

## 7.5 Sterowanie elastycznym ramieniem robota

### 7.5.1 Wstęp

Zasadniczymi problemami badawczymi analizowanymi w tym rozdziale są:

- a) określenie metodyki oraz budowa i identyfikacja modelu matematycznego elastycznego ramienia robota wraz z napędem, ujmującego wszystkie istotne zjawiska (w tym oscylacje i tarcie),
- b) wybór i realizacja odpowiedniej koncepcji układu sterowania w czasie rzeczywistym, zapewniającej:
  - wymaganą dokładność śledzenia sygnałów sterujących,
  - zadowalającą szybkość działania,
  - skuteczne tłumienie oscylacji,
  - odporność na zmiany parametrów (zmiana obciążeń , nieliniowości i niestacjonarność obiektu oraz otoczenia),
- c) weryfikacja uzyskanych rezultatów na stanowisku badawczym z modelem fizycznym.

Opisany dalej proces prototypowania (projektowania, modelowania, symulacji i weryfikacji) sterowników jest oparty o podejście mechatroniczne i zostanie przeprowadzony w środowisku MATLAB/SIMULINK/RTW, z wykorzystaniem wirtualnych sterowników rezydujących w pamięci komputera. Do badań w czasie rzeczywistym wykorzystywane były wariantowo karta i oprogramowanie dSPACE lub komputer przemysłowy z systemem operacyjnym VxWorks.

Celem opisanych badań jest opracowanie metodyki efektywnej syntezy algorytmów sterowania oraz ich implementacji w warunkach przemysłowych, na przykładzie sterowania elastycznym ramieniem robota. Implementacja sprzętowa zostanie docelowo przygotowana w technologii dedykowanych układów scalonych ASIC/FPGA (rozdział 5 – Realizacja produktów mechatronicznych), co pozwoli na uzyskanie konstrukcji zwartej i odpornej na warunki pracy w przemyśle.

W ramach projektu 7TO7B 01414 przeprowadzono rozeznanie w zakresie używanych w Polsce i w innych krajach narzędzi przydatnych do budowy modelu matematycznego oraz do syntezy sterowania elastycznym ramieniem robota. Dokonano w tym celu przeglądu publikacji, materiałów konferencyjnych, czasopism i baz danych na dyskach CD-ROM. Uzyskane informacje były weryfikowane i uzupełniane o wiadomości dostępne w sieci Internet.

Stwierdzono, że zarówno w kraju jak i zagranicą wielu autorów z powodzeniem wykorzystuje środowisko MATLAB/SIMULINK/RTW do prototypowania. Potwierdzają to między innymi materiały konferencji krajowych (np. *MMAR* w Kołobrzegu; *Metody i systemy komputerowe w badaniach naukowych i projektowaniu inżynierskim*, AGH Kraków) jak i konferencji zagranicznych (w tym *ICRA: IEEE International Conference on Robotics and Automation* w Leuven, Belgia 1998 i w Detroit, USA 1999). Za wyborem tym przemawiają też względy praktyczne i ekonomiczne: w Katedrze Robotyki i Dynamiki Maszyn przygotowano kilka stanowisk z wykorzystaniem MATLAB-a do prototypowania w czasie rzeczywistym.

### 7.5.2 Przegląd literatury: modelowanie i sterowanie ramieniem elastycznym robota

Proste manipulatory o jednym ramieniu elastycznym są użyteczne do weryfikowania rezultatów teoretycznych. Są one opisywane między innymi przez *TS Bandyopadhyay [1997]*

(model o zmiennej strukturze), *Ge-Ss Lee-Th Zhu-G*, [1997] (elementy skończone). *Krishnan-H i Vidyasagar-M* [1998] wykorzystuje normę Hankel'a a. [Depince, 1998] proponuje sposób oszacowania parametrów, których nie można zidentyfikować.

Znajomość kątów pomiędzy ramionami robota nie określa przestrzennego położenia końca ramienia – jeśli robot ma elastyczne ramiona. Rozwiązanie tego problemu przy użyciu obserwatorów zostało opisane przez *Jing-Xin Shi et al.*, [1998]. Z kolei *Akira Mohri*. [1998] wykorzystuje, podobnie jak Lisowski [1995], metodę elementów skończonych i zasadę Lagrange'a do opisu (i wytłumienia) drgań końca ramienia. *Philippe Depince* [1998] prezentuje podejście heurystyczne do tego problemu, dla robota planarnego z jednym ramieniem elastycznym. Dynamiczne generowanie trajektorii dla robota o ramionach elastycznych jest również opisywane przez *Yue-Sg*, [1998], *J. Kovecses-J* [1997]., *Akira Mohri et al*, [1998] oraz *Nagaraj* [1997]. Jeszcze inne podejście opisuje *Thomas-S Bandyopadhyay* [1997].

*F. Boyer* [1998] uwzględnia **nieliniowości** związane z kinematyką ramion elastycznych poprzez wykorzystanie nie tylko pierwszego, ale i dwu następnych członów we wzorze Taylora. Z kolei *Li-Dg* i *Zu-Jw Goldenberg-Aa* [1998] oraz *Lisowski* [1995] używają analizy modalnej do identyfikacji. Model o parametrach rozłożonych jest opisywany przez *Kovecses* [1998]. Dokładność modelu dyskretnego jest badana przez *Moulin i Bayo* [1997]. *Fan-Zj Lu-Bh* i *Ku-Ch* [1997] uwzględniają tarcie wiskotyczne przy ruchu ramion elastycznych. Inne prace na ten temat to: *Nagaraj* [1997] i *Theodore* [1997].

Regulatory **PID** (oraz **PI** i **PD**) są proste i łatwe w stosowaniu. Dają one zauważalną poprawę własności dynamicznych dość skutecznie tłumiąc oscylacje, są jednak wrażliwe na zmianę parametrów modelu (Uhl [1998]). Są mniej skuteczne dla obiektów z opóźnieniem i nieminimalno fazowych.

Metoda **lokacji biegunów** obiektu wymaga znajomości parametrów rzeczywistego obiektu Nie ma wpływu na położenie zer, ale pozwala przesuwac bieguny obiektu na płaszczyźnie zespolonej. Daje to możliwość zmiany częstotliwości własnych obiektu (a zarazem szybkości jego reakcji na wymuszenie) i określenia jego współczynników tłumienia. Metoda ta (w przypadku modelu w przestrzeni stanu) wymaga pomiaru wszystkich zmiennych stanu. W warunkach przemysłowych, jeśli jakaś współrzędna stanu nie może być mierzona lub nie ma do niej wygodnego dostępu (np. położenie końca ramienia robota), stosowane są obserwatory. Jednym z nich jest filtr Kalmana. W przypadku transmitancji układu SISO wystarczy znajomość wartości aktualnej i poprzednich wartości sygnału wyjściowego Wadą metody lokacji biegunów jest jej wrażliwość na niedokładności modelu matematycznego i możliwość występowania wysokich wartości współczynnika wzmocnienia. Współczynniki wzmocnienia można obliczać z użyciem metody LQ lub LQG.

Część autorów bada modele typu „czarna skrzynka”. Należą do nich modele transmitancyjne opisane w rozdziale 7.5.6. Do określenia chwilowych wartości parametrów tego modelu (zależą one przykładowo od obciążenia i od konfiguracji ramion) można użyć sieci neuronowe [Sundareshan. 1997]. [Bumjin Song, 1998] opisuje dyskretną, wielowarstwową **sieć neuronową**, która była trenowana w kierunku przewidywania przyszłych sygnałów wyjściowych w oparciu o aktualne i wcześniejsze wartości sterowań. Opisywany system, dla każdej chwili próbkowania, generuje sygnał sterujący minimalizujący przyjęte kryterium jakości. *H.A. Talebi* [1998], opisuje zespół czterech sterowników wykorzystujących sieci neuronowe dla zadania pozycjonowania końca ramienia elastycznego. Badany robot wykazywał obecność tarcia suchego i wiskotycznego, zmieniane było obciążenie końca ramienia, a model matematyczny nie opisywał wszystkich obserwowanych zjawisk.

Tarcie i luz nie są dokładnie opisywane w uproszczonych modelach, choć występują powszechnie we wszelkich urządzeniach mechanicznych. [Jin Il Song et al., 1998]

przedstawia prostą i efektywną metodę kompensacji tarcia. Rezultaty są udokumentowane badaniami eksperymentalnymi. Inną, metodę prezentują [Henrichfreise i Witte, 1998]

Regulatory **predykcyjne** omówiono w rozdziale 7.5.6. Zyskują one coraz większe uznanie z uwagi na możliwość jej stosowania do obiektów nieminimalnie fazowych, a także z uwagi na odporność na zmianę rzędu i opóźnienia obiektu.. Zastosowanie GPC w robotyce przedstawiają między innymi *Yim and Singh [1997]*, *Yang et al [1997]*, *Bumjin Song, [1998]*, *I-Ching Lin and Li-Chen Fu [1998]*.. Soloway D. I Haley P. [1997] opublikowali opis regulacja **predykcyjnej** z modelem w postaci wielowarstwowej **sieci neuronowej** (metoda NGPC - Neural Generalized Predictive Control). Sterownik predykcyjny zaprojektowano w oparciu o algorytm GPC, opisany przez [Clarke DW, 1987]

Rezultaty stosowania **regulatora rozmytego** do kompensacji luzów przedstawił *K.T. Woo, [1998]*. Wykazuje on, że pod pewnymi warunkami układ z luzem może prawie dokładnie odwzorować zadaną trajektorię. Co więcej, wykazał on doświadczalnie, że w określonym zakresie jego rozmyty algorytm jest odporny na niestacjonarność parametrów luzu. Podejście **adaptacyjne** do problemów kompensacji luzu było badane przez *Chen-Jh Ju-Ms Tsuei-Yg, [1997]*

Technika odsprzęgania, zwana **singular perturbation** (zakłóceń osobliwych) jest oparta na hipotezie, że pod pewnymi założeniami model obiektu o wielu częstotliwościach drgań własnych można przedstawić jako połączenie kilku odsprzężonych systemów. W przypadku użycia dwu podsystemów (patrz *I-Ching Lin and Li-Chen Fu, [1998]*), model o mniejszej szybkości reakcji opisuje pozycję i szybkości ramion robota, a model szybki opisuje drgania ramion robota. Uproszczenie polega na tym, że obliczając odpowiedź modelu szybkiego, zakłada się stałe wartości odpowiedzi modelu wolnego. Bardziej zaawansowane wyniki przedstawione są przez *Jing-Xin Shi [1998]*.

Drgania końca ramienia znacznie utrudniają jego dokładne pozycjonowanie. Są one szczególnie wyraźne w momencie zatrzymania napędu, przy dochodzeniu do zadanego położenia (pobudzenia w zerze transmitancji ramienia). Możliwość skutecznego tłumienia tych drgań była badana między innymi przez *Akira Mohri et al. [1998]*, *Albedoor-A [1997]*, *Ankarali and Shi [1997]*, *Coleman [1998]*, *Fung and Shi [1997]*, *Konno et al. [1997]*, *Low [1998]*, *Mitsuhiro Yamano et al, [1998]*, *Yue [1998]*, *Pun and Smercigil [1997]*, *Uhl. [1998]*, *Wang-F [1997]*, *Wang Y [1998]*. Opisane w tej książce (także *Uhl i inni, [1997]*) zastosowanie sieci neuronowych do aktywnego tłumienia drgań układu zawieszenia pojazdu może być odpowiednio zaadoptowane dla potrzeb robotyki.

Zastosowanie **równań kinematyki odwrotnej** do sterowania elastycznego ramienia robota jest przedstawione przez *A. De Luca, [1998]*. Podaje on też rezultaty badań na specjalnie zbudowanym stanowisku pomiarowym FlexArm z robotem typu SCARA o dwu ramionach, z których drugie jest elastyczne.

W zastosowaniach występuje niekiedy konieczność kontrolowania siły, z jaką robot oddziałuje na swoje otoczenie. Można to uzyskać przez uzależnienie wzmocnienia w pętli sprzężenia zwrotnego od oporu, na jaki natrafia ramię robota *Jing-Xin Shi, [1998]*..Określa się to jako problem twardego i miękkiego kontaktu. Adaptacyjny sterownik do pozycjonowania z pomiarem siły jest opisany przez *I-Ching Lin and Li-Chen Fu [1998]*. Inne podejście jest przedstawione przez *Borowiec- i Tzes [1997]*, *Kovacs-J [1997]* oraz *Matsuno-F Kasai-S, [1998]*.

Technika synchronizacji pracy dwu manipulatorów o elastycznych ramionach przenoszących sztywny obiekt w przestrzeni 3-wymiarowej jest opisana przez. [*Mitsuhiro Yamano et al,*

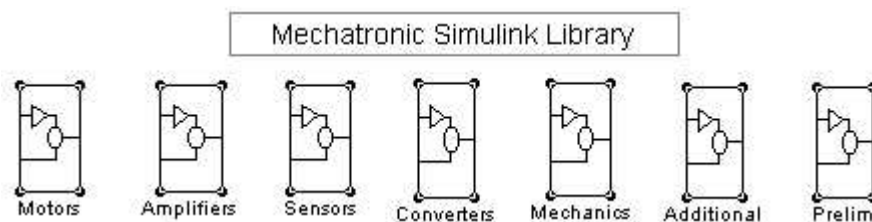
1998]. Dyskutują oni problemy pozycjonowania z uwzględnieniem wartości siły oraz tłumienie drgań efektora. Wyniki były weryfikowane

Inne problemy sterowania robotami o elastycznych ramionach prezentowane są przez Albedoor-Bo[1997], Aoustin Y [1997],Choi-Sb[1998], Damaren CJ [1998], Ge-Ss Lee [1998], Ghanekar [1997], Guo-B [1998], Hou X [1998], Lucibello [1997, 1998, 1998b], Parker [1997], Szyszkowski [1998]

### 7.5.3 Biblioteka MSL (Mechatronics Simulink Library)

Biblioteka **Mechatronics Simulink Library** jest rozszerzeniem środowiska MATLAB/SIMULINK. Jest ona przeznaczony do modelowania i symulacji systemów mechatronicznych. Systemy te obejmują urządzenia mechaniczne, elektryczne, elektroniczne i systemy automatyki.

Biblioteka **Mechatronics Simulink Library** została przygotowana w ramach finansowanego przez Wspólnotę Europejską projektu COPERNICUS PROJECT: CP 93:10119. Ze strony polskiej w projekcie brała udział Akademia Górniczo-Hutnicza. Biblioteka była prezentowana na krajowych i zagranicznych konferencjach [Ravn and Pjetursson, 1995], [Szymkat et al., 1995], spotykając się z dużym zainteresowaniem. Aktualna wersja biblioteki jest dostępna u profesora O. Ravn z Technical University of Denmark.



