

Ocena możliwości detekcji zjawisk wypadania zapłonu w silniku spalinowym o ZS przy użyciu metod drganiowych

W artykule przedstawiono wpływ zjawiska wypadania zapłonów na wybrane parametry sygnałów drgań, wskazując na możliwości użycia metod drganiowych do kontroli wypadania zapłonów w silniku o ZS pod kątem wymagań diagnostyki pokładowej OBD (On-Board Diagnostics). Określono poszczególne etapy metodyczne pomiarów i analizy sygnałów drgań zrealizowane przez autorów pracy, przedstawiono wyniki badań i kierunki dalszych prac dotyczących zastosowania metod drganiowych do pokładowej diagnostyki zjawisk wypadania zapłonów.

1. Wstęp

Spalanie w silnikach o zaplonie samoczynnym (ZS) ma zasadniczo odmienny charakter niż w silnikach o zaplonie iskrowym (ZI). W obu jednak przypadkach przebieg tego procesu ma istotne znaczenie dla uzyskiwanych przez silniki parametrów pracy (moc użyteczna, zużycie paliwa, sprawność ogólna). Właściwe przygotowanie mieszanki palnej i poprawne sterowanie przebiegiem procesu spalania przyczynia się do uzyskiwania większej pracy z jednostki energii paliwa, co sprawia, że uzyskuje się niższe jednostkowe zużycie paliwa (wyższa sprawność ogólna). Dobra organizacja wspomnianych procesów przyczynia się też do mniejszej emisji szkodliwych składników spalin z silnika spalinowego. Rozpoczęcie procesu spalania jest wynikiem wystąpienia samozapłonu, który ma miejsce w różnych częściach komory spalania. Miejsce i chwila wystąpienia samozapłonu zależy od wielu czynników, wśród których wymienić można jakość przygotowania mieszanki w okresie opóźnienia samozapłonu i okres trwania tego opóźnienia, który jest zależny od warunków pracy silnika. Wystąpienie zjawisk wypadania zapłonu w czasie pracy silnika jest zjawiskiem negatywnym. Brak zapłonu skutkuje utratą całej energii chemicznej zawartej w paliwie, powodując zmniejszenie sprawności ogólnej silnika i zwiększenie emisji węglowodorów i cząstek stałych do środowiska naturalnego. Dodatkowo znacznie zmniejsza sprawność konwersji składników szkodliwych przez reaktor katalityczny, przyspiesza jego zużycie, a w skrajnych przypadkach jest przyczyną jego uszkodzenia. Z uwagi na wspomniane konsekwencje wystąpienia zjawisk wypadania zapłonu w silniku spalinowym, jest niezwykle ważne, aby w sposób jednoznaczny wykryć to negatywne zjawisko i określić częstotliwość jego występowania. Właściwa metodyka oceny tego procesu ma istotne znaczenie w strategii przeciwdziałania jego skutkom, co odzwierciedla się w strategii sterowania pracą silnika w aspekcie poprawy uzyskiwanych wskaźników pracy i w aspekcie zapewnienia wymaganego poziomu spełnienia aktualnych norm emisji szkodliwych składników spalin.

2. Metody wykrywania zjawisk wypadania zapłonów

Realizacja wykrywania wypadania zapłonów w silniku o ZS może być dokonywana przy użyciu metod, które bazują na pomiarze i ocenie [4 i 5]: chwilowej wartości prędkości kątowej wału korbowego silnika, chwilowej wartości ciśnienia gazów wylotowych silnika, chwilowej wartości ciśnienia w cylindrze, sygnału jonizacji w komorze spalania, momentu obrotowego, oraz sygnałów optycznych rejestrowanych w komorze spalania.

