

METODY REKONSTRUKCJI ZMIENNYCH STANU ELEKTROPNEUMATYCZNEGO NAPĘDU POZYCYJNEGO

Streszczenie:

Niniejszy referat stanowi podsumowanie prac nad metodami rekonstrukcji zmiennych stanu serwonapędu elektropneumatycznego. W referacie przedstawiono podstawowe zależności teoretyczne, na których opierają się poszczególne metody, a także przedyskutowano wyniki badań laboratoryjnych na przykładzie rekonstrukcji przebiegów prędkości tłoka siłownika na podstawie mierzonych wartości przemieszczenia.

Abstract:

This paper is a summary of works on state reconstruction methods for electropneumatic servodrives. The theoretical basis of the particular methods are presented in this paper. The paper presents also the results of laboratory tests on the example of piston velocity reconstruction on the basis of piston position measurement.

1. WPROWADZENIE

Algorytmy regulacji wykorzystujące sprzężenie zwrotne od zmiennych stanu zapewniają zwykle bardzo dobre wyniki sterowania. Umożliwiają one efektywną kontrolę dynamiki procesu przejściowego, co pozwala na wykorzystywanie dużych wartości wzmocnień statycznych układu zamkniętego, nieosiągalnych w przypadku algorytmów konwencjonalnych. Właściwość ta jest szczególnie istotna w przypadku układów sterowania pozycyjnego. Zapewnia bowiem oczekiwaną dokładność pozycjonowania, nawet bez konieczności całkowania sygnału odchyłki regulacji.

Na uwagę zasługuje również możliwość stosunkowo łatwej i taniej implementacji algorytmów wykorzystujących sprzężenie zwrotne od zmiennych stanu w oparciu o uniwersalne procesory sygnałowe lub komputery jednoukładowe. W połączeniu ze spadającymi cenami układów mikroprocesorowych, przy jednoczesnym wzroście ich mocy obliczeniowej, algorytmy te stają się interesujące dla szerokiej gamy producentów układów automatyki, w tym także wytwórców nowoczesnych serwomechanizmów.

Stosowanie algorytmów ze sprzężeniem zwrotnym od zmiennych stanu stwarza problem dostępności tychże zmiennych stanu. W aplikacjach przemysłowych, z powodów tak technicznych, jak i ekonomicznych, bezpośredni pomiar wszystkich zmiennych stanu nie może być brany pod uwagę. Powstaje więc konieczność wyboru, a następnie implementacji, algorytmów rekonstrukcji zmiennych stanu obiektu na podstawie minimalnej liczby mierzonych wielkości fizycznych.

Przykładem aplikacji układu sterowania ze sprzężeniem zwrotnym od trzech fazowych zmiennych stanu (przemieszczenia, prędkości i przyspieszenia) jest napędowy układ pozycyjny z siłownikiem pneumatycznym [1].

Wprowadzając jako zmienne stanu

$$[x_1 \quad x_2 \quad x_3]^T = [s \quad v \quad a]^T \quad (1)$$

oraz upraszczając i linearyzując [1] model napędu otrzymujemy opis rozpatrywanego obiektu

$$\left. \begin{aligned} \begin{bmatrix} \dot{x}_1(t) \\ \dot{x}_2(t) \\ \dot{x}_3(t) \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & -\omega_0^2 & -2D\omega_0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \\ x_3(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ C\omega_0^2 \end{bmatrix} u(t) \\ y(t) &= [1 \quad 0 \quad 0] \begin{bmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \\ x_3(t) \end{bmatrix} \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

2. PODSTAWY TEORETYCZNE

2.1. Metody rekonstrukcji zmiennych stanu przez różniczkowanie

Metody z grupy „różniczkowych” posiadają wspólną bardzo istotną zaletę - do ich stosowania nie jest wymagana znajomość modelu matematycznego obiektu. Cecha ta okupiona jest jednak ograniczeniem możliwości stosowania tych metod jedynie do rekonstrukcji fazowych zmiennych stanu (np. prędkości i przyspieszenia na podstawie pomiaru przemieszczenia). Poszczególne metody z tej grupy charakteryzują się różną wrażliwością na zniekształcenia sygnału pomiarowego (wynikające z szumu wprowadzanego przez przetwornik pomiarowy, z kwantyzacji i próbkowania mierzonego sygnału), różnym przesunięciem fazowym (opóźnieniem) wielkości odtwarzanej w stosunku do rzeczywistej oraz bardzo zróżnicowanym nakładem obliczeń.

2.1.1. Rekonstrukcja metodą siecznych

Metoda ta jest obliczeniowo najprostsza ze wszystkich prezentowanych i opiera się na zależności

$$\hat{x}^{(i+1)}(k) = \frac{\hat{x}^{(i)}(k) - \hat{x}^{(i)}(k-i)}{iT}, \quad (3)$$

która w przypadku rekonstrukcji prędkości i przyspieszenia na podstawie mierzonego przemieszczenia prowadzi do następującej formuły ich obliczania

$$\left. \begin{aligned} \hat{v}(k) &= \frac{s(k) - s(k-i)}{iT} \\ \hat{a}(k) &= \frac{\hat{v}(k) - \hat{v}(k-j)}{jT} = \frac{s(k) - s(k-i) - s(k-j) + s(k-i-j)}{ijT^2} \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

Do zasadniczych wad tej metody należy zaliczyć zwiększanie zniekształceń jakimi obciążone jest mierzone przemieszczenie oraz wprowadzanie przesunięcia fazowego rekonstruowanych sygnałów - $0.5iT$ dla prędkości oraz $0.5(i+j)T$ dla przyspieszenia.

