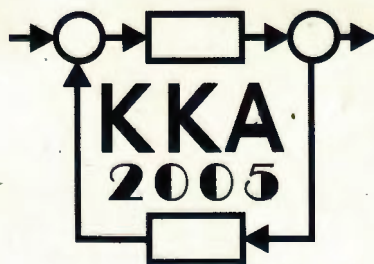


XV Krajowa Konferencja Automatyki

Tom I



**Redaktorzy:
Zdzisław Bubnicki
Roman Kulikowski
Janusz Kacprzyk**

XV Krajowa Konferencja Automatyki Tom I



Redaktorzy:
Zdzisław BUBNICKI
Roman KULIKOWSKI
Janusz KACPRZYK

ORGANIZATOR

Komitet Automatyki i Robotyki Polskiej Akademii Nauk
Instytut Badań Systemowych Polskiej Akademii Nauk

WSPÓŁORGANIZATORZY

Politechnika Warszawska

Przemysłowy Instytut Automatyki i Pomiarów

Polskie Stowarzyszenie Pomiarów, Automatyki i Robotyki

ORGANIZATOR

Komitet Automatyki i Robotyki Polskiej Akademii Nauk
Instytut Badań Systemowych Polskiej Akademii Nauk

WSPÓLORGANIZATORZY

Politechnika Warszawska
Przemysłowy Instytut Automatyki i Pomiarów
Polskie Stowarzyszenie Pomiarów, Automatyki i Robotyki

KOMITET PROGRAMOWY

Przewodniczący
Zastępca Przewodniczącego

Zdzisław BUBNICKI
Roman KULIKOWSKI

CZŁONKOWIE

Stanisław BAŃKA
Mikołaj BUSŁOWICZ
Ryszard GESSING
Jakub GUTENBAUM
Stanisław KACZANOWSKI
Janusz KACPRZYK
Józef KORBICZ
Krzysztof KOZŁOWSKI
Krzysztof KUŹMIŃSKI
Krzysztof MALINOWSKI
Antoni NIEDERLIŃSKI
Tadeusz PUCHAŁKA
Stanisław SKOCZOWSKI
Jerzy ŚWIĄTEK
Ryszard TADEUSIEWICZ
Krzysztof TCHOŃ
Jan WĘGLARZ

Michał BIAŁKO
Władysław FINDEISEN
Henryk GÓRECKI
Jerzy JÓZEFczyk
Tadeusz KACZOREK
Jerzy KLAMKA
Zbigniew KOWALSKI
Juliusz L. KULIKOWSKI
Kazimierz MALANOWSKI
Wojciech MITKOWSKI
Władysław PEŁCZEWSKI
Leszek RUTKOWSKI
Roman SŁOWIŃSKI
Andrzej ŚWIERNIAK
Piotr TATJIEWSKI
Leszek TRYBUS
Andrzej P. WIERZBICKI

KOMITET ORGANIZACYJNY

Przewodniczący
Zastępcy Przewodniczącego

Roman KULIKOWSKI
Janusz KACPRZYK
Stanisław KACZANOWSKI
Tadeusz KACZOREK
Krzysztof MALINOWSKI
Roman OSTROWSKI
Tadeusz PUCHAŁKA
Dariusz WAGNER
Jan STUDZIŃSKI
Jan W. OWSIŃSKI

Członkowie

Sekretarze naukowci

ISBN 83-89475-00-6

Copyright © Instytut Badań Systemowych Polskiej Akademii Nauk
All rights reserved

Druk: ARGRAF, Warszawa

TEORIA STEROWANIA
– TEORIA SYSTEMÓW

KONCEPCJA SKALOWANIA CZASOWEGO ODPOWIEDZI UKŁADÓW WIELOWYMIAROWYCH

Bogdan GRZYWACZ

Politechnika Szczecińska, Wydział Elektryczny
ul. Sikorskiego 37, 70-313 Szczecin, e-mail:bogdan.grzywacz@ps.pl

Streszczenie: W pracy zaproponowano koncepcję skalowania czasowego sygnałów wyjściowych obiektów typu MIMO, tak liniowych, jak i nieliniowych. Przedstawiono sposób syntezy sygnałów sterujących realizujących dokładnie skalowanie czasowe sygnałów na wyjściach obiektu. Zaproponowano praktyczną implementację proponowanych algorytmów skalowania w ramach typowej struktury Model Following Control dla układów MIMO. Wskazano na zalety algorytmów sterowania opartych o skalowanie czasowe, tak w dziedzinie czasu, jak i w dziedzinie częstotliwości. Rozważania zilustrowano dwoma przykładami.