Metoda oparta na ocenie chwilowej wartości prędkości obrotowej wału korbowego silnika jest metodą powszechnie stosowaną do wykrywania wypadania zapłonów w silnikach pojazdów o zastosowaniach drogowych (procedura kontroli realizowana przez system OBD II/EOBD). W metodzie wykorzystuje się zjawisko zmniejszania się wartości momentu i prędkości obrotowej wskutek braku spalania zgodnie z równaniem [4 i 5]:

$$M_o = M_h + J \frac{d\omega}{dt} \quad (1)$$

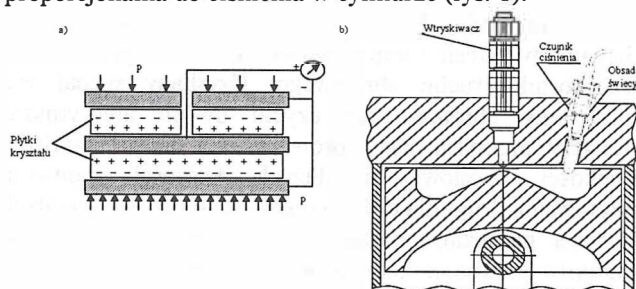
gdzie: M_o – moment obrotowy silnika,
 J – moment bezwładności układu napędowego i pojazdu zredukowany do osi wału korbowego,
 M_h – moment oporów ruchu samochodu i układu napędowego zredukowany do osi wału korbowego,
 ω – prędkość kątowa wału korbowego,
 t – czas.

Pomiar prędkości kątowej wału korbowego jest możliwy przez zastosowanie czujników indukcyjnych lub Halla reagujących na znaczniki umieszczone na wale silnika i wale rozrządu. Dzięki tym czujnikom jest możliwe zliczanie w okresie t impulsów wytworzonych przy obrocie przetwornika ruchu obrotowego. Uzyskany sygnał jest poddawany obróbce przy użyciu dwóch algorytmów. Pierwszy algorytm jest stosowany dla małych wartości prędkości obrotowej i dużych wartości momentu obrotowego, drugi dla dużych prędkości obrotowej i małych wartości momentu obrotowego. W metodzie opartej na pomiarze prędkości kątowej wału silnika mogą wystąpić problemy z detekcją braku spalania w zakresie dużych wartości prędkości obrotowych i małych obciążeń, co można ograniczyć stosując filtrowanie dolnoprzepustowe sygnału bądź ocenę częstotliwościową bieżącej wartości prędkości obrotowej.

W metodzie pomiaru chwilowej wartości ciśnienia gazów wylotowych wykorzystuje się zjawisko znacznego zmniejszenia się wartości ciśnienia w układzie wylotowym wskutek wypadnięcia zapłonu. W trakcie prawidłowego cyklu pracy silnika otwarcie zaworu wylotowego powoduje zwiększenie wartości ciśnienia w kolektorze wylotowym w wyniku nagłego uwolnienia produktów spalania i ruchu

tłoka w kierunku górnego martwego punktu (GMP). W przypadku wystąpienia zjawiska braku zapłonu, ciśnienie w cylindrze jest około trzy razy mniejsze niż w przypadku regularnego procesu spalania. Ponieważ ciśnienie w cylindrze w takim przypadku jest niższe niż w kolektorze wylotowym, następuje wsteczne przemieszczenie gazów wylotowych z kolektora do cylindra, w którym miało miejsce wypadnięcie zapłonu. Tym tłumaczyć można znaczne zmniejszenie wartości ciśnienia w kolektorze wylotowym. Pomiar ciśnienia realizuje się za pomocą przetwornika ciśnienia podłączonego do kolektora wylotowego. W odróżnieniu od czujników montowanych na kadłubie silnika nie jest potrzebny układ chłodzenia czujnika. Wymagane pasmo przenoszenia rejestrowanych sygnałów zależy od dynamiki zjawisk w kolektorze wylotowym. Częstotliwość wyłączenia czujnika powinna wynosić co najmniej 200 Hz. Dużego znaczenia nabiera właściwe umieszczenie czujnika w układzie wylotowym. Od niego zależy jakość uzyskiwanego sygnału pomiarowego. Ponadto w metodzie oceny wartości ciśnienia w układzie wylotowym bezwładność spalin w znacznym stopniu wpływa na szybkość i jakość oceny procesu spalania, co ma istotne znaczenie w przypadku ciągłej kontroli braku zapłonu.

