

PODSTAWY MODELOWANIA BIOMECHANICZNEGO W ŚRODKACH TRANSPORTU

DARIUSZ WIĘCKOWSKI

Przemysłowy Instytut Motoryzacji

Streszczenie

W pracy omówiono podstawy związane z modelowaniem biomechanicznym w ujęciu inżynierskim. Praca ma charakter przeglądowy, a jej celem jest przedstawienie różnych metod modelowania biomechanicznego wykorzystywanych w środkach transportu. Nawiązano do historii rozwoju modelowania, zwracając uwagę na początki modelowania. Przytoczono definicje modelu oraz omówiono postacie modeli. Zdefiniowano pojęcie biomechaniki. Zaprezentowano sposób budowy modelu człowieka. Zwrócono uwagę na główne segmenty ciała człowieka w aspekcie uwzględnienia ich w procesie modelowania. Opisano trudności związane z modelowaniem ruchów ciała i działających na to ciała sił. Zaprezentowano podział modeli biomechanicznych oraz opisano charakterystyczne cechy i przykłady zastosowań. Zwrócono uwagę na różne rodzaje modeli biodynamicznych, w tym modele fizyczne, matematyczne i zwierzęce. Podkreślono różnice w modelowaniu człowieka w zależności od przyjętego modelu. Pokazano przykłady modelowania. W podsumowaniu podkreślono, że dany model biomechaniczny może odwzorowywać tylko kilka aspektów ciała ludzkiego. Natomiast badanie poprawności modelu powinno obejmować porównania pomiędzy danymi prognozowanymi przy użyciu tego modelu, a niezależnymi obserwacjami prognozowanych odpowiedzi. Wskazano kierunki dalszych prac związanych z modyfikacją, rozwojem modeli.

Słowa kluczowe: modelowanie, biomechanika, modelowanie biomechaniczne środki transportu.

1. Wstęp

Pojęcie modelu zaczęło rozwijać się wraz z rozwojem cybernetyki, teorii sterowania oraz informatyki, znalazło szerokie zastosowanie wraz z rozwojem maszyn matematycznych do symulacji i modelowania różnych procesów. W 1945 roku Norbert Wiener zdefiniował model następująco: „jest to reprezentacja procesu lub systemu (istniejącego w rzeczywistości lub planowanego do realizacji), która wyraża istotne cechy procesu czy systemu w postaci użytkowej” [1]. W pracy [2] definicja modelu została określona, jako: „układ, którego zadaniem jest imitowanie wyróżnionych cech innego układu, zwanego oryginałem”. Z innego punktu widzenia jest sformułowana definicja modelu w pracy [3]. Mianowicie: „przez model izomorficzny z badanym pod kątem dynamiki maszyn zjawiskiem, zachodzącym z rozważnym układzie, rozumiemy taką idealizację obiektu, przy której wybierając najważniejsze

własności, a odrzucając pozostałe, można uzyskać przy takich samych sygnałach wejściowych dla obiektu i modelu dostatecznie bliskie sygnały wyjściowe".

Można wyróżnić następujące postacie modelu [1]:

- 1) Koncepcyjny – reprezentuje pewną logiczną propozycję uporządkowania istotnych cech procesu.
- 2) Fizyczny – nadaje cechom procesu interpretację, zgodną z naturą fizyczną procesu (model fizyczny jest rozumiany, jako wierna replika rozważanego procesu czy systemu w zmniejszonej skali).
- 3) Matematyczny – reprezentuje cechy modelu w postaci relacji matematycznych (model matematyczny jest rozumiany, jako zbiór relacji matematycznych opisujących system).

Są także inne klasyfikacje modelu [1]. Model może mieć charakter strukturalny, jeżeli są w nim wyodrębnione modele elementów systemu i powiązań między nimi; lub charakter zagregowany, jeżeli dotyczą systemu jako jakości. Model może być dynamiczny bądź statyczny, liniowy bądź nieliniowy (nieliniowość może mieć charakter geometryczny lub fizyczny), deterministyczny bądź stochastyczny.

Podobna klasyfikacja modeli (pod kątem dynamiki maszyn) zawarta jest w [3]. Również wyróżnione zostały: model fizyczny – układ, który ma być przestudiowany i zjawiska w nim zachodzące; model matematyczny – opis analityczny badanych zjawisk objętych modelem fizycznym; modele strukturalne – organizacja wewnętrzna modelu jest podobna do organizacji wewnętrznej badanego układu, zachodzi wręcz podobieństwo i odpowiedniość elementów modelu i elementów układu; modele funkcjonalne – przy ich budowie nie wnika się w strukturę wewnętrzną układu, a które spełniają jedynie warunek, że w wyniku działań sygnałów wejściowych otrzymuje się sygnały wyjściowe dostatecznie bliskie sygnałom wyjściowym obiektu. Także wprowadzono modele dyskretne i ciągłe, liniowe i nieliniowe.

Model jest pewnym uproszczeniem, idealizacją modelowanego układu. Zgodność między modelem, a układem powinna być na tyle duża, aby wszelkie wnioski dotyczące systemu oparte na badaniach symulacyjnych modelu można było uznać za prawdziwe. Nie można podać ogólnej recepty budowy modeli. Jednak w przypadku modeli o konkretnym przeznaczeniu możliwe są pewne wskazówki metodyczne.

Model należy oceniać pod względem nie tego, co on ma prognozować, lecz tego, jak dobrze prognozuje to, co ma prognozować. A więc, prosty model, który stawia konkretną tezę, może być „lepszy” niż model złożony. Prosty model może być korzystny w następujących przypadkach:

- a) jeśli stawia bardziej konkretną tezę,
- b) jeśli jego dokładność w prognozowaniu informacji, do wyznaczania których służy, jest większa od dokładności złożonego modelu.

Mylące jest oferowanie modelu bez wyraźnego określenia, co on ma reprezentować, a więc czego w istocie nie reprezentuje. Może to dotyczyć:

- formy modelu;
- parametrów modelu;
- warunków, w których można dany model stosować;
- zastosowań modelu;
- dokładności modelu.