2.1.2. Rekonstrukcja z wykorzystaniem wielomianu interpolacyjnego

Interesującą alternatywą dla metody siecznych jest rekonstrukcja wykorzystująca interpolację danego (mierzonego) przebiegu sygnału przemieszczenia. Okazuje się, że zastosowanie wielomianu postaci

$$\hat{s}(k) = b_0 + b_1(k - k_0) + \dots + b_n(k - k_0) \dots (k - k_n) \quad (5)$$

jako funkcji interpolującej daje możliwość uzyskania dobrych wyników przy stosunkowo niskim nakładzie obliczeń.

Wykorzystywanie metody opartej na wielomianie interpolacyjnym daje możliwość wyboru z jednej strony stopnia samego wielomianu (co jednoznacznie rzutuje na liczbę punktów pomiarowych koniecznych do interpolacji), z drugiej zaś sposobu jego numerycznego różniczkowania - w aktualnej chwili czasowej lub w innej wybranej chwili, w szczególności w środku przedziału interpolacji.

I tak przykładowo dla rekonstrukcji prędkości w bieżącej chwili czasowej mamy

- przy różniczkowaniu 4-punktowym

$$\hat{v}(k) = \frac{1}{6T} [-2s(k-3) + 9s(k-2) - 18s(k-1) + 11s(k)] \quad (6)$$

- przy różniczkowaniu 6-punktowym

$$\hat{v}(k) = \frac{1}{60T} [-12s(k-5) + 75s(k-4) - 200s(k-3) + 300s(k-2) - 300s(k-1) + 137s(k)] \quad (7)$$

zaś dla rekonstrukcji w środku przedziału interpolacji:

- przy różniczkowaniu 4-punktowym

$$\hat{v}(k) \approx \hat{v}(k-2) = \frac{1}{10T} [-2s(k-4) - s(k-3) + s(k-1) + 2s(k)] \quad (8)$$

- i przy różniczkowaniu 6-punktowym

$$\hat{v}(k) \approx \hat{v}(k-3) = \frac{1}{28T} [-3s(k-6) - 2s(k-5) - s(k-4) + s(k-2) + 2s(k-1) + 3s(k)] \quad (9)$$

Analogicznie można otrzymać wyrażenia na estymatę przyspieszenia w funkcji dyskretnych wartości prędkości (a w praktyce jej estymaty), które następnie przekształca się do postaci zawierających jedynie mierzone wartości (próbki) sygnału przemieszczenia.

2.1.3. Rekonstrukcja z wykorzystaniem wielomianu aproksymacyjnego

Kolejnym krokiem badań metod "różniczkowych" rekonstrukcji zmiennych stanu stała się próba zastąpienia wielomianu interpolacyjnego wielomianem aproksymacyjnym, wyznaczonym na podstawie wybranego kryterium jakości aproksymacji. Jako najbardziej naturalne kryterium uznano minimum sumy kwadratów błędów aproksymacji.

W metodzie tej zakłada się, że dostępny z pomiaru przebieg przemieszczenia $s(t)$ może być aproksymowany wielomianem stopnia n

$$\hat{s}(k) = b_0 + b_1 kT + \dots + b_n (kT)^n \quad (10)$$

w oparciu o kryterium jakości aproksymacji postaci

$$S(\mathbf{B}) = \sum_{i=1}^N [s(k) - \hat{s}(k)]^2 \rightarrow \min \quad (11)$$

Bardziej uzasadnione wydaje się jednak założenie, że wyznaczone współczynniki b_i wielomianu aproksymacyjnego nie są stałe, lecz zmieniają się w kolejnych krokach

aproxymacji, z szybkością zależną od tzw. współczynnika zapominania γ . Minimalizacji podlega wówczas wskaźnik

$$S_N(\mathbf{B}_k) = \sum_{i=1}^N \gamma^{N-i} [s(k) - \hat{s}(k)]^2 \quad (12)$$

Wektor $\mathbf{B}_k = [b_{0k}, b_{1k}, \dots, b_{nk}]^T$ współczynników wielomianu (10) uzyskany w k -tym kroku aproxymacji można wyrazić zależnością rekurencyjną

$$\mathbf{B}_k = \mathbf{B}_{k-1} + \frac{[\mathbf{v}(k)\Phi_{k-1}]^T [s(k) - \mathbf{v}(k)\mathbf{B}_{k-1}]}{\gamma + [\mathbf{v}(k)\Phi_{k-1}]\mathbf{v}^T(k)}, \quad (13)$$

gdzie: $\mathbf{v}(k) = [1, kT, \dots, (kT)^n]$, $\Phi_k = \Phi_{k-1} + \frac{1}{\gamma} \left[\frac{[\mathbf{v}(k)\Phi_{k-1}]^T [\mathbf{v}(k)\Phi_{k-1}]}{\gamma + [\mathbf{v}(k)\Phi_{k-1}]\mathbf{v}^T(k)} \right]$ (14)

Aproxymacja sygnału przemieszczenia pozwala przez proste różniczkowanie analityczne zależności (10) zrekonstruować sygnały prędkości i przyspieszenia w funkcji czasu oraz wyznaczonych wartości współczynników b_{ik}

$$\left. \begin{aligned} \hat{v}(k) &= b_{1k} + 2b_{2k}kT + \dots + nb_{nk}(kT)^{n-1} \\ \hat{a}(k) &= 2b_{2k} + 6b_{3k}kT + \dots + n(n-1)b_{nk}(kT)^{n-2} \end{aligned} \right\} \quad (15)$$

2.2. Metody rekonstrukcji zmiennych stanu przez obserwator zmiennych stanu

Przewaga technik obserwacji zmiennych stanu nad metodami z grupy "różniczkowych" polega na możliwości odtwarzania nie tylko zmiennych stanu o charakterze fazowym. Wymaga to jednak znajomości modelu matematycznego obiektu, którego zmienne stanu mają być obserwowane.

