

6.8. DRGANIA NIEUSTALONE.

DRGANIA WYMUSZONE MODELU RAMIENIA ROBOTA

6.8.1. Wprowadzenie

Drgania elementów konstrukcji oraz całej konstrukcji są ważnym zagadnieniem techniki. Wynikają one bezpośrednio z własności sprężystych materiału. Szczególnie ważny jest specjalny przypadek, gdy działające na konstrukcję nawet niewielkie okresowo-zmienne siły zewnętrzne w warunkach tzw. rezonansu mogą wywołać bardzo groźne skutki, do zniszczenia konstrukcji włącznie.

Powtarzające się okresowo zmienne obciążenia prowadzą do wcześniejszego zniszczenia konstrukcji, która wytrzymała działanie obciążenia statycznego równego maksymalnej wartości obciążenia okresowo zmiennego. Tłumaczy się to zjawiskiem zmęczenia materiału.

Teoretyczna i eksperymentalna analiza drgań rzeczywistych konstrukcji nie jest możliwa bez pominięcia pewnych czynników i uproszczenia niektórych związków. Otrzymujemy w ten sposób wyidealizowany model fizyczny, który nazywamy *układem zastępczym*. Posiada on własności zbliżone do własności układu rzeczywistego.

Przejście od układu rzeczywistego do zastępczego polega najczęściej na ograniczeniu liczby stopni swobody, uproszczeniu związków konstytutywnych pomiędzy siłami sprężystymi a odkształceniami, pominięciu pewnych oporów ruchu oraz uproszczeniu schematu działania sił zewnętrznych. Wymaga to przeprowadzenia szczegółowej analizy charakteru rzeczywistych obciążeń układu, jego odkształceń, sił wewnętrznych oraz własności dynamicznych. Tylko w ten sposób można dobrać prawidłowy układ zastępczy, którego własności nie będą odbiegały znacząco od własności układu rzeczywistego.

Ze względu na charakter zjawisk zachodzących w układach rozróżnia się drgania *liniowe* i *nieliniowe*, w zależności od tego, czy zjawiska te są opisane liniowymi lub nieliniowymi równaniami różniczkowymi. Układy rzeczywiste są z natury rzeczy nieliniowe. Jednakże ze względu na duże trudności matematyczne, na jakie napotyka się przy analizie problemów nieliniowych, dokonuje się ich linearyzacji. W większości przypadków uproszczenie to wpływa nieznacznie na wyniki analizy. Analiza liniowa ma duże znaczenie praktyczne, ponieważ w wielu przypadkach daje wystarczająco dokładne rozwiązanie zagadnień inżynierskich, a w innych – przynajmniej orientacyjne ale stanowiące często podstawę oceny technicznej. Dla dobrego zrozumienia prezentowanych problemów niezbędna jest podstawowa wiedza dotycząca drgań układów dyskretnych, przedstawiona w ramach Mechaniki Ogólnej. Za pomocą MES możemy analizować każdy omówiony wyżej przypadek.

Nieustalona analiza dynamiczna (*Transient Dynamic Analysis*) służy do wyznaczania dynamicznej odpowiedzi układu na zależne od czasu wymuszenie. Za jej pomocą można wyznaczyć przemieszczenia, odkształcenia, naprężenia i siły w funkcji czasu jako odpowiedź na jakąkolwiek kombinację statycznego, nieustalonego i harmonicznego obciążenia. Stosuje się ją, gdy czas działania obciążeń jest taki, że nie można pominąć sił bezwładności i tłumienia.

Równania opisujące drgania własne oraz ruch układu pod wpływem obciążeń zewnętrznych mają postać (patrz również ćwiczenie 6.7):

$$\begin{aligned} M\ddot{u} + Ku &= 0 \\ M\ddot{u} + C\dot{u} + Ku &= F(t) \end{aligned} \tag{6.8.1}$$

gdzie: M jest macierzą masową, C – macierzą tłumienia, K – macierzą sztywności,
 \ddot{u} – wektorem przyspieszeń węzłowych, \dot{u} – wektorem prędkości węzłowych,
 u – wektorem przemieszczeń, $F(t)$ – wektorem obciążeń.

Istnieją trzy metody rozwiązywania równań ruchu (6.8.1): pełna (*Full*), superpozycji modalnej (*Mode Superposition*) oraz redukcji stopni swobody (*Reduced*).

