

Detekcja spalania stukowego w silnikach benzynowych oparta na metodzie HVD

Streszczenie. W artykule zaprezentowano koncepcję detekcji spalania stukowego w silnikach benzynowych opartą na metodzie HVD (ang. Hilbert Vibration Decomposition). Jak pokazano, oparta na HVD dekompozycja sygnału ciśnienia w komorze spalania na poszczególne składowe częstotliwościowe pozwala na wnikliwą obserwację tego zjawiska, jak również na wyznaczenie wartości parametru, określającego intensywność spalania stukowego.

Abstract. The article presents the concept of using the Hilbert Vibration Decomposition (HVD) method for the detection of knocking combustion in gasoline engines. It has been shown that the HVD-based decomposition of the pressure signal in the combustion chamber into a set of frequency components allows for a precise characterization of this phenomenon, as well as for the determination of the knock intensity metric. (**Detection of knocking combustion in gasoline engines based on the HVD method.**)

Słowa kluczowe: elektronika samochodowa, spalanie stukowe, dekompozycja drgań Hilberta, analiza czasowo-częstotliwościowa.

Keywords: automotive electronics, engine knocking, Hilbert Vibration Decomposition, time-frequency analysis.

Wstęp

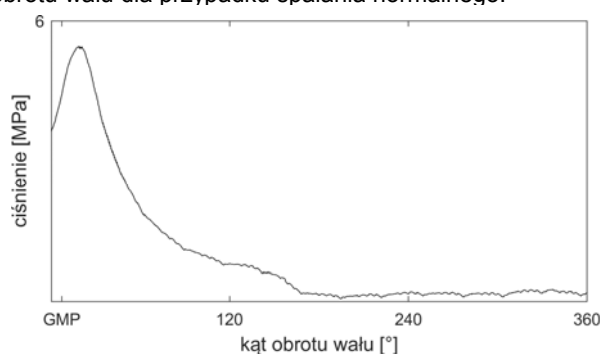
Przemysł samochodowy należy do wiodących gałęzi współczesnego przemysłu. Mimo iż gospodarka światowa przeżywa ostatnio trudny okres, liczba wyprodukowanych pojazdów samochodowych zbliża się do magicznej granicy 100 mln sztuk rocznie. Strategiczne znaczenie tego sektora wynika z wielu czynników. W kwestii ekonomicznej, generuje on duże zyski, tworzy miejsca pracy, realizuje inwestycje mające wpływ na rozwój lokalnej społeczności. Nie bez znaczenia jest również kreowanie, w wielu dziedzinach, postępu technologicznego, co przyczynia się do konkurencyjności kraju na arenie międzynarodowej. Aby jednak zapewnić sprawne funkcjonowanie, koncerny muszą nieustannie dbać o klienta, oferując coraz to doskonalsze pojazdy, pod względem osiągnięć, zużycia paliwa, bezpieczeństwa, komfortu, czy oddziaływania na środowisko naturalne. Rozwój ten wymaga zaangażowania wielu specjalistów i prowadzenia interdyscyplinarnych badań w wielu obszarach.

Tematyka zaprezentowana w artykule dotyczy detekcji spalania stukowego w silnikach benzynowych. Jest to zagadnienie z pogranicza kilku dziedzin, takich jak technika motoryzacyjna, elektronika, cyfrowe przetwarzanie sygnałów. Ponieważ zjawisko spalania stukowego w istotny sposób wpływa na sprawność jednostki napędowej i jej trwałość, badania prowadzone w zakresie poprawy efektywności detekcji tego niekorzystnego zjawiska wpisują się w aktualne badania z obszaru techniki samochodowej.

Spalanie normalne i stukowe

W popularnych silnikach z zapłonem iskrowym, zapłon mieszanki paliwowo-powietrznej następuje wskutek przeskoku iskry pomiędzy elektrodami świecy zapłonowej, co ma miejsce przed samym końcem suwu sprężania. Moment generacji iskry zależy od wielu czynników, w tym przede wszystkim od prędkości obrotowej wału, temperatury silnika i jego chwilowego obciążenia, i typowo zawiera się w przedziale od 10 do 35 stopni kątowych przed Górnym Martwym Punktem (GMP). Odpowiednio wcześniej dobrana chwila wystąpienia zapłonu gwarantuje osiągnięcie maksymalnej wartości ciśnienia w komorze spalania w punkcie optymalnym (kilkanaście stopni po GMP). W tej sytuacji, czoło płomienia rozchodzi się w sposób jednostajny, czemu towarzyszy stopniowy wzrost ciśnienia w komorze spalania aż do osiągnięcia wartości maksymalnej. Mamy wówczas do czynienia z efektywnym wykorzystaniem pracy gazów w cylindrze. Na Rysunku 1

przedstawiono przebieg zmian ciśnienia w funkcji kąta obrotu wału dla przypadku spalania normalnego.

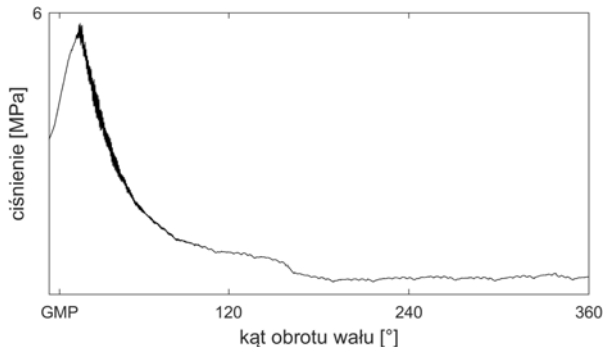


Rys. 1. Przebieg zmian ciśnienia w przypadku spalania normalnego

Spalanie stukowe, określane inaczej jako detonacyjne, nazwę swą zawdzięcza charakterystycznym dźwiękom powstającym w komorze silnika na skutek nieprawidłowego przebiegu procesu spalania. Jest to efektem samozapłonu części mieszanki paliwowo-powietrznej, nie mającej kontaktu z propagującym od świecy zapłonowej czołem płomienia. W rezultacie, obserwujemy bardzo gwałtowny wzrost ciśnienia i temperatury w komorze spalania, wywołany wielokrotnym zderzaniem się frontów płomienia. Detonacyjny charakter zjawiska powoduje chwilowy, ponadnormatywny wzrost obciążenia mechanicznego i cieplnego elementów silnika. Długotrwałe występowanie tego zjawiska może prowadzić do uszkodzenia silnika, zwiększa zużycie paliwa, a także przyczynia się do nadmiernej emisji substancji szkodliwych do atmosfery [1]. Na Rysunku 2 zaprezentowano przebieg zmian ciśnienia w komorze spalania w funkcji kąta obrotu wału dla przypadku spalania stukowego.

