

Adam MARTOWICZ¹
Piotr KUROWSKI²
Tadeusz UHL³
Grzegorz LASKO⁴

**ANALIZA MOŻLIWOŚCI POPRAWY KOMFORTU PODRÓŻOWANIA
Z ZASTOSOWANIEM SYMULACJI MODELU
WIELOBRYŁOWEGO TRAMWAJU**

W ramach podjętych prac przeprowadzono szereg symulacyjnych analiz własności dynamicznych modelu wielobryłowego pięcioczęłowego tramwaju. Jako cel przyjęto redukcję wartości wskaźnika zdefiniowanego do oceny komfortu podróżowania. Sparametryzowany model umożliwił zmianę wybranych charakterystyk układu zawieszenia traktowanych jako zmienne decyzyjne zadania poprawy własności modelu. Wartości przyspieszeń drgań zarejestrowane podczas przejazdów z zadanymi prędkościami posłużyły do wyznaczenia wartości współczynnika komfortu. W pracy przedstawiono wyniki analizy wrażliwości wskaźnika komfortu oraz wyznaczone konfiguracje parametrów układu zawieszenia, dla których zaobserwowano redukcję przyspieszeń drgań.

**ANALYSIS OF IMPROVEMENT POSSIBILITIES OF TRAVELING COMFORT
WITH THE APPLICATION OF SIMULATIONS OF TRAMWAY
MULTIBODY MODEL**

Within the scope of the work there have been performed a number of numerical analyses of dynamic properties of the multibody model of five-piece tramway. Reduction of value of index defined to assess the comfort of traveling has been assumed as the object of work. Parameterized model has allowed for the change of selected characteristics of the suspension system which are treated as decision variables for the task of improvement of the model properties. Values of vibration accelerations measured while vehicle run at assumed velocities have been used to calculate value of comfort index. In present work the results of sensitivity analysis for comfort index as well as found characteristics of suspension system for improved model are presented.

¹Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica, Katedra Robotyki i Mechatroniki;
30-059 Kraków, al. Mickiewicza 30, tel.: +48 12 617-36-40, fax.: +48 12 634-35-05
e-mail: adam.martowicz@agh.edu.pl

²Akademia Górniczo-Hutnicza, Katedra Robotyki i Mechatroniki; e-mail: kurowski@agh.edu.pl

³Akademia Górniczo-Hutnicza, Katedra Robotyki i Mechatroniki; e-mail: tuhl@agh.edu.pl

⁴Akademia Górniczo-Hutnicza, Katedra Robotyki i Mechatroniki; e-mail: grzegorz.lasko@gmail.com

1. WSTĘP

Proces projektowania pojazdu szynowego obejmuje szereg różnego rodzaju analiz własności statycznych oraz dynamicznych [1,6,12]. Podstawowe kryteria decydujące o dopuszczeniu pojazdu do eksploatacji dotyczą przede wszystkim bezpieczeństwa. Badaniom poddawane są odkształcenia statyczne, wytrzymałość zmęczeniowa oraz stabilność przejazdu. Ponadto, ze względu na konieczność redukcji zapotrzebowania na energię w układach napędowych, przeprowadzana jest analiza możliwości zmniejszenia masy pojazdu. Poza ściśle technicznymi zagadnieniami, których szczegółowa analiza gwarantuje szybki i bezpieczny transport pasażerów, dodatkowym kryterium optymalizacji konstrukcji może być również poprawa komfortu podróżowania.

Artykuł dotyczy zagadnienia poprawy komfortu podróżowania. W oparciu o uzyskane wyniki analiz własności dynamicznych zaproponowano możliwą zmianę parametrów układu zawieszenia modelu wielobryłowego pięciocłonowego tramwaju mającą na celu redukcję przyspieszeń drgań rejestrowanych w przestrzeni pasażerskiej. Zdefiniowano współczynnik jakości podróżowania umożliwiający ilościową ocenę występujących przyspieszeń drgań [14]. Następnie w oparciu o opracowany metamodel dokonano przeszukania przestrzeni parametrów wejściowych w celu określenia konfiguracji modelu cechujących się zredukowaną wartością przyjętego współczynnika jakości podróżowania.