6.8.1.1. Metoda pełna

W metodzie pełnej całkuje się bezpośrednio układ równań ruchu (6.8.1). Jest to najbardziej ogólna metoda, ponieważ układ równań może być układem nieliniowym wynikającym między innymi z uwzględnienia dużych ugięć, nieliniowych równań konstytutywnych, kontaktu pomiędzy elementami

konstrukcji itd. Dodatkowymi zaletami tej metody są: łatwość użycia oraz fakt, że przemieszczenia i naprężenia są obliczane bezpośrednio. Główną wadą jest to, że czasy obliczeń są stosunkowo długie, szczególnie dla długich okresów.

6.8.1.2. Metoda superpozycji modalnej

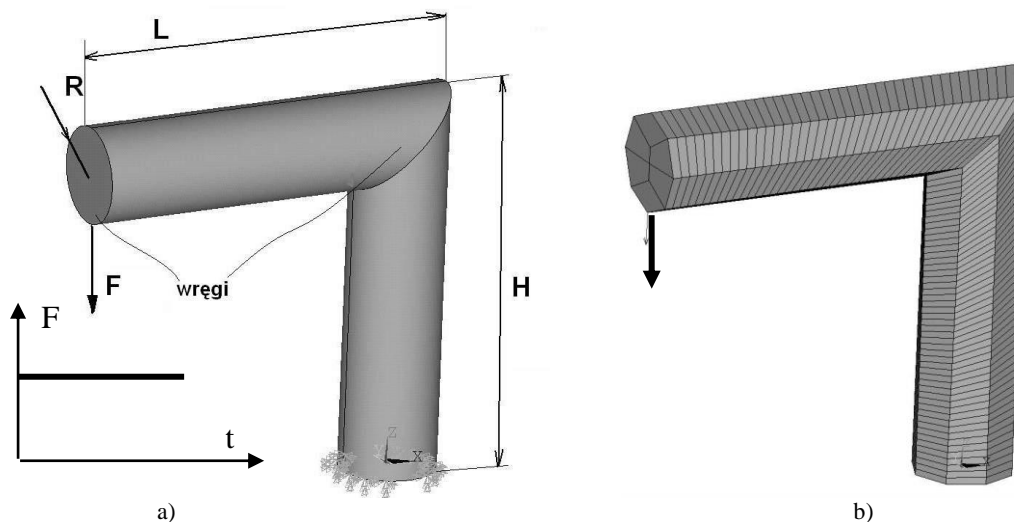
W metodzie superpozycji modalnej ruch ciała opisuje się za pomocą kombinacji liniowej postaci (wektorów) drgań własnych. Podstawową jej zaletą jest stosunkowo krótki czas obliczeń dla dowolnej chwili czasowej. Jej wadami są: stały krok czasowy podczas obliczeń, możliwość użycia tylko kontaktu typu węzeł do węzła (*node-to-node*), brak akceptacji narzuconych (niezerowych) przemieszczeń.

6.8.1.3. Metoda redukcji stopni swobody

W metodzie redukcji następuje kondensacja układu równań (6.8.1) do głównych stopni swobody (*master degrees of freedom - MDOF*). Wymiary macierzy masy, sztywności oraz tłumienia ulegają zwykle znacznej redukcji. Po wyznaczeniu głównych stopni swobody (*MDOF*) następuje określenie pozostałych przemieszczeń nie będących głównymi stopniami swobody. Zaletą tej metody jest zwykle krótszy czas obliczeń niż przy metodzie pełnej. Do wad natomiast możemy zaliczyć to, że: nie mogą być używane obciążenia przyłożone do elementów (ciśnienia, temperatury itp.), krok czasowy musi pozostać stały w czasie obliczeń, można uwzględnić tylko kontakt typu węzeł do węzła (*node-to-node*).

6.8.2. Rozwiązywane zagadnienie

Wyznaczyć przemieszczenia w funkcji czasu w modelu ramienia robota składającego się z dwóch połączonych duralowych rur o grubości ścianki $h=1\text{mm}$ (rys. 6.8.1a). Ramię jest utwierdzone w dolnym przekroju, a na drugim końcu obciążone siłą $F=100\text{N}$. W przekrojach końcowych oraz w łączeniu rur znajdują się pełne wręgi.



