

## Research of knock phenomenon in diesel engine powered with oxygenated fuels

*Abstract: A diesel knock is a phenomenon which can be unfavorable because it causes noise increase. The main sources of the acoustic emission are combustion chamber resonances. It is caused by high-frequency pressure oscillations inside the cylinder during a fuel combustion process. In some cases high-intensity of knock can lead to the damage of pistons, other parts of the engine and its premature wear. The use of some kinds of alternative fuels in diesel engine may increase knocking intensity. It is typical for the fuels with lower cetane number. The examples of such fuels are blends of selected alcohols or ethers with diesel oil. The use of these oxygenated fuels reduces emissions of most harmful pollutants from diesel engine, but can increase the knock intensity and the rate of pressure rise in a combustion chamber.*

*Paper presents possibilities of using wavelet transform in application to research of knock phenomenon in diesel engine powered with selected oxygenated fuels.*

**Key words:** wavelet transform, engine knock, signals decomposition, alternative fuels, fuel combustion

### Badania zjawiska stuku w silniku o zapłonie samoczynnym zasilanym paliwami tlenowymi

*Streszczenie: Stuk w silniku o zapłonie samoczynnym jest zjawiskiem, które może być niekorzystne, ponieważ powoduje wzrost emisji dźwięku. Głównymi źródłami tej emisji są drgania rezonansowe komory spalania. Jest to spowodowane wysokoczęstotliwościowymi oscylacjami ciśnienia zachodzącymi wewnątrz cylindra podczas procesu spalania paliwa. W niektórych przypadkach, wysoka intensywność stuku może prowadzić do uszkodzenia tłoków, innych części silnika i przyspieszać jego zużycie. Wykorzystanie niektórych rodzajów paliw alternatywnych w silniku o zapłonie samoczynnym może zwiększyć intensywność stuku. Jest to typowe dla paliw o niższej liczbie cetanowej. Przykładem takich paliw są mieszaniny wybranych alkoholi lub eterów z olejem napędowym. Użycie tych paliw obniża emisję szkodliwych składników spalin z silnika o zapłonie samoczynnym, ale może zwiększyć intensywność stuku i prędkość narastania ciśnienia w komorze spalania.*

*Artykuł przedstawia możliwości wykorzystania transformaty falkowej w zastosowaniu do badań zjawiska stuku silnika o zapłonie samoczynnym zasilanego wybranymi rodzajami paliw zawierających tlen.*

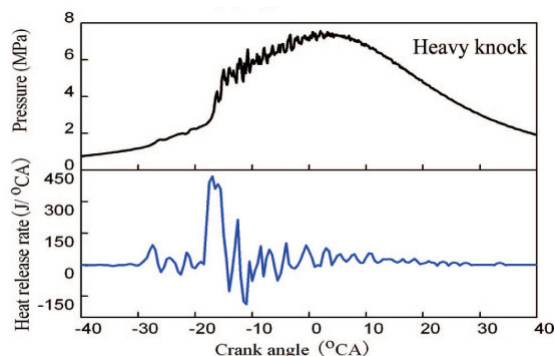
**Słowa kluczowe:** transformata falkowa, stuk silnika, dekompozycja sygnałów, paliwa alternatywne, spalanie paliwa

### 1. Wprowadzenie

Stuk silnika jest zjawiskiem akustycznym, którego źródłem są procesy zachodzące w komorze spalania. W określonych warunkach jest ona pobudzana do drgań rezonansowych, które przenoszą się na pozostałe elementy konstrukcyjne silnika. Wibracje tych elementów są następnie rozprzestrzeniane do otoczenia i mogą być słyszalne dla człowieka. W takim przypadku są one przez niego porównywane do metalicznych uderzeń – stąd określenie „stuk silnika”. Jak już wspomniano, podstawowym źródłem powstawania tego zjawiska są procesy występujące w komorze spalania. Zachodzą one odmiennie w silnikach o zapłonie iskrowym i samoczynnym. W przypadku tych pierwszych, proces spalania jednorodnej mieszanki paliwowej zachodzi zazwyczaj w sposób uporządkowany. Oznacza to, że płomień rozprzestrzenia się od iskry w kierunku ścian komory spalania, czemu towarzyszą niewielkie prędkości narastania ciśnienia. Są one na tyle małe, że nie powodują znaczących drgań komory spalania. Jednak w silniku o

zapłonie iskrowym może dojść do sytuacji, w której pojawia się dodatkowe źródło zapłonu mieszanki palnej. W takim przypadku dochodzi do gwałtownej interakcji pomiędzy rozprzestrzeniającymi się falami ciśnienia. Ulegają one gwałtownemu wzmocnieniu, a następnie oscylują aż do wygaszenia. Takie spalanie określane jest jako stukowe i ma ono wpływ nie tylko na zwiększoną emisję akustyczną silnika, ale także przyczynia się do intensyfikacji procesów jego zużycia [5].

Gwałtowne oscylacje ciśnienia w komorze spalania mogą wystąpić nie tylko w silnikach o zapłonie iskrowym. Są one charakterystyczne także dla silników o zapłonie samoczynnym, w tym także pracujących wg koncepcji HCCI, czego przykład pokazano na rys. 1. Przedstawia on fragment zmian ciśnienia zarejestrowanego w cylindrze silnika o zapłonie samoczynnym, który przystosowano do zasilania dwupaliwowego DME i LPG.



