

Jakub Szabelski <sup>1)</sup>

## WSTĘP DO KOMPUTEROWEGO MODELOWANIA CHARAKTERYSTYK UKŁADU DYNAMICZNEGO OBRÓBK UBYTKOWEJ WAŁÓW O MAŁEJ SZTYWNOŚCI

**Streszczenie:** Artykuł prezentuje opracowany model matematyczny układu dynamicznego obróbki ubytkowej wałów z uwzględnieniem obróbki części o małej sztywności. Z wykorzystaniem aproksymacji funkcji wykładniczej przy jej rozkładzie w szereg Padé model został uproszczony. W oparciu o wyżej wymieniony model zbudowany został program komputerowy do symulacji układu obróbki zarówno szlifowaniem jak i toczeniem. Praca ta opisuje wyniki modelowania charakterystyk układu z wykorzystaniem stworzonego narzędzia komputerowego.

**Słowa kluczowe:** modelowanie, wałki, mała sztywność, programowanie, układ dynamiczny, obróbka skrawaniem, Visual Basic.

### WSTĘP

Zwiększanie dokładności bez jednoczesnego zmniejszania efektywności obróbki skrawaniem części o małej sztywności szczególnie w sytuacji oddziaływania na układ technologiczny szeregu zakłóceń, może być realizowane na dwa sposoby – poprzez modyfikacje unowocześniające charakterystyki istniejących maszyn skrawających i wykorzystywanych narzędzi bądź też przez bezpośrednie sterowanie procesem obróbki, tj. parametrami skrawania, a przede wszystkim właściwościami sprężystymi i wspomnianymi zakłóceniami, które podczas obróbki mogą występować.

Modelowanie matematyczne jest z kolei pierwszym krokiem do budowy kompletnego i w pełni działającego systemu sterowania każdym procesem. Budowa modelu jak najbardziej zbliżonego do modelu rzeczywistego jest konieczna do rozwiązania problemu stabilności układów sterowania automatycznego oraz syntezy członów korygujących z wymaganymi wskaźnikami jakości sterowania procesem przejściowym [6].

### MODEL UKŁADU DYNAMICZNEGO OBRÓBK SZTYWNOŚCI

Pod pojęciem rozpatrywanego układu dynamicznego rozumiemy w tym przypadku układ technologiczny (OUPN – obrabiarka - uchwyt - przedmiot obrabiany

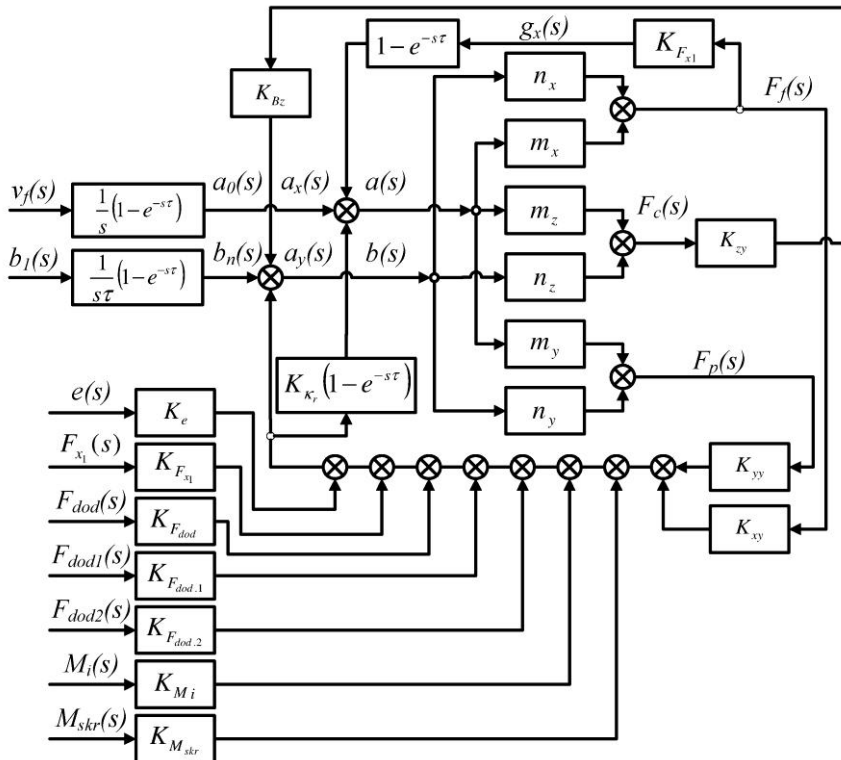
---

<sup>1</sup> Instytut Technologicznych Systemów Informatycznych, Wydział Mechaniczny, Politechnika Lubelska.