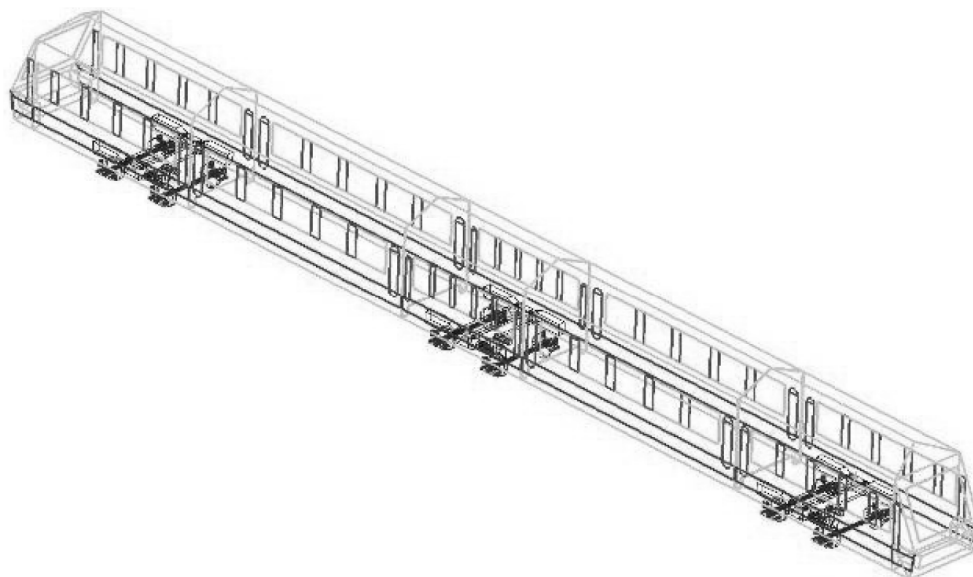
W zadaniu poszukiwania modelu charakteryzującego się wyższym komfortem podróżowania zastosowano metodę powierzchni odpowiedzi [2,5,11]. Symulacje przejazdów modelu tramwaju są czasochłonne, a dodatkowo podczas realizacji zadania optymalizacji niezbędne jest przeprowadzenie dużej liczby tego typu analiz. Aproksymacyjne techniki dostępne w ramach metody powierzchni odpowiedzi umożliwiają znaczne przyspieszenie obliczeń. Opracowane metamodele definiują zależności pomiędzy parametrami projektowymi a analizowanymi własnościami dynamicznymi i pozwala na znaczną redukcję liczby koniecznych symulacji z zastosowaniem modeli wielobryłowych. Dodatkowo wyniki uzyskane podczas wyznaczania metamodeli umożliwiają określenie wrażliwości badanych własności na zmienność wybranych parametrów projektowych, dzięki czemu możliwe jest określenie listy parametrów istotnych z punktów widzenia poszukiwania optymalnej konfiguracji modelu oraz zbioru tych, które mogą być pominięte bez straty dla jakości prowadzonych przeszukiwań przestrzeni zmiennych decyzyjnych.

W zadaniu poszukiwania optymalnego rozwiązania projektowego zastosowano algorytmy genetyczne. Wybór narzędzia do zadania optymalizacji umotywowany został szerokim wachlarzem dotychczasowych aplikacji algorytmów genetycznych w szeroko rozumianej mechanice komputerowej [3,4,7,8,9,10]. Jedną z zalet ich aplikacji jest brak konieczności znajomości gradientów oraz możliwość pracy z funkcjami niemonotonicznymi. Jako wadę podaje się z kolei konieczność przeprowadzenia wielu realizacji funkcji celu, w przypadku algorytmów genetycznych określanej również jako funkcja dostosowania, jako skutek koniecznej znacznej liczby osobników oraz generacji, w celu uzyskania wymaganej zbieżności rozwiązania. Jednakże w przypadku kiedy do wyznaczenia wartości funkcji dostosowania zastosowane są metamodele przytaczana powyżej niedogodność przestaje mieć znaczenie. Uzyskana konfiguracja modelu tramwaju charakteryzuje się lepszym komfortem podróżowania w porównaniu z modelem nominalnym. Zaproponowane rozwiązanie zostało zweryfikowane za pomocą analizy numerycznej przeprowadzonej dla modelu wielobryłowego.

