Ćwiczenie nr 11 MES

Wprowadzenie

Metoda elementów skończonych polega podziale obszaru analizy zjawisk na mniejsze elementy (skończone -dyskretyzacja) a następnie rozwiązaniu metodami numerycznymi równań opisujących dane zjawiska w węzłach podziału z uwzględnieniem warunków brzegowych. Otrzymane wyniki w węzłach są interpolowane na cały obszar.

Podstawowe kroki przy analizie MES

- 1. Budowa modelu geometrycznego, ustalenie materiału elementu z własnościami fizycznymi
- 2. Dyskretyzacja (budowa siatki)
- 3. Zadanie warunków brzegowych obciążenia, wiązania, kontakty
- 4. Opis fizyczny i rozwiązanie matematyczne (metodami numerycznymi)
- 5. Analiza wyników

Aplikacje, które umożliwiają wykonanie analizy MES mają wbudowane narzędzia do opisu fizycznego wybranych grup zjawisk (np. obliczenia mechaniczne, obliczenia wymiany ciepła i inne) wraz z układem służącym do przeprowadzenia obliczeń, zwalniając użytkownika z zajmowania się operacjami matematycznymi. Dodatkowo oferują możliwość praktycznie automatycznego generowania podziału na elementy skończone (siatki) wraz z grupą narzędzi do jej modyfikacji i optymalizacji. Do użytkownika należy budowa modelu geometrycznego, wybór materiału oraz zadanie warunków brzegowych w postaci np. (dla obliczeń wytrzymałościowych) działających sił, momentów, ciśnienia oraz zapewnienia reakcji analizowanego elementu w postaci mocowania (odebrania stopni swobody) wybranych fragmentów geometrii czy uwzględnienia wzajemnego kontaktu poszczególnych fragmentów geometrii. Kluczowym zagadnieniem jest właśnie odpowiednie zadanie warunków brzegowych oraz odpowiednie dobranie siatki tak aby uzyskane wyniki analiz miały być zgodne z rzeczywistymi wielkościami. Analiza wyników pod kątem zgodności z teorią i praktyką związaną z danym typem zagadnień oraz kontrola jakości wyników ze zmianą siatki są niezbędne w celu poprawnego przeprowadzenia analizy MES

MES w Inventorze

Program posiada wbudowane środowisko do analizy MES. Zostało ono szerzej opisane w instrukcji do Inventora (kurs podstawowy). W tej instrukcji zostaną podane informacje rozszerzające wiadomości z tego tematu ze szczególnym uwzględnieniem:

- 1. Zagęszczanie siatki ręczne, automatyczne, kontrola zbieżności
- 2. Upraszczanie modelu korzyści i pułapki
- 3. Pomijanie geometrii stwarzającej problemy
- 4. Mocowanie elementu automatyczne, sposoby mocowań
- 5. Powielanie symulacji
- 6. Kontakty

Siatka

W Inventorze dostępny jest tylko jeden rodzaj elementów – czworościany. Takie uproszczenie (brak możliwości zmiany rodzaju elementów) wynika z przyjętych założeń co do funkcjonowania tego modułu w programie i ograniczenia się do podstawowych analiz na etapie projektowania części czy zespołu.

Po uruchomieniu analizy MES dostępna jest sekcja Siatki (rys. 1) z poszczególnymi poleceniami (rys. 2-4)



Rys. 1. Sekcja Siatka z poleceniami **Widok siatki**, **Ustawienia Siatki**, **Lokalna kontrola siatki i Ustawienia zbieżności**

Ustawienia siatki ×				
Ustawienia ogólne				
Średnia wielkość elementu	þ, 100			
(jako ułamkowa długość ramki ogra	aniczającej)			
Minimalna wielkość elementu	0,200			
(jako ułamek średniej wielkości)				
Współczynnik gradacji	1,500			
Maksymalny kạt trójkạta siatki	60,00 deg			
Utwórz zakrzywione elementy siatki				
2	OK Anuluj			