- narzędzie) łącznie z przeprowadzaniem w nim procesem technologicznym (toczenie, szlifowanie).

Poprzez wprowadzenie do istniejącego modelu matematycznego układu dynamicznego obróbki wałów [1] równania opisującego zachowanie części o małej sztywności zbudowany został wyjściowy, uogólniony model matematyczny układu dynamicznego obróbki wałów o małej sztywności w stanie sprężystości odkształcalnym [2]. Dodatkowo uwzględniono proces zmiany grubości warstwy skrawalnej, tj. fakt, że w bieżącej chwili składowe warstwy skrawanego materiału zależą jednocześnie od położenia krawędzi ostrza w chwili bieżącej jak i w chwili poprzedniego obrotu półfabrykatu (tzw. zjawisko skrawania po śladzie). Na podstawie układu równań stworzono schemat strukturalny układu (rys. 1).

Odształcenia sprężyste układu technologicznego w kierunku promieniowym, rozpatrywane jako suma odkształceń sprężystych układu obrabiarka-przedmiot-narzędzie i odkształceń sprężystych części, są funkcją parametrów materiałowych i geometrycznych obrabianej części, składowych siły skrawania, punktu przyłożenia siły skrawania względem długości półfabrykatu, a także dodatkowych oddziaływań sterujących, tj. siły rozciągającej, momentu zginającego, skręcającego, dodatkowych sił lub kombinacji powyższych.



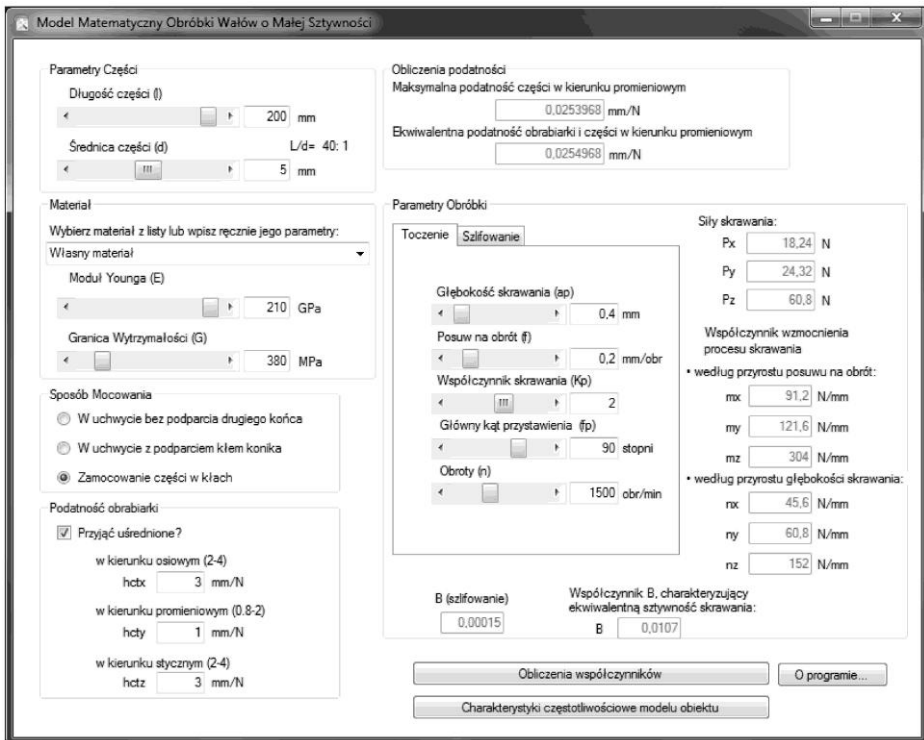
Rys. 1. Schemat strukturalny układu

## OPIS PROGRAMU KOMPUTEROWEGO

W oparciu o wyżej przedstawiony model matematyczny oraz program MATMOD1 [2] został w środowisku programistycznym Microsoft Visual Studio (w języku Visual Basic) zbudowany program komputerowy do określania parametrów układu dynamicznego, transmitancji operatorowych, współczynników wzmocnienia, stałych czasowych oraz charakterystyk czasowych i częstotliwościowych.

