

Zastosowanie obserwatora stanu w badaniach dynamiki modeli pojazdów

W artykule przeprowadzono syntezę macierzy stanu liniowego obserwatora stanu dla modeli konstrukcji typowych dla pojazdów przy znanych wymuszeniach oraz podano przykłady obliczeń.

1. Wprowadzenie

Pojazdy oraz ich zespoły funkcjonalne podlegają podczas eksploatacji złożonym, dynamicznym stanom obciążenia. W celu zapewnienia bezpieczeństwa oraz komfortu podróży, a także dla realizacji zadanych funkcji, konieczne jest zagwarantowanie im odpowiedniej niezawodności oraz trwałości. Wymaga to diagnozowania stanu szczególnie istotnych węzłów funkcjonalnych pojazdu, aby możliwie wcześniej wykryć zagrożenie pojawienia się uszkodzeń. Ocena stanu technicznego pojazdu i jego zespołów w czasie eksploatacji związana jest z prowadzeniem badań eksperymentalnych. Pojazdy są obiektami wielowymiarowymi i wielkości podlegających pomiarowi jest zwykle wiele. Zasadniczy problem podczas realizacji badań eksperymentalnych stanowi pomiar wielkości fizycznych w trudno dostępnych punktach obiektu. Celowym jest zatem poszukiwanie metod badawczych pozwalających na zmniejszenie liczby punktów pomiarowych, jak również umożliwiających wyznaczenie charakterystyk wielkości w miejscach trudno dostępnych pomiarowo.

Szybki rozwój metod numerycznych pozwalających na budowę złożonych, wielowymiarowych modeli w zakresie charakterystyk bezwładnościowych i sztywnościowych (zastosowanie MES) oraz rozwój technik identyfikacyjnych w zakresie charakterystyk tłumieniowych, umożliwiają budowę dyskretnych modeli zjawisk zachodzących w pojeździe i jego zespołach funkcjonalnych. Wprowadzenie modelu przestrzeni stanu umożliwia wykorzystanie metod nowoczesnej teorii regulacji – koncepcji obserwatora stanu. Obserwator stanu umożliwia odtworzenie trudno dostępnych fizycznie wielkości, na podstawie znajomości przebiegów wielkości dostępnych pomiarowo, przy znajomości modelu zjawisk zachodzących w badanym układzie. Koncepcja obserwatora stanu, wprowadzona przez Luenbergera [7], znalazła szerokie zastosowanie w technice regulacji. Zastosowanie obserwatora stanu w tworzeniu modelu półaktywnych zawiesznień przedstawiono w [3,11]. Identyfikację siły tarcia między oponą a jezdnią z wykorzystaniem obserwatora stanu, omówiono w [9]. Szczególne zastosowanie znalazła koncepcja obserwatora stanu w badaniach dynamiki układów napędowych [10] oraz w detekcji pęknięć wałów osiowych pojazdów i turbogeneratorów [8]. Szerokie spektrum zastosowania obserwatora stanu w monitorowaniu stanu procesów zachodzących w układach dynamicznych przedstawiono w pracach [1,2,4,6].

W artykule przedstawiono na wybranych przykładach, odpowiadających modelom stosowanym w badaniu pojazdów, zastosowanie obserwatora stanu przy odtwarzaniu trudno mierzalnych zmiennych stanu.

2. Obserwator stanu dla obiektu o stałych parametrach i znanych wymuszeniach

Równanie różniczkowe opisujące zjawiska ruchu zachodzące w układzie mechanicznym ma postać

$$\mathbf{M} \cdot \ddot{\mathbf{q}}(t) + \mathbf{C} \cdot \dot{\mathbf{q}}(t) + \mathbf{K} \cdot \mathbf{q}(t) = \mathbf{U} \cdot \mathbf{u}(t) \quad (1)$$

gdzie $\mathbf{q}(t)$ jest n -wymiarowym wektorem współrzędnych uogólnionych, a kropką oznaczono jego pochodną względem czasu, natomiast $\mathbf{u}(t)$ jest p -wymiarowym wektorem wejść. Przez \mathbf{M} , \mathbf{C} i \mathbf{K} oznaczono kwadratowe macierze n -tego rzędu (odpowiednio) bezwładności, tłumienia i sztywności, a \mathbf{U} jest macierzą wejść o wymiarach $n \times p$.

