

CHARAKTERYSTYKI STATYSTYCZNE WYMUSZEŃ DZIAŁAJĄCYCH NA POJAZD OD DROGI

LEON PROCHOWSKI (WARSZAWA)

Przedstawiono charakterystyki statystyczne wymuszeń, które działają na pojazd poruszający się po drogach: asfaltowej, brukowanej, gruntowej. Uwzględniono związki zachodzące pomiędzy wymuszeniami działającymi na koła lewej i prawej strony pojazdu.

1. WPROWADZENIE

Obciążenia dynamiczne, wywołane oddziaływaniem nierówności nawierzchni drogi na pojazd, wpływają w sposób decydujący na trwałość wielu jego układów i elementów. Zatem stan rozpoznania wymuszeń kinematycznych, które działają od strony drogi na koła pojazdu w różnych warunkach jego eksploatacji, w istotny sposób wpływa na wiarygodność prognozy stanu obciążeń i trwałości konstrukcji.

Celem pracy jest przedstawienie i analiza charakterystyk statystycznych wymuszeń działających na koła w typowych warunkach eksploatacji pojazdów. Charakterystyki wymuszeń przedstawiono w układzie, który pozwala - podczas badań modeli pojazdu - uwzględnić jednoczesność oddziaływań wywołujących drgania:

w pionowej podłużnej płaszczyźnie symetrii pojazdu (wymuszenie symetryczne dla kół lewej i prawej strony);

poprzeczno-kątowe w płaszczyznach prostopadłych do kierunku ruchu (wymuszenie asymetryczne).

Konieczność łącznego rozpatrywania wymuszeń działających na wszystkie koła lewej i prawej strony pojazdu oraz konieczność uwzględnienia związków zachodzących między tymi wymuszeniami wynika z kumulacyjnego charakteru skutków tych oddziaływań.

Charakterystyki statystyczne nierówności dróg są opisywane w wielu publikacjach, m.in. [1,9,10,12,13,16], głównie w aspekcie formowania wymuszeń drgań w pionowej, podłużnej płaszczyźnie symetrii pojazdu. Przy tym autorzy niektórych prac np. [1,3,6] wskazują na możliwość przyjęcia założenia o jednorodności i izotropii nierówności dróg. Wówczas wymuszenia działające na wszystkie koła pojazdu można wyznaczyć na podstawie charakterystyk statystycznych nierówności pomierzonych w jednej kolejinie. Takie wyniki pomiarów są powszechnie dostępne.

Pomiary powierzchni wielu dróg oraz rezultaty badań drogowych pojazdów wskazują [3,4,14], że założenie o jednorodności i izotropii nierówności dróg może być przyjęte w odniesieniu do opisu wymuszeń działających na koła pojazdów poruszających się po wysokiej jakości nawierzchni dróg asfaltowo-betonowych. Natomiast nie może być przyjęte w odniesieniu do większości badanych dróg średniej jakości [4,17].

Zatem w wielu problemach analizy obciążeń dynamicznych pojazdów należy wykorzystywać charakterystyki wymuszeń, które są określane na podstawie pomiarów nierówności dróg w dwóch kolejinach, odpowiadających śladom kół lewej i prawej strony pojazdu. To wskazuje też na potrzebę wyznaczenia tych charakterystyk w sposób zapewniający możliwość łącznego rozpatrywania obu postaci wymuszeń (symetrycznych i asymetrycznych) w odniesieniu do tych samych odcinków dróg krajowych.

Problem dotyczy w szczególności badań ukierunkowanych na prognozowanie stanu obciążeń i trwałości elementów układu jezdnego pojazdów oraz możliwości bezpośredniego porównania wyników badań stanu obciążeń i trwałości obiektów z rezultatami badań modeli, w których wykorzystuje się omawiane charakterystyki wymuszeń.

Przedstawiane w dostępnej literaturze przebiegi estymatorów gęstości widmowych wymuszeń działających na koła pojazdu nie zawierają informacji o dokładności oszacowania tych estymatorów, co utrudnia ocenę dokładności wyników badań modelowych.

2. POMIAR PROFILU DROGI

Przeprowadzono pomiary profilu podłużnego drogi asfaltowej, brukowanej i gruntowej w dwóch koleinach równoległych do podłużnej osi drogi. Usytuowanie kolein i sposób pomiaru omówiono w [15]. Pomiary wykonano metodą geodezyjną na odcinkach o długości do 1000 m, stosując następujący krok (odstęp punktów pomiarowych):

$\Delta l_q = 0,10$ m - na drodze asfaltowej i brukowanej,

$\Delta l_q = 0,25$ m - droga gruntowa.

Charakterystyka badanych odcinków dróg:

1. Droga o nawierzchni asfaltowej na trasie E30. Stan nawierzchni dobry, po lewej stronie od środka pasa ruchu nawierzchnia bez ubytków i miejscowych napraw, po prawej stronie widoczne są pęknięcia i niewielkie ubytki warstwy wierzchniej. Na tym odcinku drogi przeprowadzono pomiary powtórne (w odstępie 1 roku) po wykonaniu naprawy nawierzchni; wyniki pomiarów przedstawiono w [15].
2. Droga lokalna (Zaborów k. Warszawy) o nawierzchni brukowanej (kamień polny) w dobrym stanie.
3. Droga lokalna (Zielonka k. Warszawy) nieutwardzona: suchy ubity grunt piaszczysto-darnisty, na krótkich odcinkach drogi występują koleiny o niewielkiej głębokości, przebiegające w odległości odpowiadającej rozstawowi kół typowych samochodów ciężarowych.

Realizacje $\dot{q}^*(t)$, otrzymane podczas pomiarów profili dróg, poddano cyfrowej filtracji pasmowej środkowoprzepustowej w zakresie 0,3 - 50 Hz (dla drogi gruntowej 0,5 - 20 Hz). Podstawowym celem przeprowadzonej operacji filtrowania było ograniczenie pasma częstotliwości badanych realizacji. Jest to warunek konieczny do uzyskania wysokiej jakości estymatorów gęstości widmowych. Stosowanie takiej filtracji ma swoje uzasadnienie, które wynika z analizy własności pojazdu jako układu dynamicznego. Problem ten szerzej rozpatrywano w pracach [9,13,14]. Otrzymane w wyniku filtracji realizacje $q(t)$ są scentrowane, mają rozkład normalny i spełniają test stacjonarności.

