

OPTIMIZATION OF CHARACTERISTIC OF SUSPENSION ELEMENTS OF POWER PACK UNIT IN MOTOR VEHICLES

Wacław Borkowski

*Military University of Technology
ul. Kaliskiego 2, 00-908 Warszawa, Poland
tel.: +48 22 6839531, fax.: +48 22 6837370
e-mail: w.borkowski@wme.wat.edu.pl*

Zdzisław Hryciów

*Military University of Technology
ul. Kaliskiego 2, 00-908 Warszawa, Poland
tel.: +48 22 6839739, fax.: +48 22 6837382
e-mail: zhryciow@wat.edu.pl*

Abstract

In the paper chosen questions relating to the influence of power pack unit vibrations on dynamics of vehicle are described, particularly from comfort of drive point of view. The problems of power pack fastening to frame of vehicle using rubber-metal vibration isolators are introduced. Advantages and defect of this type of solution are passed. In the paper the questions of vibration isolators selection with optimum characteristic the special attention are dedicated. The possible to use method of optimization of spring and damping characteristic this type of elements is introduced.

The object of investigations, its physical model and nonlinear mathematical model is described as well as acting on it loading conditions. The task of optimization is formulated in frames which the criterion of optimization and objective function is passed, the set of decision variables is specified as well as limitations put on these variables. The method of determinate the characteristic of elastic elements was passed. In the paper the examples results of simulating investigations are put – the accelerations of power pack unit as well as appointed optimum characteristic.

Keywords: transport, combustion engines, suspension, modelling, optimization

OPTIMALIZACJA CHARAKTERYSTYK ELEMENTÓW ZAWIESZENIA BLOKU NAPĘDOWEGO W POJAZDACH SAMOCHODOWYCH

Streszczenie

W pracy opisano wybrane zagadnienia dotyczące wpływu drgań bloku napędowego na dynamikę pojazdu, a w szczególności na komfort jazdy. Przedstawiono problematykę zamocowania bloku napędowego do ramy pojazdu przy użyciu wibroizolatorów gumowo-metalowych. Podano zalety i wady tego typu rozwiązania. W pracy szczególną uwagę poświęcono zagadnieniom doboru wibroizolatorów o optymalnych charakterystykach. Przedstawiono możliwą do zastosowania metodę optymalizacji, służącą kształtowaniu charakterystyk sprężysto-tłumiących tego typu elementów.

Opisano obiekt badań, jego model fizyczny oraz nieliniowy model matematyczny, a także działające na niego wymuszenia. Sformułowano zadanie optymalizacji, w ramach którego podano kryterium optymalizacji, funkcję celu, sprecyzowano zbiór zmiennych decyzyjnych oraz podano ograniczenia nałożone na te zmienne. Podano także metodę wyznaczania charakterystyk elementów sprężystych. W pracy zamieszczono przykładowe wyniki badań symulacyjnych – przebiegi przyspieszeń bloku napędowego oraz wyznaczoną charakterystykę optymalną.

Słowa kluczowe: transport, silniki spalinowe, zawieszenie, modelowanie, optymalizacja

1. Wstęp

Jednymi z podstawowych czynników determinujących komfort jazdy w pojazdach samochodowych są drgania i hałas. Zapewnienie odpowiedniego komfortu jazdy przestało być mylnie kojarzone z zapewnieniem zbędnego luksusu. W dokumentach normatywnych [6, 7] można znaleźć ściśle zależności pomiędzy poziomem drgań i hałasu na siedzisku kierowcy a dopuszczalnym czasem jego pracy. Niski komfort jazdy powoduje szybkie narastanie zmęczenia u kierowcy, co w sposób bezpośredni prowadzi do obniżenia efektywności jego pracy, a tym samym także do pogorszenia bezpieczeństwa ruchu drogowego.

