

Wykorzystanie miar punktowych sygnału drganiowego do oceny wybranych parametrów regulacyjnych układu rozrządu silnika spalinowego

W artykule przedstawiono wyniki badań dotyczące zastosowania wybranych miar punktowych sygnału drganiowego do oceny luzu zaworów silnika spalinowego. Wskazano konieczność zastosowania złożonego procesu przygotowania sygnału przyspieszeń drgań, przed wykonaniem obliczeń miar punktowych charakteryzujących sygnał wibroakustyczny, w celu zmniejszenia ryzyka błędnej diagnozy.

1. Wprowadzenie

Silniki spalinowe są powszechnie stosowanym źródłem napędu pojazdów mechanicznych i urządzeń stacjonarnych. Jednym z podstawowych zespołów tłokowego silnika spalinowego jest układ rozrządu, który steruje wymianą ładunku. Prawidłowe działanie układu rozrządu jest możliwe tylko wtedy, kiedy parametry regulacyjne mają optymalne wartości. Głównymi parametrami regulacyjnymi rozrządu silnika spalinowego są: fazy rozrządu oraz luz zaworowy (między trzonkiem zaworu, a dźwignią lub krzywką).

Nieprawidłowe ustawienie faz rozrządu może wystąpić z powodu błędnego ustawienia elementów silnika podczas montażu, wchodzących w skład napędu układu rozrządu lub w wyniku awarii napędu rozrządu np. zmiana położenia koła zębatego względem wału korbowego.

Luz zaworowy jest parametrem regulacyjnym, który należy okresowo sprawdzać. 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 przyłgni zaworów lub gniazd zaworowych.

Zastosowanie automatycznej kompensacji luzów zaworowych umożliwia wyeliminowanie konieczności okresowej regulacji luzu zaworów w silnikach spalinowych. Jednak wprowadzenie do układu rozrządu dodatkowych mas powoduje zwiększenie sił bezwładności, poza tym 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, którego skutki przedstawiono powyżej.

Celem badań jest ocena przydatności wybranych miar punktowych sygnału drgań generowanego przez głowicę silnika spalinowego do oszacowania luzów zaworów oraz przedstawienie procesu przygotowania sygnału przyspieszeń drgań dla optymalnego wykorzystania zawartej w nim informacji o stanie luzu zaworowego.

2. Miary punktowe stosowane w analizie sygnałów drganiowych

Miary punktowe są jednym ze sposobów opisu sygnałów przemieszczeń, prędkości lub przyspieszeń drgań [1 i 2].

Pozwalają scharakteryzować sygnał drganiowy przy pomocy jednej liczby. Dzięki takiemu opisowi parametrów drgań, łatwo określić zmiany w sygnale wibroakustycznym będące wynikiem zmian stanu technicznego obiektu. Miary punktowe stosowane w diagnostyce wibroakustycznej (DWA) można podzielić zgodnie z [1] na wymiarowe i bezwymiarowe. Do miar punktowych wymiarowych należą:

- amplituda średnia:

$$s_{AVERAGE} = \frac{1}{T} \int_0^T |s(t)| dt \quad (1)$$

w jednakowym stopniu uwzględnia każdą wartość amplitudy chwilowej sygnału drgań,

- amplituda skuteczna:

$$s_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T [s(t)]^2 dt} \quad (2)$$

w większym stopniu uwzględnia duże wartości amplitudy chwilowej, jest najczęściej stosowaną miarą punktową ze względu na proporcjonalność do mocy procesu,

- amplituda pierwiastkowa:

$$s_{SQUARE} = \left[\frac{1}{T} \int_0^T |s(t)|^{\frac{1}{2}} dt \right]^2 \quad (3)$$

w większym stopniu uwzględnia małe wartości amplitudy chwilowej sygnału drgań,

- amplituda szczytowa:

$$s_{PEAK} = \left[\frac{1}{T} \int_0^T |s(t)| dt \right]^{\frac{1}{\infty}} \quad (4)$$

jest używana do oceny procesów impulsowych np. luzy, uderzenia itp.