3. WYMUSZENIA DZIAŁAJĄCE NA KOŁA POJAZDU

Rozważając oddziaływanie nierówności drogi na koła pojazdu (rys.1) badaniom poddano realizacje $q(r_1)$ i $q(r_2)$, które potraktowano jako dwa równoległe przekroje dwuwymiarowego pola losowego $Q(r), r(x, y)$, gdzie:

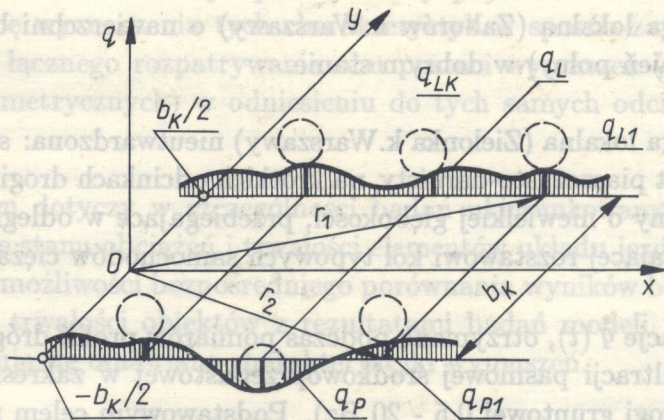
$$q(r_1) = q\left(x, \frac{b_K}{2}\right)$$

$$q(r_2) = q\left(x, -\frac{b_K}{2}\right)$$

$0x$ - wyznacza kierunek ruchu środka masy pojazdu, równoległy do podłużnej osi drogi, b_K - rozstaw kół pojazdu.

Dla $V = \text{const}$ i $x = vt$ napisano

$$(3.1) \quad \begin{aligned} q\left(x, \frac{b_K}{2}\right) &= q_L(t) \\ q\left(x, -\frac{b_K}{2}\right) &= q_P(t) \end{aligned}$$



Rys. 1. Wymuszenia działające na koła pojazdu od drogi. Indeksy L ; i P , odnoszą się do wymuszeń działających na koła i -tej osi po lewej i prawej stronie pojazdu

Reakcję modelu matematycznego pojazdu na wymuszenie o strukturze losowej można wyznaczyć na podstawie rozwiązania układu n równań różniczkowych jego drgań, które w tym celu napisano w postaci macierzowej:

$$(3.2) \quad \mathbf{A}\ddot{\mathbf{u}} + \mathbf{B}\dot{\mathbf{u}} + \mathbf{C}\mathbf{u} = \mathbf{Q},$$

gdzie $\mathbf{A}, \mathbf{B}, \mathbf{C}$ oznaczają macierze kwadratowe $n \times n$ współczynników układu równań ruchu oraz $\ddot{\mathbf{u}}, \dot{\mathbf{u}}, \mathbf{u}, \mathbf{Q}$ - macierze kolumnowe, w tym

$$(3.3) \quad \mathbf{Q} = [q_{11}, q_{12}, \dots, q_{1k}, q_{21}, q_{22}, \dots, q_{2k}, 0, \dots, 0]^T.$$

Wprowadzając oznaczenia [5,14]

$$(3.4) \quad q_1 = \frac{q_L + q_P}{2}$$

wymuszenie drgań modelu w płaszczyźnie pionowej podłużnej;

$$q_2 = \frac{q_L - q_P}{2} \quad \text{lub} \quad \psi = \frac{q_L - q_P}{b_K}$$

wymuszenie drgań poprzeczno-kątowych w płaszczyznach prostopadłych do kierunku ruchu pojazdu; oraz przyjmując, że na wszystkie koła jednej strony modelu oddziałuje ta sama realizacja funkcji wymuszającej, napisano:

$$(3.5) \quad q_{1i} = q_{11}(t - \tau_{1i}), \quad q_{2i} = q_{21}(t - \tau_{1i}),$$

gdzie

$$\tau_{1i} = \frac{l_{x1} - l_{xi}}{V}; \quad i = 1, 2, \dots, k, \quad \text{sign}(l_{xi}) = \text{sign}(0x),$$

l_{xi} oznacza odległość i -tej osi kół od środka masy nadwozia, k - liczbę osi kół pojazdu, $q_{11} \equiv q_1, q_{21} \equiv q_2, q_{1i}, q_{2i}$ - wymuszenia działające odpowiednio na koła pierwszej i i -tej osi pojazdu.

Gęstości widmowe i wzajemne gęstości widmowe odpowiedzi modelu wyrażają zależności:

$$(3.6) \quad G_{ui} = \sum_{s=1}^2 \sum_{t=1}^2 \sum_{h=1}^k \sum_{l=1}^k \Phi_{sh}^{ui} \Phi_{tl}^{*ui} G_{q_{sh}q_{tl}},$$

$$G_{ui,ur} = \sum_{s=1}^2 \sum_{t=1}^2 \sum_{h=1}^k \sum_{l=1}^k \Phi_{sh}^{ui} \Phi_{tl}^{*ur} G_{q_{sh}q_{tl}}; \quad i, r = 1, 2, \dots, n,$$

gdzie $\Phi_{sh}^{ui}(j\omega)$ oznacza transmitancję widmową współrzędnej u_i względem wymuszenia q_{sh} oraz $*$ - wielkość zespoloną, sprzężoną.

Zależności (3.6) wskazują na zakres obliczeń gęstości widmowych wymuszeń $G_{q_h q_{hl}}$, które są niezbędne przy wyznaczaniu charakterystyk statystycznych odpowiedzi układu dynamicznego. Podobne związki funkcyjne można uzyskać stosując metodę linearyzacji statystycznej do nieliniowych modeli pojazdów [8].

4. CHARAKTERYSTYKI STATYSTYCZNE WYMUSZEŃ

Uwzględniając (3.5) zapisano następujące relacje pomiędzy gęstościami widmowymi wymuszenia

$$(4.1) \quad \begin{aligned} G_{q_{1h} q_{1l}} &= G_{q_1} e^{-j2\pi f \tau_{h1}}, \quad j = \sqrt{-1}, \\ G_{q_{2h} q_{2l}} &= G_{q_2} e^{-j2\pi f \tau_{h1}}, \\ G_{q_{1h} q_{2l}} &= G_{q_1 q_2} e^{-j2\pi f \tau_{h1}} = [U_{12}(f) + jV_{12}(f)] e^{-j2\pi f \tau_{h1}}, \\ G_{q_{2h} q_{1l}} &= G_{q_2 q_1} e^{-j2\pi f \tau_{h1}} = G_{q_1 q_2} e^{j2\pi f \tau_{h1}}. \end{aligned}$$

Natomiast wykorzystując związki (3.4) napisano

$$\begin{aligned} G_{q_1} &= \frac{1}{4}(G_{q_L} + G_{q_P} + G_{q_L q_P} + G_{q_P q_L}), \\ G_{q_2} &= \frac{1}{4}(G_{q_L} + G_{q_P} - G_{q_L q_P} - G_{q_P q_L}), \\ G_{q_1 q_2} &= \frac{1}{4}(G_{q_L} - G_{q_P} - G_{q_L q_P} + G_{q_P q_L}). \end{aligned}$$