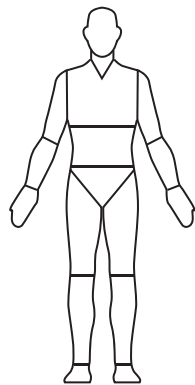
Z jednej strony wydaje się, że nie można zaproponować modelu bez podania dowodów, na których jest on oparty, ale z drugiej strony nie wszystkie modele wywodzą się z rygorystycznie prowadzonych prac naukowych. Model powinien być połączony z dowodami związanymi z jego nieodłącznymi właściwościami i proponowanym zastosowaniem. Te dowody nie powinny być ograniczone do tego, co przemawia za słuszością modelu, lecz powinny być uczciwym przedstawieniem istniejącego stanu wiedzy. Ta informacja powinna być wystarczająca dla użytkownika modelu dla przeanalizowania, czy zastosowanie modelu może być użyteczne.

Z pewnego punktu widzenia, jak zauważył autor pracy [4], przedrostek „bio” występujący w nazwach modeli jest często nadużywany, gdyż w większości przypadków prezentowane modele mają parametry skupione i są modelami mechanicznymi ciała człowieka (nawet prostymi modelami liniowymi, np. [6]), ponieważ nie odzwierciedlają złożonych funkcji biologicznych. Wykorzystuje się nawet modelowanie dynamiczne typu masa-sprężyna-tłumik. Przykładem jest praca [26] gdzie rozważane było zagadnienie badań oddziaływania ogólnych drgań pionowych na organizm człowieka.

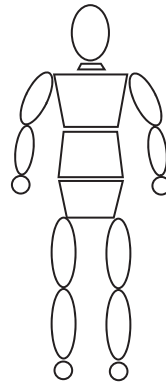
Szczególnie szerokie zastosowanie modeli występuje przy rozpatrywaniu zagadnień związanych ogólnie z mechaniką (dynamiką).

2. Modele biomechaniczne

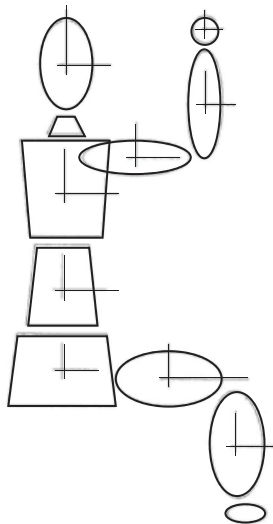
Podobnie jak w mechanice również w przypadku organizmu człowieka buduje się i wykorzystuje modele. Przy czym pod pojęciem modelu mechanicznego człowieka rozumie się taki układ mechaniczny ze skupionymi lub rozłożonymi masami, którego impedancja mechaniczna lub transmitancja są zgodne, według określonego kryterium, ze znaną impedancją lub transmitancją ciała człowieka [4]. Z punktu widzenia mechaniki ciało ludzkie można traktować jako ciągły układ sprężysto-tłumiący. Układ taki można uprościć poprzez zastąpienie go dynamicznie równoważnym modelem dyskretnym, o wielu stopniach swobody. Na rys. 1 przedstawiono główne segmenty ciała człowieka, a na rys. 2 przykład uwzględnienia tychże segmentów w procesie modelowania. Z kolei na rys. 3 pokazano przykład modelowania osoby siedzącej w pojeździe, a na rys. 4 zaprezentowano model mechaniczny dyskretny postawy siedzącej według [4].



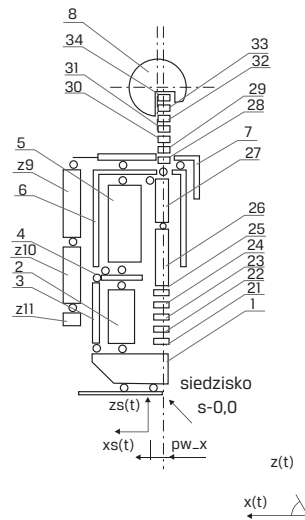
Rys. 1. Główne segmenty ciała człowieka.



Rys. 2. Przykład modelowania ciała człowieka.



Rys. 3. Przykład modelowania człowieka siedzącego [4].

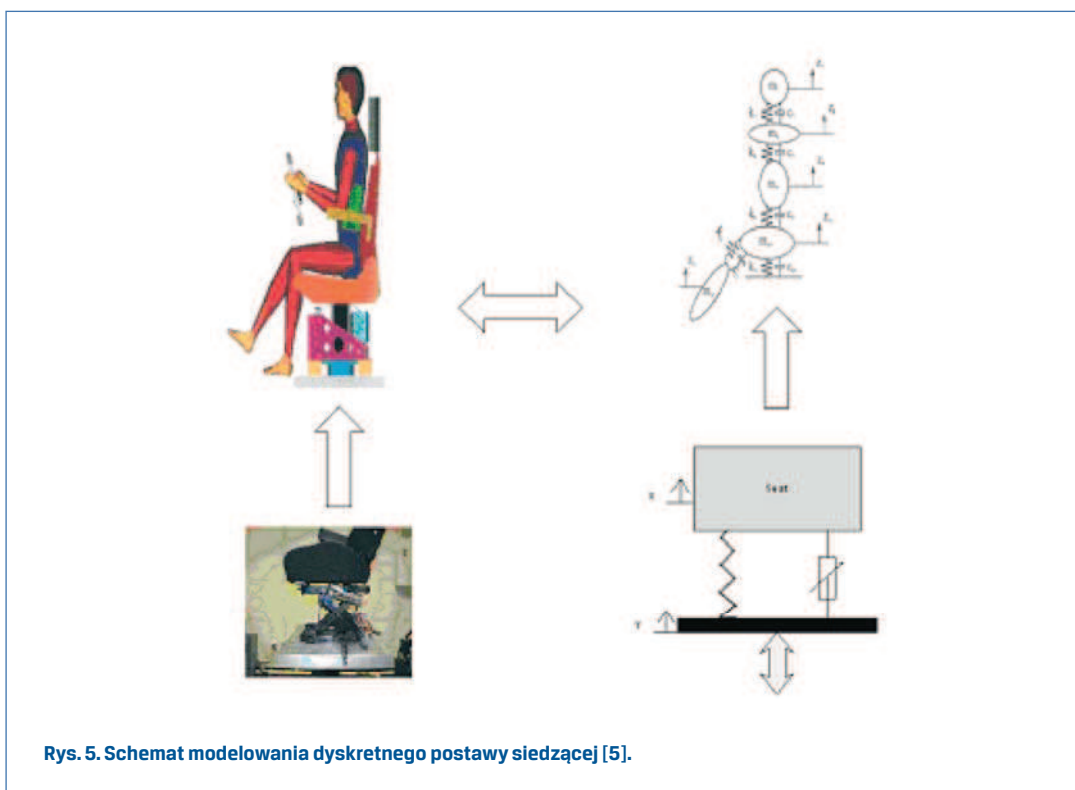


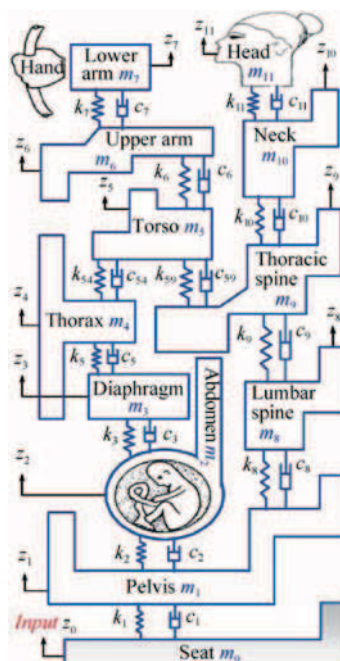
Rys. 4. Model mechaniczny dyskretny postawy siedzącej [4].