Dyskryminanty bezwymiarowe są ilorazami odpowiednich miar punktowych wymiarowych, zalicza się do nich następujące wielkości:

- współczynnik kształtu:

$$K = \frac{s_{RMS}}{s_{AVERAGE}} \quad (5)$$

- współczynnik szczytu:

$$C = \frac{s_{PEAK}}{s_{RMS}} \quad (6)$$

- współczynnik impulsowości:

$$I = \frac{s_{PEAK}}{s_{AVERAGE}} \quad (7)$$

- współczynnik luzu:

$$L = \frac{s_{PEAK}}{s_{SQUARE}} \quad (8)$$

- kurtoza:

$$\beta = \frac{\frac{1}{T} \int_0^T [s(t)]^4 dt}{\left[\frac{1}{T} \int_0^T [s(t)]^2 dt \right]^2} \quad (9)$$

W zależnościach (1) do (9) zastosowano następujące oznaczenia:

$s(t)$ – chwilowa wartość amplitudy przemieszczeń, prędkości lub przyspieszeń drgań,

t – czas,

T – czas uśredniania.

W pracach [1,4] udowodniono, że z punktu widzenia przydatności diagnostycznej miary punktowe bezwymiarowe można uszeregować w porządku rosnącej wartości K, C, β, I, L .

1. Metodyka i obiekt badań

Badania przeprowadzono zgodnie z własną metodyką badań. Do realizacji 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 zasadami eksperymentu czynnego. Zmieniano wartość luzu pomiędzy trzonkiem zaworów, a dźwignią zaworową i równocześnie obserwowano zmiany zachodzące w wartościach miar punktowych sygnałów prędkości i przyspieszeń drgań. Luzy zaworowe zmieniano w zakresie 0,3 ÷ 1 mm z krokiem 0,1 mm.

Akwizycji poddano sygnały przyspieszeń oraz prędkości drgań w trzech wzajemnie prostopadłych kierunkach, sygnał ciśnienia panującego w cylindrze oraz sygnał ze znacznika kąta obrotu wału korbowego. Do rejestracji 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.

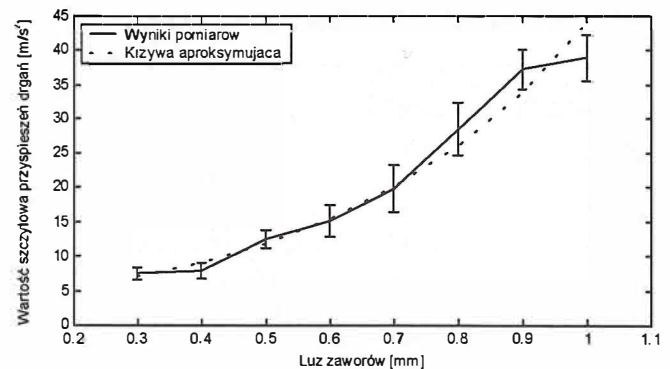
Przetworniki drgań zamocowano na głowicy silnika za pośrednictwem kostki sześcienniej, umożliwiającej trójosiowy pomiar drgań. Kostkę zamocowano do głowicy przy pomocy wkrętu, wykorzystując otwór technologiczny.

Szczegółowe założenia dotyczące opracowania metodyki badań nad wpływem luzu zaworów silnika spalinowego na wybrane charakterystyki sygnałów drgań przedstawiono w pracach [2,3].

1. Analiza wyników badań

Analizie poddano sygnał drganiowy w kierunku równoległym do osi wału korbowego (kierunek x), ponieważ ich parametry umożliwiały jednoznaczne określenie wartości luzu zaworowego. Przed obliczeniem miar punktowych, sygnały poddano wstępnej obróbce polegającej na selekcji czasowej. 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 charakteryzowały się niewystarczającą dynamiką zmian (do celów diagnostycznych) w funkcji luzu zaworowego. Na podstawie tak przygotowanego sygnału obliczono miary punktowe, które są najbardziej wrażliwe na zmiany luzów w układach mechanicznych – wartość szczytową i kurtozę przyspieszeń drgań.