Rys.1 Biblioteka MSL: Mechatronics Simulink Library

Biblioteka MSL zawiera następujące zbiory modeli:

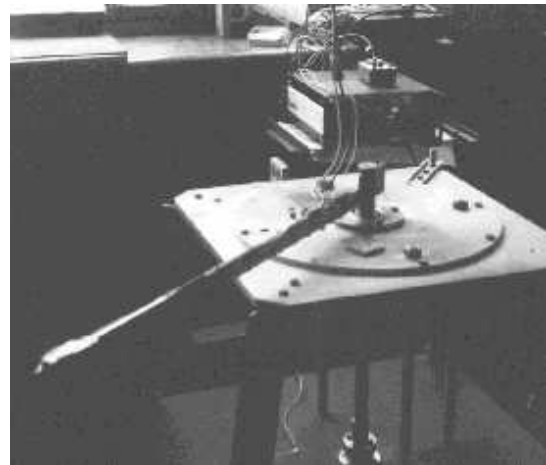
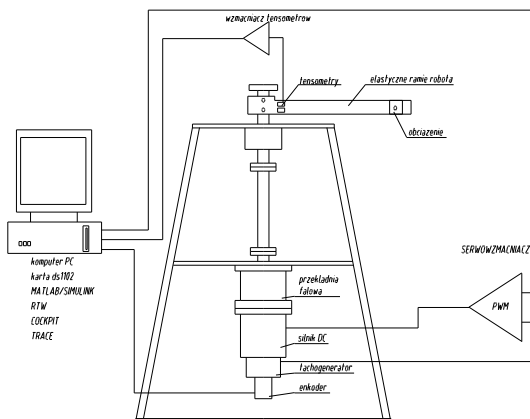
- Motors: silnik prądu stałego, posiada inercję i wyjście prądowe do sterownika,
- Amplifiers: wzmacniacze, w tym PWM i mostek tensometryczny,
- Sensors (czujniki): tachometr, mostek tensometryczny, enkoder, potencjometr,
- Convertors: przetworniki: analogowo-cyfrowy i cyfrowo-analogowy,
- Mechanics: urządzenia mechaniczne: przekładnia, ramię elastyczne wraz z napędem,
- Bloki uzupełniające: czas, czas procesora, tarcie, całkowanie z zerowaniem i inne,

Istotnym elementem jest baza danych, z parametrami opisywanych wyżej obiektów.

Użytkownik ma możliwość modyfikowania omówionych wyżej bloków, zmiany ich parametrów w oknach edycyjnych i w bazie danych oraz możliwość definiowania własnych bloków.

Inną bibliotekę, *Robot Control Toolbox*, prezentowano na konferencji ESM'99 w Warszawie. Jest ona rozszerzeniem pakietu MATLAB/SIMULINK i została przygotowana przez Angel Valera Fernandez z Uniwersytetu Politechnicznego Valencia z Hiszpanii. Brak w niej bloków z modelem elastycznego ramienia robota.

## 7.5.4 Stanowisko do dynamicznej identyfikacji elastycznego ramienia robota



Rys.2 Stanowisko do dynamicznej identyfikacji elastycznego ramienia robota

Opisany tu model fizyczny elastycznego ramienia robota będzie nazywany **obiektem rzeczywistym** lub **obiektem badanym**. Modelem elastycznego ramienia robota jest stalowa belka napędzana przez układ napędowy składający się z przekładni harmonicznego i silnika. Układ napędowy stanowiska badawczego jest sterowany za pomocą serwowzmacniacza, pracującego w układzie regulacji prędkości. Sygnał proporcjonalny do prędkości obrotowej silnika wytwarzany jest przez tachogenerator. Położenie katowe belki mierzone jest przy pomocy enkodera. Na belce naklejone są tensometry służące do pomiaru naprężeń poprzecznych belki.

Na osi silnika zabudowano tachogenerator i enkoder. Niestabilność sił tarcia w przekładni powoduje, że obiekt ten jest trudny do sterowania. Wielu badaczy używa inne układy napędowe, dogodne do badań i do modelowania matematycznego, ale mniej zgodne z realiami spotykanymi w warunkach przemysłowych:

- napęd bezpośredni o dużym momencie i niskich obrotach może być stosowany bez przekładni. Brak przekładni ułatwia budowę modelu matematycznego i syntezę układu sterowania. Jednak takie napędy są ciężkie, kosztowne i mają spore rozmiary.
- cykloko-drive jako przekładni. Są one produkowane w Niemczech i w Japonii.

Poniżej podano parametry mechaniczne i elektryczne wybranych elementów użytych do budowy stanowiska badawczego:

silnik PARVEX Jego parametry, użyte w modelu, to:

$$R_a = 1.1, L = 6.5e-4, K_e = 57e-3; J_m = 3.05e-5 \text{ kgm}^2; U_{max} = 84.0V$$

prądnica tachometryczna PARVEX TBN 206, dane:  $6mV/obr/min/n'$  )

encoder 'haidenhain' na wale silnika, typ AE500 , 500 imp/obrot

przekładnia falowa,  $n=84$

encoder 'haidenhain' na złączu ramienia typu ROD 800S, 18000 imp/obrot, wraz z układem 'haidenhain' typ EXE 702 B do digitalizacji i interpolacji (daje 25-krotnego zwiększenia rozdzielczości)

filtr RTF 11021, używany jako antyaliasingowy filtr dolnoprzepustowy 32.5 Hz

belka elastyczna o wymiarach  $L = 0.715 \text{ m}; H = 0.0048 \text{ m}; B = 0.03 \text{ m};$

gęstość i moduł Younga  $\rho = 7860 \text{ kg/m}^3; E = 2.1e11 \text{ Pa};$

mostek tensometr. w węźle nr.102:  $l=0.040 \text{ m},$  tensometry HBM 6/120LY11

Wszystkie mierzone sygnały analogowe są normalizowane do standardowego zakresu -10 do +10V, stosowanego w kartach pomiarowych.

### 7.5.4.1 Wyniki analizy modalnej belki elastycznej

Uzyskano [Lisowski, 1996] następujące uśrednione wartości częstotliwości drgań własnych belki elastycznej i odpowiadające im wartości tłumienia modalnego: (uwzględniono trzy pierwsze częstotliwości)

Tabela 7.5.1

Częstotliwości drgań własnych $f$ [Hz], i tłumienia $\text{ksi}$ [%]						
	$f_1$	$\text{ksi}$	$f_2$	$\text{ksi}$	$f_3$	$\text{ksi}$
Belka z masa dodatkową	5.1	8	39	1.95	115	0.44
Belka bez masy dodatkowej	7.8	6.1	49	0.71	137	0.42

Zamontowanie belki elastycznej do przekładni powoduje przesunięcie w dół wszystkich częstotliwości drgań własnych belki oraz pojawienie się dodatkowej częstotliwości. Częstotliwości drgań własnych systemu z przekładnią, wynoszą

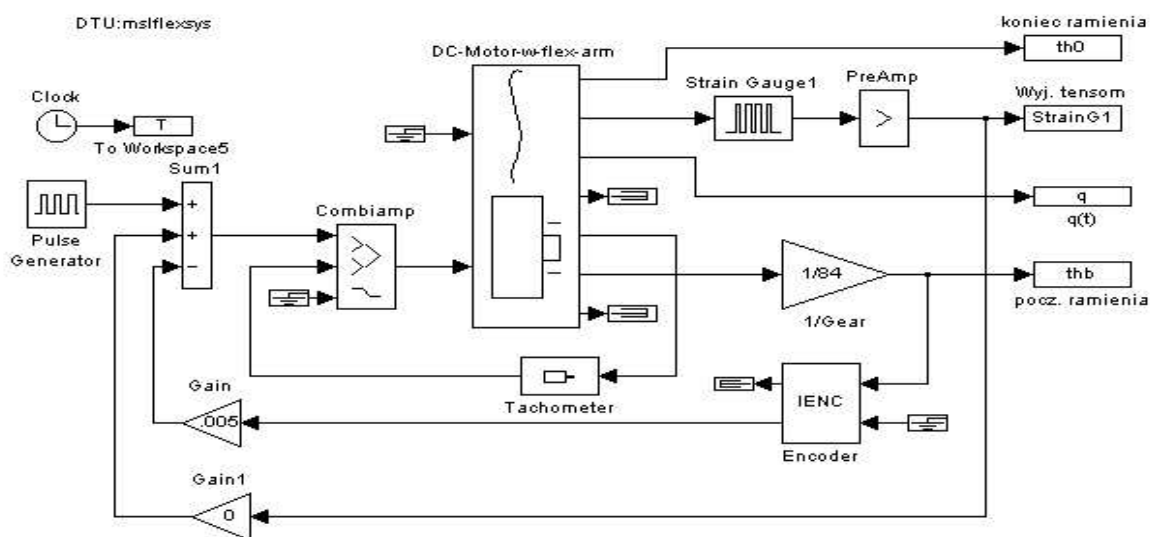
Tabela 7.5.2

Częstotliwości drgań własnych belki po zamontowaniu $f$ [Hz]				
	$f_1$	$f_2$	$f_3$	$f_4$
Belka z masa dodatkową	3.9	33	90	149
Belka bez masy dodatkowej	6.8	40	100	166

Podane wyżej parametry belki elastycznej oraz wyniki analizy modalnej mogą być bezpośrednio użyte do budowy modelu z wykorzystaniem bloków SIMULINK-a oraz biblioteki *MSL toolbox*.

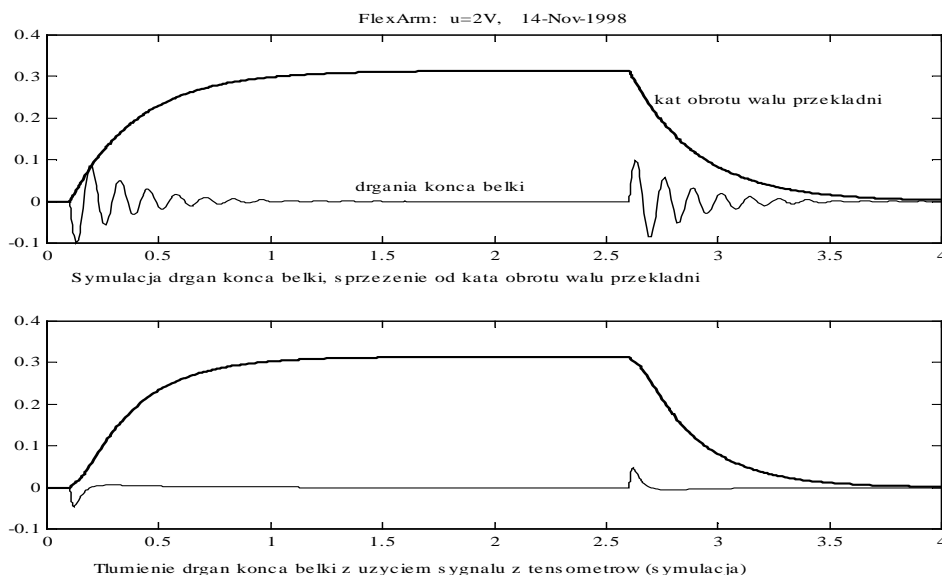
### 7.5.4.2 Symulacja dynamiki belki elastycznej z użyciem biblioteki MSL

Do symulacji użyto bibliotekę mechatroniczną MSL i schemat blokowy SIMULINK-a. (rys. 4). Baza danych biblioteki MSL została poszerzona o urządzenia wykorzystane na stanowisku pomiarowym, to jest silnik, przekładnię i belkę. Na wykresach pokazano wyniki symulacji drgań wolnego końca belki elastycznej. Pokazano też (linia pogrubiona) kąt obrotu wału przekładni, do którego umocowano belkę.



Rys. 4 Symulacja belki elastycznej z użyciem biblioteki MSL

W dolnej części rysunku 5 potwierdzono możliwość efektywnego tłumienia drgań końca belki poprzez wykorzystanie sygnału z tensometrów (mierzących naprężenia belki) w pętli sprzężenia zwrotnego układu sterowania. Wyniki symulacji zostały jakościowo potwierdzone na stanowisku badawczym.



Rys. 5 Symulacja drgań belki z użyciem biblioteki MSL

Biblioteka MSL pozwala na łatwe utworzenie modelu ciągłego układów mechatronicznych. Umożliwia uwzględnienie nieliniowości charakterystyk użytych elementów i daje dobrą zgodność wyników symulacji z pomiarami.

W dalszej części rozdziału omówiono tworzenie modelu dyskretnego w postaci równań stanu oraz identyfikację transmitancji ramienia elastycznego.

### 7.5.5 Model matematyczny ramienia elastycznego w przestrzeni stanów

W oparciu o [Lisowski 1995] zbudowano model matematyczny z 11 współzrędnymi stanu. Pierwsze 8 równań to model modalny belki elastycznej. Dalsze 3 równania opisują układ napędowy z silnikiem elektrycznym prądu stałego (z magnesami stałymi) i przekładnią. Jako współzrędnymi stanu wybrano:  $q_1, q_2, q_3, q_1\text{Dot}, q_2\text{Dot}, q_3\text{Dot}$  (zmienna modalna i jej pochodne),  $\text{arm.Theta} = \Theta$ ,  $\text{arm.ThetDot}$  (położenie kątowe ramienia i jego pochodna),  $i = \text{motor.I}$  (prąd silnika),  $\varphi = \text{motor.Fi}$ ,  $\text{motor.FiDot}$  (położenie kątowe wału silnika i jego pochodna). W równaniach (7.5.8) i (7.5.11) występują jednocześnie zmienne  $\varphi$  i  $\Theta$  (odpowiednio kąt obrotu wału silnika i złącza), co wskazuje na sprzężenie pomiędzy belką elastyczną i układem napędowym.

$$\dot{q}_1 = d/dt q_1 \quad (7.5.1)$$

$$\dot{q}_2 = d/dt q_2 \quad (7.5.2)$$

$$\dot{q}_3 = d/dt q_3 \quad (7.5.3)$$

$$Y_1 \Theta'' + q_1'' = -2\xi_1 \omega_1 q_1' - \omega_{12} q_1 \quad (7.5.4)$$

$$Y_2 \Theta'' + q_2'' = -2\xi_2 \omega_2 q_2' - \omega_{22} q_2 \quad (7.5.5)$$

$$Y_3 \Theta'' + q_3'' = -2\xi_3 \omega_3 q_3' - \omega_{32} q_3 \quad (7.5.6)$$

$$\Theta'' = d/dt \Theta' \quad (7.5.7)$$

$$J\Theta'' + Y_1q''_1 + Y_2q''_2 + Y_3q''_3 = k/n*\varphi - K\Theta \quad (7.5.8)$$

$$L*di/dt = R*i - k_u \varphi' - k_T \varphi' + U \quad (7.5.9)$$

$$\varphi' = d/dt \varphi \quad (7.5.10)$$

$$J_o \varphi'' = k_i *i - K/n^2 * \varphi + K/n * \Theta \quad (7.5.11)$$

gdzie:

- $q_i$  - i-ta zmienna modalna
- $\omega_i, \xi_i, Y_i$  - i-ta częstotliwość drgań własnych, tłumienie, współczynnik kształtu
- $\Theta, \varphi, n$  - położenie katowe ramienia i silnika, przełożenie przekładni
- $L, R, k_i, k_u$  - indukcyjność, rezystancja, stała prądowa i napięciowa silnika
- $k_T$  - współczynnik wzmocnienia pętli tachogeneratora,
- $K$  - zastępcza stała sprężystości złącza
- $J_o$  - masowy moment bezwładności części wirujących silnika i przekładni sprowadzony do wału silnika
- $J$  - masowy moment bezwładności części wirujących złącza i belki

Równania opisujące silnik elektryczny, przekładnię i belkę elastyczną przekształcono do postaci równań stanu. W tym celu utworzono dwie macierze współczynników, osobno dla lewej i prawej strony powyższego układu równań. Do odwracania pierwszej z tych macierzy użyto arytmetykę o precyzji 32 cyfr dziesiętnych. Tym sposobem starano się zminimalizować skutki złego uwarunkowania macierzy. Użycie standardowej dla pakietu MATLAB podwójnej precyzji 16 miejsc dziesiętnych nie jest wystarczające. W razie potrzeby można dokonać przeskalowania zmiennych, aby wszystkie ich wartości były tego samego rzędu. Dla przyjętej struktury modelu i parametrów stanowiska pomiarowego utworzono model ciągły w postaci równań stanu

$$\begin{aligned} \mathbf{dx/dt} &= \mathbf{Ax(t)} + \mathbf{Bu(t)} \\ \mathbf{y(t)} &= \mathbf{Cx(t)} + \mathbf{Du(t)} \end{aligned}$$

Macierz **A** tego modelu ma postać jak poniżej. Podano nazwy zmiennych stanu (*dot* oznacza pochodną)

