

## Ocena luzu zaworów układu rozrządu silnika spalinowego o ZS z wykorzystaniem analizy częstotliwościowej sygnału drganiowego

*W artykule przedstawiono wyniki badań dotyczące możliwości zastosowania charakterystyk częstotliwościowych sygnału drganiowego do oceny luzu zaworów silnika spalinowego. Wskazano na konieczność wstępnego przygotowania sygnału przyspieszeń drgań, przed wykonaniem analiz częstotliwościowych, w celu zmniejszenia ryzyka błędnej diagnozy.*

### 1. Wprowadzenie

Silniki spalinowe to jedno z głównych źródeł napędu pojazdów mechanicznych oraz wielu urządzeń stacjonarnych. Jednym z podstawowych zespołów tłokowego silnika spalinowego o zaplonie samoczynnym (ZS) jest układ rozrządu, którego zadaniem jest sterowanie wymianą ładunku. Poprawne działanie układu rozrządu jest możliwe tylko wtedy, kiedy parametry regulacyjne przyjmują optymalne wartości. Podstawowymi parametrami regulacyjnymi rozrządu silnika spalinowego są: luz zaworowy (między trzonkiem zaworu, a dźwignią lub między trzonkiem zaworu, a krzywką) oraz fazy rozrządu.

Nieprawidłowe ustawienie faz rozrządu może być spowodowane podczas montażu błędnym ustawieniem elementów silnika, wchodzących w skład napędu układu rozrządu lub może wystąpić w wyniku awarii napędu rozrządu np. zmiana położenia koła zębatego względem wału korbowego wywołana zerwaniem paska zębatego.

Luz zaworów jest parametrem regulacyjnym, który należy okresowo sprawdzać, ponieważ nieprawidłowo wyregulowany luz zaworów jest przyczyną pogorszenia efektywności pracy silnika spalinowego, zwiększenia emisji związków toksycznych do atmosfery, a także może doprowadzić do uszkodzenia elementów układu rozrządu silnika spalinowego np. nadpalenie przylgni zaworów lub gniazd zaworowych.

Wylimitowanie konieczności okresowej regulacji luzu zaworów w silnikach spalinowych umożliwia zastosowanie automatycznej kompensacji luzów zaworowych. Wprowadzenie do układu rozrządu dodatkowych mas powoduje zwiększenie sił bezwładności, a dodatkowe urządzenie zwiększa prawdopodobieństwo awarii, ponieważ jest włączone szeregowo w łańcuchu kinematycznym układu rozrządu. Konsekwencją uszkodzenia automatycznego kompensatora luzu zaworowego jest niekontrolowany wzrost luzu zaworów.

Celem badań jest ocena przydatności wybranych charakterystyk częstotliwościowych sygnału drganiowego generowanego przez głowicę silnika spalinowego do oszacowania luzu zaworów oraz analiza procesu przetwarzania sygnału przyspieszeń drgań dla pozyskania z niego informacji o stanie luzu zaworowego.

### 2. Charakterystyki częstotliwościowe w analizie sygnałów drganiowych

Charakterystyki częstotliwościowe przedstawiają amplitudę lub fazę sygnału w funkcji częstotliwości. W diagnostyce drganiowej do oceny stanu technicznego obiektów wykorzystuje się zależność amplitudy od częstotliwości

(widma amplitudowe, widma mocy, widma iloczynowe, widma gęstości mocy i inne).

Na podstawie analizy widmowej można dokonać identyfikacji uszkodzonego zespołu, ponieważ zespoły obiektów technicznych generują drgania o różnych częstotliwościach. Do analizy sygnałów drgań w dziedzinie częstotliwości stosuje się różnego rodzaju analizatory. Analiza widmowa może być wykonana ze stałą bezwzględną lub względną szerokością pasma analizy. Widma sygnałów drgań można otrzymać na drodze analogowej lub cyfrowego przetwarzania przebiegów czasowych sygnału.

Analiza sygnałów metodami analogowymi polega na sekwencyjnym lub równoległym filtrowaniu sygnałów za pomocą filtrów pasmowych [1]. Parametry filtrów oraz szczegóły tego typu przetwarzania sygnałów przedstawiono w pracach [2 i 3].