Podane wyżej zależności pozwalają na wyznaczenie $G_{q_h q_{hl}}$, gdy znane są gęstości widmowe G_{q_L} i G_{q_P} (wymuszeń działających na koła lewej i prawej strony pojazdu) oraz wzajemne gęstości widmowe $G_{q_L q_P}$ i $G_{q_P q_L}$. Estymatory gęstości widmowych funkcji wymuszających drgania pojazdu wyznaczono korzystając z zależności podanych w pracy [15], mianowicie

$$\hat{G}_q(f) = 2\Delta t \hat{K}_q(0) + 4\Delta t \sum_{h=1}^m \hat{K}_q(h\Delta t) k(h\Delta t) \cos 2\pi f \Delta t h,$$

$$q \in \{q_L, q_P\},$$

$$(4.2) \quad \hat{G}_{q_P q_L}(f) = \hat{U}_{PL}(f) - j\hat{V}_{PL}(f), \quad \hat{G}_{q_L q_P} = \hat{U}_{PL} + j\hat{V}_{PL},$$

$$\hat{U}_{PL}(f) = 2\Delta t \hat{K}_{q_P q_L}(0) + 2\Delta t \sum_{h=1}^m \left[\hat{K}_{q_P q_L}(h\Delta t) + \hat{K}_{q_L q_P}(h\Delta t) \right] * \\ * k(h\Delta t) \cos 2\pi f h \Delta t,$$

$$\hat{V}_{PL}(f) = 2\Delta t \sum_{h=1}^m \left[\hat{K}_{q_P q_L}(h\Delta t) - \hat{K}_{q_L q_P}(h\Delta t) \right] k(h\Delta t) * \\ * \sin 2\pi f h \Delta t,$$

gdzie

$$\hat{K}_q(h\Delta t) = \frac{1}{N-h} \sum_{i=1}^{N-h} q(i\Delta t)q[(h+i)\Delta t], \quad h = 0, 1, 2, \dots, m;$$

$$m \ll N,$$

$$\hat{K}_{q_P q_L}(h\Delta t) = \frac{1}{N-h} \sum_{i=1}^{N-h} q_P(i\Delta t)q_L[(h+i)\Delta t], \quad f = \frac{n}{2m\Delta t},$$

$$n = 1, 2, \dots, m.$$

Związek pomiędzy gęstościami widmowymi, obliczonymi dla różnych prędkości ruchu pojazdu, wyraża zależność:

$$G_{v_2}(f) = \frac{v_1}{v_2} G_{v_1} \left(f \frac{v_1}{v_2} \right),$$

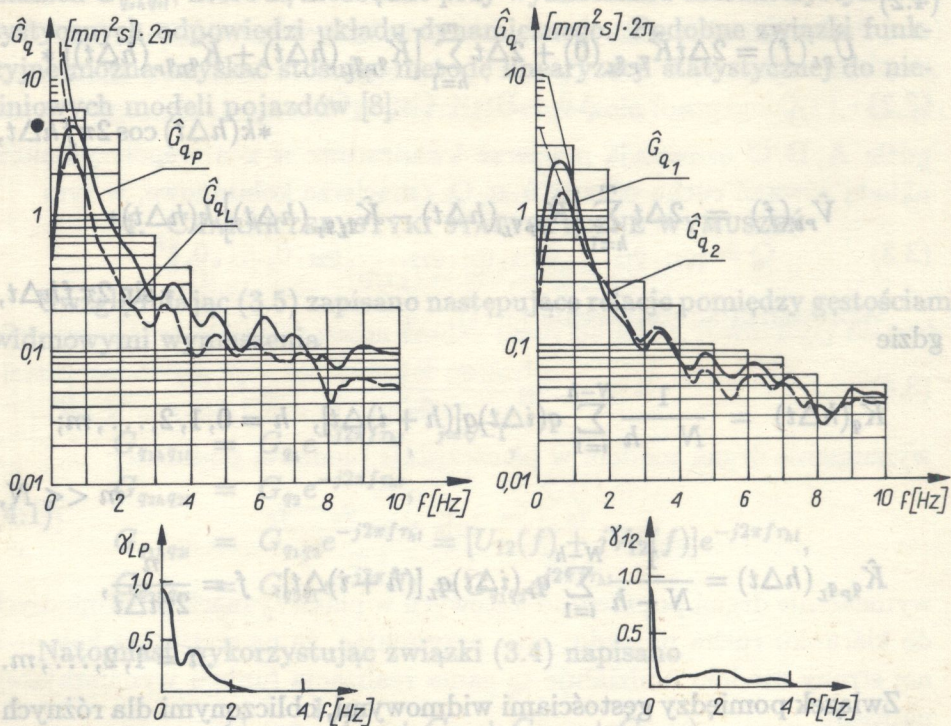
gdzie v oznacza prędkość ruchu pojazdu.

Estymatory $\hat{G}_q(f)$ gęstości widmowej i wzajemnej gęstości widmowej wyznaczono z dyskretnej realizacji $q(t)$ metodą Blackmana-Tukeya z zastosowaniem funkcji wagi Hamminga. Zastosowaną metodykę oszacowania estymatorów opisano w [15] wraz z podaniem niezbędnych zależności.

Na rysunkach 2-4 zestawiono przebiegi estymatorów gęstości widmowych, które uzyskano z uśrednienia wyników obliczeń dla $n_1 = 5$ realizacji o tej samej długości

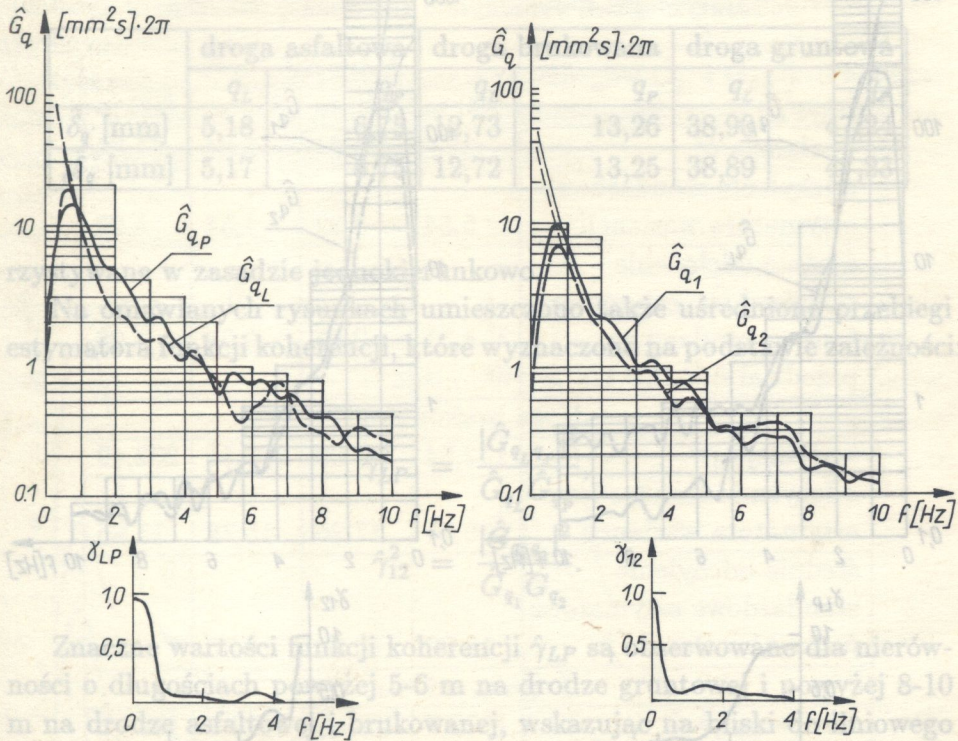
$$\hat{G}_q(f) = \frac{1}{n_1} \sum_{s=1}^{n_1} \hat{G}_q^{(s)}(f),$$

gdzie $\hat{G}_q^{(s)}$ oznacza rezultat obliczeń dla s -tej realizacji.