<b>A =</b>	<i>q1</i>	<i>q2</i>	<i>q3</i>	<i>q1Dot</i>	<i>q2Dot</i>			
<i>q1</i>	0	0	0	1	0			
<i>q2</i>	0	0	0	0	1			
<i>q3</i>	0	0	0	0	0			
<i>q1Dot</i>	-84477	-8.7406e+005	-2.4732e+006	-419.73	-85.313			
<i>q2Dot</i>	-15004	-2.1712e+005	-4.447e+005	-74.55	-21.192			
<i>q3Dot</i>	-4857	-50874	-6.6805e+005	-24.132	-4.9656			
<i>arm.Theta</i>	0	0	0	0	0			
<i>arm.ThetDot</i>	1.6073e+005	1.6835e+006	4.7637e+006	798.58	164.32			
<i>motor.I</i>	0	0	0	0	0			
<i>motor.Fi</i>	0	0	0	0	0			
<i>motor.FiDot</i>	0	0	0	0	0			
	<i>q3Dot</i>	<i>arm.Theta</i>	<i>arm.ThetDot</i>	<i>motor.I</i>	<i>motor.Fi</i>	<i>motor.FiDot</i>		
<i>q1</i>	0	0	0	0	0	0		
<i>q2</i>	0	0	0	0	0	0		
<i>q3</i>	1	0	0	0	0	0		
<i>q1Dot</i>	-27.467	96573	0	0	-1149.7	0		
<i>q2Dot</i>	-4.9387	17364	0	0	-206.72	0		
<i>q3Dot</i>	-7.4193	5621	0	0	-66.916	0		
<i>arm.Theta</i>	0	0	1	0	0	0		
<i>arm.ThetDot</i>	52.904	-1.8601e+005	0	0	2214.4	0		
<i>motor.I</i>	0	0	0	-1692.3	0	-87.692		
<i>motor.Fi</i>	0	0	0	0	0	1		
<i>motor.FiDot</i>	0	2.4138e+005	0	1868.9	-2873.6	0		

### 7.5.5.1 Model dyskretny w przestrzeni stanów

Parametry równań stanu dla modelu dyskretnego uzyskano zakładając użycie ekstrapolatora rzędu zerowego (ang. *zero order hold* lub *sample and hold*) Przyjęto czas próbkowania  $T_s=0.004$  s. i przekształcono równanie stanu po postaci dyskretniej.

$$\begin{aligned} \mathbf{x}(t+1) &= \mathbf{A}\mathbf{x}(t) + \mathbf{B}\mathbf{u}(t) \\ \mathbf{y}(t) &= \mathbf{C}\mathbf{x}(t) + \mathbf{D}\mathbf{u}(t) \end{aligned}$$

Poniżej podano nowe wartości macierzy **A**,**B**,**C**,**D** dla modelu dyskretnego, otrzymane z modelu ciągłego z wykorzystaniem funkcji `c2d` z pakietu MATLAB.

**A =**

	<i>q1</i>	<i>q2</i>	<i>q3</i>	<i>q1Dot</i>	<i>q2Dot</i>	
<i>q1</i>	0.77767	-1.9407	-0.77781	0.0024664	-0.0042915	
<i>q2</i>	-0.033314	0.26418	-0.031442	-0.00023594	0.002633	
<i>q3</i>	-0.0015275	-0.003597	-0.78938	-2.0867e-005	-0.00012662	
<i>q1Dot</i>	-32.981	-61.549	2645.9	0.61381	-1.9467	
<i>q2Dot</i>	-1.0566	-171.48	540.14	-0.038564	0.24744	
<i>q3Dot</i>	5.1961	61.792	50.907	0.024289	0.0024343	
<i>arm.Theta</i>	0.41761	3.7884	1.5859	0.0028861	0.0083304	
<i>arm.ThetDot</i>	58.634	145.8	-5075.2	0.70894	3.8027	
<i>motor.I</i>	-6.9617	-69.156	-127.57	-0.042138	-0.0833	
<i>motor.Fi</i>	0.22506	2.2659	4.7124	0.0013233	0.0023127	
<i>motor.FiDot</i>	181.1	1772.5	2844.7	1.1249	2.4389	

	<i>q3Dot</i>	<i>arm.Theta</i>	<i>arm.ThetDot</i>	<i>motor.I</i>	<i>motor.Fi</i>	<i>motor.FiDot</i>
<i>q1</i>	-0.0067699	0.24931	0.0004859	-4.3965e-006	-0.002968	-5.3665e-006
<i>q2</i>	-0.0011041	0.038797	8.1852e-005	-7.4972e-007	-0.00046187	-9.0165e-007
<i>q3</i>	0.00019549	0.0018052	1.5448e-005	-1.5821e-007	-2.149e-005	-1.6555e-007
<i>q1Dot</i>	-0.74842	33.935	0.24931	-0.002589	-0.40398	-0.0025825
<i>q2Dot</i>	-0.025444	1.2861	0.038797	-0.0004163	-0.015311	-0.00039612
<i>q3Dot</i>	-0.78882	-6.0285	0.0018052	-4.1641e-005	0.071768	7.616e-006
<i>arm.Theta</i>	0.013167	0.51385	0.0030573	8.5227e-006	0.0057875	1.0414e-005
<i>arm.ThetDot</i>	1.5296	-68.78	0.51385	0.0050394	0.81881	0.0050401
<i>motor.I</i>	-0.17022	-29.419	-0.060574	-0.043528	0.35023	-0.038297
<i>motor.Fi</i>	0.0048904	1.5045	0.0021859	0.0033133	0.98209	0.003437
<i>motor.FiDot</i>	4.744	618.48	1.5045	0.81616	-7.3629	0.69154

**B =**

	<i>motor.U</i>
<i>q1</i>	-7.334e-006
<i>q2</i>	-1.2767e-006
<i>q3</i>	-3.2209e-007
<i>q1Dot</i>	-0.0067639
<i>q2Dot</i>	-0.0011534
<i>q3Dot</i>	-0.0002434
<i>arm.Theta</i>	1.4193e-005
<i>arm.ThetDot</i>	0.013112
<i>motor.I</i>	0.68452
<i>motor.Fi</i>	0.0094199
<i>motor.FiDot</i>	5.0974

**C =**

	<i>q1</i>	<i>q2</i>	<i>q3</i>	<i>q1Dot</i>	<i>q2Dot</i>	
<i>arm.Theta</i>	0	0	0	0	0	
<i>arm.ThetDot</i>	0	0	0	0	0	
<i>arm.end</i>	1.4313	-0.95493	0.60413	0	0	
<i>arm.StrGau</i>	0.51919	0.093353	0.030219	0	0	
<i>motor.U</i>	0	0	0	0	0	
<i>motor.Fi</i>	0	0	0	0	0	
<i>motor.FiDot</i>	0	0	0	0	0	

	<i>q3Dot</i>	<i>arm.Theta</i>	<i>arm.ThetDot</i>	<i>motor.I</i>	<i>motor.Fi</i>	<i>motor.FiDot</i>
<i>arm.Theta</i>	0	1	0	0	0	0
<i>arm.ThetDot</i>	0	0	1	0	0	0
<i>arm.end</i>	0	0.715	0	0	0	0
<i>arm.StrGau</i>	0	0	0	0	0	0
<i>motor.U</i>	0	0	0	0	0	0
<i>motor.Fi</i>	0	0	0	0	0.011905	0
<i>motor.FiDot</i>	0	0	0	0	0	0.00014172

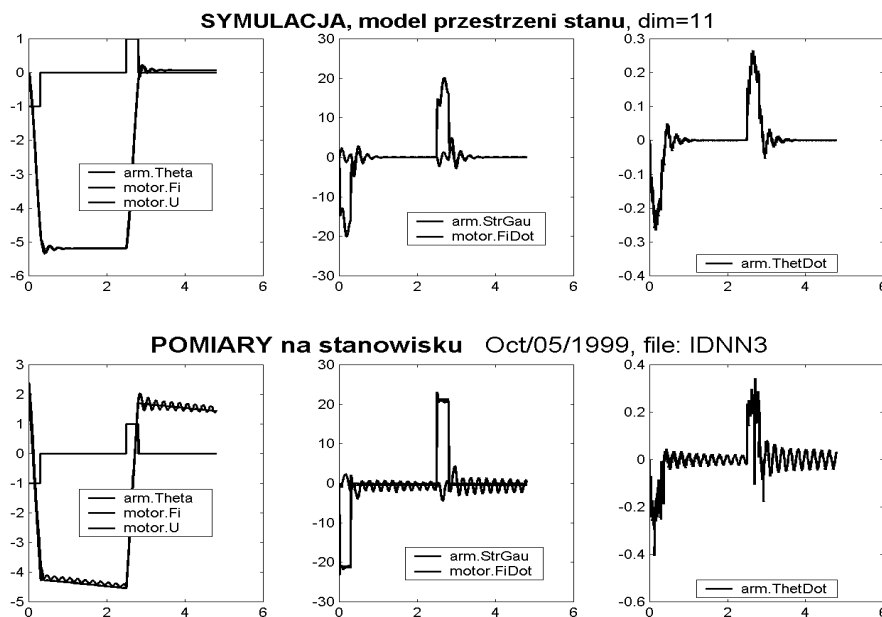
**D** =

	<i>motor.U</i>
<i>arm.Theta</i>	0
<i>arm.ThetDot</i>	0
<i>arm.end</i>	0
<i>arm.StrGau</i>	0
<i>motor.U</i>	1
<i>motor.Fi</i>	0
<i>motor.FiDot</i>	0

### 7.5.5.2 Weryfikacja eksperymentalna modelu przestrzeni stanu

Podane wyżej macierze **A**, **B**, **C**, **D** równania modelu w przestrzeni stanu zweryfikowano w oparciu o dane eksperymentalne. Na wejście modelu podano prostokątny sygnał sterujący (o małym współczynniku wypełnienia) zarejestrowany podczas pomiarów. Sygnały wyjściowe modelu porównano z sygnałami zarejestrowanymi na stanowisku pomiarowym. Porównanie obu grup wykresów (rysunek 6) pokazuje, że:

- przebiegi eksperymentalne są jakościowo zgodne z przebiegami symulacyjnymi w obu grupach wykresów. Widoczne są oscylacje o częstotliwości ok. 5 Hz. Jest to wartość bliska wartości pierwszego, dominującego modu w modelu modalnym ramienia elastycznego
- widoczne w badaniach eksperymentalnych oscylacje sygnałów mają znacznie większą amplitudę niż na wykresie symulacji
- oscylacje sygnałów mierzonych na stanowisku są znacznie słabiej tłumione niż pokazuje to symulacja
- w pomiarach brak wolnozmiennych oscylacji, generowanych podczas symulacji prędkości kątowej silnika. Powodem jest nieuwzględnienie specyfiki (samohamowność i asymetria) przekładni harmoniczej w modelu
- w pomiarach widoczne są zakłócenia (szpilki, szum i dodatkowe oscylacje o częstotliwości ok. 50 Hz) oraz dryft sygnału enkoderów – których nie ma podczas symulacji.



Rys. 6. Wyniki symulacji (model przestrzeni stanu) i pomiary na stanowisku bez filtru

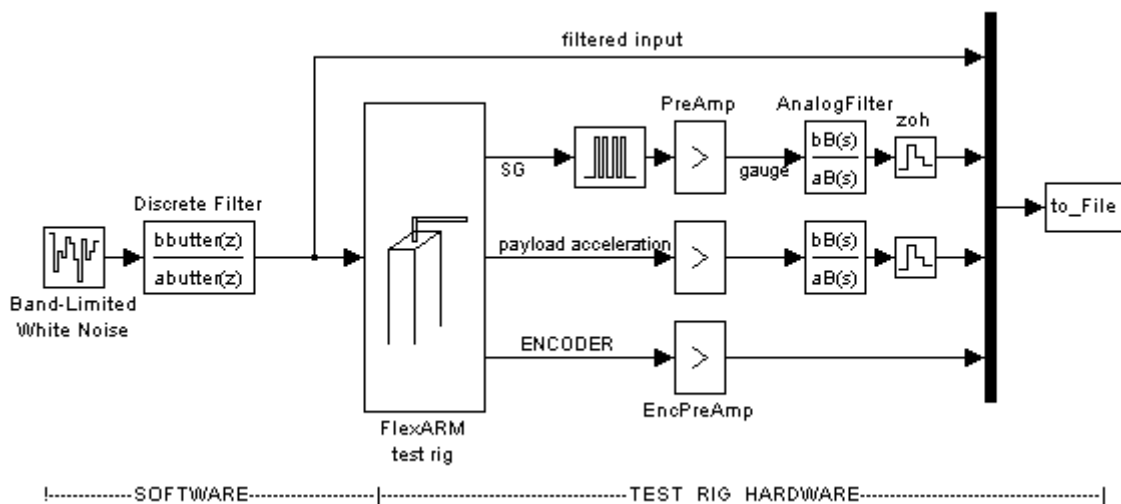
Model w postaci równań stanu umożliwia wprowadzenie dodatkowych bloków, uwzględniających niedostatecznie uwzględnione w modelu zjawiska nieliniowe jak: tarcie suche i wiskotyczne, histereza, nasycenie. Do opisania tych zjawisk można użyć funkcje nieliniowe, ale też i podsystemy realizujące sprzętowo sieć neuronową lub regulator rozmyty.

### 7.5.6 Model transmitancyjny dyskretny elastycznego ramienia robota

Celem identyfikacji jest wybór struktury i określenie parametrów modelu matematycznego elastycznego ramienia robota. Model winien ujmować wszystkie istotne zjawiska (w tym różnego charakteru oscylacje, tarcie i luzy) - jednak bez nadmiernego zwiększania rzędu modelu.

#### 7.5.6.1 Sygnały wejściowe, wyjściowe, ich filtracja i rejestracja.

Do identyfikacji użyto stanowisko badawcze (rozdział 7.5.2) z modelem fizycznym ramienia elastycznego i interfejsami do sprzężenia stanowiska z komputerem i środowiskiem do szybkiego prototypowania. Wykorzystano oprogramowanie MATLAB/Simulink/RTW oraz kartę i oprogramowanie z *dSPACE GmbH* (w tym *COCPIT* i *TRACE*). Część pomiarów powtórzono na tym samym stanowisku, lecz z wykorzystaniem komputera przemysłowego z systemem operacyjnym VxWorks – opisanym w jednym z wcześniejszych rozdziałów.



Rys. 7 Układ pomiarowy do identyfikacji elastycznego ramienia robota.

Sygnały analogowe, mierzone na stanowisku pomiarowym były, w razie potrzeby, filtrowane. Filtracja sygnału wyjściowego ma na celu odcięcie (przed przetworzeniem na postać cyfrową) częstotliwości leżących powyżej pasma Nyquista, to jest powyżej połowy zastosowanej częstotliwości próbkowania sygnału (ang. antialiasing). Sygnał cyfrowy z enkoderów nie był filtrowany. Napięcie tachogenerators jest wykorzystywane wyłącznie w wewnętrznej pętli sprzężenia zwrotnego układu napędowego i nie było ani mierzone ani rejestrowane. Sygnał z akcelerometru był rejestrowany tylko dla części pomiarów..

Stosowano różne wymuszenia. Sygnał **stochastyczny** (biały szum) był filtrowany dolnoprzepustowo filtrem cyfrowym, aby nie powodować pobudzenia obiektu do drgań na częstotliwościach poza pasmem rejestrowanego sygnału wyjściowego. Obniża to też rząd identyfikowanego modelu, gdyż nie bada się jego zgodności z obiektem na częstotliwościach, które leżą poza rejestrowanym pasmem. Należy jednak pamiętać, że zbytne ograniczenie pasma częstotliwości może utrudnić a nawet uniemożliwić identyfikację [Findeisen, 1995].

