

IDENTYFIKACJA PARAMETRÓW FIZYCZNYCH ŁOŻYSKA MAGNETYCZNEGO

W niniejszym artykule przedstawiona jest nowa metoda identyfikacji parametrów fizycznych układu otwartego. Metoda ta zastosowana do identyfikacji parametrów łożyska magnetycznego, jest rozszerzeniem metody OCID opisanej w [5]. Układ zamknięty składa się z czujników pomiarowych, cewek elektromagnesów jako elementu wykonawczego i regulatora. Dla wyznaczenia parametrów Markowa układu zamkniętego został zaprojektowany obserwator skończony. Korzystając z metody rozwiązywania problemu własnego ERA możemy wyznaczyć estymaty modelu modalnego układu zamkniętego w przestrzeni stanu, na podstawie których wyznaczane są parametry fizyczne układu otwartego.

PHYSICAL PARAMETERS IDENTIFICATION OF MAGNETIC BEARING

A new identification method of physical parameters of open-loop system is presented in the paper. This method is used for physical parameters identification of magnetic bearing and it is the extension of the OCID (Observer/Controller Identification) method described in [5]. The closed-loop system consists of sensors, magnetic coils as actuator, and controller. Deadbeat state observer was designed to estimate the closed-loop system Markov parameters. Markov parameters are used to obtain a modal state-space model of the closed-loop system by using ERA (the Eigensystem Realization Algorithm). Physical parameters of the open-loop system are computed from the modal parameters of the closed-loop system.

1. WPROWADZENIE

Łożyskiem magnetycznym określanym jest zespół elektromagnesów wytwarzających sterowane pole magnetyczne służące do bezkontaktowego zawieszenia ferromagnetycznej masy. Zadanie łożyska magnetycznego polega na utrzymaniu łożyskowanej masy w punkcie pracy, który jest określony przez szczerelinę nominalną x_0 i prąd punktu pracy i_0 .

Aktywne zawieszenia magnetyczne są układami strukturalnie niestabilnymi. Do zapewnienia prawidłowej pracy zawieszenia należy włączyć w tor sterowania zawieszeniem regulator zapewniający odpowiedni zapas stabilności. Regulatory wykorzystywane do sterowania zawieszonymi magnetycznymi można podzielić na regulatory włączone w torze sprzężenia zwrotnego od wektora wyjść np. regulator typu PD² oraz regulatory proporcjonalne K włączone w torze sprzężenia zwrotnego od wektora stanu. Powyższe regulatory stosuje się przy sterowaniu napięciowym.

W niniejszym artykule rozważania ograniczymy do identyfikacji dynamiki ruchu translacyjnego łożyskowanej masy, a badania przeprowadzimy na modelu symulacyjnym. W przypadku obiektu rzeczywistego należałoby jednocześnie uwzględnić ruch rotacyjny i ruchy te rozprząc, stosując transformację modalną opisaną w [2]. Regulatory PD² i K dla układu sterowania napięciowego ruchem translacyjnym zostaną zaprojektowane w technice dyskretnej metodą przesuwania biegunów. Do przeprowadzenia badań symulacyjnych oraz budowy modeli na potrzeby identyfikacji wykorzystane zostanie środowisko Matlab-Simulink.

2. MODEL RUCHU TRANSLACYJNEGO

Model ruchu translacyjnego można przedstawić we współrzędnych wektora stanu:

$$\begin{aligned} \dot{x} &= Ax + Bu, \\ y &= Cx, \end{aligned} \quad (1)$$

przy czym współrzędne te mogą być zmiennymi zespolonymi, jeśli współrzędne (x, y) i inne zmienne w płaszczyźnie łożyska zastąpimy zmiennymi (np. $r = x + jy$) na płaszczyźnie zespolonej [3].