Jeszcze do niedawna, podstawowym sposobem eliminacji tego zjawiska było stosowanie paliwa o odpowiedniej liczbie oktanowej. Wraz ze wzrostem świadomości ekologicznej, w większości krajów zakazano stosowania związków ołowiu, co wymogło na producentach pojazdów konieczność stosowania innych rozwiązań. Współcześnie produkowane pojazdy silnikowe posiadają już zaimplementowany system wykrywania i eliminacji spalania stukowego. W rozwiązaniach tych częstotliwość występowania spalania stukowego, a także jego intensywność, ogranicza się dobierając odpowiedni kąt wyprzedzenia zapłonu (opóźnienie chwili wystąpienia

zapłonu powoduje zmniejszenie wartości szczytowej ciśnienia w komorze spalania). Dzięki temu, redukuje się prawdopodobieństwo pojawienia nieprawidłowego procesu spalania w kolejnych cyklach. Warto jednak dodać, iż działanie to zmniejsza sprawność jednostki napędowej, co stanowi jego istotną wadę. Dąży się więc do sytuacji, w której silnik pracuje na granicy spalania stukowego, co umożliwia uzyskanie optymalnych osiągnięć przy jednoczesnej redukcji niekorzystnych efektów nieprawidłowego przebiegu procesu spalania.



Rys.2. Przebieg zmian ciśnienia w przypadku spalania stukowego

Ze względu na fakt, iż zmiana kąta wyprzedzenia zapłonu jest prosta do realizacji w układzie sterowania pracą silnika, metoda ta znalazła powszechne zastosowanie. Należy również wspomnieć, iż producenci, w celu uzyskania jak największej sprawności jednostki napędowej, wykorzystują jednocześnie inne rozwiązania, takie jak wzbogacanie mieszanki, zmniejszanie stopnia sprężania, ograniczanie obciążenia silnika, stosowanie układów recyrkulacji spalin czy też zapewnienie efektywnego chłodzenia.

Metody detekcji spalania stukowego

Odpowiednia korekcja kąta wyprzedzenia zapłonu zmniejsza prawdopodobieństwo pojawienia się spalania stukowego. Mechanizm ten funkcjonuje prawidłowo jedynie wtedy, gdy zastosowana metoda detekcji, oparta na analizie wybranego sygnału pomiarowego, pozwala na wiarygodną ocenę przebiegu procesu spalania.

Pomiar przyspieszenia bloku silnika

Pośrednim efektem spalania stukowego jest chwilowy, gwałtowny wzrost amplitudy drgań bloku silnika. Umieszczając w odpowiednio dobranych miejscach bloku silnika czujniki przyspieszenia, zjawisko to można rejestrować, dokonując analizy elektrycznego sygnału wyjściowego. Wadą tej pośredniej metody jest silne, negatywne oddziaływanie szumu tła, mającego źródło w drganiach własnych elementów silnika, sygnałach akustycznych generowanych na skutek ruchu tłoków, zaworów, naprężeniach itd. Dodatkowym, niekorzystnym czynnikiem jest wpływ temperatury na prędkość rozchodzenia się fali dźwiękowej wewnątrz bryły silnika, co wywołuje zmianę charakteru częstotliwościowego mierzonego sygnału. Ponieważ oddziaływanie tych negatywnych zjawisk nasila się wraz ze wzrostem prędkości obrotowej, obserwujemy szybki spadek wartości SNR (ang. Signal to Noise Ratio). W efekcie, wiele systemów detekcji zawiesza swoje działanie po przekroczeniu ustalonego progu prędkości obrotowej, ustalając kąt wyprzedzenia zapłonu z odpowiednio dużym marginesem. Mimo wielu przytoczonych wad, koncepcja detekcji oparta na czujnikach przyspieszenia dominuje w zastosowaniach seryjnych, co bezpośrednio wynika z niskiego kosztu implementacji.

Pomiar prądu jonizacji

Kolejna metoda oceny przebiegu procesu spalania bazuje na pomiarze prądu jonizacji czynnika w cylindrze. W wyniku reakcji chemicznych zachodzących w komorze spalania, następuje generacja jonów. Wartość chwilowa tego prądu zależy od ciśnienia i temperatury, ale także od innych czynników, takich jak stosunek masy powietrza do masy paliwa, obciążenie silnika, skład chemiczny paliwa, ilość gazów dostarczanych przez układ recyrkulacji spalin. Niewątpliwą zaletą tego rozwiązania jest brak potrzeby stosowania dodatkowych czujników, gdyż jako czujnik można wykorzystać świecę zapłonową. Wymaga to jednak wprowadzenia pewnych modyfikacji do układu zapłonowego, co wynika z konieczności wymuszenia (po ustaniu iskry) stałej wartości napięcia (około 150-250 V) na świecy. Mimo swej prostoty, metoda ta nie znalazła szerszego zastosowania w obszarze detekcji spalania stukowego. Jest to spowodowane w głównej mierze oddziaływaniem wymienionych wcześniej czynników zakłócających na korelację pomiędzy wartością prądu jonizacji a zmianami ciśnienia w komorze. Ponadto, metoda ta nie pozwala na szybką detekcję, co wynika z konieczności uśredniania wyników w oknie czasowym obejmującym kilkaset cykli spalania. Ograniczeniem jest również mała czułość, wrażliwość toru pomiarowego na zakłócenia, a także duży wpływ stopnia zanieczyszczenia czujnika (świecy) na otrzymane wyniki [2,3].