Rys. 1. Przebiegi zmian ciśnienia oraz prędkości uwalniania ciepła w komorze spalania silnika o zapłonie samoczynnym zasilanego dwupaliwowo DME i LPG

Fig. 1. Variations of in-cylinder pressure and heat release rate in diesel engine fuelled with DME and LPG [8]

Rys. 1 pokazuje, że na ok. 17 °CA przed GMP (0 °CA) w komorze spalania silnika zarejestrowano charakterystyczne oscylacje ciśnienia. Towarzyszą im równie gwałtowne zmiany w procesie wydzielania ciepła. Podobne przebiegi występują także w klasycznych silnikach o zapłonie samoczynnym zasilanych jednopaliwowo [4]. W ich przypadku, paliwo po wtrysnięciu do komory spalania odparowuje, miesza się z powietrzem i nagrzewa do temperatury, w której możliwy jest samozapłon. W chwili jego wystąpienia dochodzi do „eksplozji”, czemu towarzyszy wyraźny wzrost prędkości narastania ciśnienia. Wskazuje się, że takie spalanie nie zachodzi w sposób równomierny w całej objętości komory spalania. W związku z tym powstają w niej oscylacje ciśnienia o częstotliwości rezonansowej, która jest zmienna i zależy m.in. od zmian położenia tłoka w cylindrze (geometrii komory spalania). W tym zakresie przykładowe obliczenia przedstawione są w pracy pt. „Combustion Chamber Pressure Oscillations as a Source of Diesel Engine Noise” – autorzy: K. Schmillen oraz M. Schneider. Natomiast w badaniach prowadzonych przez PSA Peugeot Citroen wskazano, że zmiany częstotliwości oscylacji ciśnienia w komorze spalania wynikają nie tylko z jej wymiarów geometrycznych, ale także podlegają wpływowi stochastycznego procesu turbulentnego spalania paliwa i innych zjawisk z tym związanych [7].

W związku z powyższym, badając nowe paliwa dla silników o zapłonie samoczynnym warto również zwrócić uwagę na problem stuku, co było inspiracją do napisania niniejszej pracy.

## 2. Charakterystyka badanych paliw

W Politechnice Radomskiej od kilkadziesiąt lat prowadzone są liczne prace badawcze z zakresu wykorzystania biopaliw pochodzenia roślinnego oraz gazów LPG i CNG do zasilania silników o zapłonie samoczynnym. Ponadto, wykonywane są badania nad wykorzystaniem do tego celu etanolu i niektórych eterów, które można produkować z krajowych zasobów biomasy. Ich użycie umoty-

wowane jest głównie aspektami ekologicznymi oraz dostępnością do taniego surowca, który nie jest przydatny dla produkcji spożywczej [2 - 4].

W niniejszych badaniach wykorzystano olej napędowy (ON) oraz jego mieszaniny z etanolem (ET) lub eterem etylo-tert-butylovym (EETB). Wybrane własności fizykochemiczne tych paliw przedstawiono w tabeli 1.

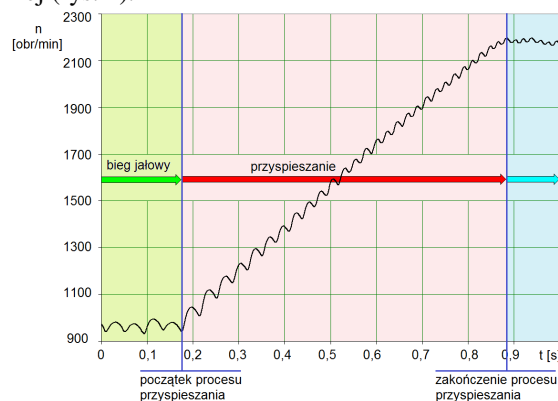
Tab. 1. Wybrane własności fizykochemiczne badanych paliw [4]  
Tab. 1. Selected physicochemical properties of tested base fuels: ON (standard diesel oil), ET (ethanol) and EETB

Własność	Oznaczenie paliwa i wartość		
	ON	ET	EETB
Numer CAS	-	64-17-5	637-92-3
Identyfikator Chemspider	-	682	11996
Wartość opałowa, [MJ/kg]	42,8	27	36,2
Lepkość, w 25 °C, [mPa·s]	2,79	1,08	<1
Gęstość w 20 °C, [g/cm <sup>3</sup> ]	0,836	0,785	0,745
Liczba cetanowa, [-]	52,7	8	8
Zawartość węgla, [%, m/m]	86,3	52,173	70,53
Zawartość wodoru, [%, m/m]	13,7	13,0435	13,81
Zawartość tlenu, [%, m/m]	-	34,1782	15,66
Masa cząsteczkowa, [g/mol]	-	46,07	102,18
Napięcie powierz., [mN/m]	25,9	22,3	20,6

Wykorzystując przedstawione w tabeli 1 paliwa przygotowano ich następujące mieszaniny: ET10, ET20, EETB10 oraz EETB20. Liczba znajdująca się za oznaczeniem paliwa określa jego objętościowy udział procentowy w mieszaninie z olejem napędowym. Dla przykładu paliwo ET10 zawierało objętościowo 10% czystego etanolu oraz 90% oleju napędowego.

## 3. Stanowisko badawcze i zastosowane metody analizy sygnałów

Badania zdecydowano się przeprowadzić za pomocą tzw. metody przyspieszeń, w której wał korbowy silnika jest gwałtownie rozpędzany od prędkości obrotowej biegu jałowego do maksymalnej (rys. 2).



Rys. 2. Zmiany prędkości obrotowej wału korbowego silnika AD3.152 podczas wykonywania próby jego przyspieszania

Fig. 2. Variations of the crankshaft rotational speed of AD3.152 engine in conditions of its acceleration

Zaletą zastosowanej metody badawczej jest krótki okres jej realizacji, co ma wpływ na ograniczenie kosztów prowadzonych badań. Warto także zauważyć, że obciążenie swobodnie przyspieszającego silnika jest porównywalne do tego, które występuje podczas wykonywania charakterystyki zewnętrznej.