Wektor stanu opisany jest przez przemieszczenie masy, prędkość masy oraz prąd sterujący:

$$x = [r \quad \dot{r} \quad i]^T, \quad (2)$$

a wektor pomiaru:

$$y = r. \quad (3)$$

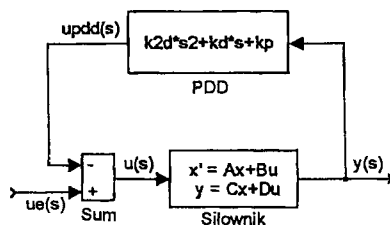
Macierze opisujące łożysko w przestrzeni stanu charakteryzują stałe współczynniki zależne od jego konstrukcji:

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ v_1 & 0 & v_2 \\ 0 & -v_3 & -v_4 \end{bmatrix}, \quad B = [0 \quad 0 \quad v_5]^T, \quad C = [1 \quad 0 \quad 0], \quad (4)$$

gdzie: $v_1 = \frac{2k_r}{m}$, $v_2 = \frac{2k_i}{m}$, $v_3 = \frac{k_i}{L}$, $v_4 = \frac{R}{L}$, $v_5 = \frac{1}{L}$,

a k_r , k_i , R , L wyrażają odpowiednio sztywność przemieszczeniową i prądową łożyska, rezystancję cewek oraz indukcyjność, m jest masą zredukowaną do płaszczyzny łożyska. Powyższe macierze zostały zbudowane na podstawie równań opisujących dynamikę obiektu. Macierze te są przedmiotem przeprowadzonej identyfikacji.

3. PROJEKTOWANIE REGULATORA



Rys.1. Sterowanie aktywnym zawieszeniem magnetycznym
Z regulatorem PD²

Na (rys.1) przedstawiono schemat strukturalny układu sterowania aktywnym zawieszeniem magnetycznym. W torze sprzężenia włączono regulator typu PD², który posiada prawo sterowania:

$$u_{\text{pdd}}(s) = [k_{2d}s^2 + k_d s + k_p]y(s). \quad (5)$$

Równanie charakterystyczne transmitancji opisującej siłownik elektromechaniczny w wariancie sterowania napięciowego z regulatorem PD² opisane jest w dziedzinie operatora Laplace'a następująco:

$$s^3 + \left(v_4 + \frac{k_{2d}}{a}\right)s^2 + \left(v_2 v_3 - v_1 + \frac{k_d}{a}\right)s + \left(\frac{k_p}{a} - v_1 v_4\right) = 0, \quad (6)$$

gdzie: $a = \frac{2k_i}{mL}$.

Wszystkie współczynniki równania charakterystycznego transmitancji układu (rys.1) zależą od nastaw regulatora oraz od parametrów aktywnego zawieszenia magnetycznego. W wyniku tego, do wyznaczania nastaw regulatora można zastosować metodę przesuwania biegunów. Zakłada się, że układ zamknięty posiada trzy bieguny o wartościach $s=p_1$, $s=p_2$ i $s=p_3$. Równanie charakterystyczne dla wyznaczonych - ze względu na przyjęte wymagania dynamiczne układu - biegunów przyjmuje postać:

$$s^3 - (p_1 + p_2 + p_3)s^2 + (p_1 p_2 + p_1 p_3 + p_2 p_3)s - p_1 p_2 p_3 = 0. \quad (7)$$

Porównując współczynniki równania charakterystycznego (6) ze współczynnikami założonego równania charakterystycznego (7) można wyznaczyć nastawy analogowego regulatora PD²:

$$k_p = \frac{-p_1 p_2 p_3 + v_1 v_4}{a}, \quad k_{2d} = \frac{-(p_1 + p_2 + p_3) - v_4}{a}, \quad (8)$$

$$k_d = \frac{(p_1 p_2 + p_1 p_3 + p_2 p_3) + v_1 - v_2 v_3}{a}.$$

Na podstawie nastaw regulatora analogowego oraz parametrów procesu przetwarzania analogowo-cyfrowego (okres próbkowania T) wyznaczony został regulator dyskretny:

$$G_{\text{PDD}} = \frac{\alpha z^2 - \beta z + \gamma}{z^2}, \quad (9)$$

którego współczynniki powiązane są z nastawami regulatora analogowego następującymi zależnościami:

$$\alpha = k_p + \frac{k_d}{T} + \frac{k_{2d}}{T^2}, \quad \beta = \frac{k_d}{T} + \frac{2k_{2d}}{T^2}, \quad \gamma = \frac{k_{2d}}{T^2}. \quad (10)$$