W praktyce badań laboratoryjnych do oceny procesu spalania w silniku spalinowym stosuje się pomiar ciśnienia w cylindrze [4 i 5]. Pomiar tej wielkości fizycznej jest realizowany z wykorzystaniem metod piezoelektrycznych i optycznych. W przypadku metod piezoelektrycznych wykorzystuje się efekt piezoelektryczny, który ma miejsce w anizotropowych ośrodkach dielektrycznych o określonej strukturze krystalograficznej. W wyniku umieszczenia takiego materiału w zewnętrznym polu elektrycznym następuje jego deformacja typowa dla ściskania albo rozciągania. Chwilowa wartość ciśnienia w cylindrze oddziałuje na zestaw płytek przetwornika ciśnienia powodując ich deformację mechaniczną. W wyniku tej deformacji jest generowany ładunek elektryczny na ściankach płytek, który jest dalej odprowadzany przewodami do wzmacniacza ładunku i rejestratora. Wartość ładunku jest wprost proporcjonalna do ciśnienia w cylindrze (rys. 1).



Rys. 1. Zasada działania czujnika piezoelektrycznego (a) i przykład zamontowania czujnika w obsadzie świecy żarowej (b) w silniku o zapłonie samoczynnym (P – ciśnienie) [5]

W metodzie optycznej pomiaru ciśnienia w cylindrze zmiana ciśnienia powoduje przemieszczenie przepony czujnika, zmieniając sygnał optyczny (natężenie światła), który dociera przez włókno nadajnika do odbiornika przepony [5]. Sygnał pomiarowy jest zależny od intensywności natężenia promieniowania w komorze spalania w wyniku spalania mieszanki palnej.

Wykorzystanie pomiaru ciśnienia za pomocą przetworników piezoelektrycznych w pojazdach trakcyjnych napotyka na znaczne trudności, które są związane ze znacznym kosztem przetworników, ich niewielką żywotnością, wrażliwością na interferencje elektromagnetyczne i koniecznością zapewnienia chłodzenia. Zastosowanie czujników z włóknem optycznym ogranicza częściowo poprzednie wady, jednak zakres pracy przetwornika jest mniejszy niż dla przetworników piezoelektrycznych.

W metodzie oceny braku spalania na podstawie pomiaru sygnału jonizacji wykorzystuje się zjawisko powstawania wolnych elektronów (jonizacja chemiczna i termiczna) podczas procesu spalania [3]. W wyniku reakcji chemicznych zachodzących w komorze spalania silnika podczas procesu spalania paliwa powstają wolne elektrony (jonizacja chemiczna). Jonizacja chemiczna ma miejsce w czasie reakcji egzotermicznej, kiedy wyzwolona w wyniku niej energia jest na tyle duża, aby zjonizować jeden z produktów reakcji. Proces jonizacji powstającej w płomieniu przebiega według reakcji:



W wyniku reakcji wymiany ładunków powstaje następnie jon H_3O^+ [3]:



Ilość tych jonów jest znacznie wyższa niż jonów CHO^+ , ponieważ reakcja, w wyniku której powstają, przebiega znacznie szybciej od reakcji (2). Proces powstawania dodatkowych wolnych elektronów następuje pod wpływem wzrostu temperatury w komorze spalania (jonizacja termiczna) i może być opisany za pomocą następującej reakcji [3]:



gdzie: M – dany rodzaj cząsteczki,

M^+ - jon dodatni,

E_{ion} – energia jonizacji.

Wytworzone w wyniku jonizacji chemicznej i termicznej jony [3] po krótkim czasie łączą się ponownie z elektronami i tworzą cząsteczki bardziej stabilne (5). Ich szybkość rekombinacji jest jednak różna.



Pole elektryczne utworzone przez źródło prądu stałego przez dodatnią elektrodę (czujnik jonizacyjny), będzie przyciągać elektrony utworzone w komorze spalania, co spowoduje przepływ prądu. Powierzchnia tłoka i ścianek cylindra stanowi powierzchnię o ujemnym ładunku. Intensywność procesu jonizacji podczas spalania jest ściśle związana ze zmianami ciśnienia (temperatury) wewnątrz komory spalania.

