

RÓŻYCKI Andrzej

ZJAWISKO STUKU W SILNIKU SPALINOWYM O ZAPŁONIE SAMOCZYNNYM ZASILANYM DWUPALIOWO

Streszczenie

W artykule przedstawiono zagadnienia związane ze zjawiskiem spalania stukowego w silniku o zapłonie iskrowym. Opis tego zjawiska zilustrowano zdjęciami przedstawiającymi komorę spalania z widocznym ogniskiem samozapłonu oraz odpowiadające temu zjawisku wysokoczęstotliwościowe pulsacje ciśnienia. Opis zjawiska spalania stukowego w silniku o ZI był wykorzystany do identyfikacji źródła wysokoczęstotliwościowych pulsacji ciśnienia występujących w komorze spalania silnika o ZS zasilanego bogatą mieszanką CNG-powietrze i LPG-powietrze. Przedstawiona została analiza amplitudowo-częstotliwościowa pulsacji ciśnienia i drgań głowicy. Na podstawie przeprowadzonej analizy stwierdzono, że do identyfikacji stuku (spalania stukowego i stuku wywołanego dużą szybkością narastania ciśnienia w cylindrze) w silniku o ZS zasilanym dwupaliowo może być wykorzystywana analiza drgań głowicy.

WSTĘP

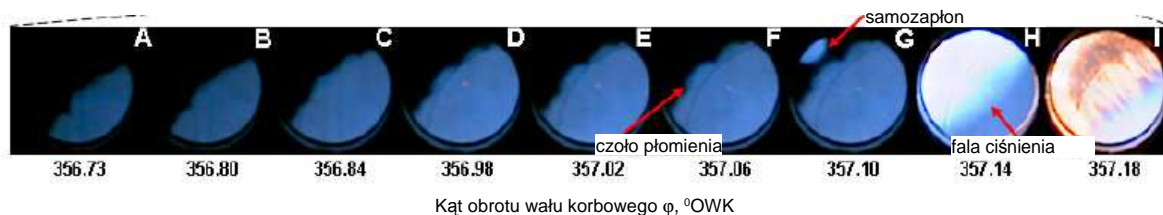
Analiza problemów występujących w silnikach o zapłonie samoczynnym zasilanych dwupaliowo z wykorzystaniem paliw alternatywnych wykazuje, że jednym z głównych zjawisk ograniczających osiągi tego typu silników jest zjawisko stuku.

Zjawisko stuku w silniku o ZI po raz pierwszy zidentyfikował Harry Ricardo. Według niego zjawisko stuku (spalania stukowego) polegało na przedwczesnym zapłonie mieszanki paliwowo powietrznej na skutek kontaktu z przegrzаныmi ściankami cylindra [1].

Ogólnie można powiedzieć, że zjawisko stuku w silniku spalinowym objawia się słyszalnymi na zewnątrz silnika dźwiękami o dużej częstotliwości w zakresie $1 \div 10$ kHz wywołanych przez drgające elementy konstrukcyjne silnika. Częstotliwość ta jest zależna od źródła wywołującego drgania jak i od konstrukcji komory spalania silnika.

1. ZJAWISKO SPALANIA STUKOWEGO W SILNIKU O ZI

Obecnie za główne źródło drgań uważa się pulsacje ciśnienia w komorze spalania silnika o ZI występujące w okresie spalania spowodowane samozapłonem homogenicznej mieszanki w strefie niespalonej (rys.1.1). Pulsacje te są wyraźnie widoczne na wykresie indykatorowym. Początek tych pulsacji występuje zwykle w okolicy GMP. Maksymalna amplituda pulsacji ciśnienia w okresie spalania dochodzi do 1MPa (rys.1.2).

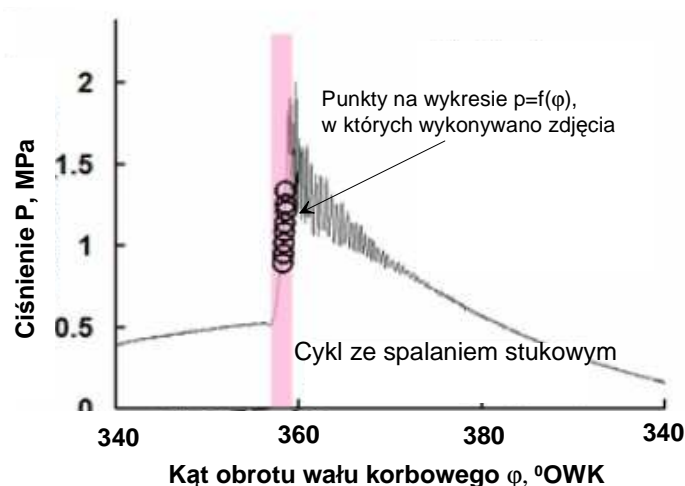


Rys.1.1 Kolejne zdjęcia obszaru komory spalania położonego w pobliżu ścianki cylindra w cyklu pracy ze spalaniem stukowym wykonane szybką kamerą cyfrową. Prędkość rejestracji wynosiła 80000 klatek na sekundę

Źródło: [2]

Na zdjęciach (rys.1.1) wykonanych szybką kamerą cyfrową pokazane są zdjęcia kolejnych faz rozwoju płomienia w mieszance wodorowo-powietrznej silnika o ZI. Obszar objęty płomieniem pochodzącym od iskry zapłonowej oznaczony jest kolorem niebieskim. Na zdjęciu wykonanym przy kącie obrotu wału korbowego wynoszącym 357.10° OWK widoczny jest odizolowany obszar koloru niebieskiego, który nie posiada ciągłości z płomieniem pochodzącym od świecy zapłonowej. Wskazuje to na powstanie niekontrolowanego obszaru objętego płomieniem pochodzącym od samozapłonu powstałego w strefie poza głównym obszarem spalania. Zjawisko samozapłonu i niekontrolowanego spalania jest źródłem wspomnianych wyżej wysokoczęstotliwościowych pulsacji (rys.1.2).

