

Andrzej Gągorowski  
Wydział Transportu Politechniki Warszawskiej

## **SYMULACYJNE BADANIA SZTYWNOŚCI ZAWIESZENIA SIEDZISKA W ASPEKTCIE OCENY DRGAŃ ODDZIAŁUJĄCYCH NA OPERATORA POJAZDU**

**Streszczenie:** w artykule przedstawiono nowe podejście do problemu wyznaczania optymalnej sztywności zawieszenia siedziska z punktu widzenia redukcji drgań oddziałujących na operatorów pojazdów. Podstawowa idea opiera się na uwzględnieniu indywidualnych cech osobniczych kierowców czy też maszynistów (ich parametrów biomechanicznych) w procesie wyznaczania i oceny drgań. W artykule autor prezentuje układ do komputerowej analizy wpływu sztywności zawieszenia na drgania transmitowane przez poszczególne struktury anatomiczne człowieka. Składa się on z następujących podsystemów: biomechanicznego modelu człowieka reprezentującego kierowcę o określonych cechach osobniczych, modelu siedziska z układem zawiesznień i regulowaną sztywnością, modelu pojazdu, podsystemu realizującego wymuszenie drogowe, układu pomiarowego. Badania numeryczne przeprowadzono w środowisku Matlab-Simulink-SimMechanics.

**Słowa kluczowe:** sztywność zawieszenia, siedzisko, operator pojazdu, drgania.

### **1. WSTĘP**

W dobie intensywnego rozwoju transportu problem bezpieczeństwa stał się elementem priorytetowym stawiającym przed badaczami i konstruktorami ogromne wyzwanie. Bezpieczeństwo w transporcie kojarzone jest najczęściej z rozwiązaniami, które pozwalają zapobiec wypadkom czy też zminimalizować ich skutki. Jednakże bezpieczeństwo w przypadku osób pracujących zawodowo to również minimalizowanie tych wszystkich czynników, które mogą niekorzystnie wpływać na psychomotoryczny stan kierowcy czy maszynisty podczas jazdy (np. obniżenie koncentracji czy też zwiększenie czasu reakcji), jak również na ich późniejsze zdrowie. Wiele badań epidemiologicznych (prowadzonych na dużą skalę na świecie) potwierdza niekorzystny wpływ drgań na człowieka podczas jazdy [1, 2, 3]. Drgania o określonych parametrach mogą być przyczyną znacznych wzmocnień rezonansowych w ciele człowieka, przy których znacznie wzrasta ryzyko wystąpienia zmian chorobowych. Dyrektywa 2002/44/WE Unii Europejskiej [4]