Na potrzeby realizacji badań przygotowano systemy:

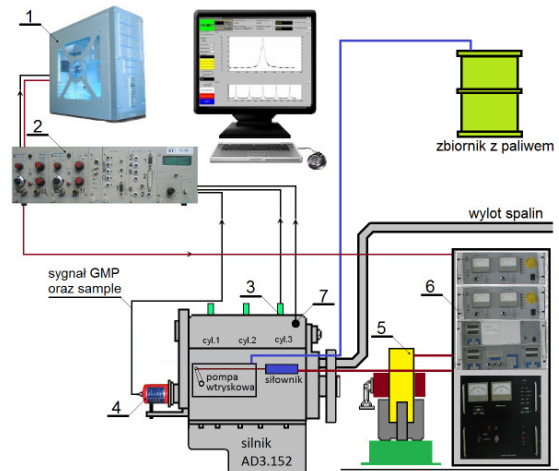
- rejestracji wybranych parametrów roboczych silnika w zależności od czasu,
- synchronizacji chwili początku próby przyspieszania z położeniem GMP tłoka w badanym cylindrze.

System rejestracji parametrów roboczych silnika skonfigurowano w taki sposób, aby umożliwiał zapisanie do pamięci komputera niezbędnych danych pomiarowych w zależności od czasu, z uwzględnieniem kryterium Nyquist'a oraz zjawiska aliasingu. W związku z tym, dla potrzeb niniejszych badań zastosowano częstotliwość próbkowania  $f=100$  kHz oraz filtr dolnoprzepustowy o częstotliwości odcięcia  $f=10$  kHz. Taka konfiguracja jest wystarczająca dla potrzeb prowadzenia badań zjawiska stuku silnika, w którym maksymalna wartość wysokoczęstotliwościowych oscylacji ciśnienia w komorze spalania zazwyczaj nie przekracza 8 kHz.

Zastosowany system synchronizacji początku próby przyspieszania z położeniem GMP tłoka w badanym cylindrze pozwala zautomatyzować proces pomiarowy. Ponadto, sprzyja zachowaniu porównywalnych warunków początkowych wykonywanych prób przyspieszania wału korbowego. Operator systemu, chcąc wykonać pomiar naciska odpowiedni przycisk wyświetlony na ekranie komputera. Od tej chwili system oczekuje na sygnał GMP z przetwornika zamocowanego na wale korbowym (rys. 3). Po jego zarejestrowaniu natychmiast inicjowana jest procedura gwałtownego zwiększenia dawki paliwa dostarczanego do komory spalania, czego skutkiem jest gwałtowne przyspieszenie wału korbowego silnika.

Pomiary zmian ciśnienia w komorze spalania silnika AD3.152 (Tab. 2) wykonano za pomocą czujnika QC34D firmy AVL. Jego częstotliwość rezonansowa wynosi ok. 69 kHz, co pozwala na jego zastosowanie do badań zjawiska stuku silnika.

Dodatkowo do głowicy silnika przymocowano czujnik stuku firmy NTK. Został on umieszczony w pobliżu indykowanego cylindra, co pozwala ocenić wpływ procesu spalania paliwa na drgania głowicy. Zarejestrowany przykład tych drgań pokazano na rys. 4.



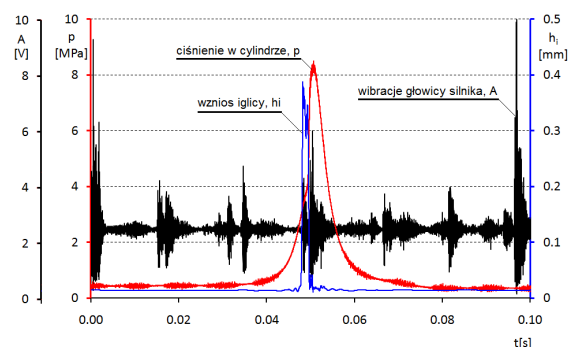
Rys. 3. Widok stanowiska badawczego: 1 – stacja robocza z kartą pomiarową Keithley KPCI 3110, 2 – wzmacniacz sygnałów, 3 – czujnik ciśnienia AVL QC34D, 4 – przetwornik obrotowo-impulsowy, 5 – hamulec silnikowy, 6 – szafa sterownicza, 7 – czujnik stuku firmy NTK

Fig. 3. View of the test stand: 1 – PC workstation with Keithley KPCI 3110 measurement card, 2 – signals amplifier, 3 – AVL QC34D quartz type sensor, 4 – crankshaft angle position transducer, 5 – engine brake, 6 – dynamometer control system, 7 – NTK knock sensor

Tab. 2. Dane techniczne silnika AD3.152

Tab. 2. Technical specification of AD3.152 engine

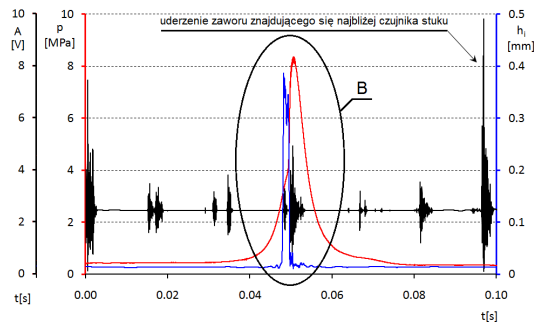
Nazwa parametru	Wartość
Liczba cylindrów	3
Kąt otwarcia zaworu dolotowego	13 °OWK
Kąt zamknięcia zaworu dolotowego	43 °OWK
Kąt otwarcia zaworu wydechowego	46 °OWK
Kąt zamknięcia zaworu wydechowego	10 °OWK
Kolejność zapłonów	1-2-3
Maksymalna moc	34,5 kW
Maksymalny moment obrotowy	165 Nm
Stopień sprężania	16,5
Rodzaj pompy wtryskowej	Lucas DPA
Rodzaj systemu wtrysku paliwa	bezpośredni
Nominalny kąt wyprzedzenia wtrysku	17 °OWK przed GMP



Rys. 4. Przykładowe przebiegi zmian ciśnienia w komorze spalania -  $p(t)$ , wibracji głowicy -  $A(t)$  oraz wzniosu iglicy rozpylacza -  $h_i(t)$  w silniku AD3.152, zarejestrowane w pierwszym cyklu procesu przyspieszania wału korbowego