W pojazdach samochodowych można wyróżnić wiele źródeł generujących drgania, które mają niekorzystny wpływ na komfort jazdy. Z tego też względu w niniejszej pracy ograniczono się jedynie do niekorzystnego wpływu drgań, generowanych przez blok napędowy pojazdu. Poprzez blok napędowy rozumie się silnik wraz ze sprzęgłem i skrzynią biegów. Masa silnika wraz ze sprzęgłem i skrzynią biegów jest porównywalna a niekiedy nawet większa od masy kabiny samochodu ciężarowego. Z tego też względu nie powinna być ona pomijana w badaniach modelowych pojazdów. Blok napędowy w samochodzie posadowiony jest w sposób elastyczny na ramie bądź nadwoziu pojazdu i jak wykazano w pracy [3] jest istotnym elementem w ogólnym modelu dynamiki pojazdu. Takie ujęcie problemu drgań bloku napędowego oraz przenoszenia tych drgań aż do fotela kierowcy wymaga szczegółowej analizy. W pracy [4] wykazano w oparciu o badania modelowe, że niewłaściwy dobór zawieszenia silnika może w wyraźny sposób doprowadzić do pogorszenia komfortu jazdy kierowcy.

Zazwyczaj silnik w pojazdach samochodowych posadowiony jest przy wykorzystaniu gumowo-metalowych elementów sprężysto-tłumiących. Tego typu rozwiązanie nie zapewnia jednak dostatecznej redukcji drgań w całym zakresie obserwowanych częstotliwości wymuszeń. Niekorzystną cechą tego rozwiązania jest konieczność stosowania elementów sprężystych o stosunkowo dużej sztywności. Wynika ona z konieczności zapewnienia małych przemieszczeń poszczególnych zespołów układu napędowego względem siebie. Dlatego też przyjmuje się, że maksymalne odkształcenia elementów podatnych nie powinny przekraczać 20%. Dodatkowo, niekorzystną właściwością gumowych elementów wibroizolacyjnych jest również zwiększająca się wartość współczynnika sztywności wraz ze zwiększaniem częstotliwości wymuszeń.

Pomimo opisanych powyżej wad, gumowe-metalowe elementy zawiesznień silników są powszechnie stosowane ze względu na niską cenę, prostotę konstrukcji oraz wysoką niezawodność. Mimo szerokich zastosowań ich właściwości dynamiczne nie są opisane w literaturze w dostatecznym stopniu. Brak jest charakterystyk sprężysto-tłumiących tych elementów w dokumentacji konstrukcyjnej i katalogach firmowych producentów, co w dużym stopniu utrudnia konstruktorom dobór właściwych wibroizolatorów.

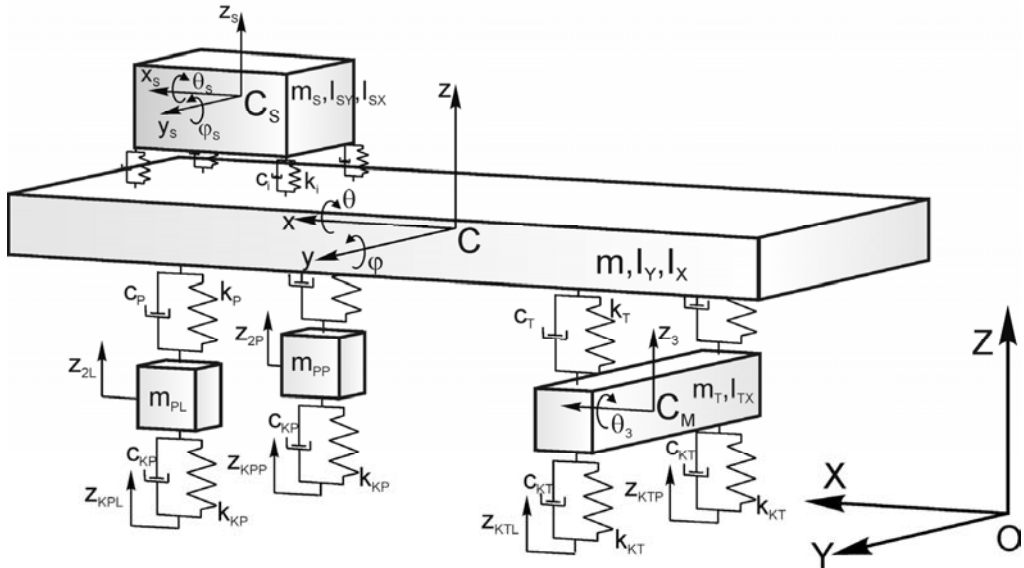
Problematyka doboru właściwości sprężysto-tłumiących wibroizolatorów zazwyczaj obejmuje analizy układów o liniowych charakterystykach oraz wybór rozwiązania o korzystnych cechach. Takie podejście prezentowane jest w pracy [3], w której podjęto próbę doboru korzystnych charakterystyk elementów zawieszenia bloku napędowego w samochodzie ciężarowym. W odróżnieniu od prezentowanych powyżej, w niniejszej pracy do doboru charakterystyk zawieszenia bloku napędowego zastosowano procedurę optymalizacyjną. Wrz z opracowanym modelem pojazdu umożliwia ona na drodze symulacji komputerowej wyznaczenie dla założonych warunków optymalnej, ze względu na zastosowane kryterium, charakterystyki wibroizolatorów.

