
Piotr Mulewicz*

WYZNACZENIE SIŁ REAKCJI OGUMIENIA SAMOCHODU CIĘŻAROWEGO WYWOŁANYCH JEGO PRZEJAZDEM PO POWIERZCHNI DROGI O LOSOWYCH NIERÓWNOŚCIACH

Przedmiotem artykułu jest wyznaczenie sił reakcji ogumienia samochodu na powierzchnię drogi podczas przejazdu po nierównościach. W tym celu rozwiązano układ dynamicznych równań różniczkowych opisujących ruch elementów masowych samochodu ciężarowego. Równania te zależą od parametrów charakterystycznych dla danego pojazdu: masy, masowego momentu bezwładności, wartości tłumienia tłumików drgań oraz stałych sprężystości sprężyn pojazdu. Nierówność powierzchni drogi została określona za pomocą funkcji gęstości widmowej mocy. Uwzględnia ona statystyczny charakter nierówności zależny od klasy i jakości drogi. Układ równań został wprowadzony do środowiska MATLAB Simulink.

DETERMINATION OF THE REACTION FORCES OF A TRUCK'S TIRES CAUSED BY ITS PASSING ON A ROAD SURFACE WITH RANDOM ROUGHNESS

The aim of the article is to determine the reaction forces caused by the passage of a heavy truck on an uneven road. The reactions are the result of solving the system of dynamic differential equations of the truck's. These equations depend on the parameters characteristic for a given vehicle: mass, mass moment of inertia, dampers and spring constants of vehicle suspension. The roughness of the road surface was determined using the power spectral density function. It takes into account the statistical nature of unevenness depending on the class and quality of the road. The system of equations was solved in MATLAB Simulink environment.

1. WSTĘP

W niniejszym artykule podjęto temat wyznaczenia sił reakcji ogumienia samochodu ciężarowego na podłoże wywołanych przejazdem pojazdu po powierzchni drogi o losowych nierównościach. Nierówności występują na każdej drodze. W literaturze i normach [1–4] można

* AGH Akademia Górniczo-Hutnicza, Wydział Inżynierii Lądowej i Gospodarki Zasobami, Studenckie Koło Naukowe Mechaniki Konstrukcji „Aksjator”.

spotkać rozmaite sposoby opisu nierówności powierzchni drogi w zależności od parametrów statystycznych (nierówności te określane są jako chropowatość powierzchni). Wartości wspomnianych parametrów określa się na podstawie licznych badań statystycznych *in situ* nierówności dróg. Wynika z nich, że największe nierówności powstają na drogach wysoko eksploatowanych przez ciężkie samochody oraz na różnego rodzaju drogach tymczasowych, podrzędnych, o słabej nośności. Podstawową klasyfikacją dróg jest podział na drogi o jakości doskonałej, dobrej, średniej, złej i bardzo złej [1, 2, 4].

Przejazd pojazdów po nierównych drogach generuje wymuszenia kinematyczne układu zawieszenia pojazdu, co skutkuje dynamicznym oddziaływaniem pojazdu na grunt. Miarą tego oddziaływania są siły na styku opona – powierzchnia drogi. Podjęte w niniejszej pracy zagadnienie jest istotne, ponieważ siły działające na powierzchnię drogi są źródłem drgań gruntu – propagują się one w gruncie i oddziałują na konstrukcje (fundamenty budynków) jako wymuszenie kinematyczne, co może mieć wpływ na budynki i być odczuwane przez ludzi w nich przebywających. Stąd też podjęty temat jest dopiero pierwszym, lecz bardzo ważnym etapem określenia wpływów dynamicznych na budowle i ludzi.

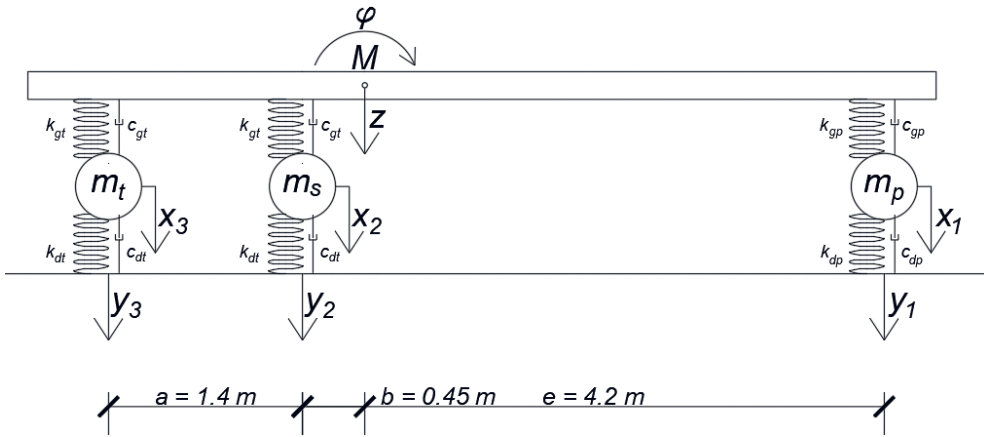
Celem artykułu jest wyznaczenie sił reakcji ogumienia na powierzchnię drogi podczas przejazdu samochodu po nierównościach. Dynamikę samochodu opisano układem pięciu równań różniczkowych ruchu. Model ten jest modelem płaskim, co znaczy m.in., że nierówności drogi oddziałują równocześnie i siłami o tych samych wartościach na całą oś pojazdu (dwa koła jednocześnie). W modelu odwzorowano zasadnicze elementy decydujące o dynamice pojazdu. Symulacji poddano trójosiowy samochód ciężarowy o masie $M = 40$ t. Uwzględniono dwa przypadki: przejazd po drogach średniej i złej jakości. Dobór parametrów w zależności od jakości drogi zaczerpnięto z literatury [4]. W artykule przedstawiono przebiegi reakcji w zależności od czasu, zestawiono wartości maksymalne i minimalne.