Najbardziej istotne wydają się być badania z wykorzystaniem przebiegu **prostokątnego**. Był on wykorzystany do rejestracji przebiegów przejściowych o różnych amplitudach. Przebieg prostokątny dobrze oddaje warunki sterowania obiektu przez układy cyfrowe.

Wymuszenie **sinusoidalne** nie były stosowane. Pozwalało by ono dokładnie zbadać własności obiektu w otoczeniu częstotliwości drgań własnych. Biblioteka *Frequency Domain System Identification Toolbox* umożliwia usprawnienie pomiarów poprzez równoczesne badanie odpowiedzi obiektu na wymuszenia sinusoidalne o różnych częstotliwościach (funkcja *multisinus*).

### 7.5.6.2 Model parametryczny ARX

W pierwszym przybliżeniu przyjęto, że poszukiwane będą parametry modelu dyskretnego ARX (ang. *autoregressive model with exogenous input*), opisanego przez dwa wielomiany niskiego rzędu. Brano też pod uwagę inne modele, jak ARMAX, BJ, OE. Model ARX może być wyprowadzony z zależności

$$[y(t) + a_1y(t-1) + \dots + a_ny(t-n)] = b_1u(t-nk) + \dots + b_nu(t-nk-nb+1)$$

lub po wprowadzeniu operatora różnicy wstecznej  $q^{-1}$

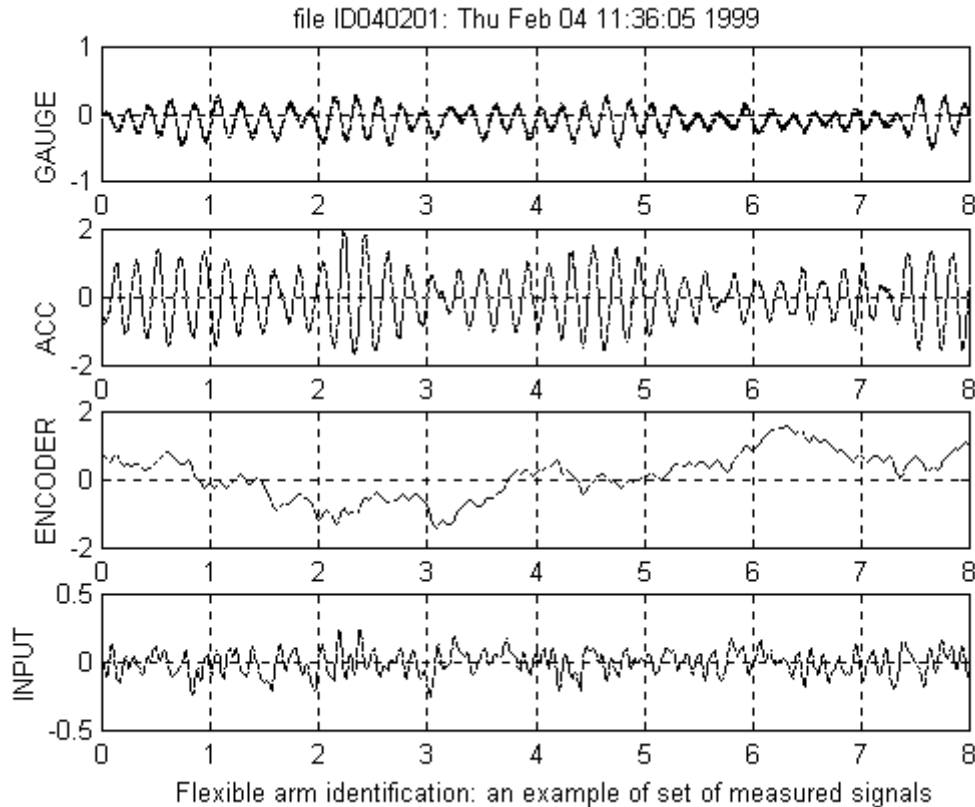
$$A(q^{-1})y(t) = B(q^{-1})u(t-nk)$$

gdzie:

$A(q^{-1}), B(q^{-1})$	wielomiany operatora różnicy wstecznej $q^{-1}$
$u(t)$	sygnał sterujący
$y(t)$	sygnał wyjściowy
$na, nb-1$	ilość biegunów, zer
$nk$	opóźnienie wyrażone jako wielokrotność okresu próbkowania

### 7.5.6.3 Identyfikacja z użyciem sygnału stochastycznego

Identyfikację prowadzono z użyciem MATLAB-a oraz bibliotek *System Identification Toolbox* i *Control System Toolbox*. Dostępny w *Identification Toolbox* interfejs graficzny GUI ułatwia efektywne wykorzystanie zawartych tam narzędzi, lecz staje się uciążliwy przy obróbce dużej ilości pomiarów. Dobrym rozwiązaniem jest zapisanie sekwencji poleceń do wstępnej obróbki danych pomiarowych w pliku dyskowym (M-plik). W ramach obróbki wstępnej usuwano wartość średnią, dryft i filtrowano cyfrowo zarejestrowane sygnały.



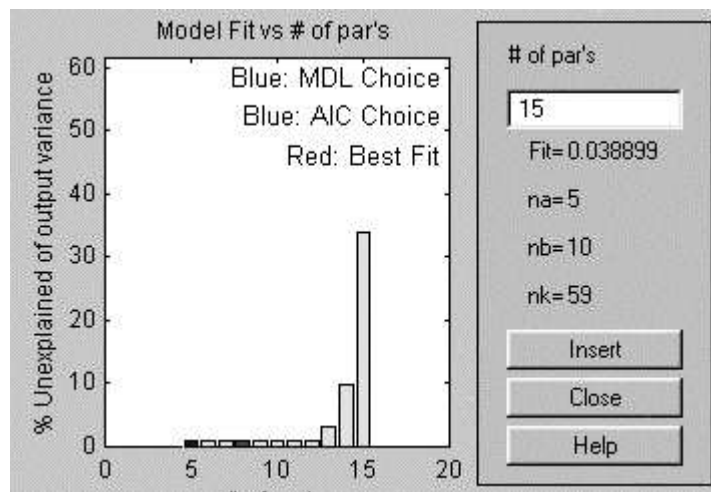
Rys. 8 Identyfikacja modelu ramienia elastycznego z użyciem wymuszenia stochastycznego. Mierzone sygnały: napięcie sterujące (input), enkoder silnika, enkoder ramienia (nie pokazany na rysunku), akcelerometr, mostek tensometryczny (gauge). Użyto cyfrowy filtr dolnoprzepustowy 20 Hz na wejściu.

Sygnały wejściowe i wyjściowe były w opisywanym eksperymencie próbkowane z częstotliwością 1 kHz, co daje okres próbkowania 1 ms. Pozwalało to na zarejestrowanie przebiegu o czasie trwania do 8 sekund (8001 próbek na każdy sygnał mierzony). Dane przetwarzane przez *System Identification Toolbox* są opisane na osi czasu dla  $1 < t < 9$  zamiast  $0 < t < 8$ . W innych pomiarach stosowano dłuższe okresy próbkowania, nawet do 60 ms.

Sygnał wejściowy (rys.7) był pobierany z generatora szumu białego (z biblioteki Simulink-a) i mógł być, w razie potrzeby, filtrowany z użyciem dolnoprzepustowego filtra cyfrowego Butterworth-a 4-go rzędu. Częstotliwości odcięcia ustawiano, w oparciu o tabelę 7.5.2, na 12.5, 15 lub 20 Hz.. Ograniczono w ten sposób możliwość pobudzenia ramienia elastycznego do drgań o wyższych częstotliwościach rezonansowych (odpowiada to częstotliwościom wyższego rzędu modelu modalnego z rozdziału 7.5.4). Przykładowe zarejestrowane przebiegi pokazano na rysunku 8.

Biblioteka *System Identification Toolbox* wykorzystuje kryteria FPE: (ang. *final prediction error*), MDL (*Rissanen'sw minimum description length*) lub AIC (*Akaike's information criterion*) do wstępnej selekcji wygenerowanych modeli. Otrzymano w ten sposób zbiór modeli o zbliżonym, poprawnie określonym czasie opóźnienia i różnych stopni licznika i mianownika. Przykładowe rezultaty automatycznej selekcji są przedstawione graficznie na rysunku 9. Stwierdzono, że nie były one wiarygodne, gdyż modele wskazywane jako najlepsze miały odpowiedź czasową niekiedy znaczne odbiegającą od zarejestrowanych wyników pomiarów, a zdarzały się przypadki modeli niestabilnych. W tej sytuacji powtarzano

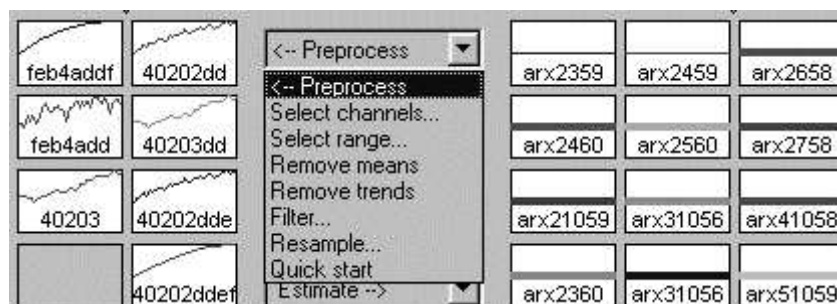
proces identyfikacji dla różnych zbiorów kombinacji stopnia licznika **na** i mianownika (**nb-1**) oraz dla modeli innych niż ARX. Optymalny model był poszukiwany wśród modeli niskiego rzędu, które dla użytego sygnału miały odpowiedź zbliżoną do odpowiedzi rzeczywistego obiektu i najlepiej spełniały kryteria MDL oraz AIC.



Rys. 9 *System Identification Toolbox* wybiera, dla każdej sumy ( $na+nb$ ), jeden model w zadanym przedziale  $5 < na+nb < 15$ . Wskazano na modele 5 i 8 jako najlepsze (ciemniejszy wykres). Najgorszy jest model dla  $na=5, nb=10, nk=59$

#### 7.5.6.4 Transmitancja sygnału tensometrów względem napięcia wejściowego

Wysoki poziom szumów sygnału z mostka tensometrycznego uniemożliwiał identyfikację parametrów modelu transmitancyjnego. Zadowalające rezultaty uzyskano dopiero po zastosowaniu dodatkowej obróbki wstępnej (filtracji) zarejestrowanych sygnałów. Użyto do tego filtr dyskretny Butterworda 8-go rzędu o częstotliwości odcięcia z zakresu 7.5 do 20 Hz. Należy zaznaczyć, że zastosowanie filtrów zmienia obserwowane parametry badanego obiektu i powinno być odpowiednio uwzględnione przy projektowaniu układu sterowania.



Rys. 10 Interfejs graficzny GUI z biblioteki *System Identification Toolbox*. Od lewej: ikony danych po obróbce wstępnej; rozwinięte menu obróbki wstępnej sygnału; ikony dla wygenerowanych modeli typu ARX

Najlepszą zgodność z badanym obiektem wykazywały, dla przyjętych kryteriów, modele transmitancyjne **arx2359** i **arx2459**, o wartościach **na, nb** wynoszących odpowiednio **2 i 3** lub **2 i 4**, oba z czasem opóźnienia  $nk=59$  okresów próbkowania. Wybór modeli dokonano w oparciu o weryfikację prowadzoną z użyciem części danych pomiarowych, które nie były wcześniej używane do identyfikacji.

Porównanie wykresów na poniższym rysunku pokazuje, że sygnały wyjściowe obu rozpatrywanych modeli ARX2359 i ARX2459 są zbliżone do rezultatów uzyskanych na stanowisku pomiarowym. Transmitancji ARX 2359 nadano nazwę SG23a

$$SG23a = \frac{0.07598 q^{-59} - 0.1538 q^{-60} + 0.07823 q^{-61}}{1 - 1.998 q^{-1} + 0.9988 q^{-2}}$$

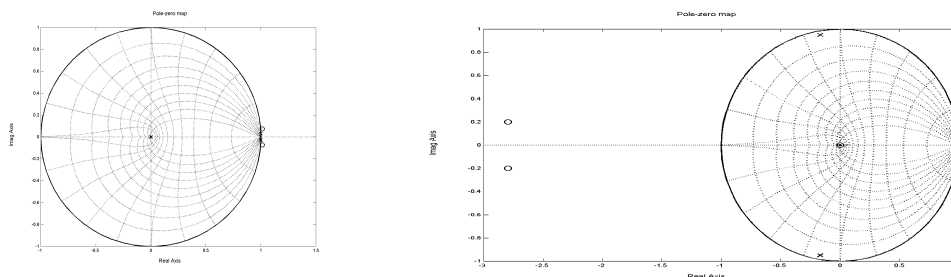
okres próbkowania  $T_s=1ms$

czas opóźnienia  $nk=59$  okresów próbkowania

Obiekt rzeczywisty ma własności nieminimalno fazowe (niestabilne zera transmitancji). Nie jest to regułą, ale otrzymany model dyskretny jest także nieminimalno fazowy. Dwa jego zera ( $1.0120 \pm j0.0737$ ) leżą poza okręgiem jednostkowym. Bieguny transmitancji dyskretniej mają wartości ( $0.9989 \pm j0.0295$ ) i są stabilne, a częstotliwość drgań własnych modelu SG23a wynosi 4.711 Hz.. Model SG23a przeliczono (użyto w tym celu funkcję `d2d` z biblioteki *Control System Toolbox*) dla czasu próbkowania 59ms, aby uzyskać nowy model z opóźnieniem równym jednemu okresowi próbkowania. W ten sposób otrzymano nowy model dyskretny

$$SG23b = \frac{0.07598 q^{-1} + 0.4247 q^{-2} + 0.5965 q^{-3}}{1 + 0.3323 q^{-1} + 0.9292 q^{-2}}$$

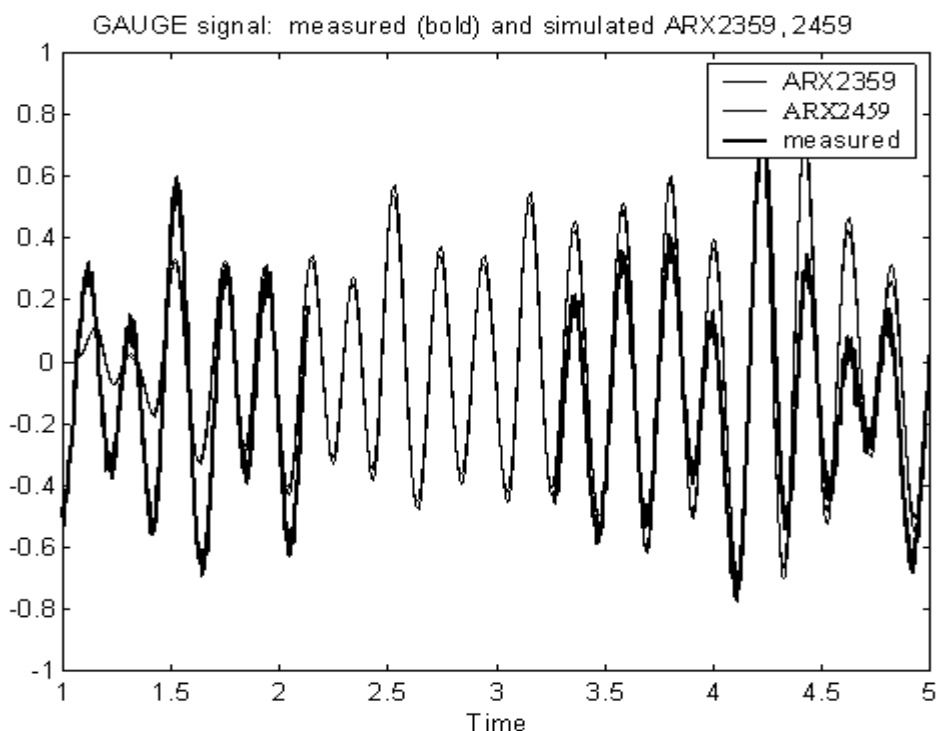
okres próbkowania  $T_s=59ms$



Rys. 11 Bieguny i zera transmitancji modeli dyskretnych SG23a i SG23b

Otrzymana transmitancja SG23b ma, w porównaniu do SG23a niższy stopień licznika, przy tej samej częstotliwości rezonansowej 4.706 Hz i przy tym samym współczynniku tłumienia równym 0.02103. Zmienia się natomiast położenie biegunów i zer transmitancji. Dwa niestabilne zera, położone na prawo od okręgu jednostkowego transmitancji SG23a, są obecnie przesunięte w lewo i znajdują się daleko poza okręgiem jednostkowym. Zera są odpowiedzialne za nieminimalno fazowe własności obu modeli: SG23a i SG23b.