4. ALGORYTM IDENTYFIKACJI

Do identyfikacji parametrów fizycznych siłownika wykorzystany zostanie algorytm metody OCID - Observer/Controller Identification opisanej w [5]. Zakłada się, że obiekt jest stabilizowany przy pomocy układów automatycznej regulacji. Dla takiego układu można identyfikować nie tylko dynamikę układu zamkniętego, ale również niestabilnego obiektu sterowania i parametrów regulatora. Na potrzeby tej metody zbudowany został algorytm identyfikacji w którym wykorzystano obserwator stanu. Obserwator ma na celu odtworzenie - na podstawie sygnałów sterujących zawieszeniem oraz wyjściowych z zawieszenia - wektora

stanu obiektu na potrzeby układu sterowania z regulatorem proporcjonalnym K. Prawo sterowania dla sterowania napięciowego z regulatorem K opisuje równanie:

$$u(s) = -Kx(s) + u_e(s), \quad (11)$$

natomiast dla sterowania z regulatorem PD² równanie:

$$u(s) = -(k_{2d}r + k_d\dot{r} + k_p i) + u_e(s), \quad (12)$$

gdzie $u_e(s)$ jest sygnałem trwale pobudzającym o szerokim widmie wymuszenia, pseudolosowym. Współczynniki regulatora proporcjonalnego można określić na podstawie zależności pomiędzy prawami sterowania dla regulatorów PD² i K:

$$K = [k_p + k_i v_1 \quad k_d \quad k_i v_2]. \quad (13)$$

W pierwszym etapie identyfikacji wyznacza się parametry Markowa obserwatora skończonego (deadbeat) a następnie na ich podstawie parametry Markowa dyskretnego układu zamkniętego. Obserwator o czasie skończonym zastosowano ze względu na problemy związane z zapewnieniem zerowych warunków początkowych i długością procesu przejściowego w warunkach eksperymentu. W drugim etapie wyznacza się z parametrów Markowa macierze Hankela. W wyniku ich dekompozycji korzystając z algorytmu numerycznego rozwiązywania zagadnienia wartości szczególnych (ERA) można określić estymaty parametrów modalnych układu zamkniętego. Trzeci etap polega na wyznaczeniu realizacji układu otwartego - obiektu fizycznego - bezpośrednio z wyznaczonych parametrów modalnych układu zamkniętego.

5. PARAMETRY MARKOWA UKŁADU ZAMKNIĘTEGO

Podczas identyfikacji korzystamy z parametrów Markowa Y_i , które wiążą sygnały wejściowe $u(k)$ i sygnały wyjściowe $y(k)$, (dowolnego obiektu: otwartego, zamkniętego, lub ich fragmentu, przy zerowych warunkach początkowych), zależnością:

$$y(k) = \sum_{i=1}^{\infty} Y_i u(k-i), \quad Y_i = CA^{i-1}B. \quad (14)$$

Ponieważ dynamika obserwatora dąży do dynamiki obiektu, to w dalszych rozważaniach można model obiektu zastąpić modelem obserwatora.

Celem otrzymania równania stanu obserwatora do równania stanu obiektu (1) dodamy i odejmiemy człon $Gy(k)$, gdzie G jest dowolną macierzą (o określonych wymiarach) pozwalającą na pożądane kształtowanie macierzy stanu obserwatora. Po dodaniu do otrzymanych tym sposobem równań obserwatora, prawa sterowania od odtworzonego wektora stanu (11), otrzymamy model układu zamkniętego, który nazwiemy modelem obserwatora/regulatora:

$$\begin{aligned} \hat{x}(k+1) &= \bar{A}\hat{x}(k) + \bar{B}v(k), \\ y_o(k) &= \bar{C}\hat{x}(k), \end{aligned} \quad (15)$$

$$\text{gdzie: } \bar{A} = A - GC, \quad \bar{B} = [B \quad G], \quad \bar{C} = \begin{bmatrix} C_o \\ -K \end{bmatrix}, \quad v(k) = \begin{bmatrix} u(k) \\ y(k) \end{bmatrix}, \quad y_o(k) = \begin{bmatrix} \hat{y}(k) \\ u_k(k) \end{bmatrix}.$$