Po wprowadzeniu $2n$ -wymiarowego wektora stanu postaci

$$\mathbf{x} = \begin{bmatrix} \mathbf{q} \\ \dot{\mathbf{q}} \end{bmatrix} \quad (2)$$

równanie (1) przedstawiono w postaci układu dwóch równań:

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A} \cdot \mathbf{x} + \mathbf{B} \cdot \mathbf{u} \quad (3)$$

$$\mathbf{y} = \mathbf{D} \cdot \mathbf{x} \quad (4)$$

gdzie macierz

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} \mathbf{0} & \mathbf{E} \\ -\mathbf{M}^{-1} \cdot \mathbf{K} & -\mathbf{M}^{-1} \cdot \mathbf{C} \end{bmatrix} \quad (5)$$

o wymiarze $2n \times 2n$ jest nazywana macierzą stanu, macierz \mathbf{B} o wymiarze $p \times 2n$ macierzą wejść, a macierz \mathbf{D} o wymiarze $r \times 2n$ macierzą wyjść określoną przez przyjęcie wektora wielkości mierzonych. Przez \mathbf{E} oznaczono macierz jednostkową o wymiarze $n \times n$, $\mathbf{u}(t)$ jest p -wymiarowym wektorem wejść, $\mathbf{y}(t)$ jest r -wymiarowym wektorem wyjść.

Założono, że para (\mathbf{A}, \mathbf{B}) jest sterowalna, para (\mathbf{A}, \mathbf{D}) jest obserwowalna [1,7], a wektor stanu \mathbf{x} nie jest bezpośrednio dostępny dla pomiaru.

Obserwatorem układu (3 i 4) nazwano układ, który odtwarza wektor \mathbf{x} na podstawie znanych wielkości $\mathbf{u}(t)$ oraz $\mathbf{y}(t)$, a którego matematyczny model ma postać [7]

$$\dot{\hat{\mathbf{x}}} = \mathbf{F} \cdot \hat{\mathbf{x}} + \mathbf{G} \cdot \mathbf{u} + \mathbf{H} \cdot \mathbf{y} \quad (6)$$

gdzie \hat{x} jest $2n$ -wymiarowym estymatorem wektora stanu, $u(t)$ oraz $y(t)$ jak w równaniach (3) i (4), a macierze F , G oraz H są poszukiwanymi macierzami o odpowiednich wymiarach.

Błąd e odtworzenia wektora zmiennych stanu x przedstawiono jako

$$e = x - \hat{x} \quad (7)$$

Różniczkując równanie (7) i podstawiając odpowiednio (3), (4) i (6) uzyskano

$$\dot{e} = (A - F - H \cdot D) \cdot x + F \cdot e + (B - G) \cdot u \quad (8)$$

Aby błąd odtwarzania zmiennych stanu nie zależał od wektora stanu i wektora wejść winny być spełnione związki

$$F = A - H \cdot D, \quad B = G \quad (9)$$

W wyniku spełnienia równania (9), równanie błędu obserwatora (8) przyjmie postać

$$\dot{e} = F \cdot e \quad (10)$$

Rozwiązanie równia (10) ma postać

$$e(t) = e^{Ft} \cdot e(0) \quad (11)$$

gdzie $e(0) = x(0) - \hat{x}(0)$.

Wektor błędu obserwatora będzie malał asymptotycznie do zera, jeżeli wartości własne macierzy F będą w lewej półpłaszczyźnie zespolonej, to znaczy część rzeczywista

$$\text{Re} \lambda_i < 0 \quad (12)$$

Gdzie: λ_i są wartościami własnymi macierzy F

W przypadku, gdy macierze F , G oraz H spełniają związki (9), to równanie (6) jest modelem asymptotycznego obserwatora układu opisanego równaniem (2).

Rząd modelu obserwatora (6) jest taki sam jak rząd modelu układu (3), a zatem obserwator jest obserwatorem asymptotycznym pełnego rzędu.

Niech $w(\lambda)$ będzie dowolnym, stabilnym wielomianem n -tego stopnia o współczynniku przy najwyższej potędze równym 1. Spełniona jest zależność [7]

$$\frac{\det[I \cdot \lambda - A + H \cdot D]}{\det[I \cdot \lambda - A^T + D^T \cdot H^T]} = w(\lambda) \quad (13)$$

Macierz H spełnia równanie

$$\det[I \cdot \lambda - A^T + D^T \cdot H^T] = w(\lambda) \quad (14)$$

wtedy i tylko wtedy, gdy para (A^T, D^T) jest sterowalna, czyli para (A, D) jest obserwowalna.

Synteza asymptotycznego obserwatora pełnego rzędu polega zatem na wyznaczeniu macierzy H spełniającej warunek (14) dla danego wielomianu $w(\lambda)$, mającego wszystkie wartości własne w lewej półpłaszczyźnie.

Macierz H wyznacza się za pomocą przesuwania biegunów.

Alternatywnym sposobem wyznaczenia macierzy H jest wykorzystanie zasady dualności między obserwatorem a regulatorem.

