

# Wykorzystanie metody CMS do budowy efektywnego numerycznie modelu MES

## Using CMs method for construction of numerically efficient FEM model

PIOTR DANIELCZYK \*

Materiały z XX SKWPIE, Jurata 2016 r.  
DOI: 10.17814/mechanik.2016.7.120

W pracy przedstawiono efektywny numerycznie model obliczeniowy do rozwiązania zadania optymalizacji parametrycznej z wykorzystaniem metody elementów skończonych. Do budowy modelu obliczeniowego użyto superelementów, a do redukcji rozmiaru zadania wykorzystano metodę Component Mode Synthesis. Pokazano korzyści wynikające z przyjętej metodyki modelowania w odniesieniu do czasu potrzebnego na znalezienie rozwiązania optymalnego oraz wielkości plików generowanych podczas analizy.

**SŁOWA KLUCZOWE:** optymalizacja, metoda elementów skończonych, efektywność numeryczna, superelement

*The paper presents a numerically efficient computational model for solving a parametric optimization problem with the use of the Finite Element Method. Building a computational model involved applying superelements and the CMS method was applied for model reduction. The advantages of the adopted modelling methodology were shown with reference to the time required to find the optimal solution and the size of the files generated during the analysis.*

**SŁOWA KLUCZOWE:** optimization; finite element method; computational efficiency; superelement

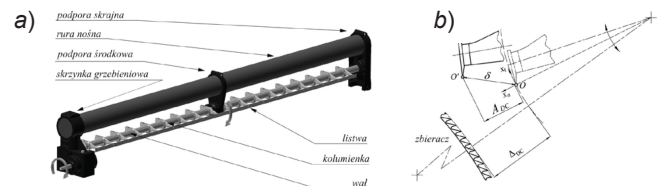
Efektywność numeryczna skończenie elementowego modelu obliczeniowego ma kluczowe znaczenie w rozwiązywaniu zadania optymalizacji parametrycznej. Poszukiwanie rozwiązania optymalnego jest procesem iteracyjnym, co w przypadkach złożonych modeli MES i skomplikowanych analiz, np. w zadaniach dynamiki, wymaga zaangażowania znacznych zasobów komputerowych (czasu procesora i wielkości pamięci). Z tego powodu często wykorzystywane są sposoby modelowania pozwalające na redukcję rozmiaru zadania poprzez zmniejszenie liczby węzłów modelu. W zadaniach analizy dynamicznej do redukcji rozmiaru zadania często wykorzystuje się metodę CMS (Component Mode Synthesis), zaimplementowaną w większości komercyjnych pakietów metody elementów skończonych w sformułowaniu podanym np. przez Craiga i Bamptona [1], a będącą rozszerzeniem metody Gyuana [2].

Prezentowana praca w założeniu ma być studium efektywności wykorzystania metody kondensacji dynamicznej CMS w rozwiązywaniu zadania optymalizacji parametrycznej z wykorzystaniem metody elementów skończonych. Porównane zostaną rozwiązania tego samego zadania przy wykorzystaniu modelu pełnego oraz modelu zredukowanego. Ocenie będzie podlegała zarówno jakość rozwiązań, jak i efektywność numeryczna modeli.

### Obiekt analizy

Analizie poddano urządzenie (rys. 1a) stosowane do odbierania półproduktu włókienniczego zwanego runkiem, a znajdującego zastosowanie w zgrzeblarkach wałkowych [3]. Konstrukcję podwieszającą stanowią podpory skrajna i środkowa (dzielona) oraz rura podwieszająca i skrzynka grzebieniowa. Na wale zamocowano szereg kolumienek, które łączą go

z listwą. Zabudowany w skrzynce grzebieniowej mechanizm korbowo-wahaczowy zamienia ruch obrotowy silnika napędowego na oscylacyjny ruch obrotowy wału grzebieniowego.



Rys. 1. Grzebień szcieszający niedzielony: a) postać konstrukcyjna, b) współpraca ze zbieraczem

Ruchowi wału grzebieniowego towarzyszą drgania listwy niekorzystnie wpływające na kształt i wielkość  $\Delta_{DC}$  szczeliny pomiędzy listwą a współpracującym z nią bębnum zbierającym-zbieraczem (rys. 1b). Pożądane jest, aby kształt szczeliny był jak najbardziej zbliżony do prostokątnego i równomierny na całej szerokości roboczej maszyny. Osiągnięcie tego celu wymaga zmniejszenia amplitudy drgań w kierunku normalnym do założonego toru ruchu  $A_{DC}$ . Z uwagi na sprzężenia drgań giętych i drgań skrętnych podczas ruchu wału grzebieniowego będzie to możliwe poprzez zmniejszenie odległości  $\delta$  pomiędzy położeniem rzeczywistym  $O$  i teoretycznym  $O'$  punktów na krawędzi listwy grzebieniowej.