Wymiary konstrukcji: $L=400\text{mm}$, $H=400\text{mm}$, $R=50\text{mm}$, $h=1\text{mm}$.
Właściwości mechaniczne materiału: $E=70000\text{MPa}$, $\mu =0,34$, $\rho =2700\text{kg/m}^3$. Obciążenie: siła $F=100\text{N}$.

Rys. 6.8.1. Model ramienia robota: a) wymiary geometryczne, b) model MES

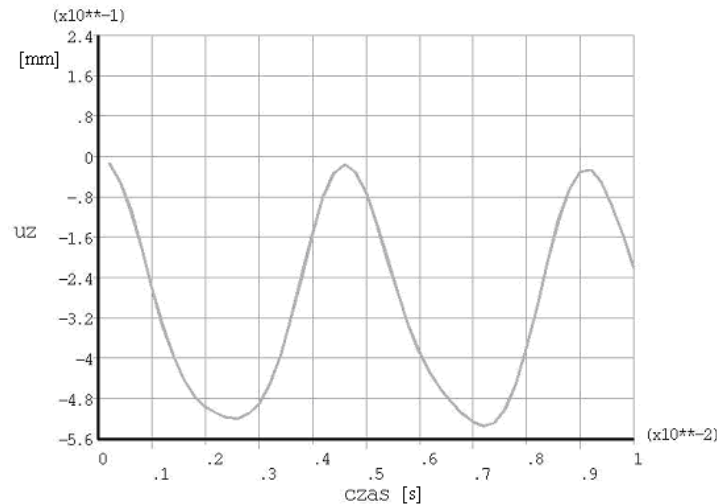
Do budowy modelu MES można wykorzystać elementy powłokowe typu SHELL181. Przykładowy model pokazany został na rysunku 6.8.1b.

W wyniku analizy otrzymać możemy pełny obraz przemieszczeń i naprężeń w dowolnej chwili czasowej. Przykładowe wyniki – drgania pionowe węzła, do którego przyłożono w początkowej chwili czasu stałą siłę pokazane zostały na rysunku 6.8.2.

6.8.3. Typowy przebieg analizy numerycznej

6.8.3.1. Preprocessor

- A. Wybranie elementu typu SHELL181
- B. Zdefiniowanie dwóch walców o wymiarach przedstawionych na rys. 6.8.1a, dokonanie operacji ich wzajemnego przenikania, oraz zbudowanie powierzchni modelujących wręgi
- C. Określenie własności mechanicznych materiału oraz grubości ścianki
- D. Podział na elementy skończone (rys. 6.8.1b)

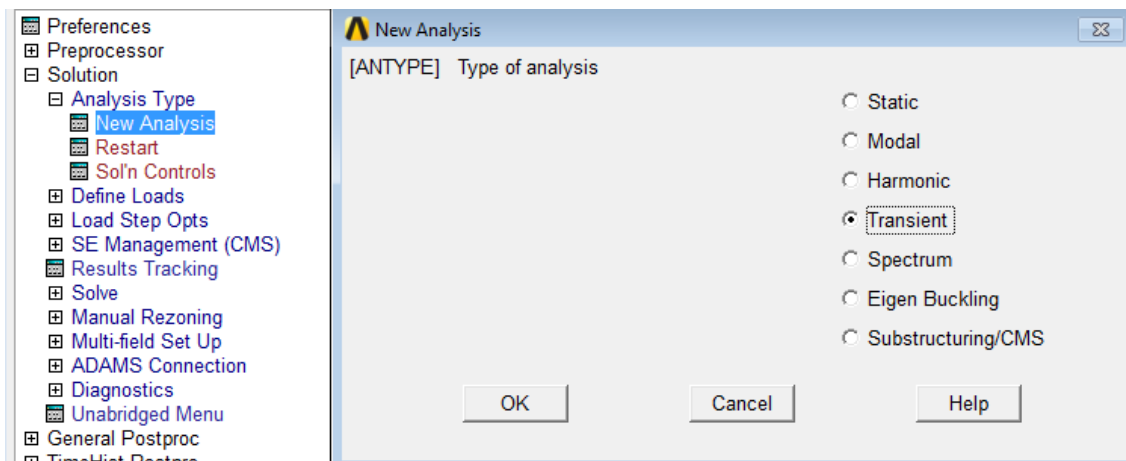


Rys. 6.8.2. Drgania pionowe (przemieszczenia) węzła, do którego przyłożono siłę

6.8.3.2. Solution

- A. Wprowadzenie warunków brzegowych i początkowych
- B. Ustawienie opcji rozwiązania (*Solution Options*) zależnie od wybranej metody rozwiązania