Rys. 2. Okno polecenia Ustawienia siatki

W ustawieniach siatki należy uwzględnić:

- średnią wielkość elementu (jako ułamek wielkości całej części zalecana 0,05-0,1)
- minimalną wielkość elementu (jako ułamek wielkości średniej elementu, zalecana wartość to 0,1-0,2).
- Współczynnik gradacji, który określa szybkość zmiany rozmiaru siatki pomiędzy obszarem siatki drobnej i grubej. Współczynnik 2 oznacza, że długość krawędzi przyległego elementu nie jest większa niż 2 krotność wielkości bieżącego elementu (zalecana wartość z przedziału 1,5-3).
- Maksymalny kąt trójkąta siatki, który określa jak dużo elementów zostanie rozmieszczonych na zakrzywionych powierzchniach. Im mniejszy kąt tym więcej elementów zostanie rozmieszczonych (zalecana wartość to 30°-60°). Pozostawienie opcji Utwórz zakrzywione elementy siatki pozwala na lepsze oddanie powierzchni zakrzywionych.

Lokalna kontrola siatki	x
Powierzchnie lub kr	rawędzie
Wielkość elementu:	0,000 mm
2	OK Anuluj



Rys. 3. Polecenie Lokalna kontrola siatki

Lokalna kontrola siatki umożliwia dodatkowe zagęszczenie siatki dla wybranej powierzchni lub krawędzi. Wielkość elementu skończonego jest określana w mm

Ustawienia zbieżności			
þMaksymalna liczba wygładzeń h10,000Kryteria zatrzymania (%)0,750Próg wygładzania h (0 to 1)			
Rezultaty dla zbieżności Naprężenie Von Mises Pierwsze naprężenie główne Trzecie naprężenie główne Przemieszczenie	Wybór geometrii O Cała geometria Dołącz wybraną geometrię Wyklucz wybraną geometrię Powierzchnie		
2	Resetuj OK Anuluj		

Rys. 4. Okno polecenia Ustawienia zbieżności

Polecenie **Ustawienie zbieżności** umożliwia włączenie automatycznego zagęszczania siatki w stosunku do ustawień siatki. Określa się maksymalną ilość kroków h (dodatkowe kroki po pierwszych 3 krokach modyfikacji siatki polegających na zmianie stopnia wielomianu aproksymującego obiekt). Drugim ustawieniem jest Kryterium zatrzymania obliczeń przed wykonaniem wszystkich kroków h. Ta wartość wyrażona w procentach określa przy jakiej wartości zmian wielkości wybranej w kryteriach zbieżności (Sekcja **Rezultaty dla zbieżności**) obliczenia zostaną zatrzymane. Ostatnie ustawienie dotyczy ułamka liczby wszystkich elementów w których nie będzie przeprowadzane wygładzanie. Przy wartości 0,75 25% wszystkich elementów będzie wygładzanych i dotyczyć to wygładzanie będzie elementów o największej zmienności wartości. Dodatkowo można określić jaka część geometrii będzie analizowana przez wykluczenie części lub wybór całości. Po przeprowadzeniu obliczeń należy prześledzić ich przebieg – polecenie **Zbieżność/Wydruk zbieżności** (rys 5).





Rys. 5. Wydruk zbieżności z kryterium zatrzymania 1%

Analiza wyników z rys. 5 pokazuje, że dopiero po 5 krokach h (i 3 krokach p) uzyskano różnice w wynikach w kolejnych iteracjach poniżej 1% (dla naprężeń Von Mises). Po zmianie ustawień (kryterium 0,5%) i 8 krokach h wyniki analiz nie różnią się znacząco a czas obliczeń wydłużył się o dodatkowe 3 kroki (rys. 6).



