

STABILIZATORY SAMOCHODOWE – OBLICZENIA WYTRZYMAŁOŚCIOWE STABILIZATORÓW Z WYKORZYSTANIEM METODY ELEMENTÓW SKOŃCZONYCH – WSKAZÓWKI I OGÓLNE WYTYCZNE OBLICZENIOWE

ADAM MARKUS WITTEK¹, DAMIAN GĄSKA², TOMASZ MATYJA³

ThyssenKrupp Federn & Stabilisatoren GmbH

Politechnika Śląska

STRESZCZENIE

Stabilizatory w pojazdach samochodowych mają za zadanie redukcję przechyłów poprzecznych podczas jazdy na zakręcie lub pod działaniem innych sił bocznych. Na przechyły boczne zasadniczy wpływ ma przemieszczenie się obciążen kół jezdnych, jak i zmiany kąta pochylenia kół. Te czynniki mają zasadniczy wpływ na kierowność pojazdu, która poprzez odpowiedni dobór stabilizatorów objawia się jako tendencja do podsterowności lub nadsterowności. Artykuł przedstawia zarys podstaw metod obliczeniowych stosowanych w procesie konstrukcji stabilizatorów. Nowoczesne rozwiązania technologiczne i konstrukcyjne we współczesnych pojazdach samochodowych są również widoczne w konstrukcji i produkcji stabilizatorów. Prawidłowa konstrukcja i właściwy dobór parametrów stabilizatora wpływa na jego cechy wytrzymałościowe, ciężar, trwałość i niezawodność, a także na dobór odpowiednich metod produkcyjnych. Niewłaściwe przygotowanie modeli obliczeniowych z wykorzystaniem Metody Elementów Skończonych prowadzi w konsekwencji do błędnych wyników. Szczególnie trudna jest interpretacja wyników i znalezienie błędu, jeśli nie dysponujemy danymi porównawczymi (takimi jak wyniki testów zmęczeniowych lub wynikami analitycznych obliczeń wytrzymałościowych). Artykuł zawiera wskazówki praktyczne i ogólne wytyczne obliczeniowe niezbędne do prawidłowego przygotowania modeli obliczeniowych, do właściwego przeprowadzenia obliczeń i właściwej interpretacji wyników z wykorzystaniem Metody Elementów Skończonych.

Słowa kluczowe: stabilizatory samochodowe, obliczenia MES

¹ ThyssenKrupp Federn & Stabilisatoren GmbH, Deger St. 85, 58089 Hagen, Germany,
e-mail: adam.wittek@t-online.de, tel. +49 233 14 07 105

² Politechnika Śląska, Wydział Transportu, ul. Krasińskiego 8, 40-019 Katowice,
e-mail: damian.gaska@polsl.pl, tel. 32 603 43 93

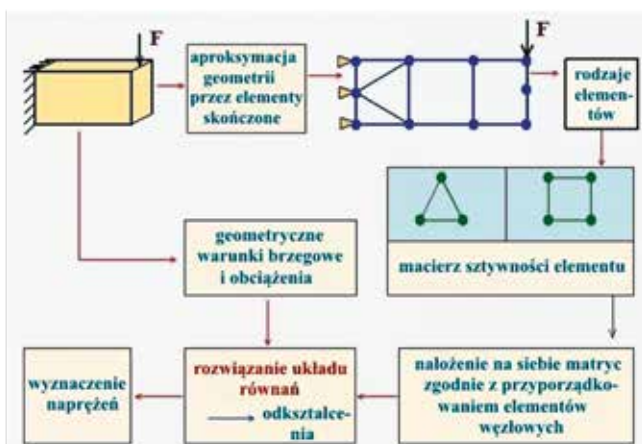
³ Politechnika Śląska, Wydział Transportu, ul. Krasińskiego 8, 40-019 Katowice,
e-mail: tomasz.matyja@polsl.pl, tel. 32 603 41 83

1. Wstęp

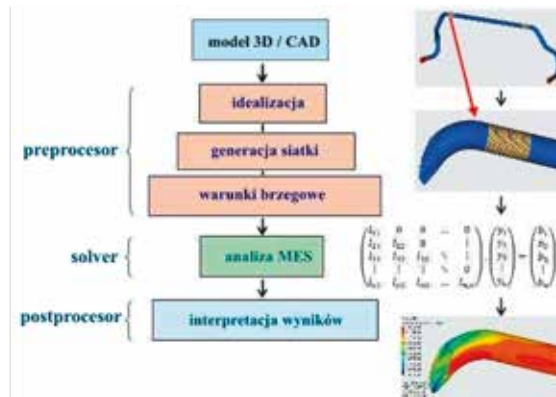
Metoda Elementów Skończonych jest metodą aproksymacji (poprzez dyskretyzację) równań różniczkowych cząstkowych. Oto trzy podstawowe elementy metodologii rozwiązania danego problemu za pomocą MES [2, 7, 9]:

- sformułowanie słabe (wariacyjne, całkowe) zagadnienia różniczkowego,
- podział obszaru obliczeniowego na elementy,
- przyjęcie w obszarze prostych funkcji bazowych jako podstawy aproksymacji.