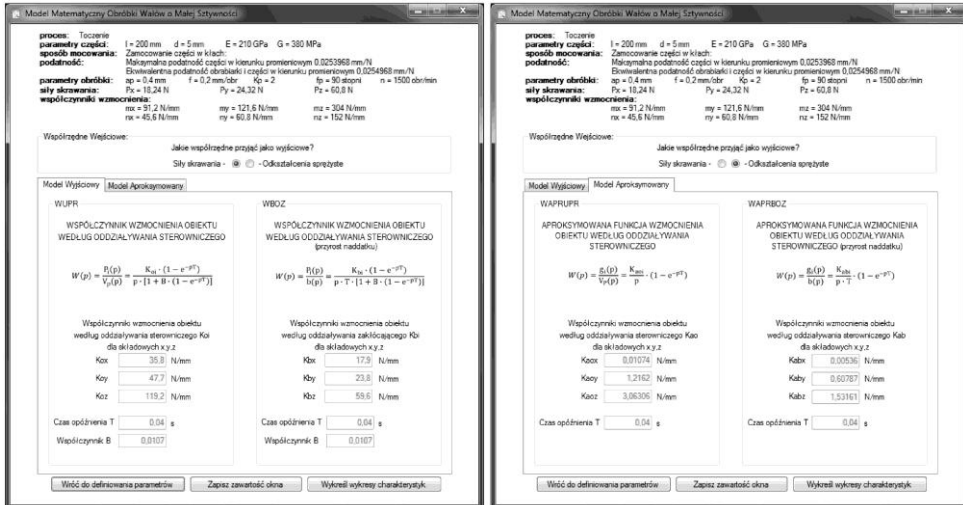
Stworzony program pozwala na ustalenie warunków procesu skrawania. Podając parametry obrabiarki, części i warunki skrawania w procesie technologicznym, w oparciu o wcześniej wspomniany model układu dynamicznego procesu skrawania, wyodrębniane są podstawowe charakterystyki dynamiczne: transmitancje operatorowe, odpowiedzi sił skrawania oraz odkształceń sprężystych na skokową zmianę prędkości posuwu oraz charakterystyki częstotliwościowe: amplitudowa i fazowa.

Ostateczna wersja programu zbudowana jest z 7 okien – w skład których wchodzi razem ok. 400 kontrolki (przycisków, pól tekstowych, etykiet, itd.). Kod programu składa się łącznie z około 6000 linii. W czasie ok. 2 miesięcy budowy programu powstało kilkadziesiąt pośrednich wersji testowych.