Dla danego zlinearyzowanego ciągłego modelu serwonapedu elektropneumatycznego (2) algorytm jego liniowego dyskretnego obserwatora przyjmuje postać

$$\begin{bmatrix} \hat{s}(k+1) \\ \hat{v}(k+1) \\ \hat{a}(k+1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & T & 0 \\ 0 & 1 - \alpha T & \beta T \\ 0 & -2\alpha\beta & 1 - \alpha T - 2\beta(1 - \beta) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{s}(k) \\ \hat{v}(k) \\ \hat{a}(k) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ CT\alpha \\ 2C\alpha\beta \end{bmatrix} u(k) + \begin{bmatrix} h_1 \\ h_2 \\ h_3 \end{bmatrix} (s(k) - \hat{s}(k)), \quad (16)$$

gdzie: $\alpha = \frac{\omega_0^2 T}{2}$, $\beta = 1 - D\omega_0 T$ (17)

Syntezę obserwatora (sprowadzoną de facto do wyznaczenia macierzy $\mathbf{H} = [h_1 \ h_2 \ h_3]^T$), realizuje się przez określenie jego biegunów. Zagadnienie to ujęto w następujący algorytm:

1. Wybór biegunów obserwatora w przestrzeni S w funkcji pulsacji drgań swobodnych obiektu

$$\begin{cases} s_{1,2} = -\lambda\omega_0 \pm i\lambda\kappa\omega_0 \\ s_3 = -\lambda\chi\omega_0 \end{cases} \quad (18)$$

gdzie: $\lambda \in \langle 2, 5 \rangle$, $\kappa \in \langle 0, 5, 2 \rangle$, $\chi \in \langle 2, 5 \rangle$, (19)

2. Transformacja biegunów (18) do przestrzeni Z

$$z = e^{sT} \Rightarrow \begin{cases} z_{1,2} = e^{-\lambda\omega_0 T} \cos(\lambda\kappa\omega_0 T) \pm ie^{-\lambda\omega_0 T} \sin(\lambda\kappa\omega_0 T) \\ z_3 = e^{-\lambda\chi\omega_0 T} \end{cases} \quad (20)$$

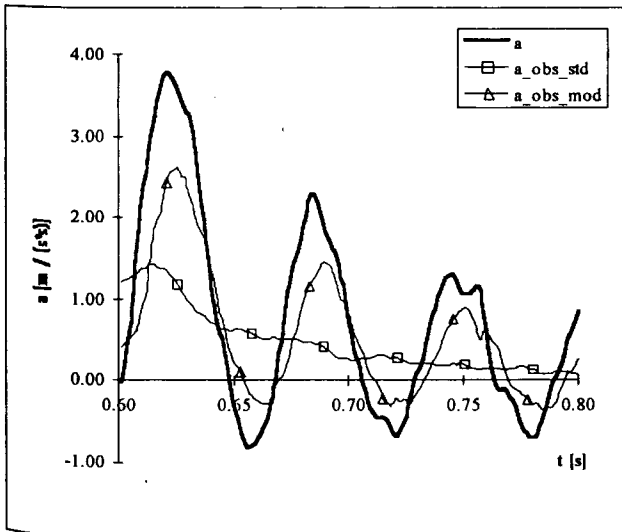
3. Obliczenie elementów macierzy \underline{H} przez rozwiązanie równania określającego postać wielomianu charakterystycznego obserwatora (16)

$$\det(zI - \begin{bmatrix} 1 & T & 0 \\ 0 & 1 - \alpha T & \beta T \\ 0 & -2\alpha\beta & 1 - \alpha T - 2\beta(1 - \beta) \end{bmatrix}) + \begin{bmatrix} h_1 \\ h_2 \\ h_3 \end{bmatrix} [1 \ 0 \ 0] = \prod_{i=1}^3 (z - z_i) \quad (21)$$

Badania przeprowadzone dla szerokiej gamy napędów wykazały jednak konieczność zmodyfikowania sposobu syntezy obserwatora (niezależnie od tego, który ze sposobów otrzymywania modelu obiektu był wykorzystywany - synteza na podstawie parametrów napędu, czy identyfikacja).

Okazuje się bowiem, że założenie (18)-(19) o dystrybucji biegunów nie daje satysfakcjonujących rezultatów dla systemów o względnie małej wartości pulsacji drgań swobodnych ($\omega_0 < 15$ rad/s). Pogorszenie jakości rekonstrukcji prowadzi w niektórych sytuacjach (szczególnie w pobliżu końców siłownika) do powstania cyklu granicznego lub słabo tłumionych oscylacji. W celu uniknięcia wspomnianych problemów zaproponowano modyfikację rozłożenia biegunów obserwatora zastępując stały współczynnik λ w (18) współczynnikiem λ^* zależnym od pulsacji drgań swobodnych obiektu oraz pewnej dobranej eksperymentalnie pulsacji granicznej

$$\begin{cases} \lambda^*(\omega_0) = \lambda \frac{\omega^*}{\omega_0} \Leftrightarrow \omega_0 < \omega^* \\ \lambda^*(\omega_0) = \lambda \Leftrightarrow \omega_0 \geq \omega^* \end{cases} \quad (22)$$



Rys. 1: Przykładowe porównanie jakości sygnału przyspieszenia rekonstruowanego przez obserwatory o różnym algorytmie syntezy; a - przebieg wzorcowy, a_{obs_std} - obserwator o standardowy algorytmie syntezy (18), a_{obs_mod} - obserwator o zmodyfikowanym algorytmie syntezy (22).