Istotnym elementem przekształcenia transmitancji było przyjęcie, że nowy okres próbkowania jest całkowitą wielokrotnością poprzedniego okresu próbkowania i jest podwielokrotnością czasu opóźnienia. Jeśli opóźnienie nie jest całkowitą wielokrotnością czasu próbkowania, prowadzi do wygenerowania dodatkowych zer i biegunów. W takiej sytuacji nie zaleca się przeliczania parametrów lecz powtórna identyfikację z zastosowaniem nowej częstotliwości próbkowania. Będzie to pokazane na przykładzie.



Rys.12 Sygnał mierzony mostkiem tensometrycznym (pogrubiony) i rezultaty symulacji

Omawiana w następnym podrozdziale transmitancja enkodera względem napięcia wejściowego ma opóźnienie 10 ms i tą wartość postanowiono przyjąć jako okres próbkowania. Jednak model SG23a, po przeliczeniu dla  $T_s=10$  ms ma kilkanaście dodatkowych zer, co jest niepotrzebną komplikacją. W tej sytuacji dokonano powtórnej identyfikacji z użyciem co dziesiątej wartości mierzonego sygnału (ang. resampling) i uzyskano

$$SG23c = \frac{0.07758 q^{-7} - 0.1167 q^{-8} + 0.084 q^{-9}}{1 - 1.897 q^{-1} + 0.9837 q^{-2}}$$

okres próbkowania  $T_s=10$  ms

czas opóźnienia  $nk=7$  okresów próbkowania

Wadą takiego postępowania jest utrata 90% punktów pomiarowych (lepiej jest powtórzyć pomiary, wydłużając czas rejestracji). Wykorzystanie co dziesiątego punktu pomiarowego jest prawdopodobną przyczyną zmiany czasu opóźnienia (70 ms w miejsce 59 ms) i zapewne mniejszej dokładności tego modelu.

#### 7.5.6.5 Transmitancja sygnału enkodera względem napięcia wejściowego

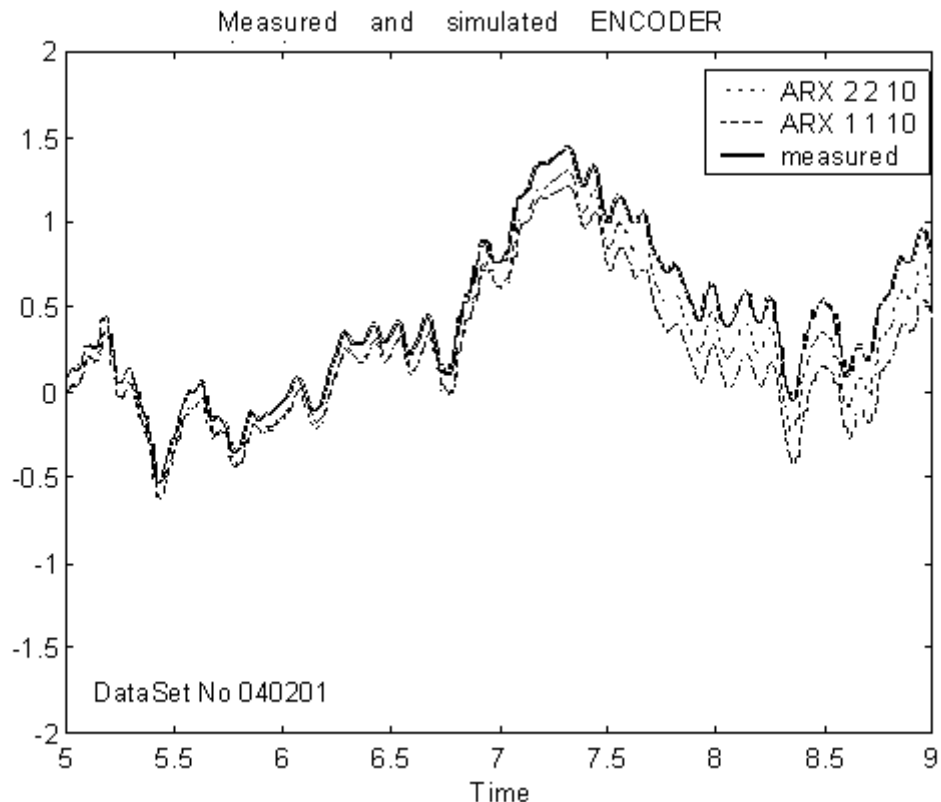
Przy identyfikacji transmitancji enkodera względem napięcia wejściowego stwierdzono znacznie mniejszą wartość opóźnienia niż dla wyjścia tensometrycznego. Opóźnienie to wynosi 10 okresów próbkowania, czyli  $nk=10$ . Rząd otrzymanej transmitancji jest też niższy, niż dla SG23A. Do dalszej analizy wybrano modele ARX\_1\_1\_10 i ARX\_2\_2\_10. Na ich wejście podano sygnały zarejestrowane podczas pomiarów lecz niewykorzystywane wcześniej do identyfikacji. Na poniższym rysunku pokazano sygnał wyjściowym badanego obiektu rzeczywistego i wyniki symulacji dla ARX\_1\_1\_10 i ARX\_2\_2\_10. Oba przebiegi symulacyjne są zbliżone do przebiegu zarejestrowanego podczas pomiarów i do omówienia wybrano model ARX\_1\_1\_10, który nazwano ENC1a

$$\text{ENC1a} = \frac{0.04601 q^{-10}}{1 - 0.9998 q^{-1}}$$

okres próbkowania  $T_s=1$  ms

Powyższy model przeliczono, przy użyciu funkcji  $d2d$  na częstotliwość próbkowania 10 ms, otrzymując

$$\text{ENC1b} = \frac{0.04601 q^{-1} + 0.4136 q^{-2}}{1 - 0.9975 q^{-1}}$$



Rys.13 Sygnał mierzony z enkodera (pogrubiony) i rezultaty symulacji

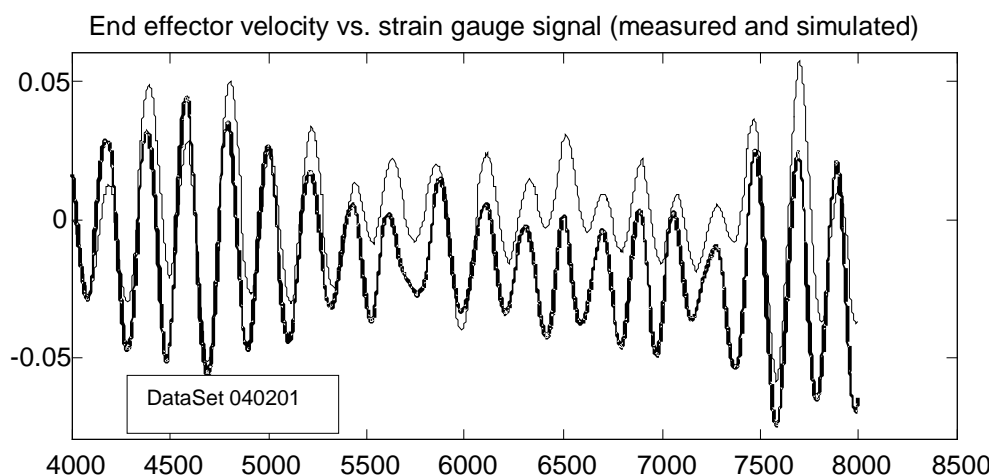
### 7.5.6.6 Transmitancja sygnału akcelerometra względem sygnału tensometrów

Sygnał mierzony akcelerometrem zawierał dużą ilość zakłóceń. Problemy te pomyślnie rozwiązano z użyciem dolnoprzepustowego filtra cyfrowego Butterworth-a 4-go rzędu. Kolejnym krokiem było cyfrowe całkowanie tego przebiegu z użyciem filtra  $T/(1-q^{-1})$  dla uzyskania sygnału proporcjonalnego do prędkości kątowej końca elastycznego ramienia, odległego od osi obrotu. Uzyskany sygnał prędkości został porównany z sygnałem wyjściowym z tensometrów i uzyskano następującą transmitancję niskiego rzędu:

$$\text{ARMV} = \frac{-0.004104 q^{-1}}{1 - 0.9911 q^{-1}}$$

Uzyskany rezultat może mieć praktyczne znaczenie, gdyż daje istotną informację o zachowaniu się odległego od osi obrotu końca ramienia elastycznego. Na rysunku poniżej

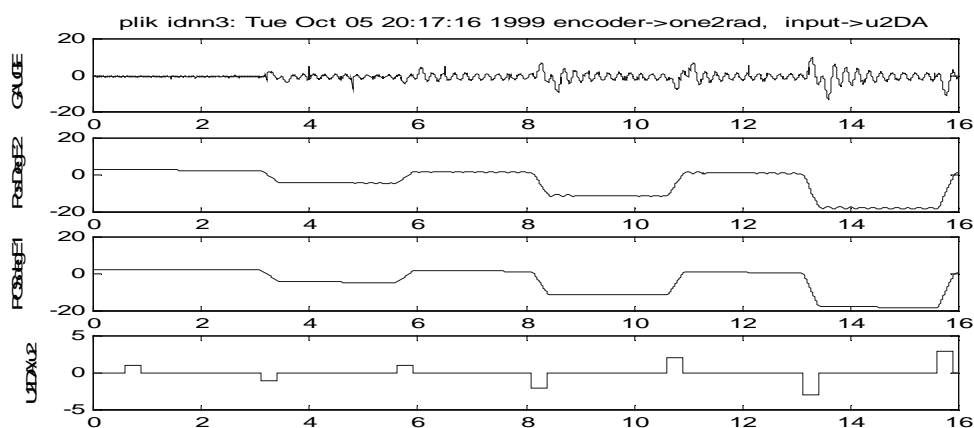
podano porównanie przebiegu mierzonego i symulowanego - z użyciem danych, które nie były użyte do identyfikacji.



Rys. 14 Sygnał mierzony (pogrubiony) i rezultaty symulacji prędkości odległego końca ramienia elastycznego

### 7.5.6.7 Identyfikacja z użyciem sygnału prostokątnego

Opisany niżej eksperyment ma uwzględnić nieliniowość charakterystyk ramienia elastycznego wraz z układem napędowym. Służy temu zmiana amplitudy sygnałów wymuszających. Na wejście podano sygnał w postaci fali prostokątnej. Niski współczynnik wypełnienia przebiegu umożliwia dłuższą obserwację drgań swobodnych układu. Nie rejestrowano sygnału akcelerometru ani prądnicy tachometrycznej i nie filtrowano przebiegów wejściowych. Pomiarów wykonano z użyciem komputera przemysłowego z systemem operacyjnym VxWorks i rejestrowano przebiegi o czasie trwania do 15 sekund. Przykładowe wyniki pomiarów pokazano poniżej.

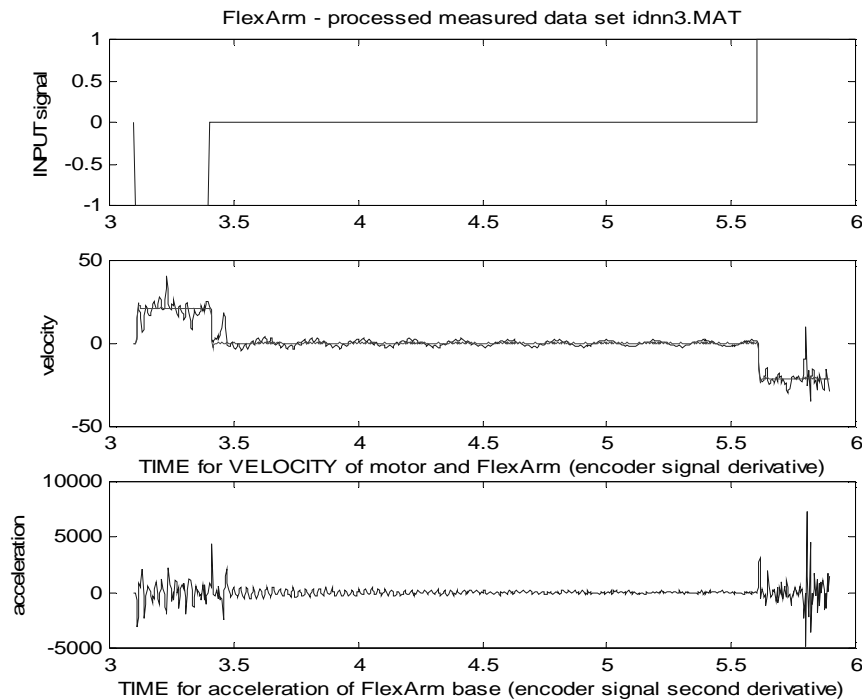


Rys. 16 Identyfikacja modelu ramienia elastycznego z użyciem fali prostokątnej o zmiennej amplitudzie. Mierzone sygnały (od dołu): napięcie sterujące (input), enkoder silnika, enkoder ramienia, mostek tensometryczny (gauge)

Na rysunku widoczny jest brak reakcji systemu na pierwsze dodatnie wymuszenie U2DA. Było to spowodowane **opóźnionym**, ręcznym **włączeniem wzmacniacza mocy**. Podczas przetwarzania tych danych:

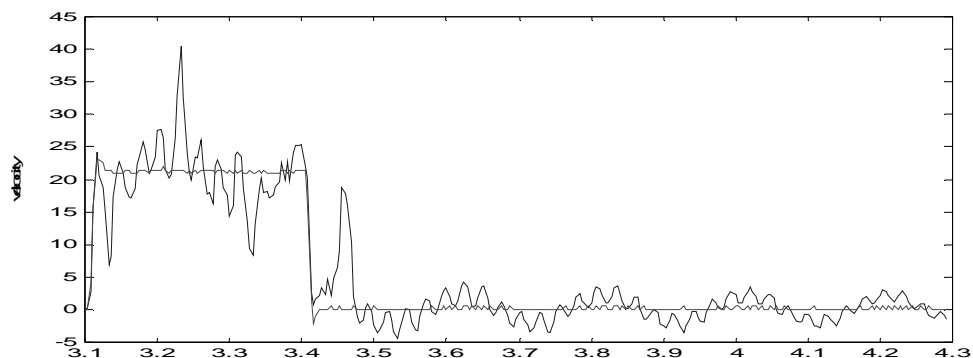
1. odrzucono początkową część przebiegów dla czasu z zakresu 0-3 sekundy
2. odfiltrowano cyfrowo pojedyncze szpilki sygnału GAUGE, zastępując je średnią z sąsiednich pomiarów
3. wygenerowano cyfrowo sygnał szybkości, jako pochodna z sygnału enkoderów.

Przetworzone zarejestrowane przebiegi enkodera w celu uzyskania sygnału prędkości i przyspieszenia, pokazanych na rysunku poniżej.