Rys. 2. Zestawienie estymatorów gęstości widmowej i funkcji koherencji dla drogi asfaltowej, $v=10$ m/s; wartości rzędnych należy mnożyć przez 2π

Na tych rysunkach cienką linią naniesiono przebiegi estymatorów \hat{G}_q , które wyznaczono z realizacji $\hat{q}(t)$ - scentrowanych, ale nie poddawanych operacji filtracji górnoprzepustowej. Tak otrzymane przebiegi obejmują szersze pasmo częstotliwości, mianowicie od $\sim 0,02$ do $50(20)$ Hz. Wykorzystanie obliczonych w ten sposób estymatorów gęstości widmowych może mieć miejsce np. podczas badań modeli pojazdów z zawieszeniem aktywnym (regulowanym), w których najniższe wartości częstotliwości drgań własnych nadwozia niekiedy są tylko nieznacznie wyższe od $0,1$ Hz [7]. Jakość estymatorów gęstości widmowych, uzyskanych opisaną wyżej metodą, została uprzednio rozważona w [13,15]. Uzyskane rezultaty obliczeń pozwalają stwierdzić, że zastosowana metoda pozwala osiągnąć wysoką jakość i powtarzalność przebiegów badanych estymatorów.



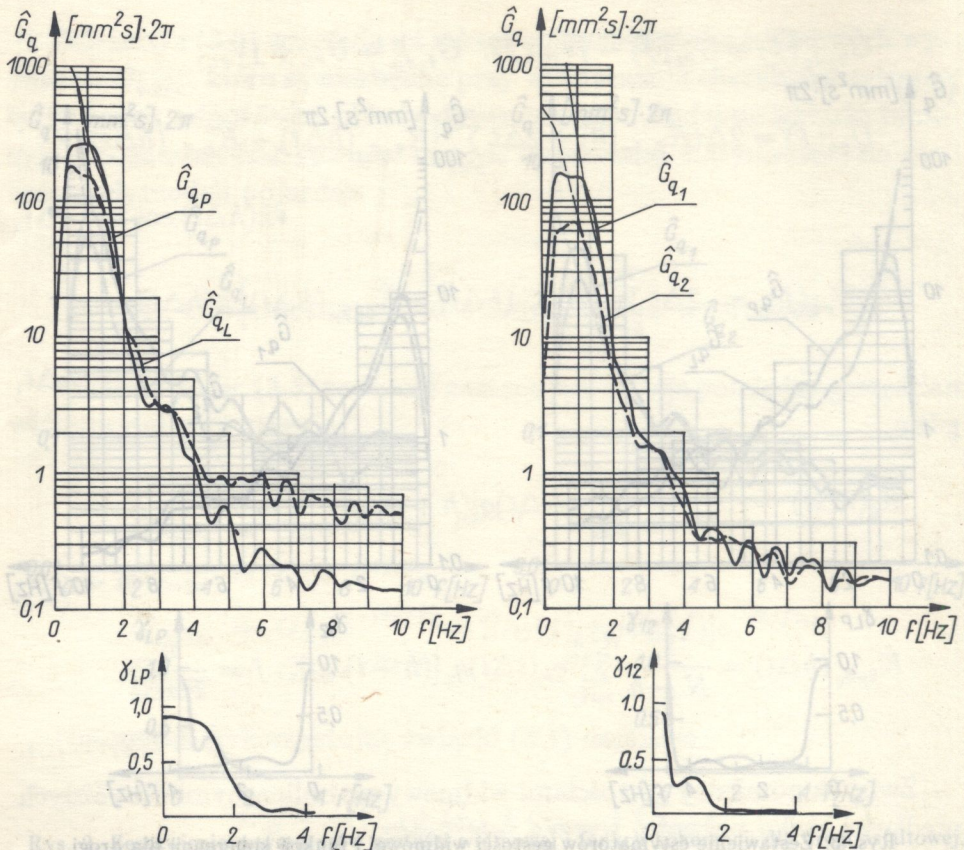
Rys. 3. Zestawienie estymatorów gęstości widmowej i funkcji koherencji dla drogi brukowanej, $v=10$ m/s

W tabelicy 1 zestawiono wartości odchyłeń standardowych wymuszeń, które wyznaczono na podstawie zależności

$$\hat{\delta}_q = \left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N q^2(i\Delta t) \right]^{\frac{1}{2}},$$

$$c\hat{\delta}_q = \left[\int_0^{f_{\max}} \hat{G}_q(f) df \right]^{\frac{1}{2}}.$$

Zgodność wartości tak obliczonych odchyłeń standardowych wskazuje na poprawność stosowanej metody obliczeń. Wysoką jakość estymatorów potwierdzają wyniki obliczeń zestawione w tabelicy 2 wskazując, że odchylenie standardowe estymatora funkcji korelacji nie przekracza odchylenia standardowego estymatora wariancji. Można zatem sądzić,



Rys. 4. Zestawienie estymatorów gęstości widmowej i funkcji koherencji dla drogi gruntowej, $v=10$ m/s

że jakość obliczanych estymatorów gęstości widmowej jest zbliżona do jakości estymacji wariancji procesu [2,11,15].

Przebiegi \hat{G}_{q_L} i \hat{G}_{q_p} , pokazane na rysunkach 2-4, wykazują duże podobieństwo. Jednak wartości $\hat{G}_{q_p}(f)$ obliczone dla dróg o nawierzchniach utwardzonych, często przekraczają \hat{G}_{q_L} . Większe wysokości nierówności i związane z tym wyższe wartości \hat{G}_{q_p} są rezultatem szybszego niszczenia nawierzchni w obszarach zbliżonych do krawędzi jezdni niż w jej pasmach środkowych. Zestawienie gęstości widmowych drogi gruntowej wskazuje na odmienną relację, t.j. $\hat{G}_{q_L} > \hat{G}_{q_p}$ przy nierównościach krótszych od 4-5 m ($f > 2$ Hz). Jest to związane z bardziej intensywnym obciążeniem środkowej koleiny drogi gruntowej (jazda w obu kierunkach praktycznie po tej samej koleinie) niż skrajnych kolein, które są wyko-

Tablica 1. Zestawienie wartości odchyłeń standardowych z realizacji $q(t)$

	droga asfaltowa		droga brukowana		droga gruntowa	
	q_L	q_P	q_L	q_P	q_L	q_P
$\hat{\delta}_q$ [mm]	5,18	6,75	12,73	13,26	38,90	47,24
${}_c\hat{\delta}_q$ [mm]	5,17	6,75	12,72	13,25	38,89	47,23

rzystywane w zasadzie jednokierunkowo.