Słowa kluczowe: Sterowanie obiektami wielowymiarowymi (MIMO), skalowanie czasowe odpowiedzi układów dynamicznych, sterowanie z wykorzystaniem zmiennych stanu.

1. WSTĘP

W pracy przedstawiono jedną z możliwych koncepcję rozwiązania następującego problemu:

Niech sygnały $y_1(t), \dots, y_q(t)$ (tworzące wektor wyjść $y(t)$) będą odpowiedziami układu (obiektu) wielowymiarowego (MIMO) na wymuszenia $u_1(t), \dots, u_p(t)$ (tworzące wektor wejść $u(t)$). Niech kształt wszystkich odpowiedzi $y_i(t), i=1, \dots, q$, spełnia nałożone wymagania techniczne (stabilność, jakość regulacji, itd.) z wyjątkiem jednego, a mianowicie tego, że odpowiedzi układu są „zbyt wolne” lub „zbyt szybkie”. Należy wyznaczyć takie sygnały sterujące $u_{A1}(t), \dots, u_{Ap}(t)$ (tworzące wektor $u_A(t)$), które sprawią, że odpowiedzi układu przyjmą postać $y_1(A^{-1}t), \dots, y_q(A^{-1}t)$, gdzie „współczynnik skali czasu” $A > 0$.

Jeśli wprowadzić sterowania $u_A(t)$ przyjmując $A > 1$, wtedy odpowiedzi układu zostaną „przyśpieszone” w porównaniu z odpowiedziami „naturalnymi”, otrzymanymi dla $A = 1$. Wprowadzenie $0 < A < 1$ powoduje spowolnienie odpowiedzi układu. W obu przypadkach, gdy skalowanie układu zostanie wykonane dokładnie, „kształty” odpowiedzi (a zatem takie parametry związane z kształtem, jak na przykład przeregulowania, błędy statyczne, stopnie tłumienia oscylacji, itd.) zostaną zachowane. Co więcej, dokładne skalowanie czasowe układu stabilnego nie spowoduje utraty stabilności przez ten układ (sterowanie $u_A(t)$ sprawia, że kolejność nastę-

pujących po sobie amplitud tworzących sygnały wyjściowe zostaje zachowana, zaś od wartości A zależą tylko momenty pojawienia się poszczególnych amplitud na wyjściach układu). Jest to wyjątkowo korzystna cecha algorytmów sterowania bazujących na idei skalowania czasowego. Jeśli „przyśpieszanie”, czy „spowalnianie” odpowiedzi obiektu odbywa się w sposób „klasyczny”, to jest poprzez zmianę parametrów lub algorytmu działania i parametrów regulatorów w pętach sprzężenia zwrotnego, wówczas narażamy się na niebezpieczeństwo utraty stabilności przez układ (sformułowanie warunków stabilności dla układów nieliniowych typu SISO, a tym bardziej typu MIMO, nie jest wcale zadaniem łatwym), nie mówiąc już o ilości prób, które trzeba wykonać, by chociaż w sposób przybliżony zachować pożądane kształty odpowiedzi obiektu. Niewątpliwą zaletą algorytmów sterowania opartych o koncepcję skalowania czasowego jest też możliwość natychmiastowej, nie wymagającej dodatkowych analiz, interpretacji własności układu w dziedzinie częstotliwości, co wynika ze znanej własności: jeśli $y(t)$ ma reprezentację widmową $y(j\omega)$, wówczas reprezentacją widmową $y(A^{-1}t)$ jest $A y(jA\omega)$.