Aby wykazać zalety stosowania obserwatora o biegunach określonych zależnością (22) w stosunku do obserwatora o biegunach zdefiniowanych zależnością (18) przebadano napędy na bazie kilku rodzajów siłowników, przy różnym obciążeniu masowym i różnych skokach wartości zadanej przemieszczenia. Przykładowe porównanie typowych rezultatów rekonstrukcji sygnału przyspieszenia przez obserwator o biegunach określonych zależnością (18) oraz zmodyfikowanych zależnością (22) przedstawia rys. 1.

Na podstawie przytoczonego przykładu (rys. 1) widać, iż sygnał przyspieszenia rekonstruowany przez obserwator o biegunach określonych zależnością (18) cha-

rakteryzuje się zbyt małą zmiennością. Uzasadnia to twierdzenie o zbyt małej pulsacji drgań swobodnych tego obserwatora.

2.2.1. Obserwator z modelem obliczeniowym obiektu

Pierwsze próby implementacji algorytmu obserwatora zmiennych stanu serwonapędu elektropneumatycznego bazowały na modelu obliczeniowym [2], tzn. powstałym jako rezultat analizy teoretycznej zachodzących zjawisk fizycznych [1]. Okazuje się jednak, że tworzenie dla napędów płynowych, a zwłaszcza pneumatycznych, modeli obliczeniowych prowadzi do znacznych nieadekwatności tychże modeli w stosunku do rzeczywistych właściwości dynamicznych napędu. Wynika to z jednej strony z wprowadzanych uproszczeń, z drugiej zaś z szacowania wartości parametrów charakteryzujących tak złożone zjawiska fizyczne jak tarcie, przemiany gazowe oraz przepływy.

Naturalnym etapem dalszych badań nad możliwością stosowania obserwatora dla potrzeb rekonstrukcji zmiennych stanu serwonapędu elektropneumatycznego stają się próby rozbudowy prostej struktury klasycznego obserwatora o pewne elementy nieliniowe - reprezentujące nasycenie, strefę nieczułości oraz błąd punktu zerowego (*offset*) sygnału sterującego rozdzielaczem - oraz mechanizmy samostrojzenia [5].

2.2.2. Obserwator z modelem obiektu identyfikowanym w trybie *on-line*

Jeden z kierunków badań nad algorytmami samostrojzenia obserwatora opiera się na wykorzystaniu ciągłej (w trybie *on-line*) identyfikacji parametrów modelu napędu (2) (C , ω_0 , D). Istotnym problemem jest przy tym określenie warunków rozpoczęcia i zakończenia procesu identyfikacji [3] tak, aby otrzymać model jak najbardziej adekwatny dla, najistotniejszej z punktu widzenia jakości procesu pozycjonowania napędu, fazy hamowania.

2.2.3. Obserwator z modelem obiektu wyznaczanym w eksperymencie wstępnym

Drugi z kierunków badań nad algorytmami samostrojzenia obserwatora wykorzystuje wyniki odpowiednio zaprojektowanego eksperymentu wstępnego (w trybie *off-line*) oraz koncepcję dopasowania wartości parametrów modelu dla bieżącej pozycji, korzystając z przybliżonych zależności teoretycznych.

Okazuje się, że opis liniowy zachowań dynamicznych napędu, wyznaczony dla środkowego położenia tłoka siłownika i ruchów w kierunku "dodatnim" i "ujemnym" (ze względu na nieuniknioną asymetrię budowy napędu oraz możliwość jego pracy w pozycji "niepoziomej"), stanowi dostatecznie dobrą podstawę do antycypowania dynamiki napędu w całym zakresie przemieszczeń. Z dostatecznie dobrym, dla rozpatrywanego problemu, przybliżeniem można przyjąć

$$C = C(d_v, d_c, l_c, m, p_s) = const, \quad \omega_0 = \omega_0(d_c, l_c, m, p_s, s) = f(s), \quad D = const. \quad (23)$$

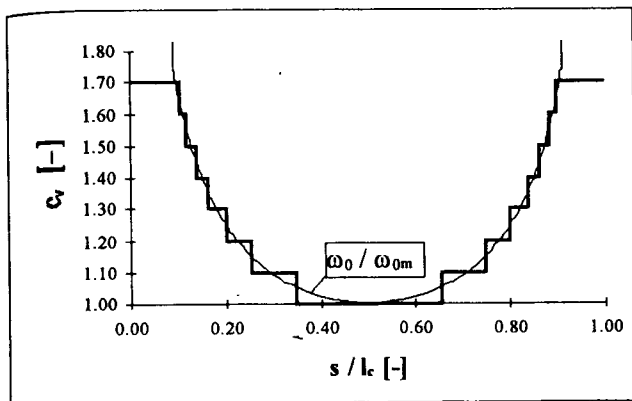
Problem można zatem sprowadzić do określenia funkcji

$$\omega_0 = \omega_0(\omega_{0m}, s). \quad (24)$$

Okazuje się jednak, że zamiast rozwikłania funkcji (23.2) do postaci (24) i obliczania jej wartości w każdym kroku rekonstrukcji można przyjąć, że

$$\omega_{0c}(\omega_{0m}, s) = \omega_{0m} c_\omega(s), \quad (25)$$

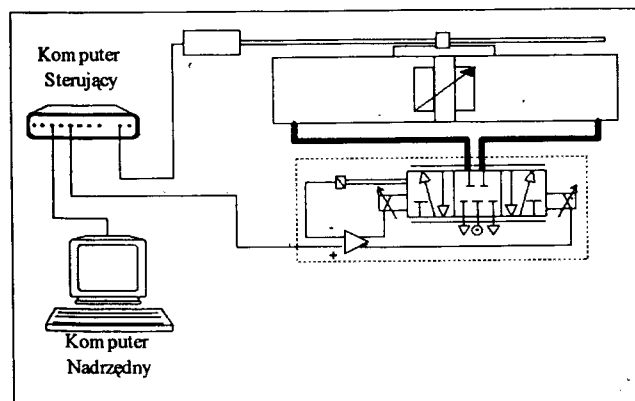
gdzie $c_\omega(s)$ zdefiniowane jest jak na rys. 2.