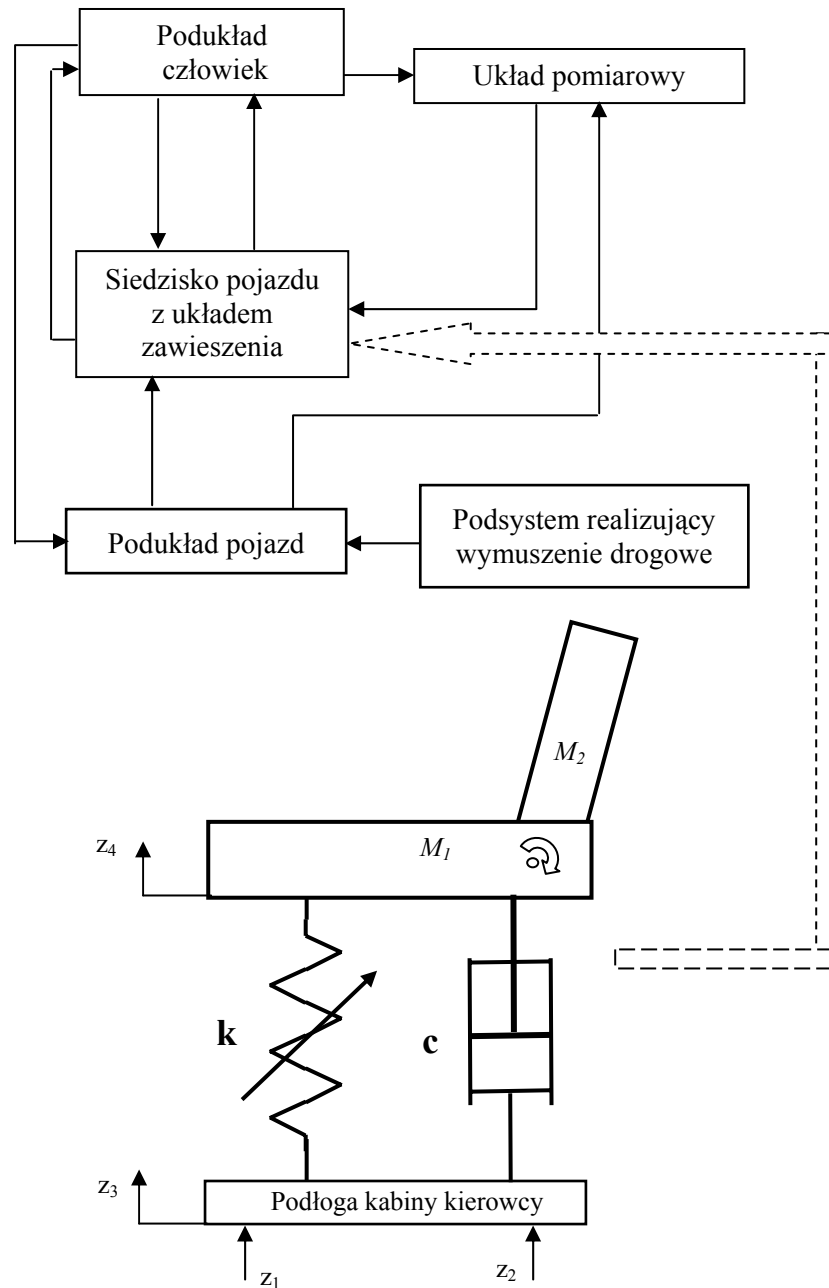
definiuje minimalne wymagania w zakresie ochrony zdrowia i bezpieczeństwa dotyczące narażenia pracowników na ryzyko spowodowane drganiami mechanicznymi. Zgodnie z nią w celu poprawy bezpieczeństwa i ochrony zdrowia pracowników, pracodawcy powinni dokonać niezbędnych zmian w świetle postępu technicznego i wiedzy naukowej dotyczącej zagrożeń związanych z narażeniem na wibracje. W przypadku operatorów pojazdów skuteczną ochronę przed drganiami może zapewnić odpowiednie zawieszenie siedziska. Przy projektowaniu zawieszek konstruktorzy od lat borykają się z problemem znalezienia układu skutecznie redukującego drgania w różnych warunkach eksploatacyjnych. Obecnie wielu badaczy pracuje nad zastosowaniem pół-aktywnego lub aktywnego zawieszenia. Zaletą takiego typu zawieszek jest aktywna zmiana charakterystyki zawieszenia. Ponieważ wrażliwość na drgania jest osobniczą cechą człowieka [5, 6], dlatego niezbędne staje się uwzględnienie cech indywidualnych operatorów pojazdów w procesie konstruowania siedzisk jako inteligentnych układów wibroizolacji. W tym celu konieczne staje się dokładne poznanie związków pomiędzy parametrami zawieszenia (w tym sztywności) a drganiami transmitowanymi przez poszczególne struktury anatomiczne człowieka. Przedstawione badania są kontynuacją wcześniejszych prac autora [np. 7, 8].

## **2. BUDOWA UKŁADU DO BADAŃ SZTYWNOŚCI ZAWIESZENIA SIEDZISKA Z PUNKTU WIDZENIA OCENY ODDZIAŁYWANIA DRGAŃ NA OPERATORA POJAZDU**

Układ do komputerowej analizy wpływu sztywności zawieszenia na drgania transmitowane przez poszczególne struktury anatomiczne człowieka składa się z następujących podsystemów: biomechanicznego modelu człowieka reprezentującego kierowcę o określonych cechach osobniczych, modelu siedziska z układem zawieszek i regulowaną sztywnością, modelu pojazdu, podsystemu realizującego wymuszenie drogowe, układu do pomiaru i przetwarzania sygnałów. Strukturę układu pokazano na rys. 1.

Badania modelowe dynamiki układów złożonych człowiek – siedzisko – pojazd są najczęściej prowadzone z użyciem modelu człowieka o jednym (lub kilku) stopniu swobody bez uwzględnienia jego anatomii [9, 10]. Autor do celów analizy obciążeń dynamicznych struktur człowieka zbudował model o wielu stopniach swobody z uwzględnieniem rzeczywistego rozkładu masy ciała oraz parametrów tkanek mających wpływ na przenoszone drgania. Uwzględniono m.in.:

- sztywności dysków kręgowych,
- sztywności więzadeł kręgosłupa,
- tłumienia dysków kręgowych,
- tłumienia więzadeł,
- sztywności i tłumienia różnych grup mięśni,
- masy i momenty bezwładności poszczególnych struktur anatomicznych człowieka.