W związku z dynamicznym rozwojem technik informatycznych, obecnie najczęściej stosuje się cyfrowe metody przetwarzania i analizy sygnałów drganiowych. W cyfrowych metodach analizy sygnałów do transformacji przebiegów czasowych w dziedzinę częstotliwości wykorzystywane jest rozwinięcie funkcji w szereg Fouriera zgodnie z zależnością (1).

$$s(t) = a_0 + \sum_{k=1}^{\infty} \left[ a_k \cos\left(\frac{2 \cdot \pi \cdot k \cdot t}{T}\right) + b_k \sin\left(\frac{2 \cdot \pi \cdot k \cdot t}{T}\right) \right] \quad (1)$$

Współczynniki rozwinięcia funkcji w szereg Fouriera  $a_0$ ,  $a_k$  oraz  $b_k$  można wyznaczyć jako współczynniki korelacji pomiędzy funkcją  $x(t)$ , a zestawem ortogonalnych funkcji bazowych, używając zależności (2), (3), i (4) [1 i 5].

$$a_0 = \frac{1}{T} \int_0^T s(t) dt \quad (2)$$

$$a_k = \frac{1}{T} \int_0^T s(t) \cdot \cos\left(\frac{2 \cdot \pi \cdot k \cdot t}{T}\right) dt \quad (3)$$

$$b_k = \frac{1}{T} \int_0^T s(t) \cdot \sin\left(\frac{2 \cdot \pi \cdot k \cdot t}{T}\right) dt \quad (4)$$

W zależnościach (1) do (4) zastosowano następujące oznaczenia:

$s(t)$  – przebieg czasowy sygnału,

$t$  – czas,

$T$  – przedział czasu,

$k$  – rząd harmonicznej ( $k = 1, 2, 3, \dots$ );

$f$  – częstotliwość,

$a_0$  – stała składowa sygnału,

$a_k, b_k$  – współczynniki rozwinięcia funkcji w szereg Fouriera.

Warunkiem umożliwiającym przedstawienie przebiegu czasowego w postaci szeregu Fouriera jest spełnienie przez przebieg czasowy sygnału warunków Dirchleta, które sformułowano następująco [1 i 5]:

1. Dowolny wybrany przedział czasu  $t$  o szerokości  $T$  można podzielić na skończoną liczbę przedziałów, w których funkcja ta jest określona, ciągła i monotoniczna.
2. Liczba punktów nieciągłości musi być określona, a w każdym punkcie nieciągłości istnieje granica prawo i lewostronna.
3. Wartość funkcji w punkcie osobliwym jest równa średniej arytmetycznej granic.

W pracy [1] autor stwierdza, że każdy sygnał wibroakustyczny spełnia warunki Dirchleta.

Współczynniki  $a_k$  i  $b_k$  są widmem zespolonym sygnału. Widmo amplitudowe opisuje równanie (5), natomiast widmo fazowe można wyznaczyć na podstawie zależności (6).

$$A(k) = \sqrt{a_k^2 + b_k^2} \quad (5)$$

$$\theta(k) = \arctg\left(\frac{b_k}{a_k}\right) \quad (6)$$

gdzie:  $A(k)$  – widmo amplitudowe,

$\theta(k)$  – widmo fazowe,

$k$  – rząd harmonicznej ( $k = 1, 2, 3, \dots$ ),

$a_k, b_k$  – współczynniki rozwinięcia funkcji w szereg Fouriera.

### 3. Metodyka i obiekt badań

Badania przeprowadzono zgodnie z metodyką badań, której szczegółowe założenia przedstawiono w pracach [4 i 6].

Do badań użyto badawczego silnika spalinowego o ZS typu SB 3.1. W trakcie badań przyjęto następujące parametry pracy silnika: prędkość obrotowa 700 obr/min, moment obrotowy bez obciążenia (ok. 3 Nm opory własne hamulca), temperatura cieczy chłodzącej 75°C.

Badania zostały przeprowadzone zgodnie z zasadami eksperymentu czynnego. Zmieniano wartość luzu zaworów pomiędzy trzonkiem zaworów a dźwignią zaworową w zakresie 0,3 ± 1 mm z krokiem 0,1 mm i równocześnie obserwowano zmiany zachodzące w widmach amplitudowych, wyznaczonych z sygnałów prędkości i przyspieszeń drgań.

Zarejestrowano sygnały przyspieszeń oraz prędkości drgań w trzech wzajemnie prostopadłych kierunkach, sygnał ciśnienia panującego w cylindrze oraz sygnał ze znacznika kąta obrotu wału korbowego. Do akwizycji przebiegów czasowych wymienionych wielkości użyto

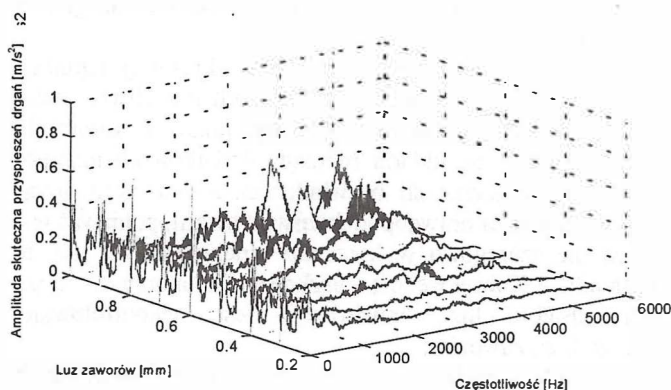
zestawu pomiarowego składającego się z piezoelektrycznych przetworników przyspieszeń drgań i ciśnienia, wzmacniaczy ładunku, znacznika kąta obrotu wału korbowego oraz rejestratora DAT.

