

Nowoczesna obróbka mechaniczna stopów magnezu i aluminium

Politechnika Lubelska, Politechnika Rzeszowska, Politechnika Warszawska

Wyniki badań

Nowoczesna obróbka mechaniczna stopów magnezu i aluminium Podstawy numerycznej symulacji nieliniowych drgań samowzбудnych

Prof. dr hab. inż. Krzysztof Jemielniak

Radosław Morek, Mirosław Nejman, Dominika Śniegulska-Grądzka, Rafał Wypysiński, Piotr Bąk

1. Wprowadzenie

Klasyczna analiza stabilności oparta jest na rozwiązywaniu równań stabilności dynamicznego układu OUPN. Mimo bardzo znacznego rozwoju takich metod, mają one istotne ograniczenie – bardzo trudne lub wręcz niemożliwe jest uwzględnienie w nich nieciągłości, nieliniowości oraz zmienności w czasie parametrów analizowanego układu.

Podstawową cechą numerycznej symulacji drgań jest wyznaczanie kolejnych położeń, prędkości i przyspieszeń drgających elementów, w kolejnych iteracjach (chwilach czasu) na podstawie stanu tych parametrów w poprzedniej iteracji oraz aktualnie działających na układ sił. Siły te wyznaczane są także w każdym kroku iteracji na podstawie chwilowego (aktualnego) przekroju warstwy skrawanej i prędkości skrawania. Takie podejście umożliwia uwzględnienie dowolnie skomplikowanego opisu tak procesu skrawania jak układu OUPN.

Głównym, wiążącym inne zagadnieniem jest tu budowa algorytmów i programów do symulacji przebiegu drgań nieliniowych układów wielowymiarowych, o zmiennych, nieliniowych właściwościach. Parametrami, danymi wykorzystywanymi w tych programach są:

- dynamiczna charakterystyka procesu skrawania (DCPS) czyli zależność sił skrawania od drgań części roboczej narzędzia
- charakterystyka dynamiczna układu MDS, czyli jego funkcja przejścia (FRF) - zależność drgań części roboczej narzędzia od sił oddziaływujących na nią

Pełen model układu OUPN jest niezbędny do optymalizacji konstrukcji obrabiarki. Można go uzyskać np. metodą elementów skończonych. Do symulacji drgań samowzбудnych niezbędna jest zależność drgań części roboczej narzędzia od sił oddziaływujących na nią, czyli funkcja przejścia (FRF – frequency response function).

2. Założenia wstępne do symulacji drgań

Prace będą realizowane w kolejnych etapach, w których modelowane będą kolejne przypadki - zaczynając od najprostszego, do najbardziej złożonego.

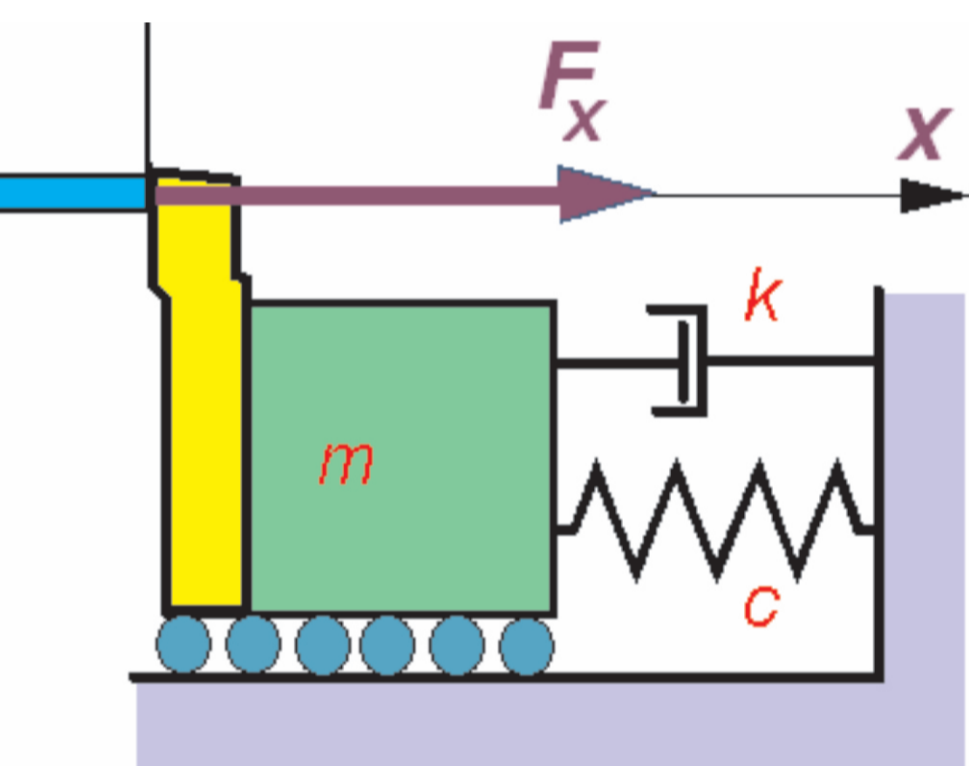
Prace rozpoczną się od uproszczonego przypadku skrawania swobodnego, w którym układ MDS (OUPN) ma jeden stopień swobody w kierunku osi x (skierowanej przeciwnie niż posuw).