Na obu rysunkach w sposób odmienny nie tylko zamodelowano elementy ciała człowieka, ale również inna jest ich liczba przyjęta do modelu. Na rys. 4 liczbami zaznaczono poszczególne narządy i części ciała człowieka: 1 – miednica; 2 – narządy wewnętrzne jamy brzusznej; 3 – powłoki jamy brzusznej; 4 – przepona; 5 – narządy wewnętrzne klatki piersiowej; 6 – klatka piersiowa; 7 – obręcz barkowa; 8 – głowa; z9 – ramię zastępcze; z10 przedramię zastępcze; z11 – ręka zastępcza; z15 – udo zastępcze; z16 – goleń zastępcza; z17 – stopa zastępcza; 21, 22, 23, 24, 25 – pięć kręgów odcinka lędźwiowego kręgosłupa; 26 – dolna część kręgosłupa piersiowego; 27 – górna część kręgosłupa piersiowego; 28, 29, 30, 31, 32, 33, 34 – siedem kręgów odcinka szyjnego kręgosłupa.

Kolejny przykład modelowania dyskretnego postawy siedzącej pokazano na rys. 5 [5]. Na rysunku tym zaprezentowano schematycznie sposób identyfikacji modelu w oparciu o badania na specjalnym stanowisku badawczym. Inne przykładowe prace dotyczące modelowania postawy siedzącej to: [6], [7], [8].

Na rys. 6 pokazano przykład modelowania kobiety w ciąży, w środkach transportu, w pozycji siedzącej [9]. Natychmiast można zauważyć nowy „element” modelu, czyli dziecko w brzuchu matki. W porównaniu poprzednimi przykładami (rys. 3, 4 i 5) widać jeszcze inny sposób budowy modelu – inna forma modelowania kręgosłupa, rąk, tułowia. W tym przypadku charakterystyczną cechą jest to, że autorzy przy modelowaniu postawy siedzącej pominęli nogi. Inne przykładowe prace dotyczące tego tematu to [10], [11].





Rys. 6. Mechaniczny model drgań ciała kobiety w ciąży [9].

Należy również zauważyć, że podejmowane są zadania modelowania poszczególnych elementów ciała człowieka, często bardzo złożonych. Przykładem jest praca [12], dotycząca modelowania kręgosłupa wraz z układem mięśniowo szkieletowym człowieka w zakresie badania stateczności i drgań kręgosłupa.

„Biomechanika” (termin używany, jako synonim pojęcia „biodynamika”) jest to nauka o fizycznych, biologicznych i mechanicznych właściwościach lub odpowiedziach ciała, jego tkanek, organów, części i układów, w odniesieniu zarówno do sił i ruchów działających na ciało z zewnątrz jak i do jego własnej aktywności mechanicznej [13]. Podobna definicja sformułowana jest w pracy [14]. Autorzy tej pracy podają, że biomechanika, czyli mechanika układów żywych, jest interdyscyplinarną nauką o przyczynach i skutkach działania sił zewnętrznych i wewnętrznych na układy biologiczne (np. człowieka, zwierzę, owada, roślinę), zarówno w skali makro (na cały organizm lub segment ciała), jak i mikro (na jedną komórkę lub jej część). Zbieżna definicja biodynamiki podana jest w [15] – jest to nauka, o fizycznych, biologicznych i mechanicznych (bezwładnościowych) właściwościach i reakcjach człowieka lub analogu ciała ludzkiego, jego tkanek, organów, części i układów, na siły zewnętrzne (biodynamika zewnętrzna), łącznie z drganiami wewnątrzpochodnymi, bądź na siły wewnętrzne wytwarzane przez wzajemne oddziaływanie sił zewnętrznych i własnej mechanicznej czynności ciała (biodynamika wewnętrzna).

Możliwe są różne rodzaje modeli biodynamicznych, w tym modele fizyczne, matematyczne

i zwierzęce. Nie oczekuje się, aby modele pod każdym względem funkcjonowały identycznie jak układy przez nie reprezentowane. Model może odwzorowywać jeden lub więcej aspektów jakiegoś układu. Trzeba, aby użytkownicy modelu wiedzieli, z jaką dokładnością odwzorowuje on dany system i do jakiego zakresu zastosowań ten model się nadaje.

Przy każdym modelowaniu ruchów ciała i działających na to ciało sił występuje szereg trudności. Jako przykładowe można podać [13]:

- złożoność struktury i własności ciała,
- trudności przy pomiarze ruchów i sił w obrębie ciała,
- nieliniowość układu,
- zamierzone i niezamierzone działanie mięśni na pozycję ciała,
- trudności przy uzyskaniu danych doświadczalnych dotyczących właściwości tkanek ciała,
- niepełne zrozumienie sposobów poruszania się ciała.