Pomiar ciśnienia w komorze spalania

Zmiany ciśnienia w komorze stanowią najbardziej pożądane źródło informacji o przebiegu procesu spalania mieszanki paliwowo-powietrznej. Monitorowanie tej wielkości otwiera nowe możliwości realizacji koncepcji sterowania pracą silnika, w zakresie poprawy sprawności, zmniejszenia emisji substancji szkodliwych do atmosfery, ograniczenia zużycia paliwa. Nabiera to szczególnego znaczenia w obecnych czasach, gdyż spełnienie rygorystycznych norm emisji obciąża producentów do wprowadzania coraz to bardziej zaawansowanych rozwiązań.

Przebieg zmian ciśnienia w komorze spalania wykorzystywany jest w wielu obszarach, takich jak sterowanie silnikiem, detekcja spalania stukowego oraz wypadania zapłonów, estymacja wartości parametrów procesu spalania (masa zasysanego paliwa i powietrza, współczynnik nadmiaru powietrza, temperatura gazów w komorze), czy estymacja chwilowej wartości momentu obrotowego [3,4,5]. Wyznaczone na podstawie tego sygnału parametry odnoszą się do bieżącego stanu (śledzenie zmian z cyklu na cykl), co umożliwia analizę stanów przejściowych i realizację szybkich algorytmów sterowania. Ponadto, rezygnacja z nadmiarowych czujników, wykorzystywanych do wyznaczania wspomnianych parametrów, obniża koszty produkcji pojazdów.

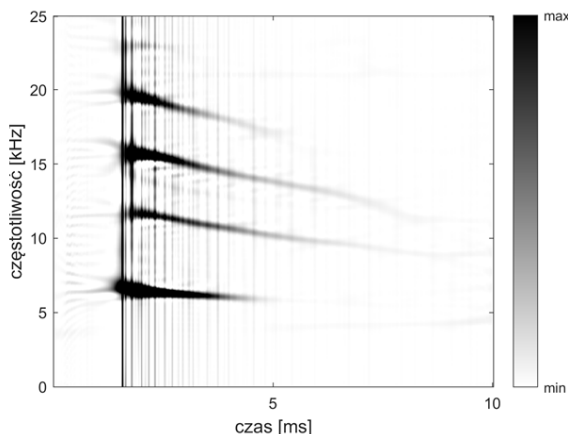
Pomimo zalet, czujniki te stosowane są obecnie dość rzadko w masowej produkcji. Ograniczenie to wynika z wysokich wymagań jakie stawia się czujnikowi tj. praca w zakresie do 150 barów, temperatura pracy sięgająca 300 stopni, trwałość rzędu 10^9 cykli [6]. Mimo iż elementy te są dostępne na rynku, ich zastosowanie ogranicza się jedynie do badań doświadczalnych, prowadzonych w laboratoriach i instytutach badawczych. Powodem jest oczywiście wysoka cena. Jednakże, duże korzyści związane z wprowadzeniem na rynek taniego, łatwo dostępnego czujnika ciśnienia sprawiają, iż można dostrzec spore zainteresowanie tą tematyką, co bezpośrednio przyczynia się do powstawania nowych rozwiązań [5,6].

Na podstawie studium literatury wydaje się, iż bardzo interesującym rozwiązaniem jest optyczny czujnik ciśnienia, który charakteryzuje się niską ceną oraz dobrymi parametrami [8]. Ze względu na duży potencjał tego typu czujników, zaprezentowana w artykule metoda detekcji bazuje na pomiarze ciśnienia w komorze spalania.

Sygnał zmian ciśnienia w komorze spalania

Badania rozwojowe w zakresie metod detekcji spalania stukowego wymagają dogłębnego poznania charakteru sygnału ciśnienia, gdyż bezpośrednio decyduje to o skuteczności działania projektowanego systemu. Etap ten wymaga wielu czasochłonnych i kosztownych badań, prowadzonych w odpowiednich warunkach laboratoryjnych. Źródłem danych pomiarowych, wykorzystanych w prowadzonych przez autora badaniach, jest obszerna baza danych, pozyskana dzięki wieloletniej współpracy związanej z koncernem FIAT (Centro Ricerche Fiat) a Politechniką Śląską. W ramach przeprowadzonych we Włoszech badań zarejestrowano przebiegi zmian ciśnienia w czterocyndrowym, seryjnie produkowanym silniku o pojemności 1,6 litra, dla różnych obciążeń oraz wybranych prędkości obrotowych (1500, 2000, 3000, 4000 oraz 5000 obr/min). Akwizycję sygnału ciśnienia w każdym cylindrze (wraz z dodatkowym znacznikiem informującym o położeniu GMP) przeprowadzono przy użyciu wielokanałowej karty pomiarowej o rozdzielczości 12 bitów (częstotliwość próbkowania ustalono na 50 kHz). Intensywność oraz częstotliwość występowania zjawiska spalania stukowego regulowano poprzez zmianę kąta wyprzedzenia zapłonu, co możliwe było dzięki zastosowaniu programalnego sterownika silnika.

Następstwem spalania stukowego jest obecność w sygnale ciśnienia dominujących składników wysokoczęstotliwościowych, których częstotliwość i amplituda zmienia się w czasie. Dla tego typu sygnałów niestacjonarnych, powszechnie stosowanym narzędziem oceny jest analiza czasowo-częstotliwościowa TF (ang. Time-Frequency). Dla przykładu, Rysunek 3 przedstawia obraz czasowo-częstotliwościowy przebiegu zmian ciśnienia w przypadku spalania stukowego (przedstawiony obraz uzyskano wykorzystując rozkład Choi-Williamsa). Aby poprawić czytelność, analizowany sygnał wstępnie przefiltrowano górnoprzepustowo, co pozwoliło na usunięcie składowej wolnozmiennnej o dużej amplitudzie (składnik ten nie niesie informacji o spalaniu stukowym).