Przetworniki drgań zamocowano na głowicy silnika za pośrednictwem kostki sześcienniej umożliwiającej trójosiowy pomiar drgań. Kostkę zamocowano do głowicy przy pomocy wkrętu, wykorzystując wykonany w głowicy otwór technologiczny.

### 4. Analiza wyników badań

Do przetwarzania sygnałów przyspieszeń drgań wykorzystano pakiet programu Matlab z dodatkiem Signal Processing. Analizie poddano sygnały przyspieszeń drgań w kierunku równoległym do osi wału korbowego (kierunek  $x$ ), ponieważ mierzone parametry w tym kierunku umożliwiały jednoznaczne określenie wartości luzu zaworowego. Przed wyznaczeniem charakterystyk częstotliwościowych, sygnały poddano wstępnej obróbce polegającej na selekcji czasowej [3]. Oznacza to, że w obliczeniach uwzględniono tylko te odcinki przebiegów czasowych przyspieszeń drgań, które czasowo były związane z momentem zamykania zaworów. Operacja selekcji czasowej była konieczna, ponieważ bez jej zastosowania obliczone miary punktowe sygnałów przyspieszeń drgań wyznaczone na podstawie widm charakteryzowały się niewystarczającą dynamiką zmian w funkcji luzu zaworowego (do celów diagnostycznych). Na podstawie tak przygotowanego sygnału wyznaczono widma amplitudowe, które następnie uśredniono.

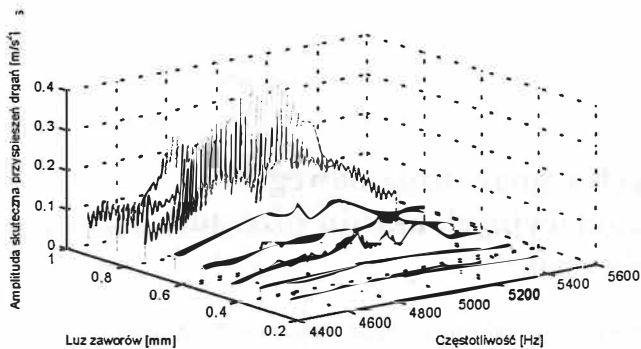
Na rysunku 1 przedstawiono zmiany postaci widma amplitudowego przyspieszeń drgań od luzu zaworów rozrządu silnika spalinowego. Analiza postaci widm amplitudowych sygnału przyspieszeń drgań wykazała, że najlepszy związek ze zmianą luzu zaworów wykazuje zmiana wartości skutecznych przyspieszeń drgań w paśmie 4500÷5500 Hz. Na rysunku 2 przedstawiono zmiany postaci widm amplitudowych wykonanych po filtracji pasmowej w zakresie częstotliwości 4500÷5500 Hz.



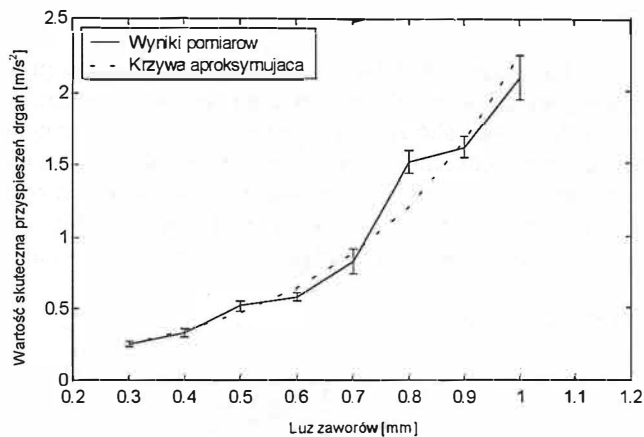
Rys. 1. Zależność postaci widma amplitudowego przyspieszeń drgań od luzu zaworów silnika spalinowego SB 3.1

Na rysunku 3 przedstawiono zależność skutecznej wartości przyspieszeń drgań w paśmie 4500÷5500 Hz, od luzu zaworów silnika spalinowego, którą aproksymowano (metodą najmniejszych kwadratów) funkcją wykładniczą. W wyniku aproksymacji otrzymano równanie krzywej (7), którego graficzną reprezentację zaznaczono na rysunku 3 linią przerywaną.