Na rysunku 1.2 dodatkowo zaznaczono zakres położenia wału korbowego, w którym były wykonywane zdjęcia szybką kamerą cyfrową przedstawione na rysunku 1.1.



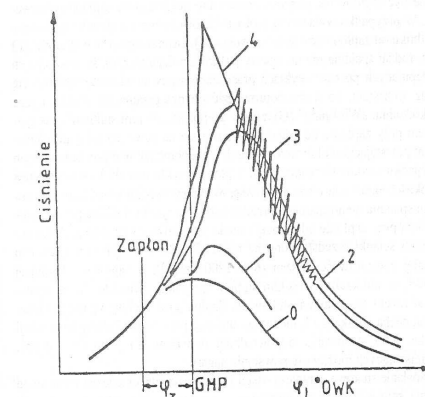
Rys.1.2. Pulsacje ciśnienia w warunkach spalania stukowego z zaznaczonym zakresem położenia wału korbowego, w którym były wykonywane zdjęcia szybką kamerą cyfrową

Źródło: [2]

Na powyższych rysunkach przedstawiono efekty zjawiska spalania stukowego w oparciu o wyniki wizualizacji i pomiary ciśnień w silniku o ZI zasilanym mieszanką wodorowo-powietrzną. Podobne wyniki są prezentowane w publikacjach [3, 4].

Według rozważań zawartych w [3, 5] można zdefiniować dwa rodzaje spalania stukowego:

- spark knock – spalanie stukowe zależne od kąta zapłonu i prawdopodobnie wywołane samozapłonem mieszanki palnej,
- knock surface ignition – spalanie stukowe wywołane zapłonem powierzchniowym mieszanki (od gorącej ścianki rysunek 1.3).

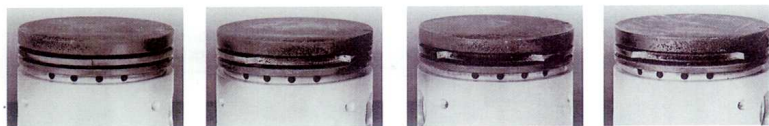


Rys.1.3. Wykresy indykatorowe przebiegów spalania przy zapłonie od gorącej ścianki przy coraz wyższych temperaturach ścianki: 0 – silnik napędzany z obcego źródła energii, 1 – spalanie przy zapłonie od gorącej ścianki (niska temperatura ścianki), 2 – spalanie normalne, 3 – spalanie stukowe zainicjowane zapłonem od gorącej ścianki przy temperaturze ścianki wyższej od przypadku 1, 4 - spalanie typu „rumble” zainicjowane od gorącej ścianki w silnikach o wysokim stopniu sprężania

Źródło: [6]

Jak wspomniano na wstępie powstawanie tego rodzaju zjawiska spalania stukowego od gorącej (przegrzanej) ścianki cylindra jako pierwszy dostrzegł i opisał H. Ricardo [1].

Procesowi spalania, w warunkach częściowych i pełnych obciążeń, przeważnie towarzyszą pulsacje ciśnienia, jednakże ich intensywność ma niewielki wpływ na osiągi i trwałość silnika. Dopiero gdy intensywność tych pulsacji nadmiernie wzrasta może być ona przyczyną obniżenia osiągu oraz trwałego uszkodzenia silnika. Efekty wystąpienia uszkodzeń spowodowanych spalaniem stukowym przedstawiono na rysunku 1.4.



Rys.1.4. Uszkodzone na skutek spalania stukowego półki pod rowkami pierścieniowymi

Źródło: [7]

1.1. Wskaźniki stuku w silniku o ZI

W celu określenia poziomu dopuszczalnej wartości intensywności pulsacji ciśnienia w cylindrze świadczącej również o wystąpieniu spalania stukowego potrzebne jest zdefiniowanie wskaźników bazujących na zjawiskach występujących w czasie spalania stukowego. Do zjawisk tych można zaliczyć pulsacje ciśnienia w cylindrze oraz drgania elementów silnika (kadłuba, głowicy itp.) wymuszone przez zjawiska występujące w procesie spalania.

Większość wskaźników stuku bazuje na analizie intensywności pulsacji ciśnienia w pojedynczym cyklu pracy [8, 9].

Znane są również wskaźniki oparte na analizie sygnału wibracyjnego elementów konstrukcyjnych silnika (głowica, kadłub) [10, 11] oraz sygnale akustycznym emitowanym przez silnik [12].

2. PRÓBA OPISU ZJAWISKA STUKU W DWUPALIWOWYM SILNIKU O ZS

Jak wspomniano powyżej definicje wskaźników identyfikujących zjawisko spalania stukowego bazują na wysokoczęstotliwościowych pulsacjach ciśnienia w komorze spalania w silniku o ZI. Duży poziom pulsacji ciśnienia występujący przy spalaniu stukowym generuje wysokoczęstotliwościowe drgania elementów silnika słyszalne na zewnątrz (dźwięki o częstotliwości powyżej 1kHz identyfikowane jako metaliczne postukiwanie).

