NUMERICAL STUDIES OF THE TRUCK SUSPENSION

Wiesław Krasoń

Military University of Technology
Department of Mechanics and Applied Computer Science
Gen. Sylwestra Kaliskiego 2, 00-908 Warsaw, Poland
tel.: +48 22 6839654
e-mail: wkrason@wme.wat.edu.pl

Abstract

Numerical analysis of the double spring of truck is subject of consideration. Such structure is composed of the six leafs. The spring leafs create two assemblies called: the master spring (four leafs) and the auxiliary spring composed of two plates. The spring has a bilinear stiffness characteristics. FEM models of the spring are discussed in the paper. Beam elements and GAP contact elements are used in 2D model of the multi-leaf spring. 3D FEM models of the same spring are built with the shell or solid elements. Different methods are used for the contact modelling between master and auxiliary spring assemblies. Nonlinear analysis of the spring model were performed. Vertical concentrated force were used as a load of the system. The computing results were compared with the experimental stiffness characteristics. Substitute stiffness of the spring system was determined on the base of numerical results as well. It was used in the numerical model of a complete truck to define a suspension characteristics. Chosen results of the dynamic simulation of the vehicle model moving in special conditions will be presented here.

Received characteristics within the framework of realized work can be especially useful to elaboration simple models supplementary suspensions used for the simulation movement of motor vehicles.

Keywords: *double spring of truck, 2D and 3D numerical model of the multi-leaf spring, nonlinear analysis FEM*

NUMERYCZNE BADANIA ZAWIESZENIA SAMOCHODU CIĘŻAROWEGO

Streszczenie

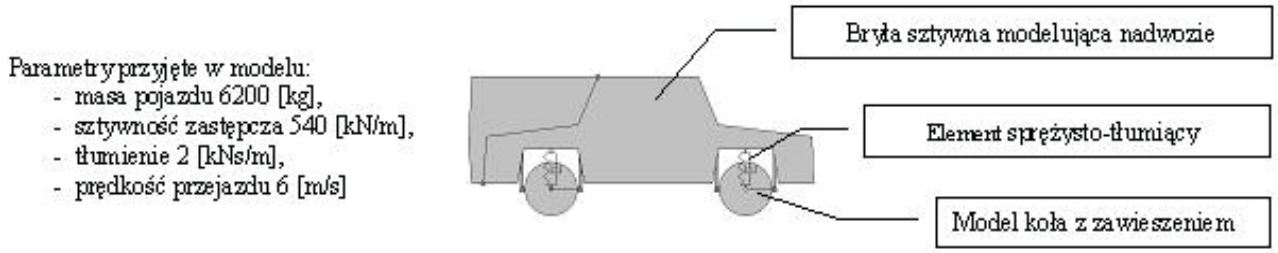
Przedmiotem rozważań jest podwójny resor samochodu ciężarowego. Konstrukcja taka składa się z sześciu piór. Połączone są one w dwa zespoły nazwane odpowiednio resorem głównym złożonym z czterech piór i resorem pomocniczym utworzonym przez dwa pozostałe pióra o innej krzywiźnie. Konstrukcja taka charakteryzuje się biliniową charakterystyką sprężystą. W pracy omawiana jest analiza numeryczna takiej konstrukcji zrealizowana metodą elementów skończonych. Zaproponowano model płaski wielopiórowego resoru podwójnego, w którym zastosowano elementy belkowe i dwuwęzłowe elementy kontaktowe typu GAP. Przedstawiono także alternatywne modele powłokowe i bryłowe takiego samego resoru. Omówiono różne podejścia w modelowaniu kontaktu pomiędzy piórami zespołu głównego i pomocniczego. Wykonano nieliniową analizę numeryczną w zaproponowanych modelach dyskretnych resoru. Wyznaczono charakterystyki sprężyste resoru. Przedstawiono wybrane zastosowanie zastępczej sztywności na przykładzie modelu zawieszania użytego w symulacjach dynamiki ruchu pojazdu kołowego po moście pływającym. Otrzymane charakterystyki w ramach zrealizowanej pracy mogą być szczególnie przydatne do opracowania prostych modeli zastępczych zawieszeń wykorzystywanych do symulacji ruchu pojazdów mechanicznych.

