału energetycznego CNG w ładunku dostarczanym do cylindra na wystąpienie niekorzystnych zjawisk zachodzących w procesie spalania.

Analizie zostały poddane zarejestrowane przebiegi ciśnień i drgania głowicy. Stwierdzono, że przy nadmiernym wzroście udziału energetycznego CNG w pierwszej kolejności dochodzi do nadmiernego wzrostu ciśnień 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. Zaobserwowano duże różnice w poziomie drgań głowicy pochodzące od procesu spalania w poszczególnych cylindrach. Świadczy to o nierównomiernym składzie mieszaniny powietrze-CNG w poszczególnych cylindrach.

Słowa kluczowe: stuk, twarda praca, silnik dwupaliwowy, CNG, drgania głowicy

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].

W artykule opisano badania przeprowadzone na turbodoładowanym silniku z układem zasilania składającym się ze standardowego układu *Common Rail* i układu wtrysku pośredniego 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 gaz-powietrze.

Minimalna wartość dawki oleju napędowego inicjującej zapłon 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, twarda praca (zbyt szybkie narastanie ciśnienia), niepewtarzalność kolejnych cykli pracy i spalanie stukowe.

Celem badań było ustalenie obszaru pracy silnika zasilanego dwupaliwowo. Wielkościami, które podlegały regulacji były: udział energetyczny CNG w ładunku, wielkość dawki ON inicjującej spalanie oraz obciążenie silnika.

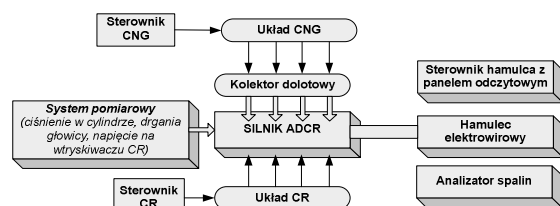
Do określenia poziomów granicznych ww. parametrów regulacyjnych użyto następujących parametrów procesu roboczego i drgań głowicy:

- ciśnienie maksymalne cyklu pracy P_{max} ,
- szybkość narastania ciśnienia $\Delta P/\Delta \varphi$,
- niepowtarzalność P_{max} ,
- maksymalne amplitudy drgań głowicy reprezentowane przez sygnał napięciowy z czujnika stuku,
- moc sygnału napięciowego obliczana dla pojedynczego cyklu pracy (kwadrat wartości skutecznej sygnału).

Parametry regulacyjne dobierano w taki sposób aby wartości liczbowe ww. parametrów procesu roboczego i drgań głowicy nie przekraczały wartości maksymalnych występujących przy zasilaniu standardowym.

2. Stanowisko badawcze

Badania przeprowadzono na stanowisku hamulcowym (rys.1), wyposażonym w silnik o zapłonie samoczynnym Andoria ADCR i hamulec elektrowirrowy firmy Automex [2]. Parametry techniczne silnika przedstawiono w tabelicy 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 odbywał się za pomocą dwukanałowego znacznika kąta obrotu wału korbowego. Wyzwalanie pojedynczego pomiaru występowało co 0,7^oOWK. Początek cyklu pomiarowego obejmującego pełny obieg pracy był zsynchronizowany z położeniem GMP tłoka.

Częstotliwość próbkowania ww. sygnałów dla prędkości obrotowej wału korbowego $n = 2000$ obr/min (prędkość momentu obrotowego

przy której wykonywane były pomiary) wynosiła około 17.1 kHz.

Pomiary stężeń składników spalin wykonywano za pomocą analizatora AVL 4000.

2. Przebieg badań

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

Tabela 1. Dane techniczne silnika ADCR

Rodzaj silnika	Wysokoprężny, turbodoładowany z intercoolerem
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 dawki oleju napędowego inicjującej zapłon. Dawki te wynosiły odpowiednio: $d1_{ON} = 12.6$ mg/cykl (20Nm, $p_e = 0.1$ MPa); $d2_{ON} = 15.2$ mg/cykl (40Nm, $p_e = 0.21$ MPa) i $d3_{ON} = 23.4$ mg/cykl (100Nm $p_e = 0.52$ 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 wskaźniki drgań głowicy.

Współczynnik niepowtarzalności ciśnień maksymalnych obliczany był ze wzoru:

$$COV_{P_{max}} = \frac{\sigma_{P_{max}}}{\bar{P}_{max}}$$

gdzie:

$\sigma_{P_{max}}$ – odchylenie standardowe ciśnienia maksymalnego w kolejnych 30 cyklach pracy,

\bar{P}_{max} – uśredniona z 30 cykli pracy wartość ciśnienia maksymalnego.