W dalszej części pracy przedstawiono: opis modelu wielobryłowego tramwaju, opis przeprowadzonych analiz własności dynamicznych, definicję współczynnika komfortu (rozdział 2), analizę wrażliwości przeprowadzoną na podstawie wyników aplikacji metody powierzchni odpowiedzi (rozdział 3), procedurę poszukiwania konfiguracji modelu charakteryzującej się poprawionym komfortem podróży (rozdział 4) oraz podsumowanie (rozdział 5).

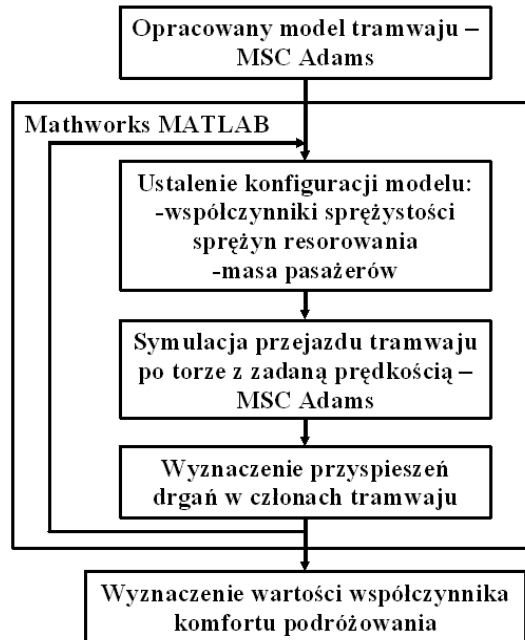
2. SYMULACJE WŁASNOŚCI DYNAMICZNYCH MODELU WIELOBRYŁOWEGO TRAMWAJU

Badany model wielobryłowy pięcioczłonowy, trójwózkowy tramwaju przedstawiono na rys. 1. Model opracowano w oprogramowaniu MSC Adams. Jako sztywne elementy strukturalne zamodelowano ramy wózków, osie, koła, maźnice oraz ramy poszczególnych członów. Układ zawieszenia obejmuje odbojniki, tłumiki oraz sprężyny dla pierwszego i drugiego stopnia resorowania.



Rys.1. Model wielobryłowy tramwaju

Model jest sparametryzowany i umożliwia przeprowadzenie numerycznych symulacji przejazdu po torze dla różnych wartości współczynników sprężystości sprężyn resorowania oraz różnych mas pasażerów. Jako wielkości szukane zdefiniowane są wartości przyspieszeń drgań mierzone w poszczególnych członach tramwaju. Na rys. 2 przedstawiono ogólny schemat analiz własności dynamicznych opracowanego modelu.



Rys.2. Ogólny schemat numerycznych analiz własności sparametryzowanego modelu tramwaju

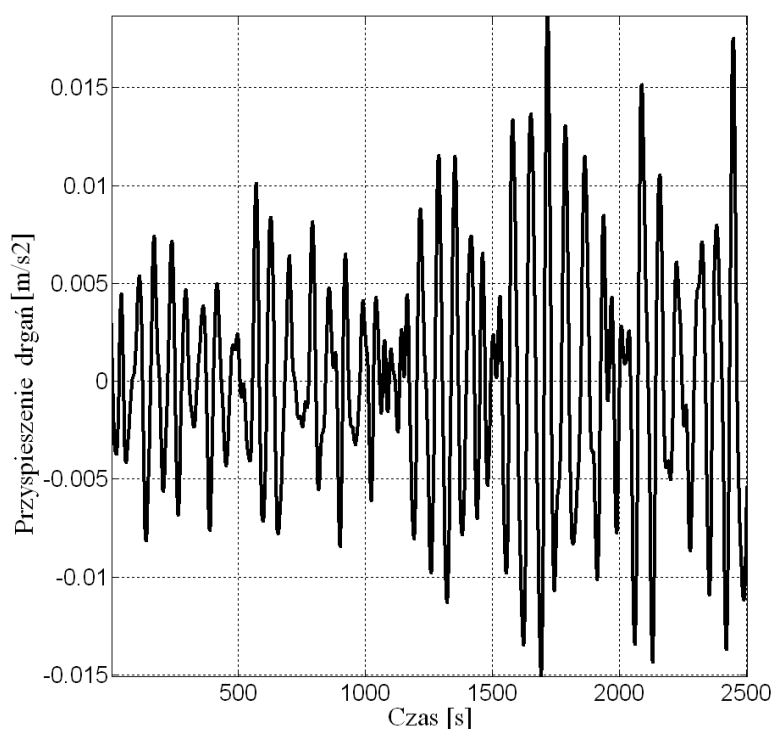
Masa modelu wynosi 29,3t przy czym dodatkowo uwzględniona jest masa 19,5t wprowadzana obecnością pasażerów. Założono, że powiększająca się liczba pasażerów skutkuje proporcjonalnym wzrostem ich całkowitych mas uwzględnianych w poszczególnych członach tramwaju.