Pomiar chwilowej wartości momentu obrotowego na wale silnika jest metodą, która nie znalazła zastosowania w ocenie zjawisk wypadania zapłonu w silnikach spalinowych pojazdów trakcyjnych. Kontrola zjawisk wypadania zapłonów przy pomocy tej metody jest realizowana z wykorzystaniem następujących zjawisk i przetworników:

- **przetworniki piezoelektryczne** – generowanie ładunku pod wpływem siły odkształcającej krystaliczną strukturę

elementu aktywnego. Wymagają stosowania układów kondycjonujących o dużej impedancji i nie nadają się do pomiarów statycznych. Wykazują małą wrażliwość na zmiany temperatury (mogą pracować w temperaturze do 500°C). Pozwalają mierzyć sygnały o stosunkowo dużej częstotliwości;

- **przetworniki magnetyczne** – rejestrują zmianę podatności magnetycznej elementów wału pod wpływem przenieszonego obciążenia. Przyłożony do wału moment obrotowy powoduje skrócenie i powstanie naprężeń w wale oraz proporcjonalną zmianę mierzonego parametru (podatności magnetycznej). Pomiar tą metodą silnie zależy od temperatury i zmian szerokości szczeliny powietrznej;

- **elementy pomiarowe naklejane na wał silnika** – wykonane z materiałów o właściwościach magnetycznych silnie zależnych od naprężeń mechanicznych. Do określenia zmian przepływu w szczelinie powietrznej służą w tym przypadku dodatkowe czujniki pola magnetycznego;

- **miar kąta skręcenia wału silnika** przy użyciu dwóch tarcz pomiarowych umieszczonych na jego końcach. Metoda ta jest stosunkowo tania i prosta w realizacji. Wykryte tą metodą skrócenie wału jest wprost proporcjonalne do momentu przenieszonego przez wał.

Wykrywanie wypadania zapłonów tą metodą jest utrudnione w niektórych zakresach pracy silnika. Sytuacja taka ma miejsce przy wysokich prędkościach obrotowych silnika i wysokich obciążeniach. Przy wysokich prędkościach obrotowych, dominujący wpływ na dynamikę układu ma bezwładność mas wirujących, która może stanowić szum zakłócający zmniejszanie się wartości momentu obrotowego w wyniku wypadania zapłonów. Przy małych obciążeniach silnika wpływ ciśnienia w komorze spalania na wartość momentu obrotowego także maleje i powoduje skutki podobne jak przy dużych prędkościach obrotowych. Oscylacyjny charakter odpowiedzi wartości momentu wywołany brakiem spalania w cylindrze może być bardzo podobny do innych przebiegów momentu w warunkach normalnej eksploatacji, np. wywołanych w chwili zmiany położenia (pozycji nastawnika w lokomotywie). Także ten stan przejściowy może pokryć odpowiedź w przypadku wystąpienia kolejnego braku spalania, w krótkim odstępie czasu po pierwszym.

Metody optyczne oceny przebiegu procesu spalania w silniku o zapłonie samoczynnym polegają na pomiarze emisji elektromagnetycznej w zakresie promieniowania widzialnego

i cieplnego. Metody te stosuje się do bezpośredniej obserwacji takich zjawisk jak przebiegi: tworzenia mieszanki palnej, ruchu ładunku wewnątrz komory spalania, spalania (samozapłon, rozwój płomienia). Do metod optycznych należą między innymi: stereografia i endoskopia video. Z uwagi na właściwości każdej z metod, które opisano szerzej w [5], ich zastosowanie ogranicza się do badań silnikowych wykonywanych w warunkach laboratoryjnych. Metody te nie nadają się w chwili obecnej do bieżącej kontroli procesu spalania pod kątem wykrywania zjawisk braku zapłonu.