Wskaźnik intensywności stuku w odniesieniu do drgań głowicy obliczany był z zależności [4]:

$$WISG = \frac{\sum_{i=0}^L (WSG_i) WSG_GR}{N_{\text{cykli}}}$$

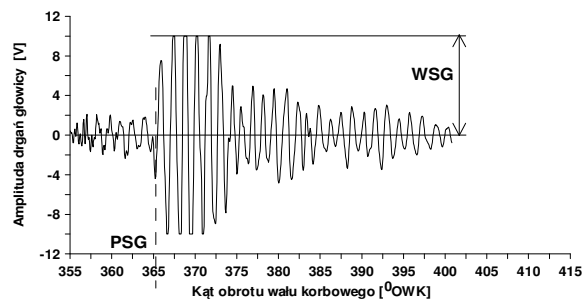
gdzie:

WSG_GR – wartość graniczna wskaźnika stuku WSG,

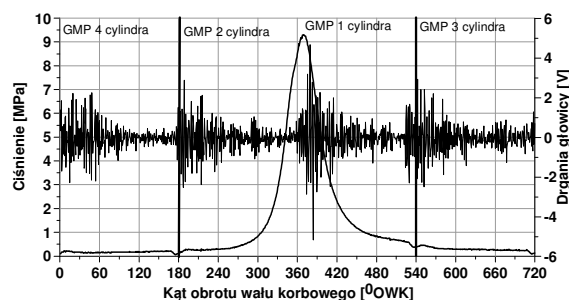
N_{cykli} – liczba analizowanych cykli pracy,

L – ilość cykli pracy z wartością WSG przekraczająca poziom graniczny (WSG_GR)

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 $N_{\text{cykli}} = 10$. Wartość N_{cykli} ustalono arbi-

tralnie, powinna być ona ustalona w trakcie badań trwałościowych silnika.

Moc sygnału napięciowego z czujnika stuku obliczano z zależności:

$$P_G = \sum_{i=1}^{L_p} U_i$$

gdzie:

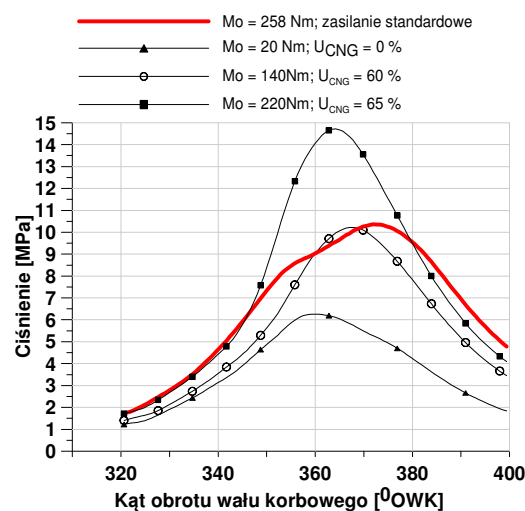
L_p – liczba punktów pomiarowych w cyklu pracy,

U_i – wartość amplitudy sygnału napięciowego czujnika stuku.

2. Wyniki badań i analiz

2.1 Ciśnienia maksymalne

Przy zasilaniu standardowym i maksymalnym obciążeniu ($M_o = 258 \text{ Nm}$, $n = 2000 \text{ obr/min}$) maksymalne ciśnienie w cylindrze wynosiło około 10 MPa (rys.4). Przyjmując tę wartość za poziom graniczny określono maksymalne udziały energetyczne CNG w ładunku przy zasilaniu dwupaliwowym.