Tymczasem wiemy, że występują, między innymi:

- sztywność dysków i więzadeł kręgosłupa,
- tłumienie dysków i więzadeł kręgosłupa
- sztywności i tłumienie różnych grup mięśni,
- sztywności i tłumienie różnych grup szkieletu i stawów,
- masy i momenty bezwładności poszczególnych struktur anatomicznych człowieka

Poszukiwanie pełnego inżynierskiego modelu odpowiedzi ciała jest nierealistyczne. Na odwrót, w każdym przypadku najbardziej użyteczny będzie najprawdopodobniej model najprostsz, który zapewni dostatecznie dokładne określenie przewidywanych odpowiedzi stanowiących przedmiot zainteresowania. Złożone modele odzwierciedlają złożone hipotezy, których prawdopodobnie nie da się obecnie poddać testom i zweryfikować. Złożoność modelu da się uzasadnić dopiero wtedy, gdy będą znane mechanizmy przez ten model odwzorowywane. Przykładowe możliwe zastosowania modeli biodynamicznych to [16]:

- odwzorowanie zrozumienia charakteru ruchów ciała,
- oszacowanie wpływu zmiennych oddziałujących na odpowiedź biodynamiczną,
- zaproponowanie dogodnej metody zestawiania średnich wartości eksperymentalnych danych biodynamicznych,
- prognozowanie ruchów lub sił powodowanych przez pewne sytuacje, gdy nie da się tego określić doświadczalnie z powodu zbyt dużej liczby i różnorodności takich sytuacji,
- prognozowanie ruchów lub sił powodowanych przez pewne sytuacje, gdy nie da się tego określić doświadczalnie z powodu występującego nadmiernego zagrożenia,
- dostarczenie informacji potrzebnych do optymalizacji układów wibroizolacyjnych i innych powiązanych z ciałem,
- określenie warunków impedancji standardowej do badania drgań układów używanych przez człowieka.

Jeszcze innym zastosowaniem modelu może być jego wykorzystanie do badań rozdziału mocy i przepływu energii w systemie człowiek-urządzenie mechaniczne [17].

Nie można przyjąć, że wystarczającym uzasadnieniem dla modelowania dynamicznych odpowiedzi ciała jest dążenie do ograniczenia szkodliwego oddziaływania drgań lub wstrząsów

mechanicznych na zdrowie człowieka. Przewidywanie sił i ruchów występujących w ciele stanowi tylko mały fragment w kierunku przewidywania oddziaływania drgań na zdrowie: nie jest znany związek pomiędzy siłą, a obrażeniem lub schorzeniem w każdym miejscu ciała, ale przypuszczalnie jest on bardzo złożony i w dużej mierze zależny od czasu. Aby uzasadnić przydatność modeli do takich zastosowań, konieczne jest zidentyfikowanie i określenie poprawności nie tylko modelu biodynamicznego, ale także modelu odpowiednich mechanizmów powstawania obrażeń [13]. Przy modelowaniu biodynamicznym ważne są duże różnice występujące zarówno pomiędzy różnymi obiektami („zmiennosc międzyobiektowa”) jak i dla poszczególnych obiektów („zmiennosc wewnątrzobiektowa”). Ludzie, do których jakiś model ma zastosowanie, mogą podlegać różnym ograniczeniom zależnie od ich wieku, płci, wzrostu i tuszy, sprawności fizycznej, doświadczenia itp. W większości modeli istotnych dla omawianych tu zagadnień uzyskuje się tylko jedną prognozowaną wartość dla każdego wejścia, ale dla rzeczywistych obiektów zwykle występuje duża zmienność odpowiedzi pomiędzy obiektami i dla poszczególnych obiektów. Dlatego od modeli wymaga się, aby odzwierciedlały ten rozkład odpowiedzi.

Istotnym zagadnieniem jest sprawa danych potrzebnych do konstruowania modeli. Modele można konstruować nie posiadając danych lub nie uwzględniając danych, które są dostępne, wykorzystując parametry definiowane na podstawie domysłów. Przykładowo, można zaproponować (zasugerować), że istnieje rezonans przy określonej wartości częstotliwości jakiejś części ciała i w konsekwencji można proponować jakiś rodzaj jakościowego lub ilościowego modelu tego rezonansu bez przedstawienia jakiegokolwiek dowodu na poparcie tej tezy. Przykładem takiego podejścia jest praca [18]. Nawet niektóre dobrze znane modele wyewoluowały bardziej z dążenia do ich większego wyrafinowania, niż z chęci lepszego zrozumienia bądź z potrzeby dokładniejszego odwzorowania opisywanych efektów. W przypadku niektórych modeli tego rodzaju nie twierdzi się, że odwzorowują one jakieś konkretne zależności pomiędzy wejściem a wyjściem z określoną dokładnością czy też jakiś konkretny mechanizm. Jednakże na tyle, na ile nie przypisuje się im takich konkretnych cech, nie można ich łatwo obalić.

2.1. Rodzaje modeli biomechanicznych

Przechodząc do kwestii rodzajów modeli M. J. Griffin w pracy [13] zaproponował rozpatrzenie trzech różnych form modeli, wzajemnie się niewykluczających.

2.1.1. Mechanistyczne¹ modele biodynamiczne

„Model mechanistyczny” jest to taki model, w którym zakłada się, że do użytecznego prognozowania odpowiedzi ciała człowieka wystarczy zastosowanie praw fizyki (jak również chemii itd.). Ma on ułatwiać zrozumienie ruchu ciała. Te modele w pewien sposób odzwierciedlają mechanizmy biorące udział w generowaniu biodynamicznych odpowiedzi ciała ludzkiego. W praktyce, modelu czysto mechanistycznego nie da się jeszcze zdefiniować,

¹ „Mechanistyczny - usiłujący wyjaśnić zjawiska i procesy niebędące ruchem mechanicznym za pomocą pojęć i praw mechaniki [21].

ponieważ mechanizmy związane z większością odpowiedzi biodynamicznych są złożone i słabo rozpoznane.

Wiele opublikowanych biodynamicznych modeli odpowiedzi ciała ludzkiego na drgania utworzono jako proste kombinacje mas, sprężyn i tłumików. Niektóre z nich mogą dawać użyteczne przybliżone zależności pomiędzy zmiennymi niezależnymi, a zależnymi. Jednakże w większości przypadków budowano je wybierając formę modelu bez uwzględniania tego, w jaki sposób ciało się porusza, jedynie tak dobierano parametry modelu, aby związek pomiędzy wejściem, a wyjściem pasował do jakiejś zmierzonej lub oszacowanej funkcji przenoszenia (np. dane opisujące zdolność przekazywania drgań lub impedancję) [18]. Nie ulega wątpliwości, że większość tych modeli niewłaściwie odwzorowuje wewnętrzne ruchy zachodzące w ciele. Modele te są wygodną formą porozumiewania się - wyrażają złożone odpowiedzi w postaci drukowanej lub w formie programów komputerowych. Jednakże nie dają możliwości prawidłowego przewidywania i nie są dokładniejsze niż te wartości lub krzywe, do których je dopasowano - nie są to modele mechanistyczne. Jako przykład opracowanych modeli mechanistycznych można podać publikacje [20], [17]. Natomiast należy stwierdzić, że nie są szeroko dostępne dane eksperymentalne na podstawie, których buduje się tego typu modele lub uznaje za poprawne.