W macierzy pomiarowej obserwatora \bar{C} dostęp do całego wektora stanu zapewnia macierz:

$$C_o = I. \quad (16)$$

Dla funkcji przejścia pomiędzy wejściami a wyjściami z obserwatora (15) można sformułować parametry Markowa obserwatora/regulatora w następującej postaci:

$$\bar{Y}_k = \begin{bmatrix} C_o \\ -K \end{bmatrix} (A - GC)^{k-1} [B \ G] = \begin{bmatrix} \bar{Y}_k^{(1,1)} & \bar{Y}_k^{(1,2)} \\ -\bar{Y}_k^{(2,1)} & \bar{Y}_k^{(2,2)} \end{bmatrix}, \quad \text{dla } k = 1, 2, \dots \quad (17)$$

Powiązemy parametry Markowa obserwatora/regulatora z sygnałami wejściowymi i wyjściowymi następującym równaniem regresji liniowej:

$$y_t = \bar{Y} V_t, \quad (18)$$

gdzie:

$$y_t = \begin{bmatrix} \hat{y}(s+1) & \hat{y}(s+2) & \dots & \hat{y}(1-1) & \hat{y}(1) \\ u_k(s+1) & u_k(s+2) & \dots & u_k(1-1) & u_k(1) \end{bmatrix},$$

$$\bar{Y} = [\overline{CB} \ \overline{CAB} \ \dots \ \overline{CA}^{p-1}\overline{B}],$$

$$V_t = \begin{bmatrix} v(s) & v(s+1) & \dots & v(1-1) \\ v(s-1) & v(s) & \dots & v(1-2) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ v(s-p+1) & v(s-p+2) & \dots & v(1-p) \end{bmatrix}$$

Liczba p oznacza liczbę parametrów Markowa obserwatora/regulatora, które należy wyznaczyć, gdyż zakładamy, że:

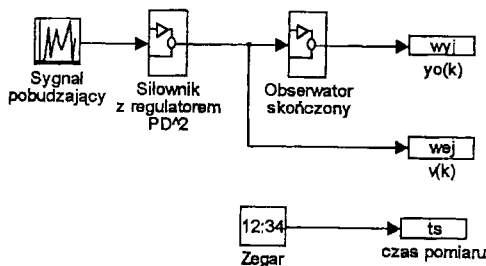
$$\bar{Y}_k = \overline{CA}^{k-1}\overline{B} = 0, \quad \text{dla } k > p.$$

Parametry Markowa obserwatora/regulatora znajdziemy pseudoodwracając macierz lub rozwiązując równanie (18) w sensie najmniejszej sumy kwadratów:

$$\bar{Y} = y_t V_t^*, \quad \bar{Y} = y_t V_t^T (V_t V_t^T)^{-1}. \quad (19)$$

To pierwsze rozwiązanie stosuje się, gdy rząd macierzy V_t jest mniejszy niż n . Zazwyczaj jednak szum pomiarowy powoduje, że macierz ta osiąga pełny rząd.

W warunkach eksperymentu trudno jest zapewnić zerowe warunki początkowe. Z drugiej strony układy mechaniczne są słabo tłumione, dlatego proces zanikania drgań swobodnych jest długi, co powoduje, że parametry Markowa zbyt wolno zbiegają się do zera. To z kolei narzuca długie sekwencje pomiarowe i obliczenia na dużych, źle uwarunkowanych macierzach.



Rys.2. Model symulacyjny z wymuszeniem losowym zbudowany w środowisku Matlab-Simulink

Aby uniknąć powyższych trudności proponuje się wprowadzenie obserwatorów stanu. Najkrótszy czas zanikania procesów przejściowych zapewnia obserwator skończony. Wszystkie wartości własne takiego obserwatora są równe zero, a proces przejściowy trwa nie dłużej niż $n+1$ kroków próbkowania, gdzie n jest rzędem macierzy stanu obiektu.