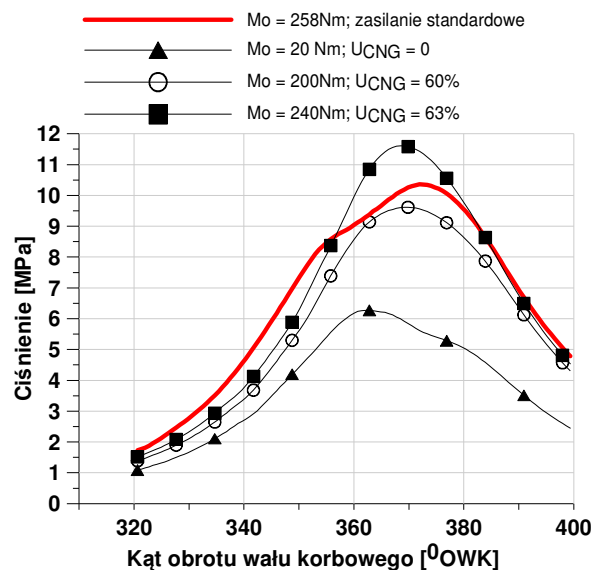


Rys.4. Fragmenty zarejestrowanych otwartych wykresów indykatorowych przy zasilaniu standardowym (linia ciągła) i maksymalnym obciążeniu oraz przy zasilaniu dwupaliwowym i różnych udziałach CNG. Dawka oleju napędowego inicjująca spalanie $d_{1ON} = 12.6 \text{ mg/cykl}$ prędkość obrotowa $n = 2000 \text{ obr/min}$

Zastosowanie dawki oleju napędowego inicjującej spalanie $d_{1ON} = 12,6 \text{ mg/cykl}$ umożliwiło osiągnięcie przez silnik momentu $M_o = 220 \text{ Nm}$ przy udziale $U_{\text{CNG}} = 65\%$. Wartość ciśnienia maksymalnego obrotu osiągnęła poziom 15 MPa (rys.4). Jest to poziom przekraczający o około 50% wartość graniczną. Udział energetyczny CNG, który zapewnia dopuszczalne wartości ciśnienia maksymalnego dla założonej dawki inicjującej spalanie wy-

niósł 56%. Moment obrotowy obniżył się do poziomu 140 Nm.

W celu zwiększenia momentu obrotowego konieczne było zwiększenie wartości dawki oleju napędowego inicjującej spalanie. Wartość $d_{2ON} = 15.2$ mg/cykl umożliwiła osiągnięcie obciążenia $M_o = 240$ Nm ale również, jak w poprzednim przypadku przy znacznym przekroczeniu ciśnienia maksymalnego $P_{max} = 12$ MPa. Prawidłowa praca silnika możliwa była przy udziale CNG wynoszącym 60%. Przy tej wartości udziału CNG obciążenie wzrosło do wartości $M_o = 200$ Nm.



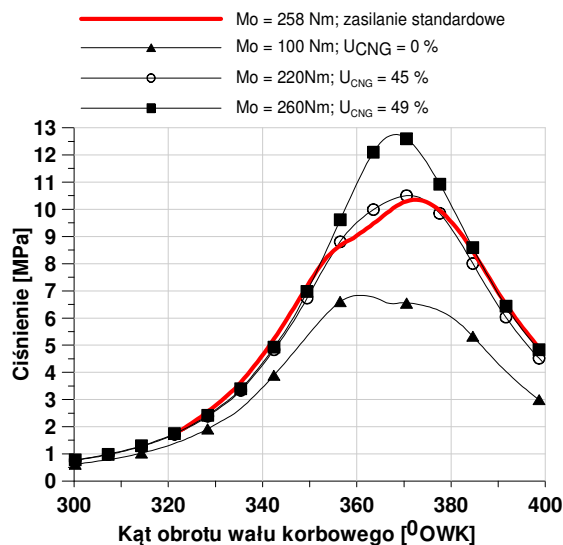
Rys.5. Fragmenty zarejestrowanych otwartych wykresów indykatorowych przy zasilaniu standardowym (linia ciągła) i maksymalnym obciążeniu oraz przy zasilaniu dwupaliwowym i różnych udziałach CNG. Dawka oleju napędowego inicjująca spalanie $d_{1ON} = 15.2$ mg/cykl

Największy moment obrotowy $M_o = 260$ Nm silnik zasilany dwupaliwowo uzyskał przy dawce inicjującej $d_{3ON} = 23.4$ mg/cykl i udziale energetycznym CNG $U_{CNG} = 49\%$ (rys. 6). Podobnie, jak w poprzednich przypadkach poziom ten został osiągnięty kosztem znacznego wzrostu ciśnienia maksymalnego $P_{max} = 12.8$ MPa.

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.