Model mechanistyczny reprezentuje aktualny stan wiedzy o określonym mechanizmie i będzie zastąpiony przez „lepszy” model, gdy stan wiedzy się poprawi. Na tyle, na ile modele mechanistyczne przyczyniają się do rozwoju wiedzy, stanowią one kolejne stopnie potrzebne do postępu nauki.

Modele, które mają odwzorowywać mechanizmy, są zdecydowanie zadowalające. Jeśli dany mechanizm jest prawidłowo zidentyfikowany i zrozumiany, modele takie mogą umożliwić prognozowanie odpowiedzi, która nie została zmierzona. Model o jednym stopniu swobody mógłby być mechanistycznym.

Model mechanistyczny zwykle odwzorowuje jakieś fragmenty ciała, a więc wymaga posiadania wiedzy na temat tych fragmentów. Do tego mogą być potrzebne dane anatomiczne i informacje o masie, sztywności i tłumieniu. Alternatywnie, ponieważ sztywność i tłumienie są trudne do uzyskania bezpośrednio dla żywej tkanki, odpowiednie wartości potrzebne, aby model umożliwił określenie oczekiwanych zależności pomiędzy wejściem, a wyjściem, mogą wynikać z danych otrzymanych z prób dynamicznych. Z tego powodu parametry takich modeli wyznacza się zarówno na podstawie zrozumienia występujących mechanizmów jak i z dopasowywania krzywych do zmierzonych odpowiedzi biodynamicznych. Może to prowadzić do uproszczeń polegających na stosowaniu modelu człowieka (o jednym lub kilku stopniach swobody) bez uwzględnienia jego anatomii [22], [23].

Formą modelu mechanistycznego może być [13]:

- a) Opis jakościowy sposobu poruszania się ciała. Przykładem jest wyrażenie opisujące odpowiedź ciała wywołaną przez określone rezonanse.
- b) Układ mechaniczny, którego odpowiedź odwzorowuje niektóre charakterystyczne cechy układu wywołującego zjawisko uznane za wyjście. Przykładem jest model umożliwiający przewidywanie efektów cech charakterystycznych modelu (np. pozycji lub masy ciała).

- c) Zwłoki ludzkie.
- d) Zwierzęta (żywe lub martwe; całe lub ich części).

Opis powyższy określa zakres stosowania modeli mechanistycznych.

Tworzenie modelu mechanistycznego wymaga rozważenia, jakie mechanizmy są istotne dla interesujących zależności pomiędzy wejściem, a wyjściem. Taki rodzaj modelowania zachęca do postępowania według tradycyjnego cyklu naukowego, polegającego na zbudowaniu modelu, przetestowaniu hipotezy, udoskonaleniu modelu, dalszym testowaniu hipotezy itd.

2.1.2. Modele biodynamiczne ilościowe (modele typu „wejście-wyjście”)

Niektóre modele odwzorowują zależności występujące pomiędzy wejściem, a wyjściem układu, z pominięciem odwzorowywania rzeczywistych mechanizmów, które uzależniają wyjście od wejścia: są to modele ilościowe typu „wejście-wyjście” (niemechanistyczne). Obecnie ta kategoria obejmuje większość modeli biodynamicznych. Modele ilościowe podsumowują pomiary biodynamiczne.

Biodynamiczny model ilościowy powinien umożliwiać przewidywanie jednej lub więcej odpowiedzi ciała na działanie siły lub ruchu. Pomimo pozornej złożoności, te modele biodynamiczne przeważnie nie przedstawiają układów mechanicznych zdolnych do trwałego istnienia: w większości dają odpowiedź tylko jednokierunkową. Nadmierna prostota staje się oczywista, gdy tworzy się strukturę mechaniczną, która ma reprezentować odpowiedź modelu w postaci manekina antropodynamicznego. Podczas gdy takie manekiny opracowywano dla celów prowadzenia badań zderzeniowych, obecnie mało jest manekinów odwzorowujących odpowiedzi ciała ludzkiego na drgania i powtarzające się wstrząsy. Niektórzy doszli do wniosku, że układ o niewiele więcej niż jednym stopniu swobody może być wystarczającą reprezentacją impedancji ciała przy badaniach siedzisk. Dla takich celów wystarczy model ilościowy (niemechanistyczny), gdyż mechanizmy ruchu ciała nie są istotne, jeśli się dostatecznie odwzoruje impedancje w głównych punktach styku z siedziskiem [24]. W przypadku tego typu modeli pojedyncza para pomiarów zależności pomiędzy wejściem, a wyjściem umożliwia dopasowanie opracowywanego modelu (tzn. czegoś dogodnego dla kogoś, kto buduje ten model) do dostępnych danych, ale taki model nie daje możliwości prawidłowego przewidywania. Model może wskazać, co się stanie w przypadku wejść innych od tych, na podstawie których został on zbudowany (np. dla innych amplitud lub częstotliwości drgań), ale uzyskane prognozy nie będą oparte na rzeczywistych danych lub na znajomości odpowiednich mechanizmów. Przykładowo, zaproponowano wiele modeli liniowych bez udowodnienia, w jakim zakresie amplitud lub częstotliwości stosowanie modelu liniowego jest właściwe.

Formą modelu ilościowego może być [13]:

- a) Tablica wartości liczbowych pokazujących określoną odpowiedź na określone wejście. Przykładem są tablice zmierzonych wartości zdolności przekazywania drgań między wejściem a wyjściem.

- b) Równanie odwzorowujące wartości liczbowe określone w podpunkcie a). Przykładem jest równanie matematyczne o określonej formie i parametrach.
- c) Wyidealizowany układ mechaniczny o odpowiedzi lub odpowiedziach podobnych do wartości liczbowych z podpunktu a). Przykładem są modele liniowe lub nieliniowe o jednym lub wielu stopniach swobody, modele ciągle lub modele oparte na metodzie elementów skończonych.
- d) Manekin mechaniczny dający odpowiedzi podobne do wartości liczbowych z podpunktu a). Przykładem jest manekin antropodynamiczny używany do odwzorowania impedancji ciała przy badaniach siedzisk.

Z powyższego wynika, w jakim zakresie mogą być stosowane modele ilościowe.