Równanie różniczkowe ruchu układu MDS (rys. 1) o jednym stopniu swobody ma postać:

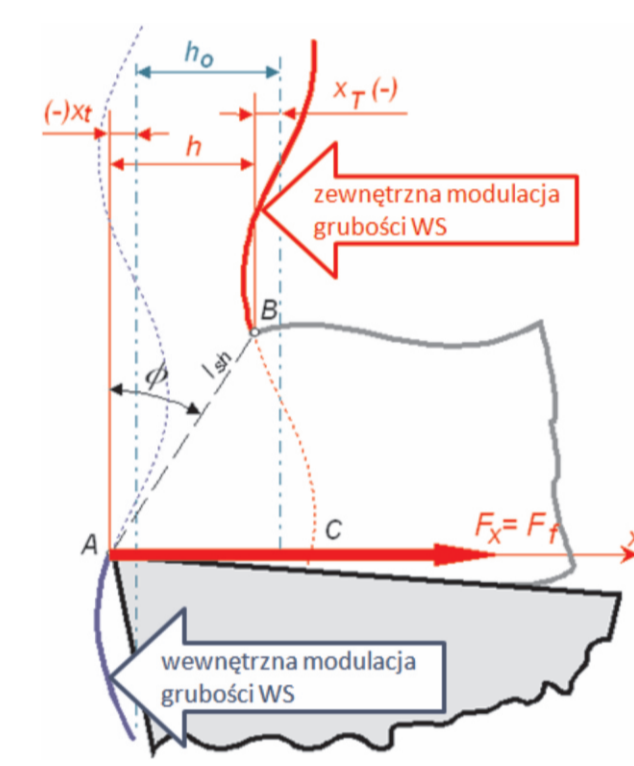
$$m\ddot{x} + k\dot{x} + c x = F_{sd} \quad (1)$$

gdzie:  $m$ ,  $k$ ,  $c$  - masa, tłumienie i sztywność układu DMS,

$F_{sd}$  - zmienna (dynamiczna) składowa siły  $F_x$ , działającej w kierunku osi  $x$



Rys. 1. Układ OUPN (MDS) o jednym stopniu swobody



Rys. 2. Zależność chwilowej grubości WS od drgań narzędzia względem przedmiotu obrabianego w kierunku osi x, w układzie o jednym stopniu swobody (widok w płaszczyźnie P)

Do symulacji drgań samowzбудnych niezbędne jest określenie dynamicznej charakterystyki procesu skrawania, czyli zależności zmiennej składowej siły od drgań układu OUPN. Siła skrawania zależy od przekroju warstwy skrawanej (WS), w tym przypadku od grubości WS  $h$  (szerokość WS –  $b$  jest stała). Na rysunku 2 przedstawiono zmienność tej grubości spowodowaną drganiami układu o jednym stopniu swobody. Siła skrawania może być opisana zależnością:

$$F_x = F_{sd} + F_{sd} = F_{sd} + K_{sd} h_d; \quad (2)$$

$$h_d = h - h_0 \quad (3)$$

$$h = (x_t - x_r) \quad (4)$$

gdzie  $F_{sd}$  – nominalna wartość siły skrawania w kierunku osi  $x$ , równa statycznej sile posuwowej  $F_f$

$F_{sd}$  – dynamiczna składowa siły skrawania

$K_{sd}$  – współczynnik sztywności dynamicznej procesu skrawania

$h_0$  – zmienna składowa grubości WS

$h$  – chwilowa grubość WS

$h_0$  – nominalna wartość grubości WS

Uwzględniając ponadto zależność zmiennej składowej siły skrawania  $F_{sd}$  od prędkości drgań, można dynamiczną charakterystykę procesu skrawania przy toczeniu swobodnym ortogonalnym wyrazić zależnością:

$$F_{sd} = K_{sd}(x_t - x_r) - H_s \dot{x}_t \quad (5)$$

gdzie  $K_{sd}$ ,  $H_s$  - sztywność i tłumienie procesu skrawania,

$K_{sd} = b k_{sd}$ ,  $H_s = b h_s$ ,

$k_{sd}$ ,  $h_s$  - dynamiczny opór właściwy i tłumienie właściwe procesu skrawania,

$b$  - szerokość warstwy skrawanej,

$x_t$  - aktualne przemieszczenie narzędzia względem przedmiotu obrabianego,

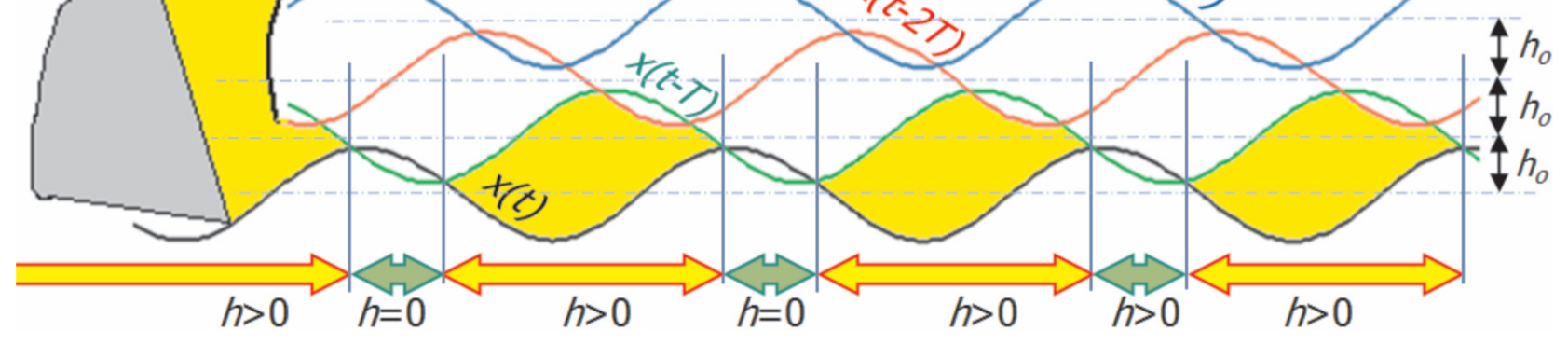
$x_r$  - przemieszczenie w poprzednim obrocie przedmiotu obrabianego (w czasie poprzedniego przejścia), czyli o  $T$  sekund wcześniej:

$$x_r = x(t - T) \quad \text{gdzie } T = 1/n_{obr} \quad (6)$$

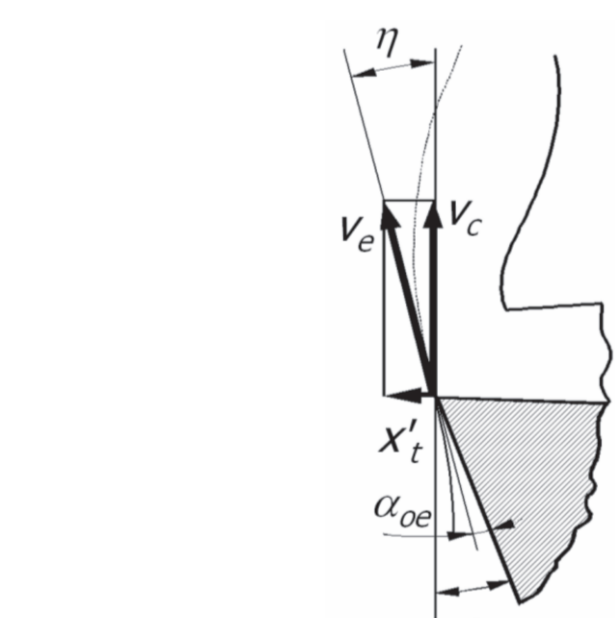
Wychodzenie narzędzia z materiału obrabianego (rys. 3) powodujące zanik sił skrawania może być uwzględnione przez uściślenie znaczenia wielkości  $x_t$  we wzorze (2): należy ją wyznaczyć jako ślad pozostawiony na powierzchni skrawania powstały w poprzednim lub wcześniejszych obrotach (przejściach):

$$x_t = \text{minimum } x(t-T), h_0 + x(t-2T), 2h_0 + x(t-3T) \dots \quad (6)$$

gdzie:  $h_0$  - nominalna grubość warstwy skrawanej.



Rys. 3. Ślady pozostawione na powierzchni skrawania przy wychodzeniu narzędzia z materiału obrabianego



Rys. 4. Zmiany kąta przyłożenia w układzie roboczym (widok w płaszczyźnie P)

Ponadto należy przyjąć, że siła  $F_{sd}$  jest opisana równaniem (5) tylko przy

$$h_d = h_0 + x_t - x_r > 0.$$

W przeciwnym razie  $F_{sd} = 0$ .

W trakcie drgań narzędzia względem przedmiotu obrabianego zmienia się kinetyczny (roboczy) kąt przyłożenia  $\alpha_{ex}$  (rys. 4):

$$\alpha_{ex} = \alpha_0 + \alpha_0' + x_t/v_0 \quad (7)$$

gdzie:  $v_0$  - nominalna prędkość skrawania.

Gdy kąt ten zbliża się do zera, występuje nieliniowy wzrost tłumienia procesu skrawania nie uwzględniony zależnością (5). Jest on przyczyną znacznego wzrostu stabilności obróbki przy małych prędkościach skrawania znanego jako efekt stabilności niskich prędkości skrawania LSS (Low Speed Stability). Ponieważ kinetyczny kąt przyłożenia nie może osiągać wartości ujemnych ( $\alpha_{min} > -\alpha_0$ ) należy przyjąć, że dodatkowa siła tłumiąca wywołana tym zjawiskiem rośnie do nieskończoności przy  $\alpha_{ex}$  dążącym do zera. Jednocześnie można przyjąć, że siła ta nie występuje dla  $x_t' > 0$ . Matematycznie efekt taki można uzyskać zastępując tłumiący składnik siły  $F_{sd}$  z zależności (5):

$$F_{xh} = -H_x \dot{x}_t$$

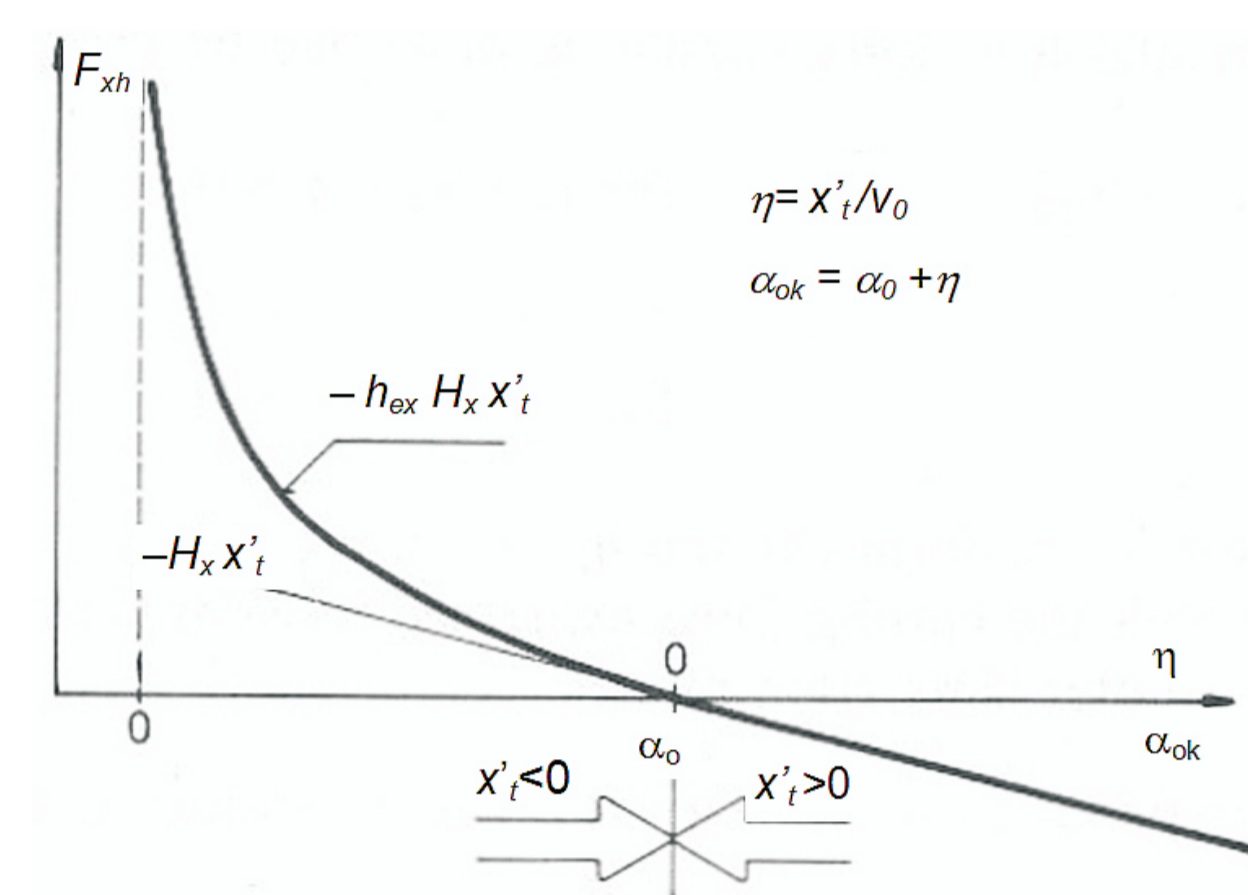
wzorem (rys.5):