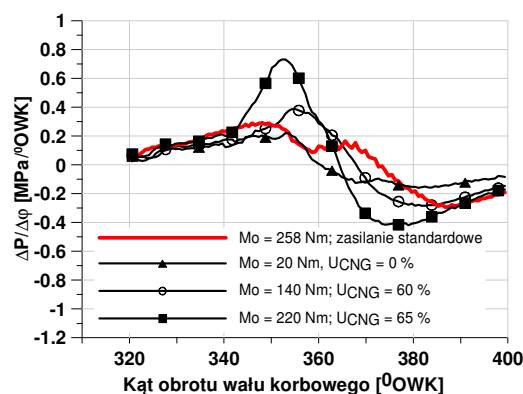
2.2. Szybkość narastania ciśnienia

Wysokie ciśnienia maksymalne obiegu pracy są wynikiem dużych wartości szybkości narastania ciśnienia. Szybkość narastania ciśnienia jest odpowiedzialna za twardą pracę silnika. Przy zasilaniu standardowym szybkość narastania ciśnienia nie przekracza wartości 0.3 MPa/ $^{\circ}$ OWK w całym zakresie obciążeń silnika.

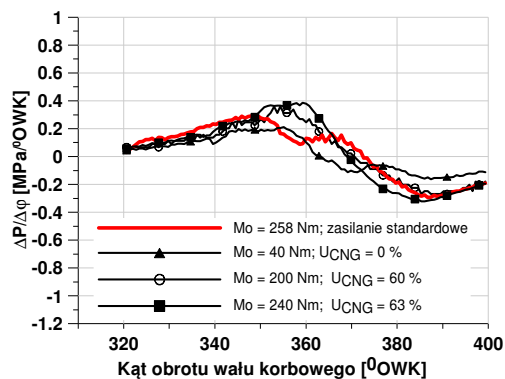


Rys.6. Fragmenty zarejestrowanych otwartych wykresów indykatorowych przy zasilaniu standardowym (linia ciągła) i maksymalnym obciążeniu oraz przy zasilaniu dwupaliwowym i różnych udziałach CNG. Dawka oleju napędowego inicjująca spalanie $d_{1ON} = 23.4$ mg/cykl

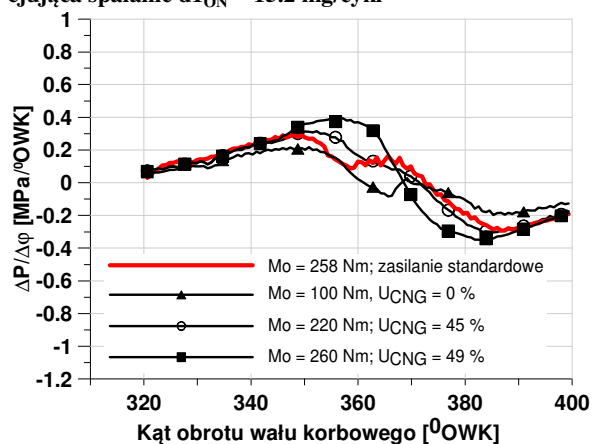
Szybkość narastania ciśnienia na tym poziomie jest uważana za miękką pracę silnika [7]. Analizując przebiegi szybkości narastania ciśnienia dla ww. trzech dawek oleju napędowego inicjujących spalanie (rys.7, rys.8, rys.9), udziały energetyczne CNG ustalone dla kryterium maksymalnego ciśnienia nie powodują nadmiernego wzrostu ich wartości. Dopiero zwiększenie ilości CNG prowadzi do zwiększenia szybkości narastania ciśnienia aż do poziomu 0.7 MPa/ $^{\circ}$ OWK odpowiedzialnej za twardą pracę silnika.



Rys.7. Szybkości narastania ciśnienia przy zasilaniu standardowym (linia ciągła) i maksymalnym obciążeniu oraz przy zasilaniu dwupaliwowym i różnych udziałach CNG. Dawka oleju napędowego inicjująca spalanie $d_{1ON} = 12.6$ mg/cykl



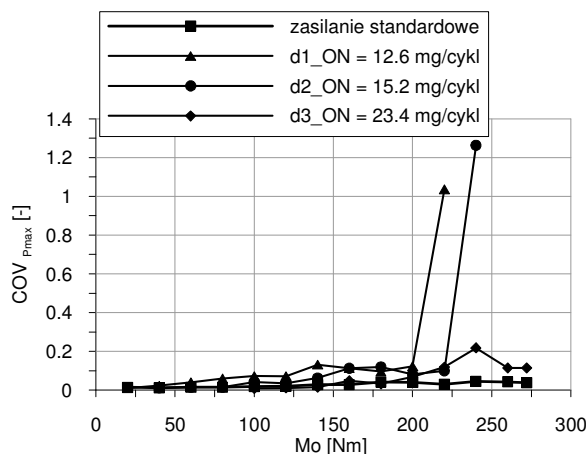
Rys.8. Szybkości narastania ciśnienia przy zasilaniu standardowym (linia ciągła) i maksymalnym obciążeniu oraz przy zasilaniu dwupaliwowym i różnych udziałach CNG. Dawka oleju napędowego inicjująca spalanie $d1_{ON} = 15.2$ mg/cykl



