

Monika Kulisz¹⁾

IDENTYFIKACJA I WERYFIKACJA MODELU OBIEKTU DYNAMICZNEGO NA PRZYKŁADZIE PROCESU FREZOWANIA

Streszczenie: Przedstawiony w pracy proces jest obiektem dynamicznym, którego proces identyfikacji przeprowadzono za pomocą modelu „czarnej skrzynki”. W tym celu użyto narzędzia System Identyfikation Toolbox w środowisku Matlab. Przeprowadzono identyfikację modelu poprzez estymację struktury i parametrów modelu. Porównano zgodność różnych postaci modeli.

Słowa kluczowe: frezowanie, identyfikacja systemu, model „czarnej skrzynki”, obiekt dynamiczny.

WSTĘP

Proces frezowania jest technologią obróbki skrawaniem szczególnie często stosowaną w przemyśle motoryzacyjnym i lotniczym do obróbki przedmiotów o skomplikowanych kształtach. W celu poprawy wydajności stosowane są duże szybkości skrawania, przy zachowaniu założonej dokładności i powtarzalności obróbki. Przy obróbce wysokowydajnościowej pojawia się problem oddziaływania dynamicznego sił skrawania, które powodują odchylenia od założonego przez technologa toru narzędzia [1, 2]. Jest to szczególnie widoczne dla przedmiotów o zmiennej sztywności. Rozwiązaniem takiego problemu mogłaby być obróbka w obszarach o małej sztywności przy zmniejszonych parametrach skrawania, jednakże zmniejszona by była wydajność obróbki. Zatem nie jest to rozwiązanie optymalne. Innym rozwiązaniem jest potraktowanie procesu frezowania jako obiektu sterowania w którym wielkością regulowaną będzie błąd kształtu przedmiotu powodowany odkształceniem sprężystym w trakcie frezowania. Projektując proces sterowania należy poznać własności procesu sterowanego. Można tego dokonać przez budowę modelu procesu frezowania. Istotnym wyjściem z procesu z punktu widzenia technologa są wartości odchylenia od toru narzędzia czyli błędy wymiaru utrwalone w geometrii wyrobu. Wartości tych błędów są mierzalne dopiero jako odchyłki od wymiaru nominalnego przedmiotu po obróbce. Na odchylenia od toru narzędzia w procesie frezowania ma wpływ geometria przedmiotu oraz składowa siła skrawania, skierowana prostopadle do przedmiotu obrabianego, jednak jest ona trudno mierzalna. Gdy obrabiany przedmiot ma zmienną

¹ Wydział Mechaniczny, Politechnika Lubelska.

geometrię to wraz z nią zmienia się sztywność przedmiotu, a co za tym idzie zmienia się tor narzędzia.

Błąd geometrii toru narzędzia będzie zależał, w każdym kolejnym punkcie, od bieżącej sztywności układu narzędzie- przedmiot obrabiany, bieżącego tłumienia, masy zastępczej oraz wartości chwilowej siły skrawania. Biorąc pod uwagę, że z natury procesu frezowania wynika pulsacja siły skrawania związana funkcyjnie z liczbą ostrzy i prędkością obrotową freza, na powierzchni przedmiotu nastąpi odwzorowanie efektów tego zjawiska. Intensywność tego odwzorowania zależy od bieżących właściwości dynamicznych procesu. W celu poznania i analizy właściwości tak złożonego modelu podjęto próbę identyfikacji modeli w kilku wybranych punktach toru narzędzia różniących się sztywnością przedmiotu obrabianego. Zbieranie danych do modelu budowanego na podstawie eksperymentu polega na wykonaniu kilku cykli obróbkowych. Przy każdym cyklu w określonych krótkich odcinkach toru narzędzia rejestrowana jest siła skrawania i dla tych samych odcinków mierzona jest wartość powstałych błędów na przedmiocie. Długość odcinków pomiarowych musi być tak dobrana, aby można było pominąć błąd niestacjonarności procesu.

PRZEDMIOT BADAŃ

W niniejszej pracy zamodelowano proces frezowania przy założeniu, że znane są parametry skrawania, które odpowiednio wynoszą: $V_c=251\text{m/min}$, $f_z=0,05\text{mm/ostre}$, $n=5000\text{obr/min}$, $a_p=6\text{mm}$, liczba ostrzy freza $z=4$ oraz efekty obróbki w określonych punktach przedmiotu obrabianego.