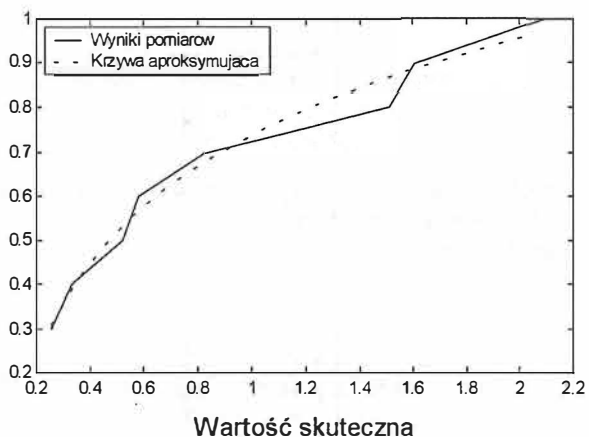
Rys. 2. Zależność postaci widma amplitudowego przyspieszeń drgań w paśmie 4500÷5500 Hz od luzu zaworów silnika spalino-



Rys. 3. Zależność wartości skutecznej przyspieszeń drgań w paśmie 4500÷5500 Hz od luzu zaworów silnika spaliny-

$$a_{x \text{ RMS}} = 0,0987 \cdot e^{3,1225 \cdot \text{luz}} \quad (7)$$

Wartość współczynnika korelacji pomiędzy wynikami pomiarów a wartościami uzyskanymi z obliczeń, wykorzystując zależność (7), wyniosła 0,98. Oznacza to bardzo dobre odwzorowanie rzeczywistych pomiarów w modelu matematycznym, opisującym zmiany luzu zaworów w zależności od skutecznej wartości przyspieszeń drgań, natomiast dynamika zmian parametru diagnostycznego wyniosła aż 9,1 dB.



Rys. 4. Zależność luzu zaworów silnika spaliny-

Podstawowym celem badań diagnostycznych jest określenie luzu zaworów na podstawie znanej skutecznej wartości przyspieszeń drgań. W tym celu przeprowadzono obliczenia w oparciu o krzywą aproksymującą. W równaniu za zmienną objaśniającą przyjęto wartość skuteczną przyspieszeń drgań, a za zmienną objaśnianą luz zaworów. W wyniku obliczeń współczynników aproksymacji otrzymano krzywą opisaną zależnością (8), przedstawioną na rysunku 4 linią przerywaną.

$$\text{luz} = 0,3138 \cdot \ln(a_{x \text{ RMS}}) + 0,7398 \quad (8)$$

gdzie:  $a_{x \text{ RMS}}$  – wartość skuteczna przyspieszeń drgań [m/s²],

luz – luz zaworów [mm].

## 5. Podsumowanie

W pracy przedstawiono analizę możliwości zastosowania widma amplitudowego do oceny luzu zaworowego układu rozrządu. W oparciu o przeprowadzone badania i analizę sygnału przyspieszeń drgań stwierdzono, że pasmo widma 4500÷5500 Hz wykazuje największe zmiany w zależności od wartości luzu zaworowego. Wyznaczone w tym paśmie miary punktowe przyspieszeń drgań cechuje duża dynamika zmian wynosząca ~ 9 dB. Stwierdzono ponadto, że warunkiem uzyskania zadowalającej dokładności oszacowania luzu zaworów na podstawie analizy częstotliwościowej sygnałów drganiowych jest poddanie szeregów czasowych wstępnemu przetwarzaniu, polegającemu na zastosowaniu separacji czasowej. Dalsze prace dotyczące oceny luzu zaworów będą dotyczyły zagadnień związanych z budową modelu fizycznego i matematycznego, umożliwiającego symulację zmian luzu zaworów rozrządu silnika spalinyowego oraz ocenę wpływu tych zmian na parametry sygnału drganiowego.

## Literatura

- [1] Barczewski R., *Materiały z badań własnych. Niepublikowane, Poznań 1998.*
- [2] Randall R.B., *Tech B.A., Frequency analysis. Brüel & Kjaer 1987.*
- [3] Cempel Cz., *Podstawy wibroakustycznej diagnostyki maszyn. Wydawnictwa Naukowo-Techniczne Warszawa 1982.*
- [4] Czechyra B., Szymbański G., Tomaszewski F., *Ocena luzu zaworów silnika spalinyowego w oparciu o parametry drgań – założenia metodyczne. Silniki Spalinyowe nr 1/2004(118).*
- [5] Fichtenholtz G.M., *Rachunek różniczkowy i całkowy III. PWN Warszawa 1985.*
- [6] Szymbański G., *Ocena stanu regulacji zaworów silnika spalinyowego za pomocą sygnału drganiowego. Praca magisterska. Politechnika Poznańska Poznań 2000.*