Na omawianych rysunkach umieszczono także uśrednione przebiegi estymatora funkcji koherencji, które wyznaczono na podstawie zależności:

$$\hat{\gamma}_{LP}^2 = \frac{|\hat{G}_{q_L q_P}|^2}{\hat{G}_{q_L} \hat{G}_{q_P}},$$

$$\hat{\gamma}_{12}^2 = \frac{|\hat{G}_{q_1 q_2}|^2}{\hat{G}_{q_1} \hat{G}_{q_2}}.$$

Znaczne wartości funkcji koherencji $\hat{\gamma}_{LP}$ są obserwowane dla nierówności o długościach powyżej 5-6 m na drodze gruntowej i powyżej 8-10 m na drodze asfaltowej i brukowanej, wskazując na bliski do liniowego związek pomiędzy $q_L(t)$ i $q_P(t)$ przy niskich częstotliwościach wymuszeń. Są to często nierówności wynikające z ogólnego pofałdowania terenu i z technologii wykonywania nawierzchni dróg. W tym zakresie częstotliwości ogólny kształt funkcji koherencji jest zgodny [17] w odniesieniu do dróg średniej klasy. Wartości funkcji koherencji $\hat{\gamma}_{12}$ są wyraźnie mniejsze od $\hat{\gamma}_{LP}$, co potwierdza słaby charakter związków pomiędzy wymuszeniami $q_1(t)$ i $q_2(t)$. Natomiast funkcja $\hat{\gamma}_{12}$ wyznaczona dla drogi gruntowej, osiągając wartości powyżej 0,3 przy $f < 1,5\text{Hz}$ wskazuje na związek pomiędzy strukturą wymuszeń wywołujących pionowe i poprzeczno-kątowe drgania pojazdów. Wynika to z faktu, że nierówności odpowiadające temu zakresowi częstotliwości (o długościach ponad 6-8 m) - jako związane z pofałdowaniem terenu - w podobnym stopniu wpływają na przebiegi \hat{G}_{q_1} i \hat{G}_{q_2} .

Tablica 2. Wartości estymatorów wariancji i ich oszacowanie dla kilku odcinków o różnej długości, wybranych z pojedynczej realizacji

[mm ²]	droga asfaltowa			
	200 m	400 m	600 m	800 m
wariancja $\hat{\delta}_q^2$	37,2	35,64	46,64	51,84
odchylenie standardowe estymatora wariancji	5,54	3,82	4,54	4,22
średnie odchylenie standardowe estymatora funkcji korelacji za przedział $h < 0; 0,1N >$	4,21	2,91	3,34	3,08
droga brukowana				
wariancja jw.	132,94	164,09	200,50	202,49
odchylenie standardowe estymatora wariancji	19,95	17,26	15,78	13,86
średnie odchylenie standardowe estymatora funkcji korelacji	13,92	12,00	10,86	9,51
droga gruntowa				
wariancja jw.	1509,7	2159,5	1893,1	1593,6
odchylenie standardowe estymatora wariancji	209,6	212,9	169,6	128,0
średnie odchylenie standardowe estymatora funkcji korelacji	143,1	142,6	113,6	86,1

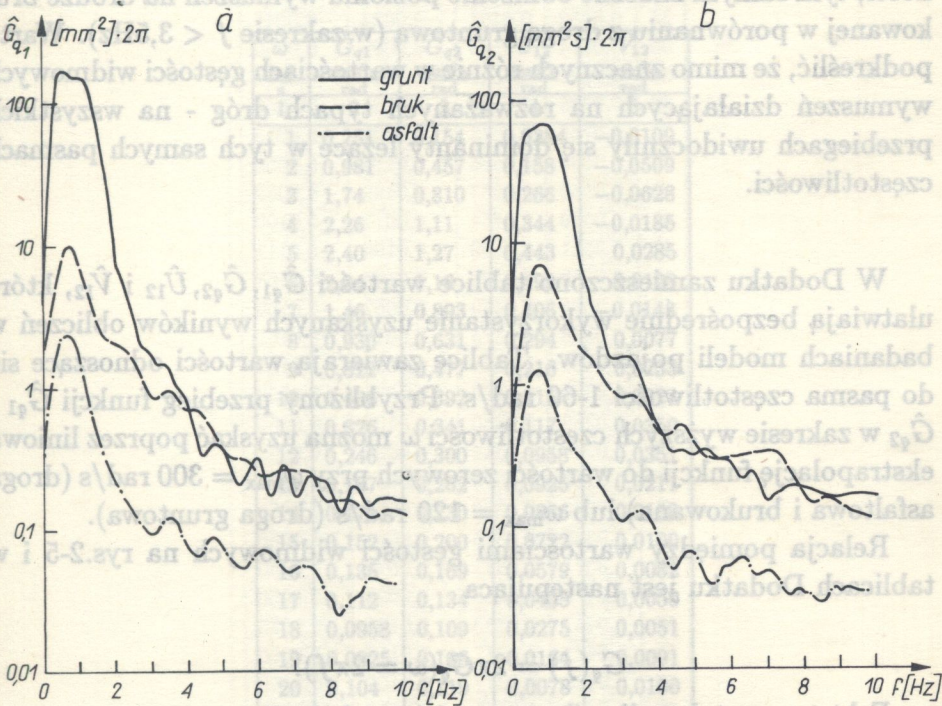
Niwelacja terenu, wykonywana podczas budowy dróg o nawierzchni utwardzonej, usuwając nierówności o znacznych wysokościach i długościach, wpływa na obniżenie wartości funkcji $\hat{\gamma}_{12}$. Natomiast dynamiczne oddziaływanie pojazdów na drogę powoduje powstawanie nierówności, których długości

$$L \cong \frac{2\pi V_E}{\Omega}$$

wynikają z wartości średnich prędkości eksploatacyjnych V_E i częstości drgań własnych Ω układów nośnych samochodów ciężarowych średniej i

dużej ładowności. Skutki tych oddziaływań można przewidywać analizując przebiegi funkcji koherencji $\hat{\gamma}_{LP}$ odnoszących się do dróg intensywnie użytkowanych [1,15].

Rysunek 5a,b zawiera zestawienie przebiegów \hat{G}_{q_1} i \hat{G}_{q_2} , które wskazuje na wzajemne relacje pomiędzy wymuszeniami działającymi na pojazd w różnych warunkach jego eksploatacji.



Rys. 5. Zestawienie gęstości widmowych \hat{G}_{q_1} i \hat{G}_{q_2}

Obserwowane relacje pomiędzy wartościami gęstości widmowych wymuszeń symetrycznych i asymetrycznych na drodze asfaltowej i brukowanej są zbliżone do przedstawionych w [5] dla dróg średniej jakości.