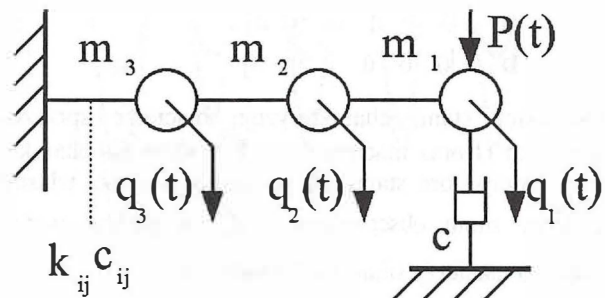
3. Przykłady

Analizę numeryczną dotyczącą wyznaczania macierzy obserwatora stanu przeprowadzono dla dwóch modeli układu:

- dyskretny model belki wspornikowej podpartej tłumikiem wiskotycznym,
- dyskretny model pojazdu.

3.1. Model belki wspornikowej

W badaniach belkę przedstawiono modelem dyskretnym o trzech stopniach swobody (rys. 1).



Rys. 1. Model badanego układu

Równanie ruchu ma postać

$$\begin{bmatrix} m_1 & 0 & 0 \\ 0 & m_2 & 0 \\ 0 & 0 & m_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{q}_1 \\ \ddot{q}_2 \\ \ddot{q}_3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} c_{11} & c_{12} & c_{13} \\ c_{21} & c_{22} & c_{23} \\ c_{31} & c_{32} & c_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{q}_1 \\ \dot{q}_2 \\ \dot{q}_3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} k_{11} & k_{12} & k_{13} \\ k_{21} & k_{22} & k_{23} \\ k_{31} & k_{32} & k_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} q_1 \\ q_2 \\ q_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \cdot P(t) \quad (15)$$

gdzie macierz sztywności K ma postać

$$K = \begin{bmatrix} 0,129 & -0,295 & 0,222 \\ -0,295 & 0,813 & -0,850 \\ 0,222 & -0,850 & 1,477 \end{bmatrix} \cdot 10^5$$

macierz mas M

$$M = \text{diag}[0,2 \quad 1,0 \quad 1,0]^T$$

a macierz tłumienia C

$$C = \begin{bmatrix} 16,49 & -2,95 & 2,22 \\ -2,95 & 9,13 & -8,50 \\ 2,22 & -8,50 & 15,76 \end{bmatrix}$$

Wartości własne macierzy stanu A (5) są równe:

$$\lambda_{1,2} = -18,74 \pm j \cdot 489,68$$

$$\lambda_{3,4} = -19,99 \pm j \cdot 222,16$$

$$\lambda_{5,6} = -14,93 \pm j \cdot 40,38$$

Stwierdzono, że układ jest sterowalny i obserwowalny.

Przyjęto, że wymuszenie przyłożone jest na kierunku zmiennej uogólnionej q_1 (rys. 1) jako:

- funkcja skoku jednostkowego,
- funkcja $\sin(\omega \cdot t)$ (dla $\omega = 40, 60, 100, 200 \text{ rad/s}$)

Macierz wejść \mathbf{B} ma postać:

$$\mathbf{B} = [0 \ 0 \ 0 \ 5 \ 0 \ 0]^T$$

W celu oceny wpływu wyboru wielkości mierzonej na jakość odtwarzanego wektora stanu układu przyjęto cztery przypadki wektora wyjść:

$$\mathbf{D}_a = [1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0]$$

$$\mathbf{D}_b = [0 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0]$$

$$\mathbf{D}_c = [0 \ 0 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0]$$

$$\mathbf{D}_d = [0 \ 0 \ 0 \ 1 \ 0 \ 0]$$

Obserwator stanu charakteryzują macierze sprzężenia zwrotnego \mathbf{H} oraz macierz stanu \mathbf{F} . Istotne dla charakteru pracy obserwatora stanu jest położenie wartości własnych macierzy stanu obserwatora - λ_i^O względem wartości własnych macierzy stanu modelu układu - λ_i .

Przyjęto następujące wartości własne macierzy stanu dla czterech wariantów obserwatora stanu, dla których przedstawiono wyznaczone odpowiadające macierze sprzężenia zwrotnego \mathbf{H} .