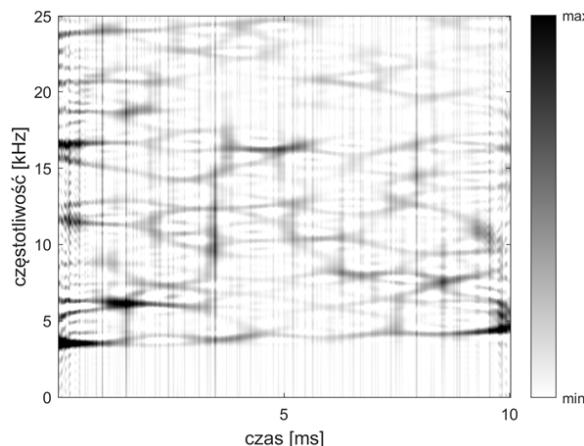


Rys.3. Obraz czasowo-częstotliwościowy w przypadku spalania stukowego

Jak łatwo zauważyć, w tym przypadku efektem spalania stukowego jest obecność w sygnale ciśnienia czterech dominujących składników, ułożonych wokół częstotliwości: 6 kHz, 12 kHz, 16 kHz, 20 kHz. Odnosząc to do innych jednostek napędowych można stwierdzić, iż

najczęściej obserwuje się występowanie od 2 do 4 dominujących składników, rozmieszczonych w zakresie od 5 kHz do 20 kHz, których częstotliwość chwilowa zmienia się w przybliżeniu liniowo, natomiast amplituda wykładniczo maleje. Poczynione obserwacje można wytłumaczyć na gruncie falowej teorii rozchodzenia się fal dźwiękowych, jednakże wyniki teoretyczne stanowią jedynie pewne przybliżenie, co jest zrozumiałe, biorąc pod uwagę duży stopień trudności opisu zjawisk termodynamicznych zachodzących podczas spalania. Z tego powodu, do wyznaczenia parametrów sygnału ciśnienia powszechnie wykorzystuje się rzeczywiste przebiegi zarejestrowane podczas eksperymentu. Należy również nadmienić, iż parametry te zależą od wielu czynników, w tym przede wszystkim prędkości obrotowej i obciążenia silnika.

W przypadku spalania normalnego sygnał ciśnienia ma zupełnie odmienny charakter, co pokazano na Rysunku 4. Jak można zauważyć, mamy tutaj do czynienia z szumem, który najczęściej modelowany jest jako szum gaussowski.



Rys.4. Obraz czasowo-częstotliwościowy w przypadku spalania normalnego

Metody przetwarzania sygnału ciśnienia

Tematykę przetwarzania sygnału ciśnienia na potrzeby detekcji spalania stukowego podjęło wielu autorów. Zasada działania najprostszych metod polega na filtracji sygnału (górną lub pasmowo-przepustowej), a następnie wyznaczeniu wartości pewnego parametru, który stanowi miarę intensywności spalania stukowego. Parametrem takim może być energia, całka wartości bezwzględnej, wartość maksymalna lub też wartość maksymalna pierwszej pochodnej analizowanego sygnału [2]. Podstawową wadą tej koncepcji jest znaczny wpływ szumu tła na wynik detekcji, co ma szczególne znaczenie w zakresie wyższych prędkości obrotowych silnika. Poprawę efektywności działania można uzyskać poprzez zastosowanie kilku filtrów pasmowo-przepustowych, których charakterystyki są dopasowane do częstotliwości występowania składników [9]. Wadą tej koncepcji jest konieczność posiadania wiedzy a priori o przetwarzanym sygnale. Ponadto, realizacja tej metody wymaga użycia filtrów wysokich rzędów, a także ich dynamicznego przestrajania w zależności od parametrów pracy silnika.

Detekcja spalania stukowego możliwa jest także w dziedzinie częstotliwości, przy użyciu takich narzędzi jak szybka transformacja Fouriera, metody estymacji widmowej gęstości mocy. Mając na uwadze dualność dziedziny częstotliwości i czasu, uzyskiwane wyniki są zbliżone do opisanych wcześniej metod czasowych [10]. Ponadto należy podkreślić, iż niestacjonarność przebiegu zmian ciśnienia w komorze w dużej mierze ogranicza zasadność stosowania metod częstotliwościowych.

Poprawę skuteczności wykrywania spalania stukowego można uzyskać, stosując bardziej zaawansowane narzędzia, takie jak analiza czasowo-częstotliwościowa. Rodzina tego typu reprezentacji jest bardzo duża, wymienić można tutaj chociażby krótkoczasową transformację Fouriera STFT (ang. Short-Time Fourier Transform), transformację Wignera (Ville'a), reprezentacje należące do klasy Cohena (np. rozkład Choi-Williamsa wykorzystany do generacji Rysunków 3 i 4). Mimo iż uzyskujemy możliwość obserwacji zmienności amplitudy i częstotliwości chwilowej na płaszczyźnie TF, metody te nie dostarczają rozwiązania idealnego. Podstawowym ograniczeniem STFT jest niemożność uzyskania dużej rozdzielczości zarówno w osi czasu jak i częstotliwości. Często stosowany rozkład Wignera idealnie odwzorowuje liniową zmianę częstotliwości sygnałów jednoskładnikowych, jednakże w przypadku przebiegów złożonych (wieloskładnikowych), występowanie pasożytniczych interferencji znacząco utrudnia prawidłową ocenę sygnału. Częściowym rozwiązaniem tego problemu jest wygładzanie rozkładu Wignera, co sprowadza się do odpowiedniej modyfikacji jądra przekształcenia całkowego. Dzięki temu następuje redukcja składników pasożytniczych, jednak odbywa się to kosztem pogorszenia rozdzielczości, a także utraty pewnych matematycznych właściwości przekształcenia. Mimo przytoczonych wad, narzędzia te z powodzeniem można stosować w badaniach doświadczalnych, na etapie wstępnej oceny przebiegów, dokonywanej przez eksperta w trybie offline. Generalnie jednak, znaczny nakład obliczeniowy sprawia, iż nie są one stosowane jako baza algorytmów detekcji działających w czasie rzeczywistym. Poza wspomnianymi metodami, istnieją inne podejścia, oparte na przekształceniu falkowym, ułamkowej transformacji Fouriera, dekompozycji empirycznej [3,7,11].

Nowa metoda detekcji spalania stukowego oparta na HVD

W dalszej części pracy zostanie przedstawiona zaproponowana przez autora metoda detekcji.

Model sygnału ciśnienia

Przebieg zmian ciśnienia w komorze spalania $x(t)$ można być zapisany jako

$$(1) \quad x(t) = w(t) + s(t) + n(t)$$

gdzie: $w(t)$ – składowa wolnozmienna niezawierająca informacji o spalaniu stukowym, $s(t)$ – składnik zawierający informację o spalaniu stukowym, $n(t)$ – addytywny składnik szumowy (modelowany jako szum gaussowski), którego moc zależy od prędkości obrotowej silnika.