2. Sformułowanie problemu

2.1. Model pojazdu

Schemat modelu dyskretnego samochodu przedstawiony jest na rys. 1. W modelu wyróżnia się bryły sztywne kół przednich oraz mostu tylnego z kołami podpartymi na elementach sprężysto –

tłumiących modelujących ogumienie, bryłę sztywną nadwozia podpartą względem kół przednich i mostu tylnego na elementach sprężysto – tłumiących odwzorowujących resory i amortyzatory oraz bryłę sztywną bloku napędowego podpartego względem kadłuba na elementach sprężysto – tłumiących odwzorowujących elastyczne łączniki.



Rys. 1. Model dyskretny pojazdu
Fig. 1. Discrete model of vehicle

Bryłę nadwozia oraz bryłę silnika przypisuje się po trzy stopnie swobody (przemieszczenie pionowe oraz przemieszczenie kątowe względem osi podłużnej i poprzecznej pojazdu). Bryły kół przednich posiadają po jednym stopniu swobody (przemieszczenia pionowe), natomiast bryła mostu tylnego dwa stopnie swobody (przemieszczenia pionowe oraz kątowe względem osi podłużnej pojazdu). Łącznie model posiada 10 stopni swobody. W pracy przyjęto, że blok napędowy stanowi bryłę sztywną posadowioną przy użyciu elastycznych łączników w nadwoziu pojazdu. Liczbę elementów podatnych i ich rozmieszczenie względem bloku napędowego można zmieniać.

Opracowano dwa modele pojazdu – liniowy i nieliniowy. Model liniowy przeznaczony jest do analizy podstawowych właściwości dynamicznych obiektu badań, a w szczególności do wyznaczenia częstotliwości i stowarzyszonych z nimi postaci drgań własnych. Model nieliniowy służy do symulacji ruchu samochodu oraz stanowi podstawę do doboru charakterystyk łączników elastycznych bloku napędowego.

Równania ruchu dla nieliniowego modelu pojazdu zostały wyprowadzone przy wykorzystaniu zasady d'Alemberta [5]:

$$\begin{aligned} -\sum m_i \mathbf{a}_i + \sum \mathbf{F}_i &= 0, \\ -\sum \frac{d\mathbf{K}_i}{dt} + \sum \mathbf{r}_i \times \mathbf{F}_i &= 0, \end{aligned} \quad (1)$$

gdzie:

- m_i – masa i-tego punktu (ciała) materialnego,
- \mathbf{a}_i – przyspieszenie i-tego punktu (środka masy ciała) materialnego,
- \mathbf{K}_i – kręt i-tego ciała materialnego względem środka masy,

F_i – siła działająca na i -ty punkt (ciało) materialny,
 r_i – promień wektora definiujący położenie i -tej siły względem środka masy.

Wykorzystując równania (1) dla rozważanego modelu fizycznego pojazdu otrzymano układ równań równowagi, który w zapisie macierzowym ma postać (2):

$$\mathbf{M} \cdot \ddot{\mathbf{q}} = \mathbf{Q}, \quad (2)$$

gdzie:

\mathbf{M} – macierz bezwładności,
 \mathbf{Q} – wektor uogólnionych sił,
 $\ddot{\mathbf{q}}$ – wektor uogólnionych przyspieszeń.

Równanie (2) uzupełnione warunkami początkowymi:

$$\begin{aligned} \mathbf{q}(t = 0) &= \mathbf{q}_0, \\ \dot{\mathbf{q}}(t = 0) &= \dot{\mathbf{q}}_0, \end{aligned} \quad (3)$$

jest nieliniowym modelem matematycznym rozważanego obiektu.

