

Janusz Gardulski
Politechnika Śląska, Wydział Transportu

Jan Adamczyk
AGH, Wydział Inżynierii Mechanicznej i Robotyki

Jan Targosz
AGH, Wydział Inżynierii Mechanicznej i Robotyki

WYZNACZANIE STOCHASTYCZNEGO WYMUSZENIA KINEMATYCZNEGO SAMOCHODU PRZEZ RZECZYWISTY PROFIL DROGI

Streszczenie: Stosowane w badaniach modelowych zawiesznień samochodowych wymuszenia harmoniczne, należy traktować jako daleko idące uproszczenia matematyczne.

W rzeczywistych warunkach eksploatacji na zawieszzenia oddziałują wymuszenia kinematyczne pochodzące od nierówności powierzchni, zwane mikroprofilem poprzecznym powierzchni. Mają one charakter wymuszeń losowych.

W artykule przedstawiono podstawy matematyczne opisu w/w wymuszenia stochastycznego oraz przedstawiono metodę akwizycji danych przy wykorzystaniu wózka pomiarowego zaprojektowanego i wykonanego w Laboratorium Podstaw Technik Pomiarowych Wydziału Transportu Politechniki Śląskiej.

Na wózku pomiarowym zamocowana została wykonana w/w laboratorium głowica pomiarowa umożliwiająca przyjęcie następujących pomiarów: przyspieszenia drgań w kierunku wzdłużnym, poprzecznym i pionowym, kąty obrotu koła wózka pomiarowego, prędkości jazdy samochodu (mierzona z dużą dokładnością), mikroprofil nawierzchni jezdni. Do akwizycji danych pomiarowych z badań drogowych wykorzystywano komputery przenośne (laptopy) z oprogramowaniem, zasilane z instalacji elektrycznej samochodu. Przydatność zaprojektowanych i wykonanych głowic pomiarowych przeprowadzono w warunkach drogowych podczas jazdy zestawów samochodów badany z holowanym wózkiem pomiarowym, wykazały poprawne działanie torów pomiarowych oraz powtarzalność wyników. Badania sprawdzające prowadzono przy różnych prędkościach jazdy w zakresie do 50 km/h. Aktualnie system pomiarowy jest na etapie testowania.

Słowa kluczowe: stochastyczne wymuszenia kinematyczne drogi, podstawy matematyczne, metoda pomiaru

1. WPROWADZENIE

W badaniach modelowych zawieszonych samochodów ze względu na prostotę zapisu matematycznego, w równaniach najczęściej przyjmuje się harmoniczne wymuszenia kinematyczne. Ten typ wymuszeń nie występuje w rzeczywistych warunkach eksploatacyjnych pojazdów. W efekcie badania symulacyjne zawieszonych są przybliżone - nie odpowiadają rzeczywistym warunkom drogowym.

Nierówności poprzeczne drogi (profil) mają charakter losowy. Poruszający się po takiej drodze pojazd, pobudzony jest do drgań wymuszeniem stochastycznym. Pełny opis takich procesów jest trudny. Przy jego opisie przyjmuje się, że mają one charakter stacjonarny w szerszym sensie oraz ergodyczny. Poprawność takich założeń potwierdzają badania przeprowadzone przez wiele ośrodków badawczych. Założenie takie wymaga przeprowadzenia badań na długich odcinkach pomiarowych, któremu odpowiada długi czas obserwacji. Można więc przyjąć że spełniony jest warunek matematyczny, że czas obserwacji dąży do nieskończoności ($T \rightarrow \infty$). Najczęściej stacjonarność sygnału drganiowego w szerszym sensie oraz jego ergodyczność ocenia się za pomocą opisów statystycznych sygnałów wartością średnią i funkcją autokorelacji. Ponadto wyznacza się wartość średniokwadratową, gęstość prawdopodobieństwa oraz gęstość widmową mocy. Zależności te wykorzystywane są przy opisie wymuszeń stochastycznych pochodzących od nierówności drogi.