$$F_{xh} = -h_{ex} H_x \dot{x}_t$$

gdzie:

$$h_{ex} = \begin{cases} 1 - LSS \frac{x_t' / v_0}{\alpha_0 + x_t' / v_0} & \text{dla } x_t' < 0 \\ 1 & \text{dla } x_t' \geq 0 \end{cases} \quad (9)$$

gdzie: LSS > 0 współczynnik stały.



Rys. 5. Aproksymacja siły tłumiącej z uwzględnieniem oddziaływania powierzchni skrawania na powierzchni przyłożenia

Współczynnik LSS występujący w powyższym wzorze pozwala na uwzględnienie wagi omawianego zjawiska i powinien być wyznaczony doświadczalnie. Ponieważ brak dotychczas wyników odpowiednich badań wstępnie przyjęto LSS=1. Uściślenie tej zależności będzie przedmiotem oddzielnych badań.

Rozwiązanie analityczne równania (1) przy sile skrawania opisanej zależnością (10) jest kłopotliwe. Znacznie łatwiej i szybciej można znaleźć przebieg drgań określonych tymi równaniami na drodze symulacji numerycznej.

Symulacja numeryczna drgań samowzбудnych opiera się na wyznaczaniu przemieszczeń, prędkości i przyspieszeń układu MDS w kolejnych chwilach czasu odległych od siebie o krok iteracji  $dt$ .

$$x''[i] = (F_{sd} - h x'[i] - c x[i]) / m;$$

$$x'[i+1] = x'[i] + x''[i] dt;$$

$$x[i+1] = x[i] + x'[i+1] dt$$

Jak wynika z równań (11) przyjęto następujące założenia upraszczające:

- w czasie  $dt$  od między iteracją  $n$  a  $n+1$  przyspieszenie jest stałe, takie jak na początku tego odcinka czasu,
- prędkość w czasie  $dt$  jest stała, taka jak na końcu tego odcinka czasu.

Założenia te powodują określone niedokładności symulacji względem przebiegu otrzymanego na podstawie analitycznego rozwiązywania równań różniczkowych ruchu (bez nieliniowości). Znaczące (ponad 10-krotne) zmniejszenie błędów uzyskano w pracy, stosując zależność wyprowadzone poniżej.

Srednia prędkość w bieżącym kroku oznaczona zostanie jako prędkość w połowie tego kroku (między poprzednią a aktualną iteracją):

$$x_t'[i] = x_t'[i-1] + (n-0.5)dt \quad (12)$$

Podobnie średnią prędkość w poprzednim kroku oznaczono jako prędkość w połowie tego kroku:

$$x_t'[i-1] = x_t'[i-2] + (i-1.5)dt \quad (13)$$

Srednia prędkość w bieżącym kroku można zatem obliczyć jako :

$$x_t'[i] = x_t'[i-1] + x_t'[i-1] dt \quad (14)$$

gdzie:  $x_t'[i-1]$  - przyspieszenia na końcu poprzedniego kroku

Wartość tę można wykorzystać do wyznaczenia przemieszczenia  $x[i]$  na końcu bieżącego kroku  $dt$  (w aktualnej iteracji):

$$x[i] = x[i-1] + x_t'[i] dt \quad (15)$$

Prędkość w aktualnej iteracji opisana jest równaniem:

$$x_t'[i] = x_t'[i-1] + x_t''[i-1] dt \quad (16)$$

Wykorzystując wartości  $x_t''[i]$ ,  $x_t''[i-1]$ ,  $x_t''[i-2]$  oraz model siły skrawania opisany ogólnie równaniem (7) można wyznaczyć przyspieszenie w aktualnej iteracji:

$$x_t''[i] = (F_{sd}(x_t, x_t'), x_t'[i], x_t[i]) - c x_t'[i] - h x_t''[i] / m \quad (17)$$

Jeśli w aktualnej iteracji narzędzie jest w materiale:

$$x_t''[i] - x_t''[i] < a_s \quad (18)$$

to narzędzie pozostawia ślad na powierzchni skrawania:

$$x_{t+1}[i] = x_t''[i] \quad (19)$$

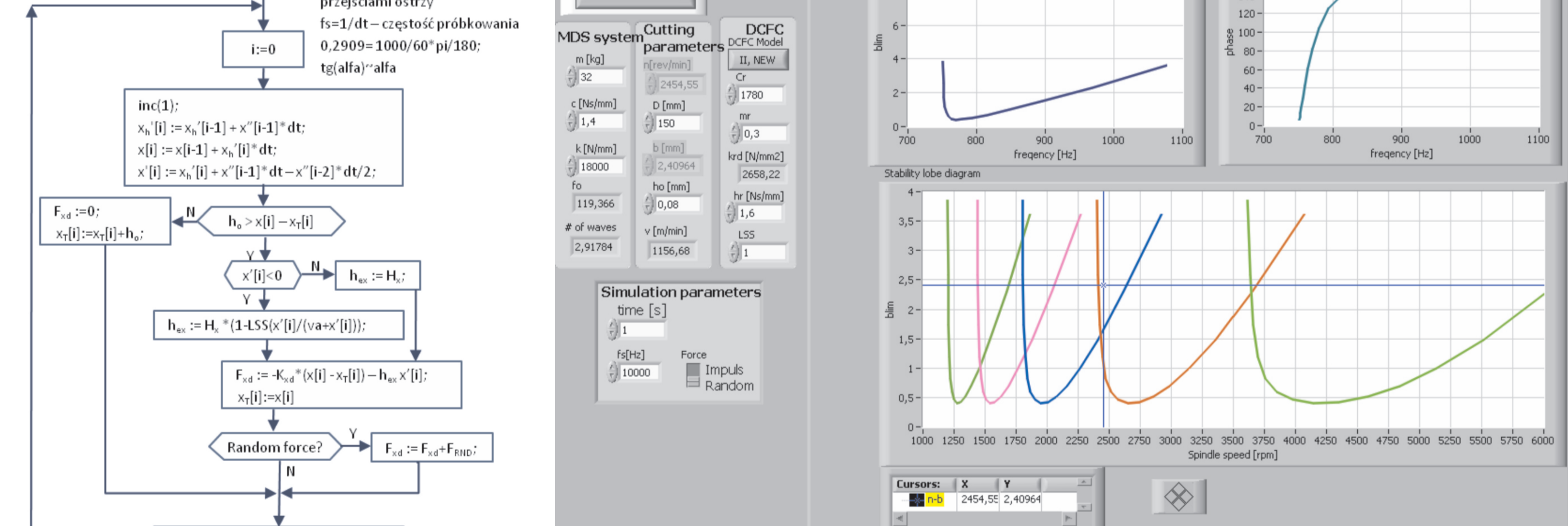
jeśli natomiast narzędzie jest poza materiałem, na powierzchni skrawania pozostaje poprzedni ślad oddalony o nominalną grubość WS:

$$x_{t+1}[i] = x_t''[i] + a_s \quad (20)$$

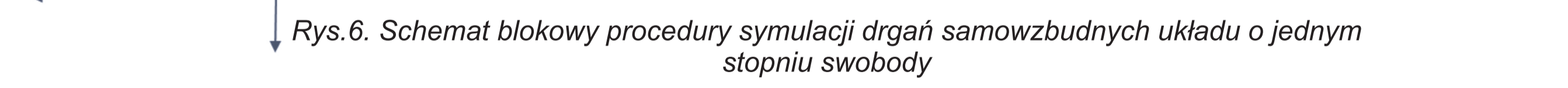
Wartość  $x_{t+1}[i]$  jest wykorzystywana w czasie następnego przejścia ostrza (przejścia następnego obrętu) jako  $x_t''[i]$ .

Program do symulacji nieliniowych drgań samowzбудnych w układzie o jednym stopniu swobody

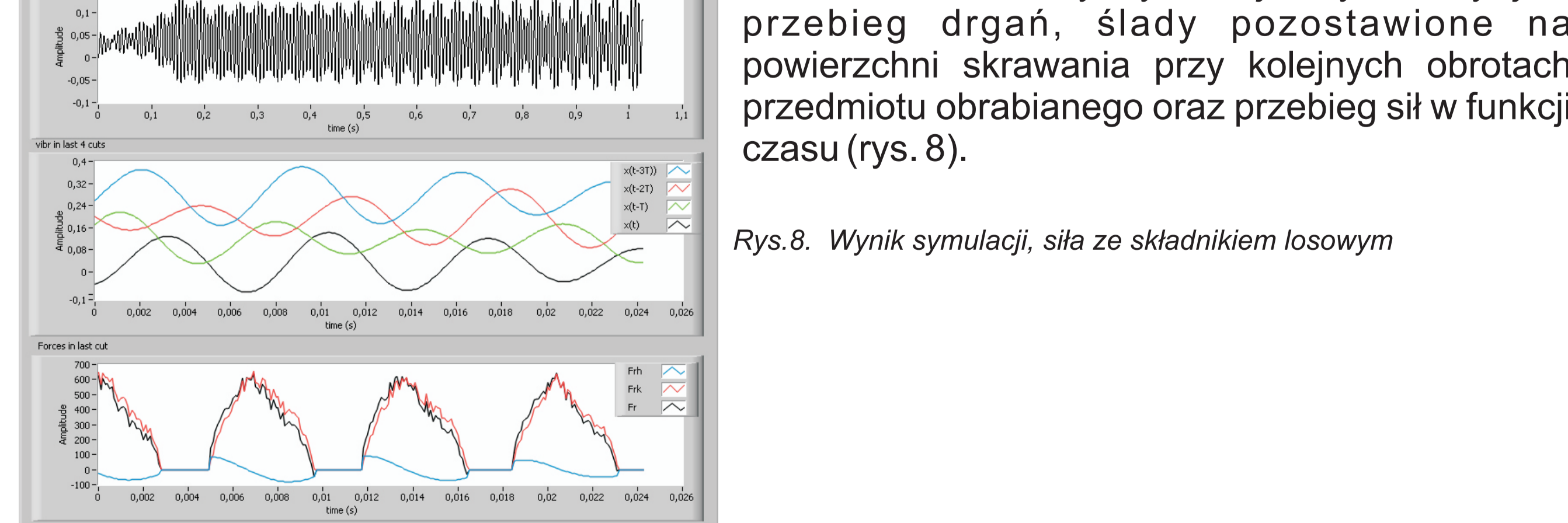
Opisane w poprzednim punkcie założenia zostały zrealizowane w programie symulacji drgań nieliniowych o jednym stopniu swobody.



Rys. 7. Panel wprowadzania danych wejściowych



Rys. 6. Schemat blokowy procedury symulacji drgań samowzбудnych układu o jednym stopniu swobody



Rys. 8. Wynik symulacji, siła ze składnikiem losowym

Jako efekt końcowy symulacji uzyskiwany jest przebieg drgań, ślady pozostawione na powierzchni skrawania przy kolejnych obrotach przedmiotu obrabianego oraz przebieg sił w funkcji czasu (rys. 8).