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 $d1_{ON} = 23.4$ mg/cykl

2.2. Niepowtarzalność ciśnień maksymalnych

Niepowtarzalność ciśnień maksymalnych dla zasilania standardowego i dwupaliwowego wyrażona przez współczynnik niepowtarzalności $COV_{P_{max}}$ jest na poziomie 0.2. Jedynie dla dawek oleju napędowego inicjujących spalanie $d1_{ON}$ i $d2_{ON}$ i dla maksymalnych obciążeń (przekraczających poziomy graniczne wynikające z ciśnień maksymalnych obiegów pracy) wskaźniki niepowtarzalności przekraczają wartości uzyskiwane przy zasilaniu standardowym (rys.10). Wynika z powyższego, że zasilanie dwupaliwowe, realizowane za pomocą układu common rail i wtrysku pośredniego CNG, nie powoduje podwyższenia stopnia niepowtarzalności ciśnień maksymalnych.

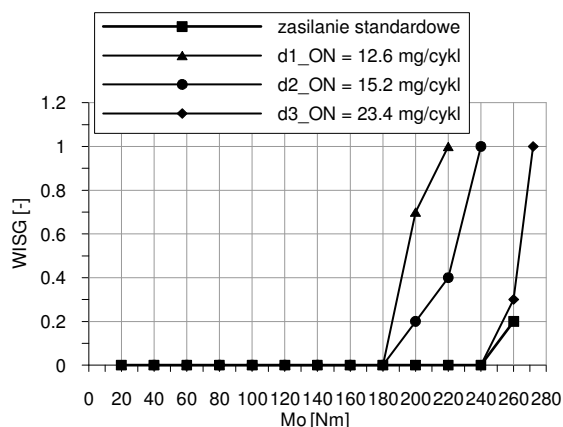


Rys.10. Zależność niepowtarzalności ciśnienia maksymalnego od obciążenia przy zasilaniu standardowym i zasilaniu dwupaliwowym przy różnych wielkościach dawki oleju napędowego inicjującej spalanie

Wzrost niepowtarzalności następuje przy przekroczeniu udziałów energetycznych CNG ponad poziom powodujący wzrost ciśnienia maksymalnego powyżej 10 MPa (poziom odpowiadający pracy silnika pod pełnym obciążeniem przy zasilaniu standardowym).

2.2. Wskaźnik intensywności stuku

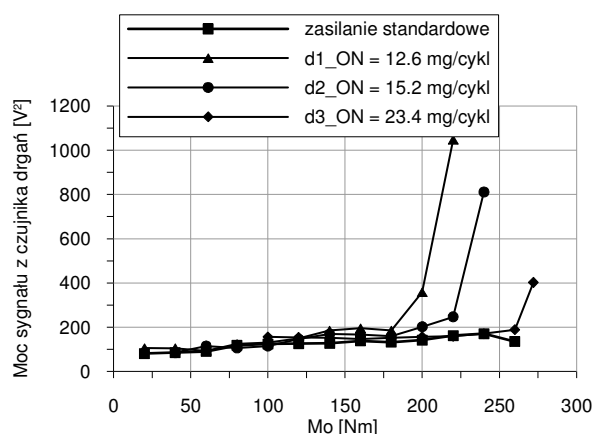
Wskaźnik intensywności stuku określający poziomy drgań głowicy wywołane procesem spalania (uwzględniający procesy spalania we wszystkich cylindrach) dla każdej dawki oleju napędowego inicjującej spalanie zwiększa swoją wartość ponad maksymalny poziom osiągnięty przy zasilaniu standardowym ale dopiero po przekroczeniu dopuszczalnych udziałów energetycznych CNG w ładunku (rys.11). Wynika z powyższego, że zjawisko stuku przy zasilaniu CNG nie jest zjawiskiem ograniczającym udział CNG w ładunku dostarczanym do cylindrów silnika. Związane to jest z dużą odpornością CNG na spalanie stukowe (liczba oktanowa około 130).