Na rysunku 1 przedstawiono zależność szczytowej wartości przyspieszeń drgań w funkcji luzu zaworów silnika spalinowego, którą aproksymowano (metodą najmniejszych kwadratów) funkcją wykładniczą. W wyniku aproksymacji otrzymano równanie krzywej (10), którego graficzną reprezentację zaznaczono na rysunku 1 linią przerywaną. W trakcie badań wyznaczono dynamikę zmian parametru sygnału drgań, która wyniosła 7 dB.



Rys.1. Zależność wartości szczytowej przyspieszeń drgań od luzu zaworów silnika spalinowego SB 3.1

$$a_{x\text{ PEAK}} = 3,1839 \cdot e^{2,6261 \cdot \text{luz}} \quad (10)$$

Podstawowym celem badań diagnostycznych jest określenie luzu zaworów na podstawie znanych wartości parametrów przyspieszeń drgań; w tym celu przeprowadzono obliczenia w oparciu o krzywą aproksymującą. W równaniu za zmienną objaśniającą przyjęto wartość szczytową przyspieszeń drgań, a za zmienną objaśnianą luz zaworów. W wyniku obliczeń współczynników aproksymacji otrzymano krzywą opisaną równaniem (11) przedstawioną na rysunku 2.

$$\text{luz} = 0,3728 \cdot \ln(a_{x, \text{PEAK}}) - 0,4180 \quad (11)$$

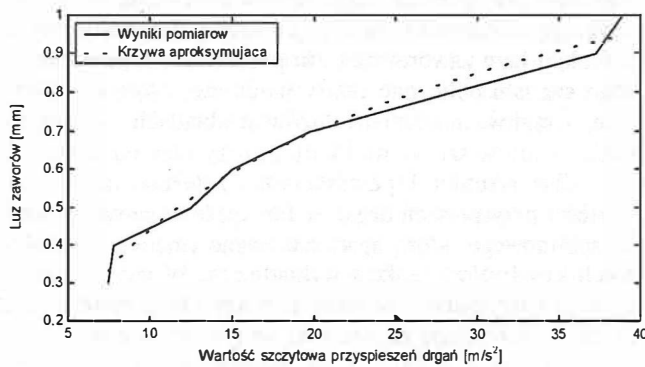
gdzie: $a_{x, \text{PEAK}}$ – wartość szczytowa przyspieszeń drgań [m/s^2],
luz – luz zaworów [mm].

Wartość współczynnika korelacji pomiędzy wynikami pomiarów, a wartościami uzyskanymi w trakcie obliczeń wykorzystując zależność (11) wyniosła 0.98, co oznacza dobre odwzorowanie rzeczywistych pomiarów w modelu matematycznym opisującym zmiany luzu zaworów w zależności od wartości szczytowej przyspieszeń drgań.

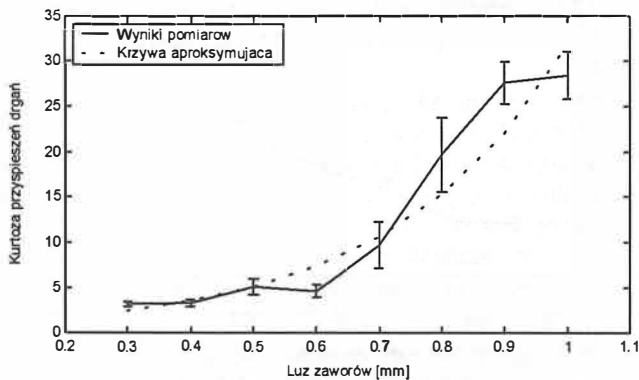
Na rysunku 3 przedstawiono zależność kurtozy przyspieszeń drgań w funkcji luzu zaworów. Dynamika zmian kurtozy w funkcji luzu zaworów wyniosła aż 9,5 dB.