2.2. Model wymuszenia

Zasadniczym typem wymuszenia działającego na model pojazd jest wymuszenie kinematyczne. Może ono przyjmować postać sinusoidy, pojedynczej nierówności, progu o zadanej wysokości bądź wymuszenia o rozkładzie losowym. Dodatkowo na model może działać wymuszenie siłowe w postaci momentu siły działającego na bryłę bloku napędowego. Dla celów niniejszej pracy przyjęto jako wymuszenie moment reakcyjny silnika o zapłonie samoczynnym. Sposób wyznaczania momentu reakcyjnego a także przykładowe wyniki eksperymentalne zamieszczono w pracach [2, 3].

2.3. Sformułowaniu problemu optymalizacji

Zasadniczym celem pracy było ustalenie optymalnych, dla założonego kryterium jakości, charakterystyk w zawieszeniu bloku napędowego. W pracy przeanalizowano drgania bloku napędowego spowodowane działającym na niego wymuszeniem siłowym oraz wymuszeniem kinematycznym o rozkładzie losowym oddziałującym na koła pojazdu. Są to wymuszenia o charakterze ciągłym, dlatego jako kryterium optymalizacji przyjęto minimalizację energii drgań bloku napędowego.

Dla takiego kryterium przyjęto następujące zmienne decyzyjne, determinujące kształt charakterystyki sprężystości łączników mocujących blok napędowy:

- ugięcie łączników przy obciążeniu statycznym u_{st} ,
- siła P_{max} przy maksymalnym ugięciu łączników sprężystych,
- sztywność elementu przy zerowym ugięciu k_1 ,
- wykładniki wielomianu opisującego charakterystykę.

W celu rozwiązania zadania konieczne jest również określenie warunków ograniczających:

- określenie wartości maksymalnego ugięcia łącznika elastycznego u_{max} ,
- założenie kształtu charakterystyki (degresywno-progresywny),
- określenie zakresu możliwych zmian poszczególnych zmiennych decyzyjnych.

Dla tak określonego zadania przyjęto następującą funkcję celu J (4):

$$J = \frac{1}{T} \int_0^T [f(t,p)]^2 dt, \quad (4)$$

gdzie:

T – horyzont czasu dla funkcjonału J liczonego dla przedziału czasu $\langle 0, T \rangle$,

$f(t,p)$ – funkcja przyspieszeń (realizacja otrzymana w wyniku symulacji) dla określonych wartości zmiennych decyzyjnych p ,

p – zbiór zmiennych decyzyjnych.

Na potrzeby tej pracy przyjęto degresywno-progresywny przebieg charakterystyki sprężystości. Tego typu charakterystyka cechuje się kilkoma korzystnymi cechami. W przypadku ugięcia statycznego przypadającego na punkt przegięcia charakterystyki, uzyskuje się małą sztywność w otoczeniu tego punktu, co w wyniku pozwala ograniczyć przyspieszenia elementu drgającego. Dla większych ugięć następuje szybki wzrost siły, co w skuteczny sposób ogranicza dalsze ugięcie.

Zakłada się, że charakterystyki sprężystości łączników bloku napędowego z nadwoziem mogą być opisane za pomocą podanego poniżej wielomianu (5):

$$P(u) = k_1 \cdot u + B_1 \cdot u^{w_1} + B_2 \cdot u^{w_2} + B_3 \cdot u^{w_3}, \quad (5)$$

gdzie:

$P(u)$ – siła w elemencie sprężystym,

u – ugięcie elementu sprężystego,

w_i – wykładniki wielomianu losowo wybrane z zadanego przedziału,

k_1 – sztywność dla zerowego ugięcia ($k_1 = \frac{\partial P}{\partial u}(0)$).

Sposób wyznaczania charakterystyki sprężystości dla poszczególnych wartości przyjętych zmiennych decyzyjnych i warunków ograniczających zaprezentowano w pracy [1].