Ustawienie typu analizy następuje przez wybranie: *Solution>Analysis Type>New Analysis>Transient* (rys. 6.8.3). Na rys. 6.8.4 przedstawiony jest wybór metody pełnej rozwiązania (*Full method*)



Rys. 6.8.3. Określenie typu rozwiązywanego zadania (rozwiązanie stanu nieustalonego)

- C. Określenie obciążenia

Należy przyłożyć obciążenie w postaci siły $F=100\text{N}$ w odpowiednim węźle konstrukcji.

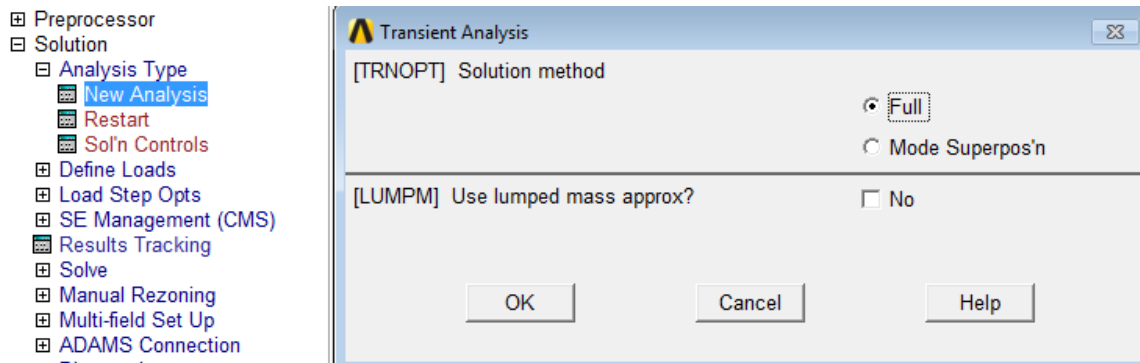
- D. Określenie czasu liczby podkroków, częstości zapisu wyników oraz uruchomienie obliczeń

W analizowanym przypadku badana jest odpowiedź struktury na przyłożenie pełnego obciążenia w chwili początkowej (*Stepped*). Obliczenia można przeprowadzić w jednym kroku, ustawiając odpowiednie opcje: *Solution>Analysis Type>Sol'n Controls – Time at end of loadstep - Number of substeps* (rys. 6.8.5).

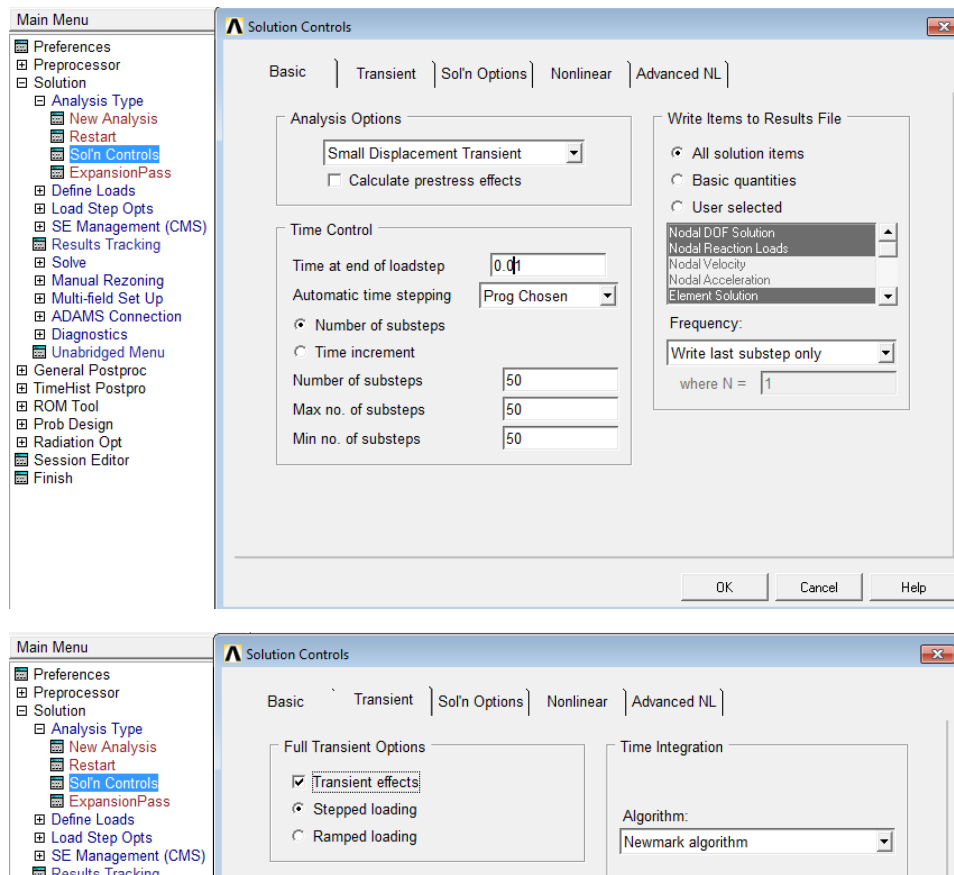
Należy także pamiętać o odpowiednim określeniu szczegółowości zapisu wyników: *Solution>Analysis Type>Sol'n Controls – Write every substep* (rys. 6.8.6).