2. MODEL DYNAMICZNY SAMOCHODU

2.1. MODEL FIZYCZNY

Na rysunku 1 pokazano model fizyczny samochodu ciężarowego trójosiowego. Masa M to sumaryczna masa naczepy samochodu, ramy i kabiny. Przyjęto, że naczepa stanowi ciało sztywne. W płaskim modelu masa M ma dwa dynamiczne stopnie swobody: pionowy ruch z i obrót φ wokół środka ciężkości. Masowy moment bezwładności $I = 240$ t · m² odwzorowuje rozkład masy własnej samochodu oraz masy ładunku na przyczepie.

Osie samochodu mają po jednym dynamicznym stopniu swobody x_1, x_2, x_3 , które są przemieszczeniami translacyjnymi. Masy poszczególnych osi wynoszą: $m_t = 450$ kg – oś tylna, $m_s = 500$ kg – oś środkowa, i $m_p = 300$ kg – oś przednia; osie te zamocowane są do ramy za pomocą układu sprężyn i tłumików stanowiących zawieszenie samochodu. Wartości mas osi zróżnicowano z uwagi na obecność elementów napędowych (osie tylne) lub ich brak (oś przednia).



Rys. 1. Schemat modelu dynamicznego samochodu. Objasnienia w tekście

Elementy zawieszenia przyjęto jako liniowe względem przemieszczenia i prędkości, co oznacza, że spełnione są następujące ogólne równania:

$$\begin{aligned} F_{kg}(\Delta) &= k_g \Delta \\ F_{cg}(\dot{\Delta}) &= c_g \dot{\Delta} \end{aligned} \quad (1)$$

gdzie Δ są względnymi przemieszczeniami końców sprężyn zawieszenia, $\dot{\Delta} = d\Delta / dt$. Wartości parametrów poszczególnych elementów zawieszenia przyjęto następująco:

- stałe tłumienia [kg/s]: $c_{gp} = 1,1 \cdot 10^4$ – zawieszenie przednie, $c_{gt} = 3 \cdot 10^4$ – zawieszenie tylne;
- stałe sprężyn [N/m]: $k_{gp} = 7,5 \cdot 10^5$ – zawieszenie przednie, $k_{gt} = 13,64 \cdot 10^5$ – zawieszenie tylne.

Elementem, który ma kontakt z podłożem, jest podatna opona, której cechy sprężyste i dysypacyjne uwzględniono w modelu. Funkcje opisujące własności opon przyjęto tak, aby umożliwiać odrywanie kół od podłoża, co oznacza, że spełnione są następujące równania:

$$F_{kd}(\delta) = \begin{cases} k_d \delta & \delta \leq 0, \\ 0 & \delta > 0, \end{cases} \quad F_{cd}(\dot{\delta}) = c_d \dot{\delta} \quad (2)$$

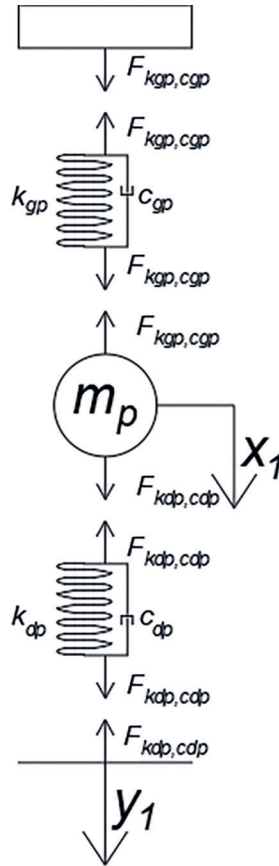
gdzie δ to zmiana odległości osi samochodu od powierzchni drogi, $\dot{\delta} = d\delta / dt$. Wartości parametrów dla opon przyjęto następująco:

- stałe tłumienia [kg/s]: $c_{dp} = 1,3 \cdot 10^4$ – opona przednia, $c_{dt} = 1 \cdot 10^4$ – opona tylna;
- stałe sprężyn [N/m]: $k_{dp} = 33,33 \cdot 10^5$ – opona przednia, $k_{dt} = 24,39 \cdot 10^5$ – opona tylna.

W dalszej części artykułu ułożono równania ruchu metodą Newtona (bilansu sił). Każdy dynamiczny stopień swobody został przeanalizowany odrębnie.

2.2. RÓWNANIE DYNAMICZNE OSI POJAZDU

Na rysunku 2 przedstawiono schematycznie przednią oś pojazdu wraz z siłami oddziaływającymi między poszczególnymi elementami. Pozwala to ułożyć bilans sił działających na przednią oś pojazdu.



Rys. 2. Bilans sił działających na przednią oś pojazdu. Objaśnienia w tekście

W wyniku najechania samochodu na nierówność drogi odległość między osią a podłożem zmienia się i można ją wyrazić jako $\delta_1 = y_1 - x_1$. Skutkuje to powstaniem w oponie sił wewnętrznych. Siły te oddziałują na oś m_p , wpływając także pośrednio na zmianę odległości między osią a nadwoziem $\Delta_1 = z + \varphi e - x_1$. Na podstawie bilansu sił można ułożyć następujące równanie:

$$m_p \ddot{x}_1 = m_p g + F_{kdp,cdp}(\delta_1, \dot{\delta}_1) + F_{kgp,cgp}(\Delta_1, \dot{\Delta}_1) \quad (3)$$

gdzie $m_p g$ to ciężar osi ($g = 9,81$ – przyspieszenie ziemskie [m/s^2]), a poszczególne siły dane są równaniami:

$$F_{k_{gp},c_{gp}}(\Delta_1, \dot{\Delta}_1) = k_{gp} \Delta_1 + c_{gp} \dot{\Delta}_1 \quad (4)$$

$$F_{k_{dp},c_{dp}}(\delta_1, \dot{\delta}_1) = c_{dp} \dot{\delta}_1 + \begin{cases} k_{dp} \delta_1, & \delta_1 > 0 \\ 0 & \delta_1 \leq 0 \end{cases} \quad (5)$$