Słowa kluczowe: *resor podwójny samochodu ciężarowego, numeryczne modele 2D i 3D resoru wielopiórowego, analiza nieliniowa MES*

1. Wprowadzenie

Współczesne programy do symulacji numerycznych umożliwiają wykonanie uproszczonych

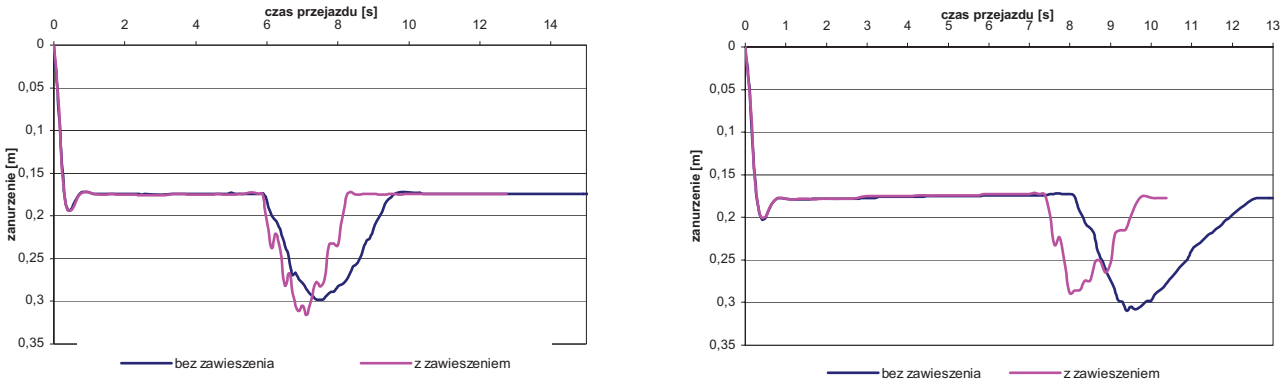
modeli komputerowych i analizy w zakresie dynamiki ruchomego pojazdu samochodowego bez wielkiego nakładu pracy. Budowa modelu pojazdu kołowego złożonego z brył sztywnych możliwa jest przy wykorzystaniu programu Working Model 2D [1] (modele płaskie) lub Visual Nastran 4D [2] (modele przestrzenne). Tak odwzorowane pojazdy mogą by zastosowane jako modele ruchomych obciążeń w badaniach numerycznych obiektów infrastruktury specjalnej (np. mostów pływających, towarzyszących itp.). Na rys. 1 przedstawiono przykładowy model płaski wojskowego pojazdu kołowego wykonany w celu analizy oddziaływań powstających w wyniku ruchu tego typu pojazdów po mostach pływających typu wstęga.



Rys. 1. Model samochodu 2D z zawieszeniem
Fig. 1. Truck model 2D with suspension

Na rys. 2 przedstawiono przykładowe wykresy zanurzeń takiego obiektu, odpowiednio w środkowej i skrajnej zjazdowej części wstęgi mostu, podczas symulacji przejazdu wojskowego pojazdu kołowego. W zastosowanych do obliczeń modelach numerycznych pojazdów zdefiniowano parametry odpowiadające charakterystykom rzeczywistych pojazdów wojskowych (rys. 1). Zbudowano dwa warianty modeli tego samego pojazdu kołowego. W jednym pominięto zawieszenie, mocując oś koła na sztywno do bryły nadwozia. W drugim modelu numerycznym pojazdu wprowadzono model zawieszenia. Wymienione modele posłużyły do wykonania analizy dynamiki obiektu pływającego złożonego z jednakowych modułów pływających, połączonych ze sobą przegubowo w płaszczyznach dennych, z uwzględnieniem luzów montażowych i zjawisk kontaktowych w postaci kolizji segmentów. Badano wstęgę o długości 48 [m] obciążoną ciężarem własnym i ciężarem poruszającego się z zadaną prędkością pojazdu kołowego. Uwzględnienie efektów pracy zawieszenia nawet w postaci proponowanego prostego modelu, jak na rys. 1, daje możliwość rozszerzenia zakresu wielowariantowych analiz studialnych prowadzonych na etapie prac projektowo-konstrukcyjnych takich złożonych obiektów inżynierskich.

a) b)



Rys. 2. Przykład wpływu modelu zawieszenia na zanurzenia mostu podczas ruchu pojazdu
Fig. 2. Model suspension influence on the bridge submersions during move of the vehicle

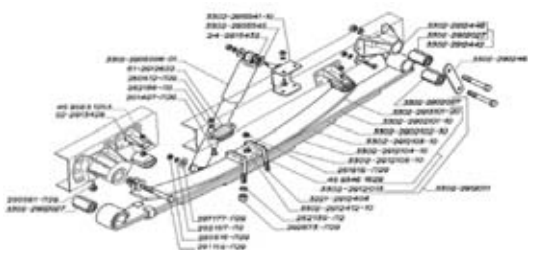
Opracowanie takiego modelu pojazdu z uwzględnieniem zawieszenia w postaci sprzężonych równolegle elementów sprężysto–tłumiących nie jest czasochłonne i nie wymaga specjalnych nakładów przy założeniu, że dysponujemy niezbędnymi charakterystykami zastępczymi.