Na podstawie wyznaczonych punktów przeprowadzono aproksymację metodą najmniejszych kwadratów. Aproksymowaną krzywą przedstawiono równaniem (12) oraz zaznaczono linią przerywaną na rysunku 3.

$$\beta_{ax} = 0,8353 \cdot e^{3,6376 \cdot \text{luz}} \quad (12)$$



Rys. 2. Zależność luzu zaworów silnika spalinowego SB 3.1 od wartości szczytowej przyspieszeń drgań



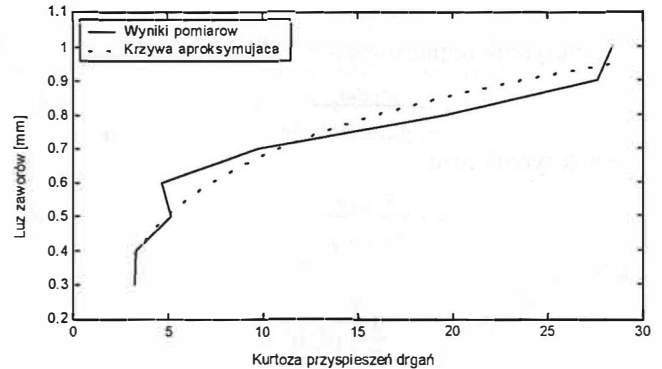
Rys.3. Zależność kurtozy przyspieszeń drgań od luzu zaworów silnika spalinowego SB 3.1

W celu oszacowania luzu zaworów na podstawie wartości kurtozy sygnału przyspieszeń drgań wyznaczono model matematyczny w oparciu o metodę najmniejszych kwadratów. Wynikiem aproksymacji jest krzywa opisana równaniem (13) przedstawiona na rysunku 4 linią przerywaną.

$$\text{luz} = 0,2559 \cdot \ln(\beta_{ax}) + 0,0909 \quad (13)$$

gdzie: β_{ax} – wartość kurtozy przyspieszeń drgań,
luz – luz zaworów [mm].

Na podstawie wyników pomiarów i wartości uzyskanych w trakcie obliczeń wykorzystując zależność (13) wyznaczono współczynnik korelacji, który wyniósł 0.96. Oznacza to dobre odwzorowanie rzeczywistych pomiarów w modelu matematycznym opisującym zmiany luzu zaworów w zależności od kurtozy przyspieszeń drgań.



Rys. 4. Zależność luzu zaworów silnika spalinowego SB 3.1 od wartości kurtozy przyspieszeń drgań

1. Podsumowanie

Na podstawie przeprowadzonych analiz wpływu luzu zaworów rozrządu na wartość miar punktowych sygnałów przyspieszeń drgań stwierdzono, że do oszacowania luzu zaworów w badanym silniku spalinowym najbardziej przydatna jest wartość szczytowa przyspieszeń drgań oraz kurtoza obliczone z przebiegów czasowych sygnału przyspieszeń drgań. Ustalono ponadto, że warunkiem uzyskania zadowalającej dokładności oszacowania luzu zaworów na podstawie wartości szczytowej i kurtozy przyspieszeń obliczonych z sygnału drganiowego jest poddanie szeregów czasowych wstępnej obróbce polegającej na selekcji czasowej. Dalsze prace dotyczące możliwości oceny luzu zaworów będą obejmowały badania zmierzające do zastosowania analizy częstotliwościowej w opisie zjawisk zachodzących w układzie rozrządu silnika spalinowego.

Literatura

- [1] Cempel Cz., *Podstawy wibroakustycznej diagnostyki maszyn*. Wydawnictwa Naukowo Techniczne Warszawa 1982.
- [2] Czechyra B., Szymański G., Tomaszewski F., *Ocena luzu zaworów silnika spalinowego w oparciu o parametry drgań – założenia metodyczne*. Silniki Spalinowe nr 1/2004(118)
- [3] Szymański G., *Ocena stanu regulacji zaworów silnika spalinowego za pomocą sygnału drganiowego*. Praca magisterska. Politechnika Poznańska Poznań 2000.
- [4] Tomaszewski F., *Zastosowanie procesów wibroakustycznych do oceny stanu technicznego silnika spalinowego lokomotywy*. Praca doktorska. Politechnika Poznańska Poznań 1987.