a) *wariant I*

$$\lambda_{1,2}^I = -35,00 \pm j \cdot 490,00$$

$$\lambda_{3,4}^I = -30,00 \pm j \cdot 225,00$$

$$\lambda_{5,6}^I = -25,00 \pm j \cdot 42,00$$

$$\mathbf{H}^I = [72 \ -10 \ 20 \ 2584 \ -3269 \ 2580]$$

b) *wariant II*

$$\lambda_{1,2}^{II} = -12,00 \pm j \cdot 15,00$$

$$\lambda_{3,4}^{II} = -15,00 \pm j \cdot 150,00$$

$$\lambda_{5,6}^{II} = -18,00 \pm j \cdot 50,00$$

$$\mathbf{H}^{II} = [-100 \ 72 \ 1 \ 5357 \ 2584 \ -2635]$$

c) *wariant III*

$$\lambda_1^{III} = -45, \lambda_2^{III} = -50, \lambda_3^{III} = -55,$$

$$\lambda_4^{III} = -60, \lambda_5^{III} = -65, \lambda_6^{III} = -70$$

$$\mathbf{H}^{III} = [116 \ 53 \ 73 \ -3152 \ 421 \ 2584]$$

d) *wariant IV*

$$\lambda_1^{IV} = -90, \lambda_2^{IV} = -100, \lambda_3^{IV} = -110,$$

$$\lambda_4^{IV} = -120, \lambda_5^{IV} = -130, \lambda_6^{IV} = -140$$

$$\mathbf{H}^{IV} = [-2 \ -1 \ -1 \ 73 \ -11 \ 20]$$

Zgodnie z zależnością (9) wyznaczono macierze stanu obserwatorów. Przykładowa macierz stanu obserwatora dla wariantu I ma postać

$$\mathbf{F}^I = \begin{bmatrix} \mathbf{F}_{11}^I & \mathbf{F}_{12}^I \\ \mathbf{F}_{21}^I & \mathbf{F}_{22}^I \end{bmatrix}$$

gdzie:

$$\mathbf{F}_{11}^I = \begin{bmatrix} -70 & 0 & 0 \\ 10 & 0 & 0 \\ -20 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

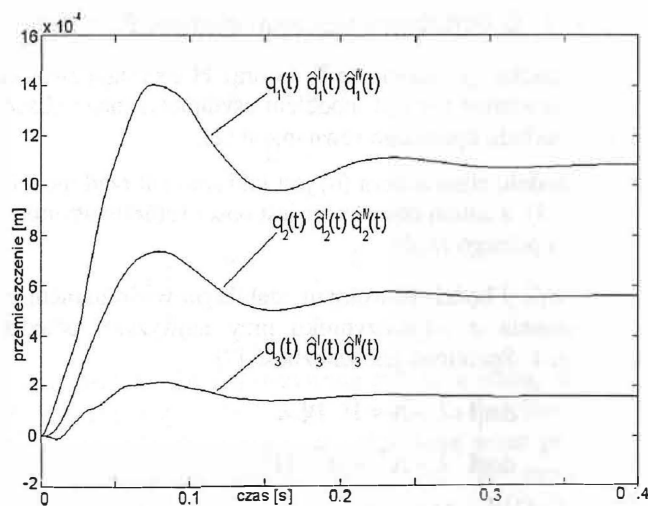
$$\mathbf{F}_{12}^I = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{F}_{21}^I = \begin{bmatrix} -67080 & 147500 & -111000 \\ 32770 & -81300 & 85000 \\ -24780 & 85000 & -147700 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{F}_{22}^I = \begin{bmatrix} -82,45 & 14,75 & -11,10 \\ 2,95 & -9,13 & 8,50 \\ -2,22 & 8,50 & -15,76 \end{bmatrix}$$

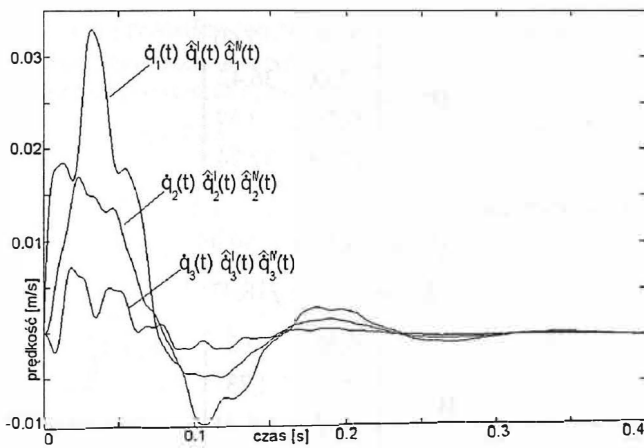
Dla oceny jakości wyznaczonych macierzy obserwatora przeprowadzono badania symulacyjne z wykorzystaniem pakietu programów systemu komputerowego [12].

Na rys. 2 przedstawiono przebiegi zmiennych stanu w postaci przemieszczeń, a na rys. 3 przebiegi zmiennych stanu w postaci prędkości dla układu oraz estymaty zmiennych stanu uzyskane za pomocą obserwatorów stanu dla wariantu I i wariantu IV – przy wymuszeniu skokiem jednostkowym, przy przyjęciu macierzy wyjść \mathbf{D}_a , \mathbf{D}_b , \mathbf{D}_c , \mathbf{D}_d .