Warunki brzegowe modelu uwzględniają nierówność toru. Nierówność pionową S_{ZZ} , nierówność poziomą S_{YY} oraz przechyłkę $S_{\phi\phi}$ zdefiniowano zgodnie z [13] dla następujących parametrów: $\Omega_c = 0,8246 \text{ rad/m}$, $\Omega_r = 0,0206 \text{ rad/m}$, $\Omega_s = 0,4380 \text{ rad/m}$, $b = 0,75 \text{ m}$, $A_V = 1,08 \cdot 10^{-6} \text{ m} \cdot \text{rad}$ oraz $A_A = 6,125 \cdot 10^{-7} \text{ m} \cdot \text{rad}$. Długości fal zawierają się w przedziale do 2m to 100m.

Analiza numeryczna modelu wielobryłowego tramwaju polegała na wielokrotnej symulacji przejazdu z prędkością 10m/s przez zadany czas. Uwzględniona w modelu nierówność powodowała powstawanie drgań w układzie zawieszenia, które następnie propagowały w całej konstrukcji. Drgania pojawiające się w przestrzeni pasażerskiej wpływają na komfort podróżowania. Fakt ten ma szczególne znaczenie dla pasma niskich częstotliwości, tj. rzędu 1Hz. Dla każdego przejazdu oraz dla każdego członu tramwaju wyznaczone przyspieszenia drgań dla wszystkich trzech kierunków kartezjańskiego układu współrzędnych posłużyły do wyliczenia współczynnika komfortu podróżowania.

Dla każdej konfiguracji modelu dokonywano wyznaczenia współczynnika komfortu podróżowania zgodnie ze szczegółową procedurą definiującą następujące kroki [14]:

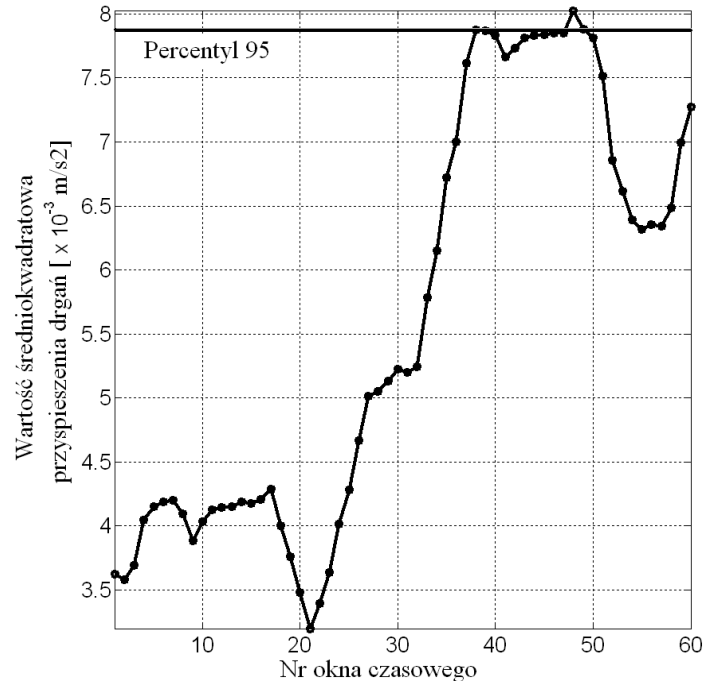
- symulacja przejazdu po torach z zadana prędkością przez określony czas w celu uzyskania przebiegów czasowych przyspieszenia drgań dla wszystkich kierunków i dla wszystkich członów tramwaju; Z zarejestrowanych przebiegów czasowych usuwano ich początkowe części odpowiadające pierwszym pięciu sekundom ruchu tramwaju. Dzięki temu w analizach nie były uwzględnione przebiegi przyspieszeń drgań zarejestrowane dla procesu statycznego ugięcia zachodzącego w pierwszej fazie symulacji jako skutek obecności siły oddziaływania grawitacyjnego. Rys. 3 przedstawia przykładowy zarejestrowany przebieg przyspieszenia drgań dla wybranego członu oraz kierunku.