2. OPIS MATEMATYCZNY PROFILU POPRZECZNEGO NAWIERZCHNI DROGI

Zbiór danych o mikroprofilu poprzecznych nierówności drogi można uzyskać w oparciu o pomiary:

- statyczne
- dynamiczne

W pomiarów statycznych wykorzystuje się łaty pomiarowe. Na ich długości dokonuje się pomiarów odległości nawierzchni od powierzchni łaty. Podstawową wadą tego typu pomiaru jest jego pracochłonność. Wady tej nie posiadają pomiary dynamiczne wykonywane podczas jazdy samochodu.

Samochód poruszając się ruchem jednostajnym z prędkością v w czasie t przebędzie drogę

$$x = vt \quad (1)$$

Oznaczając przez Ω wysokość nierówności profilu nawierzchni oraz przez ω odpowiadające im częstości wymuszeń, można zdefiniować współzależność

$$\omega = v\Omega \quad (2)$$

czyli

$$\S \Omega x = \omega t \quad (3)$$

Przyjmując że do pomiarów wysokości nierówności nawierzchni wykorzystany został zestaw jednoosiowy wózek pomiarowy (tzw. piąte koło), można stwierdzić, że efekt pomiarowy dotyczy jednego śladu, a pobudzony do drgań jest układ jednomasowy. Przyjęcie takiego schematu badań pozwala opisać w postaci zespolonej:

- nierówności profilu drogi na odcinku o długości x

$$h(x) = \int_{-\infty}^{\infty} h(\Omega) e^{j\Omega x} d\Omega \quad (4)$$

- wymuszenie w czasie t przejazdu drogi x z prędkością v

$$h(t) = \int_{-\infty}^{\infty} h(\omega) e^{j\omega t} d\omega \quad (5)$$

- postać drgań pojazdu

$$q(t) = \int_{-\infty}^{\infty} q(\omega) e^{j\omega t} d\omega = \int_{-\infty}^{\infty} \left[\frac{q(\omega)}{h(\omega)} \right] h(\omega) e^{j\omega t} d\omega \quad (6)$$

gdzie $h(\Omega)$ – amplituda zespolona nierówności nawierzchni drogi

Widmo amplitud opisuje zależność

$$h(\Omega) = 2\pi \int_{-\infty}^{\infty} h(x) e^{-j\Omega x} dx \quad (7)$$

gdzie:

$h(\omega)$ - amplituda zespolona częstotliwości wymuszeń

$q(\omega)$ - amplituda zespolona opisująca dowolne drgania pojazdu (np. obciążenie koła)

Wartość średnia dla $q(t)$ wynosi

$$\mu_q = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T q(t) dt \quad (8)$$

a wartość średnia kwadratowa

$$\Psi_q^2 = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T q^2(t) dt \quad (9)$$

Pierwiastek kwadratowy tej wartości jest wartością skuteczną (RMS). Oscylacje $q(t)$ względem wartości średniej μ_q charakteryzuje odchylenie standardowe

$$\sigma_q = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T [q(t) - \mu_q]^2 dt} \quad (10)$$

Po podstawieniach w/w wielkości wartość średniokwadratową opisuje równanie

$$\Psi_q^2 = \int_0^\infty \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{4\pi}{T} q^2(\omega) d\omega \quad (11)$$

w którym

$$\lim_{T \rightarrow \infty} \frac{4\pi}{T} q^2(\omega) = G_q(\omega) \quad (12)$$

jest gęstością widmową mocy tzw. jednostronną

$$\Psi_q^2 = \int_0^\infty G_q(\omega) d\omega \quad (13)$$

czyli zależność pomiędzy widmem amplitud $q(\omega)$ i wartością średniokwadratową. Analogicznie gęstość widmowa mocy wymuszenia od nierówności drogi przyjmuje postać:

$$G_h(\omega) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{4\pi}{T} h^2(\omega) \quad (14)$$

Ponieważ jest ona funkcją częstości ω , więc także zależy od prędkości jazdy samochodu. Analogicznie gęstość widmowa nierówności drogi w funkcji częstości nierówności Ω ma postać:

$$G_h(\Omega) = \lim_{X \rightarrow \infty} \frac{4\pi}{X} h^2(\Omega) \quad (15)$$