Podczas gdy w klasycznych metodach bezpośredniego rachunku wariacyjnego, takiego jak metoda Ritza lub Galerkina – gdzie funkcje kształtu są zdefiniowane w obrębie całego elementu (np. we wnętrzu elementu) – w Metodzie Elementów Skończonych funkcje kształtu są zdefiniowane w podregionach, tzw. elementach skończonych i przyjmują wartości różne od zera. Rysunek 1 przedstawia poglądowo poszczególne etapy obliczeniowe z wykorzystaniem Metody Elementów Skończonych [7, 9, 13]. Po zakończeniu modelowania (3D) zostaje najpierw podzielona struktura geometryczna badanego elementu na podregiony (elementy skończone). Przedstawiony na rys. 1 wspornik został przeanalizowany przykładowo jak element płaski (dyskusja modelowa). Powierzchnia środkowa wspornika zostaje podzielona na elementy skończone. Dalszym krokiem jest generacja siatki. Do utworzenia siatki elementu obliczeniowego służą różnorodne elementy siatkowe. W rozpatrywanym przypadku zostały wykorzystane elementy trójkątne i czworokątne. Sztywność całej konstrukcji pozostanie opisana sumą macierzy sztywności wszystkich elementów skończonych. Te sztywności zostaną addytywnie wpisane w globalną macierz sztywności. W połączeniu z geometrycznymi warunkami brzegowymi i założonymi obciążeniami wynika z globalnej macierzy sztywności liniowy układ równań. Niewiadomymi obliczeniowymi zdefiniowanymi w tym układzie równań są deformacje w węzłach elementu obliczeniowego. Z deformacji / odkształceń, stosując funkcje kształtu, można w ostateczności obliczyć naprężenia w każdym elemencie skończonym [7, 9, 13].



Rys. 1. Schemat struktury obliczeniowej z wykorzystaniem MES [7]



Rys. 2. Segmenty obliczeniowe w strukturze MES

Rozwiązanie problemu za pomocą MES prowadzi do uzyskania rozwiązania przybliżonego. W oparciu o postać rozwiązywanego problemu, cechy geometryczne elementów i własności przestrzeni aproksymacji można z góry oszacować błąd rozwiązania MES. Niestety, oszacowanie wyraża się za pomocą nieznanego rozwiązania dokładnego (mimo to jest istotne dla ustalenia zbieżności metody, jej optymalności i do jej porównania z innymi aproksymacjami tego samego problemu) [2, 10, 11].

Programy komputerowe, w których stosowana jest metoda elementów skończonych składają się z 3 części (rys. 2) [2, 7, 9]:

1. **preprocesora**, w którym budowane jest zadanie do rozwiązania,
2. **procesora**, czyli części obliczeniowej,
3. **postprocesora**, służącego do graficznej prezentacji uzyskanych wyników.

Dla użytkowników tych programów najbardziej pracochłonnym i czasochłonnym etapem rozwiązywania zadania jest podział na elementy skończone w preprocesorze. Niewłaściwy podział na elementy skończone powoduje uzyskanie błędnych wyników.

Element skończony jest prostą figurą geometryczną (płaską lub przestrzenną), dla której określone zostały wyróżnione punkty zwane węzłami oraz pewne funkcje interpolacyjne (węzłowe, kształtu), służące do opisu rozkładu analizowanej wielkości w jego wnętrzu i na jego bokach. Węzły znajdują się w wierzchołkach elementu skończonego, ale mogą być również umieszczone na jego bokach i w jego wnętrzu. Jeżeli węzły znajdują się tylko w wierzchołkach, to element skończony jest nazywany elementem liniowym (ponieważ funkcje interpolacyjne są wtedy liniowe). W pozostałych przypadkach mamy do czynienia z elementami wyższych rzędów [2, 7].

Rząd elementu jest zawsze równy rzędowi funkcji interpolacyjnych (funkcji kształtu). Liczba funkcji kształtu w pojedynczym elemencie skończonym jest równa liczbie jego węzłów. Funkcje kształtu są zawsze tak zbudowane, aby w węzłach, których dotyczą ich wartości, wynosiły jeden, a w pozostałych węzłach przyjmowały wartość zero.

2. Obliczenia MES

2.1 Obszary zastosowania Metody Elementów Skończonych

Korzyści płynące z zastosowania MES:

- obniżenie czasu procesu konstrukcyjnego,
- obniżenie kosztów procesu konstrukcyjnego,
- obniżenie kosztów produkcji,
- oszczędności materiałowe,
- możliwość wczesnego rozpoznania słabych stron konstrukcji,
- podniesienie jakości procesu konstrukcyjnego i tym samym wytwarzanego elementu,
- optymalizacja konstrukcji,
- redukcja ilości prób doświadczalnych,
- elastyczne dopasowanie konstrukcji do dalszych wdrożeń (tzw. dogład wariantów modelowych).

Wymogi i założenia niezbędne do osiągnięcia wyżej wymienionych korzyści [6, 9, 12]:

- profesjonalne oprogramowanie (**ABAQUS**, ADINA, ALGOR, **ANSYS**, ANTRAS, COSAR, **COSMOS**, ISAFEM, LUSAS, **MARC**, MECHANICA, NASTRAN, NISA, OPTISTRUCT, PERMAS, **RADIOSS**, ...),
- profesjonalne hardware (PC, workstation, komputer o dużej mocy obliczeniowej),
- MES – teoria (znajomość podstaw obliczeniowych),
- znajomość techniki i obliczeń inżynierskich będących podstawą do krytycznej oceny wyników obliczeniowych,
- doświadczenie konstrukcyjne (konstrukcja realna 3D ⇒ model obliczeniowy).