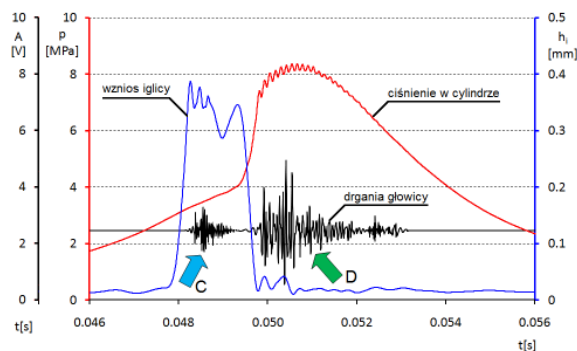
Fig. 4. Example traces of in-cylinder pressure -  $p(t)$ , engine head vibration -  $A(t)$  and needle lift -  $h_i(t)$  in AD3.152 engine, recorded in first cycle of crankshaft acceleration process

Zarejestrowane sygnały, których przykład pokazano na rys. 4, są silnie zakłócone i w związku z tym muszą być poddane dodatkowej filtracji. Do tego celu zastosowano technikę „prycinania falkowego – z ang. „wavelet shrinkage”. Niezbędne obliczenia wykonano przy pomocy własnych arkuszy kalkulacyjnych opracowanych w programie MathCad w wersji 14, do którego pozyskano pakiet dodatkowych bibliotek o nazwie Wavelet Extension Pack. Efektem zastosowania techniki przycinania falkowego są przebiegi, z których usunięto szumy pomiarowe (rys. 5)



Rys. 5. Przebiegi z rys. 4, z których usunięto szumy pomiarowe  
Fig. 5. Denoised traces from Fig. 4

Usunięcie szumów z zarejestrowanych przebiegów:  $p(t)$ ,  $h_i(t)$  oraz  $A(t)$  pozwala zauważyć wiele interesujących szczegółów. Wyraźnie widoczne stały się vibracje głowicy spowodowane uderzeniami znajdujących się w niej zaworów. Amplituda tych drgań jest największa dla zaworów znajdujących się najbliżej czujnika stuku. Kolejne ważne informacje zostały pokazane na rys. 6, który przedstawia powiększenie obszaru oznaczonego literą B na rys. 5.

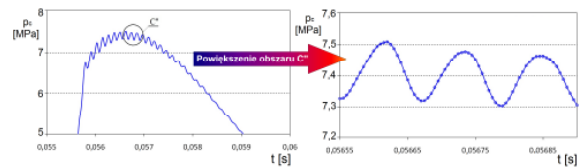


Rys. 6. Powiększenie obszaru oznaczonego literą B na rys. 5: strzałka C wskazuje obszar drgań głowicy spowodowanych pracą wtryskiwacza, strzałka D wskazuje drgania głowicy spowodowane oscylacjami ciśnienia w komorze spalania

Fig. 6. An enlargement of area marked by a letter B in Fig. 5: arrow C shows the area of engine head vibrations caused by working injector, arrow D shows the area of engine head caused by in-cylinder pressure oscillations

Na rys. 6 wyraźnie widać drgania głowicy spowodowane nie tylko oscylacjami ciśnienia zachodzącymi wewnątrz cylindra, ale także drganiami uniesionej iglicy rozpylacza.

Dla potrzeb niniejszego artykułu wymagane było przeprowadzenie analizy przebiegów oscylacji ciśnienia (rys. 7) obserwowanych w komorze spalania podczas wystąpienia zjawiska stuku silnika.



Rys. 7. Fragment wykresu indykatorowego z widocznymi oscylacjami ciśnienia typowymi dla silnika w którym wystąpiło zjawisko stuku

Fig. 7. A part of indicator diagram with in-cylinder pressure oscillation visible, typical for a diesel engine knock phenomenon

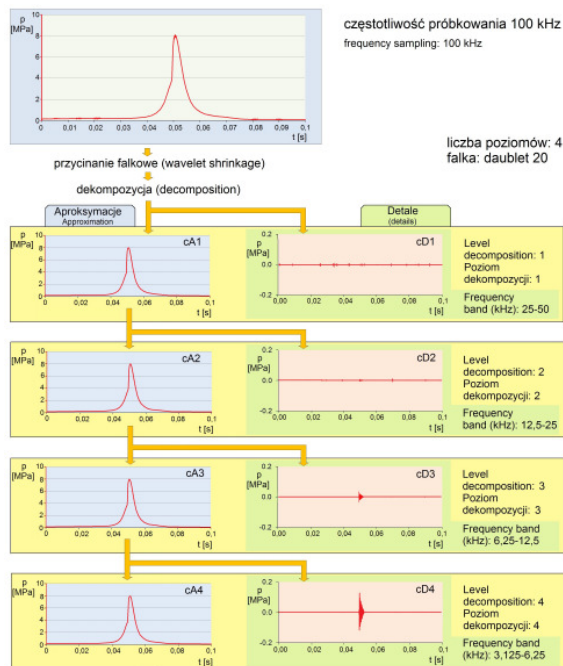
W związku z tym, z zarejestrowanego przebiegu  $p(t)$  wymagane było wyodrębnienie tej składowej ciśnienia, która zawiera charakterystyczne dla zjawiska stuku oscylacje. Do tego celu zastosowano dyskretną transformatę falkową – ang. Discrete Wavelet Transform (DWT).

Transformata falkowa pozwala analizować zarówno sygnały stacjonarne jak i niestacjonarne, co jest jedną z jej zalet w stosunku do transformaty Fouriera. Ponadto pozwala zachować informacje o chwili, w której dochodzi do zmiany cech sygnału, podczas gdy zastosowanie transformaty Fouriera powoduje, że taka informacja jest tracona. Należy jednak zauważyć, że wprowadzenie do transformaty Fouriera techniki „okienkowania – np. STFT” pozwala analizować sygnał w zależności „czas – częstotliwość”, ale jest to ograniczone zasadą nieoznaczoności Heisenberga. Publikacje wielu matematyków, którzy doskonalili teorię falkową pokazują, że jest ona rozwinięciem dotychczas stosowanych technik „okienkowania”. Wskazują, że zastosowanie „falek” w analizie sygnałów pozwala uzyskać ich korzystniejszą reprezentację w układzie „czas – skala (częstotliwość)”.