3. Badania numeryczne

3.1. Zakres badań

Obliczenia numeryczne drgań bloku napędowego przeprowadzono dla wymuszenia momentem siły odpowiadającym momentowi reakcyjnemu silnika o zapłonie samoczynnym i mocy 100 kW. Obliczenia przeprowadzono dla dwóch prędkości obrotowych silnika: 800 i 1300 obr/min. Odpowiadają one prędkości obrotowej biegu jałowego oraz prędkości, przy której silnik osiąga maksymalny moment obrotowy. Przykładowe przebiegi momentów reakcyjnych zamieszczono w pracach [2, 3]. W drugim etapie przeprowadzono obliczenia drgań bloku napędowego spowodowane jednoczesnym oddziaływaniem wymuszenia siłowego i wymuszenia kinematycznego działającego na koła pojazdu. Symulacje numeryczne przeprowadzono dla prędkości od 20 do 70 km/h oraz czterech rodzajów nawierzchni – asfaltowej i brukowej w dobrym i złym stanie.

Dla każdego wymuszenia przeprowadzono poszukiwanie optymalnej charakterystyki sztywności łączników elastycznych. W tym celu przeprowadzono symulacje dla całego założonego obszaru zmiennych decyzyjnych wykorzystując metodę systematycznego przeszukiwania. Założono następujące wartości i zakresy zmian podstawowych zmiennych:

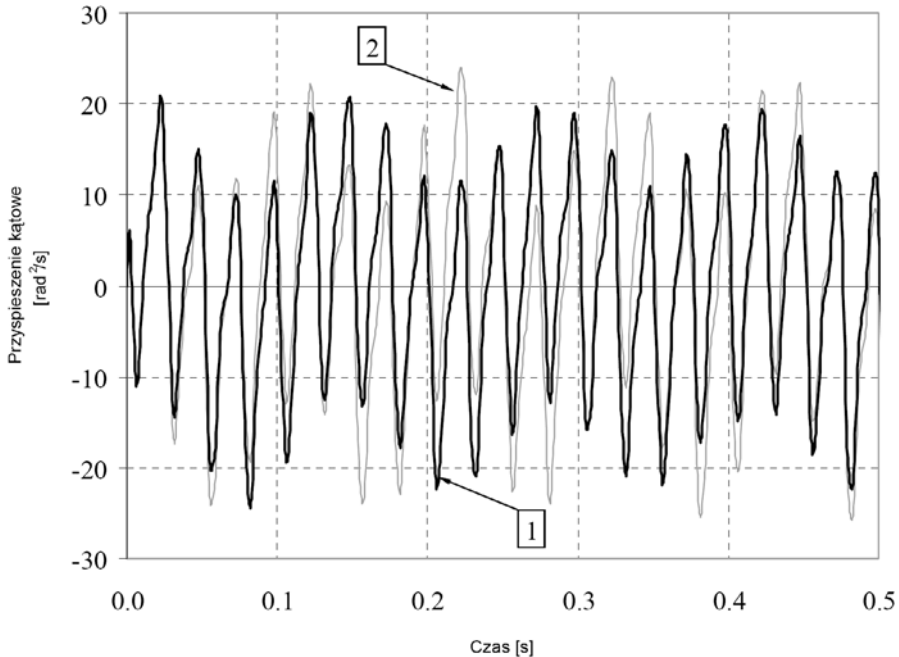
- maksymalne ugięcie elementu sprężystego – $u_{\max} = 5 \text{ mm}$,
- ugięcie statyczne – $u_{\text{st}} = 0,4 \div 0,6 u_{\max}$,
- siła maksymalna – $P_{\max} = 1 \div 2 P_{\max_lin}$ (siły maksymalnej dla elementu o liniowej charakterystyce),
- sztywność $k_1 = 1 \div 2 k_{1_lin}$ (sztywności elementu o liniowej charakterystyce).

Przyjęte do obliczeń pozostałe dane modelu pojazdu odpowiadają samochodowi ciężarowemu średniej ładowności.

3.2. Wyniki obliczeń

W wyniku badań symulacyjnych wyznaczono dla założonych warunków obciążenia optymalne charakterystyki łączników elastycznych pomiędzy blokiem napędowym i nadwoziem samochodu, a także obciążenia dynamiczne bloku napędowego.

Na rys. 2. przedstawiono przebiegi przyspieszeń kątowych bloku napędowego względem osi podłużnej odpowiadające optymalnej i skrajnej charakterystyce łączników przy wymuszeniu momentem siły odpowiadającej momentowi reakcyjnemu przy prędkości 800 obr/min.