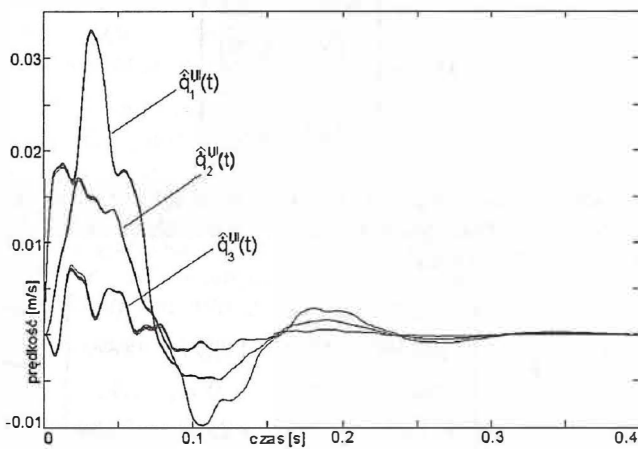


Rys. 2. Przebiegi zmiennych stanu układu w postaci przemieszczeń i ich estymat dla wariantu I i wariantu IV obserwatora, przy wymuszeniu skokiem jednostkowym (macierz wyjść \mathbf{D}_a)

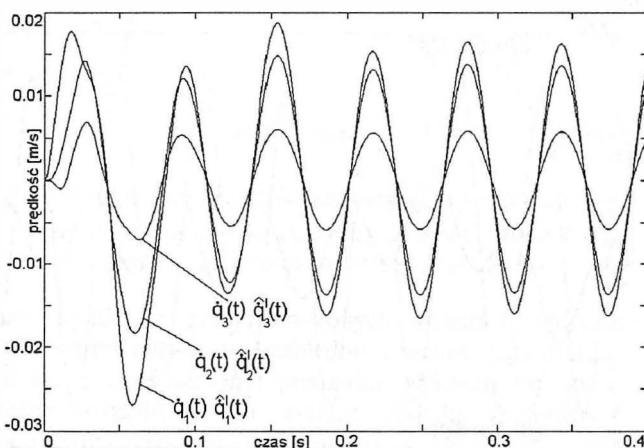
Na rys. 4 przedstawiono przebiegi zmiennych stanu w postaci prędkości oraz estymaty zmiennych stanu uzyskane za pomocą obserwatorów stanu dla wariantu II i wariantu III – przy wymuszeniu skokiem jednostkowym, przy przyjęciu macierzy wyjść \mathbf{D}_a .



Rys. 3. Przebiegi zmiennych stanu układu w postaci prędkości i ich estymat dla wariantu I i wariantu IV obserwatora, przy wymuszeniu skokiem jednostkowym (macierz wyjść D_a)



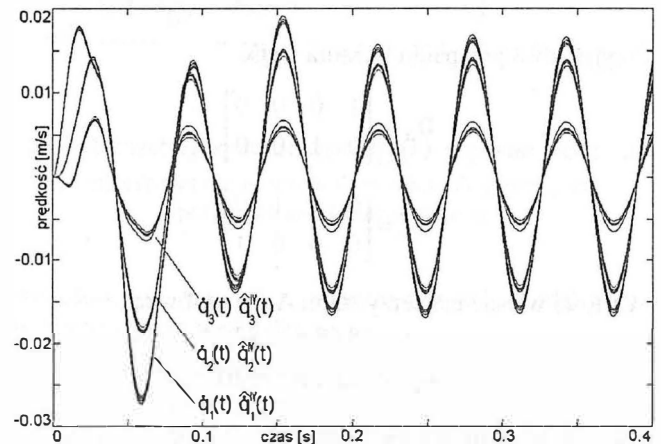
Rys. 4. Przebiegi zmiennych stanu układu w postaci prędkości i ich estymat dla wariantu II i wariantu III obserwatora, przy wymuszeniu skokiem jednostkowym dla macierzy wyjść D_a , D_b , D_c , D_d



Rys. 5. Przebiegi zmiennych stanu układu w postaci prędkości i ich estymat dla wariantu I obserwatora, przy wymuszeniu $\sin(100 \cdot t)$ dla macierzy wyjść D_a , D_b , D_c , D_d

Przeprowadzone symulacje wykazały brak wpływu wyboru wielkości mierzonej na przebiegi estymat wektora stanu układu przy wykorzystaniu obserwatorów stanu dla przyjętych wariantów.

Na rys. 5 przedstawiono przebiegi zmiennych stanu układu w postaci prędkości i ich estymat, uzyskanych za pomocą obserwatora dla wariantu I – dla macierzy wyjść D_a , D_b , D_c , D_d , przy wymuszeniu $\sin(100 \cdot t)$, a na rys. 6 za pomocą obserwatora dla wariantu IV – przy wymuszeniu $\sin(100 \cdot t)$.