W przypadku badań prowadzonych z zastosowaniem pojazdów wojskowych pozyskanie takich gotowych charakterystyk zastępczych jest często poważnie utrudnione. Wykonanie niezbędnych do ich opracowania badań eksperymentalnych jest kosztowne i wymaga zastosowania specjalistycznej aparatury. W niniejszej pracy omówiono metodę numerycznego wyznaczania sztywności zastępczej zawieszenia na przykładzie prototypowego resoru podwójnego, nad którym pracę prowadzono w Wydziale Mechaniczny WAT [3, 4].

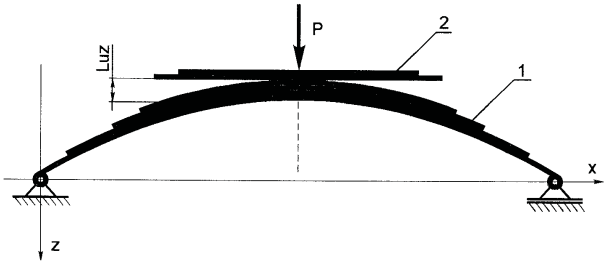
2. Przedmiot badań numerycznych

Zasadniczym elementem decydującym o parametrach zawieszeń samochodów ciężarowych są resory. W pojazdach renomowanych firm (Volvo, MAN, i innych) stosowane są wielopiórowe resory paraboliczne, które charakteryzują się dużą trwałością i małą masą. Konstrukcje takie jednocześnie zapewniają utrzymanie wysokiego komfortu jazdy, nawet przy niewielkim obciążeniu osi pojazdu. W rozwiązaniach konstrukcyjnych zawieszeń tylnych współczesnych samochodów ciężarowych szerokie zastosowanie znajdują resory podwójne. Na rys. 3 przedstawiono przykładową ofertę katalogową [5] zawieszenia z resorem podwójnym złożonym z 5-piórowego resoru zasadniczego i jednopiórowego podresornika. Prototypowy resor, stanowiący przedmiot rozważań i modelowany numerycznie przedstawiono w postaci schematu na rys. 4. Składa się on z czterech piór resoru głównego (zespół oznaczony cyfrą 1 na rys. 4) i 2-piórowego resoru pomocniczego (2 na rys. 4). Jest to zatem typowy resor podwójny, w którym pomiędzy resorem głównym i pomocniczym występuje luz (rys.4), a sztywność kompletnego resoru zależy od współczynników sztywności resorów składowych, wielkości luzu, relacji między długościami najkrótszego pióra resoru głównego i najdłuższego pióra resoru pomocniczego. Takie rozwiązanie konstrukcyjne decyduje o nieliniowej charakterystyce zawieszenia, które powinno zapewnić, między innymi, stałą częstotliwość drgań własnych nadwozia w całym zakresie obciążeń. W związku z powyższym, w przypadku badania resorów podwójnych, istnieje potrzeba uwzględnienia specyfiki współpracy resoru głównego z resorem pomocniczym. Zastosowanie analizy numerycznej do określenia charakterystyki sztywności resoru podwójnego wiąże się z koniecznością uwzględnienia znacznego luzu pomiędzy zespołami resoru głównego i pomocniczego oraz zjawisk kontaktowych pomiędzy poszczególnymi piórami obu zespołów. Analiza taka jest zatem zagadnieniem nieliniowym nawet przy założeniu liniowej charakterystyki materiału i statycznego zakresu obciążenia.

Problem taki omawiano w pracach autorów z WAT [3, 4], a opisane w niniejszej pracy badania numeryczne można uznać jako ich kontynuację z zastosowaniem bardziej zaawansowanych technik modelowania i analizy zagadnień kontaktowych możliwych do zrealizowania za pomocą pakietu programów do obliczeń inżynierskich firmy MSC.Software [6, 7].