Rys. 2. Wprowadzanie danych wejściowych do modelowania i podstawowe obliczenia

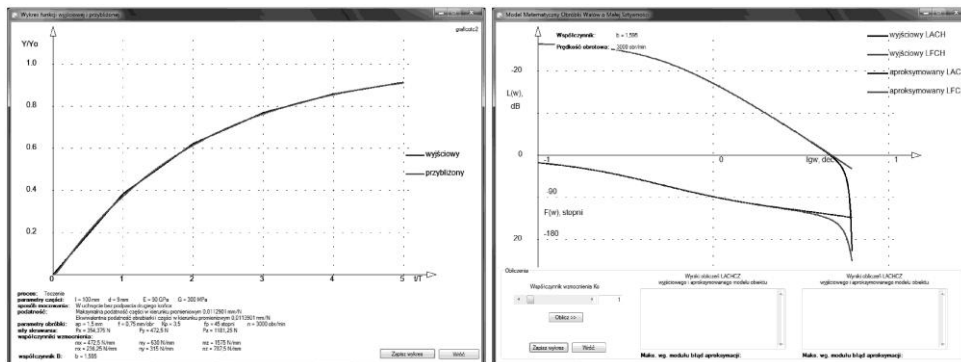
Parametrami wejściowymi do obliczeń są: długość wałka, jego średnica (wyznaczony zostaje stosunek L/D definiujący „sztywność” wałka). Z listy należy wybrać wcześniej zdefiniowany materiał, istnieje również możliwość dodania materiału własnego - przez podanie modułu Younga i granicy wytrzymałości na rozciąganie. Określany jest również sposób zamocowania części do obróbki: w uchwycie bez podparcia drugiego końca, w uchwycie z podparciem kłmem konika lub zamocowanie części w kłach a także definiowana jest w trzech współrzędnych - podatność obrabiarki. W kolejnych polach ustalane są parametry obróbki, w przypadku toczenia: głębokość skrawania, posuw na obrót, główny kąt przystawienia narzędzia skrawającego, obroty wrzeciona oraz wskaźnik skrawalności uwzględniający okresową prędkość skrawania lub jej pochodne (okres trwałości noża, intensywność zużycia ostrza) i chropowatość powierzchni obrobionej [5]. Program na bieżąco przelicza siły skrawania dla trzech współrzędnych i wyświetla je na ekranie razem z współczynnikami wzmocnienia procesu skrawania wg. przyrostu posuwu oraz przyrostu głębokości skrawania. Dodatkowo wyznaczane są maksymalna podatność części w kierunku promieniowym, ekwiwalentna podatność obrabiarki wraz z częścią w kierunku promieniowym i współczynnik B określający ekwiwalentną sztywność skrawania (rys. 2). Współczynnik ten jest o tyle istotny, że posiada wartość graniczną (0,077), która definiuje kształt transmitancji operatorowej na jedną z dwóch postaci. Jego badanie jest istotną częścią modelowania.



Rys. 3. Wyznaczanie postaci transmitancji operatorowej i współczynników wzmocnienia dla modelu aproksymowanego

Następnie, po wybraniu co będzie współrzędną wyjściową: siła skrawania czy odkształcenie sprężyste, program wyznacza dla wcześniej zadanych warunków postać transmitancji operatorowej obiektu i oblicza współczynniki wzmocnienia

obiektu według oddziaływania sterującego dla trzech składowych kierunkowych oraz czas opóźnienia. Ponadto dla modelu uproszczonego przez aproksymację funkcji wykładniczej przy jej rozkładzie w szereg Padé - również stałe czasowe (rys. 3, rys. 4).



**Rys. 4.** Generowanie wykresów odpowiedzi na skok jednostkowy i charakterystyk fazowych i częstotliwościowych

W dalszej kolejności program pozwala na porównanie na jednym wykresie funkcji wyjściowej (uogólnionej) i funkcji przybliżonej (aproksymowanej rozwinięciem funkcji wykładniczej w szereg Padé) (rys. 4). Umożliwia to praktyczne zaobserwowanie dokładności aproksymacji.

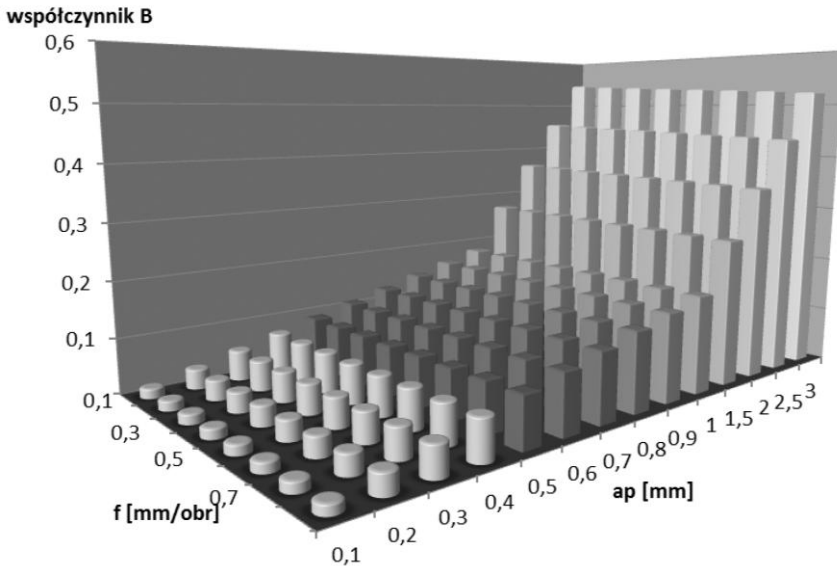
Na koniec, dla ustalonych w pierwszym oknie parametrów, użytkownik może wykreślić charakterystyki fazową i częstotliwościową znów dla dwóch przypadków – dokładnego i aproksymowanego (rys. 4).