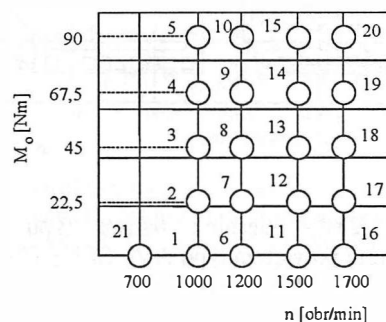
3. Zakres badań i stanowisko pomiarowe

Badania zrealizowano w oparciu o eksperyment czynny, który polega na celowej zmianie parametrów wejściowych i obserwacji wpływu tych zmian na wielkości wyjściowe. Parametrami wejściowymi były prędkość obrotowa i obciążenie silnika, natomiast parametry

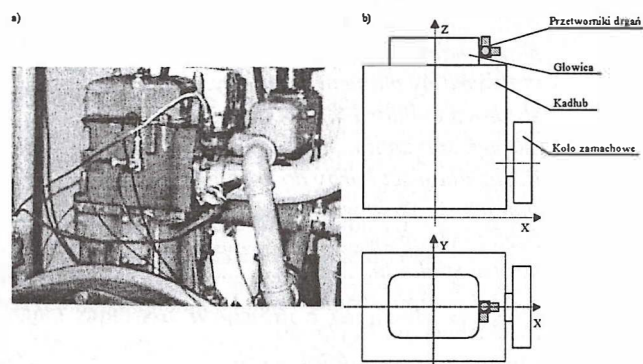
wyjściowe stanowiły: przyspieszenia i prędkości drgań, ciśnienie w komorze spalania, zużycie paliwa, emisja szkodliwych składników spalin.

Wybory warunków pracy silnika dokonano w oparciu o użyteczny zakres wartości prędkości obrotowej i momentu obrotowego, jakie można było uzyskać z obiektu badań. Warunki te odzwierciedlały pracę silnika w ramach charakterystyk obciążeniowych (rys. 2) przy czym wartość $n = 700$ obr/min odpowiadała pracy silnika w warunkach biegu jałowego, $n = 1000$ obr/min minimalnej prędkości obrotowej, przy której było możliwe obciążenie silnika a $n = 1700$ obr/min maksymalnej prędkości obrotowej dla tego obiektu badań.

W celu uzyskania braku zapłonu w silniku dokonywano impulsowego odcinania dawki paliwa z zastosowaniem mechanicznie sterowanego zaworu odcinającego.



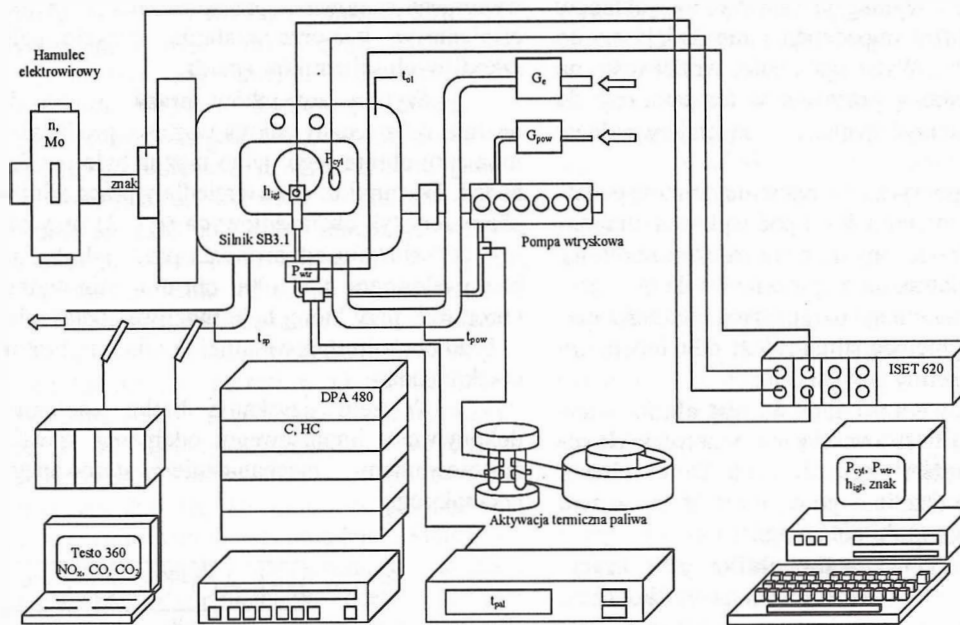
Rys. 2. Schemat rozmieszczenia punktów pracy silnika