Tablica 1. Przykłady zastosowań [MES] [12]

elastostatyka liniowa	<ul style="list-style-type: none"> • wartości logiczne odwracalnego zachowania się materiału
elastostatyka nieliniowa	<ul style="list-style-type: none"> • nieliniowe zachowanie materiału (elastoplastyka) • geometryczne problemy nieliniowe (problemy niestabilności, duże przemieszczenia przy małych odkształceniach)
liniowa elastodynamika	<ul style="list-style-type: none"> • drgania własne • drgania swobodne • drgania wymuszone • losowe drgania wymuszone
nieliniowa elastodynamika	<ul style="list-style-type: none"> • odpowiedź / czas – postępowanie • stabilność i rezonanse
stacyczna i dynamiczna aerosprężystość	<ul style="list-style-type: none"> • oddziaływanie strukturalno – przepływowe
liniowa i nieliniowa termosprężystość	<ul style="list-style-type: none"> • naprężenia mechaniczne w wysokich temperaturach
problemy wymiany ciepła	<ul style="list-style-type: none"> • stabilny i niestabilny przepływ ciepła (wymiana ciepła)
przepływ płynów	<ul style="list-style-type: none"> • przepływ, przenikanie, wyciek, prędkość i ciśnienie, pola temperaturowe, przepływy lepkie
elektrotechnika	<ul style="list-style-type: none"> • pole elektromagnetyczne
akustyka	<ul style="list-style-type: none"> • rozkład ciśnienia akustycznego

Główne, zasadnicze procedury w obliczeniach części maszyn (np. stabilizatorów samochodowych) z wykorzystaniem MES [6, 9, 12]:

- zastąpienie realnej konstrukcji – modelu 3D CAD modelem obliczeniowym (np. z wykorzystaniem programu HyperMesh),
- obliczenia odkształceń, naprężeń, sił ścinających, reakcji w łożyskach, podporach, itp. z uwzględnieniem założonych obciążeń i warunków pracy łożysk (program do analizy MES, centralny procesor, np. OptiStruct),
- ocena ich wyników (postprocesor, np. HyperMesh),
- ukierunkowana optymalizacja konstrukcji bazująca na obliczonych odkształceniach, naprężeniach, itp., ewentualne nowe obliczenia wytrzymałościowe i symulacje zmodyfikowanej konstrukcji, względnie modelu obliczeniowego lub też wykonanie zmodyfikowanej części konstrukcji.

2.2 Modele 3D CAD

Części lub podzespoły maszynowe należy przygotować do obliczeń MES w formie modelu 3D CAD, opisującym dokładnie relacje i zależności geometryczne.



modele 3D/ CAD - SolidWorks, Catia, Creo, HiCAD, Inventor, SolidEdge / alternatywnie: step, iges

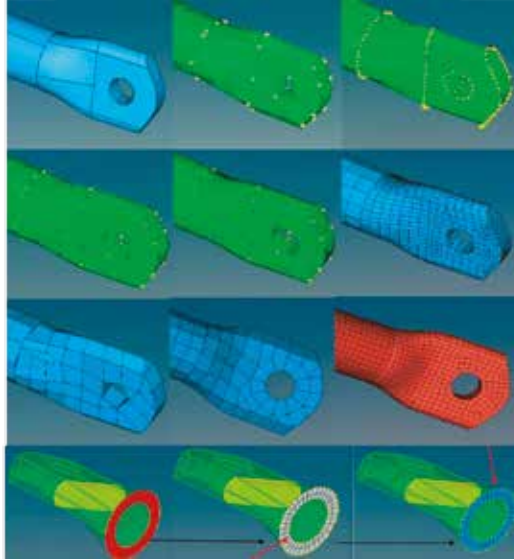
Rys. 3. Przykładowe modele stabilizatorów wykonane z zastosowaniem programu SolidWorks

Niestety, większość modeli stabilizatorów wykonanych z wykorzystaniem programów CAD, takich jak SolidWorks, CATIA, nie nadaje się do automatycznego generowania siatki. Modele te należy poddać dalszej obróbce, np. z wykorzystaniem programu HyperMesh. Korzyści płynące z dalszej obróbki modelu 3D to znacznie skrócony czas obliczeniowy, zmodyfikowany objętościowo model, uproszczona obsługa obliczeniowa, zredukowana baza danych. Bazując na danych modelowych z uwzględnieniem wyżej wymienionych zalet, można przeprowadzić następujące uproszczenia: usunięcie lub wygaszenie nieistotnych elementów konstrukcyjnych, takich jak np. skosy lub otwory. Ta faza przygotowania modelu obliczeniowego jest określana jako idealizacja modelu. Wiele elementów konstrukcyjnych charakteryzuje się pełną symetrią i tym samym możliwa jest dodatkowa optymalizacja, uproszczenie modelu obliczeniowego. Uproszczenie modelu obliczeniowego z uwzględnieniem symetrycznych bądź też asymetrycznych warunków brzegowych prowadzi do dokładnie tych samych wyników obliczeniowych, jak w przypadku modelu niezmodyfikowanego.

2.3 Preprocessing – generowanie siatki, definicja obciążeń i warunków brzegowych

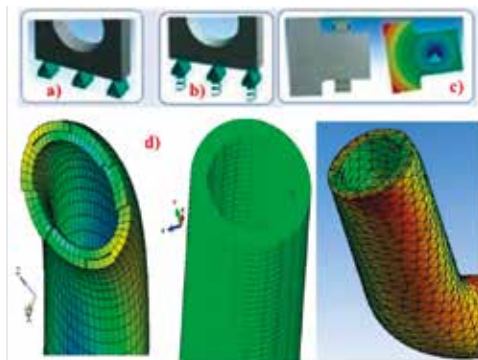
Następnym krokiem bazującym na parametrach geometrycznych modelu 3D jest

generowanie siatki MES (rys. 4, 5d). Siatka składa się z elementów skończonych i węzłów. Różne rodzaje elementów 3D, takie jak: belki, powłoki, bryły, sprężyny, luki/otwory, połączenia sztywne, itp., będące do dyspozycji użytkownika [3, 9, 16], są bazą wyjściową do generowania siatki.



Rys. 4. Przykłady generowania i optymalizacji siatki z wykorzystaniem programu HyperMesh [10]

Ten etap jest nazywany dyskretyzacją obszaru i w zależności od złożoności konstrukcji może trwać od kilku sekund do kilku godzin.