Przedstawione wcześniej informacje stanowią niezbędne minimum pozwalające przeprowadzić obliczenia. Pozostałe parametry takie jak np. wybór techniki rozwiązywania układu równań oraz odpowiednie wartości parametrów, przyjęte mogą być automatycznie.

Po określeniu obciążenia i ustaleniu podstawowych parametrów analizy należy uruchomić obliczenia (*Solve Curent LS*).



Rys. 6.8.4. Określenie metody rozwiązania równań ruchu (pełna)



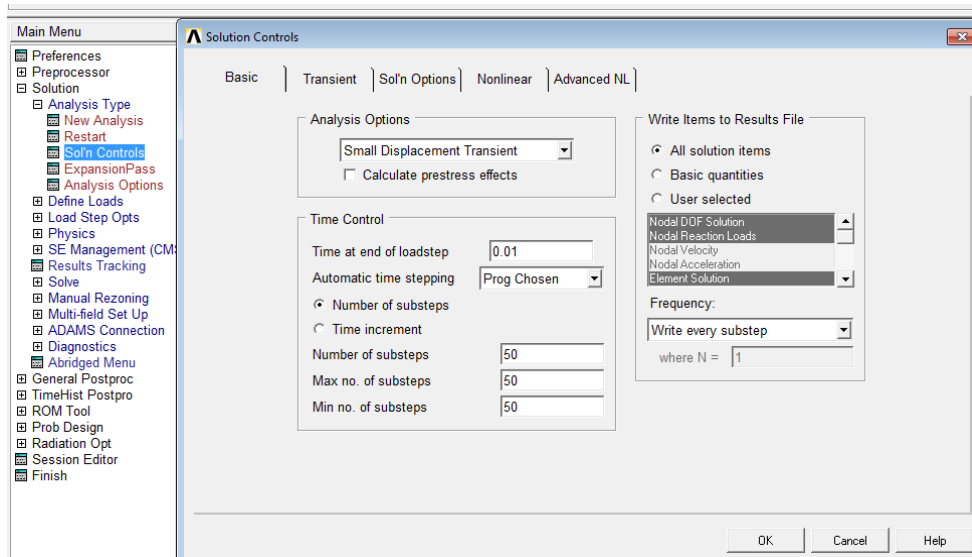
Rys.6.8.5. Określenie czasu, liczby podkroków itd. dla kroku