W silniku o zapłonie samoczynnym, przy standardowym zasilaniu (ładunek uwarstwiony) nie występuje zjawisko spalania stukowego zdefiniowane tak, jak dla silnika o ZI, ponieważ w strefie niespalonej (pomiędzy strugami wtryskiwanego ON) jest czyste powietrze (lub bardzo uboga mieszanka paliwowo-powietrzna). Słyszalne na zewnątrz silnika dźwięki o wysokiej częstotliwości ($7\div 10$ kHz) kojarzone ze spalaniem stukowym mogą się pojawiać na skutek dużych przyrostów ciśnienia występujących w okolicach GMP związanych z pierwszą fazą procesu spalania, w której dominuje spalanie kinetyczne charakteryzujące się dużymi wartościami szybkości wydzielania ciepła wywołującymi chwilowe przyrosty ciśnienia przekraczające $0.3 \text{ MPa}^{\circ}\text{OWK}$ (rys.2.1a).

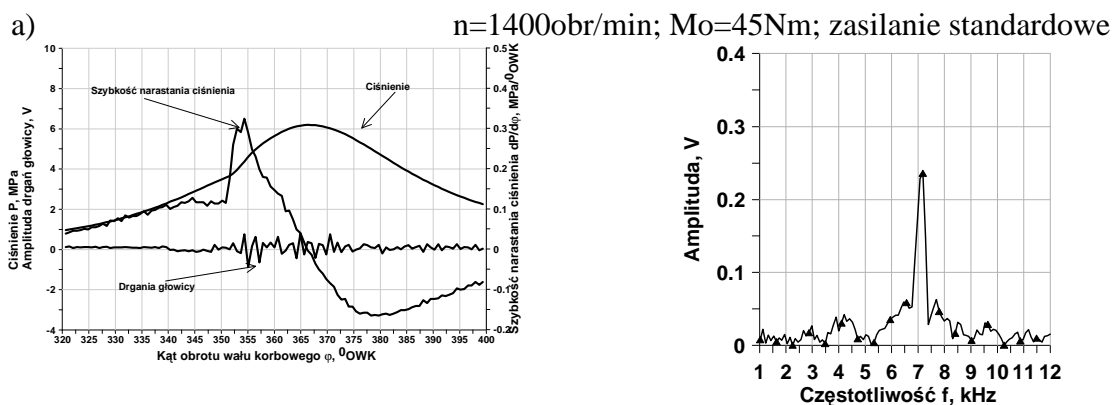
Zjawisko to nasila się przy przyspieszaniu kąta początku wtrysku ON. Praca silnika o ZS przy szybkości narastania ciśnienia w zakresie $0.3\div 0.6 \text{ MPa}^{\circ}\text{OWK}$ uznawana jest, jako twarda praca [13]. Przekroczenie poziomu $0.6 \text{ MPa}^{\circ}\text{OWK}$ (rys.2.1b) wywołuje wysokoczęstotliwościowe drgania elementów konstrukcyjnych silnika (podobnie jak przy spalaniu stukowym zachodzącym w silniku o ZI). Na zewnątrz silnika wyraźnie słychać metaliczne dźwięki. Zjawisko to nazywane bywa również „młotowaniem” silnika [13].

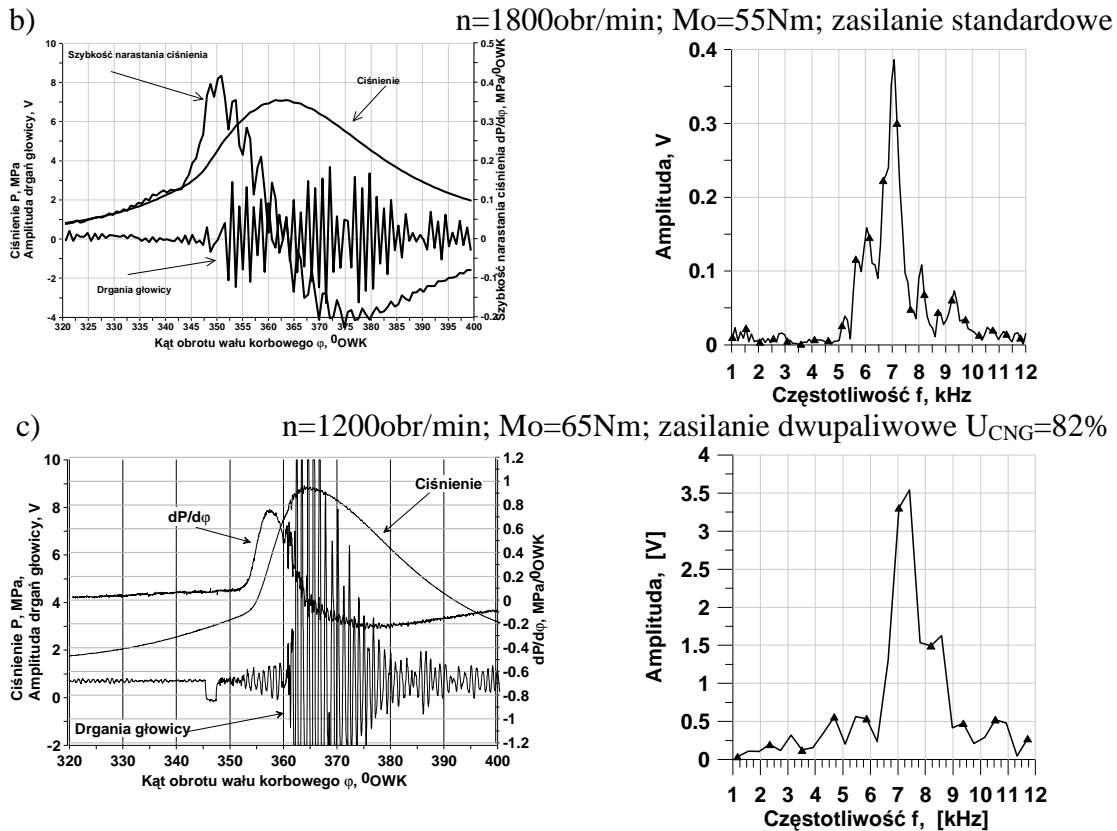
Przekroczenie poziomu $0.6 \text{ MPa}^{\circ}\text{OWK}$ pojawia się często przy zasilaniu dwupaliwowym ze zbyt dużym udziałem energetycznym paliwa gazowego (rys.2.1c). W przytoczonym przykładzie silnik był zasilany dwupaliwowo CNG i olejem napędowym.