Rys. 2: Wartość współczynnika c_v w funkcji względnego przemieszczenia tłoka siłownika

Z rys. 2 widać, że przyjęte uproszczenie oznacza akceptację do 5% błędu pulsacji drgań swobodnych przyjętej do syntezy obserwatora w stosunku do wartości wyznaczonej z zależności (23.2).

3. BADANIA DOŚWIADCZALNE



Rys. 3: Schemat ideowy stanowiska laboratoryjnego

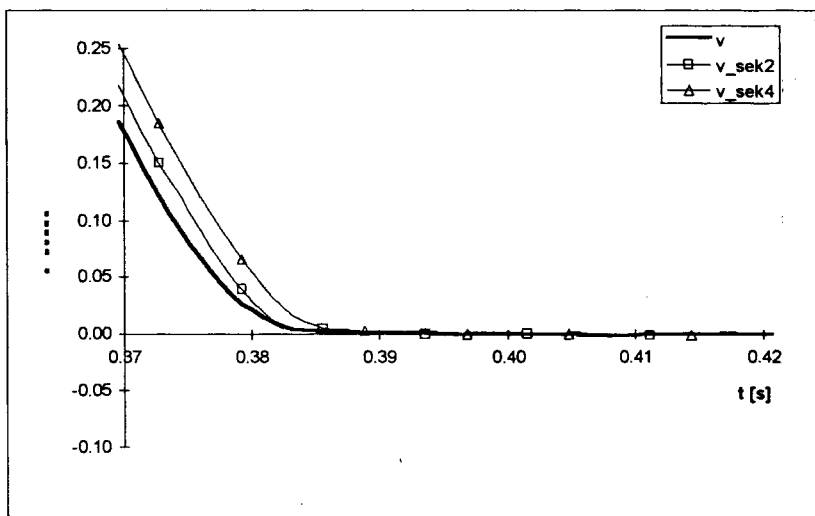
Badania doświadczalne nad jakością rekonstrukcji zmiennych stanu elektropneumatycznego napędu pozycyjnego przeprowadzono na stanowisku laboratoryjnym przedstawionym schematycznie na rys. 3.

Zaprezentowane poniżej rezultaty badań dotyczą rekonstrukcji prędkości tłoka siłownika. Porównanie przeprowadzono dla, najistotniejszej z punktu widzenia jakości procesu pozycjonowania napędu, fazy hamowania. Jako przebieg wzorcowy wykorzystano sygnał wygenerowany w trybie *off-line* (dla uniknięcia przesunięcia fazowego) przez algorytm różniczkowania 6-punktowego wielomianu interpolacyjnego w środku przedziału interpolacji.

3.1. Rekonstrukcja metodą siecznych

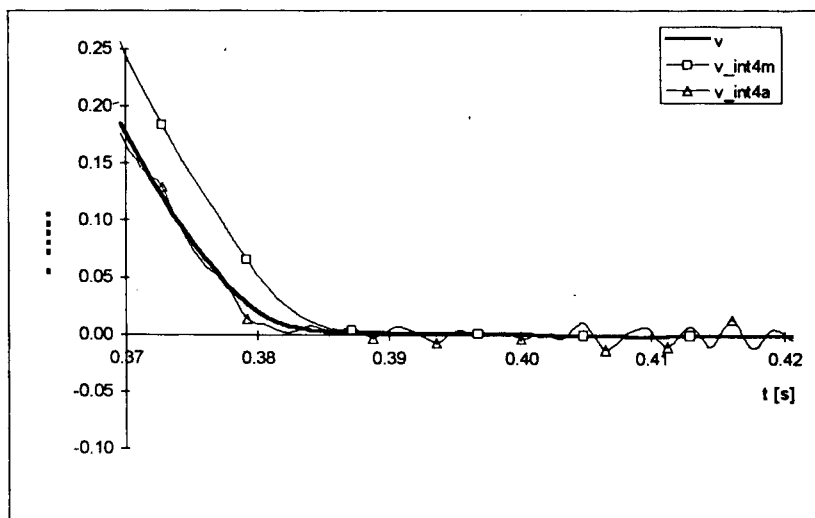
3.1. Rekonstrukcja metodą siecznych

Z zależności (3) i (4) wynika, że jedynym dostrajalnym parametrem metody jest liczba przedziałów różniczkowania (parametry i, j). Występuje przy tym zależność - im większa liczba odcinków różniczkowania, tym mniejszy wpływ zniekształceń sygnału pomiarowego na gładkość rekonstruowanych przebiegów (lepsze właściwości filtrujące metody), ale jednocześnie większe przesunięcie fazowe (rys. 4).



Rys. 4: Fragmenty przebiegów sygnału prędkości rekonstruowanego przez różniczkowanie metodą siecznych; v - przebieg wzorcowy, $v_{_sek2}$ - 2-przedziałowa metoda siecznych, $v_{_sek4}$ - 4-przedziałowa metoda siecznych.