Niniejsza praca i poprzednie publikacje [4, 6] są kolejnym przykładem praktycznego zastosowania transformaty falkowej w badaniach silnikowych. Dotychczas była ona używana głównie w cyfrowej obróbce i kompresji obrazów. Jednak coraz częściej jest stosowana w medycynie, np. do analizy sygnałów EEG i EKG, badaniach zjawisk zachodzących w atmosferze, diagnostyce maszyn, a także do analizy przebiegów indeksów spółek giełdowych.

W przypadku dowolnego sygnału zarejestrowanego w zależności od czasu można go poddać wielorozdzielczej analizie falkowej – ang. Wavelet Multiresolution Analysis (MRA). Pozwala to wyodrębnić, z analizowanego przebiegu składowe (detale) o różnych skalach (częstotliwościach). Przykład dekompozycji sygnału ciśnienia pokazano na rys. 8.

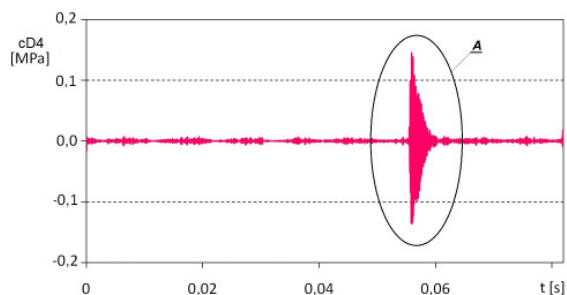




Rys. 8. Schemat procedury dekompozycji falkowej sygnału ciśnienia

Fig. 8. A scheme of the wavelet decomposition procedure of in-cylinder pressure

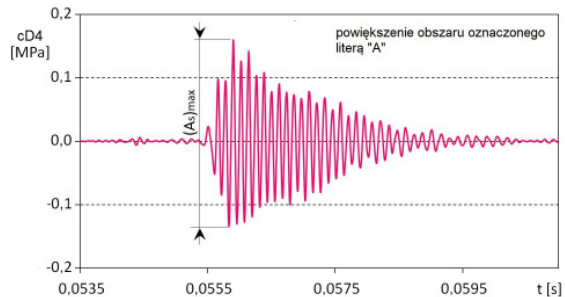
Sygnal, którego przykład przedstawiono na rys. 8, poddano najpierw procedurze „przycinania falkowego”, a następnie dekompozycji na składowe tj. aproksymacje (oznaczenia: cA1..cA4) oraz detale (oznaczenia cD1..cD4). Liczba poziomów dekompozycji wynosi zatem 4. W połączeniu z przyjętą konfiguracją parametrów próbkowania rejestrowanego sygnału ciśnienia jest to wystarczające do tego, aby w detalach cD3 i cD4 wyodrębnić oscylacje ciśnienia występujące w komorze spalania podczas stuku silnika. Powiększenie fragmentu detalu cD4 pokazano na rys. 9.



Rys. 9. Wyodrębniony z zarejestrowanego przebiegu  $p(t)$  detal cD4 zawierający charakterystyczne dla zjawiska stuku oscylacje ciśnienia

Fig. 9. A detail cD4 separated from recorded raw  $p(t)$  signal

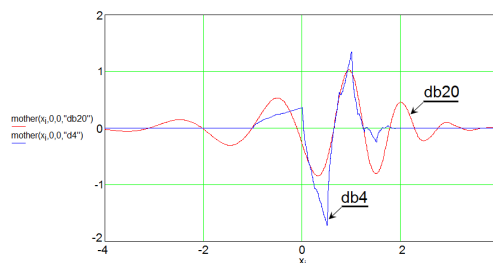
Na rys. 9 zakreślono obszar oznaczony literą A. Jego powiększenie przedstawiono na rys. 10. Widoczny na nim przebieg (detal cD4) jest wyodrębnioną składową ciśnienia, która występuje w komorze spalania podczas stuku silnika.



Rys. 10. Powiększenie obszaru oznaczonego literą A na rys. 9  
Fig. 10. An enlargement of the area marked by letter A in Fig. 9

Detal cD3 również zawiera typowe dla stuku oscylacje, ale o znacznie mniejszej amplitudzie i dlatego może być on zaniewany. Można go również sumować z detalem cD4, co pozwala uzyskać pełniejsze odwzorowanie oscylacji ciśnienia występującego w komorze spalania. Warto podkreślić, że w przedstawionym przykładzie przydatność detalu cD3 do dalszej analizy była uzależniona od zastosowania „przycinania falkowego”. Zaniechanie zastosowania tej techniki przed wykonaniem MRA spowodowałoby, że w składowej cD3 pojawiłyby się szumy, czyniące ją nieprzydatną do dalszej analizy. Nie oznacza to jednak, że stosowanie „przycinania falkowego” jest zawsze korzystne. Zagadnienie jest jednak dość złożone i wymaga przeprowadzenia dalszych badań – szczególnie w zakresie oceny przyjętych w programach matematycznych zasad ustalania wartości progów „przycinania”. Ważną kwestią są również problemy doboru funkcji falkowej, którą wykorzystuje się zarówno podczas „przycinania falkowego” jak i dekompozycji sygnałów. Na potrzeby niniejszych badań zastosowano falkę z rodziny daublet(20), gdyż jej przebieg (rys. 11) jest najbardziej zbliżony do analizowanych oscylacji ciśnienia, które starano się wyodrębnić

z zarejestrowanego przebiegu. Falki o mniejszych współczynnikach np. 4 lub 6 są „węższe” i mniej wygładzone. Z związku z tym lepiej sprawdzają się w wykrywaniu gwałtownych zmian przebiegu analizowanego sygnału.