Rys. 17 Identyfikacja modelu ramienia elastycznego: szybkość i przyspieszenie uzyskane przez różniczkowanie przebiegu enkodera

Interesujący jest wykres prędkości kątowej osi ramienia FlexArm i prędkości kątowej silnika. Fragment tego wykresu (300 punktów pomiarowych, poczynając od punktu 775, co odpowiada czasom  $t \in [3.1-4.3]$ ) przedstawiono w powiększeniu poniżej.



Rys. 18 Porównanie prędkości kątowej ramienia elastycznego i prędkości kątowej silnika.

Pochodna sygnału dolnego enkodera, zamontowanego na osi silnika napędowego ma kształt podobny do sygnału napięcia sterującego. Widoczne są:

- niewielkie przeregulowania i oscylacje sygnału pochodnej z enkodera na silniku,
- przeregulowania występują po skokowej zmianie wartości napięcia sterującego silnika,
- oscylacje występują grupami i mają następujące cechy:
  - oscylacje występują przez cały czas działania silnika napędowego. W tym samym czasie obserwuje się znaczne oscylacje ramienia silnika (ok. 5 i 40 Hz),
  - oscylacje podczas zatrzymania pracy silnika są mniejsze i są obserwowane głównie przy dodatniej amplitudzie chwilowych oscylacji 5 Hz wartości prędkości elastycznego ramienia. Potwierdza to własność przekładni harmoniczej do przenoszenia mocy tylko w jedną stronę. Opisano to dalej jako nieliniowe modulowanie sił tarcia przez oscylacje ramienia elastycznego,
- drgania ramienia o częstotliwościach wyższych (ok. 40 Hz i więcej) nie wpływają na omawiany przebieg.

Pochodna sygnału górnego enkodera (na osi ramienia elastycznego) będzie omówiona oddzielnie dla dwu przedziałów: 3.5 do 4.3 s (silnik zatrzymany) i 3.1 do 3.4 s (silnik pracuje). Zgodnie z oczekiwaniem widoczne są oscylacje osi ramienia elastycznego FlexArm - po zatrzymaniu silnika napędowego czas 3.5 do 4.3 s. Widoczne na przebiegu oscylacje mają częstotliwości harmoniczne około 5Hz i 40 Hz – co jest **zgodne** z poprzednimi  **pomiarami** i z  **obliczeniami** teoretycznymi dla tego ramienia (Lisowski, 1995, w tabeli 5.2 podaje odpowiednio 5 Hz i 39 Hz). Oznacza to, że różniczkowanie cyfrowe przebiegu enkodera daje prawidłowe wyniki.

Odmienny charakter ma przebieg prędkości dla czasów  $t = 3.1$  do 3.4 sekundy. W okresie tym podano sygnał sterujący 1 volt na wejście układu napędowego. Na wykresie widoczne są składowe harmoniczne 5 i 40 Hz oraz pojedyncze impulsy szpilkowe o dużej amplitudzie. Zakładając, że różniczkowanie cyfrowe przebiegu enkodera daje prawidłowe wyniki (potwierdzeniem jest omówiony wyżej przebieg dla zatrzymanego silnika) – należy stwierdzić, że **szpilkowe impulsy** sygnału **prędkości** kątowej **występują w układzie rzeczywistym**. Źródłem tych impulsów może być niestabilna praca przekładni harmoniczej powodowana przez (przykładowo):

- zużycie lub niedokładne wykonanie mechanizmów przekładni,
- modulowanie sił tarcia przez drgania belki elastycznej, w tym możliwość przełączania efektów tarcia suchego i wiskotycznego w takt tych drgań,

#### **7.5.6.8 Wnioski dotyczące identyfikacji transmitancji ramienia elastycznego:**

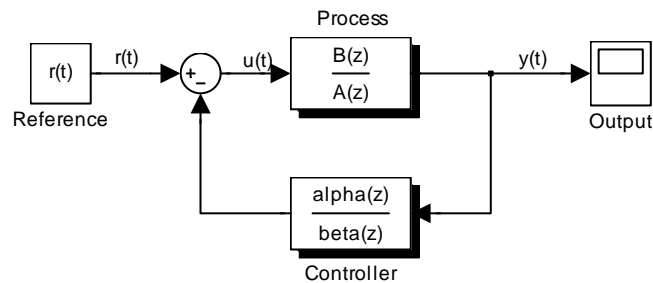
Opisane w tym rozdziale prace teoretyczne i eksperymentalne badanie modelu fizycznego elastycznego ramienia robota na podłączonym do komputera stanowisku pomiarowym prowadzą do następujących wniosków:

- Ramie elastyczne wraz z układem napędowym jest obiektem trudnym do modelowania i identyfikacji z uwagi na niestacjonarność i nieliniowość jego charakterystyk.
- Uzyskane w wyniku identyfikacji parametry modeli matematycznych wymagają weryfikacji sygnałami o różnym charakterze (w badaniach używano funkcje skokowe o różnych znakach i amplitudach oraz sygnał stochastyczny o ograniczonym paśmie).
- Nawet poprawnie zweryfikowany model nie może być bezkrytycznie wykorzystywany z uwagi na obserwowaną niestacjonarność obiektu. Przy budowie układów sterowania powinny być użyte algorytmy adaptacyjne.

- Podczas badań były dostępne odczyty z dwu enkoderów, pierwszy na wale silnika, drugi na złączu ramienia. W warunkach przemysłowych możliwy jest pomiar enkoderem wyłącznie na wale silnika. Zwiększa to potrzebę dokładnej interpretacji sygnałów z tensometrów i akcelerometru i znaczenie modeli opisujących związek tych sygnałów ze stanem obiektu.
- Zjawiska tarcia w przekładni harmoniczej mogą uniemożliwić uzyskanie zadowalającej dokładności modelu matematycznego. W konsekwencji skuteczność działania układu sterowania ramieniem elastycznym nie będzie zadowalająca. Należy rozważyć możliwość rezygnacji ze stosowania przekładni (można użyć kosztowny napęd bezpośredni) lub zastosować przekładnię innego typu (cyclodrive). Można użyć algorytm adaptacyjny ze stałą identyfikację parametrów przekładni.
- Należy zwrócić uwagę, na niski stopień transmitancji, w porównaniu do ilości elementów magazynujących energię w rzeczywistym systemie z elastycznym ramieniem. Może to oznaczać kompensację zer i biegunów modelu wyższego rzędu. Może to prowadzić do niestabilności układu sterowania automatycznego powodowanej istnieniem niesterowalnych biegunów modelu.
- Biblioteka MSL zawiera model elastycznego ramienia i pozwala na szybkie utworzenie modelu ciągłego obiektu mechatronicznego. Nie badano jej przydatności do współpracy ze sterownikiem dyskretnym.

### 7.5.7 Lokowanie biegunów z użyciem równania diofantycznego

Jeśli znana jest transmitancja obiektu regulacji – to dla uzyskania określonego zachowania się sygnału wyjściowego można dokonać lokacji (przesunięcia) biegunów transmitancji w zadane położenie z użyciem sprzężenia zwrotnego. Parametry regulatora umieszczonego w pętli sprzężenia zwrotnego można określić przez rozwiązanie równania diofantycznego.



Rys. 19 Lokowanie biegunów z użyciem równania diofantycznego

Transmitancja układu zamkniętego jest opisana przez

$$G(z) = \frac{\alpha(z) B(z)}{\alpha(z) A(z) + \beta(z) B(z)}$$

gdzie:

$B(z)/A(z)$  transmitancja dyskretna oryginalnego obiektu  
 $n_a, n_b$  stopnie wielomianów mianownika A i licznika B tej transmitancji,  $n_a \geq n_b$

Równanie w postaci

$$\alpha(z) A(z) + \beta(z) B(z) = R(z)$$

jest znane jako równanie diofantyczne. Zostało ono opisane przez *Diophantusa z Aleksandrii* (żył w latach ok.246-330). Przy spełnieniu pewnych (podanych dalej) założeń można obliczyć wielomiany  $\alpha(z)$  i  $\beta(z)$  które spełniają powyższe równanie dla dowolnego wielomianu  $R(z)$  stopnia  $NA+1$  lub niższego. Należy zwrócić uwagę, że lewa strona równania diofantycznego jest wielomianem charakterystycznym równań systemu zamkniętego. Pierwiastki wielomianu  $R(z)$  są biegunami transmitancji tego systemu. Skoro jest wielomianem dowolnym, to możemy arbitralnie określić jego pierwiastki (bieguny transmitancji systemu zamkniętego) i obliczyć wymagane  $\alpha(z)$  i  $\beta(z)$ .

Współczynniki nieznanych wielomianów  $\alpha(z)$  i  $\beta(z)$  mogą być wyliczone przez rozwiązanie równania algebraicznego, jeśli tylko wielomiany  $A(z)$  i  $B(z)$  nie mają wspólnych pierwiastków. Założenie to jest spełnione, jeśli nie zachodzi kompensacja zer i biegunów transmitancji rozważanego obiektu.

### 7.5.8 Sterownik predykcyjny dla ramienia elastycznego

Zadaniem omawianego regulatora jest obliczenie takiej sekwencji wartości sygnału sterującego (w otwartym układzie regulacji), aby przeprowadzić obiekt do zadanego stanu w określonej, niezbyt wysokiej liczbie kroków  $N_2$  (horyzont obserwacji). Aby mieć możliwość obliczenia wyjścia obiektu, należy dysponować jego modelem. Cechą wielu regulatorów predykcyjnych jest **wykorzystanie tylko pierwszego kroku** z całej obliczonej sekwencji sterowań. W oparciu o nowe dane, aktualne już po wykonaniu tego kroku, powtarza się całą procedurę obliczeń i wykonuje kolejny krok. Wielokrotne powtarzanie obliczeń dla tych samych przyszłych chwil czasu, decyduje o wysokiej skuteczności działania tego regulatora, wymaga jednak zastosowania szybkiego procesora.

Opisana poniżej (w uproszczeniu) procedura sterowania okazała się bardzo skutecznym algorytmem sterowania dużej klasy obiektów trudnych do sterowania metodami klasycznymi [Clarke i inni, 1987], w tym:

- obiekty nieminimalno fazowe. Obiekty ciągle minimalno-fazowe stają się często nieminimalno-fazowe po dyskretyzacji,
- obiekty niestabilne w układzie otwartym,
- obiekty z dużym, nieznanym lub zmieniającym się w czasie pracy opóźnieniem,
- obiekty, których rząd nie jest znany lub zmienia się w czasie pracy.

Z uwagi na trudności obliczeniowe, metody predykcyjne były stosowane początkowo w przemyśle chemicznym i papierniczym. Duże stałe czasowe tych obiektów pozwalały na wykonanie potrzebnych obliczeń w czasie rzeczywistym. Zdaniem autora, postęp w zakresie mikroprocesorów i procesorów sygnałowych pozwala na realizację algorytmów predykcyjnych dla znacznie szerszej klasy obiektów, w tym do sterowania robotów.

Przy opisie regulatorów predykcyjnych posługujemy się następującymi określeniami:

- $N_1$  chwila początkowa obliczania funkcji kosztu. Przyjmuje się  $N_1=1$  dla systemów bez opóźnienia. Dla układów z opóźnieniem można przyjąć  $N_1$  mniejsze lub równe czasowi opóźnienia. Dla  $j < N_1$  wyjścia układu  $y(t+j)$  nie zależały od aktualnych wartości na wejściu układu. Nie ma więc wykonywania niepotrzebnych obliczeń.
- $N_2$  Końcowy horyzont predykcji. Wartość tego parametru powinna być na tyle duża aby uwzględnić całą dynamikę odpowiedzi na wymuszenie. Sugeruje się aby ustawić do na czas potrzebny do uzyskania stanu ustalonego przez układ.
- $N_C$  Horyzont sterowania – jego wartość nie powinna mniejsza od liczby niestabilnych lub źle tłumionych biegunów. Zwiększanie  $N_C$  powoduje

poprawienie jakości sterowania. Po osiągnięciu pewnego poziomu, dalsze zwiększanie NC nie powoduje znaczących zmian

$\lambda$  współczynnik (lub funkcja wagi  $\lambda(k)$ ) w kryterium jakości

Aby mieć możliwość predykcji wyjścia układu, należy dysponować jego modelem. Na podstawie modelu oblicza się N-krokowy predyktor (N - horyzont predykcji) który jest następnie wykorzystany do syntezy regulatora.

Idea regulacji predykcyjnej uogólnionej (**GPC**, ang. *generalized predictive control*) została przedstawiona przez [Clarke i inni, 1987]. Algorytm GPC jest uogólnieniem wcześniejszych opracowań. Już w roku 1963 Propoi podał zasadę stosowania ruchomego horyzontu w sterowaniu, a Lee i Markus w 1967 roku opisali zasadę wykorzystania tylko pierwszego kroku regulatora predykcyjnego i celowości powtórzenia obliczeń przed wykonaniem kolejnego kroku. Innymi, znanymi przykładami regulatorów predykcyjnych były między innymi:

**DMC** (ang: Dynamic Matrix Control) była wynaleziona w Shell Oil i zastosowana w przemyśle już w roku 1973 [Cutler C.R., Ramaker B.C. (1979)]. Macierz DMC pozwala obliczyć przyszłe stany obiektu w oparciu o współczynniki dyskretnej odpowiedzi jednostkowej obiektu i wartości wymuszeń

**MPHC** (ang. model predictive heuristic control) podany przez Richalet et al. [1976,1978] Zmienne wejściowe podzielono na dwie grupy: wejścia manipulowane i sygnały zakłócające. Termin „zmiennych manipulowanych” jest często używany przy opisie algorytmów MPC. Dla układów SISO modelem obiektu typu „czarna skrzynka” jest filtr FIR, który określa sygnał wyjściowy jako sumę ważoną skończonej ilości wcześniejszych wymuszeń. Współczynniki filtru są korygowane aby minimalizować błąd pomiędzy odpowiedzią obiektu i modelu, ma więc cechy adaptacyjnego algorytmu MPC. MPHC jest też znany pod nazwą komercyjną IDICOM (ang. identification and command). Był on z powodzeniem stosowany do sterowania procesami krakingu, i syntezy polichloru winilu.

**QDMC** jest kolejnym krokiem łączącym zalety DMC i IDICOM. Charakterystyczną cechą tego algorytmu jest użycie kwadratowego wskaźnika jakości określonego dla skończonej ilości przewidywanych wartości zmiennej [Gattu, Zafiriu, 1992]. Uwzględniono też ograniczenia na sygnały sterujące i wyjściowe

**MPC** (ang. Model Predictive Control) [M. Morari, C.E. Garcia, J.H. Lee, D.M. Prett; *Model Predictive Control*; Prentice Hall, 1994] to znany i szeroko opisywany algorytm sterowania predykcyjnego.

**Regulator adaptacyjny.** Istotną cechą tego regulatora [Soderstrom Torsten, Stoica Peter. (1997)], [Niederliński A., Mościński J., Ogonowski Z. (1995)]. jest wprowadzenie modułu identyfikującego na bieżąco parametry modelu, podobnie jak w opisanym wcześniej regulatorze IDICOM. Struktura regulatora pozostaje niezmienna w czasie jego działania. Na podstawie skończonej ilości wartości sygnałów wejściowych i wyjściowych, estymuje się nieznane parametry modelu wykorzystując w tym celu którąś z metod statystycznych. Ponieważ system jest identyfikowany na bieżąco (on-line) najlepiej sprawdzają się metody rekurencyjne.

**NGPC** (ang.- Neural Generalized Predictive Control) [Soloway Haley . [1997] regulacja **predykcyjnej** z modelem w postaci wielowarstwowej **sieci neuronowej** (.