gdzie: długość odcinka X odpowiada przedziałowi T

$$X = vT \quad (16)$$

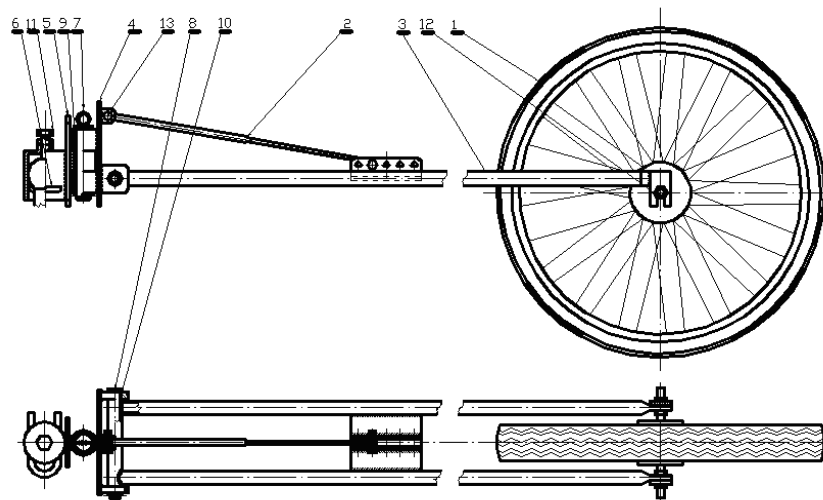
czyli

$$G_h(\omega) = \frac{1}{v} G_h(\Omega) \quad (17)$$

Zależność G_h od Ω przedstawia się najczęściej w postaci graficznej.

3. ZASTOSOWANY SYSTEM AKWIZYCJI DANYCH MIKROPROFILU NAWIERZCHNI DROGI

Aby spełnić wymóg pomiaru nierówności poprzecznych drogi w jednym śladzie w pomiarach ruchowych wykorzystuje się jednokołowy wózek pomiarowy (tzw. piąte koło). Na rys. 1 przedstawiono wózek pomiarowy zaprojektowany i wykonany w Laboratorium Podstaw Technik Pomiarowych Wydziału Transportu Politechniki Śląskiej.

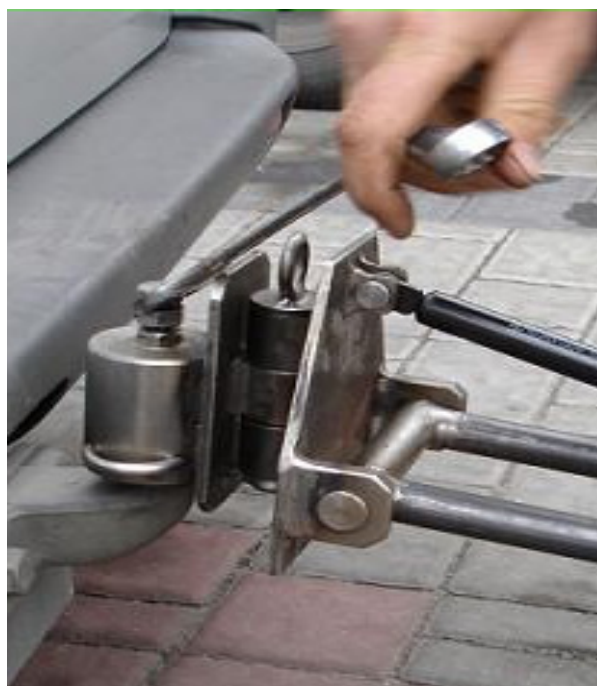


Rys. 1. Rysunek złożeniowy wózka pomiarowego

- | | |
|---|---|
| 1- koło wraz z oponą- 19" | 8- trzpień $\varnothing 15$ |
| 2- amortyzator gazowy | 9- łożyska ślizgowe wspornika pionowego |
| 3- wahacz | 10- tuleje łożyskowe wahacza |
| 4- wspornik wahacza | 11- śruba blokująca M12x50 |
| 5- zaczep piątego koła $\varnothing 50$ | 12- nakrętki osi koła M10 |
| 6- ucho blokady haka holowniczego | 13- sworzeń amortyzatora gazowego |
| 7- trzpień $\varnothing 20$ | |