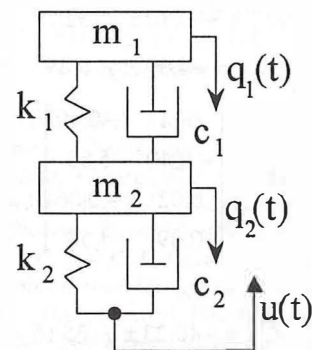
Rys. 6. Przebiegi zmiennych stanu układu w postaci prędkości i ich estymat dla wariantu IV obserwatora, przy wymuszeniu $\sin(100 \cdot t)$ dla macierzy wyjść D_a , D_b , D_c , D_d

Przeprowadzone symulacje przy przyjęciu wymuszenia w postaci $\sin(\omega \cdot t)$ wykazały, że bezbłędne odtworzenie zmiennych stanu postaci przemieszczeń i prędkości zrealizowane może być tylko z zastosowaniem obserwatora dla wariantu I.

Z przeprowadzonych symulacji wynika, że obserwator dla wariantu I najdokładniej odtwarza stan układu przy wymuszeniu funkcją skoku jednostkowego i wymuszeniu funkcją $\sin(\omega \cdot t)$. Obserwator dla wariantu I jest najmniej wrażliwy na wybór wielkości mierzonej.

3.2. Dyskretny model pojazdu

W badaniach przyjęto model pojazdu o dwóch stopniach swobody (rys. 7).



Rys. 7. Model badanego układu

Wektor stanu przyjęto w postaci

$$\mathbf{x} = [q_1 \quad \dot{q}_1 \quad q_2 \quad \dot{q}_2]^T$$

Równanie stanu i równanie wyjść opisano równaniami (2) oraz (3).

Macierz stanu ma postać

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ -111,1 & -5,8 & 111,1 & 5,8 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 612,2 & 32 & -2549 & -79,3 \end{bmatrix}$$

Przyjęto dwa przypadki wektora wyjść

$$\mathbf{D}_a = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{D}_b = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Wartości własne macierzy stanu \mathbf{A} (5) są równe:

$$\lambda_{1,2} = -38,69 \pm j \cdot 32,24$$

$$\lambda_{3,4} = -1,87 \pm j \cdot 9,01$$

Przyjęto, że wymuszenie ma postać

$$u(t) = 0,005 \cdot \sin(30 \cdot t)$$

a macierz wejść \mathbf{B} ma postać:

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ -1936,80 & -43,30 \end{bmatrix}$$

Stwierdzono, że układ jest sterowalny i obserwowalny.

Obserwator stanu charakteryzują macierze sprzężenia zwrotnego \mathbf{H} oraz macierz stanu \mathbf{F} . Istotne dla charakteru pracy obserwatora stanu jest położenie wartości własnych macierzy stanu obserwatora - λ_i^O względem wartości własnych macierzy stanu modelu układu - λ_i .

Przyjęto następujące wartości własne macierzy stanu dla czterech wariantów obserwatora stanu, dla których przedstawiono wyznaczone, odpowiadające im macierze sprzężenia zwrotnego \mathbf{H} .

a) *wariant I*

$$\lambda_{1,2}^I = -38,70 \pm j \cdot 32,27$$

$$\lambda_{3,4}^I = -4,69 \pm j \cdot 9,89$$

$$\mathbf{H}^I = \begin{bmatrix} 0,11 & -0,40 \\ -0,40 & 5,55 \\ 0,02 & -0,06 \\ 0,09 & 1,58 \end{bmatrix}^T$$

a) *wariant II*

$$\lambda_{1,2}^{II} = -40,23 \pm j \cdot 35,16$$

$$\lambda_{3,4}^{II} = -21,14 \pm j \cdot 18,69$$

$$\mathbf{H}^{II} = \begin{bmatrix} 5,19 & -7,60 \\ -7,60 & 36,42 \\ 0,71 & -1,59 \\ 17,45 & 32,24 \end{bmatrix}^T$$

a) *wariant III*

$$\lambda_{1,2}^{III} = -45,29 \pm j \cdot 39,95$$

$$\lambda_{3,4}^{III} = -2,16 \pm j \cdot 8,87$$

$$\mathbf{H}^{III} = \begin{bmatrix} 0,02 & 0,03 \\ -0,04 & 1,73 \\ 0,02 & -0,41 \\ -0,41 & 19,75 \end{bmatrix}^T$$