Występuje wówczas typowe spalanie stukowe identyczne, jak w silniku o ZI. Zjawisko to nasila się w warunkach pełnego obciążenia, przy którym następuje znaczne wzbogacenie homogenicznej mieszanki paliwa alternatywnego i powietrza wypełniającej obszar między wtryskiwanymi strugami inicjującej zapłon dawki ON (rys.2.1c).

Analiza wykresów indykatorych zarejestrowanych przed uszkodzeniem tłoka potwierdziła duży przyrost pulsacji ciśnienia w czasie spalania ładunku o dużym udziale energetycznym LPG w ładunku dostarczonym do cylindra (zakres obciążeń maksymalnych silnika) przekraczającym 50%:

Silnik pracował przy regulacji kąta początku wtrysku wynoszącej 30° OWK przed GMP.





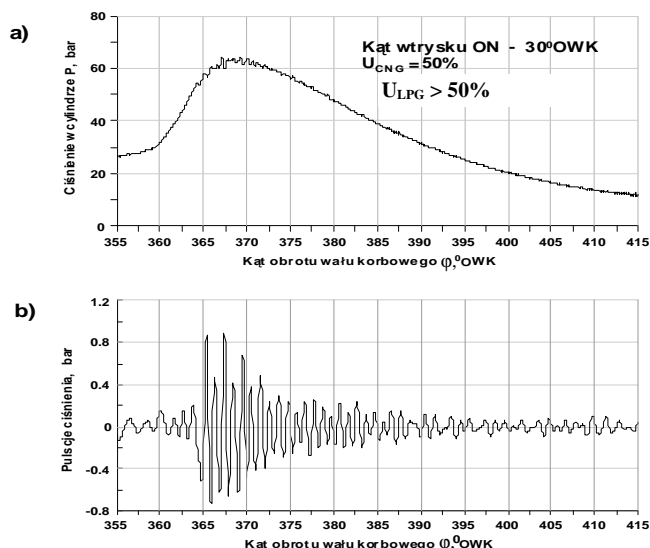
Rys.2.1. Przykładowe przebiegi ciśnienia, szybkości narastania ciśnienia i drgania głowicy (amplituda drgań głowicy proporcjonalna do sygnału napięciowego piezokwarcowego czujnika stuku) oraz odpowiadająca drganiom głowicy charakterystyka amplitudowo częstotliwościowa uzyskana za pomocą szybkiej transformaty Fouriera FFT. Zasilanie standardowe i dwupaliwowe

Źródło: [badania własne]

Przebieg ciśnienia $P=f(\varphi)$ w warunkach spalania stukowego przedstawiono na rys.2.2.

Wyeliminowanie tego zjawiska może być realizowane przez zwiększanie w mieszance udziału oleju napędowego lub opóźnianie początku wtrysku dawki oleju napędowego inicjującej proces spalania.

Podstawowym zagadnieniem przy doborze parametrów regulacyjnych silnika dwupaliwowego jest prawidłowe zdiagnozowanie zjawisk świadczących o nienormalnym współspalaniu paliw dostarczanych do cylindra. Główne zjawiska, jak wspomniano powyżej to nadmierny wzrost poziomu szybkości narastania ciśnienia oraz spalanie stukowe.



Rys.2.2. Fragment otwartego wykresu indykatorowego przedstawiający : a) przebieg ciśnienia w okresie spalania, b) odfiltrowany przebieg ciśnienia przedstawiający wysokoczęstotliwościowe pulsacje ciśnienia. Prędkość obrotowa $n = 1800 \text{ obr/min}$, moment obrotowy $M_o = 50 \text{ Nm}$, paliwo główne – LPG

Źródło: [badania własne]

Dodatkowo może wystąpić typowy dla procesu spalania w silniku o ZS nadmierny wzrost poziomu emisji tlenków azotu oraz cząstek stałych. W przypadku zasilania dwupaliwowego obserwuje się również wzrost emisji węglowodorów. Jednakże głównym zagrożeniem mogącym prowadzić do zmniejszenia trwałości a nawet uszkodzenia silnika są przeciążenia konstrukcji elementów silnika spowodowane nadmiernymi przyrostami ciśnienia w cylindrze spowodowane nadmierną szybkością narastania ciśnienia oraz wysokoczęstotliwościowymi pulsacjami ciśnienia towarzyszącymi spalaniu stukowemu.