Zasadniczą częścią zaprojektowanego wózka (piątego koła) jest uchwyt koła przystosowany do połączenia ze znormalizowanym kulowym hakiem holowniczym $\varnothing 50$ samochodów osobowych. Uchwyt posiada kształt jednostronnie zamkniętej tulei o średnicy otworu odpowiadającej średnicy kuli haka holowniczego. Tuleja zaczepu przyspawana jest do wspornika piątego koła, którym jest prostokątna blacha stalowa (St3S). Do drugiej strony blachy wspornika przyspawane są pionowe gniazda dwóch tulei łożyskowych wewnątrz których osadzone są tulejki łożysk ślizgowych sworznia pionowego wspornika. Łożyskowy sworzeń połączony jest z tuleją osadzoną pomiędzy gniazdami łożysk która jest przyspawana do wspornika wahacza. Wspornik wahacza z drugiej strony posiada przyspawane uchwyty do łożyskowej tulei osi wahacza o średnicy $\varnothing 15$ mm. W górnej części płyty znajdują się uchwyty górnego ucha amortyzatora

samochodowego (model 410N). Dolny koniec amortyzatora połączony jest ze skokowo przestawianą podstawą łączącą ramiona wahacza. Siła docisku koła do jezdni jest regulowana skokowo poprzez zmianę położenia końca amortyzatora względem koła wahacza. W tylnej części wahacza przyspawane są wsporniki typowego koła ogumionego o średnicy 19" stosowanego np. w motorowerach. Połączenie sztywne piątego koła z hakiem holowniczym samochodu uzyskuje się poprzez osadzenie wspornika zaczepu na kuli haka oraz podparcie dolnej części kuli na zamocowanym w zaczepie uchwycie. Eliminacja stopni swobody połączenia następuje poprzez dociśnięcie kuli do uchwytu śruby z przeciwnakrętką. Zastosowany system mocowania piątego koła umożliwia wykorzystanie do badań każdego samochodu posiadającego znormalizowany hak holowniczy Ø 50. Sposób mocowania urządzenia przedstawiono na rys. 2.



Rys. 2. Sposób mocowania piątego koła na haku holowniczym

Przydatność urządzenia do badań potwierdziły przeprowadzone jazdy próbne w zakresie prędkości 5 – 50 km/h.

Przy projektowaniu głowicy pomiarowej przyjęto, że zostanie ona zabudowana na wózku pomiarowym (tzw. piątym kole), który holowany będzie przez badany samochód. Głównym celem było opracowanie toru pomiarowego dostarczającego informacje niezbędne do diagnozowania metodami wibroakustycznymi amortyzatorów samochodów osobowych. Przyjęto, że parametrami mierzalnymi będą:

- przyspieszenia drgań w kierunku wzdłużnym,
- przyspieszenia drgań w kierunku poprzecznym,
- przyspieszenia drgań w kierunku pionowym,
- kąty obrotu koła wózka pomiarowego,
- prędkości jazdy samochodu (mierzona z dużą dokładnością),
- mikroprofil nawierzchni jezdni.

Do rejestracji sygnałów będzie wykorzystywany komputer przenośny.

Do wózka pomiarowego zaprojektowano tor pomiarowy, który wykonano tworząc tzw. wieloparametryczną głowicę pomiarową. Głównymi elementami toru pomiarowego są:

1. karta analogowo cyfrowa (DAQ) współpracująca z komputerem przenośnym typu laptop,
2. trójosiowy czujnik przyspieszeń drgań opracowany na bazie podzespołów ADXLxxxEB firmy Analog Devices,
3. przetwornik przemieszczeń kątowych na bazie czujnika indukcyjny IM 08-2N5PS-ZW1,
4. przetwornik nierówności nawierzchni drogi opracowany przy wykorzystaniu układu optoelektronicznego ILD1402-200

Karta analogowo – cyfrowa USB MicroDAQ wspierana jest przez oprogramowanie w systemach operacyjnych Windows i Linux. Umożliwia ona dyskretyzację sygnałów ciągłych z częstotliwością próbkowania 49 kHz przy 14 bitowej rozdzielczości. Do pomiaru przyspieszeń drgań w trzech prostopadłych osiach - pionowej, poziomej i wzdłuż osi pojazdu, zastosowano przetwornik opracowany na bazie parametrycznych czujników przyspieszeń typu ADXLxxxEB. Przetworniki typu ADXLxxxEB są wykonywane jako układy scalone z możliwością dostosowania ich parametrów do określonego celu. Wymagają one zasilania napięciem stałym, które w przypadku opracowanego systemu pomiarowego jest dostarczane przez obwody wyjściowe karty DAQ. Ważną cechą zastosowanych czujników przyspieszeń jest ich pasmo przenoszenia, które zaczyna się od 0 [Hz].