Szerszy zestaw pomiarów, obejmujący jakiś zakres warunków, umożliwi budowę modeli posiadających większy znany zakres zastosowania. Duża zmienność danych (np. silne wpływy zmienności obiektu, pozycji ciała, nieliniowości, sprzężenia) może zasugerować potrzebę zastosowania modeli innych niż te, które zbudowano uwzględniając mniej danych. Modele mogą być bardziej wyszukane, jeśli będą umożliwiały obserwację efektów wszystkich głównych zmiennych, lub prostsze, jeśli się uzna, że większa złożoność nie prowadzi do uzyskania większej dokładności odpowiedzi dla obiektu wybranego losowo.

2.1.3. Modele efektowe

Modele oddziaływań ruchu na ciało mogą być ilościowe, a mogą też być po części mechanistyczne. Mają się one charakteryzować możliwością przewidywania oddziaływań i przydatnością do zapobiegania efektom niepożądanym. Dla niektórych specjalistów zajmujących się modelowaniem interesującym efektem jest możliwość powstawania obrażeń ciała wskutek drań lub wstrząsów. Jednakże ograniczone rozumienie mechanizmów związanych z powstawaniem takich obrażeń jest czynnikiem wstrzymującym tworzenie odpowiednich modeli mechanistycznych. Przeszkodą w opracowywaniu modeli ilościowych (niemechanistycznych) jest trudność pomiaru odpowiednich wejść, identyfikacji i pomiaru wyjść (np. obrażeń lub bólu) oraz niedostatek danych umożliwiających określenie związków pomiędzy wejściami, a wyjściami. W efekcie niektórzy badacze mają obecnie odczucie, że wykorzystywanie modeli biodynamicznych do przewidywania obrażeń przynosi mało korzyści (i pewne zagrożenia) w porównaniu ze stosowaniem mniej pretensjonalnych, a jednocześnie prostszych wytycznych opartych na znormalizowanych już miarach nasilenia drgań. Pomimo tych wątpliwości, rozwój modeli umożliwiających przewidywanie obrażeń jest szlachetnym celem stanowiącym wyzwanie multidyscyplinarne, wymagające rygorystycznego podejścia naukowego dla uniknięcia rozmaitych pułapek. Modele efektowe umożliwiają przewidywanie oddziaływania ruchu na zdrowie, poziom komfortu lub wydolność człowieka.

Formą modelu efektowego może być [13]:

- a) Wartości liczbowe pokazujące prawdopodobieństwo powstania określonego stopnia określonego obrażenia (lub schorzenia) dla określonego wejścia.

- b) Równanie odwzorowujące wartości określone w podpunkcie a). Przykładem są modele matematyczne używane przy próbach zderzeniowych.
- c) Wyidealizowany układ mechaniczny o dającej się obliczyć odpowiedzi podobnej do danych z podpunktu a). Przykładem są manekiny używane przy próbach zderzeniowych.

Z opisu tego wyniku, w jakim zakresie mogą być stosowane modele efektowe.

W przypadku modeli efektowych trzeba mieć dowody, że dany efekt jest spowodowany ruchem lub wstrząsem, znać rodzaj ruchu powodującego dany efekt (tzn. mieć środki do określenia tej przyczyny w sposób ilościowy), znać wywołwany efekt (tzn. mieć środki do określenia tego efektu w sposób ilościowy) oraz znać zależność między efektem, a jego przyczyną. Gdy dany efekt może też być powodowany lub modyfikowany przez inne czynniki, może wystąpić potrzeba, aby model uwzględniał również ich wpływ.

Jest mało prawdopodobne, aby model biodynamiczny umożliwił uzyskanie prawidłowej prognozy badanej odpowiedzi ciała ludzkiego (czyli efektu), jeśli nie zostałyby w tym modelu uwzględnione oddziaływanie odpowiednich części anatomicznych i innych czynników mających wpływ na tę odpowiedź. Przykładowo, uważa się, że siły działające w kręgosłupie w dużym stopniu zależą od pozycji ciała, a więc nie wydaje się prawdopodobne, aby model umożliwił dobre prognozowanie obrażeń, gdyby pominięto w nim wpływ tej pozycji. Podobnie, jeśli przedmiotem głównego zainteresowania jest uszkodzenie określonej tkanki, najprawdopodobniej w modelu należałoby uwzględnić niektóre cechy tych tkanek.

Reasumując można stwierdzić, że modele ilościowe typu „wejście-wyjście” i modele efektowe będą się zbliżać do modeli mechanistycznych. Jednak na początek modele mechanistyczne torują drogę rozwojowi wiedzy, a od tego zależy konstruowanie modeli pozostałych.

2.1.4. Modele szczególne

Do odwzorowania ludzi można wykorzystywać zwierzęta, zwłoki oraz układy mechaniczne (omówione wyżej modele mechanistyczne, ilościowe lub efektowe). Osobną grupę stanowią modele szczególne [6], których przykłady omówiono poniżej.

Modele szczególne. Modele zwierzęce

Aby korzystać z modelu zwierzęcego (żywego lub martwego), trzeba znać stopień wszelkich różnic, jakie mogą występować pomiędzy takim modelem, a żywymi ludźmi.

Przy niektórych rodzajach prac badawczych może się dać eksperymentalnie stwierdzić, że wyniki uzyskiwane dla ludzi (lub tkanek ludzkich) i dla zwierząt (lub tkanek zwierzęcych) są do siebie podobne lub, że różnice między nimi są przewidywalne. Można wtedy z odpowiedzi uzyskiwanych dla zwierząt wyciągać użyteczne wnioski pozwalające na oszacowanie odpowiedzi ciał ludzkich. Pomijając zagadnienia moralne związane z wykorzystywaniem zwierząt, można stwierdzić, że zbieranie informacji o odpowiedziach organizmów zwierzęcych

i zrozumienie tych odpowiedzi stanowi pożądaną pracę naukową bez względu na możliwość zastosowania uzyskanych danych. Tak więc modele zwierzęce mogą być mechanistycznymi, ilościowymi lub efektowymi modelami odpowiedzi ciała człowieka.