b) *wariant IV*

$$\lambda_{1,2}^{IV} = -115,97 \pm j \cdot 113,58$$

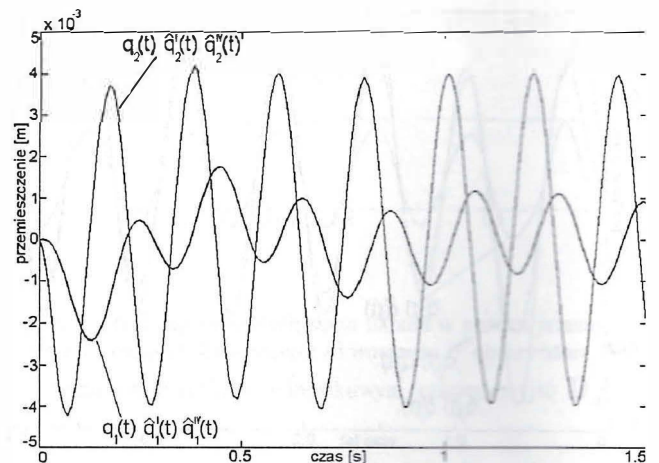
$$\lambda_{3,4}^{IV} = -2,67 \pm j \cdot 8,66$$

$$\mathbf{H}^{IV} = \begin{bmatrix} 2,41 & 0,53 \\ -1,83 & 14,91 \\ 1,43 & -8,94 \\ -0,94 & 154,71 \end{bmatrix}^T$$

Zgodnie z zależnościami (9) wyznaczono macierze stanu obserwatorów. Przykładowa macierz stanu obserwatora dla wariantu II ma postać

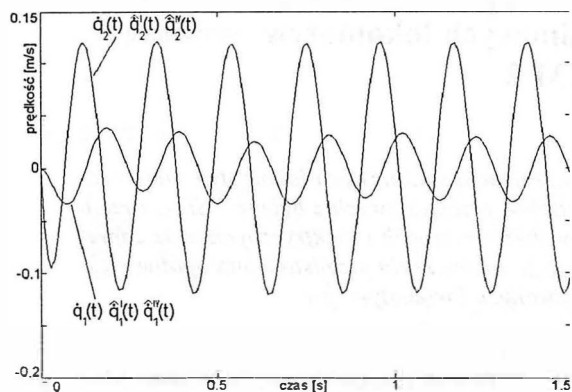
$$\mathbf{F}^{II} = \begin{bmatrix} -5,20 & 8,60 & 0 & 0 \\ -103,50 & -42,20 & 111,10 & 5,80 \\ -0,70 & 1,60 & 0 & 1 \\ 594,80 & -0,20 & -2549 & -75,30 \end{bmatrix}$$

Dla oceny jakości wyznaczonych macierzy obserwatora przeprowadzono badania symulacyjne [12]. Na wykresach przedstawiono przebiegi zmiennych stanu układu uzyskane w wyniku symulacji układu oraz estymaty tych zmiennych otrzymane w wyniku symulacji obserwatora stanu. Przykładowe przebiegi dla wariantu IV obserwatora przedstawiono na rys. 8 (zmiennie reprezentujące przemieszczenia).



Rys. 8. Przebiegi zmiennych stanu układu w postaci przemieszczenia i ich estymat dla wariantu I i wariantu IV obserwatora

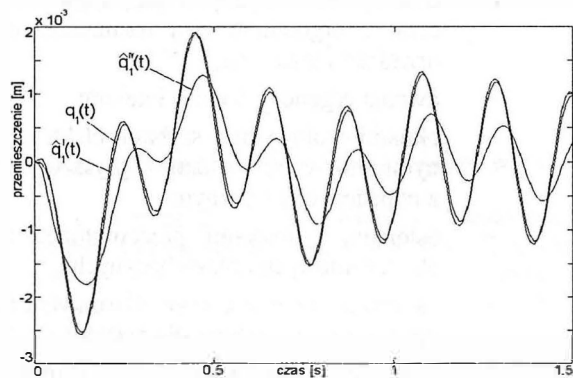
Na rys. 9 przedstawiono składowe wybranej zmiennej stanu odtworzonej przez obserwator stanu wynikające z działania zmierzonego wejścia i zmierzonego wyjścia – równanie (6).



Rys. 9. Przebiegi zmiennych stanu układu w postaci prędkości i ich estymat dla wariantu I i wariantu IV obserwatora

Widoczna jest zgodność przebiegów zmiennych stanu uzyskanych w wyniku symulacji układu i symulacji obserwatora stanu układu.

W celu sprawdzenia działania obserwatora stanu w przypadku pojawienia się usterki w układzie, przyjęto, że zmianie uległa charakterystyka tłumika – c_2 (rys. 7). Przebiegi przykładowych zmiennych stanu uzyskane w wyniku symulacji modelu z uszkodzonym tłumikiem oraz przebiegi odtworzonych zmiennych stanu za pomocą obserwatora stanu dla wariantu III i wariantu IV dla współrzędnej $q_1(t)$ – przedstawiono na rys. 10 (dla przemieszczeń), a dla współrzędnej $\dot{q}_2(t)$ na rys. 11 (dla prędkości).