W literaturze spotyka się znacznie więcej nazw na określenie różnych wariantów sterowania predykcyjnego. Przykładami są **HAC** (regulacja predykcyjna minimalno energetyczna) [B.E. Ydstie (1984)] i **EPSAC** (regulacja predykcyjna minimalnowariacyjna) opisana przez [Keyser de Cauvenberghe (1985)].,

### 7.5.8.1 Uogólnione sterowanie predykcyjne GPC

Dla regulacji GPC przyjmuje się model ARIX:

$$A(q^{-1})y(t) = B(q^{-1})u(t-1) + \frac{C(q^{-1})e(t)}{\nabla}$$

gdzie:

$$A(q^{-1}) = 1 + a_1q^{-1} + \Lambda + a_{na}q^{-na}$$

$$B(q^{-1}) = b_0 + b_1q^{-1} + \Lambda + b_{nb}q^{-nb}$$

$$C(q^{-1}) = 1 + c_1q^{-1} + \Lambda + c_{nc}q^{-nc}$$

$\nabla = 1 - z^{-1}$  jest operatorem różnicy wstecznej,  
 $e(t)$  – szum biały

Dla uproszczenia przyjęto  $C=1$ . Operator  $\nabla$  wprowadza właściwości całkujące do regulatora GPC. Szukana sekwencja sterowania jest wyrażona poprzez przyrosty sygnału sterującego

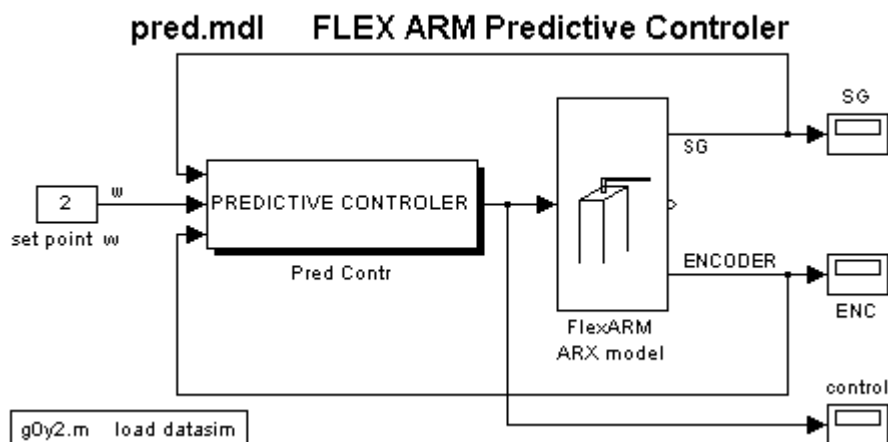
$$u = [\Delta u(t) \Delta u(t+1) \Lambda \Delta u(t+M-)]^T$$

Zakłada się, że obiekt jest stabilny i po  $n$  krokach odpowiedź osiąga wartość ustaloną. Dopuszcza się też obiekt całkujący, w którym po  $n$  krokach stała jest wartość pochodnej odpowiedzi obiektu na wymuszenie jednostkowe.

Dokładność modelu decyduje o dokładności predykcji sygnału wyjściowego modelu. Jeżeli sterowany obiekt jest silnie nieliniowy, konieczne jest zastosowanie modelu o zmiennych parametrach, a nawet o zmiennej strukturze. GPC można stosować również dla systemów z modelem nieparametrycznym.

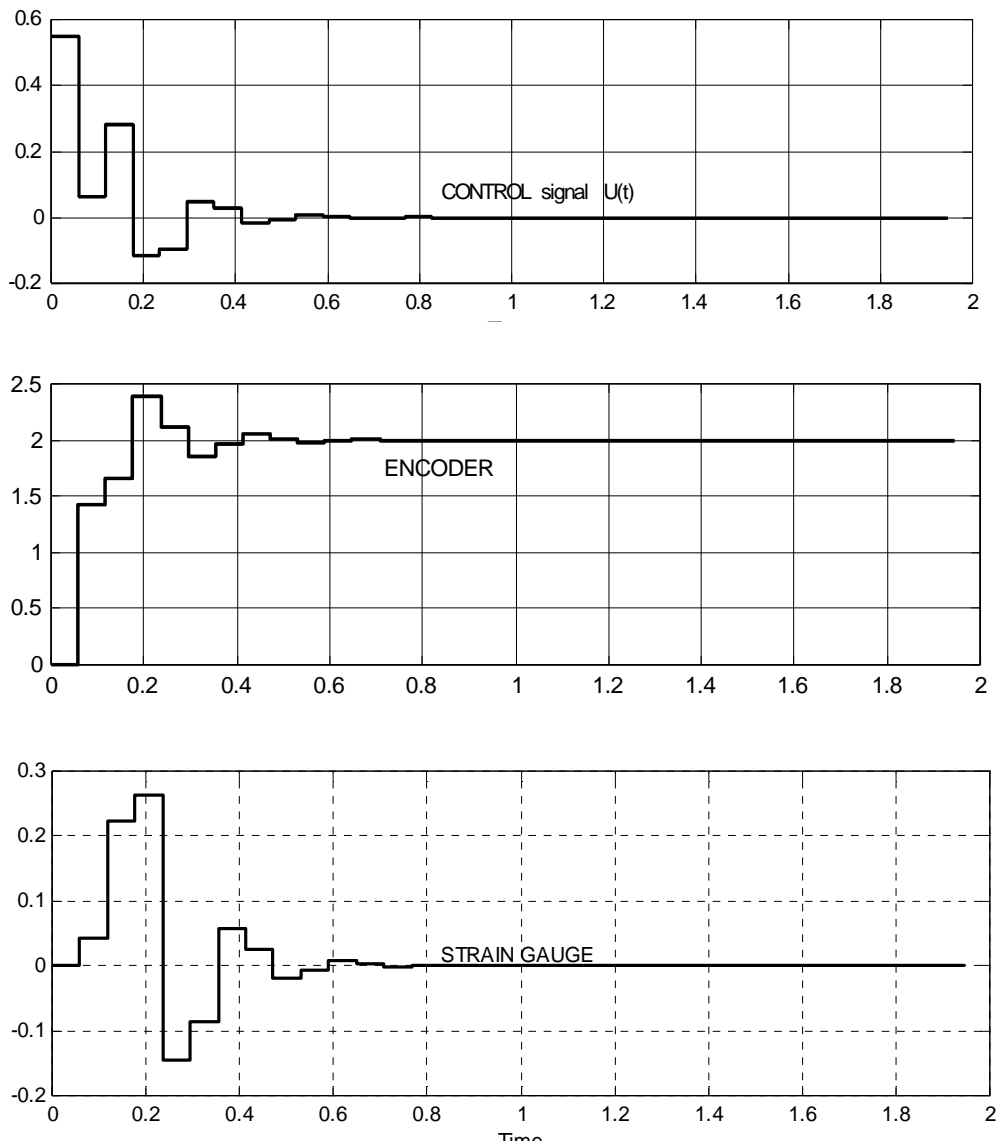
### 7.5.8.2 Przykład sterownika predykcyjnego dla elastycznego ramienia

Sterownik predykcyjny wykorzystuje transmitancje SG23\_59 i ENC11\_10 do obliczenia przewidywanych wartości sygnałów mostka tensometrycznego i enkodera, z wyprzedzeniem  $N2=8$ , uwzględniając aktualne i przyszłe skutki wcześniejszych sygnałów sterujących – jeśli ich efekty określone przez ich horyzont  $N2$  nadal oddziałują na wyjście układu. Na rysunku poniżej pokazano schemat wewnętrzny sterownika predykcyjnego.



Rys. 20 Sterowanie predykcyjne położeniem ramienia elastycznego





Rys. 22 Symulacja pracy sterownika predykcyjnego dla modelu zgodnego z obiektem

Projektant może uzyskać pożądane własności sterownika poprzez dobór horyzontu predykcji  $N1$ ,  $N2$  oraz horyzontu sterowania  $NC$ , współczynnika wagi  $\xi$  w kryterium jakości sterowania oraz przez określenie innych parametrów jak częstotliwość próbkowania i dobór modelu matematycznego obiektu.

#### 7.5.8.4 Testowanie sterownika przy braku zgodności obiektu i jego modelu

Omówiony wcześniej przypadek modelu dokładnego może być zrealizowany tylko w warunkach symulacji. W systemie rzeczywistym zawsze są różnice pomiędzy wbudowanym do sterownika modelem matematycznym służącym do predykcji a obiektem rzeczywistym. Tak więc przypadek braku zgodności ma bezpośrednie odniesienie do warunków przemysłowych. Należy jednak mieć możliwość określenia wielkości i charakteru różnic pomiędzy modelem i obiektem oraz zakłóceń oddziałujących na rzeczywisty obiekt. W podanym niżej przykładzie zmieniono równania opisujące transmitancję określającą zmianę sygnału z tensometrów względem napięcia sterującego. Zmieniono rząd równania i jego współczynniki.

$$\text{gau2459\_59} = \frac{-0.4626 q^{-1} + 0.7334 q^{-2} + 0.3326 q^{-3} + 0.5029 q^{-4}}{1 + 0.3412 q^{-1} + 0.9295 q^{-2}}$$

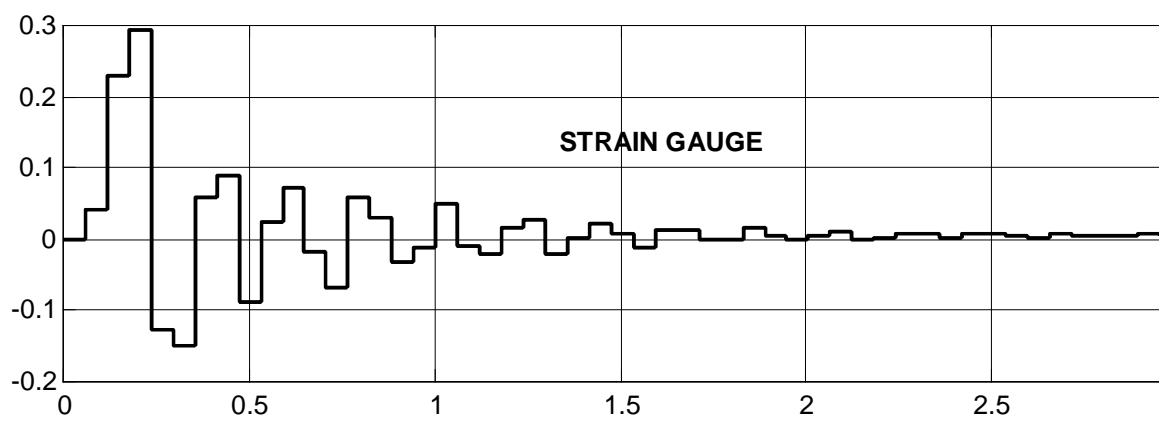
Transmitancję względem enkodera pozostawiono bez zmian

$$\text{ENC23} = \frac{2.597 q^{-1} + 0.1152 q^{-2} - 0.000737 q^{-3}}{1 - 0.998 q^{-1} - 0.0009697 q^{-2}}$$

Tak zmieniony system był niestabilny i wymagał zestrojenia. Poprawną jego pracę uzyskano po zmniejszeniu współczynnika w  $\xi$  w wyrażeniu kryterium jakości sterowania do niższej niż poprzednio wartości  $\xi=0.4$ . Pozwala to na generowanie większych wartości sterowań i zezwala na bardziej energiczne działanie sterownika. Cel sterowania (osiągnięcie zadanej pozycji i wytlumienie drgań ramienia) zrealizowano z powodzeniem, lecz w dłuższym czasie niż dla przypadku zgodności obiektu i jego modelu. W kolejnym eksperymencie zbadano system z modelem

$$\text{enc1110\_59} = \frac{2.286 q^1 + 0.4085 q^{-2}}{1 - 0.9854 q^1}$$

Z uwagi na większe niż poprzednio rozbieżności pomiędzy obiektem i jego modelem, potrzebne było jeszcze bardziej energiczne działanie sterownika. Optymalną wartością było tu  $\xi=0.3$ . Nie było potrzeby zmiany horyzontu obserwacji (NU, N2) ani horyzontu sterowania.. Również w tym przypadku zadanie sterowania zostało zrealizowane.



Rys. 23 Symulacja pracy sterownika predykcyjnego dla modelu niezgodnego z obiektem

Przy niezgodności równań modelu użytego do predykcji i równań opisujących obiekt – zadanie również jest zrealizowane, lecz wymaga dłuższego czasu symulacji. Próba weryfikacji opisanego algorytmu na stanowisku pomiarowym nie dała zadowalających rezultatów. Badania będą kontynuowane z wykorzystaniem bardziej dokładnych modeli matematycznych obiektu.

### 7.5.9 Sterowanie ramieniem elastycznym

Sterowanie elastycznym ramieniem robota jest trudne z uwagi na jego silnie nieliniowe i nieminimalno-fazowe własności. Nawet przewyciężenie trudności związanych identyfikacją takiego obiektu nie gwarantuje powodzenia, gdyż jest on obiektem niestacjonarnym, a specyfika pracy robota wymaga uwzględnienia częstej zmiany konfiguracji (pozycji) jego ramion oraz zmiany jego masy podczas przenoszenia ciężaru użytecznego (ang. payload). Prowadzi do zmiany własności statycznych i dynamicznych robota. Dodatkowym czynnikiem

jest możliwość zaburzenia ruchu robota poprzez jego twardy lub miękki kontakt z otoczeniem.

Trudności przy identyfikacji i syntezy sterowania dla robotów z elastycznym ramieniem są opisywane głównie w pracach dyplomowych – o wiele słabiej są uwzględniane w referatach prezentowanych na konferencjach.

Sytuację badacza i konstruktora pogarsza wysoki rząd obiektu (duża ilość częstotliwości drgań własnych), złe uwarunkowanie równań stanu tego obiektu, znaczne opóźnienia oraz trudność jednoczesnego uwzględnienia wszystkich zjawisk nieliniowych (tarcie suche i wiskotyczne, luz, histereza) oraz wpływu grawitacji – bez nadmiernej komplikacji modelu. Nawet gdy wszystkie parametry robota zostaną starannie zidentyfikowane, badacz musi wziąć pod uwagę dodatkowe czynniki jak:

- tarcie i luz mogą być powodem pobudzenia drgań końca ramienia nawet podczas bardzo wolnych ruchów tego ramienia, szczególnie w momencie jego zatrzymania.
- roboty o wielu stopniach swobody są wrażliwe na wzajemne zmiany konfiguracji ramion
- w sterowaniu można stosować wyłącznie modele uproszczone – jednak nawet taki model winien uwzględniać konieczność filtracji sygnałów (ang. antialiasing) w systemach dyskretnych.
- użycie filtrów wprowadza przesunięcia fazowe sygnałów i pogarsza czas reakcji systemu na wymuszenia – musi być więc uwzględnione w równaniach modelu. Zaniechanie filtracji sygnałów prowadzi do opisywanych w literaturze błędów:
  - - zmiana sygnałów sprzężenia zwrotnego i położenia wskutek przedostania się do sterownika sygnału wyjściowego o częstotliwości wyższej niż częstotliwość Nyquist'a (ang. observation spillover)
  - - brak filtracji sygnału wejściowego może pobudzić obiekt do drgań o częstotliwości leżącej powyżej częstotliwość Nyquist'a. (control spillover), które nie będą tłumione ani wykrywane przez system sterowania. Typowym przypadkiem jest wzbudzenie drgań ramienia robota przy dochodzeniu do zadanej pozycji – w chwili zatrzymania silnika napędowego.

Wnioskiem z powyższego opisu jest zalecenie stosowania szybkich, odpornych sterowników cyfrowych o własnościach adaptacyjnych.