Założenia wstępne do modelowania układu MDS Do symulowania drgań samowzбудnych opisanych powyżej, niezbędne jest określenie modelu układu masowo-dysypacyjno-sprężystego. Z wielu możliwych podejść do tego zagadnienia (modelowanie bryłowe, MES itd.) postanowiono zastosować określenie takich modeli metodą doświadczalnej analizy modalnej o jednym wejściu i jednym wyjściu (Single input-single output SISO) ew. jednym wejściu, wielu wyjściach (single input – multiple output SIMO). W obu przypadkach wejściem będzie siła skrawania skierowana prostopadle do krawędzi skrawającej, zastępowana impulsem siły (młotek modalny). Dla toczenia może to być kierunek  $x$ . Dla frezowania uwzględniona powinna być zależność podatności od kierunku

działania siły w płaszczyźnie prostopadłej do osi frezu, a przede wszystkim podatność w kierunkach  $x$  i  $x_n$  kierunku. Ten drugi przypadek może być analizowany jako złożenie dwóch SISO lub jeden SIMO.

Opracowane zostanie oprogramowanie do prowadzenia takiej analizy – od akwizycji danych, przez automatyczną ocenę ich poprawności, do automatycznego wyznaczania modelu układu MDS.

Matematyczne podstawy analizy modalnej

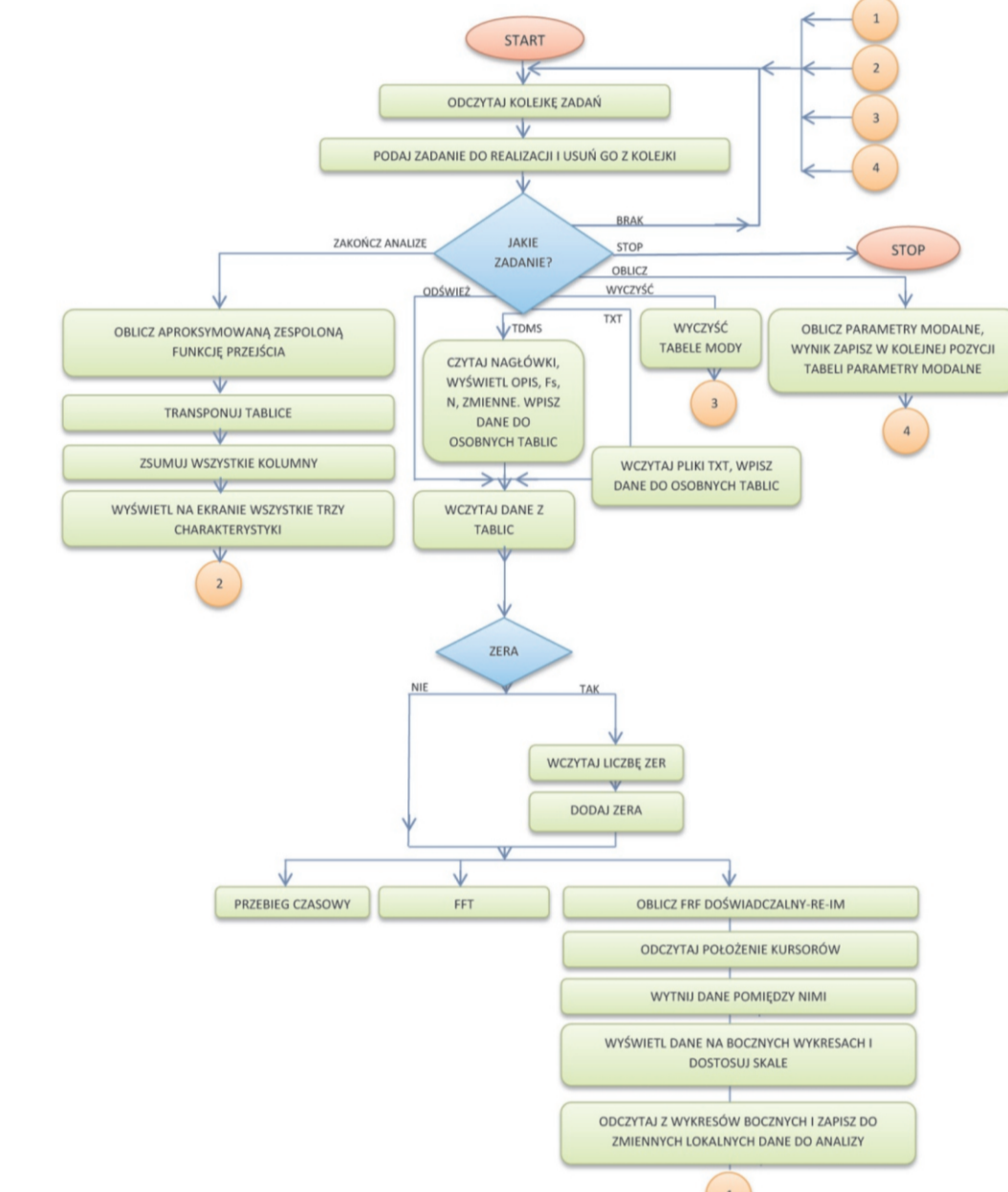
Opis matematyczny analizy modalnej bazuje przede wszystkim na analizie częstotliwościowej odpowiedzi układu na zadane wymuszenie. Jako wynik analizy uzyskuje się opis własności dynamicznych maszyny w postaci macierzy transmitancji widmowych  $H_k(j\omega)$  ( $k = 1, 2, \dots, n$ ;  $i$  - numer punktu odpowiedzi,  $k$  - numer punktu przyłożenia wymuszenia). Na podstawie znajomości widma odpowiedzi i wymuszenia dokonuje się identyfikacji przebiegu charakterystyk częstotliwościowych obiektu. Postępowanie to jest stosowane w metodach realizowanych w dziedzinie częstotliwości. Za pomocą tych metod można wyznaczyć parametry modelu modalnego w otoczeniu pojedynczej częstości własnej lub w wybranym paśmie częstotliwości zawierającym więcej niż jedną częstość własną.