Rys. 1. Struktura układu do analizy wpływu sztywności zawieszenia siedziska pojazdu na drgania transmitowane przez poszczególne struktury anatomiczne człowieka (z wyodrębnionym podsystemem siedzisko)

W układzie zawieszenia siedziska (rys. 1) uwzględniono regulację sztywności ( $k$ ) w szerokim zakresie jej wartości oraz stałe tłumienie ( $c$ ). Odwzorowano własności sprężysto - tłumiące poduszki ( $M_1$ ) i oparcia siedziska ( $M_2$ ). Do analizy dynamicznej przyjęto uproszczony model pojazdu z odwzorowaniem elementów kabiny kierowcy.

Uwzględniono kontakt kierowcy z elementami sterowniczymi. Drgania generowane są z użyciem podsystemu realizującego wymuszenia drogowe w postaci procesów losowych o określonych gęstościach widmowych mocy. W budowie układu pomiarowego uwzględniono wymagania norm międzynarodowych ISO [11, 12] w zakresie pomiaru i oceny drgań oddziałujących na człowieka. Zbudowany układ umożliwia jednoczesną analizę drgań pionowych i poziomych wzdłużnych oraz rotacyjnych poszczególnych zamodelowanych struktur anatomicznych człowieka, jak również poszczególnych elementów siedziska i pojazdu.

### 3. BADANIA SYMULACYJNE UKŁADU

Badania symulacyjne przeprowadzono w środowisku Matlab – Simulink - SimMechanics. Główna analiza miała na celu ocenę możliwości układów zawieszzeń z różną sztywnością pod kątem minimalizacji drgań poszczególnych struktur anatomicznych człowieka. Model użyty w badaniach reprezentuje operatora o określonych cechach osobniczych i masie ciała równej 85 kg (wartości parametrów biomechanicznych, o których była mowa w rozdziale 2 nie zamieszczono ze względu na ograniczoną objętość artykułu). Uwzględniając szeroki zakres sztywności stosowanych w różnych konstrukcjach zawiesznień siedzisk badania przeprowadzono dla następujących wartości współczynnika k:  $k_1=7000$  N/m,  $k_2=8000$  N/m,  $k_3=9000$  N/m,  $k_4=10000$  N/m,  $k_5=11000$  N/m,  $k_6=12000$  N/m,  $k_7=13000$  N/m,  $k_8=14000$  N/m,  $k_9=15000$  N/m,  $k_{10}=16000$  N/m,  $k_{11}=17000$  N/m,  $k_{12}=18000$  N/m,  $k_{13}=19000$  N/m,  $k_{14}=20000$  N/m,  $k_{15}=21000$  N/m,  $k_{16}=22000$  N/m,  $k_{17}=23000$  N/m,  $k_{18}=24000$  N/m. Poszczególne serie symulacji komputerowych wykonywano przy stałej wartości tłumienia zawieszzenia siedziska. Za wartość optymalną współczynnika tłumienia przyjęto  $c=980$  Ns/m [13]. W każdej serii badań komputerowych wyznaczano ważne częstotliwościowo przyspieszenia skuteczne RMS drgań pojazdu, siedziska i zamodelowanych struktur człowieka. Parametry drgań wyznaczano zgodnie z obowiązującą normą międzynarodową ISO 2631 [11], zgodnie z którą oceny komfortu jazdy i wpływu drgań mechanicznych na zdrowie człowieka należy dokonywać na podstawie oddziałujących na niego przyspieszeń ( z uwzględnieniem ważenia częstotliwościowego). Wartość RMS z przyspieszeń ważonych filtrami korekcyjnymi była wyznaczona ze wzoru (1):