Modele szczególne. Manekiny antropodynamiczne

Manekiny antropodynamiczne mogą być modelami mechanistycznymi, ale dla manekina mechanicznego odwzorowującego niektóre aspekty odpowiedzi ciała ludzkiego koniecznymi informacjami są przede wszystkim odpowiednie zależności pomiędzy wejściem, a wyjściem dla takiego modelu. Zwykle nie ma potrzeby, aby manekin antropodynamiczny poruszał się wewnątrznie według takich samych mechanizmów jak ciało ludzkie. Obecnie manekiny antropodynamiczne są głównie wykorzystywane przy próbach zderzeniowych [25], także do badania siedzisk. Obydwa rodzaje tych manekinów powinny dawać się skalować z określoną dokładnością i umożliwiać pomiar takich parametrów, dla których stopień powtarzalności wyników pomiaru byłby znany. Powinny odwzorowywać główne interesujące odpowiedzi ciała dla całego zakresu zastosowań, do których mają być wykorzystywane. Manekin mający wskazywać zagrożenia wynikające z określonych ruchów powinien wytwarzać (bezpośrednio lub pośrednio na podstawie swojego ruchu) jeden lub więcej sygnałów, co do których można zasadnie zakładać, że odzwierciedlają zagrożenie. W granicach określonych przez aktualny stan zrozumienia, należy się spodziewać, że zmiany konstrukcyjne wywołujące zmiany sygnałów wytwarzanych przez manekin spowodują też zmiany w ocenie ryzyka obrażeń. Wymaga to znajomości parametrów powodujących obrażenia.

Manekiny do badania siedzisk powinny imitować wzajemne oddziaływanie dynamiczne pomiędzy siedziskami, a ciałem człowieka w taki sposób, żeby ruch zmierzony na siedzisku ze znajdującym się na nim człowiekiem był podobny do ruchu zmierzonego dla manekina lub żeby dał się z niego wyliczyć [25]. Do tego może być konieczne, aby manekin miał impedancję podobną do impedancji ciała ludzkiego oraz aby wykazywał właściwą nieliniowość i odpowiednie sprzężenie z elementami siedziska, z którymi się styka. Z tego wynika założenie, że mechaniczna impedancja ciała człowieka, nieliniowość ciała i sprzężenie pomiędzy ciałem, a siedziskiem są już znane.

Model biodynamiczny (biomechaniczny) w najlepszym przypadku jest odwzorowaniem tylko kilku aspektów ciała ludzkiego, a powinien odzwierciedlać (chcemy, dążymy do tego, żeby odzwierciedlał) funkcje biologiczne. Nie można mówić o modelu, jako o „modelu uznanym za poprawny” bez podania, jak ten model można wykorzystywać. Konieczne jest zidentyfikowanie, co dany model odwzorowuje i jak dane prognozowane przy jego użyciu mają się do obserwowanych odpowiedzi człowieka.

Możliwe są różne modele biodynamiczne, z różnymi uzasadnieniami, różnymi zastosowaniami i różnymi wymaganiami, których spełnienie jest konieczne do „uznania modelu za poprawny”. Wiele obecnych modeli to modele ilościowe (typu „wejście-wyjście”), oferujące nie więcej informacji niż dane, na których zostały oparte: mogą nawet zawierać mniej informacji niż dane początkowe i mogą dawać mylące odwzorowanie mechanizmów, których dotyczą.

3. Podsumowanie

W pracy omówiono zagadnienia związane z modelowaniem biomechanicznym. Zaprezentowano przegląd różnych metod modelowania biomechanicznego wykorzystywanych w środkach transportu.

Model biomechaniczny może odwzorowywać tylko kilka aspektów ciała ludzkiego. Badanie poprawności modelu powinno obejmować porównania pomiędzy danymi prognozowanymi przy użyciu tego modelu, a niezależnymi obserwacjami prognozowanych odpowiedzi. Dla „modeli ilościowych” podawany błąd powinien być porównany z pomiarami wykonanymi w całym zakresie stosowania modelu.

Nie byłoby właściwym zaakceptowanie „modelu efektowego”, jeśli nie byłoby wiadomo, że drgania lub wstrząsy stanowią udowodniony czynnik powodujący określony efekt, w całym zakresie zastosowania modelu występuje korelacja i dopuszczalnie mały błąd pomiędzy danymi prognozowanymi przez model, a obserwowanym efektem oraz zostały uwzględnione inne zmienne mający duży wpływ na dany efekt. Przedstawiono wykazy zagadnień kontrolnych dla oceny jakości „modeli mechanistycznych”, „modeli ilościowych” i „modeli efektowych”. Metody naukowe nie akceptują osądów na temat wartości (np. stwierdzeń, że coś zostało lub nie zostało „uznane za poprawne”). Stwierdzenie, że dany model (lub metoda) jest modelem (lub metodą) o uznanej poprawności może być nierozważne. Lepiej jest podać ograniczenia możliwości zastosowania oraz określić błędy modelu ilościowego (lub metody ilościowej) niż twierdzić, że dany model lub metoda są „uznane za poprawne”.

Należy podkreślić, że ze względu na znaczenie praktyczne układy biomechaniczne, w stosunku do mechanicznych, charakteryzują się szczególnymi cechami:

- 1) Występuje konieczność modelowania złożonych, czy bardzo złożonych struktur, przez co niezbędne są uproszczenia idące dalej, niż ma to miejsce w układach mechanicznych. Skutkuje to zwiększeniem niepewności otrzymanych wyników.
- 2) Występuje bardzo duży rozrzut danych, takich jak: wielkości geometryczne, masowe, czy właściwości materiałowe.

Mimo to modele biodynamiczne można wykorzystywać do przewidywania ryzyka obrażeń lub schorzeń. Można ich też używać do optymalizacji konstrukcji w celu ograniczenia do minimum przewidywanych zagrożeń (np. szkodliwe oddziaływanie drgań). Jednakże takie modele nie mogą być też upowszechniane i stosowane bez znajomości ich dokładności lub przydatności w konkretnych przypadkach.

Potwierdzeniem poprawności opisanych w pracy modeli może być odpowiedź na następujące pytania:

- a) Model mechanistyczny – czy jasno zdefiniowano dany mechanizm?
- b) Model ilościowy – czy należycie zdefiniowano zależność pomiędzy wejściem a wyjściem?

- c) Model efektowy – czy jasno zdefiniowano rodzaj prognozowanego efektu? Czy zdefiniowano nasilenie tego efektu? Czy zdefiniowano prawdopodobieństwo tego efektu?

Jako kierunki dalszych prac można wskazać na modyfikację, rozwój modeli, które powinny uwzględniać:

- sztywności i tłumienia elementów ciała;
- krzywizny elementów układu kostnego, szczególnie kręgosłupa;
- nieliniowości elementów ciała;
- absorpcję energii (mocy) przez elementy ciała.

Należy oczekiwać, że stały rozwój informatyki, teorii sterowania oraz cybernetyki umożliwi realizację w/w zagadnień w stopniu zapewniającym odwzorowanie aspektów związanych z funkcjonowaniem ciała człowieka – „wyjście” z klasycznego układu mechanicznego masa-sprężyna-tłumik. Wymaga to interdyscyplinarnych działań.