Wstępną analizę statyczną odkształceń przedmiotu poddanego frezowaniu wykonano w programie Abaqus Student Edition. Na podstawie danych materiałowych i parametrów obróbki określone zostały przemieszczenia punktów toru narzędzia pod wpływem statycznych wartości sił skrawania. Przedmiot ma zmienną geometrię, zatem w każdym punkcie zmienia się jego sztywność. Zmiana sztywności powoduje zmianę toru narzędzia co zostało przedstawione na rys.1. W wyniku analizy zjawisk zachodzących podczas frezowania można postawić tezę, że proces frezowania nie można analizować statycznie, należy badać proces jako obiekt dynamiczny, ponieważ przy obróbce wysokowydajnościowej pojawiają się oddziaływania dynamiczne sił skrawania. Siły te powodują dodatkowe odchylenia od założonego toru narzędzia. Tezę tą można udowodnić porównując wyniki błędu toru narzędzia uzyskane z symulacji w programie Abaqus z wynikami symulacji dla modeli dynamicznych w tych samych punktach.

IDENTYFIKACJA I WERYFIKACJA MODELU OBIEKTU DYNAMICZNEGO W ŚRODOWISKU MATLAB

Identyfikacja systemu jest procesem iteracyjnym, w którym porównywane są modele z różnymi strukturami danych i porównywana jest ich zgodność. Rozpo-

czyną się od oszacowania parametrów prostych modeli strukturalnych. Jeśli adekwatność modelu jest niezadowalająca, stopniowo zwiększana jest złożoność struktury modelu. Ostatecznie wybierany jest najprostszy model najlepiej opisujący dynamikę systemu. Inną przyczyną rozpoczynania od modeli prostych jest to, że bardziej złożone modele są nie zawsze bardziej dokładne. Poza tym zwiększanie złożoności modelu zwiększa niepewność oszacowania parametrów i wymaga więcej danych, które są wspólne dla modeli nieliniowych [5].

Użytecznym oprogramowaniem do identyfikacji systemu jest środowisko Matlab, a dokładniej narzędzie: System Identification Toolbox [4], które na podstawie zarejestrowanych sygnałów wejścia i wyjścia, proponuje najlepiej dopasowane równanie dynamicznego modelu.

Identyfikację modelu dynamicznego można podzielić na 2 etapy. Pierwszy to estymacja struktury i parametrów modelu, drugi to weryfikacja modelu.

Identyfikację modelu dynamicznego przeprowadzono w środowisku obliczeniowym Matlab. Biorąc pod uwagę złożoność obiektu dynamicznego wykorzystano do budowy modelu model „czarnej skrzynki”. W oparciu o zmieniające się odcinkach pomiarowych parametry wejścia (wartość siły skrawania) i wyjścia (uzyskane przemieszczenie) konstruowano model. Pakiet System Identification zawiera wiele funkcji do identyfikacji modeli parametrycznych [4]. Do identyfikacji obiektu wybrano model ARX. Przeanalizowano kilka fragmentów toru o różnej sztywności i wyniki przedstawiono dla jednego z nich. Za pomocą polecenia `arxstruc`, które oblicza funkcję strat V , przeszukano szeregi struktur rzędu 1:5, z opóźnieniami 1:3. Następnie wybrano tę strukturę, która ma najmniejszą funkcję strat, czyli $nn=8\ 3\ 1$. Oznacza to, że w przeszukanych modelach najmniejszą funkcję strat ma model z ośmioma biegunami, dwoma zerami, o opóźnieniu rzeczywistym $nk=1$. Obliczono model nn : `model1` w postaci:

$$A(q)y(t) = B(q)u(t) + e(t), \quad (1)$$

gdzie: $A(q) = 1 - 1.659 q^{-1} + 0.8016 q^{-2} - 0.07987 q^{-3} - 0.2749 q^{-4} + 0.2723 q^{-5} - 0.2904 q^{-6} + 0.2288 q^{-7} + 0.02851 q^{-8}$, zaś $B(q) = 1.502e-006 q^{-1} + 4.497e-007 q^{-2} + 1.763e-006 q^{-3}$.

Do celów porównawczych obliczono inne modele. Model `pem`, to ogólny model, który nie wymaga deklarowania a priori rzędu modelu. Struktura jest poszukiwana automatycznie metodą błędu predykcji. Obliczono drugi model: `model2 pem` o następującej postaci:

$$x(t+Ts) = A x(t) + B u(t) + K e(t) \quad (2)$$

$$y(t) = C x(t) + D u(t) + e(t) \quad (3)$$

gdzie:

$$A = \begin{bmatrix} 0.98612 & -0.081762 \\ 0.11464 & 1.0008 \end{bmatrix}$$

$$B = \begin{bmatrix} -7.6636e-6 \\ -4.3963e-5 \end{bmatrix}$$

$$C = [0.80507 \quad -0.14566]$$

$$D = 0$$

$$K = \begin{bmatrix} 1.4386 \\ -2.5415 \end{bmatrix}$$

$$x(0) = \begin{bmatrix} 0.10896 \\ -0.022165 \end{bmatrix}$$

Trzeci model to armax: model3=armax w postaci:

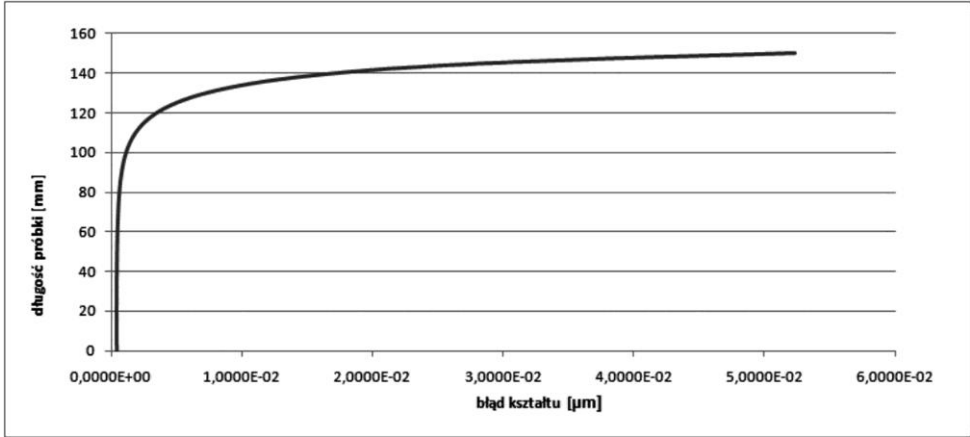
$$A(q)y(t) = B(q)u(t) + C(q)e(t) \tag{4}$$

gdzie:

$$A(q) = 1 - 1.987 q^{-1} + 0.9963 q^{-2},$$

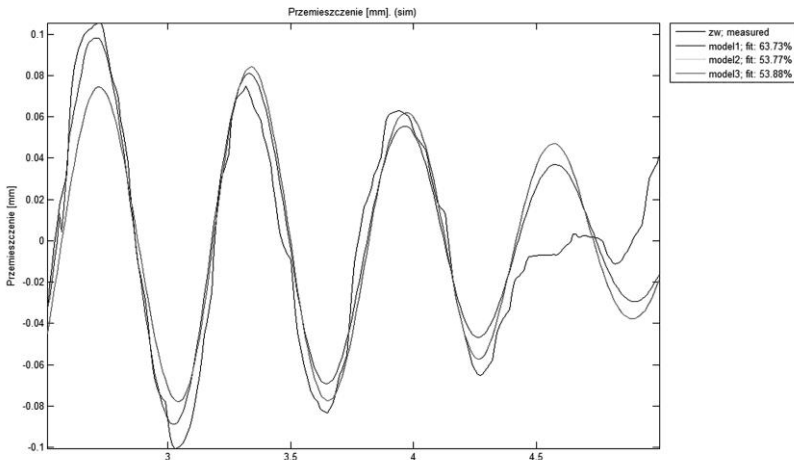
$$B(q) = 2.575e-007 q^{-1} + 2.837e-006 q^{-2},$$

$$C(q) = 1 - 0.4597 q^{-1} - 0.381 q^{-2}.$$



Rys. 1. Wynik symulacji analizy błędu kształtu pod wpływem siły statycznej w programie Abaqus Student Edition

Fig. 1. Error's shape analysis simulation result under the influence of the static force in The Abaqus Student Edition

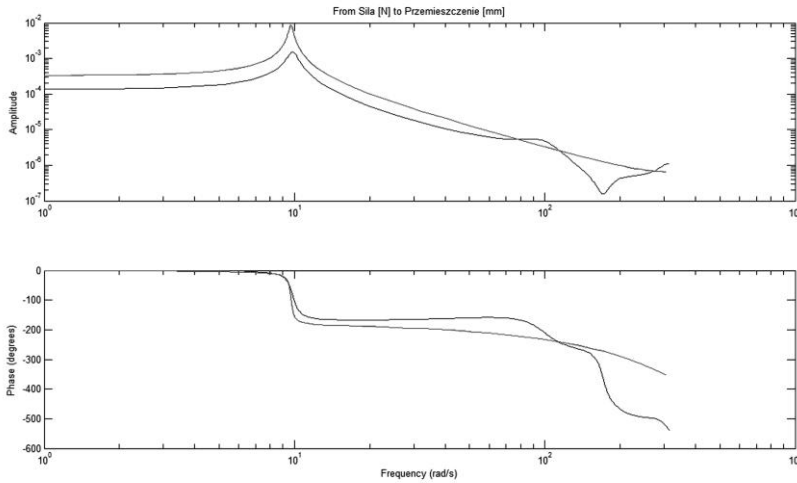


Rys. 2. Przebieg sygnału na wyjściach kolejnych modeli

Fig. 2. The signal's course on the subsequent models outputs

Kolejny etap to weryfikacja modeli, porównano je w dziedzinie czasu i częstotliwości. Na początku wizualnie sprawdzana jest zgodność wyjścia modelu z rzeczywistym pomiarem: przy pomocy funkcji `compare(zw, model0, model1, model2)` [6]. Wykresy przedstawiono na rys.2.