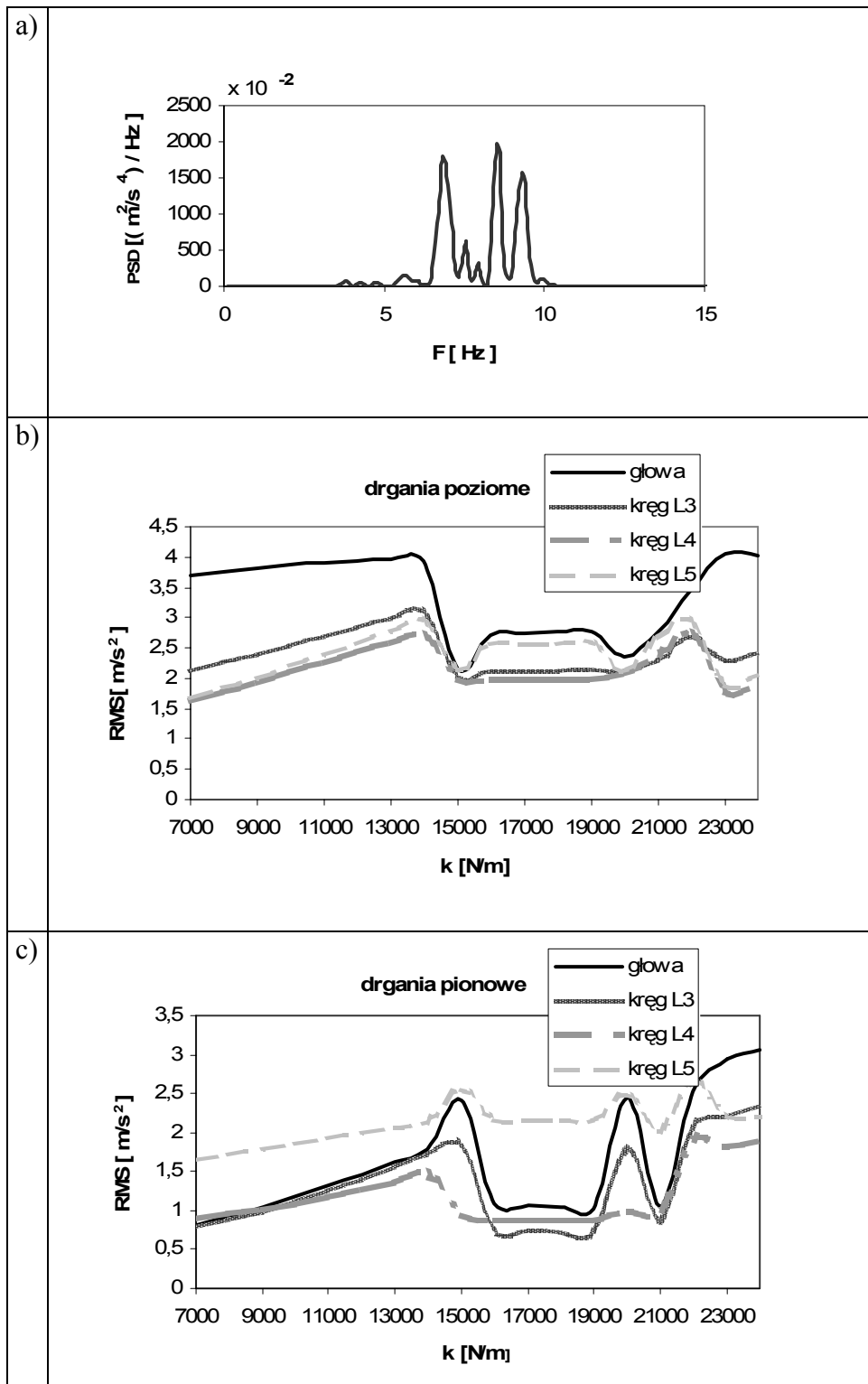
$$\text{RMS} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} a_w^2(i)}, \quad (1)$$

gdzie

$a_w(i)$  - i-ta próbka ważonego przyspieszenia,

N - całkowita liczba próbek mierzonego sygnału.

Dodatkowo uwzględniono dla każdego z analizowanych kierunków drgań odpowiedni mnożnik korekcyjny.



Rys. 2. Porównanie przyspieszeń skutecznych drgań ważonych częstotliwościowo wybranych struktur modelu kierowcy (głowy, kręgosłupów L5, L4, L3) dla różnych wartości sztywności zawieszenia siedziska przy określonym wymuszeniu losowym: a) gęstość widmowa mocy wymuszenia, b) drgania poziome, c) drgania pionowe

Na rysunku 2 pokazano przykładowe wyniki badań symulacyjnych. Rysunki 2b i 2c stanowią porównanie przyspieszeń drgań skutecznych ważonych częstotliwościowo wybranych struktur modelu kierowcy (głowy i kręgów lędźwiowych L5, L4, L3). Przedstawione wykresy ilustrują zmianę wartości przyspieszeń RMS w funkcji sztywności dla różnych kierunków drgań. Drgania układu człowiek –siedzisko –pojazd generowano zadając wymuszenie kinematyczne w postaci procesu losowego z uwzględnieniem oddziaływania kół przednich i tylnych z nierównościami drogi (odpowiednio wymuszenie  $z_1$  i  $z_2$  – rys. 1). Na rysunku 2a pokazano przebieg gęstości widmowej mocy przyspieszenia ruchu wymuszającego dla analizowanego przypadku.