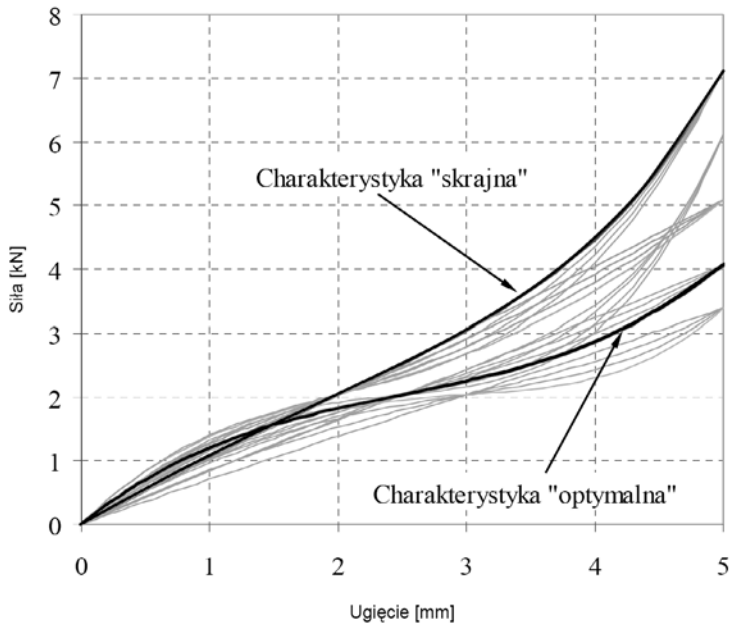
Rys. 2. Przyspieszenie kątowe bloku napędowego względem osi podłużnej – 800 obr/min

1 – charakterystyka optymalna, 2 – charakterystyka skrajna

Fig. 2. The angular acceleration of power pack unit – 800 rpm

1 – optimum characteristic, 2 – extreme characteristic

Wyznaczona na podstawie zależności (4) energia drgań dla charakterystyki optymalnej jest o około 15 % mniejsza niż dla charakterystyki „skrajnej”. Przykładowe charakterystyki sprężystości łączników otrzymane w wyniku symulacji przedstawione są na rys. 3. Na rysunku tym pogrubioną linią oznaczono charakterystyki, dla których otrzymano rezultaty przedstawione na rys. 2.



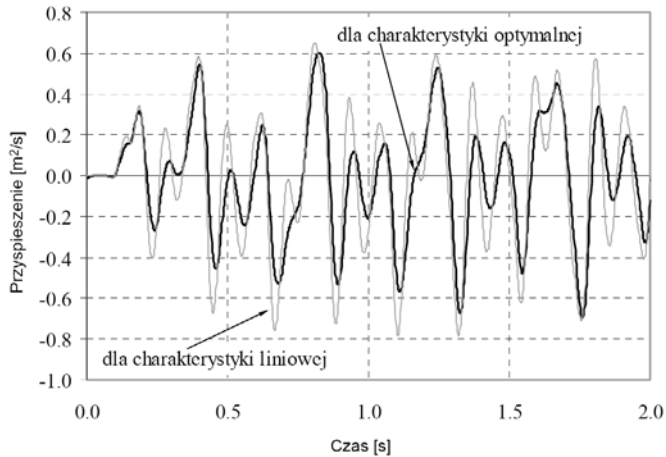
Rys. 3. Przykładowe charakterystyki sprężystości
Fig. 3. The example spring characteristic

W tabeli 1 zestawione są wyniki symulacji ruchu pojazdu po wybranych rodzajach nawierzchni z prędkościami od 20 do 70 km/h przy jednoczesnym oddziaływaniu na blok napędowy wymuszenia siłowego. W celu porównania otrzymanych wyników wyznaczono odchylenia standardowe przyspieszeń pionowych drgań bloku napędowego. Dla każdego przypadku obliczono odchylenie standardowe dla przebiegu otrzymanego dla wyznaczonej charakterystyki optymalnej (σ_1) oraz początkowej charakterystyki liniowej (σ_2).