Metoda eksperymentalnej analizy modalnej opisuje własności maszyny za pomocą macierzy charakterystyk dynamicznych. Metoda ta pozwala dokonać rozłożenia zachowania się układu na zbiór równań ruchu (wyznaczonych w przestrzeni modalnej) lub zbiór postaci własnych dla poszczególnych częstotliwości drgań własnych.

Estymacja parametrów w eksperymentalnej analizie modalnej polega na aproksymacji odpowiedzi częstotliwościowej, uzyskanej z pomiarów, przez wyrażenie analityczne. Jeśli wyrażenie analityczne jest wynikiem rozważań dotyczących odpowiedzi częstotliwościowej modelu, wtedy parametry modalne (częstości drgań własnych, tłumienie i przemieszczenie modalne) mogą być estymowane na bazie danych pomiarowych.

Wstępna wersja oprogramowania do analizy modalnej SISO

Oprogramowanie napisano w ramach pracy dyplomowej inżynierskiej Piotra Bąka, w środowisku LabVIEW 2010 firmy National Instruments.



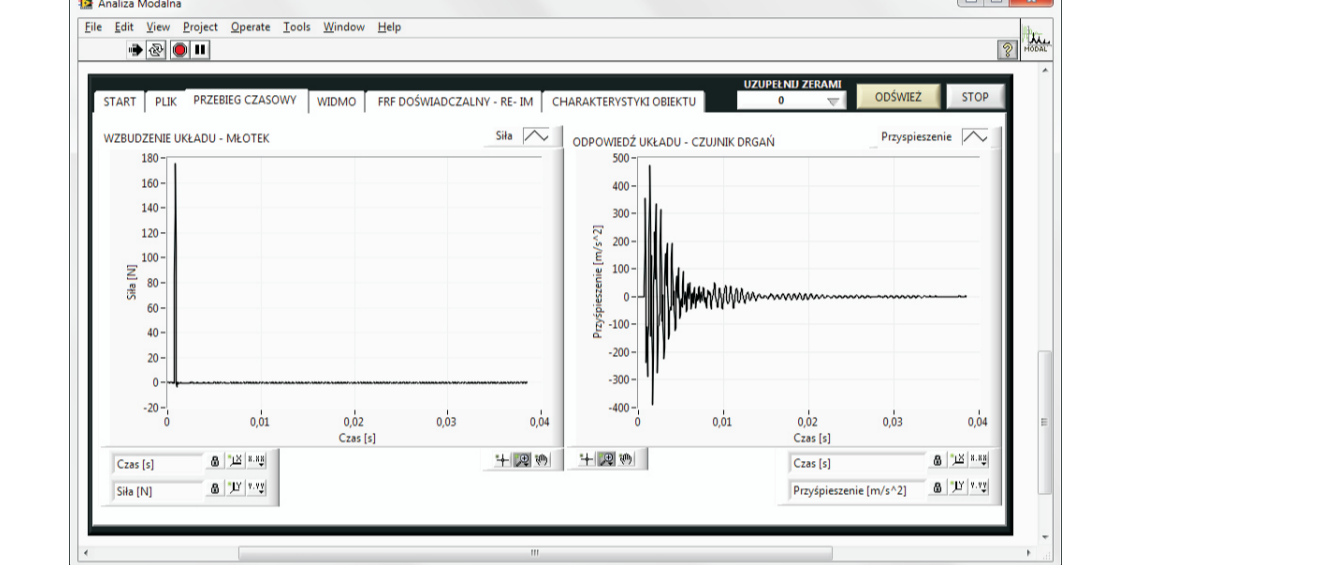
Rys. 8. Algorytm pracy programu

Test oprogramowania

W ramach przeprowadzonych badań zarejestrowano około 200 uderzeń i odpowiedzi układu z wykorzystaniem końcówki metalowej, gumowej oraz plastikowej zamocowanej na młotku.

Eksperyment 1 – młotek z końcówką metalową

Przebieg czasowy sygnału wymuszenia i odpowiedzi, który był poddany analizie przedstawia rys.9.