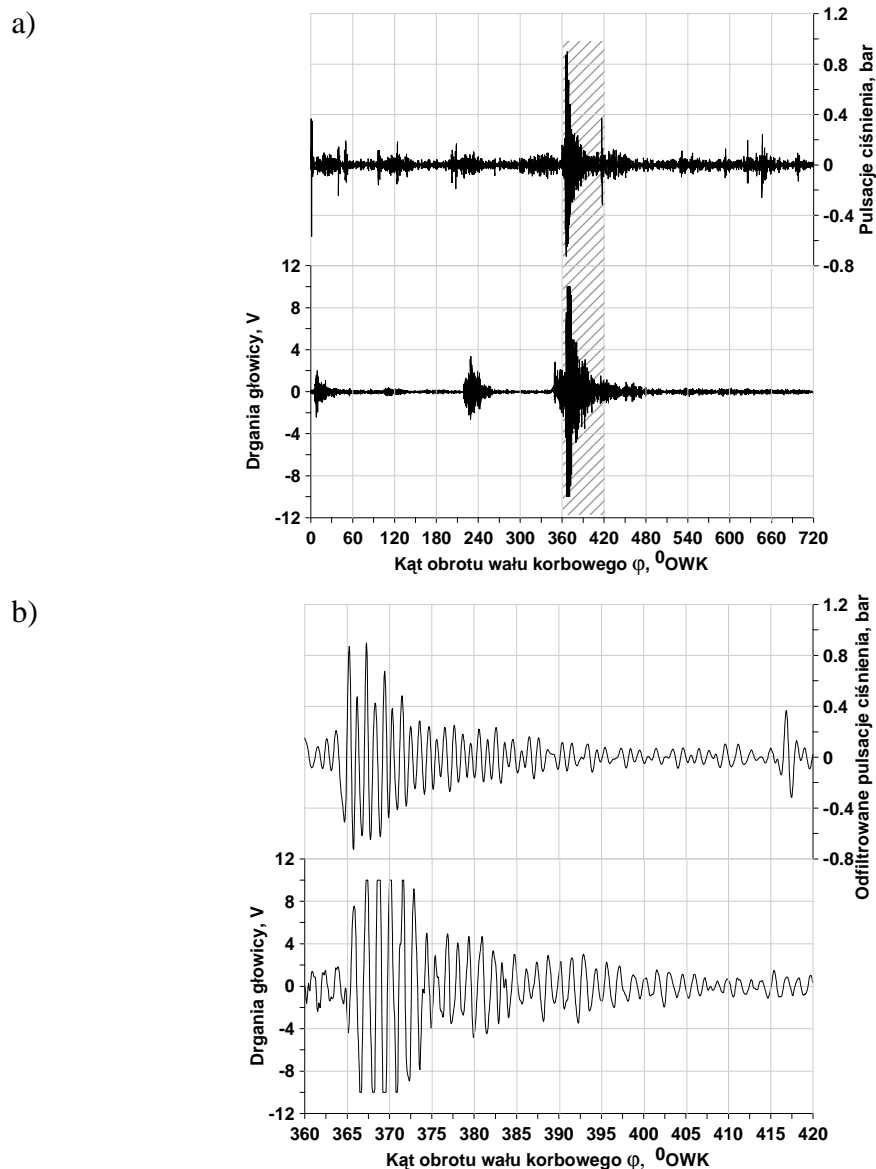
Zjawiska te są jednym z głównych czynników wzbudzających drgania w elementach konstrukcyjnych silnika. Drgania te są przenoszone na zewnątrz silnika i są słyszalne jako wysokoczęstotliwościowe dźwięki. Można zatem przyjąć, że analizując poziom drgań głowicy bądź kadłuba możliwe jest zidentyfikowanie spalania nienormalnego oraz intensywność występowania tego zjawiska (opisane procentowym udziałem w kolejnych cyklach pracy). Pod pojęciem spalania nienormalnego w silniku o ZS zasilanym standardowo lub dwupaliwowo należy rozumieć nadmierne wartości szybkości narastania ciśnienia spowodowane gwałtownym wydzielaniem energii (pierwsza faza spalania z dużym udziałem spalania kinetycznego) oraz nadmiernymi wartościami amplitudy pulsacji ciśnienia spowodowanymi spalaniem stukowym (zjawisko to występuje tylko przy zasilaniu dwupaliwowym przy dużym udziale paliwa o małej liczbie cetanowej). W obydwu przypadkach spalanie nienormalne generuje drgania elementów konstrukcyjnych silnika.

Potwierdzenie zależności pomiędzy wartością amplitudy drgań głowicy a wartościami amplitudy pulsacji ciśnienia w cylindrze przedstawiono na rysunku 2.3a i b. Zamieszczone przebiegi były zarejestrowane w trakcie badań wykonanych w ramach prac badawczych związanych z zasilaniem dwupaliwowym silnika o ZS.