3.2. Rekonstrukcja z wykorzystaniem wielomianu interpolacyjnego



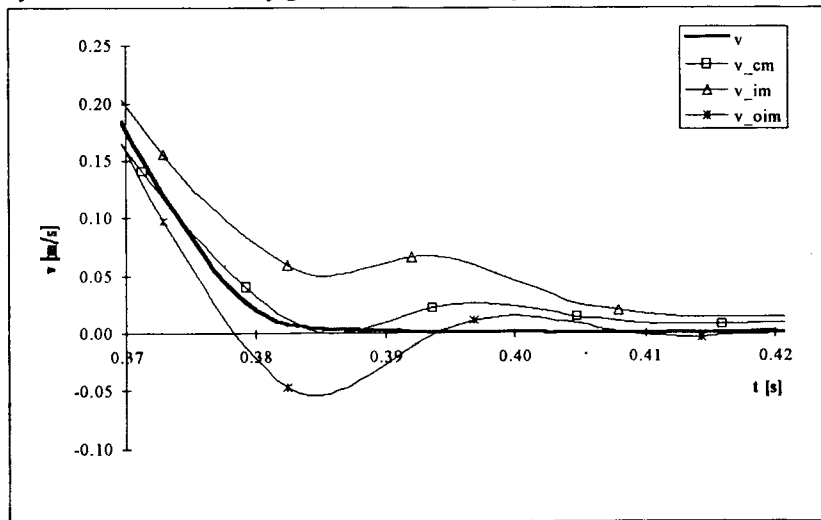
Rys. 5: Fragmenty przebiegów sygnału prędkości rekonstruowanego z wykorzystaniem wielomianu interpolacyjnego; v - przebieg wzorcowy, $v_{_int4m}$ - 4-punktowy wielomian interpolacyjny różniczkowany w środku przedziału interpolacji, $v_{_int4a}$ - 4-punktowy wielomian interpolacyjny różniczkowany w aktualnej chwili czasowej.

Metoda rekonstrukcji przez różniczkowanie w środku przedziału interpolacji (zależności (8)-(9)) wykazuje właściwości filtrujące, dzięki czemu uzyskiwane sygnały prędkości i przyspieszenia są gładkie. Metoda ta wprowadza jednak przesunięcie fazowe. Wady tej nie

ma metoda różniczkowania w aktualnej chwili czasowej (zależności (6)-(7)), ale dla nieuniknionej w praktyce przemysłowej złej jakości sygnału mierzonego przemieszczenia (szum, próbkowanie, kwantyzacja), uzyskane przebiegi prędkości, a zwłaszcza przyspieszenia, są silnie zniekształcone. Przykładowe wyniki przedstawia rys. 5.

3.3. Rekonstrukcja z wykorzystaniem wielomianu aproksymacyjnego

Zastąpienie wielomianu interpolacyjnego wielomianem aproksymacyjnym (zależności (10), (13)-(16)) daje intuicyjnie wyczuwalny efekt filtracji zniekształceń pomiarowych. Okazuje się jednak, że istotny wpływ ma tu wartość współczynnika zapominania γ . Przyjęcie zbyt małej wartości powoduje znaczne podwyższenie czułości wielomianu na zakłócenia pomiarowe. Powoduje to znaczne zniekształcenie sygnału prędkości, a zwłaszcza przyspieszenia, aż do generowania przez algorytm niefizycznych pików rekonstruowanych pochodnych. Przy małej wartości współczynnika zapominania następuje bowiem lepsze dopasowanie wielomianu do wartości w aktualnym punkcie pomiarowym, co przy obciążeniu go zniekształceniami pomiarowymi prowadzi właśnie do wspomnianych wyżej zjawisk. Zbyt duża wartość współczynnika zapominania prowadzi z kolei do zniekształcenia amplitudy i powstania efektu przesunięcia fazowego, co jest wynikiem zbyt silnego oddziaływania wyznaczonych wcześniej współczynników wielomianu na jego wartość w aktualnej chwili czasowej (rys. 6).

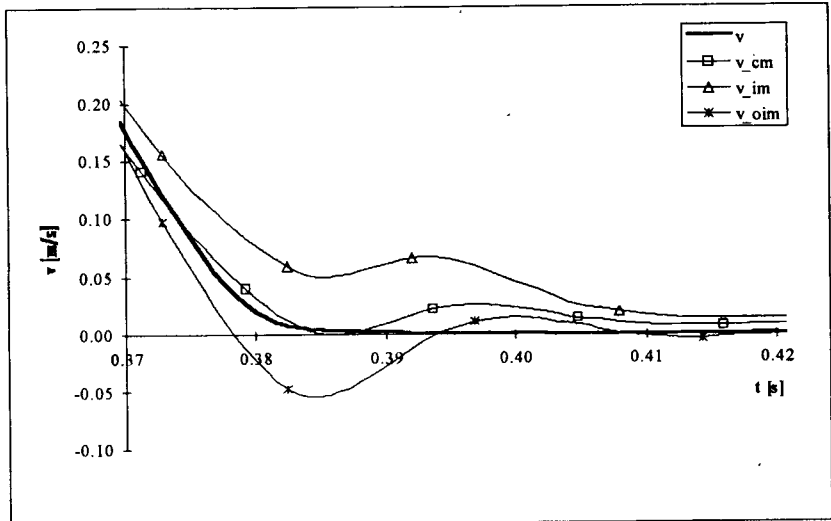


Rys. 6: Fragmenty przebiegów sygnału prędkości rekonstruowanego z wykorzystaniem wielomianu aproksymacyjnego; v - przebieg wzorcowy, v_{apr08} - wielomian aproksymacyjny o współczynniku zapominania 0.8, v_{apr06} - wielomian aproksymacyjny o współczynniku zapominania 0.6, v_{apr015} - wielomian aproksymacyjny o współczynniku zapominania 0.15.

3.4. Metody rekonstrukcji zmiennych stanu przez obserwator zmiennych stanu

Z zależności (20) wynika, że algorytm syntezy obserwatora dla danego napędu (przy danych parametrach modelu C, ω_0, D) posiada 3 dostrajalne parametry: λ, κ, χ . Porównania jakości rekonstrukcji prędkości tłka siłownika dokonano dla wszystkich 3 spośród prezentowanych wcześniej sposobów uzyskiwania modelu napędu, wykorzystując zoptymalizowane eksperymentalnie wartości współczynników dystrybucji biegunów λ, κ, χ (identyczne we

wszystkich przypadkach) oraz zmodyfikowany algorytm syntezy. Przykładowe wyniki przedstawia rys. 7.