Rys. 3.Przykład zawieszenia z resorem podwójnym
Fig. 3. Example of suspension with the double spring



Rys. 4. Schemat resoru podwójnego
Fig. 4. Scheme of the double spring

W niniejszym opracowaniu przedstawiono różne warianty modeli numerycznych MES resoru podwójnego (rys. 4) oraz wybrane aspekty ich wykorzystania na etapie badań charakterystyki

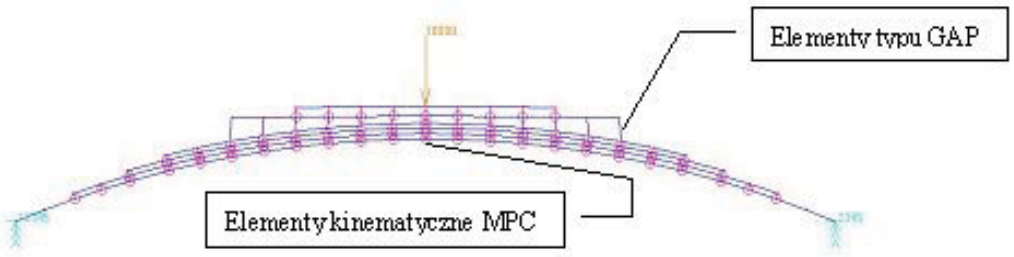
sztywności i wytężenia takiej konstrukcji. Omówiono budowę płaskiego modelu belkowego, przestrzennego modelu powłokowego oraz modelu bryłowego resoru podwójnego. Dyskutowano różne podejścia w modelowaniu zjawiska kontaktu pomiędzy poszczególnymi piórami i ich wpływ na wyniki analizy. Porównano wybrane charakterystyki sztywności takiej konstrukcji otrzymane numerycznie z dostępną w literaturze [3, 4] charakterystyką otrzymaną na drodze badań eksperymentalnych.

3. Modele numeryczne MES resoru podwójnego

Wszystkie modele numeryczne omawiane w tym rozdziale opracowania wykonano jako odkształcalne modele dyskretne przeznaczone do analizy metodą elementów skończonych (MES). Odwzorowują one identyczną prototypową wersję resoru podwójnego. Modele zbudowano za pomocą preprocesora MSC.Patran [6].

3.1. Płaski model dyskretny

W płaskim modelu dyskretnym resoru podwójnego poszczególne pióra zestawu głównego i pomocniczego modelowano za pomocą dwuwęzłowych elementów belkowych o odpowiednio dobranych charakterystykach geometrycznych. Do odwzorowania piór resoru zastosowano 114 elementów typu BEAM o przekrojach prostokątnych. Elementy połączono125 węzłami. Widok modelu belkowego przedstawiono na rys. 5.



Rys. 5. Model belkowy resoru podwójnego
Fig. 5. Beam model of the double spring

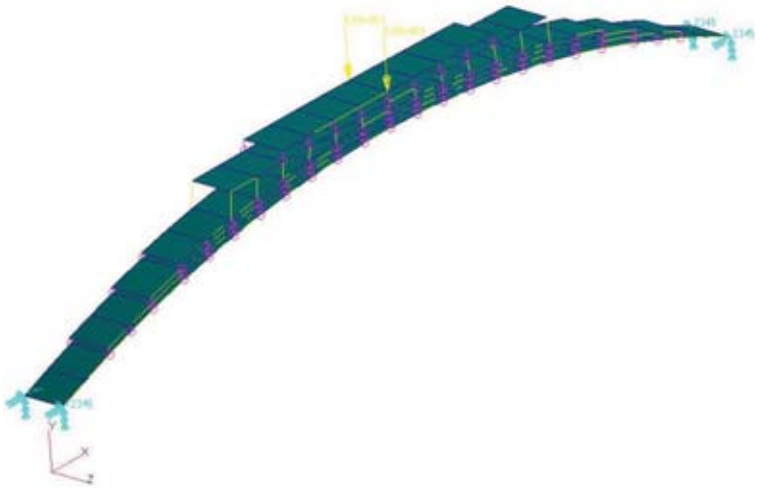
Zdefiniowano różne wartości sztywności giętnej elementów w poszczególnych piórach resoru głównego, wynoszące odpowiednio: $EI_1 = 629.39$ [Nm^2], $EI_2 = 585.99$ [Nm^2], $EI_3 = 382.52$ [Nm^2] oraz $EI_4 = 398.69$ [Nm^2]. Dla elementów modelujących dwa pióra resoru pomocniczego przyjęto jednakową sztywność giętną równą $EI_5 = 2872.90$ [Nm^2]. W modelu płaskim resoru nie wprowadzano dodatkowych elementów modelujących śrubę ściągającą. Oddziaływanie tego elementu na pracę resoru zapewniono poprzez przyjęcie identycznych translacyjnych stopni swobody dla węzłów leżących w płaszczyźnie symetrii konstrukcji. Zrealizowano to za pomocą specjalnych elementów kinematycznych typu MPC. Podobnie definiowano współpracę sąsiednich piór w obu zespołach resoru, zakładając z pewnym uproszczeniem, że przemieszczenia liniowe tych węzłów są identyczne. Zdefiniowano 32 takie elementy pomiędzy odpowiednimi węzłami elementów belkowych modelujących sąsiadujące ze sobą pióra (rys. 5).