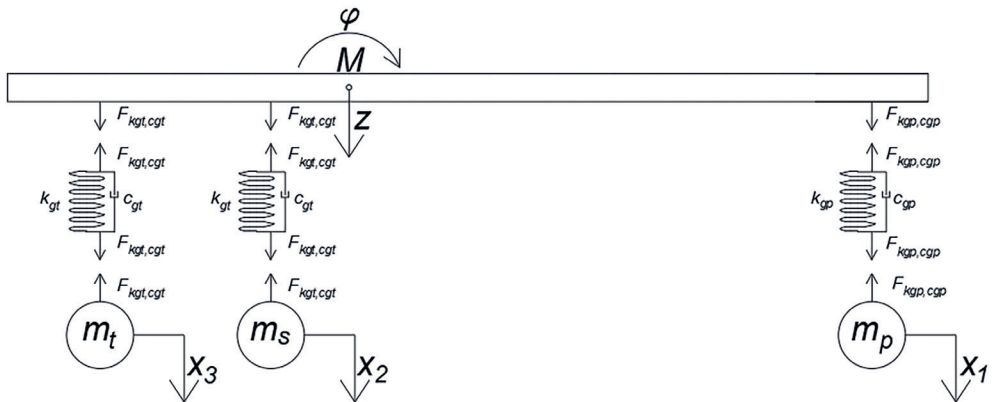
gdzie:

$$\dot{\delta}_1 = \dot{y}_1 - \dot{x}_1; \quad \dot{\Delta}_1 = \dot{z} + \dot{\varphi}e - \dot{x}_1$$

Równania pozostałych dwóch osi tylnych zostały wyprowadzone analogicznie.

2.3. RÓWNANIA DYNAMIKI NADWOZIA

Na nadwozie pojazdu działają siły pochodzące od układu zawieszenia, łączącego nadwozie z osiami pojazdu, oraz siła grawitacji. Schemat sił działających na nadwozie został przedstawiony na rysunku 3.



Rys. 3. Bilans sił działających na układ zawieszenia pojazdu. Objasnienia w tekście

Z bilansu sił i momentów wynikają następujące równania ruchu:

$$\begin{cases} M\ddot{z} = Mg + F_{k_{gp},c_{gp}}(\Delta_1, \dot{\Delta}_1) + F_{k_{gt},c_{gt}}(\Delta_2, \dot{\Delta}_2) + F_{k_{gt},c_{gt}}(\Delta_3, \dot{\Delta}_3) \\ I\ddot{\varphi} = eF_{k_{gp},c_{gp}}(\Delta_1, \dot{\Delta}_1) - bF_{k_{gt},c_{gt}}(\Delta_2, \dot{\Delta}_2) - (a+b)F_{k_{gt},c_{gt}}(\Delta_3, \dot{\Delta}_3) \end{cases} \quad (6)$$

gdzie $F_{k_{gp},c_{gp}}(\Delta_1, \dot{\Delta}_1)$ określono wzorem (4), zaś:

$$F_{k_{gt},c_{gt}}(\Delta_i, \dot{\Delta}_i) = k_{gt} \Delta_i + c_{gt} \dot{\Delta}_i, \quad i = 2, 3 \quad (7)$$

ponadto: $\Delta_2 = z - \varphi b - x_2$, $\dot{\Delta}_2 = \dot{z} + \dot{\varphi}b - \dot{x}_2$, $\Delta_3 = z - \varphi(a+b) - x_3$, $\dot{\Delta}_3 = \dot{z} - \dot{\varphi}(a+b) - \dot{x}_3$.

2.4. RÓWNANIA DYNAMIKI POJAZDU

Zbierając wyprowadzone równania i związki kinematyczne, otrzymano układ pięciu równań różniczkowych wraz z pięcioma niewiadomymi $x_1, x_2, x_3, z, \varphi$:

$$\begin{cases} m_p \ddot{x}_1 = m_p g + F_{kdp,cdp}(\delta_1, \dot{\delta}_1) + F_{kgp, cgp}(\Delta_1, \dot{\Delta}_1) \\ m_s \ddot{x}_2 = m_s g + F_{kdt,cdt}(\delta_2, \dot{\delta}_2) + F_{kgt, cgt}(\Delta_2, \dot{\Delta}_2) \\ m_t \ddot{x}_3 = m_t g + F_{kdt,cdt}(\delta_3, \dot{\delta}_3) + F_{kgt, cgt}(\Delta_3, \dot{\Delta}_3) \\ M \ddot{z} = Mg + F_{kgp, cgp}(\Delta_1, \dot{\Delta}_1) + F_{kgt, cgt}(\Delta_2, \dot{\Delta}_2) + F_{kgt, cgt}(\Delta_3, \dot{\Delta}_3) \\ I \ddot{\varphi} = eF_{kgp, cgp}(\Delta_1, \dot{\Delta}_1) - bF_{kgt, cgt}(\Delta_2, \dot{\Delta}_2) - (a+b)F_{kgt, cgt}(\Delta_3, \dot{\Delta}_3) \end{cases} \quad (8)$$

Siłami obciążenia są tu ciężary statyczne poszczególnych mas, generujące także warunki początkowe przy zerowych prędkościach początkowych.

Samochód, poruszając się po nierównościach drogi, podlega wymuszeniu kinematycznemu: opisywanemu przez funkcje nierówności drogi:

$$y_i = y_i(t) = y(x(t) + x_{0,i}) \quad (9)$$

gdzie x jest drogą pokonywaną przez samochód, zaś $x_{0,i}$ jest przesunięciem poszczególnych osi pojazdu. I tak:

$$\begin{aligned} y_1(t) &= y(x(t)) \\ y_2(t) &= y(x(t)) - (e + b) \\ y_3(t) &= y(x(t)) - (e + b + a) \end{aligned} \quad (10)$$

gdzie $y(x)$ określono w następnym rozdziale.