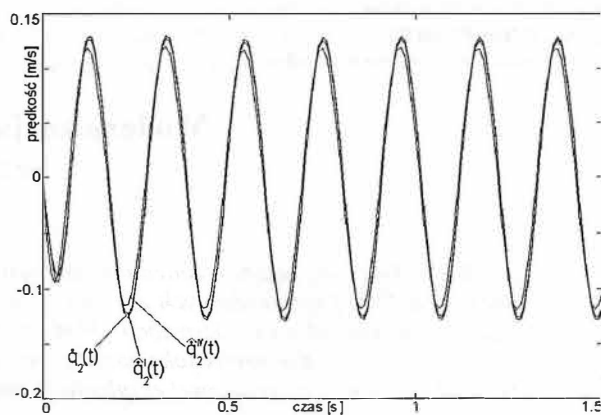


Rys. 10. Przebiegi zmiennej stanu $q_1(t)$ w postaci przemieszczenia oraz estymat dla wariantu I i wariantu IV obserwatora w przypadku uszkodzenia tłumika

Jak wynika z przeprowadzonych symulacji wszystkie obserwatory odtwarzają bezbłędnie zmienne stanu układu w postaci przemieszczeń i prędkości; wykazały one jednak różną wrażliwość na zmianę układu spowodowaną przyjętym uszkodzeniem tłumika.

4. Podsumowanie

W artykule przedstawiono zastosowanie koncepcji liniowego obserwatora stanu do odtworzenia trudno mierzalnych zmiennych stanu na przykładzie modeli charakterystycznych dla badań układów nośnych i układów zawiesznień



Rys. 11. Przebiegi zmiennej stanu $\dot{q}_2(t)$ w postaci prędkości oraz ich estymat dla wariantu I i wariantu IV obserwatora w przypadku uszkodzenia tłumika

pojazdów, przy przyjęciu, że znany jest wektor wejść oraz wybrane wyjścia w układzie.

Szczególną uwagę zwrócono na wybór wartości własnych obserwatora. Na podstawie przeprowadzonych symulacji i analiz stwierdzono wpływ wyboru mierzonego wektora wyjść na postać macierzy stanu obserwatora, a zatem – na przebiegi odtwarzanych zmiennych stanu.

Przedstawione zastosowanie koncepcji obserwatora stanu w modelowaniu dynamiki pojazdów ma istotne znaczenie w procesie prowadzenia badań symulacyjnych, w procesie projektowania układów aktywnych zawiesznień, a także w procesie monitorowania stanów zespołów pojazdów.

Literatura

- [1] Barczak A., Zastosowanie modalnych kryteriów sterowalności i obserwowalności w tworzeniu modelu dynamiki pojazdu, *Pojazdy Szynowe*, 4/2003.
- [2] Barczak, A., Zastosowanie miar obserwowalności układu do oceny wyboru wektora wielkości mierzonych w modelu pojazdu, *Zeszyty Naukowe Politechniki Poznańskiej, Maszyny Robocze i Transport*, Nr 57, 2004.
- [3] Best M. C., Gordon T. J., Dixon P. J., *An Extended Adaptive Kalman Filter for Real-time State Estimation of Vehicle Handling Dynamics*, VSD 2000, Vol. 34.
- [4] Frank P. M., *Diagnoseverfahren in der Automatisierungstechnik*, *Automatisierungstechnik* 42 (1994) 2.
- [5] Golub G. H., Van Loan Ch. F., *Matrix Computations*, The Johns Hopkins University Press, 1996.
- [6] Isermann R., *Diagnosis Methods for Electronic Controlled Vehicles*, VSD 2001, Vol. 36, No. 2-3.
- [7] Kaczorek T., *Teoria sterowania i systemów*, PWN, Warszawa, 1993.
- [8] Söffker D., Bajkowski J., Müller P. C., *Detection of Cracks in Turborotors – A New Observer Based Method*, ASME, *J. Dyn. Syst., Meas., Control*, Vol. 115, September 1993.
- [9] Yi K., Hedrick K., Lee S.-C., *Estimation of Tire-Road Friction Using Observer Based Identifiers*, VSD 1999, Vol. 31.
- [10] Yi K., Shin B.-K., Lee K.-I., *Estimation of Turbine Torque of Automatic Transmission Using Nonlinear Observers*, ASME, *J. Dyn. Syst., Meas., Control*, Vol. 122, June 2000.
- [11] Yi K., Song B. S., *Observer Design for Semi-Active Suspension Control*, VSD 1999, Vol. 32.
- [12] MATLAB Wersja. 5.3.