Luzy wstępne pomiędzy piórami zespołu głównego i pomocniczego zdefiniowano w sposób dyskretny, poprzez wprowadzenie elementów dwuwęzłowych typu GAP pomiędzy dwoma przeciwległymi węzłami skrajnych piór w zespołach (rys. 5). Wartość luzów zdefiniowanych pomiędzy węzłami elementów modelującego skrajne pióra zespołu głównego i pomocniczego zmieniają się od Luz = 34.71 [mm] do Luz = 0 [mm] pomiędzy węzłami w płaszczyźnie symetrii (rys. 4). Wartości luzów wyznaczono na podstawie geometrii resoru nieobciążonego.

W węzłach skrajnych pierwszego pióra resoru głównego wprowadzono więzy odpowiadające podporze przegubowej nieprzesuwnej na lewym końcu i podporze przesuwnej na prawym końcu.

3.2 Przestrzenny model powłokowy

Dyskretne modele przestrzenne resoru opracowano przy założeniu jego porównywalności z przedstawionym powyżej płaskim modelem belkowym pod względem: wymiarów, cech fizycznych zastosowanego materiału, więzów zewnętrznych, wartości i sposobu obciążania resoru. Model przestrzenny przedstawiony na rys. 6 zbudowano jako model powłokowy. Do dyskretyzacji piór użyto elementów powłokowych 4-węzłowych typu QUAD4, dostępnych w bibliotece oprogramowania MSC.Nastran [7].

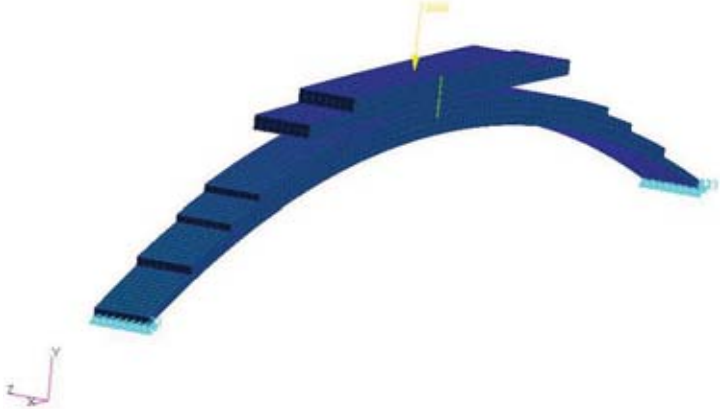


Rys. 6. Przestrzenny model powłokowy resoru
Fig. 6. 3D shell model of the spring

Pióra resoru głównego i pomocniczego odwzorowano za pomocą 126 elementów powłokowych rozpiętych na siatce 251 węzłów. Do odwzorowania śrub ściągających zastosowano elementy belkowe o odpowiednio dobranych charakterystykach zastępczych. Rozpięto je na węzłach skrajnych elementów modelujących poszczególne pióra w płaszczyźnie symetrii resoru. Elementy modelujące śrubę ściągającą resoru przyjęto 10-krotnie sztywniejsze od elementów resoru pomocniczego. Luzy pomiędzy piórami resoru głównego i pomocniczego (rys. 6), wynikające z cech geometrycznych i technologicznych badanej konstrukcji, modelowano wprowadzając pomiędzy węzłami sąsiadujących piór 2-węzłowe elementy typu GAP.

3.3 Model bryłowy

Rozważany resor podwójny odwzorowano także w modelu bryłowym zaprezentowanym na rys. 7.