Układ równań (8) wprowadzono do pakietu Simulink i rozwiązano, uprzednio jednak określając warunki początkowe wynikające ze statycznego działania ciężarów pojazdu. Zasadniczo analizie poddano siły oddziaływania ogumienia na powierzchnię drogi, więc ostatecznie po symulacji otrzymane przebiegi reakcji kół będą zbliżone do statycznych wartości sił: oś przednia – około $R1 = 95$ kN, a obie osie tylne – około $R2 = R3 = 155$ kN. Reakcje statyczne tylnych osi są znacznie większe, ponieważ tylne osie znajdują się bliżej środka ciężkości.

3. OPIS NIERÓWNOŚCI DROGI

Opis nierówności drogi został zaczerpnięty z literatury i z norm [1–4]. Jego podstawą jest funkcja spektrum gęstości chropowatości powierzchni drogi $S(\varnothing)$. Spektrum to wyznaczono na podstawie licznych badań terenowych i określono zależnością:

$$S(\varnothing) = A \begin{cases} \left(\frac{\varnothing}{\varnothing_0} \right)^{-w_1}, & \varnothing < \varnothing_0 \\ \left(\frac{\varnothing}{\varnothing_0} \right)^{-w_2}, & \varnothing \geq \varnothing_0 \end{cases} \quad (11)$$

gdzie:

- $S(\varnothing)$ – gęstość widmowa mocy [$\text{m}^2/(\text{cykle/m})$],
 \varnothing – liczba falowa [cykle/m],
 $\varnothing_0 = 1$ – wzorcowa liczba falowa,
 A – współczynnik szorstkości [m^3/cykle],
 w_1, w_2 – wykładniki szorstkości drogi [-].

Współczynniki we wzorze (11) zależą m.in. od rodzaju i jakości drogi. W tabeli 1 zestawiono wartości i przedziały tych parametrów.

Tabela 1. Wartości A , w_1 , w_2 w zależności od kategorii i jakości drogi

Rodzaj drogi	Jakość drogi	A [$10^{-6} \text{ m}^3/\text{cykle}$]	w_1	w_2
Autostrada	bardzo dobra	2–8	1,945	1,360
	dobra	8–12		
Droga główna	bardzo dobra	2–8	2,050	1,440
	dobra	8–32		
	średnia	32–128		
	słaba	128–512		
Droga podrzędna	średnia	32–128	2,280	1,428
	słaba	128–512		
	bardzo słaba	512–2048		

Zgodnie z propozycją da Silvy i współautorów [3] założono, że funkcja nierówności drogi jest sumą N fragmentów różnych funkcji cosinus – równanie (12). Ich amplitudy zależą od założonych minimalnych i maksymalnych wychyleń oraz od rodzaju i jakości drogi. Funkcja nierówności drogi dana jest wzorem:

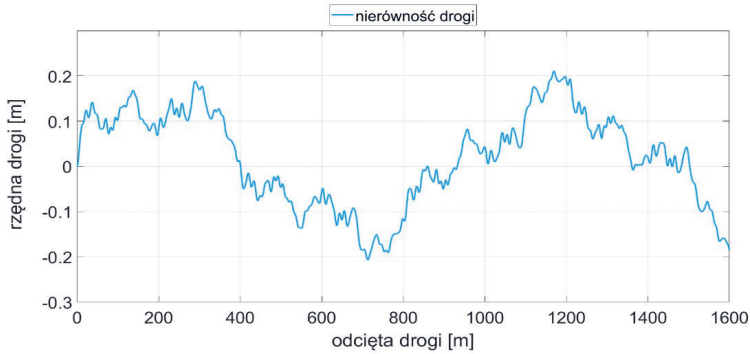
$$y(x) = \sum_{k=1}^N \sqrt{2\Delta_{\varnothing} S(\varnothing_k)} \cos(2\pi\varnothing_k x + \Phi_k) \quad (12)$$

$$\Delta_{\varnothing} = \frac{\varnothing_{\max} - \varnothing_{\min}}{N} \quad (13)$$

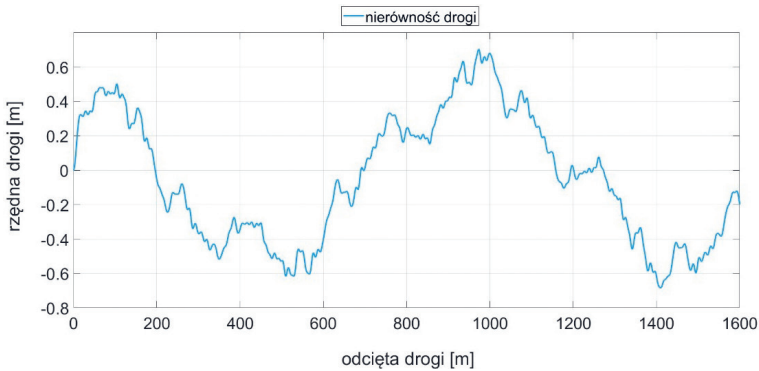
$$\varnothing_k = \varnothing_{\min} + (k-1)\Delta_{\varnothing} \quad (14)$$

gdzie:

- \varnothing_{\min} – minimalne wychylenie (przyjęto $\varnothing_{\min} = 1$ cykle/m),
 \varnothing_{\max} – maksymalne wychylenie (przyjęto $\varnothing_{\max} = 10$ cykle/m),
 Φ_k – kąt fazowy wygenerowany losowo z przedziału $[0, 2\pi]$.