## KOMPUTEROWE MODELOWANIE UKŁADU DYNAMICZNEGO

Przeprowadzone zostały analizy teoretyczne wybranych parametrów przy obróbce toczeniem wałów o małej sztywności. Modelowano wał o długości 200mm i średnicy 5mm. Stosunek  $L/D=40$  kwalifikował wał do rozpatrywania jako mało sztywny. Wybrano jako materiał stal S235JRG2 (ST3S - stara norma) – program odczytał z bazy wartości modułu Younga  $E=2,1 \times 10^5$  MPa i granicę wytrzymałości na rozciąganie 380MPa. Przyjęto domyślne wartości podatności obrabiarki, tj.: w kierunku osiowym (x) - 3mm/N, w kierunku promieniowym (y) - 1 mm/N, w kierunku stycznym (z) - 3mm/N. Parametry obróbki zostały zdefiniowane w następujący sposób: głębokość skrawania  $a_p=0,4$  mm, posuw  $f=0,2$ mm/obrót, współczynnik skrawania  $K_p=2$ , główny kąt przystawienia  $\kappa_r=90^\circ$ , obroty wrzeciona 1500obr./min.

Tak zdefiniowany układ wykazuje maksymalną podatność wałka w kierunku promieniowym na poziomie ok. 0,025mm/N w przypadku zamocowania go w kłach i ponad 15 razy większą, tj. 0,406 mm/N, gdy wałek zostanie zamocowany

w uchwycie bez podparcia drugiego końca kłem. Następnie program wyznacza siły skrawania, w tym przypadku wynoszą one kolejno:  $F_f=18,24\text{N}$ ,  $F_p=24,32\text{N}$  i  $F_c=60,8\text{N}$ . Wyznaczony zostaje również współczynnik B określający ekwiwalentną sztywność skrawania (a jednocześnie definiujący postać transmitancji operatorowej) – dla zadanych warunków obróbki i parametrów części - wynosi on 0,0107. Ponadto program wyznacza: współczynniki wzmocnienia obiektu według oddziaływania sterującego dla trzech składowych dla modelu wyjściowego - przyjmując za wyjściowe siły skrawania ( $K_{ox}=35,8\text{N/mm}$ ,  $K_{oy}=47,7\text{N/mm}$ ,  $K_{oz}=119,2\text{N/mm}$ ) bądź też odkształcenia sprężyste ( $K_{aox}=0,01074\text{N/mm}$ ,  $K_{aoy}=1,2162\text{N/mm}$ ,  $K_{aoz}=3,06306\text{N/mm}$ ), oraz czas opóźnienia  $T=0,04\text{s}$ .



**Rys. 5.** Badanie współczynnika B w zależności od wartości posuwu i grubości warstwy skrawanej.

Współczynnik B był również badany w aspekcie zależności od podstawowych parametrów skrawania (głębokości skrawania i posuwu) dla wałka  $l=500\text{mm}$ ,  $d=20\text{mm}$ , przy  $n=1000\text{obr/min}$  i  $\kappa_r=90^\circ$ . Dane numeryczne uzyskane w procesie modelowania (przy wykorzystaniu jednej z pierwszych wersji programu) przedstawia wykres – rys. 5 [2].

Wartość graniczna, której przekroczenie zmienia postać transmitancji operatorowej, jest równa 0,077 i została przedstawiona na wykresie za pomocą jaśniejszych walców. Z analizy wyników modelowania wynika, że współczynnik B ulega wzrostowi w funkcji zmiany głębokości skrawania, oraz nieznacznie maleje wraz ze wzrostem posuwu. Dodatkowo po zmianie kąta przystawienia narzędzia z

$\kappa_r = 90^\circ$  na  $45^\circ$  można stwierdzić niewielki przyrost wartości współczynnika B (przy posuwie 0,8mm/obr. i głębokości 0,5mm różnica wynosi 0,008).