Zadanie optymalizacji parametrycznej, którego celem było zmniejszenie odchylenia od założonych (teoretycznych) trajektorii ruchu punktów na krawędzi listwy grzebieniowej układu opisano szczegółowo i podano jego rozwiązanie w [4].

Do obliczeń wykorzystano tam pełny model dyskretny wału grzebieniowego, składający się z blisko 372 000 węzłów oraz 351 000 elementów. Przeprowadzone analizy wymagały zaangażowania znaczących zasobów pamięci (pliki zajęły ok. 900 GB), a czas obliczeń wyniósł blisko 270 godzin.

### Metodyka rozwiązywania zadania optymalizacji

Do poprawy efektywności procesu rozwiązania tego samego zadania optymalizacji proponuje się wykorzystać model obliczeniowy z superelementami zastosowanymi w niestandardowy sposób. Zazwyczaj wykorzystanie metod kondensacji w analizie sprowadza się do jednorazowego określenia węzłów głównych i zależnych modelu oraz wyznaczenia odpowiednich macierzy sztywności, mas, ew. tłumienia dla superelementu. W prezentowanej pracy proces redukcji przebiega inaczej. Istota tego pomysłu polega na tym, że odpowiednie macierze dla superelementu wraz z definicją węzłów głównych i węzłów zależnych dla modelu są odnawiane w każdej iteracji podczas rozwiązywania zadania optymalizacji (stosownie do zmian wartości zmiennych decyzyjnych). Tak utworzony superelement jest powielany odpowiednią liczbą.

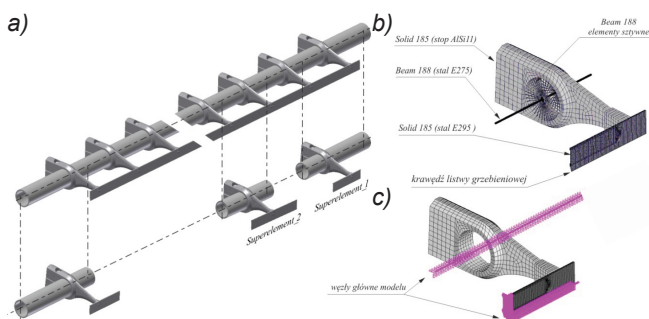
Wszystkie obliczenia przeprowadzono, wykorzystując pliki wsadowe dla pakietu metody elementów skończonych ANSYS® przygotowane w języku APDL (Ansys Parametric Design Language). Do oceny efektywności przyjętego sposobu postępowania opracowano skrypt działający w interpreterze

\* Dr inż. Piotr Danielczyk – Akademia Techniczno-Humanistyczna w Białymostku-Białej

Windows Power Shell, który w czasie rzeczywistym monitoruje rozmiar folderu roboczego pakietu, jednocześnie odnotowując czas trwania obliczeń.

### Model obliczeniowy




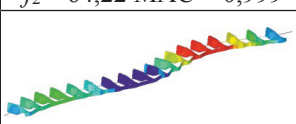
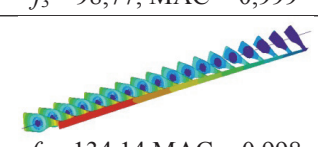
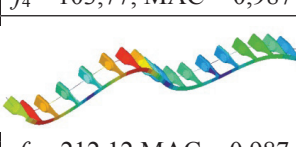
Przy opracowywaniu modelu dyskretnego do rozwiązania opisanego zadania optymalizacji parametrycznej uwzględniono jedynie odkształcenia wału, a konstrukcję podwieszającą potraktowano jako sztywną (rura podwieszająca jest blisko 80 razy sztywniejsza na zginanie od wału). Ponadto pominięto nieznaczne zaokrąglenia, a wszystkie połączenia śrubowe potraktowano jako nieodkształcalne. Model grzebienia opracowano, bazując na modelach tych części wału grzebieniowego, dla których można zdefiniować superelementy. W analizie wykorzystano dwa typy superelementów (*Superelement\_1* oraz *Superelement\_2*) określone odpowiednio dla skrajnej części grzebienia i powtarzalnego fragmentu z jego części środkowej (rys. 2a). Model dyskretny do definicji pojedynczego superelementu (por. [4]) pokazano na rys. 2b.



Rys. 2. Sposób budowy modelu obliczeniowego: a) definicja superelementów, b) dyskretyzacja superelementu, c) węzły główne modelu

Węzły główne modelu określono w miejscach połączenia superelementów ze sobą oraz w węzłach wału i na krawędzi listwy grzebieniowej. Taki wybór umożliwia bardzo dobre odwzorowanie własności dynamicznych modelu przed redukcją. Potwierdzają to wyniki analizy modalnej. Dla pierwszych 6 postaci drgań własnych uzyskano identyczne wartości częstotliwości drgań własnych, a wartości kryterium MAC (*Modal Assurance Criterion*) są bliskie jedności.