Rys.3. Przykładowy zarejestrowany przebieg przyspieszenia drgań

- wyznaczenie wartości średniokwadratowych wszystkich zarejestrowanych przyspieszeń dla zadanej liczby okien czasowych
- wyznaczenie percentyla 95 dla wszystkich wartości średniokwadratowych: a_{XP95} ,

a_{YP95} , a_{ZP95} ; Rys. 4 przedstawia przykładowy przebieg zmienności wartości średniokwadratowej przyspieszenia drgań oraz lokalizację percentyla 95 dla wybranego członu i kierunku.



Rys.4. Przykładowy przebieg zmienności wartości średniokwadratowej przyspieszenia drgań

- wyznaczenie współczynnika komfortu podróżowania dla poszczególnych członów tramwaju według wzoru:

$$N_{MV} = 6 \sqrt{(a_{XP95})^2 + (a_{VP95})^2 + (a_{ZP95})^2} \quad (1)$$

- wyznaczenie wartości wypadkowego współczynnika komfortu podróżowania dla całego modelu, definiowanego jako wartość średniokwadratowa współczynników N_{MVi} wyznaczonych dla poszczególnych członów:

$$N = \sqrt{\frac{1}{5} \sum_{i=1}^5 N_{MVi}^2} \quad (2)$$

Redukcja wartości współczynnika N stanowi cel w zadaniu poszukiwania konfiguracji modelu tramwaju charakteryzującej się poprawionym komfortem podróżowania.

Dla każdego przejazdu wartości średniokwadratowe przyspieszeń drgań wyznaczano niezależnie dla 60 okien czasowych natomiast wyznaczoną na tej podstawie wartość percentyla 95 traktowano jako wartość reprezentującą wypadkową wartość amplitudy przyspieszenia mierzonego dla danego członu wagonu i dla danego kierunku. Na podstawie tych amplitud w dalszej kolejności wyznaczano wypadkowe wskaźniki komfortu dla poszczególnych członów N_{MVi} a następnie dla całego tramwaju N .

3. ANALIZA WRAŻLIWOŚCI

Parametrami wejściowymi analizy wrażliwości są mnożniki współczynników sprężystości sprężyn pierwszego i drugiego stopnia zawieszenia – współczynniki p , d , oraz współczynnik stopnia zapełnienia tramwaju pasażerami m , wyrażający stosunek masy aktualnie uwzględnionych pasażerów do masy pasażerów w sytuacji całkowitego zapełnienia przestrzeni pasażerskiej. Jako parametr wyjściowy analizy przyjęto współczynnik komfortu N . Do określenia wpływów parametrów wejściowych zastosowano wartości współczynników regresorów metamodelu wyznaczonego w aplikacji metody powierzchni odpowiedzi. Dopuszczalne zakresy zmienności poszczególnych parametrów przedstawiono w tab. 1. Przyjęty plan eksperymentu numerycznego zakładał zastosowanie siatki jednorodnie rozłożonych punktów dla poszczególnych osi przestrzeni parametrów wejściowych. Złożono rozmieszczenie 405 punktów w odległości 0,125 dla wszystkich 3 parametrów wejściowych ($n=3$) tworząc tym samym odpowiednio 5, 9 oraz 9 lokalizacji dla współrzędnych reprezentujących zmienności parametrów p , d oraz m . Zastosowany plan eksperymentu umożliwił wyznaczenie współczynników 125 regresorów do czwartego stopnia włącznie ($r=4$) zgodnie z opisem przedstawionym w tab. 2.