Rys. 7. Model bryłowy resoru
Fig. 7. Solid model of the spring

Do modelowania piór obu zespołów resoru wykorzystano 6315 ośmiowęzłowych elementów bryłowych typu HEX rozpiętych na siatce 13704 węzłów. Śruby ściągające odwzorowano za pomocą elementów belkowych o odpowiednio dobranych charakterystykach zastępczych. Rozpięto je podobnie jak w modelu powłokowym na węzłach skrajnych elementów modelujących poszczególne pióra w płaszczyźnie symetrii resoru. Kontakt pomiędzy poszczególnymi piórami resoru modelowano poprzez określenie przewidywanej powierzchni styku ścian elementów poszczególnych piór resoru i przypisanie im odpowiednich parametrów fizycznych (np. tarcia) za pomocą funkcji 'master-slave' [7]. W modelu bryłowym wprowadzono więc ciągły opis zjawiska kontaktu, w przeciwieństwie do dyskretnego odwzorowania kontaktu zastosowanego w modelu belkowym i powłokowym.

4. Analiza numeryczna wielopiórowego resoru podwójnego

Statyczne badania resoru o biliniowej charakterystyce sztywnościowej, jak wspomniano we wprowadzeniu, stanowią z istoty swej zadanie nieliniowe nawet wtedy, gdy materiał konstrukcji jest liniowo sprężysty i pomija się duże przemieszczenia. Zwykle problem ten sprowadza się do zagadnienia na poszukiwanie warunkowego rozwiązania dopuszczalnego. Jest ono określane na podstawie rozwiązania układu skończonej liczby nieliniowych równań algebraicznych. W pracy zastosowano podejście metody elementów skończonych, sprowadzając rozwiązanie problemu do wielokrotnego rozwiązania układu równań liniowych, otrzymanych na podstawie zasady równowagi węzłów [8, 9]. Dla sprężystej konstrukcji resoru obciążonego układem sił zachowawczych $P=\lambda \cdot p$, przyrostowe równania równowagi MES w uaktualnionym opisie Lagrange'a mają postać (1):

$$\left[K_e^{(i)} + K_\sigma^{(i)}(\sigma) \right] \Delta q^{(i+1)} = \Delta p^{(i+1)}, \tag{1}$$

gdzie:

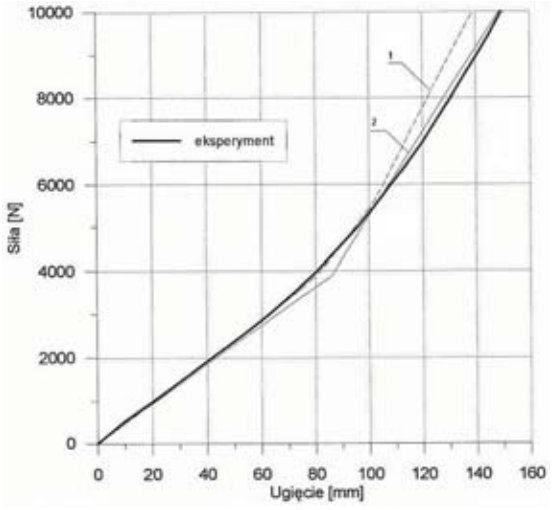
- K_e - macierz sztywności,
- $K_\sigma(\sigma)$ - macierzą początkowych naprężeń,
- Δq - przyrostem wektora przemieszczeń,
- $\Delta P=\Delta\lambda \cdot p$ - przyrostem wektora obciążeń,
- p - wektorem obciążeń porównawczych,
- λ - mnożnikiem obciążeń porównawczych.

Układ równań (1) rozwiązuje się metodą zmiennej sztywności. W ujęciu konwencjonalnym tworzy się go na każdym kroku przyrostowym dla tego samego modelu dyskretnego. W rozważanym zagadnieniu, zmiana obszaru kontaktu prowadzi do zmiany schematu statycznego analizowanej konstrukcji. Uwzględnienie zmiennych w procesie obciążania i deformacji obszarów kontaktu pomiędzy poszczególnymi piórami wywołuje zmianę sztywności konstrukcji rosoru. Ma ona charakter nieliniowości geometrycznej.