Badania przeprowadzone dla różnych wartości współczynnika sztywności  $k$  sprężyny zawieszenia pozwoliły określić zmiany drgań transmitowanych w ciele człowieka o określonych parametrach biomechanicznych, jakie mogą powstać podczas jazdy. Poniżej przedstawiono wybrane wnioski z badań:

- zarówno dla drgań pionowych jak i poziomych wzdłużnych można zaobserwować silnie nieliniową zależność przyspieszeń drgań zamodelowanych części ciała człowieka w funkcji sztywności zawieszenia,
- dla analizowanych poszczególnych struktur modelu człowieka można wskazać kilka różnych wartości sztywności, przy których występują znaczne wzrosty wartości przyspieszeń drgań (co może wiązać się z rezonansem określonego układu anatomicznego),
- z punktu widzenia ograniczania wpływu wibracji na człowieka uzyskane wyniki pozwalają określić wartości optymalne sztywności zawieszenia dla poszczególnych kierunków drgań, dla operatora o określonych parametrach biomechanicznych.

#### 4. ZAKOŃCZENIE

W artykule zaprezentowano układ przeznaczony do komputerowej analizy drgań oddziałujących na operatorów pojazdów przy uwzględnieniu zmian sztywności zawieszenia siedziska. Przedstawiono badania dla modelu człowieka reprezentującego kierowcę o określonych parametrach biomechanicznych. Otrzymane wyniki pokazują złożoność problemu, jakim jest właściwy dobór parametrów zawieszenia z punktu widzenia redukcji drgań bezpośrednio oddziałujących na ciało człowieka. Na podstawie uzyskanych wyników można stwierdzić, że zmiany sztywności zawieszenia siedziska mają duży i nieliniowy wpływ na przebieg przyspieszeń drgań poszczególnych struktur anatomicznych człowieka, przy czym trudno jest jednoznacznie wyznaczyć jej optymalną wartość. Można wskazać w badanym przypadku kilka wartości, przy których uzyskamy znaczną redukcję drgań poszczególnych analizowanych układów anatomicznych. Trudność tę zwiększa konieczność uwzględnienia drgań w różnych kierunkach. Z punktu widzenia oddziaływania na człowieka należy przede wszystkim dążyć do redukcji drgań poziomych wzdłużnych i pionowych (powodujących największe obciążenia dynamiczne kręgosłupa i innych układów anatomicznych człowieka [14]). Dla wszystkich analizowanych kierunków, zarówno przy niektórych mniejszych jak i większych wartościach sztywności,

zaobserwowano silne wzmocnienia drgań mogące niekorzystnie wpływać zarówno na komfort jazdy jak i na zdrowie operatora pojazdu.

Problem wyboru zawieszenia bardziej twardego czy też miękkiego uzależniony jest także od klasy drogi, po której porusza się pojazd. Konieczne są więc dalsze badania sztywności zawieszenia uwzględniające nie tylko zmiany cech osobniczych kierowców czy maszynistów, ale także szeroki zakres wymuszeń drogowych czy też kolejowych.

Większość rozwiązań semiaktywnych wykorzystujących np. sterowane tłumiki z cieczą magnetoreologiczną mają za zadanie dostosować charakterystykę tłumienia do różnych warunków drogowych czy też kolejowych [15]. Rozwiązań ze zmienną sztywnością jest znacznie mniej. Realizacja takich układów jest bardziej skomplikowana a koszty eksploatacji większe. Przedstawione badania dowodzą jednak, że dostosowanie sztywności zawieszenia do parametrów biomechanicznych człowieka oraz warunków ruchu pozwoli znacznie obniżyć drgania bezpośrednio oddziałujące na ciało operatora w określonych kierunkach i zminimalizować ich niekorzystny wpływ na operatorów pojazdów.