Rys. 4. Droga średniej jakości



Rys. 5. Droga złej jakości

Symulację przeprowadzono dla dwóch rodzajów dróg: drogi głównej średniej jakości przy $A = 120$ (rys. 4) oraz drogi podrzędnej słabej jakości przy $A = 490$ (rys. 5) – na obu wspomnianych rysunkach przedstawiono przebieg nierówności powierzchni drogi w zależności od odległości x .

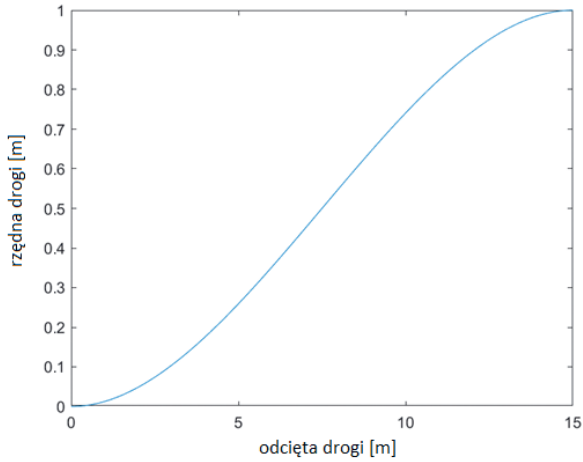
Jak widać, maksymalna amplituda dla drogi średniej jakości wynosi w symulacji około 21 cm, a nachylenie na najbardziej stromym odcinku – około 0,3%.

Maksymalne wychylenie dla drogi złej jakości wynosi z kolei około 66 cm, a nachylenie na najbardziej stromym odcinku – około 1,3%.

W celu uniknięcia nierealnej sytuacji, w której pojazd rozpoczyna ruch, znajdując się na nierówności (tj. początkowym „skoku” nierówności), przyjęto, że samochód w pozycji $x = 0$ znajduje się na poziomie 0, następnie 15 m to wjazd na nierówność. W tym celu wprowadzono funkcję wagową $w(x)$ – wzór (15), przez którą przemnożone są funkcje $y_i(x)$.

$$w(x) = \begin{cases} -\frac{2}{3375}x^3 + \frac{1}{75}x^2, & 0 < x < 15 \\ 1, & x \geq 15 \end{cases} \quad (15)$$

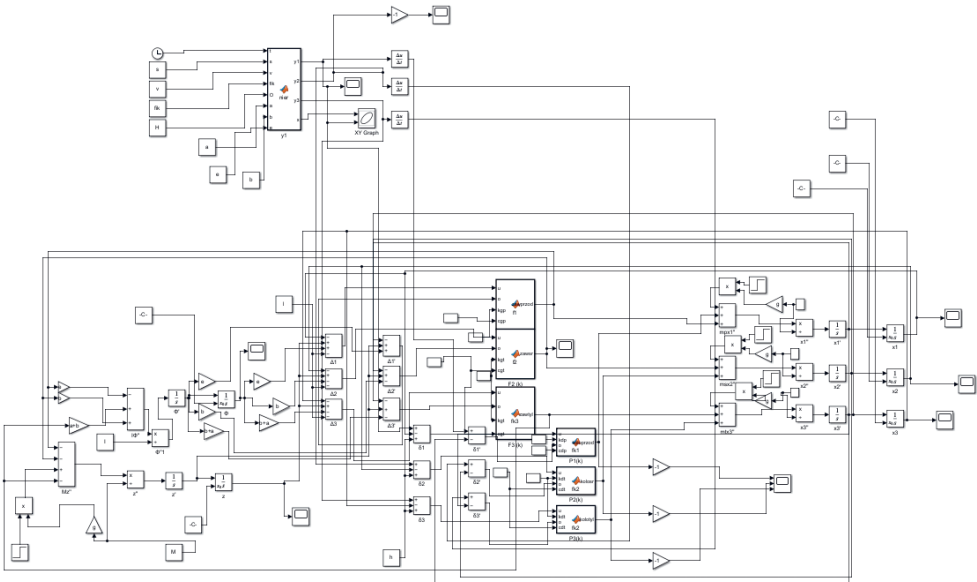
Wykres funkcji wagowej dla $x \in [0;15]$ przedstawiono na rysunku 6.



Rys. 6. Funkcja $w(x)$

4. MODEL W SIMULINKU

Układ równań ruchu (8) samochodu wraz z nierównościami drogi został opracowany w oprogramowaniu MATLAB Simulink. Na rysunku 7 przedstawiono cały schemat.



Rys. 7. Schemat całego modelu w MATLAB Simulink

Najważniejszymi blokami tego schematu są:

- Bloki związane z generowaniem nierówności drogi. Są to funkcja gęstości widmowej mocy, prędkość samochodu v (stała), \emptyset_k , macierz zawierająca losowe kąty fazowe oraz parametry geometryczne samochodu (rys. 1). Wyjścia tego bloku to funkcje wymuszenia kinematycznego $y_i(t)$ dla poszczególnych kół oraz droga x . Ponadto występują tu trzy bloki generujące pochodne $y_i(t)$ dla kolejnych osi – zob. równania (4), (5) oraz (7). Funkcje wymuszenia kinematycznego oraz ich pochodne są używane w innych fragmentach schematu.
- Bloki związane z dynamiką pojazdu. W tej części znajdują się równania (6). Wartości znajdujące się na gałęziach wchodzących do bloczków sumujących to funkcje $F_{kgt.cgt}(\Delta_1, \dot{\Delta}_1)$, $F_{kgt.cgt}(\Delta_2, \dot{\Delta}_2)$ i $F_{kgt.cgt}(\Delta_2, \dot{\Delta}_2)$. Za pomocą kolejnych bloczków liczone są całki pierwszego i drugiego rzędu (prędkości i przemieszczenia). Do przemieszczeń zostały dobrane odpowiednie warunki początkowe, które wynikają z zachowania statycznego układu przy zerowych nierównościach.
- Bloki związane z równaniami dynamicznymi osi pojazdu (3). Do odpowiednich bloczków sumujących trafiają bloki zawieszenia samochodu oraz bloki opon. Następnie wyliczane są całki pierwszego i drugiego rzędu, które zwracają prędkości i przemieszczenia pionowe. Dodatkowo przy przemieszczeniach pionowych dobierane są warunki początkowe na podstawie zachowania się układu przy braku nierówności.
- Bloczki związane z równaniami opon i układu zawieszenia. W tych bloczkach funkcyjnych są zdefiniowane opisane wcześniej funkcje zawieszenia (1) i opon (2).