Rys. 11. Widok falek daublet(20) i daublet(4)

Fig. 11. A view of daublet(20) and daublet(4) waves

Najłatwiejszym parametrem, który wykorzystuje się do opisu stuku, jest maksymalna amplituda drgań  $(A_s)_{max}$  (rys. 10). Niektórzy autorzy wyznaczają maksymalną wartość bezwzględną takiego

przebiegu [1]. Jednak przypuszcza się, że pełniejsze opisanie zjawiska stuku można uzyskać wyznaczając jego energię. Do tego celu wykorzystywana jest zależność:

$$E(t_0, t_1) = \int_{t_0}^{t_1} |x(t)|^2 dt \quad (1)$$

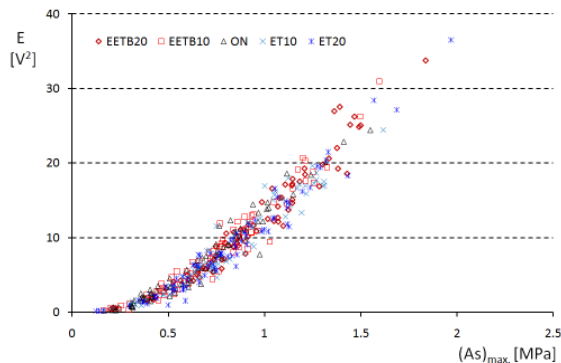
Wzór (1) opisuje energię sygnału analogowego  $x(t)$  wyznaczoną od chwili  $t_0$  do chwili  $t_1$ . Jednak w praktyce pomiarowej sygnał analogowy (ciągły) jest próbkowany z określoną częstotliwością, dostarczając badaczowi wartości ciągu  $n$  liczb. Dla takiego zbioru danych  $x[n]$  wyznacza się energię sygnału dyskretnego korzystając ze wzoru:

$$E(n_0, n_1) = \sum_{n=n_0}^{n_1} |x[n]|^2 \quad (2)$$

Wartości  $n_0$  i  $n_1$  określają, w niniejszym artykule, szerokość przedziału liczbowego, dla którego wyznaczana jest energia stuku (od chwili jego powstania do wygaszenia).

#### 4. Wyniki badań

Na początku starano się sprawdzić, czy pomiędzy wartościami maksymalnej amplitudy stuku oraz jego energią istnieje zależność korelacyjna. W tym celu przygotowano rys. 12.

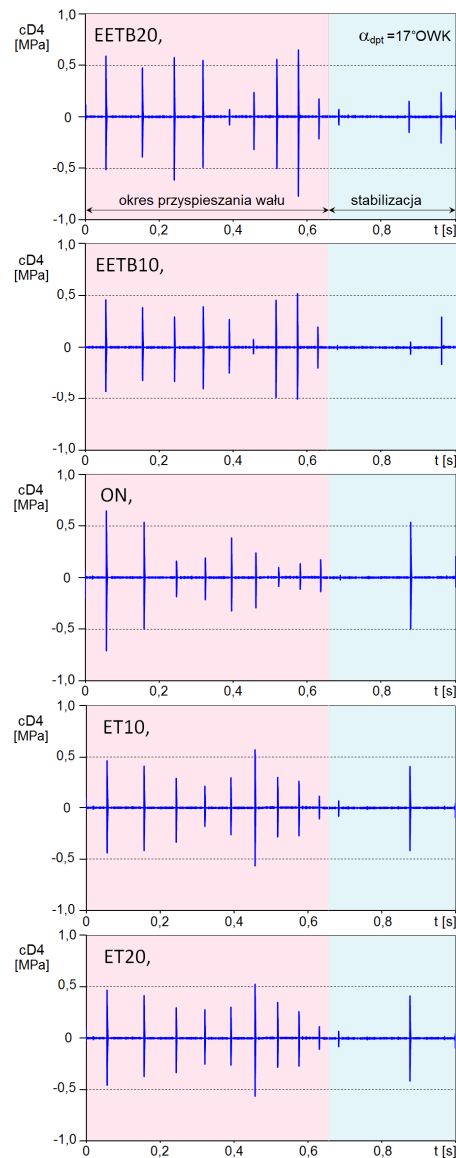


Rys. 12. Zależności występujące pomiędzy wartościami maksymalnej amplitudy stuku i jego energią w silniku AD3.152 zasilanym badanymi paliwami

Fig. 12. Relationships between values of maximal amplitude knock and its energy in AD3.152 engine fuelled with tested fuels

Otrzymany na rys. 12 układ punktów pozwala stwierdzić, że analizowane parametry  $(As)_{max}$  oraz  $E$  są ze sobą wyraźnie skorelowane - niezależnie od rodzaju badanego paliwa. Jednak nie jest to liniowa zależność. Korzystniej można ją opisać przy pomocy wielomianu drugiego stopnia.

Na kolejnym rys. 13 przedstawiono przykładowe przebiegi składowej cD4 wyznaczonej na podstawie zarejestrowanych prób przyspieszania wału korbowego silnika AD3.152 zasilanego badanymi paliwami.