## Bibliografia

1. Gallais L., Griffin M. J., Palmer K.: Longitudinal epidemiological surveys in the United Kingdom of drivers exposed to whole-body vibration. Risks of Occupational Vibration Exposures VIBRISKS. FP5 Project No. QLK4-2002-02650 January 2003 to December 2006. Annex 16 to Final Technical Report, 2006.
2. Schwarze S., Notbohm G., H. Dupuis, E. Hartung: Dose-response relationships between whole -body vibration and lumbar disk disease—a field study on 388 drivers of different vehicles. *Journal of Sound and Vibration* 215(4), 613-628, 1998.
3. Bovenzi M., Zadini A.: Self-reported low back symptoms in urban bus drivers exposed to whole-body vibration, *Spine* 17, 1048-1059, 1992.
4. DYREKTYWA 2002/44/WE PARLAMENTU EUROPEJSKIEGO I RADY z dnia 25 czerwca 2002 r. w sprawie minimalnych wymagań w zakresie ochrony zdrowia i bezpieczeństwa dotyczących narażenia pracowników na ryzyko spowodowane czynnikami fizycznymi (wibracji) (szesnasta dyrektywa szczegółowa w rozumieniu art. 16 ust. 1 dyrektywy 89/391/EWG)
5. Mansfield N. J., Griffin M. J.: Non-linearities in apparent mass and transmissibility during exposure to whole-body vertical vibration. *Journal of Biomechanics* 33(2000), pp. 933– 41.
6. Paddan G. S., Griffin M. J.: A review of the transmission of translational seat vibration to the head. *Journal of Sound and Vibration* (1998) 215(4), 863-882 .
7. Choromański W., Gągorowski A.: New concepts in the design of intelligent mechatronic vehicles seats. Proceedings of IAVSD'09, 21st International Symposium on Dynamics of Vehicles on Roads and Tracks, 17 – 21 August, 2009, KTH, Stockholm, Sweden.
8. Gągorowski A.: Badania tłumika magnetoreologicznego jako elementu zawieszenia siedziska pojazdu. *Prace Naukowe Politechniki Warszawskiej, Transport. Z. 71, Warszawa 2009, s. 43÷56.*
9. Nagai M., Yoshida H., Tohtake T., Suzuki Y.: Coupled vibration of passenger and lightweight car-body in consideration of human-body biomechanics, *Vehicle System Dynamics, Vol. 44, Supplement, 2006, 601–611*
10. Rakheja S., Afework Y., and Sankar S., An analytical and experimental investigation of the driver-seat-suspension system, *Vehicle System Dynamics, 23 (1994), pp. 501–524.*
11. ISO 2631-1:1997: Mechanical Vibration and Shock - Evaluation of human exposure to whole-body vibration, Part 1, General Requirements, International Standards Office, ISO, Switzerland, Geneva, 1997.
12. ISO 8041:2005-Human response to vibration-Measuring instrumentation, International Standards Office, ISO, Switzerland, Geneva, 2005.
13. Gundogdu O.: Optimal seat and suspension design for a quarter car with driver model using genetic algorithms: *International Journal of Industrial Ergonomics* 37 (2007) 327–332.
14. Będziński R., Pezowicz C., Szust A.: Biomechanika kręgosłupa. Seria.: Biocybernetyka i inżynieria biomedyczna 2000, (pod red.: Nałęcz M.), T.5 Biomechanika i inżynieria rehabilitacyjna (pod red.:

- Będziński R., Kiwerski J., Morecki A., Kędzior K., Skalski K., Wall A., Wit A.) Akademyka Oficyna Wydawnicza Exit, str. 101-158, 2004.
15. Song, X. , Ahmadian, M.: Study of Semiactive Adaptive Control Algorithms with Magneto-Rheological Seat Suspension. In: 2004 SAE World Congress, Detroit, Michigan, March 8–11, 2004 SAE International 2004-01-1648, 2004.

### **SIMULATION STUDY ON STIFFNESS OF SUSPENSION SEAT IN THE ASPECT OF THE VIBRATION ASSESSMENT AFFECTING ON A VEHICLE DRIVER**

**Abstract:** this paper presents an original approach to the problem of the optimal stiffness evaluation in a suspension of driver seat for the best reduction of human vibration (whole-body vibration). The basic idea is to take into consideration the individual personal features (biomechanical parameters) of a human in the process of vibrations assessment. In this article author presents a complete system to the influence analysis of suspension stiffness on driver vibrations. It consists of following subsystems: biomechanical model of human representing a specific driver, model of seat with suspension and adjustable spring, model of vehicle, subsystem of road excitation and module for signals processing. The actual research has focused on numerical simulations in the environment Matlab-Simulink-SimMechanics.

**Keywords:** suspension stiffness, seat, vehicle driver, vibrations