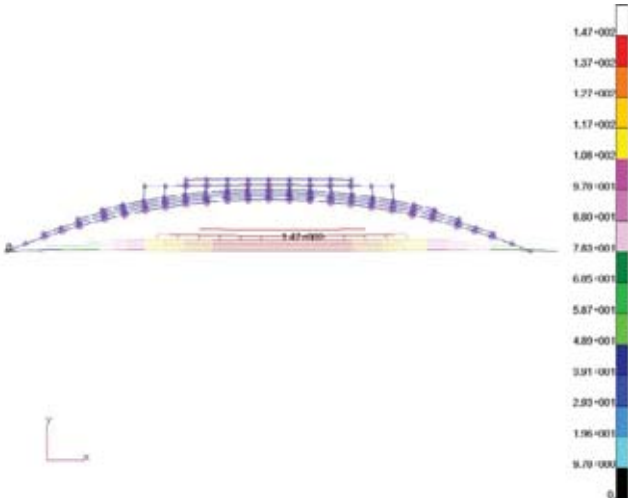
Analizę numeryczną resoru podwójnego wykonywano zatem w zakresie nieliniowej statyki za pomocą oprogramowanie MSC.Nastran. W obliczeniach zastosowano modele dyskretne resoru podwójnego omówione w rozdziale 3 opracowania. Obciążenie w płaskim modelu belkowym i w modelu bryłowym definiowano w postaci pojedynczej siły o wartości 10 [kN] przyłożonej w węzłach centralnych w płaszczyźnie symetrii modeli (rys. 5 i 7). W powłokowym modelu przestrzennym (rys 6) obciążenie przyjęto w postaci dwóch jednakowych sił skupionych przyłożonych w węzłach płaszczyzny symetrii poprzecznej resoru o wartościach 5 [kN].

Wszystkie modele numeryczne obciążono zatem wypadkową siłą równą 10 [kN]. Taką siłą maksymalną obciążano również resor podczas badań na stanowisku laboratoryjnym [3, 4]. Analiza numeryczna wykonana w przedstawionym zakresie obciążeń pozwala więc na porównanie charakterystyk sztywności uzyskanych na drodze numerycznej. Na rys. 8 zestawiono wykresy sił

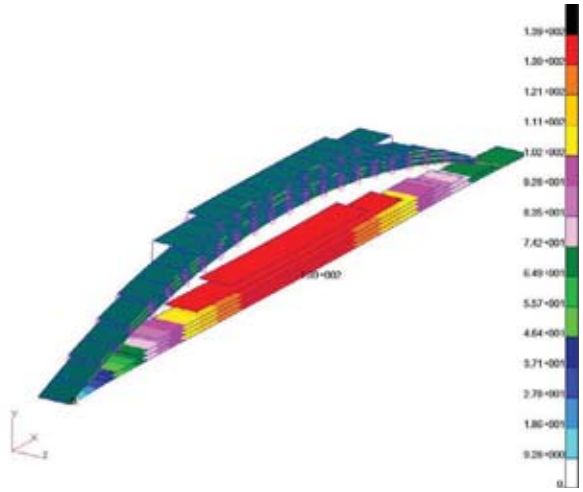
obciążenia w funkcji ugięcia resoru otrzymane w belkowym i powłokowym modelu numerycznym oraz krzywą otrzymaną na podstawie badań resoru prototypowego na stanowisku laboratoryjnym.



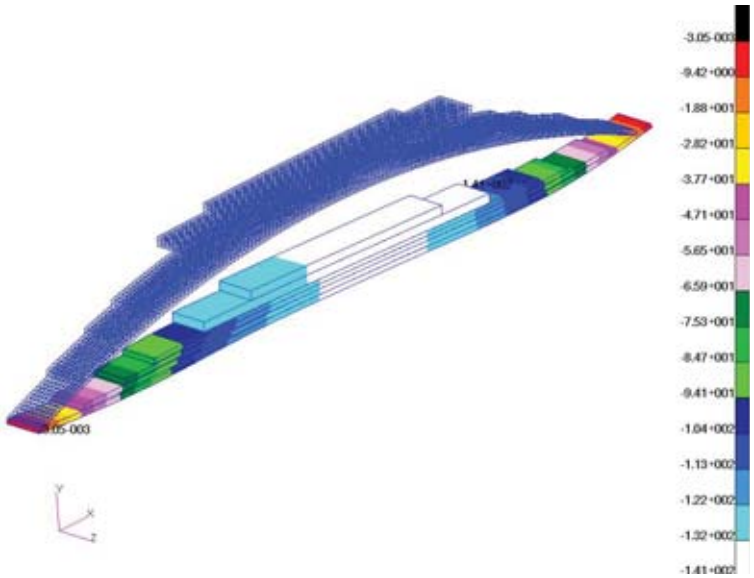
Rys. 8. Porównanie wyników badań numerycznych i eksperymentalnych
Fig. 8. Comparison of the numerical and experimental results