5. WYNIKI

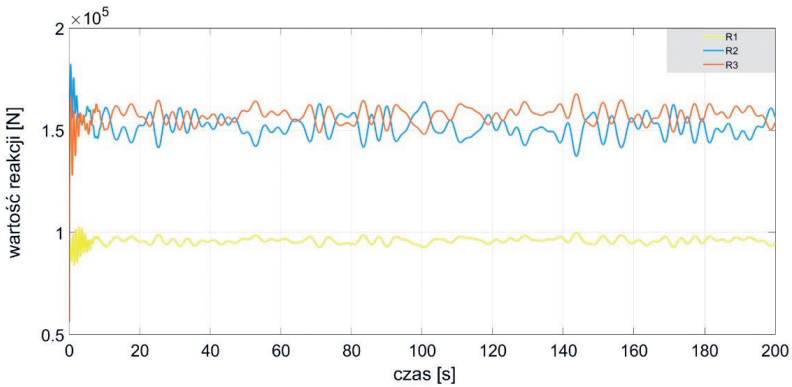
Symulację przeprowadzono w sześciu wariantach: dla prędkości v wynoszącej: 10 km/h, 30 km/h i 80 km/h na drodze średniej i złej jakości. Czas symulacji wynosił 200 s. Do rozwiązania nieliniowych równań zastosowano metodę Rungego–Kutty IV rodzaju ze stałym krokiem $dt = 0,001$ s.

Na wykresach przedstawiono wartości sił oddziaływania poszczególnych osi na jezdnię w zależności od czasu. W legendach na wykresach przyjęto następujące oznaczenia: $R1$ – siła dla osi przedniej, $R2$ – dla osi środkowej i $R3$ – dla osi tylnej. Podane wartości min./maks. reakcji obliczono z przebiegu w zakresie od 40 s do 200 s, pomijawszy w ten sposób początkowe oscylacje związane z najazdem na nierówność.

5.1. DROGA ŚREDNIEJ JAKOŚCI

Prędkość $v = 10$ km/h

Na rysunku 8 przedstawiono wykres reakcji dla przejazdu pojazdu z prędkością 10 km/h po drodze średniej jakości. W tabeli 2 zestawiono maksymalne i minimalne wartości dla każdej z reakcji. Reakcje oscylują wokół stałych wartości statycznych. Największy rozstęp wyników występuje dla reakcji $R2$ (26,6 kN), a najmniejszy dla $R1$ (7,1 kN).



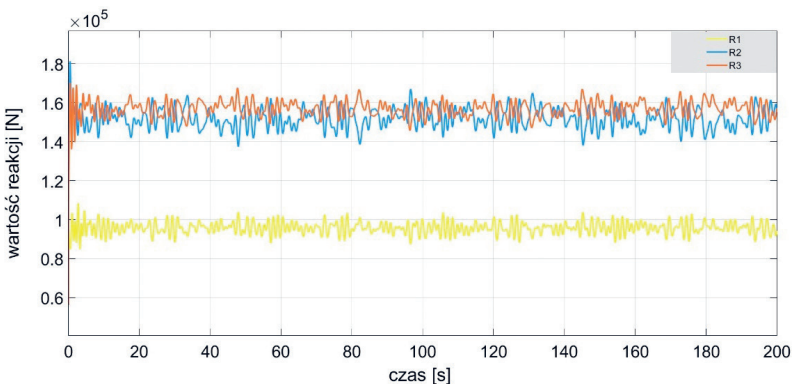
Rys. 8. Wykres reakcji R_1 , R_2 i R_3 dla drogi średniej jakości przy prędkości $v = 10$ km/h

Tabela 2. Zestawienie minimalnych i maksymalnych amplitud reakcji R_1 , R_2 i R_3 dla drogi średniej jakości przy prędkości $v = 10$ km/h

Amplituda	Reakcja [kN]		
	R_1	R_2	R_3
Maks.	99,8	163,9	167,8
Min.	92,7	137,3	148,0

Prędkość $v = 30$ km/h

Na rysunku 9 przedstawiono wykres reakcji dla przejazdu pojazdu z prędkością 30 km/h po drodze średniej jakości. W tabeli 3 zestawiono maksymalne i minimalne wartości dla każdej z reakcji. Nieznacznie zwiększyły się rozstępy wyników (maks. dla $R_2 = 29,4$ kN, min. dla $R_1 = 15,5$ kN) i amplitudy drgań, a także znacznie wzrosła częstotliwość zmian przebiegu reakcji.