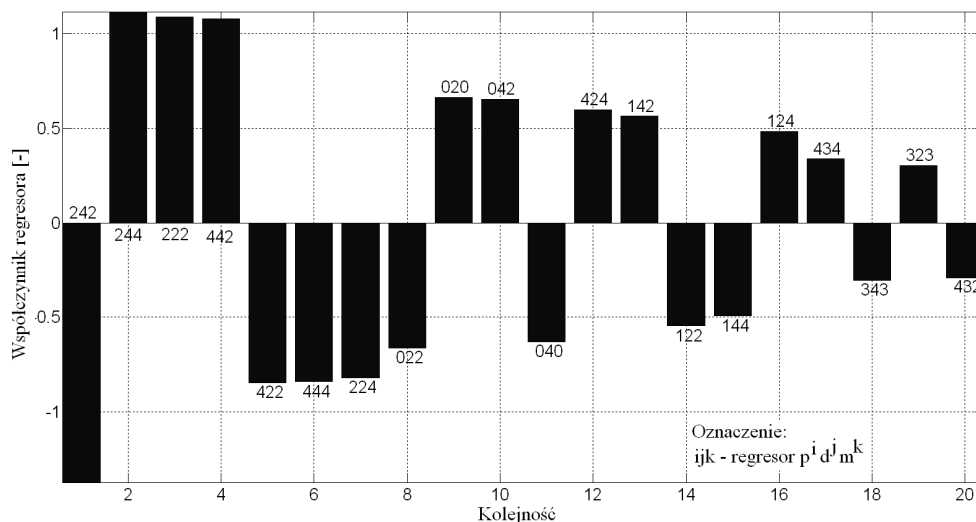
Tab. 1. Parametry wejściowe analizy wrażliwości

Parametr	Oznaczenie	Zakres zmienności [-]
Mnożnik współczynnika sprężystości sprężyn pierwszego stopnia zawieszenia	p	1-1,5
Mnożnik współczynnika sprężystości sprężyn drugiego stopnia zawieszenia	d	0,5-1,5
Współczynnik stopnia zapełnienia tramwaju pasażerami	m	0-1

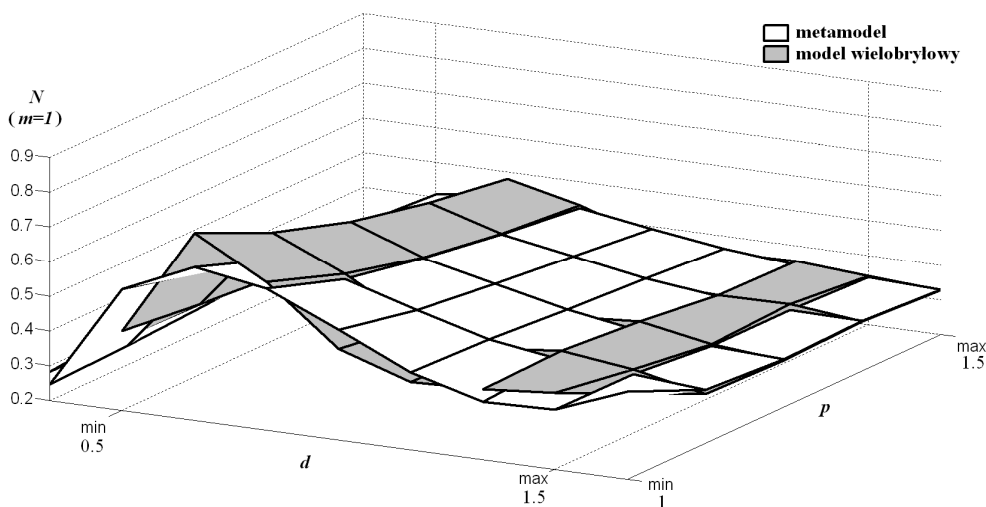
Tab. 2. Regresory zastosowanej aproksymującej funkcji wielomianowej

Typ regresora	Stała – wyraz wolny	Liniowy	Nieliniowy mieszany do stopnia r	Nieliniowy do stopnia r
Liczba regresorów	1	$n=3$	$(r+1)^n - 1 - n - nr = 109$	$nr = 12$