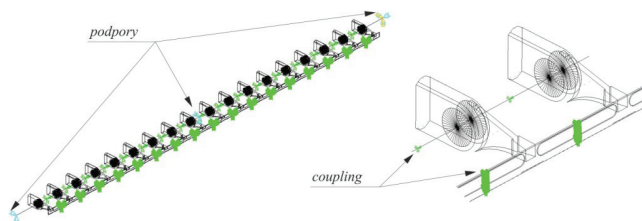
TABLICA. Postacie drgań własnych grzebienia, częstotliwości oraz wartości kryterium MAC

 $f_1 = 57,64 \text{ Hz}$ , MAC = 0,999	 $f_2 = 64,22 \text{ Hz}$ , MAC = 0,999
 $f_3 = 98,77 \text{ Hz}$ , MAC = 0,999	 $f_4 = 103,77 \text{ Hz}$ , MAC = 0,987
 $f_5 = 134,14 \text{ Hz}$ , MAC = 0,998	 $f_6 = 212,12 \text{ Hz}$ , MAC = 0,987

Kompletny model obliczeniowy grzebienia pokazano na rys. 3. Zdefiniowane wcześniej superelementy zostały powielone (lustrzane odbicie – *Superelement\_1* oraz kopie – *Superelement\_2*), a następnie połączone ze sobą za pomocą równań

więzów (*coupling*). W rezultacie otrzymano model na który składają się 6654 węzły oraz 18 superelementów.

Do rozwiązania równań ruchu wykorzystano metodę Newmarka z automatycznym doбором kroku całkowania [5], zadowalając się rozwiązaniami dla węzłów głównych modelu.



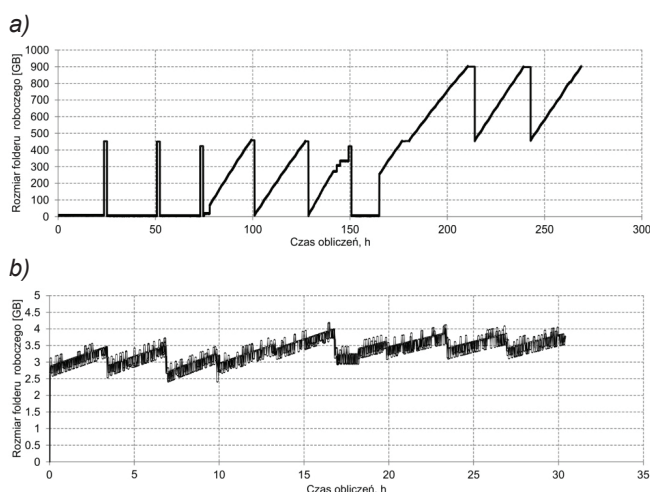
Rys. 3. Model grzebienia złożony z superelementów

### Wyniki obliczeń, podsumowanie

Optymalne wartości funkcji celu  $Q$  uzyskane z analizy modelu pełnego [4] oraz przedstawionego modelu zredukowanego różnią się o 1,9%, a różnice w wartościach zmiennych decyzyjnych nie przekraczają 4,8%.

Maksymalna wartość składowej normalnej drgań  $A_{DC}$  zmniejszyła się z 168  $\mu\text{m}$  dla konstrukcji wyjściowej do 118  $\mu\text{m}$  dla rozwiązania optymalnego.

Dla potwierdzenia efektywności zaproponowanego modelu obliczeniowego sporządzono wykres obrazujący zużycie zasobów komputerowych, tj. czasu obliczeń i rozmiaru pamięci wykorzystywanej w trakcie obliczeń. Wynik dla modelu pełnego oraz modelu po redukcji (dla rozwiązania w węzłach głównych) pokazano na rys. 4. Czas obliczeń dla modelu zredukowanego (rys. 4b) jest prawie dziewięciokrotnie krótszy, a rozmiar folderu roboczego blisko 215 razy mniejszy niż dla analizy modelu pełnego (rys. 4a).



Rys. 4. Zestawienie sumarycznego czasu obliczeń i zużycia zasobów dyskowych przy optymalizacji grzebienia: a) model pełny, b) model CMS – rozwiązania w węzłach głównych

### LITERATURA

1. Craig R.R. JR., Bampton M.C.C. "Coupling of substructures for dynamic analyses". *AIAA Journal*, No. 6, pp. 1313-1319, 1968.
2. Guyan J., "Reduction of stiffness and mass matrices". *AIAA Journal*, No. 3, pp. 380, 1965.
3. Chylewska B., Domagała M. „Przędzalnictwo: budowa i technologia przędz”. Wydawnictwo Politechniki Łódzkiej, 1999.
4. Danielczyk P., Stądnicki J. „Ocena współpracy podzespołów zgrzeblarki wałkowej po optymalizacji ich konstrukcji”. *Mechanik*, nr 7, s. 159-168, 2015.
5. Bathe K.J. "Finite Element Procedures". Prentice-Hall. Englewood Cliffs, 1996.