Rys. 6. Wydruk zbieżności z kryterium zatrzymania 0,5%

Upraszczanie modelu

W przypadku modeli o złożonej geometrii tworzona siatka obliczeniowa składa się z dużej liczby węzłów i dodatkowo wymaga zagęszczania w miejscach gdzie występują niewielkie lica (o niewielkiej w stosunku do całego elementu powierzchni lub wymiarze charakterystycznym). Konieczne jest wówczas upraszczanie modelu lub uwzględnienie w modelu symetrii co pozwala ograniczyć obszar obliczeń np. do połowy lub nawet ¼ całej geometrii. Uproszczenia modelu dotyczą głównie tych małych powierzchni. Ich brak nie powinien prowadzić do błędnych wyników (wytrzymałość) bo ich udział w przekrojach i profilach narażonych na obciążenia jest pomijalny. Inne elementy, które można wykluczyć z analizy to

- Małe otwory o średnicy mniejszej niż 1/100 długości części.
- Zewnętrzne wypukłe zaokrąglenia o małym promieniu lub fazy.
- Odciśnięte etykiety lub elementy wypukłe.

Aby wykluczyć z obliczeń wybrany element geometrii należy w danej symulacji wskazać wybraną operację związaną wybranym elementem i wykluczyć z badania (rys. 7).



Rys. 7. Wykluczanie wybranej geometrii (operacji) z badania

Uwaga na osobliwości w przypadku sił działających na bardzo małej powierzchni – zagęszczanie siatki prowadzi do wzrostu naprężeń (siła działa na coraz mniejsze elementy) a tym samym następuje zmiana wartości naprężeń z zagęszczeniem siatki.

Pomijanie geometrii stwarzającej problemy

W czasie obliczeń występują miejsca, gdzie występuje nierealne spiętrzenie naprężeń – tzn. miejsca, gdzie w wyniku dyskretyzacji modelu (podziału na elementy skończone) występują wysokie naprężenia i dalsze zagęszczanie siatki nie poprawi zbieżności obliczeń. Należy wówczas wyłączyć te

powierzchnie z zagęszczania siatki bez wpływu na dokładność obliczeń. Wyłączenie wybranych powierzchni odbywa się w oknie ustawień zbieżności (rys. 4).

Mocowanie automatyczne, rodzaje mocowań

W środowisku MES nie zawsze jest konieczność ręcznego ustawiania wiązań nieruchomych. Wystarczy w momencie uruchamiania analizy wskazać opcję *Wykryj i wyeliminuj postać bryły sztywnej* (rys. 8) – co zapewni automatyczne przeciwdziałanie siłom powodującym przesunięcie elementu

Edytuj właściwości badania			x	
<u>N</u> azwa:		Analiza statyczna: 1		
<u>C</u> el projektu:		Jeden punkt	\sim	
Typ badania Stan modelu				
Analiza statyczna				
Wykryj i wyeliminuj postaci bryły sztywnej				
Oddziel naprężenia wzdłuż powierzchni kontaktu				
Analiza obciążeń w ruchu				

Rys. 8. Mocowanie automatyczne w poleceniu Edytuj właściwości badania

Oprócz wiązania nieruchomego warto stosować inne typy wiązań – sworzniowe i beztarciowe. Wiązanie nieruchome odbiera wszystkie stopnie swobody (3 kierunki) wskazanej powierzchni. Przy kilku powierzchniach styku odbieranie wszystkich stopni swobody nie jest prawidłowe bo dodaje obciążenia związane z ograniczeniem przesunięcia fragmentu elementu wywołanego działającymi siłami

Wiązanie sworzniowe daje możliwość unieruchamiania w wybranych kierunkach (osiowym, promieniowym i stycznym) a tym samym daje możliwość uniknięcia przesztywnienia układu. Podobnie wiązanie beztarciowe odbiera tylko 1 stopień swobody (w kierunku prostopadłym do powierzchni).

Wiązania powodują, że w po obciążeniu elementu pojawiają się w nich siły reakcji - można je odczytać – są dostępne z menu podręcznego danego wiązania (rys. 9).