Do wyznaczenia współczynników regresorów zastosowano metodę najmniejszych kwadratów. Wartości współczynników determinacji R^2 oraz R_{adj}^2 określających jakość wyznaczonego metamodelu wynoszą odpowiednio 0,847 and 0,846 [11]. Wartości współczynników regresorów najistotniejszych z punktu widzenia zmienności wartości współczynnika komfortu N przedstawiono na rys. 5. W celu porównania wyników wartości współczynników regresorów zostały wyznaczone dla znormalizowanych zakresów zmienności, tj. $\langle -1,1 \rangle$, wszystkich parametrów wejściowych. Rys. 6 przedstawia porównanie wartości współczynnika N uzyskanych dla symulacji z zastosowaniem modelu wielobryłowego oraz metamodelu dla maksymalnej liczby pasażerów, tj. dla $m=1$ (w tym przypadku zachowano definicję zakresów zmienności przedstawioną w tab. 1).



Rys.5. Współczynniki najistotniejszych regresorów



Rys.6. Porównanie wartości współczynnika komfortu

Ze względu na widoczny na rys. 6 silnie nieliniowy charakter zależności pomiędzy parametrami wejściowymi a współczynnikiem komfortu, wśród prezentowanych na rys. 5 pierwszych 20 regresorów brak jest regresorów liniowych. Najistotniejsze z punktu widzenia parametru wyjściowego są regresory nieliniowe mieszane, szczególnie reprezentowane wielomianami wyższych stopni. Wyjątek stanowi regresor kwadratowy d^2 sklasyfikowany na 9 miejscu pod względem istotności.

4. POPRAWA KOMFORTU PODRÓŻOWANIA

Zadanie poprawy komfortu podróżowania sprowadzone zostało do poszukiwania takiej konfiguracji mnożników współczynników sprężystości p , d , dla której występuje największa redukcja wartości współczynnika komfortu N wyznaczonego na podstawie opracowanego metamodelu. Dla każdej konfiguracji parametrów projektowych p , d wartość N definiowana jest z kolei jako największa znaleziona dla $m \in (0,1)$ gdzie współczynnik stopnia zapełnienia tramwaju pasażerami m traktowany jest jako parametr niepewny. Oznacza to uwzględnienie najgorszego przypadku, tj. największej wartości współczynnika N , dla każdej sprawdzanej konfiguracji modelu.

Do poszukiwania najlepszej konfiguracji modelu zastosowano algorytmy genetyczne. Aplikacja algorytmów genetycznych przewidywała przeprowadzenie maksymalnie 50 generacji dla 200 osobników. Współczynnik wymiany pokoleniowej wynosił 80%. Prawdopodobieństwa krzyżowania oraz mutacji wynosiły odpowiednio 0,7 oraz 0,4. Każdy osobnik składał się z 2 genów reprezentujących 2 parametry projektowe, tj. p oraz d . Wartość funkcji dostosowania, tj. wartość współczynnika N , obliczana była dla zadanej zakodowanej konfiguracji modelu p , d przy uwzględnieniu zmienności parametru niepewnego m czyli dla $m \in (0,1)$.

Znalezione najlepsze rozwiązanie konstrukcyjne z punktu widzenia komfortu podróżowania zakłada maksymalną dopuszczalną wartość współczynnika sprężystości pierwszego stopnia zawieszenia, tj. $p=1,5$, oraz minimalną wartość współczynnika sprężystości drugiego stopnia, tj. $d=0,5$. Znaleziona minimalna wartość współczynnika N wynosi 0,303. Wartość referencyjna określona na podstawie symulacji z zastosowaniem modelu wielobryłowego dla znalezionej konfiguracji wynosi odpowiednio 0,287. Dla wyznaczonej konfiguracji zarejestrowano 28,4% redukcję wartości współczynnika komfortu podróżowania w porównaniu z modelem nominalnym, dla którego $p=d=1$. Ze względu na stosunkowo dużą liczbę osobników w populacji, tj. 200, w odniesieniu do 2 zmiennych decyzyjnych do uzyskania końcowych wartości parametrów projektowych wystarczające było przeprowadzenie 10 generacji.