Rys.11. Zależność wskaźnika intensywności stuku od obciążenia przy zasilaniu standardowym i zasilaniu dwupaliwowym przy różnych wielkościach dawki oleju napędowego inicjującej spalanie

2.2. Moc sygnału drgań głowicy

Dodatkowo została wykonana analiza mocy sygnału z czujnika stuku. Miała ona potwierdzić mały wpływ drgań głowicy wywołanych procesem spalania na udział energetyczny CNG w ładunku. Na rysunku 12 przedstawiono zależności mocy sygnału drgań głowicy obliczanej dla całego cyklu roboczego obejmującego 720⁰OWK a więc uwzględniającego wpływ procesów spalania we wszystkich cylindrach. Moc sygnału drgań głowicy we wszystkich trzech analizowanych przypadkach zasilania dwupaliwowego jest na poziomie zbliżonym lub nieznacznie przekracza maksymalny poziom mocy sygnału drgań występujący przy zasilaniu standardowym. Podobnie, jak w przypadku wskaźnika intensywności stuku dopuszczalne wartości udziałów energetycznych CNG nie powodują nadmiernego wzrostu drgań głowicy. Wynika z powyższego, że w zakresie dopuszczalnych udziałów energetycznych CNG nie występuje spalanie stukowe.



Rys. 12. Zależność mocy sygnału z czujnika drgań (pełny cykl pracy) od obciążenia przy zasilaniu standardowym i zasilaniu dwupaliwowym przy różnych wielkościach dawki oleju napędowego inicjującej spalanie

3. 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) ciśnienia maksymalnego obiegu pracy,
- obserwowany przy nadmiernych udziałach energetycznych CNG, duży wzrost ciśnienia maksymalnego jest związany ze wzrostem szybkości narastania ciśnienia (ponad 0.6 MPa⁰OWK) odpowiedzialnej za twardą pracę silnika,
- ustalenie udziału CNG na poziomie odpowiadającym maksymalnym ciśnieniom spalania w warunkach maksymalnego obciążenia przy zasilaniu standardowym nie powoduje wzrostu niepowtarzalności ciśnień maksymalnych,
- o spalaniu ładunku bez zjawiska stuku (w zakresie dopuszczalnych obciążeń silnika zasilanego dwupaliwowo) świadczy również poziom wskaźnika intensywności stuku, który nie przekracza poziomu dla silnika zasilanego standardowo,
- potwierdzeniem ww. wniosku są wartości mocy sygnału drgań głowicy, które są również na poziomie odpowiadającym zasilaniu standardowemu.

Nomenclature/Skróty i oznaczenia

CNG Compressed Natural Gas/*sprężony gaz ziemny*,
NO_x Tlenki azotu,
P_{max} Ciśnienie maksymalne obiegu pracy,
ΔP/Δφ Szybkość narastania ciśnienia,

$\overline{\text{COV}}_{P_{\text{max}}}$ Współczynnik niepowtarzalności ciśnienia maksymalnego,
 $\sigma_{P_{\text{max}}}$ – Odchylenie standardowe ciśnienia maksymalnego w kolejnych 30 cyklach pracy,

\bar{P}_{\max}	Uśredniona z 30 cykli pracy wartość ciśnienia maksymalnego,	WSG	Wskaźnik stuku odniesiony do drgań głowicy,
OWK	Obroty wału korbowego,	PSG	Początek stuku odniesiony do drgań głowicy,
GMP	Górny martwy punkt,	WISG	Wskaźnik intensywności stuku odniesiony do drgań głowicy,
P_G	Moc sygnału drgań głowicy,	WSG_GR	Wartość graniczna wskaźnika stuku WSG,
Lp	liczba punktów pomiarowych w cyklu pracy,	N_{cykli}	Liczba analizowanych cykli pracy,
Ui	Wartość amplitudy sygnału napięciowego czujnika stuku,	L	Liczba cykli pracy z wartością WSG przekraczająca poziom graniczny (WSG_GR),
U_{CNG}	Udział energetyczny CNG w ładunku,		

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.: Microkomputer system for measurement of high speed parameters for IC engines, Bratislava 2001 8th EAEC Congres, 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 Technology.

Dr inż. Andrzej Różycki – adiunkt na Wydziale Mechanicznym Politechniki Radomskiej.