Rys. 7: Fragment przebiegu sygnału prędkości rekonstruowanego przez obserwatory; v - przebieg wzorcowy, v_{cm} - obserwator z modelem obliczeniowym, v_{oim} - obserwator z modelem identyfikowanym w trybie on-line, v_{im} - obserwator z modelem identyfikowanym w trybie off-line

4. PODSUMOWANIE

Wśród „różniczkowych” algorytmów rekonstrukcji zmiennych stanu jedynie metoda różniczkowania w aktualnej chwili czasowej w oparciu o wielomian interpolacyjny (rys. 5) wykazuje jedynie minimalne przesunięcie fazowe w stosunku do przebiegu wzorcowego. Jest to właściwość o tyle istotna, że efekt przesunięcia fazowego rekonstruowanych sygnałów wykorzystywanych w procesie sterowania prowadzi do przeregulowań, a w pobliżu krańców siłownika także do słabo tłumionych drgań lub wręcz cyklu granicznego. Metoda ta charakteryzuje się jednak słabymi właściwościami filtrującymi. Należy pamiętać, że zaszumienie mierzonego sygnału przemieszczenia wykorzystywanego dla potrzeb rekonstrukcji jest przenoszone na odtwarzane sygnały (prędkości, a zwłaszcza przyspieszenia). Biorąc pod uwagę, że, ze względu na wymagania stawiane serwonapędowi pozycyjnemu, konieczne jest stosowanie dużych wzmocnień regulatora zmiennych stanu, powstaje problem zaszumienia sygnału sterującego powodującego częste przełączanie rozdzielacza. Poza pogorszeniem jakości procesu pozycjonowania powoduje to dodatkowo zwiększenie zużycia części mechanicznych rozdzielacza, znaczny hałas oraz zwiększenie zużycia medium energetycznego (powietrza).

Metoda rekonstrukcji zmiennych stanu w oparciu o wielomian aproksymacyjny o współczynniku zapominania $\gamma = 0.6$ (rys. 6) generuje sygnał prędkości o przebiegu zbliżonym do wzorcowego, charakteryzujący się jedynie nieznacznymi lokalnymi zniekształceniami amplitudy. Wydaje się zatem, że metoda ta powinna stanowić temat dalszych badań, aby można było ocenić ją w kontekście uzyskiwanych rezultatów procesu

pozycjonowania. Należy jednak zwrócić uwagę, że metoda ta należy do najbardziej złożonej obliczeniowo spośród wszystkich prezentowanych algorytmów „różniczkowych”.

Przeprowadzone badania wykazały, że zastosowanie algorytmów rekonstrukcji zmiennych stanu przez obserwator, dzięki wyeliminowaniu przesunięcia fazowego odtwarzanych sygnałów pozwoliło uzyskać zadowalający zapas stabilności układu zamkniętego (mierzoną możliwością zwiększenia wzmocnień regulatora bez utraty stabilności) oraz jakość procesu pozycjonowania.

Wciąż otwarty pozostaje jednak problem wyboru metody wyznaczania modelu napędu dla celów syntezy obserwatora, gdyż każdy z prezentowanych algorytmów posiada zarówno znaczące zalety jak i dość istotne wady (tab. 1).

Wydaje się, że spośród „obserwacyjnych” metod rekonstrukcji zmiennych stanu algorytm wykorzystujący model obiektu wyznaczony w eksperymencie wstępnym stanowi rozsądną kombinację połączenia zalet, przy jednoczesnym ograniczeniu wad dwóch pozostałych algorytmów: wykorzystującego model obliczeniowy oraz identyfikację w trybie *on-line*, pozwalając jednocześnie osiągnąć co najmniej nie gorsze rezultaty procesu pozycjonowania.

Na zakończenie warto zauważyć, że pojawiające się algorytmy sterowania, w których świadomie odchodzi się od wyznaczania modelu matematycznego obiektu (np. oparte na sieciach neuronowych lub logice rozmytej), wymuszą prawdopodobnie dalsze badania również nad metodami z grupy „różniczkowych”. Należy, wykorzystując możliwość stosowania tych metod bez znajomości modelu obiektu, dążyć do zminimalizowania wprowadzanego przez nie przesunięcia fazowego oraz czułości na zaszumienie sygnału pomiarowego.

Wydaje się, że spośród „obserwacyjnych” metod rekonstrukcji zmiennych stanu algorytm wykorzystujący model obiektu wyznaczony w eksperymencie wstępnym stanowi rozsądną kombinację połączenia zalet, przy jednoczesnym ograniczeniu wad dwóch pozostałych algorytmów: wykorzystującego model obliczeniowy oraz identyfikację w trybie *on-line*, pozwalając jednocześnie osiągnąć co najmniej nie gorsze rezultaty procesu pozycjonowania.

Na zakończenie warto zauważyć, że pojawiające się algorytmy sterowania, w których świadomie odchodzi się od wyznaczania modelu matematycznego obiektu (np. oparte na sieciach neuronowych lub logice rozmytej), wymuszą prawdopodobnie dalsze badania również nad metodami z grupy „różniczkowych”. Należy, wykorzystując możliwość stosowania tych metod bez znajomości modelu obiektu, dążyć do zminimalizowania wprowadzanego przez nie przesunięcia fazowego oraz czułości na zaszumienie sygnału pomiarowego.