Siły reakcji ×			
	Siła reakcji	Moment reakcji	
Razem	1000 N	1,3e+05 N mm	
x	0 N	-1,3e+05 N mm	
Y	1000 N	0 N mm	
Z	0 N	0 N mm	
2		ОК	

Rys. 9 Siły reakcji wiązania

Powielanie symulacji

Często istnieje konieczność wykonania obliczeń z zastosowaniem różnych ustawień np. siły czy parametrów siatki. Nie trzeba dla każdego wariantu tworzyć wszystkich ustawień symulacji. Wystarczy utworzyć jedną symulację a następnie powielić ją (opcja Kopiuj badanie –menu kontekstowe rys. 10) i wyedytować konieczne zmiany.



Rys. 10. Kopiowanie badania

Kontakty

	a staturzna 2	×	
l projektu Jadan	auglit co		
Jeden	punkt		
Typ badania Stan modelu			
Analiza statyczna			
🗌 Wykryj i wyeliminuj postac	i bryły sztywnej		
Oddziel naprężenia wzdłu:	z powierzchni kontaktu		
Analiza obciażeń w ruchu			
Cześć	Przedział czasu		
🔿 Analiza modalna			
🗹 Liczba postaci	8		
Zakres częstotliwości	0,000 - 0,000		
Oblicz postaci z uwzględni	eniem obciążeń		
Rozszerzona dokładność			
Kontakty			
Tolerancja	Тур		
0,100 mm	Związane	1	
Normalna sztywność	Związane	📑 Automatycznie	
0,000 N/mm	Przesuwne / Bez separacji	Automatyczni	-
Tolerancja złącza skorupy	Separacja / Nieprzesuwne Pasowanie skurczowe / Przesuwne Pasowanie skurczowe / Nieprzesuwne	📑 Ręcznie	
(jako wielokrotność grubości s	koru, Sprężyna	ia	

Rys. 11. Tworzenie kontaktów na etapie tworzenia badania i sekcja Kontakty w pasku środowiska MES

W celu urealnienie wzajemnego oddziaływania poszczególnych elementów zespołu wprowadza się pomiędzy nimi kontakty. Mogą one być automatyczne lub wstawiane ręcznie. Kontakty automatyczne definiuje się na etapie tworzenia analizy w dolnej części okna z rys. 8 (rys. 11) – z listy dostępnych typów kontaktów wybiera się ten, który ma być automatycznie wygenerowany a podaniem tolerancji (odległości między elementami, przy której kontakt ma być ustanowiony). Utworzenie kontaktów automatycznych następuje po wywołaniu polecenia Kontakty – Automatycznie na karcie Analizy. Tak utworzone kontakty mogą być następnie edytowane/zmieniane lub wyłączane przez odpowiednią pozycję w przeglądarce Analizy (rys.12)

N	1odel	×	+	QE
1	Zespół	M	odelowanie Badanie_	
Ê	b Zes	pół_k	contakt.iam	
ł	F 🔁 /	Analia	za statyczna:1	
•	- 2	Analia	za statyczna:2	
	+-[b Ze	espół_kontakt.iam	
	[4	©]M	ateriał	
	[≣w	liązania	
	<u>+</u>	<u></u> 0	bciążenie	
		- Ko	ontakty	
	•	-	j Związane	
		-		
		-		
		-		
		-		
		Si	atka	
	i[W	/yniki	

Rys. 12. Utworzone kontakty w zespole

Dostępne są następujące kontakty pomiędzy elementami

- Związane –symuluje wzajemne wiązanie sztywne powierzchni dwóch elementów np. połączenia spoinowe lub klejone między częściami
- Rozdzielenia powoduje rozdzielenie części tj zapobiega wzajemnemu przenikaniu części. W czasie przesunięcia jednej części (np. w wyniku obciążenia) zdefiniowanie takiego kontaktu zapewnia oparcie się tej części o drugą
- Przesuwne /bez separacji pozwala na przesuwanie powierzchni kontaktu, lecz zapobiega rozdzieleniu obu części
- Separacja /nieprzesuwne pozwala na rozdzielenie powierzchni kontaktowych, lecz zapobiega względnemu przesuwaniu się części
- Pasowanie skurczowe/ przesuwne -kontaktu Przesuwne/bez separacji z częściami w początkowym stanie kolizji.
- Pasowanie skurczowe/nieprzesuwne odpowiednik kontaktu Separacja/nieprzesuwny z częściami w początkowym stanie kolizji.
- Sprężyna symuluje warunki sprężyny między dwoma powierzchniami