Należy nadmienić, że zwykle zjawisku spalania stukowego towarzyszy duży poziom wartości szybkości narastania ciśnienia. Jednakże, w przypadku zasilania dwupaliwowego z wykorzystaniem odpornego na samozapłon CNG ($LO \cong 130$) możliwe jest wystąpienie dużych przyrostów ciśnienia (około $6 \text{ MPa}^0\text{OWK}$) bez wystąpienia zjawiska spalania stukowego.

Prezentowane na rysunkach 2.3 wyniki badań własnych autora dotyczą jednocylindrowego dwupaliwowego silnika o ZS wyposażonego w układ common rail

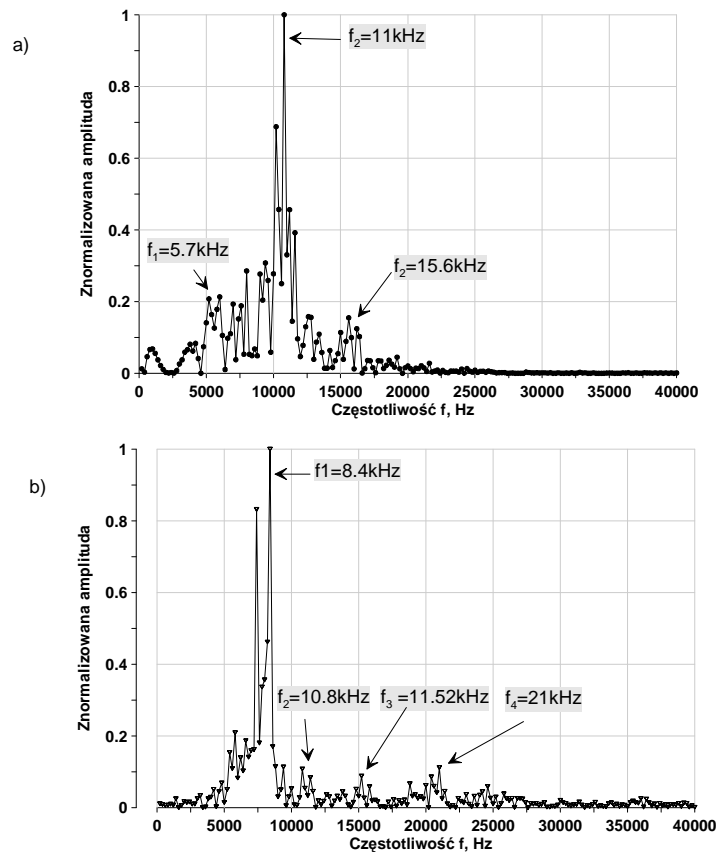
i wtrysk pośredni paliwa LPG. Prace nad tego typu zasilaniem zostały opisane [14, 15]. Z przebiegu pulsacji ciśnienia i drgań głowicy w pełnym cyklu pracy wynika, że gwałtowny wzrost amplitudy: drgań głowicy i pulsacji ciśnienia występuje przy tym samym kącie położenia wału korbowego φ [$^{\circ}$ OWK].



Rys.2.3. Przebiegi zmian amplitudy drgań głowicy i pulsacji ciśnienia a) w pełnym cyklu pracy i b) w zakresie kątowym $360\div 420^{\circ}$ OWK. Zasilanie dwupaliwowe (LPG+ON), $n=1800$ obr/min, $M_o=50$ Nm

Źródło: [badania własne]

Analizę amplitudowo-częstotliwościową wykonano w wybranym zakresie kątowym cyklu pracy wynoszącym 60° OWK. Do analizy wykorzystano szybką transformatę Fouriera. Wyniki analizy wykazują (rys.2.4a), że dominującą częstotliwością (duża wartość znormalizowanej amplitudy) w widmie pulsacji ciśnienia jest częstotliwość $f_2 = 11$ kHz. W widmie pulsacji ciśnienia można również wyodrębnić częstotliwości o zdecydowanie mniejszych amplitudach $f_1 = 5.7$ kHz i 15.6 kHz.



Rys.2.4. Widmo a) pulsacji ciśnienia, b) drgań głowicy w czasie spalania
 Źródło: [badania własne]

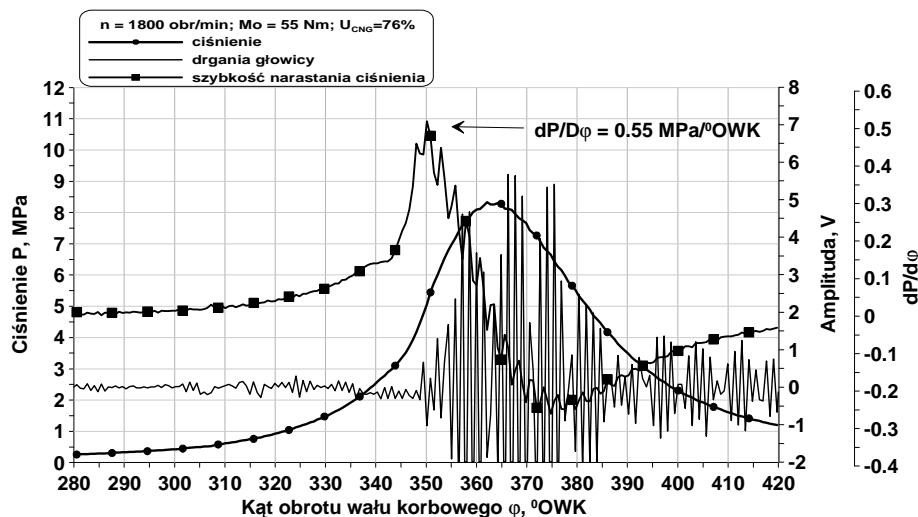
Wyodrębnione na powyższych wykresach dominujące częstotliwości odpowiadają częstotliwościom drgań własnych gazów wypełniających komorę spalania.