## PODSUMOWANIE

Wyniki uzyskane przy pomocy modelowania komputerowego będą weryfikowane doświadczalnie. Zaprojektowane zostało do tego celu stanowisko badawcze, które po rozszerzeniu będzie służyło badaniom właściwym, tj. sterowaniu stanem sprężystości odkształcalnym poprzez wykorzystanie siły osiowej. Artykuł przedstawia wyniki badań jedynie części wybranych charakterystyk układu dynamicznego. Modelowane były ponadto między innymi parametry opóźnienia i stałe czasowe oraz ich zmiany w zależności od zmian parametrów skrawania. Istnieją narzędzia umożliwiające sterowanie dokładnością obróbki części o małej sztywności [6]. Zbudowany program może być wykorzystywany do budowy narzędzi umożliwiających jeszcze dokładniejszą obróbkę wałów o małej sztywności bez jednoczesnego obniżania efektywności procesu skrawania. Ponadto może służyć precyzyjnemu określaniu parametrów przy procesie prostowania wałów o małej sztywności.

## PIŚMIENNICTWO

1. Szabelski J., Taranenko G., Taranenko W.: Zagadnienia modelowania własności dynamicznych procesów obróbki wałów o małej sztywności. W: Modele inżynierii teleinformatyki (Wybrane zastosowania) 3 Monografia, red. Marian Kopczewski, Wydawnictwo Uczelniane Politechniki Koszalińskiej, Koszalin 2008. 253 – 260.
2. Palica J., Szabelski J., Taranenko G., Taranenko W.: Modelowanie charakterystyk układów dynamicznych obróbki wałów o małej sztywności. Podstawy informatyczne w organizacji produkcji. Monografia, red. Wiktor Taranenko, Wydawnictwo Lubelskiego Towarzystwa Naukowego, Lublin 2009, 124 – 139.
3. Palica J., Szabelski J., Taranenko G., Taranenko W.: Modelowanie charakterystyk układów dynamicznych obróbki toczeniem wałów o małej sztywności. Modele inżynierii teleinformatyki (Wybrane zastosowania) 4, Monografia, red. Krzysztof Bzdrya, Wydawnictwo Uczelniane Politechniki Koszalińskiej, Koszalin 2009, 168 – 182.
4. Taranenko G., Taranenko W., Świć. A., Szabelski J.: Modelowanie układów dynamicznych obróbki skrawaniem wałów o małej sztywności, Modelling of dynamic systems of low-rigidity shaft machining, Eksploatacja i Niezawodność – Maintenance and Reliability, nr 4(48)/2010, 4-16.
5. Grzesik W.: Podstawy skrawania materiałów metalowych, Wydawnictwa Naukowo Techniczne, Warszawa, 1998 r.
6. Zubrzycki J., Abakumov A., Taranenko G., Taranenko W.: Experimental studies of characteristics of dynamic technological system of turning (in Polish). In: Zagadnienia pęknięcia i skrawania materiałów plastycznych. Monografia, red. Józef Jonak, Wyd. LTN, Lublin 2008, 24 – 41.

7. Taranenko W., Świć A.: Urządzenia sterujące dokładnością obróbki części maszyn o małej sztywności. Wydawnictwo Politechniki Lubelskiej, Lublin 2006, 186.

### **THE INTRODUCTION TO COMPUTER MODELLING OF DYNAMIC SYSTEM CHARACTERISTICS OF MACHINING OF SHAFTS WITH LOW RIGIDITY**

**Summary:**

The paper presents a formulated mathematical model of dynamic system of machining shafts including non-rigid parts. Using the approximation of exponential function by Padé series the model has been abridged. Basing on that model, the computer programme for simulating the dynamic system of turning and grinding was build. The article introduces results of mathematical modelling obtained using created tool.

**Keywords:** modelling, shafts, low rigidity, programming, dynamic system, machining, Visual Basic.