Rys. 3. Lokalizacja punktu pomiarowego na silniku: a) widok silnika z przetwornikami drgań, b) schemat położenia punktów pomiarowych

Przetworniki drgań zamocowano do kostki sześciennego wyposażonej w gwintowane otwory na każdej ze ścian, po czym taki układ przytwierdzono do głowicy silnika (technologicznie wykonany gwintowany otwór w ścianie głowicy).

W skład układu pomiarowego wchodziły (rys. 4): czujnik ciśnienia typu AVL 8QP 505c, przetworniki drgań dla każdej osi firmy Brüel & Kjær typu 4391, znacznik kąta obrotu wału korbowego typu AVL 364, mechanicznie sterowany zawór odcinający dawkowanie paliwa do cylindra, przetwornik ciśnienia paliwa w przewodzie wysokiego ciśnienia typu Orion IAE 123, aparatura pomiarowa wielkości podstawowych. Do aparatury pomiarowej wielkości podstawowych należały: hamulec elektrowirowy



Rys. 4. Schemat układu pomiarowego

typu AMX 210, miernica paliwa typu AVL 733, stabilizacji temperatury cieczy chłodzącej typu AVL 553, przepływomierz powietrza typu AVL SENSYCON, układ mierniki temperatury cieczy chłodzącej i oleju w układzie smarowania.

4. Obiekt badań

Badania zrealizowano na jednocylindrowym silniku badawczym typ SB 3.1, którego dane techniczne przedstawiono poniżej:

rodzaj zapłonu i pracy.....	samoczynny, 4-suwowy
maksymalna moc użyteczna.....	$N_e = 23,2 [kW]$ przy $n = 2200 \text{ obr/min}$
maksymalny moment obrotowy.....	$M_o = 109,8 [Nm]$ przy $n = 1600 \text{ obr/min}$
średnica cylindra \times skok tłoka.....	$D \times S = 0,127 \times 0,146 [m]$
stopień sprężania.....	$\epsilon = 15,75$
iloraz długości korby do korbowa.....	$r/l = 0,262$
pojemność skokowa silnika.....	$V_{ss} = 1,852 \cdot 10^{-3} [m^3]$
liczba cylindrów.....	$i = 1$
system spalania.....	bezpośredni wtrysk paliwa do cylindra
rodzaj pompy wtryskowej.....	rzędowa tłoczkowa, typ P 51T2 - 10.03 II RVO
ilość zaworów/1 cylinder.....	2
otwarcie zaworu dolotowego.....	4° przed GMP (górny martwy punkt położenia tłoka)
zamknięcie zaworu dolotowego.....	57° po DMP (dolny martwy punkt położenia tłoka)
otwarcie zaworu wylotowego.....	42° przed DMP
zamknięcie zaworu wylotowego.....	24° po GMP
rodzaj wtryskiwacza.....	W1B-01 z rozpylaczem D1LMK 140/2 (4 otwory o średnicy 0,34 mm)
ciśnienie otwarcia wtryskiwacza.....	$p_{wtr} = 17,5 \pm 0,5 \text{ MPa}$
geometryczny początek tłoczenia paliwa.....	$\alpha_{pil} = 26^\circ$ przed GMP