Dla każdego modelu sprawdzono wizualnie niepewność modelu, obserwując granice rozrzutu parametrów w przedziale równym trzykrotnej wartości odchylenia standardowego oraz sprawdzić czy reszty spełniają test białości (próbki nie powinny wychodzić poza zaznaczony obszar). Porównano modele w dziedzinie częstotliwości, obliczając transmitancję widmową obiektu i porównując z nią charakterystyki amplitudowo-fazowe (wykresy Bodego) modeli (rys.3).



Rys. 3. Porównanie charakterystyki amplitudowo-fazowej z widmem pomiarowym.

Fig. 3. Comparison of amplitude-phasing characteristic with the measurement spectrum

Porównanie charakterystyki amplitudowo-fazowej z widmem pomiarowym pokazuje niekorzystne skutki przewymiarowania modelu. Jeśli niezgodność pojawia się na końcu pasm, należy odfiltrować dane lub wypróbować model niższego rzędu. Często model ma rozbieżności przy wysokich częstotliwościach, zmniejszenie rzędu modelu zmniejsza tą rozbieżność.

PODSUMOWANIE

Wyniki dla analizy statycznej i dynamicznej są zgodne tylko dla zerowej amplitudy. Dla maksymalnej amplitudy przemieszczenia są do trzech razy większe. Oznacza to, że dany obiekt należy analizować jako obiekt dynamiczny. Wartość błędów geometrycznych rośnie wraz z częstotliwością wymuszeń siłowych. Wzrost ten jest jednak zróżnicowany dla odcinków pomiarowych o różnej sztywności obrabianego przedmiotu. Model statyczny nie odzwierciedla rzeczywistości, ponieważ pojawiają się siły dynamiczne, których nie uwzględnia. Na odchylenia

od toru narzędzia w procesie frezowania tego przedmiotu ma wpływ zmienna geometria przedmiotu, więc i jego sztywność oraz oddziaływanie dynamicznych sił skrawania, ponieważ proces frezowania nie jest procesem ciągłym. Trudne jest opisanie dynamiki procesu, ponieważ dla danego przedmiotu sztywność elementu zmienia się w każdym punkcie. Poza tym zmienna sztywność jak i zmienna siła skrawania może powodować powstawanie drgań w układzie. Uzyskane z procesu identyfikacji modele będą mogły być wykorzystane do konstruowania systemu adaptacyjnego sterowania procesem frezowania. Przewidując zmianę własności obiektu regulowanego, będzie można dla kolejnych punktów toru narzędzia zmieniać własności regulatora, tak aby kompensował precyzyjniej błędy kształtu w kolejnej chwili na podstawie wcześniejszych pomiarów siły skrawania. Bezpośrednim wejściem sterującym procesem może być zmiana położenia frezu względem toru skierowana przeciwnie do zakłócenia. Zmiana taka może być zrealizowana przy pomocy zespołów posuwowych frezarki.

PIŚMIENNICTWO

1. Tang W.X., Song Q.H., Yu S.Q., Sun S.S., Li B.B., Du B. Ai X.: Prediction of chatter stability in high-speed finishing end milling considering multi-mode Dynamics. *Journal of Materials Processing Technology*, V.209, I. 5, marzec 2009, s. 2585-2591.
2. Yih-fong T., Ming-der J.: Dimensional quality optimisation of high-speed CNC milling process with dynamic quality characteristic. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, V. 21, I.6, grudzień 2005, s. 506-517.
3. Czemplik A.: Modele dynamiki układów fizycznych dla inżynierów, Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, Warszawa 2008.
4. Ljung L.: *System Identification Toolbox 7. User's Guide*, MathWorks, 2010.
5. Soderstrom T., Stoica P.: *Identyfikacja systemów*, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 1997.
6. Zimmer A., Englot A.: *Identyfikacja obiektów i sygnałów. Teoria i praktyka dla użytkowników Matlab*, Politechnika Krakowska, Kraków 2005.

IDENTIFICATION AND VERIFICATION OF DYNAMIC OBJECT MODEL ON THE EXAMPLE OF THE MILLING PROCESS

Summary:

The object discussed in the present paper is dynamic. Its identification process was conducted with the use of a "black box" model. For this purpose The System Identification Toolbox in the Matlab environment has been used. The model identification was carried out due to the model structure and parameters' estimation. As a result, various models' forms was compared.

Keywords: milling, system identification, "black box" model, dynamic object.