W celu usunięcia składowej stałej oraz $w(t)$ z sygnału pomiarowego, a także ograniczenia zakresu przetwarzanych częstotliwości, dokonywana jest wstępna filtracja pasmowo-przepustowa. Podstawowe znaczenie dla detekcji ma jednak $s(t)$, który to składnik może być modelowany jako suma przebiegów o liniowo zmieniającej się częstotliwości oraz amplitudzie malejącej wykładniczo:

$$(2) \quad s(t) = \sum_{i=1}^J A_i e^{-a_i t} \cos(2\pi(f_i - 0.5b_i t)t)$$

gdzie: J , A_i , a_i , f_i , b_i to odpowiednio: liczba dominujących składników (zwykle od 2 do 4), amplituda początkowa, współczynnik tłumienia, częstotliwość początkowa oraz szybkość zmian częstotliwości i -tego składnika.

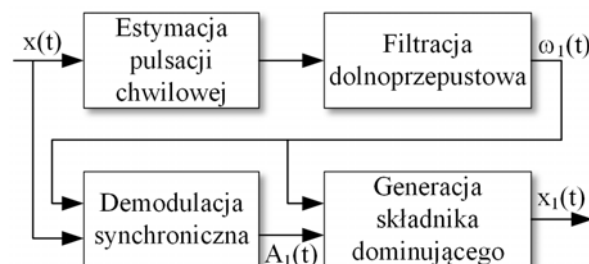
Przyjęcie powyższego modelu sygnału $s(t)$ można uzasadnić, odnosząc się do zjawisk fizycznych zachodzących w komorze spalania. Do wyznaczenia liczby

dominujących składników, a także ich częstotliwości, stosowany jest wzór Drapera, będący analitycznym rozwiązaniem równania falowego dla zamkniętego z dwóch stron cylindra [12]. Ponieważ rzeczywisty kształt geometryczny komory spalania jest bardziej złożony, a także występuje zależność prędkości rozchodzenia się fali od temperatury, uzyskiwane wyniki stanowią jedynie przybliżenie prawdziwych wartości [2]. Charakterystyczną cechą rzeczywistego sygnału ciśnienia jest występowanie zjawiska modulacji częstotliwościowej składników (nie jest to ujęte w modelu zaprezentowanym przez Drapera). Efekt ten wynika z istnienia dwóch mechanizmów. Istota oddziaływania pierwszego z nich polega na zwiększaniu długości fali wskutek wzrostu objętości komory spalania podczas ruchu tłoka w dół. Drugi, związany jest ze spadkiem temperatury czynnika w cylindrze podczas suwu rozprężania, co redukuje prędkość rozchodzenia się fali ciśnienia. W rezultacie, obserwujemy zmniejszanie się częstotliwości chwilowej składników, co można modelować za pomocą współczynnika b_i w równaniu (2). Ponadto, wraz z ruchem tłoka w dół maleje amplituda poszczególnych składników, co zostało uwzględnione poprzez wprowadzenie współczynnika tłumienia a_i . Zaprezentowany model sygnału ciśnienia wykorzystano również w pracach [13][14].

Dekompozycja sygnału

Dekompozycja wieloskładnikowego sygnału niestacjonarnego na poszczególne składowe jest zadaniem łatwym. Jednym z lepiej znanych rozwiązań jest zaproponowany przed N.E Huangą iteracyjny, adaptacyjny algorytm zwany dekompozycją empiryczną EMD (ang. Empirical Mode Decomposition) [15]. Zakres jego zastosowań obejmuje wiele dziedzin, należy jednak zdać sobie sprawę z pewnych ograniczeń odnoszących się do liczby, a także stosunku amplitud i częstotliwości chwilowych poszczególnych składników, które można efektywnie rozdzielić. Problematykę tę poruszono m.in. w [16]. Co również warto podkreślić, w jednej z prac, wykazano użyteczność tej metody w problemie detekcji spalania stukowego, jednakże przy ograniczonej do dwóch liczbie składowych [17].

Inne, ciekawe podejście do problemu dekompozycji sygnałów niestacjonarnych zaprezentowano w pracy [18]. Algorytm HVD (ang. Hilbert Vibration Decomposition), bo o nim mowa, jest stosunkowo nowym narzędziem, które znacząco poprawia separację składników leżących blisko siebie na płaszczyźnie TF. Na Rysunku 5 przedstawiono schemat blokowy działania metody HVD (pierwsza iteracja).



Rys.5. Schemat działania metody HVD - pierwsza iteracja

W oparciu o przebieg wejściowy $x(t)$ tworzony jest zespolony sygnał analityczny

$$(3) \quad z(t) = x(t) + j \cdot x_H(t) = A(t)e^{j\varphi(t)}$$

gdzie $x_H(t)$ oznacza transformatę Hilberta sygnału $x(t)$.

Pozwala to na zdefiniowanie chwilowej amplitudy i fazy sygnału

$$(4) \quad A(t) = \sqrt{x^2(t) + x_H^2(t)}$$

$$(5) \quad \varphi(t) = \arctan\left(\frac{x_H(t)}{x(t)}\right)$$

Z równań (4) i (5) dostajemy pulsację chwilową jako

$$(6) \quad \omega(t) = \frac{d\varphi(t)}{dt} = \frac{x(t) \frac{d}{dt} x_H(t) - x_H(t) \frac{d}{dt} x(t)}{A^2(t)}$$

Mechanizm dekompozycji dogodnie przedstawić wykorzystując do tego celu sygnał, będący sumą dwóch przebiegów harmonicznycch ($A_1 > A_2$; $\omega_2 > \omega_1$)

$$(7) \quad x(t) = A_1 \cos \omega_1 t + A_2 \cos \omega_2 t$$

Dla tego sygnału amplituda oraz pulsacja chwilowa dane są wzorem [16]

$$(8) \quad A(t) = \sqrt{A_1^2 + A_2^2 + 2A_1A_2 \cos(\omega_2 - \omega_1)t}$$

$$(9) \quad \omega(t) = \omega_1 + \frac{(\omega_2 - \omega_1)[A_2^2 + 2A_1A_2 \cos(\omega_2 - \omega_1)t]}{A^2(t)}$$

Pulsacja dana wzorem (9) jest sumą wartości stałej oraz niesymetrycznego składnika szybkozmiennego, pulsującego wokół ω_1 , który może zostać usunięty za pomocą filtra dolnoprzepustowego. W ten sposób uzyskujemy informację o pulsacji składnika harmonicznego o największej energii (tzw. składnik dominujący). Następnie, w oparciu o tą wiedzę, przeprowadzana jest demodulacja synchroniczna, w wyniku której otrzymujemy amplitudę chwilową tego składnika. W efekcie, dostajemy postać czasową składnika dominującego. W celu wyznaczenia wszystkich składników analizowanego sygnału, schemat ten powtarzamy w kolejnej iteracji, tym razem traktując różnicę $x(t) - x_1(t)$ jako sygnał wejściowy.