Na koniec rozważań o modelowaniu biomechanicznym warto podkreślić, że modele biodynamiczne są potrzebne do wszelkich metodycznych analiz związków człowiek-pojazd, np. związku między ekspozycją drgań, a komfortem. Jednak zakres ich zastosowań powinien być ograniczony do zakresu, dla którego są zweryfikowane. Z kolei numeryczne modele komputerowe manekinów będą pomocne do wsparcia rozwoju systemów redukcji wpływu drgań w systemie człowiek-pojazd [27], [28].

Literatura

- [1] WIERZBICKI, A.: *Modele i wrażliwość układów sterowania*. Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, Warszawa 1977.
- [2] *Leksykon naukowo-techniczny*. Wydawnictwo Naukowo Techniczne, Warszawa 1989. Wydanie czwarte poprawione.
- [3] OSIECKI, J.: *Elementy modelowania w dynamice maszyn*. Dynamika maszyn, PAN, Ossolineum 1974.
- [4] NADER, M.: *Modelowanie i symulacja oddziaływania drgań pojazdów na organizm człowieka*. Prace Naukowe Transport, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2001.
- [5] VALERO B., AMIROUCHE ., MAYTON F.: *Pneumatic active suspension design for heavy vehicle seats and operator ride comfort*. Proceedings of the First American Conference on Human Vibration, June 5-7, 2006, Morgantown, West Virginia, U.S.A., ss. 38-39.
- [6] BOILEAU, P. E., RAKHEJA, S.: *Whole-body vertical biodynamic response characteristics of the seated vehicle driver Measurement and model development*. International Journal of Industrial Ergonomics 22 (1998), ss. 449-472.
- [7] CHOROMAŃSKI, W., GAĞOROWSKI, A.: *New concepts in the desingn of intelligent mechatronic vechicles seats*. 21st International Symposium on Dynamics Vehicles on Roads and Track, Stockholm 2009, paper 161.
- [8] QASSEM, W.: *Model prediction of vibration effects on human subject seated on various cushions*. Medicine Engineering & Physics Vol. 18, July 1996, ss. 350-358.
- [9] QASSEN, W., OTHMAN, M. O.: *Vibration effects on setting pregnant women-subject of various masses*. Journal of Biomechanics 29 (4), ss. 493-501, 1996.
- [10] CHO-CHUNG LIANG, CHI-FENG CHIANG, TROUNG-GIANG NGUYEN.: *Biodynamic responses of seated pregnant subjects exposed to vertical vibrations driving conditions*. Vehicle System Dynamics Vol 45, No 11, 2007, ss. 1017-1049.
- [11] LIANG CH. CH., CHIANG CHI. F.: *A study on biodynamic models of seated human subjects exposed to vertical vibration*. International Journal of Industrial Ergonomics 36 (2006), ss. 869-89.

- [12] DIETRICH M., KĘDZIOR K., ZAGRAJEK T.: *Nieliniowa analiza deformacji układu kręgosłupa z uwzględnieniem stateczności*. Tom 5 - Biocybernetyka i inżynieria biomedyczna, red. Nałęcz M., 2000, Akademicka Oficyna Wydawnicza EXIT, Warszawa 2004.
- [13] GRIFFIN M. J.: *The validation of biodynamic models*. Clinical Biomechanics 16 Supplement No. 1, 2001, ss. 81-S86.
- [14] MORECKI A., KNAPCZYK J., KĘDZIOR K.: *Teoria mechanizmów i manipulatorów. Podstawy i przykłady zastosowań w praktyce*. Wydawnictwo Naukowo Techniczne, Warszawa 2002.
- [15] Polska Norma PN-ISO 5805 grudzień 2002. *Drgania i wstrząsy mechaniczne. Ekspozycja człowieka. Terminologia*.
- [16] NIZIOŁ J.: *Drgania w przyrodzie, technice i medycynie*. Akademia Górniczo-Hutnicza, Kraków 2006.
- [17] DOBRY M. W., *Cykl wykładów w zakresie: Biomechanika pracy i biomechanika ergonomiczna*. Politechnika Poznańska, <http://maly.ghost.pl/mw.pdf>.
- [18] MATSUMOTO Y., GRIFFIN M. J.: *Modelling the dynamic mechanisms associated with the principal resonance of the seated human body*. Clinical Biomechanics 16 Supplement No. 1., 2001 S31-S44.
- [19] BERGER E., GILMORE B. J.: *Seat Dynamic Parameters for Ride Quality*. SAE 930115, ss. 204-217, 1993.
- [20] KIM T-H., KIM Y-T., YOON Y-S.: *Development of a biomechanical model of the human body in a sitting posture with vibration transmissibility in the vertical direction*. International Journal of Industrial Ergonomics 35, 2005, ss. 817-829.
- [21] KOPALIŃSKI W.: *Słowniki wyrazów obcych i zwrotów obcojęzycznych*. Wiedza Powszechna, Wydanie 12, Warszawa 1983.
- [22] NAGAI M. i inni.: *Coupled vibration of passenger and lightweight car-body in consideration of human-body biomechanics*, Vehicle System Dynamics Vol 44, Supplement, 2006, ss. 601-611.
- [23] RAKHEJA S., AFEWORK Y., SANKAR S.: *An analytical and experimental investigation of the driver-seat-suspension system*. Vehicle System Dynamics Vol 23, 1994, ss. 501-524.
- [24] WEI L., GRIFFIN M. J.: *The prediction of seat transmissibility from measures of seat impedance*. Journal of Sound and Vibration 214 (1), 1998, ss. 121-137.
- [25] JAŚKIEWICZ M., STAŃCZYK T.L.: *The identification of damping and stiffness parameters of a driver model on the basis of crash tests*, Journal of KONES Powertrain and Transport Vol. 16, No. 1, ss. 229-238, 2009.
- [26] GIACOMINI J. A.: *Apparent mass of small children: Modelling*. International Journal of Industrial Ergonomics 37 (2007), ss. 183-195.
- [27] KAPOOR T., ALTENHOF W.: *A Comparison of the Head Injury Parameters on a TNO P3 and a Three-year-old Hybrid III Child Dummies From Numerical Simulations*. SAE Transactions 2005-01-1303, 2005, ss. 1529-1542.
- [28] WÖLFEL H. P.: *Numerical models and hardware dummies for simulating whole body vibration of human - an overview*. Proceedings of the First American Conference on Human Vibration, June 5-7, 2006, Morgantown, West Virginia, U.S.A., ss. 44-45.