Rys. 3. Widok czujnika przyspieszeń zamocowanego do piątego koła

Do pomiarów prędkości jazdy i przyspieszeń kątowych koła wózka zastosowano czujnik indukcyjny IM08 współpracujący z tarczą zębatą o 36 nacięciach na obwodzie

(rys. 4). Sygnał z czujnika po zróżniczkowaniu umożliwia uzyskanie informacji o chwilowej prędkości wzdłużnej piątego koła poruszającego się wraz z samochodem pomiarowym.

Rejestrowane w postaci plików nierówności nawierzchni są sygnałami opisującymi w funkcji czasu proces losowy.



Rys.4. Zamocowanie czujnika IM08-2N5PS-ZW1 na ramie

Pomiar nierówności drogi jest realizowany za pomocą czujnika ILD-1402-200. Jest to system pomiaru przemieszczeń ze zintegrowanym kontrolerem oparty na mikroprocesorze sygnałowym. Do pomiaru chwilowej wartości odległości przetwornik wykorzystuje metodę triangulacyjną. Wbudowana dioda laserowa dokonuje projekcji plamki świetlnej na powierzchni mierzonego obiektu. Rozproszone światło odbite od mierzonej powierzchni zostaje następnie skorygowane przez układ optyczny i w dalszej kolejności wiązka światła jest kierowana na przetwornik światłoczuły (linijka CCD). Zmiana odległości mierzonego obiektu względem czujnika ILD skutkuje zmianą położenia plamki świetlnej na powierzchni linijki CCD. Zmiany rejestrowanego przez CCD obrazu są przeliczane przez wbudowany procesor sygnałowy na wartości napięcia proporcjonalne do chwilowej wartości odległości pomiędzy czujnikiem a mierzonym przedmiotem. Pomiar odbywa się w sposób bezkontaktowy, co umożliwia pozyskiwanie informacji o bieżących nierównościach drogi w czasie jazdy w układzie dynamicznym.

Do akwizycji danych pomiarowych z badań drogowych wykorzystywano komputery przenośne (laptopy) z oprogramowaniem, zasilane z instalacji elektrycznej samochodu. Przydatność zaprojektowanych i wykonanych głowic pomiarowych przeprowadzono w warunkach drogowych podczas jazdy zestawów samochód badany z holowanym wózkiem pomiarowym, wykazały poprawne działanie torów pomiarowych oraz powtarzalność wyników. Badania sprawdzające prowadzono przy różnych prędkościach jazdy w zakresie do 50 km/h. Aktualnie system pomiarowy jest na etapie testowania.

Bibliografia

1. Adamczyk J., Targosz J. Drgania drogowe AGH, Katedra Robotyki i Dynamiki Maszyn. Kraków 2003.
2. Gardulski J.: Badania symulacyjne układów mechanicznych na potrzeby konstrukcji i eksploatacji. Przegląd Mechaniczny, Nr 11-12/2000.
3. Gardulski J.: Symptom wibroakustyczny jako miara diagnostyczna stanu technicznego amortyzatorów samochodowych. II Międzynarodowy Kongres Diagnostyki Technicznej. Warszawa 2000, 237-242.
4. Gardulski J.: Measuring head for operational testing of car suspension systems with vibroacoustic methods. Kones, Powertrain and Transport 2009 vol. 16 no. 4, s. 135-140.
5. Gardulski J.: Piąte koło jako część systemu akwizycji do badań diagnostycznych amortyzatorów samochodowych metodami wibroakustycznymi. Diag 2009, s. 79 – 82, Ustroń 2009.
6. Kamiński E, Pokorski J.: Dynamika zawiesznień i układów napędowych pojazdów samochodowych - WKŁ Warszawa 1983r.
7. Mitschke M.: Dynamika samochodu. Tom 2. Drgania. Wydawnictwo Komunikacji i Łączności. Warszawa 1989.
8. Rotenberg R.W.: Zawieszenie samochodu. Wydawnictwo Naukowo-Techniczne. Warszawa 1974.