Metoda wyznaczania modelu	Zalety	Wady
obliczeniowa	<ul style="list-style-type: none"> • brak identyfikacji • brak eksperymentu wstępnego 	<ul style="list-style-type: none"> • brak odporności na znaczące zmiany parametrów modelu napędu spowodowane zmianą warunków jego pracy • konieczność (ze względu na syntezę modelu napędu) definiowania przez użytkownika zestawu parametrów techniczno-eksploatacyjnych napędu
identyfikacja <i>on-line</i>	<ul style="list-style-type: none"> • zwolnienie użytkownika systemu od konieczności wprowadzania, często trudnych do oszacowania, wartości wielu parametrów fizycznych • odporność na zmiany parametrów modelu napędu spowodowane zmianą warunków jego pracy (np. na skutek występujących powszechnie w wielu aplikacjach przemysłowych zmian przemieszczanej masy) 	<ul style="list-style-type: none"> • wysokie nakłady obliczeniowe spowodowane koniecznością realizacji w każdym kroku sterowania zadania identyfikacji parametrów modelu, syntezy obserwatora oraz samej rekonstrukcji stanu • incydentalne problemy z identyfikacją, mogące prowadzić do błędnych oszacowań parametrów modelu i w rezultacie, na skutek znacznych nieadekwatności estymowanych zmiennych stanu w stosunku do rzeczywistości, nawet do utraty przez układ stabilności
eksperyment wstępny + uproszczona adaptacja	<ul style="list-style-type: none"> • zminimalizowanie nakładu obliczeń koniecznych do wykonania w każdym kroku sterowania, uzyskane dzięki możliwości stabilizowania (<i>look-up table</i>) opisu obserwatora dla poszczególnych zakresów przemieszczeń, • wyeliminowanie incydentalnych problemów z identyfikacją 	<ul style="list-style-type: none"> • brak odporności na znaczące zmiany parametrów modelu napędu spowodowane zmianą warunków jego pracy • w przypadku ogólnym konieczność (ze względu na dopasowywanie modelu napędu oparte na zależnościach teoretycznych) definiowania przez użytkownika systemu parametrów techniczno-eksploatacyjnych napędu; należy jednak w tym miejscu zauważyć, że w rozpatrywanym przypadku konieczne jest podanie jedynie długości siłownika, co nie powinno stwarzać użytkownikowi większych problemów

Tab. 1: Właściwości użytkowe algorytmów obserwacji zmiennych stanu przy różnych metodach uzyskiwania modelu obiektu

5. LITERATURA

- [1] Chudzik Z., Janiszowski K., Kozłowski M., Olszewski M.: *Modelowanie obiektów sterowania na przykładzie analizy opisu siłownika pneumatycznego*. PAK 41, 1994, 231-235.
- [2] Chudzik Z., Kozłowski M., Olszewski M.: *Problems of state reconstruction in positioning systems with pneumatic drive*. 4th Triennial International Symposium on Fluid Control, Measurement and Visualisation, Toulouse 1994.
- [3] Kozłowski M., Janiszowski K.: *Odporna metoda identyfikacji obiektów dynamicznych na przykładzie pneumatycznego układu napędowego*. IX Ogólnopolska Konferencja 'PNEUMA'95', Kielce, 06.1995, 101-110.
- [4] Olszewski M., Wiślicki K.: *Problematyka rekonstrukcji zmiennych stanu na przykładzie napędowego układu pozycyjnego z siłownikiem pneumatycznym*. PAK 10/1995, 286-290.
- [5] Wiślicki K., Burkhardt T., Janiszowski K., Olszewski M.: *Nieliniowy adaptacyjny obserwator zmiennych stanu napędowego układu pozycyjnego z siłownikiem pneumatycznym*. PAK 9/1996, 233-236.
- [6] Wiślicki K., Olszewski M.: *Przegląd algorytmów rekonstrukcji zmiennych stanu elektro-pneumatycznego napędu pozycyjnego*. X Krajowa Konferencja „PNEUMA'96”, Kraków, 09.1996, Hydraulika i Pneumatyka 4/1996, 6-9.

6. ZESTAWIENIE OZNACZEŃ I SYMBOLI

- $s, \hat{s}, v, \hat{v}, a, \hat{a}$ - przemieszczenie, estymata przemieszczenia, prędkość, estymata prędkości, przyspieszenie, estymata przyspieszenia tłoka siłownika;
- x, \hat{x} - zmienna stanu, estymata zmiennej stanu;
- C, ω_0, D - wzmocnienie prędkościowe, pulsacja drgań swobodnych, zredukowany współczynnik tłumienia członu oscylacyjnego;
- y - wielkość wyjściowa obiektu sterowania;
- u - wielkość wejściowa obiektu sterowania lub napięcie wysterowania rozdzielacza;
- t, k - czas ciągły, czas dyskretny;
- T - okres impulsowania;
- i, j - liczba odcinków różniczkowania dla metody siecznych,
- n - rząd wielomianu interpolacyjnego / aproksymacyjnego;
- b, B - współczynnik, wektor współczynników wielomianu interpolacyjnego / aproksymacyjnego;
- γ - współczynnik zapominania;
- $S(B), S_N(B)$ - wskaźnik jakości aproksymacji;
- h, H - element macierzy obserwatora, macierz obserwatora;
- $\lambda, \kappa, \chi, \lambda^*$ - współczynniki dystrybucji biegunów obserwatora;
- d_r - średnica rozdzielacza;
- d_c - średnica cylindra siłownika;
- l_c - długość cylindra siłownika;
- m - całkowite obciążenie masowe napędu;
- p_s - ciśnienie zasilania;
- ω_{0m} - pulsacja drgań swobodnych obiektu dla środkowego położenia tłoka siłownika;
- ω_{0c} - przybliżona pulsacja drgań swobodnych obiektu;
- c_w - współczynnik przybliżonej charakterystyki pulsacji drgań swobodnych.