Tab. 1. Odchylenia standardowych przyspieszeń drgań pionowych
Tab. 1. Standard deviation of accelerations of vertical vibration

Prędkość jazdy [km/h]	Asfalt - dobry stan			Asfalt - zły stan			Bruk - dobry stan			Bruk - zły stan		
	Odchylenie standardowe [m/s ²]		σ_1/σ_2	Odchylenie standardowe [m/s ²]		σ_1/σ_2	Odchylenie standardowe [m/s ²]		σ_1/σ_2	Odchylenie standardowe [m/s ²]		σ_1/σ_2
	σ_1	σ_2		σ_1	σ_2		σ_1	σ_2		σ_1	σ_2	
20	0.16	0.18	0.89	0.71	0.77	0.93	0.79	0.89	0.89	1.25	1.37	0.91
30	0.21	0.24	0.88	0.94	1.00	0.94	1.00	1.09	0.91	1.62	1.70	0.96
40	0.24	0.28	0.86	1.06	1.53	0.69	1.06	1.19	0.89	1.76	1.87	0.94
50	0.27	0.31	0.85	1.21	1.33	0.91	1.17	1.32	0.88	1.98	2.09	0.95
60	0.28	0.34	0.82	1.26	1.42	0.88	1.17	1.38	0.84	1.98	2.19	0.91
70	0.31	0.37	0.86	1.41	1.52	0.92	1.25	1.42	0.88	2.10	2.26	0.93

Na rys. 4. przedstawiono przykładowe przebiegi przyspieszeń pionowych bloku napędowego otrzymane w wyniku symulacji ruchu pojazdu z prędkością 60 km/h po nawierzchni asfaltowej w dobrym stanie. Na rysunku tym linią pogrubioną oznaczono przebieg otrzymany dla charakterystyki optymalnej.



Rys. 4. Przyspieszenia pionowe bloku napędowego
 Fig. 4. Vertical acceleration of power pack unit

4. Podsumowanie

W pracy przedstawiono propozycję modelu pomocnego w wyznaczaniu optymalnych charakterystyk sprężystości elementów zawiesznień bloku napędowego. Przedstawione rezultaty badań modelowych świadczą o możliwości ograniczania sił dynamicznego oddziaływania bloku napędowego na nadwozie pojazdu, a tym samym do poprawy komfortu jazdy.

Zgodnie z przewidywaniami, największą poprawę otrzymuje się dla charakterystyk cechujących się małą sztywnością w otoczeniu punktu ugięcia statycznego oraz zwiększającą się sztywnością przy większych ugięciach. Taki przebieg charakterystyki zapewnia minimalizację sił dynamicznych przy jednoczesnym ograniczeniu nadmiernych przemieszczeń bloku napędowego.

W celu zwiększenia użyteczności modelu należy rozbudować procedurę wyznaczania oprócz charakterystyk sprężystości również charakterystyki tłumienia. Celowym wydaje się wzajemne powiązanie tych charakterystyk. Dodatkowo należy poszerzyć modele wymuszeń siłowych o kilka szczególnych przypadków, np. moment reakcyjny odpowiadający średniej prędkości jazdy, maksymalnej prędkości obrotowej silnika lub moment silnika podczas rozpędzania pojazdu.

Literatura

- [1] Borkowski, W., Hryciów, Z., *Optymalizacja charakterystyk łączników elastycznych do mocowania elementów wyposażenia dodatkowego pojazdów samochodowych*, Archiwum Motoryzacji Nr 4/2004.
- [2] Jakubczak, M., *Ocena stanu sprawności technicznej silnika o zapłonie samoczynnym na podstawie analizy drgań skrętnych wału korbowego*, rozprawa doktorska, WAT, Warszawa 1997.
- [3] Jędrzejczyk, T. A., *Wpływ drgań bloku napędowego na komfort jazdy w samochodzie ciężarowym średniej ładowności*, rozprawa doktorska, WAT, Warszawa 1997.
- [4] Kamiński, E., Pokorski J., *Dynamika zawiesznień i układów napędowych pojazdów samochodowych*, WKŁ, Warszawa 1983.
- [5] Leyko, J., *Mechanika ogólna*, PWN, Warszawa 1996.
- [6] ISO 2631/1 *Evaluation of human exposure to whole-body vibration - General requirements*.
- [7] PN-91/S-04100 *Drgania – Metody badań i oceny drgań mechanicznych na stanowiskach pracy w pojazdach*.