5. PODSUMOWANIE

W artykule przedstawiono wyniki zadania optymalizacji modelu wielobryłowego tramwaju w celu poprawy komfortu podróżowania z zastosowaniem zdefiniowanego współczynnika oceny ilościowej. Sparametryzowany model uwzględniał parametry projektowe definiujące własności układu zawieszenia oraz parametr niepewny określający stopień zapełnienia pasażerami. Wyniki symulacji przejazdu modelu posłużyły do opracowania metamodelu, który następnie zastosowano do analizy wrażliwości oraz minimalizacji wartości współczynnika komfortu. Wyznaczony metamodel charakteryzował się dużymi wartościami współczynników determinacji. Znalezione zależności pomiędzy parametrami wejściowymi analizy a współczynnikiem komfortu wykazały silnie nieliniowy charakter. Najlepsza konfiguracja charakteryzująca się 28,4% redukcją wartości współczynnika komfortu została znaleziona dzięki aplikacji algorytmów genetycznych.

6. PODZIĘKOWANIE

Praca zrealizowana w ramach projektu badawczego NN 509353934 „Opracowanie metody optymalizacji masy pojazdu szynowego z uwzględnieniem niepewności modelu”.

7. BIBLIOGRAFIA

- [1] Beretta S., Braghin F., Bucca G., Desimone H.: *Structural integrity analysis of a tramway: load spectra and material damage*, Wear, 258, 2005, 1255–1264.
- [2] Box G.E.P., Draper N.R.: *Empirical Model Building and Response Surfaces*, New York, John Wiley & Sons, Inc. 1986.
- [3] Deb K., Gulati S.: *Design of truss-structures for minimum weight using genetic algorithms*, Finite elements in Analysis and Design, 37 (5), 2001, 447-465.
- [4] Dias J.P., Correa R.M.: *Multiobjective optimization of multibody systems with genetic algorithms*, Proc. of III European Conference on Computational Mechanics, Lisbon, June 5-8, 2006.
- [5] Gallina A., Martowicz A., Uhl T.: *An application of response surface methodology in the field of dynamic analysis of mechanical structures considering uncertain parameters*, Proc. of ISMA2006 Conference on Noise and Vibration Engineering, Leuven, Belgium, September 18-20, 2006.
- [6] Martowicz A., Kurowski P., Uhl T., Lasko G.: *Robust design optimisation of the FE model of rail vehicle*, Paper 1654 in Proceedings of WCSMO-8: 8th World Congress on Structural and Multidisciplinary Optimization, Lisbon, Portugal, June 1-5, 2009.
- [7] Martowicz A., Pieczara J., Uhl T.: *Application of soft computing in uncertainty analysis carried out within structural dynamics*, Computer Assisted Mechanics and Engineering Sciences - CAMES, 14, 2007, 293-305.
- [8] Martowicz A., Pieczonka L., Uhl T.: *Assessment of dynamic behaviour of spot welds with uncertain parameters using genetic algorithms application*, Proc. of III ECCM - European Conference on Computational Mechanics, Lisbon, Portugal, June 5-9, 2006.
- [9] Martowicz A., Stanciu I., Uhl T.: *Uncertainty analysis for dynamic properties of MEMS resonator supported by fuzzy arithmetics*, The International Journal of Multiphysics, 3 (3), 2009, 201-219.
- [10] Martowicz A., Uhl T.: *Assessment of variation of natural frequencies of FE model based on the application of alpha-cut strategy and genetic algorithms*, Finite Element in Analysis and Design, doi:10.1016/j.finel.2010.07.012, 2010.
- [11] Myers R.H., Montgomery D.C.: *Response Surface Methodology process and product optimization using designed experiments*, New York, John Wiley & Sons, Inc., 1995.
- [12] Uhl T., Chudzikiewicz A.: *Analytical and experimental investigation of low floor tram dynamics*, International Journal on Vehicle System Dynamics, 25, 2002, 702-713.
- [13] norma ORE B176 RP1. vol. 1: *Preliminary studies and specifications*, vol. 2: *Specification for a bogie with improved curving characteristics*, vol. 3: *Specifications for a bogie with improved curving characteristics for body tilt*, Utrecht, Netherlands, 1989.
- [14] norma UIC 513 *Guidelines to evaluating passenger comfort in relation to vibration in railway vehicles*, International Union of Railways, 1st edition, 1994.