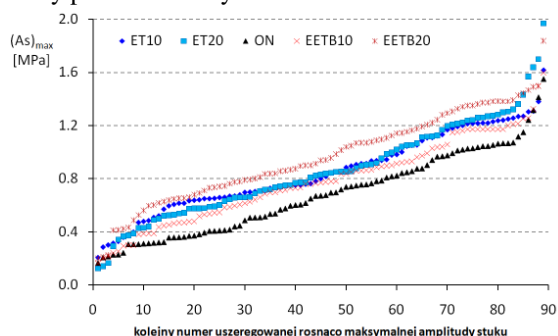


Rys. 13. Przykładowe przebiegi składowej cD4 wyznaczonej w pierwszej próbie przyspieszania wału korbowego silnika AD3.152 zasilanego badanymi paliwami: ET20, ET10, ON, EETB10, EETB20

Fig. 13. Example courses of cD4 detail calculated in the first test of crankshaft acceleration of AD3.152 diesel engine fuelled with: ET20, ET10, ON, EETB10, EETB20

Na podstawie rys. 13 widać, że największą amplitudę stuku  $(As)_{max} = 1,5 \text{ MPa}$  uzyskano dla paliw ON i ET20, odpowiednio w pierwszym i przedostatnim cyklu przyspieszania wału korbowego silnika. W końcowej fazie tego procesu następuje stopniowe odcinanie dawkowania paliwa przez pompę wtryskową i w związku z tym wartości amplitudy stuku są coraz mniejsze. Po osiągnięciu maksymalnej prędkości obrotowej przez wał korbowy silnika AD3.152, jego pompa wtryskowa częściowo przywraca dawkowanie paliwa do komory spalania. W związku z tym ponownie obserwuje się w niej oscylacje ciśnienia o różnych amplitudach.

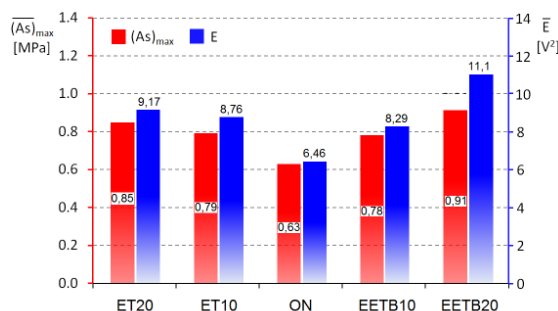
Prowadząc badania wykonano po 10 prób przyspieszania wału korbowego silnika AD3.152 zasilanego paliwami: EETB20, EETB10, ON, ET10 i ET20. Dzięki temu otrzymano zbiór wartości maksymalnych amplitud stuku silnika AD3.152, który pokazano na rys. 14.



Rys. 14. Uszeregowane wartości maksymalnych amplitud stuku silnika AD3.152 zasilanego badanymi paliwami

Fig. 14. Arranged values of maximum knock amplitude in AD3.152 engine fuelled with tested fuels

Ocena rys. 14 wskazuje, że najmniejsze wartości maksymalnej amplitudy stuku silnika AD3.152 uzyskano podczas zasilania olejem napędowym. W przypadku jego mieszanin z etanolem lub EETB obserwuje się wyraźne zwiększenie wartości amplitudy stuku. Jest to szczególnie widoczne na rys. 15, który przedstawia wartości średnie policzone zarówno dla zbioru maksymalnych amplitud stuku  $(As)_{max}$  oraz ich energii  $E$ .

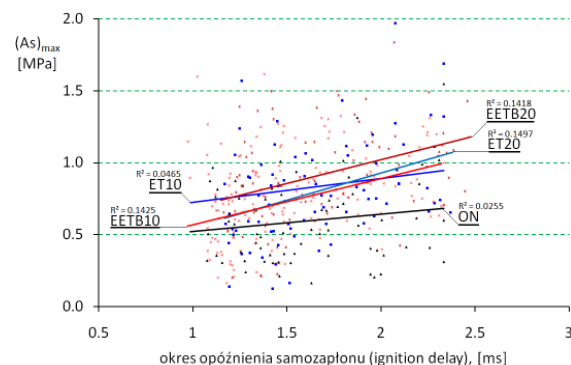


Rys.15. Wartości średnie maksymalnej amplitudy stuku oraz jego energii wyznaczone dla silnika AD3.152 zasilanego badanymi paliwami

Fig. 15. Average values of maximum knock amplitude and its energy calculated for AD3.152 diesel engine fuelled with tested fuels

Na wartość ocenianych parametrów opisujących stuk silnika AD3.152 mogą mieć wpływ odmienne własności fizykochemiczne badanych paliw, np. ich różna lepkość, napięcie powierzchniowe, wartość opałowa oraz liczba cetanowa. Zmiany wartości tych parametrów decydują o przebiegu wtrysku paliwa, początku jego spalania i intensywności tego procesu. Trudno jest ocenić, jaki jest wpływ takich czynników na stuk silnika. W tym aspekcie należy również pamiętać o wpływie zmian położenia tłoka w cylindrze na wartość częstotliwości rezonansowej komory spalania. Pokazuje to, jak złożony może być model opisujący zjawisko stuku silnika.

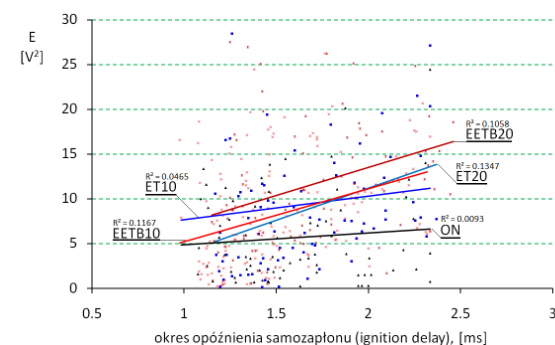
W dalszej części pracy starano się ocenić wpływ okresu opóźnienia samozapłonu badanych paliw na zmianę wartości maksymalnej amplitudy stuku. Zostało to pokazane na rys. 16.



Rys. 16. Wpływ zmian okresu opóźnienia samozapłonu badanych paliw na zmianę amplitudy stuku silnika AD3.152

Fig. 16. The influence of self-ignition delay of tested fuels on variations of amplitude knock in AD3.152 diesel engine

Podobnie na rys. 17 przedstawiono wpływ okresu opóźnienia samozapłonu badanych paliw na zmianę wartości energii stuku silnika AD3.152 pracującego w warunkach przyspieszania jego wału korbowego.