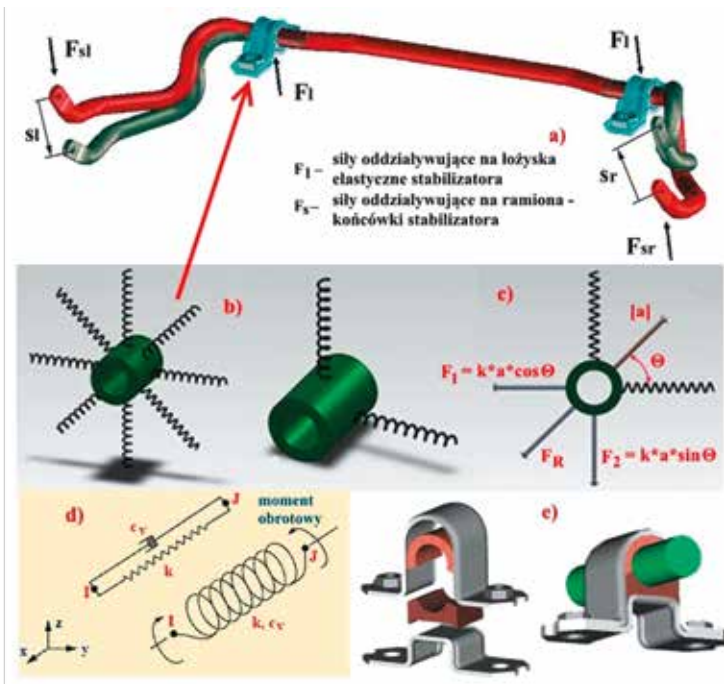
Rys. 5. Sposoby łożyskowania i siatki MES - łożyskowanie beztarciove a) [8], łożyskowanie sprężyste b) [8], przemieszczanie „zewnętrzne” c) [8], rodzaje siatek: HyperMesh, Abaqus, Ansys d)

Celem jest stworzenie siatki elementów skończonych, w której elementy mają minimalne odchylenia od idealnego kształtu, a w istotnych miejscach charakteryzują się wystarczająco małą długością krawędzi. Również wybór odpowiedniego typu elementu odgrywa dużą

wagę. Oprócz sieci MES, niezbędne jest również zdefiniowanie typu obciążeń i warunków brzegowych będących wymogiem do przeprowadzenia większości obliczeń. Takie parametry, jak działające siły, momenty, przemieszczenia, ciśnienia, temperatury, prędkości, przyspieszenia, itp. są również wykorzystywane w obliczeniach. Warunki brzegowe opisują sposób łożyskowania, mocowania elementu i możliwe symetrie. W przypadku stabilizatorów samochodowych (zarówno masywnych, jak i rurowych) do najlepszych wyników obliczeniowych prowadzi zdefiniowanie następujących warunków brzegowych (rys. 6):

- wybór mocowania (rys. 6e) i sposobu łożyskowania stabilizatora w pojeździe samochodowym (rys. 5a i b, 6a, b, c i d),
- definicja sił lub przemieszczeń końcówek obciążonego stabilizatora (rys. 5c, 6a).

Dane te są udostępnione przez producentów samochodów i łożysk elastycznych stosowanych w pojazdach samochodowych.

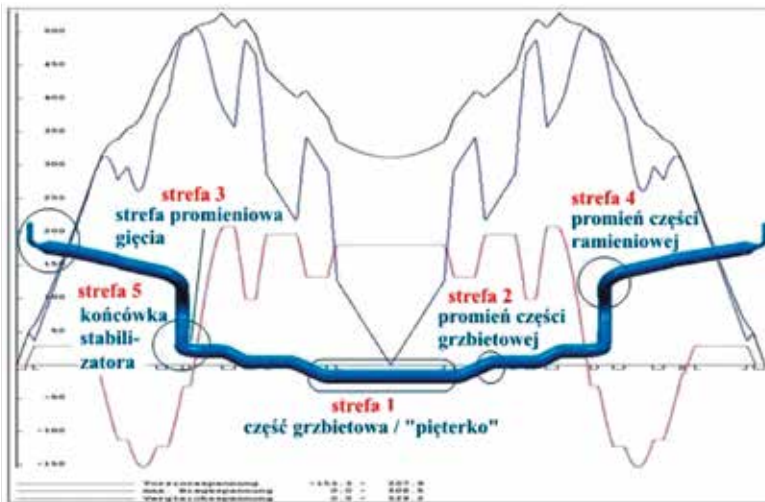


Rys. 6. Siły działające w obciążonym stabilizatorze i łożyskowanie elastyczne (model zastępczy MES) [1, 8, 11]

2.4 Obliczenia MES

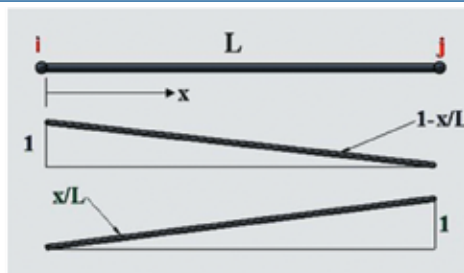
Po zakończeniu fazy wykonania modelu obliczeniowego MES, włącznie z definicją obciążeń i warunków brzegowych, następuje faza rzeczywistych obliczeń. W tym celu model zostaje wczytany do solvera, który najpierw przeprowadza kontrolę wiarygodności oraz kontrolę elementów pod kątem zgodności założonych kryteriów. Brak własności materiałowych lub znaczne zniekształcenie modeli obliczeniowych może prowadzić do przedwczesnego