Zaprezentowany tutaj opis działania dotyczył prostego dwuskładnikowego sygnału harmonicznego. Jednakże, algorytm ten z powodzeniem może być również stosowany w przypadku sygnałów o wolnozmiennnej pulsacji i amplitudzie chwilowej. Szczegółowe wyprowadzenie można znaleźć, np. w [19,20].

Miara intensywności spalania stukowego

Dekompozycja sygnału ciśnienia na składowe umożliwia głębszą analizę procesów zachodzących w komorze spalania. Dzięki temu możliwe jest wyznaczenie parametrów poszczególnych składników częstotliwościowych, co ma duże znaczenie na etapie prototypowania jednostki napędowej. W produkcie końcowym, istotna jest jednak informacja ilościowa, odnosząca się do aktualnej wartości intensywności spalania stukowego. W zaproponowanej metodzie miarą tą jest suma energii poszczególnych składowych sygnału ciśnienia. Parametr *KI* (ang. Knock Intensity), dla sygnału dyskretnego, zdefiniowano jako

$$(10) \quad KI = \sum_{j=1}^J \sum_{n=1}^N x_j^2(n)$$

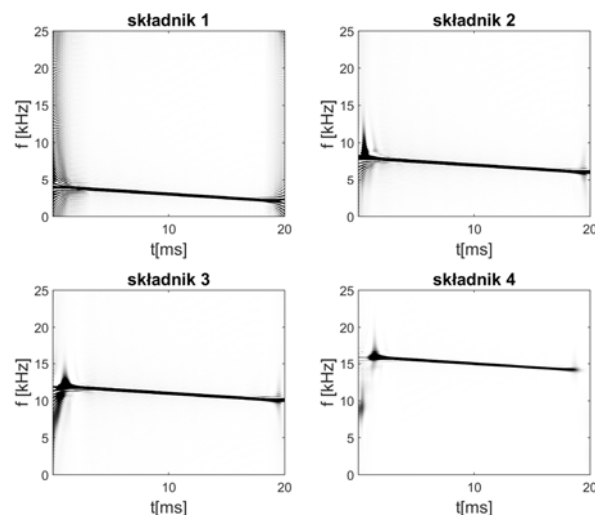
gdzie: $x_j(n)$ – poszczególne składowe sygnału ciśnienia uzyskane za pomocą metody HVD, N - liczba próbek sygnału, J - liczba składowych dominujących.

Wyniki badań

Badania laboratoryjne jednostek napędowych nie pozwalają na generację cykli spalania mieszanki paliwowo-powietrznej z założoną intensywnością spalania stukowego. Ponadto, nie istnieje ogólnie przyjęta referencyjna metoda pomiarowa pozwalająca taką wiedzę uzyskać. Tym samym, proces weryfikacji działania zaproponowanej metody detekcji przeprowadzono w oparciu o badania symulacyjne.

Jak wspomniano wcześniej, niezwykle cennym źródłem informacji o charakterze sygnału ciśnienia jest obszerna baza danych, zawierająca zarejestrowane przebiegi dla spalania normalnego oraz stukowego. W trakcie wstępnych badań, dla wybranych prędkości obrotowych silnika, dokonano wizualnej oceny obrazów czasowo-częstotliwościowych (rozkład Choi-Williamsa, przykład pokazano na Rys. 3) reprezentujących nieprawidłowy przebieg procesu spalania. W ten sposób, wyznaczono wartości parametrów sygnału ciśnienia (liczbę składników, amplitudę i częstotliwość początkową, szybkość zmian częstotliwości, współczynnik tłumienia). Dzięki temu, uzyskano analityczną postać sygnału, opartego na modelu z równania (2), zbliżonego do rzeczywistego przebiegu. W efekcie, możliwe stało się zweryfikowanie jakości dekompozycji algorytmu HVD oraz określenie wpływu szumu tła na błąd estymacji intensywności spalania stukowego.

Badania symulacyjne przeprowadzono w środowisku Matlab, wykorzystując ogólnodostępny pakiet funkcji realizujący algorytm HVD [19]. Wywołanie procedury dekompozycji wymaga podania wartości dwóch parametrów, tj. liczby izolowanych składowych (liczba iteracji) oraz częstotliwości granicznej filtra dolnoprzepustowego. Wartości te ustalono na podstawie analizy obrazów czasowo-częstotliwościowych.



Rys.6. Dekompozycja sygnału ciśnienia uzyskana za pomocą metody HVD

Pierwszy przeprowadzony eksperyment miał na celu weryfikację jakości dekompozycji uzyskanej za pomocą metody HVD. Sygnał testowy, modelowany zgodnie z równaniem (2), uzyskano poprzez odpowiedni dobór amplitudy A_i , współczynnika tłumienia a_i , częstotliwości początkowej f_i oraz szybkości zmian częstotliwości b_i . Przyjęto następujące wartości: $A_1=4$, $a_1=60$, $f_1=4$ kHz; $A_2=3$, $a_2=50$, $f_2=8$ kHz; $A_3=2$, $a_3=50$, $f_3=12$ kHz; $A_4=1$, $a_4=60$, $f_4=16$

kHz oraz $b_i=100$ kHz/s ($i=1...4$). Następnie sygnał ten spróbkowano ($f_s=50$ kHz) otrzymując $L=1024$ dyskretnych wartości. Przytoczone wartości modelują typowy, rzeczywisty przebieg zmian ciśnienia, obserwowany dla prędkości obrotowej silnika 1500 obr/min. Wybór ten odnosi się do przypadku występowania aż czterech składników częstotliwościowych, co stanowi swego rodzaju wyzwanie dla algorytmu dekompozycji opartego na metodzie HVD. W zakresie wyższych prędkości obrotowych maleje liczba dominujących składników co poprawia jakość dekompozycji.