### 7.5.10 Spis literatury: modelowanie i sterowanie ramieniem elastycznym robota

1. Albedoor -A Uchiyama-M Kito-Y Murakami-M,..Configuration-Dependent Vibration Controllability of Flexible-Link Manipulators, International Journal of Robotics Research 1997, Vol 16, 4, pp 567-576
2. Akira Mohri, Pritam Kumar Sarkar and Motoji Yamamoto An Efficient Motion Planning of Flexible Manipulator along Specified Path, ICRA'98, May 16-20, Leuven, Belgium 1998
3. Albedoor-Bo Khulief-Ya General Planar Dynamics of A Sliding Flexible Link Journal of Sound and Vibration 1997, Vol 206, 5, pp 641-661
4. Ankarali-A Diken-H, Vibration Control of An Elastic Manipulator Link, Journal of Sound and Vibration 1997, Vol 204, 1, pp 162-170
5. Aoustin-Y Formalsky-A, On the Synthesis of A Nominal Trajectory for Control Law of A One-Link Flexible Arm, International Journal of Robotics Research 1997, Vol 16, 1, pp 36-46
6. Barabasz T, Nęczyński K. Analiza i synteza algorytmów sterowania predykcyjnego, praca dyplomowa magisterska, Politechnika Krakowska 1999, promotor Z. Mrozek
7. Borowiec-J Tzes-A, Linear-Quadratic Frequency-Shaped Implicit Force Control of Flexible Link Manipulators, Journal of Dynamic Systems Measurement and Control-Transactions of the ASME 1997, Vol 119, 3, pp 405-411
8. Boyer F, Glandais N., Khalil W. Consistent first and second order dynamic model of flexible manipulators, ICRA'98, May 16-20, Leuven, Belgium 1998
9. Bruijn P. Bootsma L. Verbruggen H. Predictive control using impulse response models, Journal A, 25, 1984, pp 69-74
10. Bumjin Song and Antti J. Koivo, Neural Network Model Based Control of a Flexible Link Manipulator, ICRA'98, May 16-20, Leuven, Belgium 1998
11. Chen-Jh Ju-Ms Tsuei-Yg, Adaptive Fuzzy-Logic Control of A Single-Link Flexible Arm, Jsme International Journal Series C-Mechanical Systems Machine Elements and Manufacturing 1997, Vol 40, 4, pp 702-708
12. Choi-Sb Lee-Hb Thompson-Bs, Compliant Control of A 2-Link Flexible Manipulator By Constraint Hamiltonian System, Mechanism and Machine Theory 1998, Vol 33, 3, pp 293-306
13. Clarke DW at al., Generalised predictive control, Part I + II, Automatica vol.23, 1987, pp 137-160
14. Coleman-Mp, Vibration Eigenfrequency Analysis of A Single-Link Flexible Manipulator, Journal of Sound and Vibration 1998, Vol 212, 1, pp 109-120
15. Control System Toolbox User's Guide, 1992 – 1999, The MathWorks, Inc.
16. Cutler C.R., Ramaker B.C. Dynamic matrix control, AIChe, 1979
17. Damaren-Cj, Modal Properties and Control-System Design for 2-Link Flexible Manipulators, International Journal of Robotics Research 1998, Vol 17, 6, pp 667-678
18. De Luca (1), S. Panzieri (2), G. Ulivi (2), Stable Inversion Control for Flexible Link Manipulators, ICRA'98, May 16-20, Leuven, Belgium 1998

19. *Depince Philippe* Parameters Identification of Flexible Robots, ICRA'98, May 16-20, Leuven, Belgium 1998
20. Fan-Zj Lu-Bh Ku-Ch, Dynamic Analysis of Flexible Manipulator Arms With Distributed Viscoelastic Damping, *Journal of Dynamic Systems Measurement and Control-Transactions of the ASME* 1997, Vol 119, 4, pp 831-833
21. Fung-Ehk Shi-Zx, Vibration Frequencies of A Constrained Flexible Arm Carrying An End Mass, *Journal of Sound and Vibration* 1997, Vol 204, 2, pp 259-269
22. Gattu, G. and E. Zafiriou, "Nonlinear Quadratic Dynamic Matrix Control with State Estimation," *Ind. Eng. Chem. Research*, 1992, 31, 1096-1104.
23. Ge-Ss Lee-Th Zhu-G, A Nonlinear Feedback Controller for A Single-Link Flexible Manipulator Based On A Finite-Element Model, *Journal of Robotic Systems* 1997, Vol 14, 3, pp 165-178
24. Ge-Ss Lee-Th Zhu-G, Improving Regulation of A Single-Link Flexible Manipulator With Strain Feedback, *IEEE Transactions On Robotics and Automation* 1998, Vol 14, 1, pp 179-185
25. Ghanekar-M Wang-Dwl Heppler-Gr, Scaling Laws for Linear Controllers of Flexible Link Manipulators Characterized By Nondimensional Groups, *IEEE Transactions On Robotics and Automation* 1997, Vol 13, 1, pp 117-127
26. Grega Wojciech, *Sterowanie cyfrowe w czasie rzeczywistym*, Wydawnictwo WEAlIE AGH Kraków, 1999
27. Guo-Bz Luo-Zh, On the Exponential Stability of An Initial-Boundary Equation Arising From Strain Feedback-Control of Flexible Robot Arms With Rigid Offset, *International Journal of Control* 1998, Vol 69, 2, pp 227-238
28. *Henrichfreise Hermann, Witte Christian*, Experimental Results with Observer-based nonlinear Compensation of Friction in a Positioning System, ICRA'98, May 16-20, Leuven, Belgium 1998
29. Hou-Xz Tsui-Sk, A Control-Theory for Cartesian Flexible Robot Arms, *Journal of Mathematical Analysis and Applications* 1998, Vol 225, 1, pp 265-288
30. *I-Ching Lin and Li-Chen Fu*, Adaptive Hybrid Force/Position Control of a Flexible Manipulator for Automated Deburring with On-line Cutting Trajectory Modification, ICRA'98, May 16-20, Leuven, Belgium 1998
31. *Jin Il Song\*, Yong Hoon Choi, Jae Hong Shim\*, Dong-Soo Kwon, Hyung Suck Cho*, Nonlinear Friction Compensation Methods for an In-Parallel Actuated 6-D.O.F. Manipulator, ICRA'98, May 16-20, Leuven, Belgium 1998
32. *Jing-Xin Shi, A. Albu-Schäffer, Gerd Hirzinger* Key ues in the Dynamic Control of Lightweight Robots for Space and Terrestrial Applications, ICRA'98, May 16-20, Leuven, Belgium 1998
33. Keyser de R.M.C., van Cauvenberghe A.R. Extended predictive self adaptive control. Preprints 7th IFAC Symposium on Identification and System Parameter Estimation, 1255-1260, York, U.K. 1985
34. Konno-A Uchiyama-M Kito-Y Murakami, Configuration-Dependent Vibration Controllability of Flexible-Link Manipulators, *International Journal of Robotics Research* 1997, Vol 16, 4, pp 567-576

35. K.T. Woo, Li-Xin Wang, F.L. Lewis and Z.X. Li A Fuzzy System Compensator for Backlash, ICRA'98, May 16-20, Leuven, Belgium 1998
36. Kovacs-J, A Distributed-Parameter Model for the Dynamics of Flexible-Link Robots, Journal of Robotic Systems 1998, Vol 15, 5, pp 281-298
37. Kovacs-J, Joint Motion Dynamics and Reaction Forces In Flexible-Link Robotic Mechanisms, Mechanism and Machine Theory 1997, Vol 32, 7, pp 869-880
38. Krishnan-H Vidyasagar-M, Control of Single-Link Flexible Beam Using Hankel-Norm-Based Reduced-Order Model, IEE Proceedings-Control Theory and Applications 1998, Vol 145, 2, pp 151-158
39. Li-Dg Zu-Jw Goldenberg-Aa, Dynamic Modeling and Mode Analysis of Flexible-Link, Flexible-Joint Robots, Mechanism and Machine Theory 1998, Vol 33, 7, pp 1031-1044
40. Lisowski W *Identyfikacja modelu dynamicznego elastycznego ramienia robota* AGH Kraków 1995
41. Low-Kh, Comments On Joint Stiffness Control of A One-Link Flexible Arm, Journal of Sound and Vibration 1998, Vol 211, 5, pp 907-909
42. Lucibello-P Panzieri-S Ulivi-G Repositioning Control of A 2-Link Flexible Arm By Learning, Automatica 1997, Vol 33, 4, pp 579-590
43. Lucibello-P Panzieri-S, Application of Cyclic Control To A 2-Link Flexible Arm,, Automatica 1998, Vol 34, 8, pp 1025-1029
44. Lucibello-P Panzieri-S, Cyclic Control of Linear-Systems With Application To A Flexible Arm, IEE Proceedings-Control Theory and Applications 1998, Vol 145, 1, pp 19-24
45. Lucibello-P Panzieri-S, Experiments On Output Tracking With Internal Stability By Learning for A One-Link Flexible Arm, Automatica 1997, Vol 33, 11, pp 2065-2069
46. Matsuno-F Kasai-S, Modeling and Robust Force Control of Constrained One-Link Flexible Arms, Journal of Robotic Systems 1998, Vol 15, 8, pp 447-464
47. Mitsuhiro Yamano, Jin-Soo Kim and Masaru Uchiyama Hybrid Position/Force Control of Two Cooperative Flexible Manipulators Working in 3D Space, ICRA'98, May 16-20, Leuven, Belgium 1998
48. M. Morari, C.E. Garcia, J.H. Lee, D.M. Prett; Model Predictive Control; Prentice Hall, 1994
49. Moulin-Hc Bayo-E, Accuracy of Discrete Models for the Solution of the Inverse Dynamics Problem for Flexible Arms, Feasible Trajectories, Journal of Dynamic Systems Measurement and Control-Transactions of the ASME 1997, Vol 119, 3, pp 396-404
50. Mrozek B, Mrozek Z, *MATLAB 5.x SIMULINK 2.x, Poradnik uzytkownika*, PLJ Warszawa 1998
51. Nagaraj-BP Nataraju-BS Ghosal-A Dynamics of A 2-Link Flexible System Undergoing Locking - Mathematical-Modeling and Comparison With Experiments, Journal of Sound and Vibration 1997, Vol 207, 4, pp 567-589
52. Niederliński A., Mościński J., Ogonowski Z. Regulacja adaptacyjna. *Wydawnictwo Naukowe PWN*. 1995
53. Ogata Katsuhito, Discrete time control systems, Prentice Hall, 1995.
54. Parker-Gg Eisler-Gr Robinett-Rd Feddema-Jt, Optimal Trajectories for Flexible-Link Manipulator Slewing Using Recursive Quadratic-Programming - Experimental-Verification,

- Journal of Dynamic Systems Measurement and Control-Transactions of the ASME 1997, Vol 119, 4, pp 833-836
55. Pjetursson, A. and Ravn, O. (1995). *Mechatronic Simulink Library, Reference Manual*, Institute of Automation, Technical University of Denmark, 2. edition.
  56. Propoi A. I. Use of LP methods for synthesizing sampled-data automatic systems. *Automation and Remote Control*, 24:837, 1963
  57. Pun-J Semercigil-Se, Joint Stiffness Control of A One-Link Flexible Arm, *Journal of Sound and Vibration* 1997, Vol 203, 2, pp 341-351
  58. Richalet J. Gibonet B, Identification des systemes discretes ..., *Electronic Letters*, 4, 1968
  59. Richalet J. Rault A. Testud J. Papon J. Model predictive heuristic control: application to an industrial processes, *Automatica*, 14, 1978, pp 413-428
  60. Rossi-M Wang-D Zuo-K, Design of Passive Controllers for Flexible-Link Robots, *International Journal of Robotics Research* 1997, Vol 16, 4, pp 577-588
  61. Soloway D. I Haley P. Neural generalized predictive control, a Newton-Ralpson Implementation, NASA Technical Memorandum 110244, 1997
  62. Sodestron T. Stoica P. Identyfikacja systemów, PWN 1997 (Prentice Hall Int. 1994)
  63. Sundareshan-Mk Askew-C, Neural Network-Assisted Variable-Structure Control Scheme for Control of A Flexible Manipulator Arm, *Automatica* 1997, Vol 33, 9, pp 1699-1710
  64. System Identification Toolbox User's Guide, 1988 – 1997, The MathWorks, Inc
  65. Szymkat, M. and Uhl, T. (1994). Matlab based environments for mechatronic robot modelling. In *European Robotics and Intelligent System Conference -EURISCON'94*, pages vol II, pp. 817–829, Malaga, Spain.
  66. Szyszkowski-W Fielden-K, Effects of Flexibility and Damping On Momentum-Transfer During Locking of 2 Moving Links, Part-I - Numerical-Simulation, *Journal of Applied Mechanics-Transactions of the ASME* 1998, Vol 65, 2, pp 479-484
  67. Talebi H.A., Patel R.V., and K. Khorasani Inverse Dynamics Control of Flexible-Link Manipulators Using Neural Networks, ICRA'98, May 16-20, Leuven, Belgium 1998
  68. The Control Handbook, IEEE 1997
  69. Theodore-Rj Ghosal-A, Modeling of Flexible-Link Manipulators With Prismatic Joints, *IEEE Transactions On Systems Man and Cybernetics Part B-Cybernetics* 1997, Vol 27, 2, pp 296-305
  70. Thomas-S Bandyopadhyay-B, A New Controller-Design for A Flexible One-Link Manipulator – Comments, *IEEE Transactions On Automatic Control* 1997, Vol 42, 3, pp 425-429
  71. Thomas-S Bandyopadhyay-B, Position Control of Single Link Flexible Manipulator By Variable-Structure Model-Following Control, *Journal of Dynamic Systems Measurement and Control-Transactions of the ASME* 1997, Vol 119, 2, pp 330-335
  72. Uhl, Bojko, Mrozek, Szwabowski, Sterowanie elastycznym ramieniem robota – szybkie prototypowanie i implementacja I Krajowych Warsztatów Metod Szybkiego Prototypowania, Kraków, 26-27 listopad 1998
  73. Uhl, Bojko, Mrozek, *Identification of flexible arm*, Proceedings of ESM'99, European Simulation Multiconference., vol 2, Warsaw, June 1-4,

74. Uhl, T. Salamon T., Korendo Z, Neural Network Based Controller For Active Vibration Control, 21 ISMA, Leuven 1996
75. Wang-Fy Russell-Jl Liu-Z, Minimum-Weight Design of Flexible Arms for Specified Fundamental-Frequency, Journal of Robotic Systems 1997, Vol 14, 1, pp 49-57
76. Wang-Yx, Multifrequency Resonances of Flexible Linkages, Mechanism and Machine Theory 1998, Vol 33, 3, pp 255-271
77. Yang-Jh Lian-FI Fu-Lc, Nonlinear Adaptive-Control for Flexible-Link Manipulators, IEEE Transactions On Robotics and Automation 1997, Vol 13, 1, pp 140-148
78. Yazdanpanah-Mj Khorasani-K Patel-Rv, Uncertainty Compensation for A Flexible Link Manipulator Using Nonlinear H-Infinity Control, International Journal of Control 1998, Vol 69, 6, pp 753-771
79. Ydstie B.E. Extended horizon adaptive control. Proceedings 9<sup>th</sup> IFAC World Congress, Budapest, 1984
80. Yim-W Singh-Sn, Nonlinear Inverse and Predictive End-Point Trajectory Control of Flexible Macro-Micro Manipulators Journal of Dynamic Systems Measurement and Control-Transactions of the ASME 1997, Vol 119, 3, pp 412-420
81. Yue-Sg Yu-Yg Bai-Sx, Flexible Rotor Beam Element for the Manipulators With Joint and Link Flexibility, Mechanism and Machine Theory 1997, Vol 32, 2, pp 209-219
82. Yue-Sg, Redundant Robot Manipulators With Joint and Link Flexibility .1. Dynamic Motion Planning for Minimum End-Effector Deformation, Mechanism and Machine Theory 1998, Vol 33, 1-2, pp 103-113
83. Yue-Sg, Redundant Robot Manipulators With Joint and Link Flexibility .2. Residual Vibration Decreasing, Mechanism and Machine Theory 1998, Vol 33, 1-2, pp 115-122.