Analiza pulsacji ciśnienia i drgań głowicy wykazała, że:

- położenia kątowne początku wystąpienia silnych pulsacji ciśnienia i dużych amplitud drgań głowicy są prawie identyczne,
- dominujące częstotliwości na charakterystyce amplitudowo-częstotliwościowej są podobne.

Biorąc pod uwagę, że początek drgań głowicy o dużej amplitudzie następuje przy tym samym kącie OWK co początek silnych pulsacji ciśnienia w cylindrze oraz, że częstotliwości pulsacji ciśnienia i drgań głowicy są podobne. Można stwierdzić, że w silniku o ZS zasilanym dwupaliwowo ON i LPG, przy dużych udziałach energetycznych LPG w mieszance występuje spalanie stukowe, którego intensywność można określać na podstawie drgań głowicy.

Duża intensywność drgań głowicy, jak wspomniano wcześniej może wystąpić na skutek znacznych (powyżej $0.3 \text{ MPa}^0/\text{OWK}$) szybkości narastania ciśnienia spalania. Zobrazowano to na rysunku 2.5.



Rys.2.5. Przykładowe przebiegi ciśnienia, szybkości narastania ciśnienia i drgań głowicy przy dużych wartościach szybkości narastania ciśnienia generujących stuk. Zasilanie dwupaliwowe CNG – ON

Źródło: [badania własne]

Rozważania powyższe prowadzą do wniosku, że w silniku o zapłonie samoczynnym zasilanym standardowo lub dwupaliwowo drżania głowicy informują o występowaniu nienormalnego spalania mogącego doprowadzić do obniżenia trwałości silnika a nawet do jego uszkodzenia. Poza tym duże szybkości narastania ciśnienia są odpowiedzialne za wysokie wartości temperatur w trakcie spalania a więc i wysoką emisję tlenków azotu NOx.

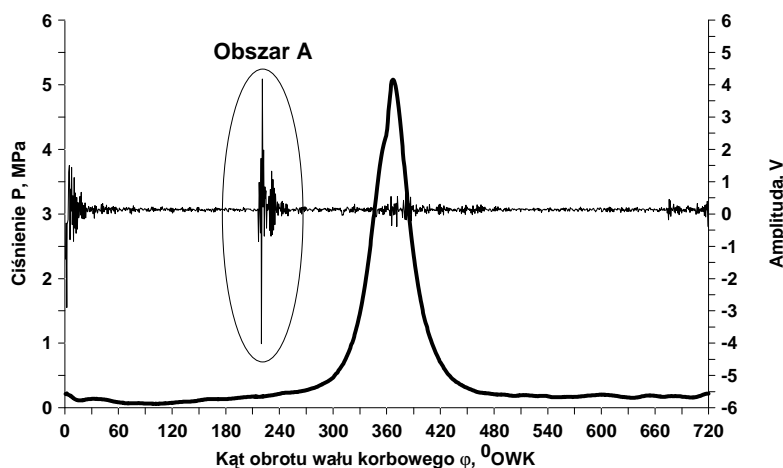
Analiza dotycząca drgań głowicy silnika o ZS zasilanego standardowo lub dwupaliwowo prowadzi do wniosku, że amplituda drgań głowicy w okresie spalania jest prostym do zmierzenia wskaźnikiem spalania stukowego lub spalania z dużą szybkością narastania ciśnienia i może być wykorzystana w algorytmach sterowania silnika.

Istotnym warunkiem przy stosowaniu amplitudy drgań głowicy do oceny procesu spalania jest to aby wyznaczana była ona w okresie spalania ponieważ w fazie przekrycia zaworów dolotowych i wylotowych oraz zamknięcia zaworu dolotowego mogą wystąpić duże amplitudy drgań głowicy wywołane zjawiskami przepływowymi przy małych czasoprzekrojach występujących w fazie otwierania i zamykania zaworów. Również drżania te mogą być generowane przez uderzenia grzybka zaworu w gniazdo zaworowe.

Amplitudy drgań głowicy w pełnym cyklu pracy przedstawiono na rysunku 2.6.

Wielkościami, którymi można opisać pulsacje ciśnienia są wskaźniki stuku bazujące na wielkościach charakteryzujących drżania głowicy lub kadłuba.

W niniejszym opracowaniu skupiono się głównie na analizie częstotliwości i amplitudy drgań głowicy występujących w okresie spalania. Analiza zmienności parametrów drgań, a w szczególności amplitudy, w całym cyklu pracy może prowadzić do błędnej interpretacji przyczyn występowania dużych wartości amplitudy drgań. Może być ona wywoływana wymuszeniem pochodzącym od uderzeń zaworów o gniazda zaworowe oraz szumów generowanych przez przepływy gazów przez szczeliny zaworowe. Sytuację tą zilustrowano na poniższym wykresie (rys. 2.6).