Rys. 9. Deformacje resoru – model belkowy
Fig. 9. Deformations of the spring – beam model



Rys. 10. Deformacje resoru –model powłokowy
Fig. 10. Deformations of the spring – shell model



Rys. 11. Deformacje resoru –model bryłowy
Fig. 11. Deformations of the spring – solid model

Krzywą wykreśloną na podstawie wyników z modelu powłokowego oznaczono na rys. 8 indeksem 1, a tę odpowiadającą modelowi belkowemu opisano indeksem 2. Przebieg krzywej uzyskanej w modelu bryłowym jest prawie identyczny jak w modelu powłokowym, dlatego nie zamieszczano jej na rys. 8.

Deformacje i wartości przemieszczeń otrzymane w poszczególnych modelach numerycznych przedstawiono w postaci map na rys. 9-11.

6. Podsumowanie

W wyniku przeprowadzonych obliczeń numerycznych określono deformacje układu, które pozwoliły wyznaczyć zależność przemieszczeń węzłów leżących w płaszczyźnie symetrii resoru i wartości obciążenia. Maksymalne wartości ugięcia resoru uzyskane w badaniach numerycznych wynoszą odpowiednio:

- w modelu belkowym; 147 [mm],
- w modelu powłokowym; 139 [mm],
- w modelu bryłowym; 141 [mm].

Maksymalna różnica względna ugięć resoru określona za pomocą różnych modeli numerycznych nie przekracza więc 6%. Zastosowanie nawet najprostszych belkowych modeli resoru, wymagających najmniejszych nakładów pracy na etapie ich opracowania, prowadzi do zadowalających wyników. Zastosowanie takiego modelu skutkuje zarazem mniejszą dokładnością w odwzorowaniu charakterystyki sprężystej resoru w części jej załamania, czyli w przedziale odpowiadającym fazie wybierania luzów pomiędzy skrajnymi piórami zespołu resoru głównego i pomocniczego. Modele przestrzenne dają lepszą zgodność krzywych wyznaczonych numerycznie i eksperymentalnie w ich częściach załamania tj. w przedziale odpowiadającym pracy resoru, kiedy włączony zostaje resor pomocniczy. Zastosowanie modelu bryłowego, wymagającego największego nakładu pracy na etapie przygotowania modelu i najdłuższego czasu trwania obliczeń, umożliwia szczegółową analizę wytężenia poszczególnych piór resoru podwójnego.

Otrzymane w pracy charakterystyki sprężyste badanej konstrukcji dla różnych modeli dyskretnych i wariantów analizy potwierdzają przydatność proponowanej metody numerycznej w określaniu zastępczej sztywności resorów wielopiórowych, jako zasadniczych elementów zawieszeń pojazdów. Charakterystyki takie mogą być szczególnie przydatne do opracowania prostych modeli zastępczych zawieszeń wykorzystywanych do symulacji ruchu pojazdów.

Literatura

[1] Users Manual, *MSC Working Model 2D* Motion Software, *Version 5.0.,* USA 2001.

[2] Quick Reference Guide, *MSC Visual Nastran 4D*, 2001.

[3] Borkowski, W., Wieczorek, M., Wysocki, J., Krasoń, W., *Analiza wielopiórowego resoru podwójnego z więzami jednostronnymi,* V Międzynarodowa Konferencja Naukowo-Techniczna „Autoprogres' 95", 1995.

[4] Borkowski, W., Krasoń, W., Szymczyk, E., Wieczorek, M., Wysocki, J., *Analiza numeryczna modelu przestrzennego wielopiórowego resoru podwójnego,* VI Międzynarodowa Konferencja Naukowo- Techniczna „Autoprogres' 96", grudzień 1996.

[5] www.aso.pl/katalogi/GAZ_3302_katalog.pdf.

[6] Reference Manual, *MSC.PATRAN,* Version r2, MSC.Software, 2001.

[7] Reference Manual, *MSC.NASTRAN*, Version r2, MSC.Software, 2001.

[8] Kleiber, M., *Metoda elementów skończonych w nieliniowej mechanice kontinuum*, IPPT PAN, Warszawa – Poznań, 1985.

[9] Dacko, M., Borkowski, W., Dobrociński, S., Niezgoda, T., Wieczorek, M., *Metoda elementów skończonych w mechanice konstrukcji*, Arkady, Warszawa, 1994.