Na potrzeby badań symulacyjnych został zbudowany (rys.2) układ składający się z układu zamkniętego (rys.1) i obserwatora skończonego (proces przejściowy zanika po p krokach), skonstruowanego na potrzeby identyfikacji.

6. PARAMETRY MARKOWA STEROWANEGO OBIEKTU, WZMOCNIENIA OBSERWATORA I REGULATORA

Zauważmy że dla czterech funkcji przejścia pomiędzy wybranymi punktami pomiarowymi $v(k)$ i $y_o(k)$ (15) można sformułować zestawione parametry Markowa:

$$\mathbf{Y} = \begin{bmatrix} \mathbf{C}_o \\ -\mathbf{K} \end{bmatrix} \mathbf{A}^{k-1} [\mathbf{B} \quad \mathbf{G}] = \begin{bmatrix} \mathbf{C}_o \mathbf{A}^{k-1} \mathbf{B} & \mathbf{C}_o \mathbf{A}^{k-1} \mathbf{G} \\ -\mathbf{K} \mathbf{A}^{k-1} \mathbf{B} & \mathbf{K} \mathbf{A}^{k-1} \mathbf{G} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{Y}_k^{(1,1)} & \mathbf{Y}_k^{(1,2)} \\ -\mathbf{Y}_k^{(2,1)} & \mathbf{Y}_k^{(2,2)} \end{bmatrix}, \quad (20)$$

dla $k=1, 2, \dots$, gdzie np.: $\mathbf{Y}_k^{(1,1)} = \mathbf{C}_o \mathbf{A}^{k-1} \mathbf{B}$ są parametrami Markowa obiektu i mogą zostać wykorzystane do wyznaczenia realizacji obiektu, $\mathbf{Y}_k^{(2,1)} = \mathbf{K} \mathbf{A}^{k-1} \mathbf{B}$ są parametrami Markowa macierzy wzmocnienia regulatora i mogą zostać wykorzystane do wyznaczenia tej macierzy. Porównując podmacierze w równaniach (17) i (20) można te parametry wyrazić przez parametry Markowa obserwatora/regulatora:

$$\mathbf{Y}_k^{(1,1)} = \bar{\mathbf{Y}}_k^{(1,1)} - \sum_{i=1}^k \bar{\mathbf{Y}}_i^{(1,2)} \mathbf{Y}_{k-i}^{(1,1)}, \quad \mathbf{Y}_k^{(1,2)} = \bar{\mathbf{Y}}_k^{(1,2)} - \sum_{i=1}^k \bar{\mathbf{Y}}_i^{(1,2)} \mathbf{Y}_{k-i}^{(1,2)}, \quad (21 \text{ a, b})$$

$$\mathbf{Y}_k^{(2,1)} = \bar{\mathbf{Y}}_k^{(2,1)} - \sum_{i=1}^k \bar{\mathbf{Y}}_i^{(2,2)} \mathbf{Y}_{k-i}^{(1,1)}, \quad \mathbf{Y}_k^{(2,2)} = \bar{\mathbf{Y}}_k^{(2,2)} - \sum_{i=1}^k \bar{\mathbf{Y}}_i^{(2,2)} \mathbf{Y}_{k-i}^{(1,2)}, \quad (21 \text{ c, d})$$

gdzie: $\bar{\mathbf{Y}}_k^{(1,1)} = \bar{\mathbf{Y}}_k^{(1,2)} = \mathbf{0}$ dla $k > p$, $\bar{\mathbf{Y}}_k^{(2,1)} = \bar{\mathbf{Y}}_k^{(2,2)} = \mathbf{0}$ dla $k > p$.

Cztery równania (21) stanowią zbiór zależności do obliczania parametrów obiektu, regulatora i obserwatora z parametrów Markowa obserwatora/regulatora. Parametry Markowa obserwatora/regulatora otrzymywane są w wyniku przeprowadzenia obliczeń na sygnałach wejścia (suma sygnału trwale pobudzającego i sygnału sprzężenia zwrotnego) i wyjścia (sygnału proporcjonalnego do przemieszczenia) otrzymanych w eksperymencie.