6.8.3.3. General postprocessor

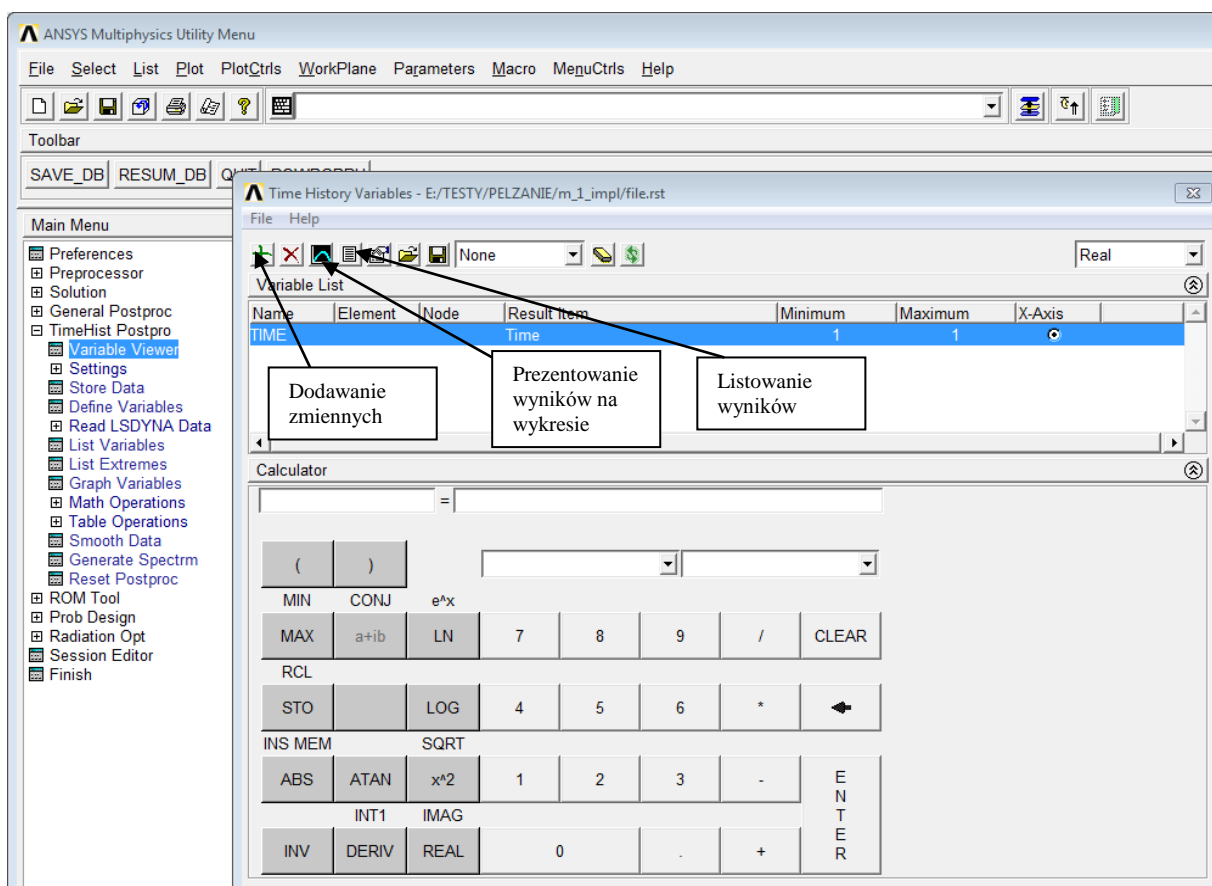
Prezentacja wyników w postaci map przemieszczeń i naprężeń oraz wykresów może być przeprowadzona dla każdej chwili czasowej wynikającej z przyjętej liczby podkroków.

6.8.3.4. Time History Postprocessor

Prezentacja pewnych wielkości (przemieszczeń węzłowych, naprężeń) w funkcji czasu może być wykonana za pomocą komend dostępnych w „Time History Postprocessor”(rys.6.8.7).



Rys. 6.8.6. Określenie częstości zapisywanych wyników



Rys. 6.8.7. Wybór wyników prezentowanych w postaci wykresów

Przykładowe wyniki – drgania pionowe węzła, do którego przyłożono siłę pokazane zostały na rysunku 6.8.2.

6.8.4. Zadania do wykonania

1. Przeprowadzić analizę ramienia robota za pomocą metody pełnej dla dwóch różnych gęstości siatki elementów skończonych oraz porównać wyniki dla siły P zmieniającej się z częstotliwością zbliżoną do drugiej częstości drgań własnych.
2. Przeprowadzić analizę ramienia robota za pomocą metody superpozycji modalnej (korzystając z opisu zawartego w dokumentacji systemu ANSYS) oraz porównać otrzymane wyniki z analizami otrzymanymi za pomocą metody pełnej.