Jednak poszczególne wartości i kształt gęstości widmowych wymuszeń uzyskanych na podstawie badań dróg RFN [5,17] i polskich są zdecydowanie różne. Gęstości widmowe wymuszeń, które działają na pojazd poruszający się po drogach gruntowej i brukowanej, mają zbliżoną strukturę częstotliwościową. Zasadnicze różnice w wartościach gęstości widmowych są widoczne przy $f < 3,5\text{Hz}$. To pasmo częstotliwości odpowiada nierównościom o długościach powyżej 3 m. Zatem niwelacja podłoża drogi brukowanej spowodowała usunięcie największych nierówności, tym samym znaczne obniżenie poziomu wymuszeń na drodze brukowanej w porównaniu z drogą gruntową (w zakresie $f < 3,5\text{Hz}$). Warto podkreślić, że mimo znacznych różnic w wartościach gęstości widmowych wymuszeń działających na rozważanych typach dróg - na wszystkich przebiegach uwidoczniły się dominanty leżące w tych samych pasmach częstotliwości.

W Dodatku zamieszczono tablice wartości \hat{G}_{q1} , \hat{G}_{q2} , \hat{U}_{12} i \hat{V}_{12} , które ułatwiają bezpośrednie wykorzystanie uzyskanych wyników obliczeń w badaniach modeli pojazdów. Tablice zawierają wartości odnoszące się do pasma częstotliwości 1-60 rad/s. Przybliżony przebieg funkcji \hat{G}_{q1} i \hat{G}_{q2} w zakresie wyższych częstotliwości ω można uzyskać poprzez liniową ekstrapolację funkcji do wartości zerowych przy $\omega_{\max} = 300$ rad/s (droga asfaltowa i brukowana) lub $\omega_{\max} = 120$ rad/s (droga gruntowa).

Relacja pomiędzy wartościami gęstości widmowych na rys.2-5 i w tablicach Dodatku jest następująca

$$G_q(f) = 2\pi G_q(\omega = 2\pi f).$$

Fakt ten został podkreślony w opisie pod rys.2.

$$L \cong \frac{2\pi V_x}{\Omega}$$

wynikają z wartości średnich prędkości eksploatacyjnych V_x i częstości drgań własnych Ω układów nośnych samochodów ciężarowych średniej i

DODATEK

Tablica D.1. Zestawienie wartości zespolonej postaci estymatora gęstości widmowej drogi asfaltowej, $V = 10\text{m/s}$

ω $\frac{\text{rad}}{\text{s}}$	\tilde{G}_{g1} $\frac{\text{mm}^2\text{s}}{\text{rad}}$	\tilde{G}_{g2} $\frac{\text{mm}^2\text{s}}{\text{rad}}$	\tilde{U}_{12} $\frac{\text{mm}^2\text{s}}{\text{rad}}$	\tilde{V}_{12} $\frac{\text{mm}^2\text{s}}{\text{rad}}$
1	2	3	4	5
1	0,251	0,154	0,0384	-0,0109
2	0,981	0,457	0,158	-0,0509
3	1,74	0,810	0,266	-0,0628
4	2,26	1,11	0,344	-0,0185
5	2,40	1,27	0,443	0,0285
6	2,04	1,16	0,499	0,0128
7	1,46	0,893	0,406	-0,0143
8	0,930	0,631	0,294	0,0077
9	0,622	0,477	0,216	0,0233
10	0,436	0,392	0,115	0,0324
11	0,326	0,341	0,117	0,0350
12	0,246	0,300	0,0958	0,0351
13	0,197	0,262	0,0925	0,0211
14	0,171	0,230	0,0866	0,0100
15	0,152	0,200	0,0722	0,0100
16	0,135	0,169	0,0579	0,0082
17	0,112	0,134	0,0435	0,0050
18	0,0958	0,109	0,0275	0,0051
19	0,0925	0,106	0,0164	0,0091
20	0,104	0,119	0,0078	0,0100
21	0,120	0,130	0,0163	0,0144
22	0,122	0,127	0,0301	0,0100
23	0,105	0,112	0,0355	0,0079
24	0,0829	0,0928	0,0283	0,0050
25	0,0697	0,0727	0,0232	-0,0203
26	0,0654	0,0569	0,0161	-0,0050
27	0,0650	0,0501	0,0125	-0,0099

Jednak poszczególne wartości i kształt gęstości widmowych wymuszeń uzyskanych na podstawie badań dróg RFN [5,17] i polskich są zdecydowanie różne. Gęstości widmowych wymuszeń, które działają na pojazd poruszający się po drodze brukowej, mają zblizoną strukturę częstotliwości widmowych są więc powiada nierówności, tym samym wykazują różnicę w porównaniu z wymuszeniami na drodze asfaltowej. Wymuszenia te należy podkreślić, że mimo to w przebiegach uwidoczniają się różnice w gęstościach częstotliwości.

W Dodatku 2 przedstawiono wyniki badań modeli do pasma częstotliwości G_{12} w zakresie wyliczeń z wykorzystaniem funkcji ekstrapolacji na drogach asfaltowej i brukowej. Relacja pomiędzy gęstościami widmowymi w tablicach Dodatku 2.

Fakt ten został

1	2	3	4	5
28	0,0793	0,0586	0,0132	-0,0157
29	0,0901	0,0665	0,0167	-0,0185
30	0,0856	0,0678	0,0139	-0,0128
31	0,0741	0,0591	0,0095	-0,0070
32	0,0608	0,0457	0,0056	-0,0050
33	0,0553	0,0403	0,0028	-0,0050
34	0,0552	0,0404	-0,0024	-0,0046
35	0,0614	0,0504	0,0009	0,0050
36	0,0692	0,0542	0,0066	0,0050
37	0,0725	0,0599	0,0136	0,0050
38	0,0725	0,0625	0,0206	-0,0013
39	0,0686	0,0586	0,0186	-0,0050
40	0,0583	0,0483	0,0129	-0,0050
41	0,0500	0,0454	0,0077	-0,0100
42	0,0511	0,0500	0,0106	-0,0111
43	0,0559	0,0491	0,0106	-0,0168
44	0,0575	0,0449	0,0062	-0,0200
45	0,0558	0,0375	0,0017	-0,0167
46	0,0489	0,0329	0,0000	-0,0109
47	0,0379	0,0373	0,0024	-0,0052
48	0,0339	0,0380	0,0100	-0,0039
49	0,0244	0,0344	0,0094	0,0050
50	0,0255	0,0315	0,0065	0,0009
51	0,0300	0,0300	0,0050	-0,0050
52	0,0335	0,0335	0,0051	-0,0050
53	0,0371	0,0371	0,0071	-0,0050
54	0,0479	0,0350	0,0099	-0,0050
55	0,0467	0,0383	0,0125	-0,0035
56	0,0427	0,0377	0,0118	-0,0050
57	0,0429	0,0377	0,0100	-0,0050
58	0,0420	0,0365	0,0085	-0,0050
59	0,042	0,0363	0,0108	-0,0050
60	0,041	0,0349	0,0103	-0,0038