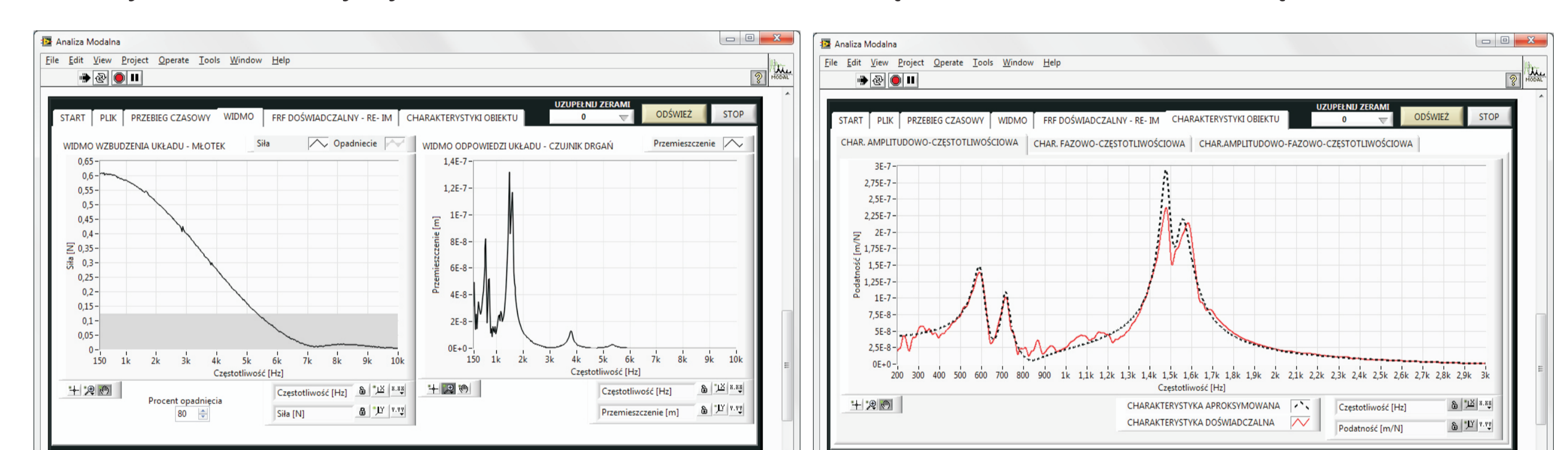


Rys. 9. Eksperyment 1 – przebieg czasowy

Widmo DFT sygnału pokazane na rys.10 sięga do ok. 10[kHz] - użyteczna część widma została dobrana do 80% spadnięcia widma.

Ze względu na czyste uderzenie młotkiem i gasnącą odpowiedź układu charakterystyka amplitudowo-częstotliwościowa (rys.11) klarownie wskazuje częstości rezonansowe, wraz z antyrezonansowymi.

Na podstawie tego sygnału policzona została charakterystyka podatności dynamicznej układu. Wynika z tego jednoznacznie, iż zamodelowane mody znajdują się w miejscach, w których charakterystyka doświadczalna wskazała częstości rezonansową.

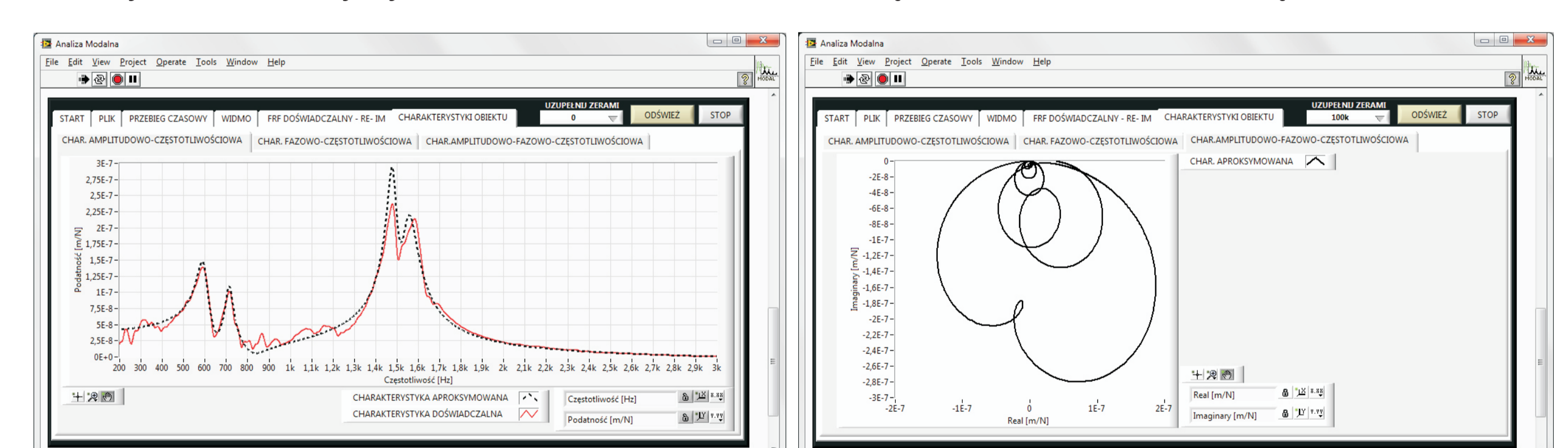


Rys. 10. Widmo DFT

Rys. 11. Eksperyment 1 – Charakterystyka amplitudowo-częstotliwościowa - zbliżenie widma do 3kHz

Ze względu na czyste uderzenie młotkiem i gasnącą odpowiedź układu charakterystyka amplitudowo-częstotliwościowa (rys.11) klarownie wskazuje częstości rezonansowe, wraz z antyrezonansowymi.

Na podstawie tego sygnału policzona została charakterystyka podatności dynamicznej układu. Wynika z tego jednoznacznie, iż zamodelowane mody znajdują się w miejscach, w których charakterystyka doświadczalna wskazała częstości rezonansową.



Rys. 11. Eksperyment 1 – Charakterystyka amplitudowo-częstotliwościowa - zbliżenie widma do 3kHz

Rys. 12. Eksperyment 1 – Charakterystyka amplitudowo-fazowo-częstotliwościowa

Wnioski

Opracowano wstępną wersję oprogramowania do prowadzenia analizy modalnej bazującej przede wszystkim na analizie częstotliwościowej odpowiedzi układu na zadane wymuszenie. Opracowano podstawowe założenia oraz wstępną wersję programu do symulacji numerycznej drgań samowzбудnych, uwzględniającej nieliniowości dynamicznej charakterystyki siły skrawania. W dalszym etapie prac wyprowadzone zależności będą rozszerzone na dowolną liczbę stopni swobody, otrzymując bardziej złożone związki

Wskaźniki realizacji celów projektu

Referaty

- Wybrane zagadnienia dynamiki obrabiarek, II Warsztaty Zadań Badawczych ZB1, ZB2, ZB5 Projektu Kluczowego, Lublin, 13.10.2010.
- „Numeryczna symulacja nieliniowych drgań samowzбудnych”, III Warsztaty Zadań Badawczych ZB1, ZB2, ZB5 Projektu Kluczowego, Łódź, 01.06.2011.

Prace mgr, dr, hab.

- Piotr Marzęcki: „Dobór stabilnych parametrów, do szybkościowej obróbki aluminium”, promotor prof. dr hab. inż. Krzysztof Jemielniak
- Piotr Bąk: „Jednowymiarowa analiza modalna wrzeciona frezarki”, promotor prof. dr hab. inż. Krzysztof Jemielniak