Rys.2.6. Przebiegi ciśnienia i drgań głowicy z wyraźnie większą amplitudą drgań głowicy (obszar A) w okresie zamknięcia zaworu dolotowego

Źródło: [badania własne]

PODSUMOWANIE

Podsumowując przedstawione powyżej analizy można stwierdzić, że do identyfikacji nienormalnego spalania obniżającego trwałość i niezawodność działania silnika o ZS zasilanego standardowo i dwupaliwowo może być wykorzystany sygnał informujący o poziomie drgań głowicy. Charakter zmian tego sygnału w całym cyklu pracy pozwala na stwierdzenie, że do określenia poziomu spalania nienormalnego (spalania stukowego bądź zbyt dużych przyrostów ciśnienia w jednostce czasu) może być wykorzystana maksymalna amplituda drgań głowicy.

Warunkiem koniecznym przy określaniu tej amplitudy jest aby analiza była wykonywana w okresie spalania. Wykorzystanie do analizy poziomu niekorzystnego przebiegu ciśnienia w cylindrze tylko maksymalnej amplitudy stwarza warunki do łatwego (w czasie rzeczywistym) i szybkiego pomiaru tego parametru a następnie do wykorzystania go w algorytmach sterujących pracą silnika.

Ze względu na fakt, że przy dużym poziomie drgań głowicy słyszalny jest na zewnątrz silnika wysokoczęstotliwościowy metaliczny dźwięk w dalszej części pracy do określania niebezpiecznego poziomu drgań głowicy będzie używane pojęcie stuku. W literaturze angielskojęzycznej często stosowane jest równoznaczne pojęcie *diesel knock*.

BIBLIOGRAFIA

1. http://www-g.eng.cam.ac.uk/125/1900-1925/ricardo_engine.html.
2. Kawahara N., Tomita E.: Visualization of auto-ignition and pressure wave during knocking in hydrogen spark-ignition engine. International Journal Of Hydrogen Energy 34 (2009) 3156-3163.
3. Heywood J. B. Internal combustion engines fundamentals. McGraw Hill Inc, New York 1988
4. Li H., Karim G. A. Experimental investigation of the knock and combustion characteristics of CH₄, H₂, CO and some of their mixtures. Proc. Inst. Mech. Eng., 220, 5, Part A: Journal Power and Energy, 2006.
5. Liu Z., Karim G. A.: Knock In Dual Fuel Engines, International Symposium COMODIA 94 (1994).
6. Löhner K., Miller H.: Gemischbildung und Verbrennung im Ottomotor. Springer Verlag , Wien , N. York , 1967.
7. SCHELLING H., FREIER R., GEISSELBRECHT M.: MEASUREMENT OF VARIOUS INFLUENCING FACTORS ON PISTON LOAD DURING KNOCKING COMBUSTION. TECHNICAL INFORMATION. MAHLE GMBH, STUTTGA.

8. Chun K. M., Heywood J. B. Characterization of knock in a spark-ignition engine. SAE Paper 890156, 1989.
9. Puzinauskas P. V. Examination of methods used to characterize engine knock. SAE Paper 920808, 1992.
10. Schmillen K. P., Rechs M. Different methods of knock detection and knock control. SAE Paper 910858, 1991.
11. Szwaja S.: Studium pulsacji ciśnienia spalania w tłokowym silniku spalinowym zasilanym wodorem. Seria monografie nr 182. Wydawnictwo Politechniki Częstochowskiej. Częstochowa 2010.
12. Gu F., Li W., Ball A.D., Leung A.Y.T.. The condition monitoring of diesel engines using acoustic measurements part 1:acoustic characteristics of the engine and representation of the acoustic signals. SAE paper 2000-01-0730.
13. Wajand J.A., Wajand J.T.: Tłokowe silniki spalinowe, WNT, W-wa 2000.
14. Luft S., Różycki A.: Badania dwupaliwowego silnika o zapłonie samoczynnym zasilanego ubogą, homogeniczną mieszanką gazów propan-butan i powietrza. Projekt KBN Nr 9T12D 012 17.
15. Różycki A.: „Wybrane aspekty procesu spalania w dwupaliwowym silniku o zapłonie samoczynnym zasilanym wtryskowo paliwem LPG w fazie ciekłej, Silniki Gazowe – wybrane zagadnienia, pod redakcją A. Dużyńskiego, seria monografie nr 183, Wydawnictwo Politechniki Częstochowskiej, str. 447 – 459.

PHENOMENON OF KNOCK IN A DUAL-FUEL DIESEL ENGINE

Abstract

The paper presents issues related to the phenomenon of knocking combustion in a diesel engine. Description of this phenomenon was illustrated with photographs presenting the combustion chamber with noticeable autoignition point and related high-frequency pressure pulsations. Description of knocking combustion in a spark-ignition engine was applied in the identification of the source of high-frequency pressure pulsations that occur in the combustion chamber of a diesel engine fuelled with reach CNG-air and LPG-air mixtures. Amplitude-frequency analysis of pressure pulsations and cylinder head vibrations was presented. It was stated, on the basis of the carried out study, that the analysis of cylinder head vibrations may be applied in an identification of knock (knocking combustion and knock resulting from a high rate of pressure rise in the cylinder) in a dual-fuel diesel engine.

Autorzy:

Dr inż. Andrzej Różycki – Uniwersytet Technologiczno - Humanistyczny im. Kazimierza Pułaskiego w Radomiu, Instytut Eksploatacji Pojazdów i Maszyn, Zakład Pojazdów i Silników Spalinowych, [mailto:e-mail: andrzej.rozycki@pr.radom.pl](mailto:andrzej.rozycki@pr.radom.pl)