Te same kontakty są dostępne w trybie ręcznym wprowadzania kontaktów

Ćwiczenie nr 11. MES - Zadania do wykonania

Zadanie 1. Analiza elementu

Wykonać element zgodnie z rysunkiem, materiał - stal węglowa.



Przeprowadzić analizę MES elementu w kolejnych wariantach. Element mocowany (unieruchomiony) tylną ścianką. Stosować kopiowanie analiz.

- Rozciąganie siłą 10 kN zamocowaną na górnej powierzchni stożka. Sprawdzić wpływ rozmiaru siatki (ustawienia siatki, kontrola lokalna siatki) oraz wpływ zaokrąglenia na uzyskane wyniki oraz na wykorzystane zasoby obliczeniowe (liczba węzłów i elementów)
- Zginanie przy pomocy siły 500N zamocowanej na powierzchni górnej stożka skierowanej prostopadle do tej powierzchni.
 Sprawdzić rolę zaokrąglenia i ustawień siatki na uzyskane wyniki.

Ustawienia zbieżności ×		
5 Maksymalna liczba wygładzeń h 1,000 Kryteria zatrzymania (%) 0,750 Próg wygładzania h (0 to 1)		
Rezultaty dla zbieżności Naprężenie Von Mises Pierwsze naprężenie główne Trzecie naprężenie główne	Wybór geometrii Cała geometria Dołącz wybraną geometrię Wyklucz wybraną geometrię	
O Przemieszczenie	Powierzchnie	
3	Resetuj OK Anuluj	

Przeprowadzić analizę zbieżności stosując poniższe ustawienia i sprawdzić wielkość siatki

Zadanie 2. Analiza kontaktów w zespole



Wykonać zespół zgodnie z rysunkiem.

Materiał stal węglowa (podstawa), Stal o wysokiej wytrzymałości niskostopowa (dwie sprężyny płaskie)

Przeprowadzić analizę MES – obciążenie siłami po 25N

- Przeprowadzić analizę bez kontaktu rozdzielenia, określić maksymalne przesunięcie
- W drugiej wersji wstawić kontakt <u>rozdzielenie</u> w lewej parze podstawa sprężyna w celu uniknięcia przenikania brył – określić różnicę w przesunięcia końca sprężyny dla obu sprężyn



Zadanie 3. Wykonać model zgodnie z rysunkiem i określić maksymalną siłę rozciągającą, która nie spowoduje przekroczenia granicy plastyczności ze współczynnikiem bezpieczeństwa 2.

Materiał stal węglowa – sprawdzić granicę plastyczności materiału.

Mocowanie elementu sworzniowe.

Sprawdzić możliwość usunięcia z analizy zaokrągleń i fazowania.

Sprawdzić wpływ wielkości siatki na zbieżność wyników



Zadanie 4

Wykonać model wspornika pod półkę ścienną zgodnie z rysunkiem. Przeprowadzić analizę MES.



Wspornik wykonać z stali węglowej.

Wspornik obciążyć z góry siłą 1100N.

Dobrać wielkość siatki.

Sprawdzić wpływ różnych sposobów mocowania elementu na wyniki obliczeń

Ocenić wpływ odchylenia od pionu zamocowania wspornika (brak pionowego ustawienia śrub mocujących) na pracę układu

Określić wpływ uwzględnienia w obliczeniach zaokrągleń na wyniki obliczeń

Zaproponować wzmocnienie elementu pozwalające na przeniesienie większego obciążenia