zakończenia procesu obliczeniowego, jeszcze przed przystąpieniem do właściwej analizy. Jeśli ten etap zostanie pozytywnie zakończony, następuje faza przekształcenia fizycznego modelu obliczeniowego w model matematyczny. W tym celu jest tworzona macierz sztywności, odzwierciedlająca charakterystykę elementów obliczeniowych. Poprzez korzystnie zdefiniowane, symetryczne macierze złożoność procesu obliczeniowego może pozostać w znacznym stopniu zredukowana. W tym celu macierz oparta na rozkładzie eliminacji Gaussa zostaje do tego stopnia zredukowana, że rezultatem tej redukcji jest utworzenie współczynnika macierzy trójkątnej. Chociaż etap ten wymaga dużej intensywności, mocy obliczeniowej, to jednakże w konsekwencji mamy do czynienia ze znaczną redukcją całkowitego czasu obliczeniowego. Wraz ze zdefiniowanym obciążeniem powstaje układ równań, który jest analizowany i rozwiązywany w solverze i w rezultacie prowadzi do podania żądanych wielkości (wartości przemieszczeń, naprężeń, itp. – rys. 7).



Rys. 7. Przykładowe wielkości naprężeń (strefy obliczeniowe) w obciążonym stabilizatorze: Strefa 1 i 5 – małe wyężenie. Strefa 2 i 4 – średnie wyężenie. Strefa 3 – strefa wysoko wyężona

Przykładem obrazującym założenia teoretyczne MES w praktyce obliczeniowej stabilizatorów może być pręt rozciągany – ściskany (rys. 8).



Rys. 8. Pryzmatyczny pręt ściskany i rozciągany [4]

Jak wiadomo, we wnętrzu pryzmatycznego pręta ściskanego i rozciąganego (tzn. pręta o stałym przekroju) występuje wydłużenie niezależne od współrzędnej położenia x :

$$u(x) = \alpha_1 + \alpha_2 x \quad \text{gdzie } \alpha_1 \text{ i } \alpha_2 \text{ są stałymi} \quad (1)$$

W ten sposób wzdłużne przemieszczenie u zmienia się liniowo w funkcji x [3, 4, 5].

$$\begin{aligned} u(x) &= \left(1 - \frac{x}{L}\right) u_i + \frac{x}{L} u_j \quad \text{odpowiednio } u(x) = \begin{bmatrix} 1 - \frac{x}{L} & \frac{x}{L} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_i \\ u_j \end{bmatrix} = \\ &= [N_i \quad N_j] \begin{bmatrix} u_i \\ u_j \end{bmatrix} \Rightarrow u = \underline{N} a \end{aligned} \quad (2)$$

gdzie: \underline{N} to macierz interpolacji funkcji lub „funkcji kształtu”

$$\varepsilon = u_{,x} = \underline{N}_{,x} a = \begin{bmatrix} -\frac{1}{L} & \frac{1}{L} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_i \\ u_j \end{bmatrix} = \underline{B} a \quad (3)$$

co oznacza nic innego jak:

$$\varepsilon = \frac{u_j - u_i}{L} \quad \text{i} \quad \underline{\sigma} = \underline{D} \varepsilon = \underline{D} \underline{N}_{,x} a = \underline{D} \underline{B} a \quad (4)$$

gdzie: D – macierz sprężystości, w tym przypadku składająca się z jednego elementu, a mianowicie z modułu sprężystości E .

Zgodnie z tym wyrażenia odkształceń i naprężeń można sformułować jako energię odkształcenia pręta:

$$U = \frac{1}{2} \int_V \sigma * \varepsilon \, dv = \frac{1}{2} A L a^T \underline{B}^T \underline{D} \underline{B} a = \frac{1}{2} \frac{E * A}{L} [u_i \, u_j] \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ -1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_i \\ u_j \end{bmatrix} = \frac{1}{2} \frac{E * A}{L} (u_i - u_j)^2 \quad (5)$$

Zgodnie z twierdzeniem Castigliano:

$$\frac{\partial U}{\partial u_i} = F_i \quad \text{lub} \quad \frac{\partial U}{\partial u_j} = F_j \Rightarrow \begin{bmatrix} F_i \\ F_j \end{bmatrix} = \frac{E * A}{L} \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ -1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_i \\ u_j \end{bmatrix} \quad (6)$$

Tutaj dostrzegamy strukturę $\underline{F} = \underline{K} a$ macierzy sztywności elementu pręta:

$$\underline{K} = \frac{E * A}{L} \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ -1 & 1 \end{bmatrix} \quad (7)$$

kóra przy bliższej analizie okazuje się całką objętościową $K = \int_V B^T * D * B \, dv$. Jeśli geometria i cechy materiałowe pręta są znane, możliwe jest – uwzględniając specyficzne funkcje kształtu – określenie całki powiązanej z macierzą sztywności.

$$K = \int_V B^T * D * B \, dv \quad (8)$$

Tego typu całki są obliczane numerycznie w programach elementów skończonych. W zależności od typu elementu wprowadza się różną ilość punktów integracyjnych Gaussa, które w programie – wewnętrznie, to znaczy bez interwencji ze strony użytkownika – zostaną wybrane w pobliżu punktów węzłych elementu obliczeniowego. Wynikowe wielkości