7. OBLICZENIE REALIZACJI OBIEKTU

Aby otrzymać modalną realizację obiektu w postaci trójki macierzy opisującej układ obserwatora/regulatora w przestrzeni stanu, z parametrów Markowa obserwatora/regulatora (17) zbudujemy macierz Hankela:

$$\mathbf{H}(k-1) = \begin{bmatrix} \bar{\mathbf{Y}}_k & \bar{\mathbf{Y}}_{k+1} & \dots & \bar{\mathbf{Y}}_{k+\beta} \\ \bar{\mathbf{Y}}_{k+1} & \bar{\mathbf{Y}}_{k+2} & \dots & \bar{\mathbf{Y}}_{k+\beta+1} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \bar{\mathbf{Y}}_{k+\alpha} & \bar{\mathbf{Y}}_{k+\alpha+1} & \dots & \bar{\mathbf{Y}}_{k+\alpha+\beta} \end{bmatrix} \quad (22)$$

W wyniku dekompozycji macierzy Hankela:

$$H(0) = RDS^T = R_n D_n S_n^T$$

i wykorzystania macierzy $H(1)$ otrzymamy następujące macierze układu:

$$\begin{aligned}\hat{A} &= D_n^{-1/2} R_n H(1) S_n D_n^{-1/2}, \\ \hat{B} &= D_n^{1/2} S_n^T E_{m+r}, \\ \hat{C} &= E_{m+r}^T R_n D_n^{1/2}.\end{aligned}\quad (23)$$

Macierz E_{m+r} ma postać: $E_{m+r}^T = [I_{m+r} \quad 0_{m+r} \quad \dots \quad 0_{m+r}]$.

Otrzymana wzorem (23) trójka macierzy $\{\hat{A}, \hat{B}, \hat{C}\}$ jest modalną realizacją układu obserwatora/regulatora. Jest ona jedną z wielu realizacji tego obiektu i zazwyczaj nie jest tożsama liczbowo z trójką macierzy opisującą układ w przestrzeni stanu otrzymaną na podstawie praw fizyki dla danego obiektu. Obie realizacje (trójki macierzy) są tożsame dynamicznie, to znaczy mają te same wartości własne i wektory własne.

W [4] zostało wykazane, że parametry Markowa nie zależą od wyboru układu współrzędnych stanu, dlatego też na podstawie znajomości macierzy transformacji modalnej T oraz realizacji modalnej układu można wyznaczyć w wyniku transformacji realizację fizyczną układu o tych samych funkcjach przejścia. Przekształcając parametry Markowa (17) obserwatora/regulatora wg powyższej zasady (24), przy użyciu funkcji transformacji modalnej T otrzymujemy nową trójkę macierzy, które są macierzami modalnymi obserwatora/regulatora (23):

$$\bar{Y}_k = \bar{C} \bar{A}^{k-1} \bar{B} = \bar{C} T (T^{-1} \hat{A}^{k-1} T) T^{-1} \hat{B} = \hat{C} \hat{A}^{k-1} \hat{B}. \quad (24)$$

Dysponując realizacją modalną (23) oraz funkcją transformacji (25):

$$T = \hat{C}_o^{-1}, \quad \text{gdzie} \quad \hat{C}_o^{-1} = \hat{C}^{-1} (1:3, 1:3), \quad (25)$$

mogę wyznaczyć nową trójkę macierzy, będącą realizacją fizyczną dyskretnego układu obserwatora/regulatora:

$$\{T^{-1} \hat{A}^{k-1} T, T^{-1} \hat{B}, \hat{C} T\} \bar{C} \bar{A}^{k-1} \bar{B} = \{\hat{A}, \hat{B}, \hat{C}\}. \quad (26)$$

Obliczenie realizacji fizycznej układu otwartego wyznaczane jest na podstawie zależności pomiędzy siłownikiem a obserwatorem/regulatorem (15).