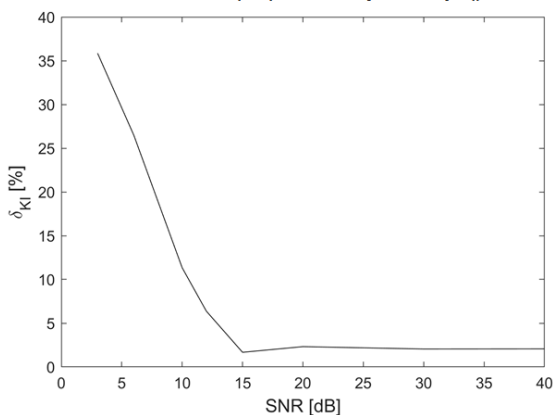
Wynik dekompozycji przedstawiono na płaszczyźnie czasowo-częstotliwościowej (Rys. 6) wykorzystując do tego celu rozkład Choi-Williamsa. Jak można zauważyć, metoda HVD dokonała prawidłowej separacji składników sygnału ciśnienia.

Drugi eksperyment polegał na wyznaczeniu błędu względnego estymacji intensywności spalania stukowego, uwzględniając przy tym wpływ szumu tła. W tym celu, do wykorzystanego poprzednio sygnału testowego dodano szum gaussowski o zadanej mocy.

Błąd względny estymacji wartości parametru KI zdefiniowano jako

$$(11) \quad \delta_{KI} = \frac{|KI_{HVD} - KI|}{KI} \cdot 100\%$$

Występująca w równaniu (11) wartość KI to energia niezasmuonego, testowego sygnału. KI_{HVD} obliczono natomiast w oparciu o dekompozycję zasmuowanego sygnału, sumując energię poszczególnych wyizolowanych składowych. Badania przeprowadzono dla 8 wartości SNR z zakresu od 3 dB do 40 dB. Aby uwzględnić losowy charakter realizacji szumu, dla każdej wartości SNR stukrotnie przeprowadzono symulację, uśredniając na końcu wyniki. Rysunek 7 stanowi potwierdzenie skuteczności działania zaproponowanej metody.

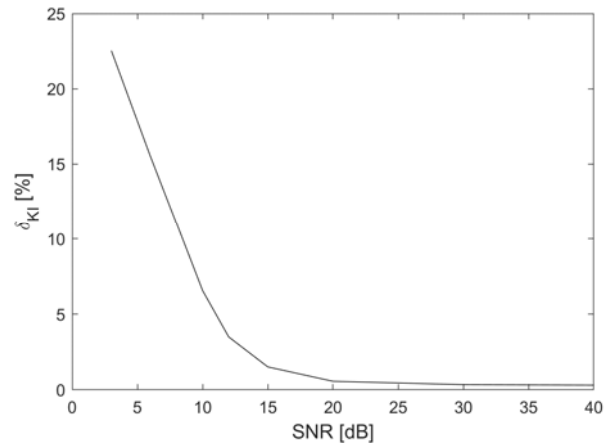


Rys. 7. Błąd względny estymacji intensywności spalania stukowego (4 składowe)

Dla wartości SNR > 15 dB, obserwujemy niewielki błąd (ok. 2 %). Wraz ze zmniejszaniem SNR odnotowujemy pogarszanie zdolności detekcyjnej. Co jednak ważne, w typowym zakresie prędkości obrotowych, dla których SNR > 10 dB, błąd pozostaje na akceptowalnym poziomie (ok. 10 %).

Trzeci eksperyment miał na celu określenie wpływu liczby składowych częstotliwościowych sygnału ciśnienia na błąd estymacji intensywności spalania stukowego. Ponieważ w zakresie wyższych prędkości obrotowych silnika liczba obserwowanych składników maleje, wykorzystywany wcześniej sygnał testowy zmodyfikowano, odrzucając składnik o najmniejszej częstotliwości.

Następnie, tak jak w eksperymencie drugim, dodano szum o zadanej mocy, otrzymując zależność przedstawioną na rysunku 8.



Rys. 8. Błąd względny estymacji intensywności spalania stukowego (3 składowe)

Jak można zauważyć, błąd względny uległ zmniejszeniu. Efekt ten wynika z poprawy jakości dekompozycji, w przypadku gdy analizowany sygnał ma prostszą postać. Z tego powodu, przy wyższych prędkościach obrotowych, zmniejszając wartość tylko jednego parametru metody HVD (liczba iteracji) można w prosty sposób poprawić dokładność estymacji intensywności spalania stukowego.

Przytoczone w tej części pracy wnioski dają podstawę do stwierdzenia, iż zaproponowana metoda umożliwi wiarygodną ocenę zjawiska spalania stukowego.

Uzyskane wartości błędności estymacji intensywności spalania stukowego można odnieść do wyników innej pracy autora, w której do dekompozycji sygnału ciśnienia zastosowano algorytm EMD [17]. Ponieważ parametr KI zdefiniowano w ten sam sposób, możliwe jest bezpośrednie zestawienie rezultatów. Porównując wartości błędności względnej δ_{KI} widać przewagę rozwiązania opartego na algorytmie HVD. Co dodatkowo należy podkreślić, w cytowanej poprzednio pracy wykorzystano prostszy, bo jedynie dwuskładowy sygnał (wynikało to z ograniczeń metody EMD, który to problem szerzej omówiono w [16]). Biorąc pod uwagę związek pomiędzy liczbą składowych częstotliwościowych a błędem estymacji wartości parametru KI , co było przedmiotem eksperymentu trzeciego, można stwierdzić, iż zaproponowana w niniejszym artykule metoda detekcji pozwala na wiarygodniejszą detekcję.