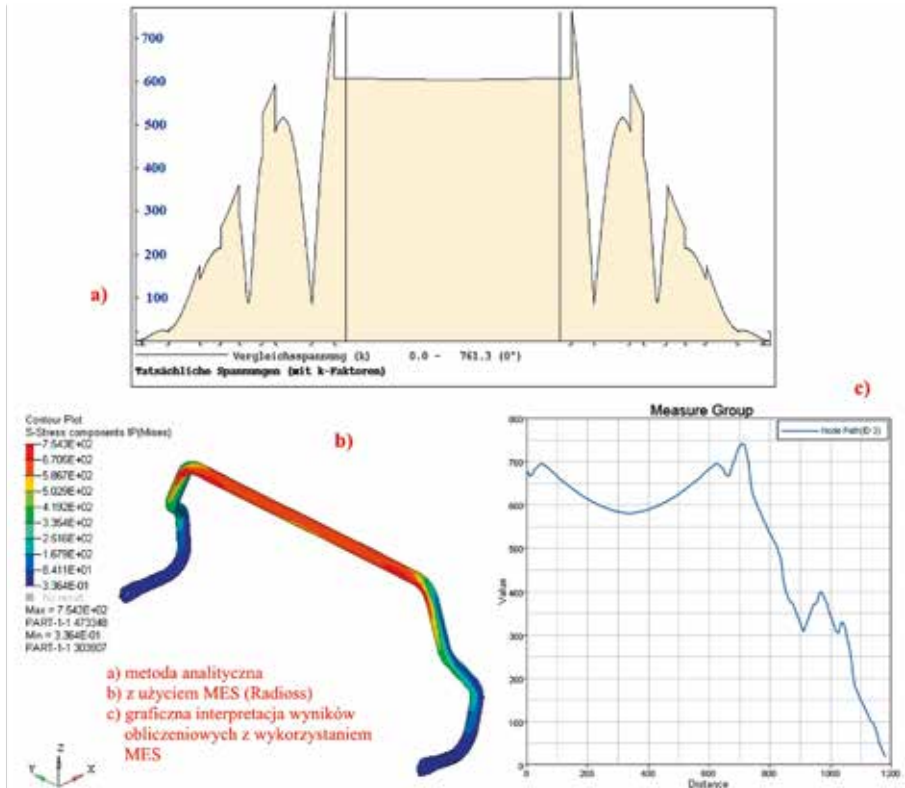
docelowe, takie jak naprężenia i odkształcenia, są oceniane w tych samych punktach i ekstrapolowane do odpowiedniego węzła.

2.5 Postprocessing – analiza wyników obliczeniowych

Końcowym etapem obliczeń z wykorzystaniem MES jest ocena i analiza wyników obliczeniowych. W tym celu wyniki obliczeniowe, takie jak siły, przemieszczenia, naprężenia, itp. są wczytywane do post procesora i mogą być przy jego pomocy [3, 9, 16] wizualizowane, dając podstawę do dalszej oceny i analizy.

Analiza wyników obliczeniowych jest trudnym i odpowiedzialnym zadaniem. Analiza ta powinna obejmować:

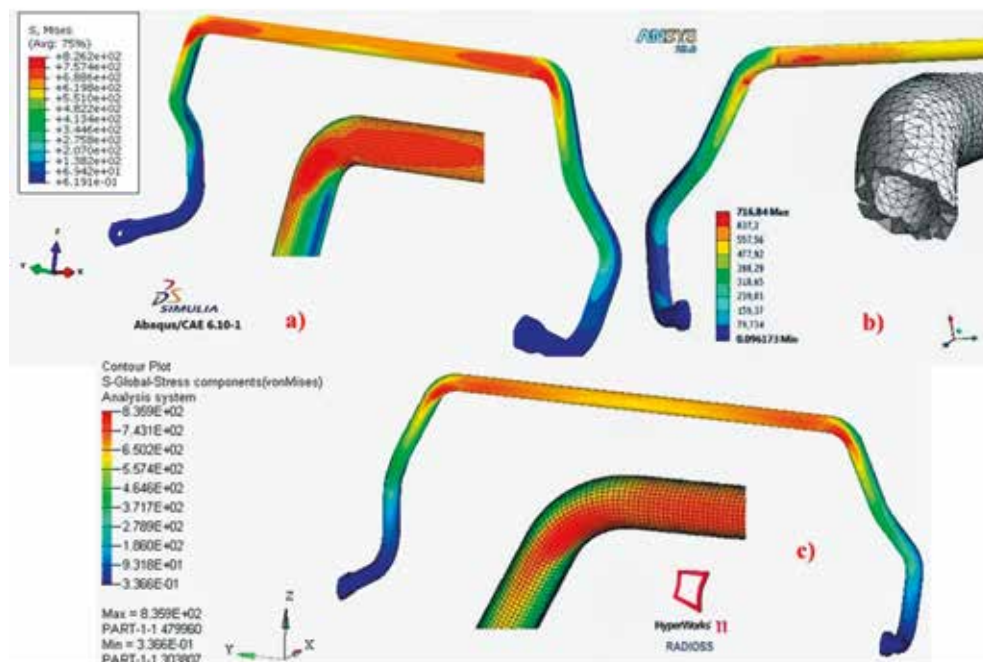
1. ocenę modelu obliczeniowego – określenie stref charakteryzujących się największymi, maksymalnymi naprężeniami (rys. 9c, 10a, b i c),