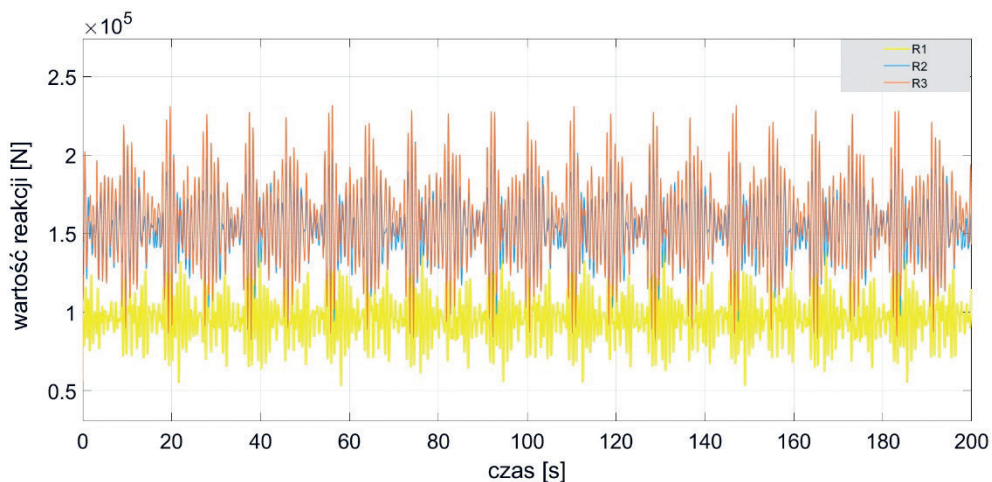
Rys. 9. Wykres reakcji R_1 , R_2 i R_3 dla drogi średniej jakości przy prędkości $v = 30$ km/h

Tabela 3. Zestawienie minimalnych i maksymalnych amplitud reakcji R_1 , R_2 i R_3 dla drogi średniej jakości przy prędkości $v = 30$ km/h

Amplituda	Reakcja [kN]		
	R_1	R_2	R_3
Maks.	103,5	166,9	167,5
Min.	87,8	137,5	145,7

Prędkość $v = 80$ km/h

Na rysunku 10 przedstawiono wykres reakcji dla przejazdu pojazdu z prędkością 80 km/h po drodze średniej jakości. W tabeli 4 zestawiono maksymalne i minimalne wartości dla każdej z reakcji. Amplitudy drgań oraz częstotliwości zmian reakcji dla każdej osi znacznie wzrosły. Rozstęp wartości wynoszą od 84,1 kN (dla reakcji R_2) do 115,9 kN (reakcja R_3).



Rys. 10. Wykres reakcji R_1 , R_2 i R_3 dla drogi średniej jakości przy prędkości $v = 80$ km/h

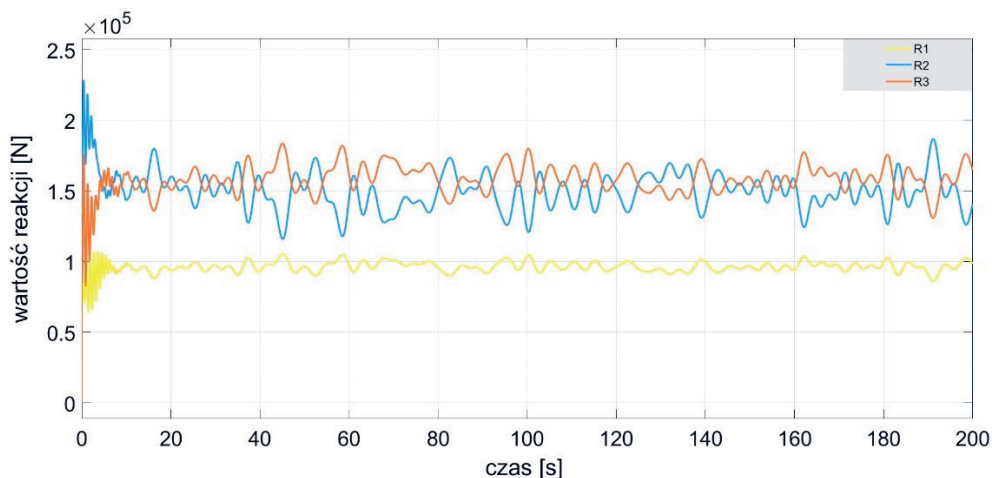
Tabela 4. Zestawienie minimalnych i maksymalnych amplitud reakcji R_1 , R_2 i R_3 dla drogi średniej jakości przy prędkości $v = 80$ km/h

Amplituda	Reakcja [kN]		
	R_1	R_2	R_3
Maks.	137,0	210,0	230,1
Min.	52,9	94,1	83,2

5.2. DROGA ZŁEJ JAKOŚCI

Prędkość $v = 10$ km/h

Na rysunku 11 przedstawiono wykres reakcji dla przejazdu pojazdu z prędkością 10 km/h po drodze złej jakości. W tabeli 5 zestawiono maksymalne i minimalne wartości dla każdej z reakcji. Częstotliwości przebiegu sił są zbliżone do częstotliwości z wykresu z rysunku 8, czyli tej samej prędkości przy drodze lepszej jakości. Względem wyników przy tej samej prędkości, ale przy lepszej drodze, znacznie wzrosła amplituda drgań. Rozstęp wyników był minimalny dla $R1 - 19,3$ kN, a maksymalny dla $R3 - 71,8$ kN.



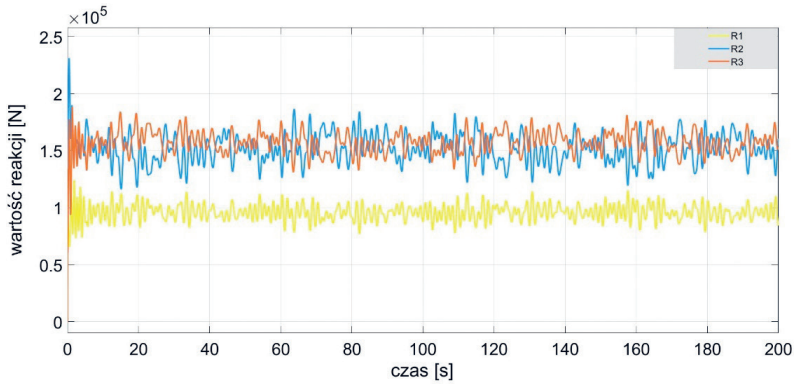
Rys. 11. Wykres reakcji $R1$, $R2$ i $R3$ dla drogi złej jakości przy prędkości $v = 10$ km/h