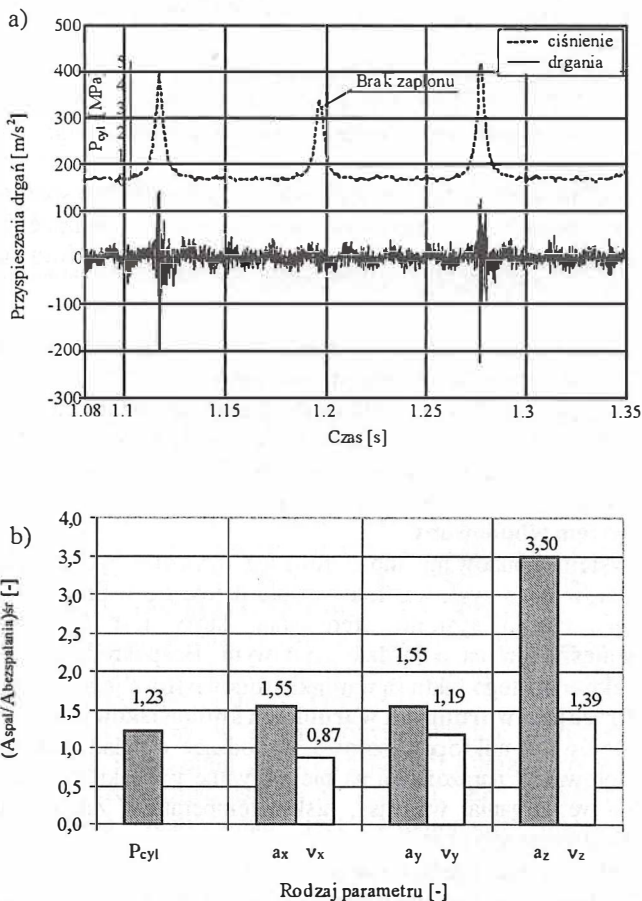
5. Analiza wyników pomiarów

Celem analizy sygnałów drganiowych było wyznaczenie charakterystyk i wielkości, opisujących jakościowo i ilościowo sygnał diagnostyczny. W ramach badań wyznaczono charakterystyki w dziedzinie czasu, amplitud i częstotliwości [1 i 2].

W sposób ilościowy sygnał drgań opisano za pomocą miar punktowych. Wyznaczono zarówno miary wymiarowe (amplituda średnia, skuteczna, pierwiastkowa i szczytowa), jak i miary bezwymiarowe (współczynnik kształtu, szczytu, impulsowości, luzu, kurtoza i pierwiastek czwartego stopnia z kurtozy).

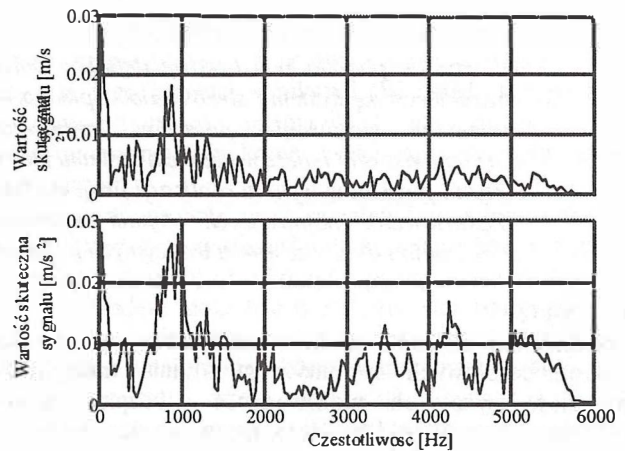
Ocenę tych miar wykonano dla pasma o częstotliwości 0 ÷ 6000 Hz. Wyznaczenie miar punktowych zrealizowano zarówno dla prawidłowych procesów spalania jak i dla cykli, w których wystąpiło zjawisko braku zapłonu. Następnie miary dla obu przypadków porównano ze sobą. W celu realizacji tego zamierzenia dokonano selekcji czasowej sygnału ciśnienia w cylindrze i sygnałów drgań.