Wiele pozycji literaturowych z tego zakresu przedstawia rozwiązania oparte na filtracji pasmowo-przepustowej, z użyciem pojedynczego lub kilku filtrów dopasowanych do częstotliwości występowania poszczególnych składowych częstotliwościowych [2,9,21]. Efektywność tych metod można zwiększać, stosując wąskopasmowe filtry wysokich rzędów, co redukuje wpływ szumu tła. Niestety, częstotliwość składników świadczących o występowaniu spalania stukowego nie jest stała, lecz zależy od prędkości obrotowej silnika i jego obciążenia. W związku z tym, zachodzi konieczność dynamicznego przestrajania filtrów w zależności od parametrów pracy silnika, co jest bardzo trudne w realizacji. Z tego również powodu, nie jest możliwe miarodajne porównanie skuteczności tychże metod i zaproponowanego rozwiązania. W tym kontekście widać wyraźnie przewagę dekompozycji HVD od podejścia opartego na zespole filtrów, co bezpośrednio przekłada się na znacznie prostszą implementację zaproponowanego podejścia.

Podsumowanie

Zjawisko spalania stukowego negatywnie oddziałuje na trwałość i parametry jednostki napędowej, jak również na środowisko naturalne. Sprawia to, iż poruszona w pracy tematyka jest bardzo aktualna, szczególnie w kontekście wprowadzania coraz to bardziej surowych norm emisji spalin.

Zaproponowane rozwiązanie bazuje na analizie sygnału ciśnienia w komorze spalania, opartej na stosunkowo nowym narzędziu przetwarzania sygnałów niestacjonarnych jakim jest metoda HVD.

Jak wykazano w pracy, zastosowanie tej metody dekompozycji umożliwia precyzyjną ocenę charakteru zjawiska spalania stukowego.

W oparciu o badania symulacyjne dokonano również weryfikacji dokładności wyznaczania intensywności spalania stukowego w przypadku sygnałów, dla których wartość SNR może zmieniać się w szerokim zakresie. Uzyskane rezultaty mogą świadczyć o przydatności metody. Niewątpliwą zaletą zaproponowanej metody w obszarze produkcji wielkoseryjnej jest jej prostota oraz niski nakład obliczeniowy, co przekłada się bezpośrednio na redukcję kosztów realizacji algorytmu działającego w czasie rzeczywistym.

Praca sfinansowana ze środków Ministerstwa Nauki i Szkolnictwa Wyższego

Autor: dr. inż. Jerzy Fiolka, Politechnika Śląska, Wydział Automatyki, Elektroniki i Informatyki, Katedra Elektroniki, Elektrotechniki i Mikroelektroniki, ul. Akademicka 16, 44-100 Gliwice, e-mail: jerzy.fiolka@polsl.pl

LITERATURA

- [1] Heywood J., Internal Combustion Engine Fundamentals, 2 edition, McGraw-Hill Education, (2018)
- [2] Millo F., Ferraro C.V., Knock in s.i engines: a comparison between different techniques for detection and control, *SAE Technical Paper*, (982477), (1998)
- [3] Fiolka J., Wykrywanie spalania stukowego w silnikach benzynowych z wykorzystaniem metod czasowo-częstotliwościowych, *Rozprawa doktorska*, (2004)
- [4] Eriksson L., Thomasso A., Cylinder state estimation from measured cylinder pressure traces - A Survey 20th, *World Congress, The International Federation of Automatic Control*, France, (2017)
- [5] Iorio B., Giglio V., Police G., Rispoli N., Methods of Pressure Cycle Processing for Engine Control, *SAE Technical Papers*, No. 10.4271/2003-01-0352, (2009)
- [6] Vollberg D., Wachter D., Kuberczyk T., Schultes G.: Cylinder pressure sensors for smart combustion control, *J. Sens. Syst.*, (8), (2019), 75-85
- [7] Fiolka J., Application of the fractional Fourier transform in automotive system development: the problem of knock detection, *Conference Proceedings of Signal processing: algorithms, architectures, arrangements, and applications (SPA)*, (2017), 286-291
- [8] Włodarczyk M.T., Fiber optic-based in-cylinder pressure sensor for advanced engine control and monitoring, *Combustion engines*, (8), No.4 (151), (2012)
- [9] Lee J.H., Hwang J.S., Lim J.S., Jeon Y.S., Cho Y.S., A new knock detection method using cylinder pressure, block vibration and sound pressure signals from an SI engine, *SAE Technical Paper*, (981436), (1998)
- [10] Hudson C., Gao X., Stone R.: Knock measurement for fuel evaluation in spark ignition engines, *Fuel, Elsevier*, (80), (2001), 395-407
- [11] Fiolka J., Preliminary investigation of the in-cylinder pressure signal using Teager Energy Operator, *Conference Proceedings of Signal processing: algorithms, architectures, arrangements, and applications (SPA)*, (2018), 31-36
- [12] Draper C.S., The physical effects of detonation in a closed cylindrical chamber, *National Advisory Committee For Aeronautics*, Report No. 493, 1934
- [13] Stankovic L., Bohme J.F., Time-frequency analysis of multiple resonances in combustion engine signals, *Signal Processing*, vol. 79, issue 1, (1999), 15-28
- [14] Matz G., Hlawatsch., Time-frequency methods for signal detection with application to the detection of knock in car engines, *IEEE Signal Processing Workshop on Statistical Signal and Array Processing*, (1998), 196-199
- [15] Huang N.E., Attoh-Okine N.O., The Hilbert-Huang Transform in Engineering, *CRC Press*, (2005)
- [16] Feldman M., Analytical basics of the EMD: Two harmonics decomposition, *Mechanical Systems and Signal Processing*, (23), (2009), 2059-2071
- [17] Fiolka J., Application of Hilbert-Huang Transform to engine knock detection, *Conference Proceedings of Mixed design of integrated circuit and system (MIXDES)*, (2013), 457-461
- [18] Feldman M., Time-varying vibration decomposition and analysis based on the Hilbert transform, *Journal of Sound and Vibration*, (295), (2006), 518-530
- [19] Feldman M., Hilbert Transform Applications in Mechanical Vibration, *Wiley*, (2011)
- [20] Gawędzki W., Serzysko B., Zastosowanie transformacji Hilbert Vibration Decomposition do analizy sygnałów parasejsmicznych w dziedzinie czasu, *Przegląd Elektrotechniczny*, 91 (2015), nr. 8, 7-10
- [21] Boubal O., Knock detection in automobile engines, *IEEE Instrumentation & Measurement Magazine*, (2000), 25-28