Tabela 5. Zestawienie minimalnych i maksymalnych amplitud reakcji $R1$, $R2$ i $R3$ dla drogi złej jakości przy prędkości $v = 10$ km/h

Amplituda	Reakcja [kN]		
	$R1$	$R2$	$R3$
Maks.	105,5	187,4	184,0
Min.	86,2	115,5	130,5

Prędkość $v = 30$ km/h

Na rysunku 12 przedstawiono wykres reakcji dla przejazdu pojazdu z prędkością 30 km/h po drodze złej jakości. W tabeli 6 zestawiono maksymalne i minimalne wartości dla każdej z reakcji. Znacznie wzrosła amplituda drgań: rozstęp wyników był minimalny dla $R1 - 36,3$ kN, a maksymalny dla $R2 - 71,4$ kN.



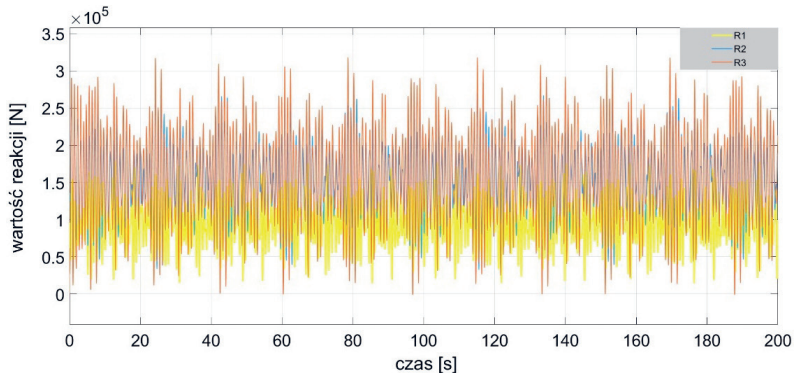
Rys. 12. Wykres reakcji R_1 , R_2 i R_3 dla drogi złej jakości przy prędkości $v = 30$ km/h

Tabela 6. Zestawienie minimalnych i maksymalnych amplitud reakcji R_1 , R_2 i R_3 dla drogi złej jakości przy prędkości $v = 30$ km/h

Amplituda	Reakcja [kN]		
	R_1	R_2	R_3
Maks.	114,5	187,0	180,9
Min.	78,2	116,6	133,6

Prędkość $v = 80$ km/h

Na rysunku 13 przedstawiono wykres reakcji dla przejazdu pojazdu z prędkością 80 km/h po drodze złej jakości. W tabeli 7 zestawiono maksymalne i minimalne wartości dla każdej z reakcji. Częstotliwość zmienności sił jest podobna jak przy prędkości 80 km/h i drodze średniej jakości. Amplitudy drgań znacznie wzrosły. Rozstęp wyników był minimalny dla $R_1 - 180$ kN, a maksymalny dla $R_3 - 316,5$ kN. Reakcja R_3 osiąga minimalną wartość równą 0. Oznacza to, że dochodzi do oderwania opony od powierzchni drogi.



Rys. 13. Wykres reakcji R_1 , R_2 i R_3 dla drogi złej jakości przy prędkości $v = 80$ km/h

Tabela 7. Zestawienie minimalnych i maksymalnych amplitud reakcji R_1 , R_2 i R_3 dla drogi złej jakości przy prędkości $v = 80$ km/h

Amplituda	Reakcja [kN]		
	R_1	R_2	R_3
Maks.	187,4	269,2	316,5
Min.	7,4	33,7	0

6. PODSUMOWANIE

Zagadnienie odpowiedzi gruntu na przejazd samochodu jest bardzo istotne w inżynierii lądowej. Wyniki wyraźnie wskazują na znaczny wzrost amplitud sił oddziaływania kół na podłożu w przypadku drogi o złej jakości. Drgania gruntu wzbudzone tymi reakcjami mogą być szkodliwe dla budynków zabudowanych w sąsiedztwie drogi. Z tego powodu powinno się dbać o nawierzchnię dróg, a szczególnie tych znajdujących się przy gęstych zabudowaniach. W ostatnich latach można zaobserwować, że budowa nowych osiedli mieszkaniowych wiąże się z remontem bądź wybudowaniem od nowa pobliskich dróg. Różnica w jakości drogi nie ma natomiast wpływu na częstotliwość zmian sił reakcji.

Na wykresach widać również zależność między częstotliwością i amplitudą reakcji a prędkością poruszającego się pojazdu. Występuje znaczny wzrost obu parametrów przy prędkości 80 km/h. Reakcje dla jazdy z tą prędkością na drodze niskiej jakości są bliskie 0, co jest stanem bliskim oderwania opony od powierzchni drogi, a jednocześnie wartości maksymalne są największe.

LITERATURA

- [1] ISO 8608:1995, *Mechanical vibration – Road surface profiles – Reporting of measurements data*.
- [2] PN-EN 1991-2:2007, *Eurokod 1: Oddziaływanie na konstrukcje – Część 2: Obciążenia ruchome mostów*.
- [3] da Silva A.C.S., Quissanga V.M., da Silva J.G.S., *Steel-concrete composite highway bridges dynamic structural behaviour assessment considering the pavement progressive deterioration effect*, *Revista IBRACON de Estruturas e Materiais*, vol. 16, no. 4, 2022, s. 1–14, <https://doi.org/10.1590/S1983-41952023000400004>.
- [4] Jerath S., Gurav S., *Road surface roughness generation by power spectral density in bridge design*, [w:] Ventura C., Harvey D., Hoit M. (Eds.), *Structures Congress 2008. Crossing Borders*, American Society of Civil Engineers, 2008, s. 1–7, [https://doi.org/10.1061/41016\(314\)312](https://doi.org/10.1061/41016(314)312).