Ocenę jakościową wpływu zjawiska wypadania zapłonu na przebiegi czasowe przyspieszeń drgań, prędkości drgań i ciśnienia w cylindrze zrealizowano dla różnych warunków pracy silnika, określonych wartością prędkości obrotowej i momentu obrotowego. Na podstawie tych przebiegów stwierdzono jakościowe zmiany sygnałów przyspieszeń drgań wskutek braku zapłonu dla całego zakresu pola pracy silnika. Sygnał prędkości był nieprzydatny do wyznaczenia braku zapłonu (dla sygnału nieodfiltrowanego). Stwierdzono między innymi możliwość określenia początku wtrysku paliwa, początku spalania (samozapłonu). Dodatkowo w przebiegach czasowych, widoczne jest zamykanie zaworów (uderzenie zaworu o gniazdo zaworowe). Na rysunku 5 przedstawiono zmiany wartości amplitud sygnału przyspieszeń drgań na tle zmian ciśnienia w cylindrze oraz ilościowe zmiany wartości amplitud sygnałów drgań i ciśnienia w cylindrze w wybranym punkcie pracy silnika.



Rys. 5. Przebieg czasowy sygnału przyspieszeń drgań w osi Z i ciśnienia w cylindrze (a) oraz wartości uśrednione współczynnika redukcji amplitudy ($A_{spal}/A_{bezspalania}$) drgań dla trzech osi dla $M_0 = 3 \text{ Nm}$ i $n = 1500 \text{ obr/min}$

Wykonanie widm amplitudowych miało na celu określenie pasm częstotliwości związanych z procesem spalania. Ocena widm amplitudowych przyspieszeń drgań w osi Z dla prawidłowego procesu spalania i z wypadaniem zapłonu umożliwia wskazanie różnic wartości skutecznej amplitud sygnału dla zakresu 600 ÷ 1200 Hz oraz dla zakresu 3000 ÷ 5000 Hz (rys. 6).



Rys. 6. Widmo amplitudowe przyspieszeń drgań w osi Z dla cyklu z brakiem zapłonu (a) i cyklu z prawidłowym procesem spalania (b) dla $M_0 = 3 \text{ Nm}$ i $n = 1500 \text{ obr/min}$

6. Podsumowanie

Na podstawie przeprowadzonych analiz wyników badań stwierdzono, że do wykrywania zjawisk wypadania zapłonów można wykorzystać przebiegi czasowe sygnału przyspieszeń drgań i jego analizę w dziedzinie częstotliwości. Ocena ilościowa wypadania zapłonów może być dokonana w oparciu o wyznaczenie miar punktowych. Mogą one stanowić podstawę do realizacji procedury diagnostycznej kontroli wykrywania zjawisk braku zapłonu w ramach działania systemu OBD II. Kontrola procesu spalania w oparciu o wybrane parametry sygnału drgań umożliwia jedną z istotnych identyfikacji braku zapłonu, co jest istotną zaletą tych metod w odniesieniu do metod obecnie wykorzystywanych. Opracowanie procedury wykrywania zjawisk wypadania zapłonów w oparciu o parametry sygnału drgań wymaga wykonania dalszych badań.

Literatura

- [1] Cempel C., *Podstawy wibroakustycznej diagnostyki maszyn*. Warszawa, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, 1982.
- [2] Cempel C., Tomaszewski F., *Diagnostyka maszyn*. Radom, Międzyresortowe Centrum Naukowe Eksploatacji Majątku Trwałego, 1992.
- [3] Glawno M., Spadafora P., Bosch R., *Closed Loop Start of Combustion Control Utilizing Ionization Sensing in a Diesel Engine*. SAE Technical Paper Series 1999-01-0549.
- [4] Merkiż J., Waligórski M., Boguś P., *Możliwości i warunki zastosowania systemów podobnych do OBD w silnikach lokomotyw spalinowych*. The 29th International Conference on Internal Combustion Engines, KONES 2003, Wisła 14-17.09.2003.
- [5] Merkiż J., Waligórski M., Boguś P., Grzeszczyk R., *Diagnostyka pokładowa zjawiska wypadania zapłonów w silnikach lokomotyw spalinowych*. Kwartalnik naukowo-techniczny pt. Pojazdy Szynowe, nr 4/2002, Poznań, 2002.