Tablica D.2. Zestawienie wartości zespolonej postaci estymatora gęstości widmowej drogi brukowanej, $V = 10\text{m/s}$

ω $\frac{\text{rad}}{\text{s}}$	\bar{G}_{g1} $\frac{\text{mm}^2\text{s}}{\text{rad}}$	\bar{G}_{g2} $\frac{\text{mm}^2\text{s}}{\text{rad}}$	\bar{U}_{12} $\frac{\text{mm}^2\text{s}}{\text{rad}}$	\bar{V}_{12} $\frac{\text{mm}^2\text{s}}{\text{rad}}$
1	2	3	4	5
1	1,12	0,442	-0,121	-0,0516
2	2,49	1,19	-0,168	-0,328
3	4,77	2,84	0,128	-0,438
4	7,56	4,79	0,780	-0,715
5	9,64	6,39	1,21	-0,948
6	9,37	6,69	0,852	-0,790
7	7,35	5,83	-0,119	-0,186
8	5,40	4,52	-0,641	-0,0883
9	4,02	3,48	-0,695	-0,0051
10	2,00	2,70	-0,575	0,0366
11	2,35	2,13	-0,504	0,0474
12	2,06	1,76	-0,549	-0,0144
13	1,98	1,57	-0,615	-0,168
14	1,89	1,43	-0,555	-0,279
15	1,77	1,21	-0,435	-0,319
16	1,58	1,01	-0,332	-0,231
17	1,31	0,902	-0,255	-0,125
18	1,03	0,836	-0,180	-0,063
19	0,854	0,790	-0,123	-0,047
20	0,850	0,799	-0,141	-0,098
21	0,946	0,817	-0,151	-0,131
22	0,952	0,740	-0,134	-0,127
23	0,823	0,623	-0,0873	-0,0697
24	0,714	0,515	-0,0752	-0,0234
25	0,678	0,441	-0,0687	-0,0276
26	0,679	0,416	-0,0288	-0,0392
27	0,660	0,454	0,175	-0,0202

c.d. tabl.D2

1	2	3	4	5
28	0,582	0,512	0,0363	0,0379
29	0,512	0,494	0,0113	0,0395
30	0,425	0,417	0,0047	0,0395
31	0,352	0,341	0,0223	0,0111
32	0,310	0,294	0,0306	-0,0098
33	0,307	0,287	-0,0122	-0,0151
34	0,316	0,288	-0,0835	-0,0143
35	0,290	0,292	-0,109	0,0087
36	0,249	0,289	-0,0958	0,0349
37	0,229	0,292	-0,0691	0,0646
38	0,237	0,306	-0,0616	0,0844
39	0,259	0,318	-0,0638	0,0784
40	0,267	0,322	-0,0559	0,0704
41	0,266	0,333	-0,0171	0,0696
42	0,259	0,339	0,0261	0,0595
43	0,259	0,355	0,0475	0,0289
44	0,262	0,324	0,0307	-0,0003
45	0,244	0,299	-0,0066	-0,0067
46	0,200	0,247	-0,0270	0,0031
47	0,156	0,201	-0,0181	0,0146
48	0,147	0,186	-0,0128	0,0039
49	0,152	0,178	-0,0169	-0,0076
50	0,160	0,170	-0,0245	-0,0150
51	0,162	0,159	-0,0288	-0,0148
52	0,157	0,155	-0,0300	-0,0079
53	0,142	0,150	-0,0300	-0,0050
54	0,120	0,145	-0,0076	-0,0099
55	0,122	0,139	0,0118	-0,0103
56	0,125	0,131	0,0132	-0,0729
57	0,125	0,124	0,0128	-0,0172
58	0,126	0,120	0,0156	-0,0159
59	0,126	0,118	0,0125	-0,0163
60	0,124	0,117	0,0125	-0,0165

LITERATURA CYTOWANA W TEKŚCIE

Tablica D.3. Zestawienie wartości zespolonej postaci estymatora gęstości widmowej drogi gruntowej, $V = 10\text{m/s}$

ω rad/s	G_{q1} mm ² /s rad	G_{q2} mm ² /s rad	U_{12} mm ² /s rad	V_{12} mm ² /s rad
1	2	3	4	5
1	6,77	3,19	-1,11	0,674
2	64,91	25,41	-5,02	1,00
3	150,70	55,59	-11,80	-1,78
4	169,32	61,40	-20,52	-2,57
5	159,40	65,88	-28,18	5,62
6	150,92	70,62	-30,87	13,50
7	155,39	67,10	-31,74	8,45
8	134,80	53,52	-26,30	2,56
9	91,58	37,38	-16,01	2,51
10	58,50	26,07	-8,54	3,18
11	31,41	15,40	-3,71	2,64
12	14,78	7,82	-1,35	1,64
13	7,92	4,63	-0,157	0,808
14	5,69	3,67	0,396	0,177
15	4,23	3,07	0,476	-0,116
16	2,74	2,13	0,430	-0,105
17	2,01	1,59	0,171	0,172
18	1,88	1,56	-0,0533	0,371
19	1,59	1,62	-0,0663	0,476
20	1,44	1,58	-0,102	0,332
21	1,52	1,41	0,0090	0,0470
22	1,28	1,09	0,170	-0,146
23	0,994	0,780	0,183	-0,127
24	0,896	0,641	0,103	-0,122
25	0,741	0,516	0,0462	-0,118
26	0,476	0,378	0,0794	-0,0952
27	0,327	0,319	0,0941	-0,020

0010,0-	7880,0	101,0	001,0	00
0010,0-	8180,0	001,0	001,0	00

1. C.J.DODDS, J.D.ROBSON, *The description of road surface roughness*, JSV, 31, 2, 1973.

2. В.И.Малков, Случайные колебания случайных процессов. Энергетика, М., 1978.

3. А.А.Хавтук, Автомобиль - водитель, М., 1978.

4. A.N.HEATH, *The Dynamic of Vehicles on Road Surfaces*, Vehicle System Dynamics, 1973.

5. H.HELMS, *Vehicle System Dynamics*, Vehicle System Dynamics, 1973.

6. K.KAMASE, *Vehicle System Dynamics*, JSV, 54, 1, 1977.

7. D.KARNOFF, *Vehicle System Dynamics*, 12, 1973.

8. T.KASPRZYK, *Wprowadzenie do teorii wibracji mechanicznych i wykorzystanie*, WKiE, Warszawa 1978.

9. T.KASPRZYK, *II Konferencja o wibracjach mechanicznych i wykorzystanie*, Wyd. Politech. Warszawskiej, Warszawa 1978.

10. T.KOBIELAK, *Wprowadzenie do teorii wibracji mechanicznych i wykorzystanie*, WKiE, Warszawa 1978.

11. A.OPFERBER, *Wprowadzenie do teorii wibracji mechanicznych i wykorzystanie*, WKiE, Warszawa 1978.

12. М.Г.Попхранин, *Введение в теорию колебаний механических систем*, М., 1965.