Rys. 9. Naprężenia zastępcze w obciążonym stabilizatorze

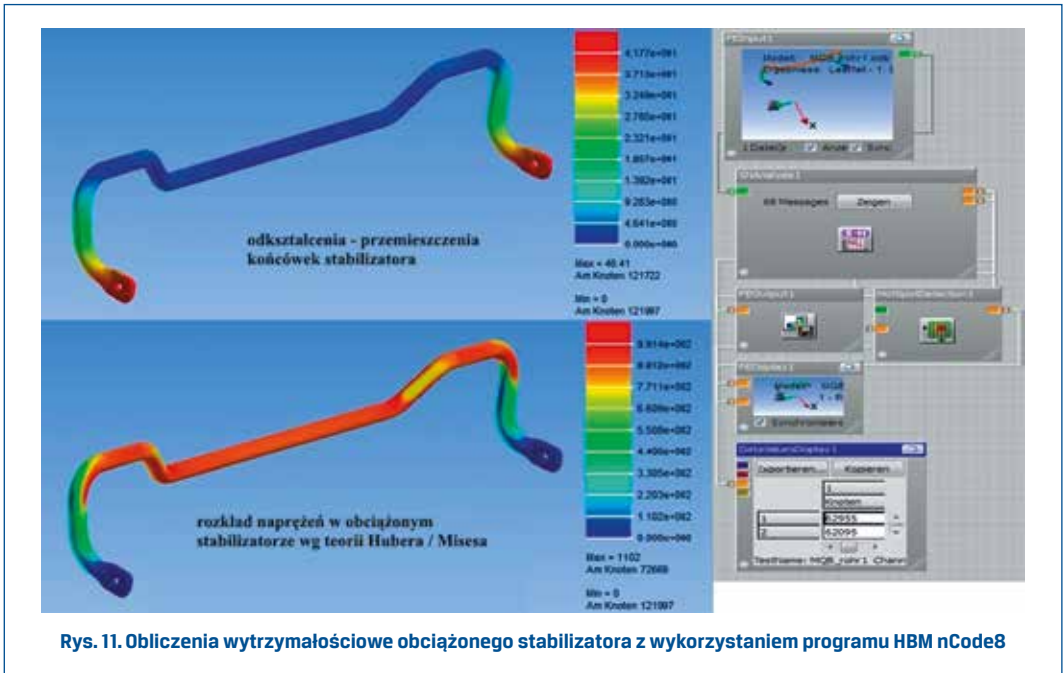
2. wyznaczenie wartości maksymalnych naprężeń (rys. 9b ic),
3. porównanie krzywej otrzymanej z obliczeń analitycznych, charakteryzującej rozkład naprężeń w obciążonym stabilizatorze z krzywą otrzymaną z obliczeń MES (rys. 9a ic),
4. w przypadku wystąpienia dużych różnic pomiędzy wynikami obliczeń analitycznych i MES należy skontrolować model obliczeniowy MES, a w szczególności warunki brzegowe.

W przypadku prawidłowo przeprowadzonej analizy MES odchyłki wynikowe nie powinny być większe niż $\pm 5\%$. Prawidłowo przygotowane modele, prawidłowo przeprowadzona analiza obliczeniowa MES prowadzi do porównywalnych wyników, niezależnie od zastosowanego solvera (rys. 10a, b ic).



Rys. 10. Wyniki obliczeniowe z zastosowaniem różnych programów MES (Abaqus a), Ansys b) HyperWorks - Radioss c)

Dalsze obliczenia – wytrzymałość zmęczeniowa (HBM nCode8) (rys. 11 i 12)



3. Wnioski

Każde prawidłowo przeprowadzone obliczenia i symulacje z wykorzystaniem MES (zgodnie z matrycą przedstawioną na rys. 1, 2) muszą być zakończone procesem walidacji i weryfikacji.

Plan weryfikacji i walidacji (plan V&V, rys. 13):

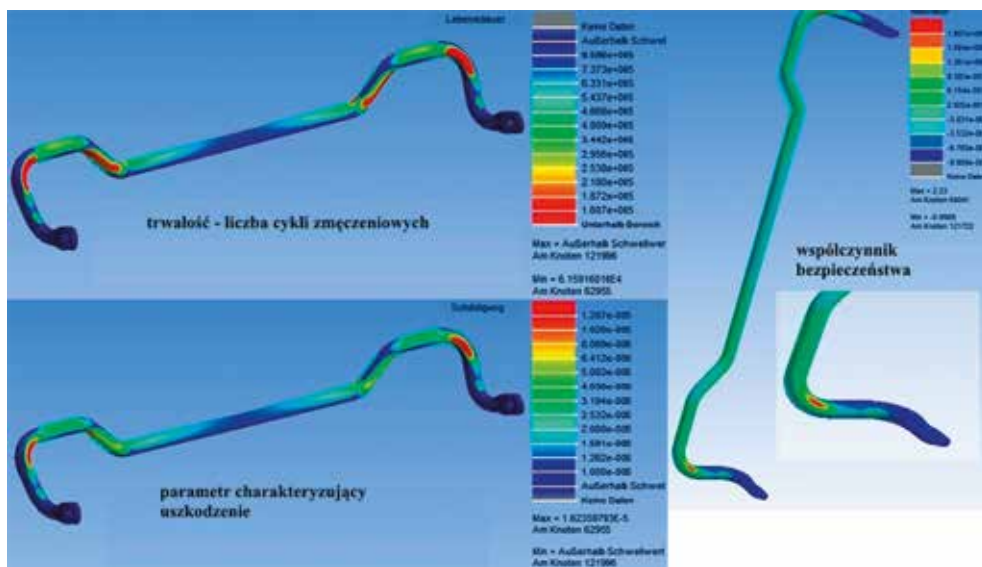
- uwagi ogólne,
- komentarze do przeprowadzonych eksperymentów,
- niepewności, wątpliwości,
- weryfikacje,
- referencyjne wartości niezbędne do walidacji,
- walidacja:** _____

Symulacja potwierdzona eksperymentami:

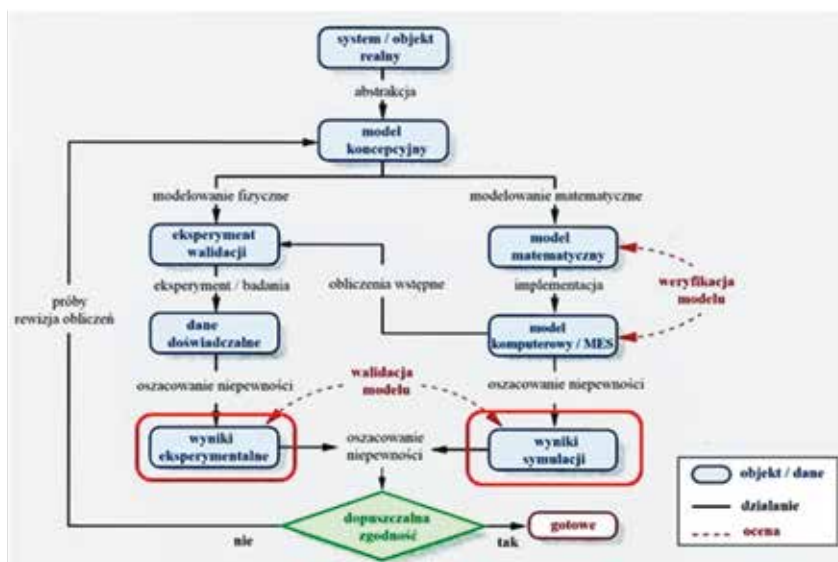
- walidacja – sprawdzenie poprawności obliczeń w oparciu o badania laboratoryjne,
- odpowiedź: zgodność obliczeń i eksperymentów jest do przyjęcia.

Symulacja potwierdzona rzeczywistymi warunkami eksploatacyjnymi:

- walidacja modelu obliczeniowego realnymi warunkami,
- uwaga: nie jest to równoznaczne z walidacją obliczeń przeprowadzonymi testami,



Rys. 12. Obliczenia wytrzymałości zmęczeniowej obciążonego stabilizatora z wykorzystaniem programu HBM nCode 8



Rys. 13. Szczegółowe opracowanie modelu, proces weryfikacji i walidacji (V&V Plan Thacker et.al., Los Alamos) [15]

- ewentualne potwierdzenie wynikające z podsumowania wyników eksperymentów uzupełniających (zastępczych),
- odpowiedź: zgodność obliczeń z warunkami realnymi jest do zaakceptowania.

Podsumowanie – weryfikacja wyników

Celem weryfikacji wyników jest:

- weryfikacja wyników obliczeniowych MES: poprawność i dokładność obliczeń z wykorzystaniem MES,
- walidacja modeli obliczeniowych: zgodność przeprowadzonych eksperymentów/obliczeń i symulacji z rzeczywistymi warunkami eksploatacji,
- walidacja obliczeń: zgodność przeprowadzonych eksperymentów z rzeczywistymi warunkami eksploatacji,
- cel: wystarczająca dokładność opisu rzeczywistych warunków eksploatacji czy też przeprowadzonych eksperymentów!

Modele obliczeniowe stabilizatorów samochodów Land Rover L405 i VW MQB, wykonanych przez autorów, zostały wykorzystane do przedstawienia optymalnego schematu obliczeniowego stabilizatorów samochodowych z wykorzystaniem MES. Te modele są poddawane w warunkach przemysłowych ciągłej weryfikacji i walidacji.

Literatura

- [1] Abaqus Version 6.10.: Volume I: Static and Dynamic Analyses. Dessault Systems 2010.
- [2] BANAŚ K.: *Metoda Elementów Skończonych*, Seminarium BIT CM UJ, Instytut Modelowania Komputerowego, Politechnika Krakowska, 17 maja 2006, 1–25.
- [3] BIELSKI J.: *Wprowadzenie do inżynierskich zastosowań MES*. Politechnika Krakowska, Wydanie 1, Kraków 2010.
- [4] DEGER Y.: *Die Methode der Finiten Elemente*, Kontakt und Studium, Band 551.5. Auflage, Expert Verlag, Renningen 2010.
- [5] FROELICH P.: *FEM – Anwendungspraxis. Einstieg in die Finite Elemente Analys*, 1. Auflage, Vieweg + Teubner, Wiesbaden 2005.
- [6] FISCHER W.: *Finite – Element – Methode*, Skript zur Vorlesung, Fachhochschule Dortmund, 4. Auflage, Wintersemester 2011/12, 1–27.
- [7] GABBERT U.: *Finite – Element – Methode*, Teil 1. Lehrstuhl für Numerische Mechanik, Vorlesung, Otto von Guericke Universität Magdeburg, 2012, 1–48.
- [8] GEBHARDT CH.: *Praxisbuch FEM mit ANSYS Workbench. Einführung in die lineare und nichtlineare Mechanik*. 1. Auflage Carl Hanser Verlag, München 2011.
- [9] KLEIN B.: *FEM – Grundlagen und Anwendungen der Finite-Element-Methode im Maschinen- und Fahrzeugbau*. 7. Auflage, Vieweg Studium Technik, Wiesbaden 2007.
- [10] Schulungsunterlagen HyperWorks11, Radioss. Fa. ALTAIR Deutschland GmbH, Hannover 2012.
- [11] SHIMOSEKI M., HAMANO T., IMAIZUMI T.: *FEM for springs*. 1. Auflage, Springer Verlag. Berlin – Heidelberg 2003.
- [12] REINERT U.: *Finite – Element – Methode*, Vorlesung. Fachhochschule Bremen, 2012, 1–24.
- [13] STEINBUCH R.: *Finite Elemente – Ein Einstieg*, 1. Auflage, Springer Verlag. Berlin – Heidelberg 1998.
- [14] THACKER B. H.: *Concepts of Model Verification and Validation*, Los Alamos, October 2004.
- [15] WITTEK A. M.: *Wpływ czynników konstrukcyjnych i technologicznych na trwałość stabilizatorów w pojazdach samochodowych*. Ph.D dissertation, Katowice 2013, 117–186.
- [16] FEM kurz und bündig, <http://www.smart-fem.de/fem.html>, Smart Engineering GmbH, 2013.