Rys.17. Wpływ zmian okresu opóźnienia samozapłonu badanych paliw na energię stuku silnika AD3.152

Fig. 17. The influence of self-ignition delay angle of tested fuel blends on the knock energy in AD3.152 diesel engine

Porównanie rys. 16 i 17 wskazuje, że są one do siebie podobne. Na obydwu z nich umieszczono linie trendu, jako najkorzystniej dopasowane do analizowanych zbiorów danych i ułatwiającej ich ocenę. Pomimo to, uzyskane wartości parametru  $R^2$  są niewielkie, co jest spowodowane dość znacznym rozrzutem analizowanych punktów w stosunku do wyznaczonych linii trendu. Może to świadczyć o tym, że zmiany opóźnienia samozapłonu paliwa nie są decydującym czynnikiem wpływającym na przebieg stuku w badanym silniku. Pomimo to zauważono, że wydłużeniu okresu opóźnienia samozapłonu paliwa towarzyszy zarówno zwiększenie wartości maksymalnej amplitudy stuku jak i jego energii. W związku z tym należy uznać, że podejmowanie działań sprzyjających skróceniu okresu opóźnienia samozapłonu paliwa jest korzystne, gdyż przyczynia się do ograniczenia zjawiska stuku zachodzącego w silniku.

---

## Podsumowanie

Stuk w silniku o zapłonie samoczynnym jest zjawiskiem akustycznym, którego źródłem są wysokoczęstotliwościowe oscylacje ciśnienia zachodzące w komorze spalania. Maksymalne amplitudy tych drgań mogą być znaczące i osiągają wartość ok. 2 MPa. Jest to źródłem dodatkowego obciążenia układu korbowo-tłokowego silnika oraz sprzyja zwiększeniu jego emisji akustycznej (hałasu).

Stwierdzono, że zjawisko stuku w badanym silniku o zapłonie samoczynnym jest związane ze zmianami okresu opóźnienia samozapłonu paliwa. Wzrost wartości tego parametru sprzyja zwiększeniu zarówno energii jak i maksymalnej amplitudy stuku. Są one tym większe, im więcej etanolu lub EETB dodano do oleju napędowego.

Badania, których wyniki przedstawiono w niniejszym artykule wykonano podczas przyspieszania wału korbowego silnika. Zaletą tej metody jest krótki czas wykonywania pomiarów, co ogranicza ich koszty. Niedogodnością „metody przyspieszeń” jest to, że nie pozwala ona ocenić wpływu oscylacji

ciśnienia w komorze spalania na emisję szkodliwych składników spalin, a także zmianę sprawności silnika. Takie badania mogą być prowadzone w warunkach ustalonych, ale wymaga to zaangażowania większych środków finansowych i wykorzystania dodatkowej aparatury pomiarowej. W związku z tym, może to być przedmiotem realizacji większego projektu badawczego.

Ocenę zjawiska stuku w silniku AD3.152 przeprowadzono wykorzystując techniki matematyczne bazujące na algorytmach dyskretnej transformaty falkowej. Pozwoliło to wyodrębnić, z zarejestrowanego sygnału ciśnienia składową, w której widoczne są charakterystyczne dla stuku oscylacje o malejącej amplitudzie. Jej maksymalna wartość jest podstawowym parametrem wykorzystywanym do oceny zjawiska stuku zachodzącego w silniku. W artykule pokazano, że może być ono również scharakteryzowane przy pomocy energii, którą oblicza się od chwili zaobserwowania oscylacji ciśnienia w komorze spalania aż do ich zaniknięcia.

## Nomenclature/Skróty i oznaczenia

DWT Discrete Wavelet Transform /Dyskretna transformata falkowa

MRA Multiresolution Analysis/Analiza wielorozdzielcza

STFT Short Time Fourier Transform /Krótko-okresowa Transformata Fouriera

ETBE Ethyl-tert-butyl ether/Eter etylo-tert-butylowy

---

## Bibliography/Literatura

- [1] Brecq G., Le Corre O.: Modeling of In-cylinder Pressure Oscillations under Knocking Conditions: Introduction to Pressure Envelope Curve. SAE 2005.
- [2] Górski K., Lotko W., Swat M.: Particulate matter emission from diesel engine fuelled with blends of diesel oil and ethyl tert-butyl ether. The Archives of Automotive Engineering, No 2/2010.
- [3] Górski K., Maciąg P.: The noise emission of diesel engine fuelled with blends of diesel oil and ethyl tert-butyl ether. The Archives of Automotive Engineering, No 3/2010.
- [4] Lotko W., Górski K., Longwic R.: Nieustalone stany pracy silnika wysokoprężnego zasilanego olejem napędowym z eterem etylo-tert-butylowym. WKiŁ, Warszawa 2010.
- [5] Różycki A.: Knock Combustion Limit in a two-fuel diesel engine. Czasopismo Techniczne „Mechanika” – z. 7-M/2008.
- [6] Sen A. K., Longwic R., Litak G., Górski K.: Analysis of cycle-to-cycle pressure oscillations in a diesel engine. Mechanical Systems and Signal processing. Vol. 22/2008, ISSN 0888-3270, Elsevier 2008.
- [7] Schuller T., Sauvage O., Dimitrijevic Z., Rymer G.: Noise Radiation Associated with Unsteady Diesel Engine Combustion Chamber Pressure Evolution. 11<sup>th</sup> AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference, American Institute of Aeronautics and Astronautics 2005.
- [8] Xinqi Qiao, Junxing Hou, Zhen Wang, Jin Zhou, and Zhen Huang: Knock Investigation of a Direct Injection-Homogeneous Charge Compression Ignition Engine Fueled with Dimethyl Ether and Liquefied Petroleum Gas. Energy & Fuels 2009, 23, p. 2006–2012.

Mr Krzysztof Górski, PhD., MEng. – doctor in the Faculty of Mechanical Engineering at Radom University of Technology.

Dr inż. Krzysztof Górski – adiunkt na Wydziale Mechanicznym Politechniki Radomskiej.