13. L.PROCHOWSKI, *Wprowadzenie do teorii wibracji mechanicznych i wykorzystanie*, WKiE, Warszawa 1978.

14. L.PROCHOWSKI, *Wprowadzenie do teorii wibracji mechanicznych i wykorzystanie*, WKiE, Warszawa 1978.

15. L.PROCHOWSKI, *Statystyczne metody wyznaczania wzmuszeń na pojazdach na drodze asfaltowej*, Rozp. Inżyn., 35, 3, 1987.

16. В.С.Прескураков, *Динамика и прочность рам и корпусов транспортных машин*, Машиностроение, Ленинград 1973.

17. G.HALL, *The influence of correlated random road-excitation processes on vehicle vibration*, Vehicle System Dynamics, [213] 1983.

18. K.W.ROZKOWSKI, *Zapewieszenie samochodu*, WKiE, Warszawa 1974.

1	2	3	4	5
28	0,337	0,334	0,115	0,0388
29	0,410	0,352	0,102	0,0369
30	0,415	0,328	0,0501	0,0123
31	0,326	0,325	0,0785	0,0053
32	0,266	0,353	0,154	0,0181
33	0,202	0,328	0,154	0,0386
34	0,221	0,313	0,177	0,0637
35	0,287	0,295	0,161	0,0498
36	0,331	0,296	0,166	0,0014
37	0,259	0,268	0,127	-0,0015
38	0,168	0,219	0,0785	0,0272
39	0,188	0,241	0,107	0,0464
40	0,282	0,268	0,167	0,0221
41	0,286	0,226	0,148	-0,0072
42	0,188	0,158	0,0804	-0,0124
43	0,170	0,152	0,0886	-0,0237
44	0,214	0,176	0,139	-0,0465
45	0,245	0,195	0,131	-0,0376
46	0,219	0,204	0,103	0,0014
47	0,225	0,207	0,102	0,0194
48	0,201	0,188	0,105	0,0239
49	0,138	0,162	0,0862	0,0250
50	0,129	0,136	0,0746	0,0097
51	0,182	0,158	0,0846	-0,0111
52	0,203	0,161	0,0897	-0,0205
53	0,178	0,154	0,0813	-0,0127
54	0,160	0,150	0,0840	-0,0150
55	0,161	0,160	0,0881	-0,0113
56	0,165	0,162	0,0903	0,0034
57	0,162	0,159	0,0783	-0,0052
58	0,164	0,160	0,0772	-0,0166
59	0,159	0,161	0,0827	-0,0160
60	0,160	0,158	0,0818	-0,0122

LITERATURA CYTOWANA W TEKŚCIE

1. C.J.DODDS, J.D.ROBSON, *The description of road surface roughness*, JSV, **31**, 2, 1973.
2. Ю.И.Грибанов, В.Л.Мальков, *Спектральный анализ случайных процессов*, Энергия, Москва 1976.
3. А.А.Хачатуров и др., *Динамика системы дорога - шина - автомобиль - водитель*, Машиностроение, Москва 1976.
4. A.N.HEATH, *Evaluation of the isotropic road roughness assumption*, The Dynamic of Vehicles on Roads and Tracks, 10th IAVSD Symposium, CSSR 1987.
5. H.HELMs, *Vibrations of four-wheel motor vehicles due to uneven road surface*, Vehicle System Dynamics, **10**, 2-3, 1981.
6. K.KAMASH, J.D.ROBSON, *Implication of isotropy in random surfaces*, JSV, **54**, 1, 1977.
7. D.KARNOPP, *Active damping in road vehicle suspension systems*, Vehicle System Dynamics, **12**, 1983.
8. T.KASPRZYK, L.PROCHOWSKI, *Analiza drgań nieliniowych w pojazdach mechanicznych z wykorzystaniem EMC*, Mechanika i Komputer, **1**, IPPT PAN, Warszawa 1978.
9. T.KASPRZYK, L.PROCHOWSKI, *O kształtowaniu funkcji wymuszającej drgania pojazdu*, II Konferencja Metody i Środki Projektowania Automatycznego, Wyd. Politech. Warszawskiej, Warszawa 1979.
10. T.KOBIELAK, *Charakterystyka nierówności i klasyfikacja polskich dróg kołowych*, Prace Materiałoznawstwa i Mechaniki Teoretycznej, **13**, Politechnika Wroclawska, 1973.
11. A.OPPENHEIM, R.SCHAFFER, *Cyfrowe przetwarzanie sygnałów*, WKiL, Warszawa 1979.
12. И.Г.Пархиловский, *Исследование вероятностных характеристик поверхностей распространенных типов дорог*, Автомобильная промышленность, **8**, 1968.
13. L.PROCHOWSKI, *Estymacja charakterystyk statystycznych funkcji wymuszającej drgania pojazdu*, Biuletyn WAT, **4**, 344, Warszawa 1981.
14. L.PROCHOWSKI, *Obciążenia dynamiczne układu nośnego pojazdu mechanicznego, podstawy prognozowania, weryfikacja doświadczalna*, Dodatek do Biuletynu WAT, **12**, Warszawa 1982.
15. L.PROCHOWSKI, *Statystyczna ocena wymuszeń działających na pojazd na drodze asfaltowej*, Rozp. Inżyn., **35**, 3, 1987.
16. В.Б.Проскуряков, *Динамика и прочность рам и корпусов транспортных машин*, Машиностроение, Ленинград 1972.
17. G.RILL, *The influence of correlated random road-excitation processes on vehicle vibrations*, Vehicle System Dynamics, **12**, 1-3, 1983.
18. R.W.ROTENBERG, *Zawieszenie samochodu*, WKiL, Warszawa 1974.

РЕЗЮМЕ

1. G.L.Dobbs, I.D.Rosson, The description of road surface roughness, 12V, 21, 2, 1978.

СТАТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ВЫНУЖДЕНИЙ ДЕЙСТВУЮЩИХ НА
ТРАНСПОРТНОЕ СРЕДСТВО СО СТОРОНЫ ДОРОГИ

Представлены статические характеристики вынуждений, которые действуют на транспортное средство движущиеся по асфальтовой, мостильной и грунтовой дорогам. Учтены соотношения имеющие место между вынуждениями, действующими на колеса левой и правой сторон транспортного средства.

SUMMARY

STATISTICAL CHARACTERISTICS OF LOADS ACTING ON A VEHICLE MOVING
ON A ROAD

Statistical characteristics of excitation forces acting on a vehicle are presented in the cases when the vehicle moves along asphalt, paved and unsurfaced roads. Relations between the excitation forces acting upon the left- and right-hand wheels of the vehicle are taken into consideration.

WOJSKOWA AKADEMIA TECHNICZNA

Praca została złożona w Redakcji dnia 27 października 1988 r.