8. BADANIA SYMULACYJNE

Dla przyjętych parametrów obiektu macierze A, B, C przyjmują postać:

$$A = 1.0e+005 * \begin{bmatrix} 0 & 0.0000 & 0 \\ 9.3306 & 0 & 0.0033 \\ 0 & -0.0228 & -0.0004 \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 2.3316 \end{bmatrix}, \quad C = [1 \quad 0 \quad 0].$$

Podając obiekt próbkowaniu z czasem próbkowania $T=0.0001s$ otrzymamy dyskretny model w przestrzeni stanu. Badania symulacyjne zostały przeprowadzone dla układu opisanego w punkcie 2. Charakterystyki (rys.3, 4) zostały wykreślone dla układu niezaburzonego przy dostępie do jednej składowej wektora stanu (przemieszczenie).

Macierze A_e przedstawione poniżej zostały zidentyfikowane dla dwóch przypadków:

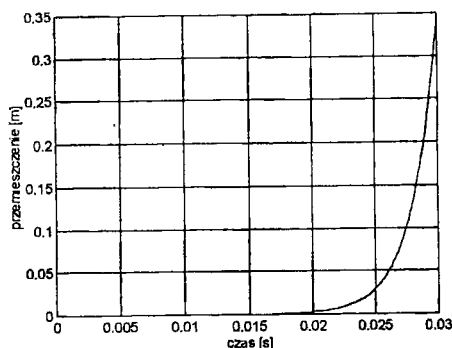
Symulacja dla nominalnych wartości współczynników łożyska

$$A_{e1} = 10^5 * \begin{bmatrix} 0.0000 & 0.0000 & 0.0000 \\ 9.3305 & 0.0000 & 0.0033 \\ -0.0009 & -0.0228 & -0.0004 \end{bmatrix}$$

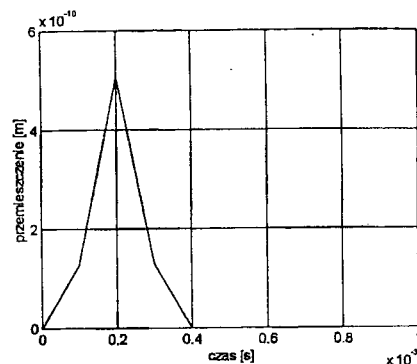
Symulacja dla dwukrotnie zwiększonej rezystancji cewek – zmiana v_4

$$A_{e2} = 10^5 * \begin{bmatrix} 0.0000 & 0.0000 & 0.0000 \\ 9.3307 & 0.0000 & 0.0033 \\ 0.0024 & -0.0228 & -0.0008 \end{bmatrix}$$

Porównując macierze A_{e1} i A_{e2} (elementy określone przez współczynniki łożyska) możemy łatwo zauważyć, że faktycznie w układzie zwiększył się dwukrotnie współczynnik v_4 .



Rys.3. Przemieszczenie łożyskowej masy (niestabilny układ otwarty) - odpowiedź na impuls napięcia obiektu określonego przez macierze modelu modalnego, przebieg parametrów Markowa dla układu otwartego.



Rys.4. Odpowiedź obserwatora skończonego na wymuszenie impulsem oraz przebieg parametrów Markowa obserwatora (składowa przemieszczenia).

9. LITERATURA

- [1] GOSIEWSKI Z., FALKOWSKI K.: *Two-Axial Gyroscope with Magnetically Supported Rotor*. Proceedings, Fifth International Symposium on Magnetic Bearings, Kanazawa, 1996, pp.65-70.
- [2] GOSIEWSKI Z.: *Sterowanie drganiami wirników sztywnych przy pomocy samopomiarowych łożysk magnetycznych*. Materiały IV Konferencji „Układy dynamiczne-teoria i zastosowanie”. Łódź, grudzień 1997, str. 109-114.
- [3] GOSIEWSKI Z.: *Sterowanie drganiami wirników izotropowych*. Prace Instytutu Lotnictwa, nr 4/97 (151) 1997, str. 81-91.
- [4] GOSIEWSKI Z.: *Identyfikacja parametrów dynamicznych samolotów i obiektów wyposażenia pokładowego*. Materiały II Konferencji Awioniki Rzeszów, wrzesień 1998, Cz. I, str. 10-20.
- [5] JER-NAN JUANG: *Applied System Identification*. Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey 07632, 1994.
- [6] OGATA K.: *Designing Linear Control Systems with MATLAB*, Prentice Hall, Englewood Cliffs, 1994.