W pracach [2, 4] przedstawiano algorytmy sterowania bazujące na idei skalowania czasowego dla obiektów SISO o wejściu u i wyjściu y ; w przypadkach, gdy obiekty te mogą być reprezentowane modelami liniowymi typu transmitancja (lub równania stanu), a także dla obiektów nieliniowych, tych reprezentowanych równaniami stanu w postaci:

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= x_2 \\ &\dots\dots\dots \\ (1) \quad \dot{x}_{n-1} &= x_n \\ \dot{x}_n &= f(x_1, x_2, \dots, x_n) + u \\ y &= F(x_1, x_2, \dots, x_n) \end{aligned}$$

gdzie $f(\cdot)$ i $F(\cdot)$ reprezentują statyczne operacje nieliniowe, a $x_1(t), \dots, x_n(t)$ są współrzędnymi wektora stanu $x(t)$. W pracy [3] pokazano, jak można skalować czasowo odpowiedzi obiektów reprezentowanych przy pomocy modeli nieliniowych Wienera lub Hammersteina, a także w przypadkach, gdy model obiektu stanowi

kaskadowe połączenie elementarnych modeli Wienera i/lub Hammerstaina. W pracach [5, 6] pokazano sposoby formowania pobudeń elektrycznych umożliwiających skalowanie czasowe wybranych przebiegów prądów i napięć w obwodach elektrycznych. W niniejszej pracy przedstawiono koncepcję skalowania czasowego odpowiedzi układów (obiektów) wielowymiarowych (liniowych i nieliniowych). Pokazano, że metody skalowania układów SISO mogą być stosunkowo łatwo przystosowane do skalowania odpowiedzi układów MIMO, jeśli te układy dają się autonomizować, a także w przypadku, gdy autonomizacja układu nie jest wymagana (lub niewskazana), zaś układ może być reprezentowany modelem typu „V”.

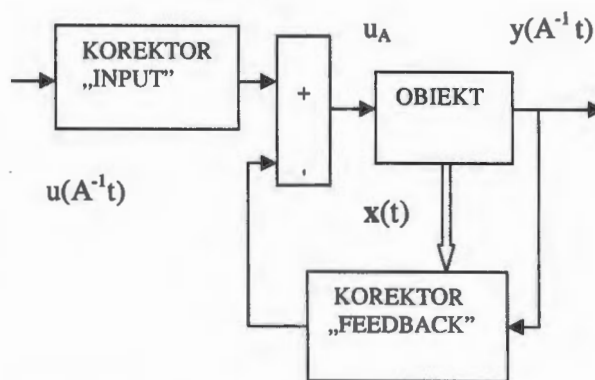
2. SKALOWANIE CZASOWE ODPOWIEDZI UKŁADU MIMO

2.1. Idea metody

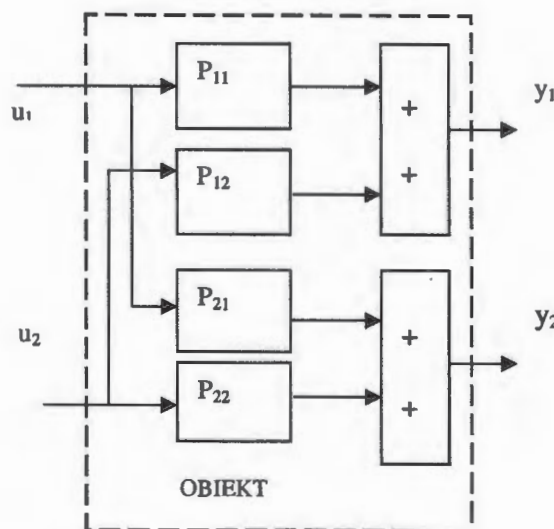
We wszystkich wymienionych we wstępie przypadkach skalowania czasowego obiektów SISO sygnał sterujący $u_A(t)$ był formowany (oczywiście z zachowaniem określonych reguł) w sposób wynikający ze schematu przedstawionego na rys. 1, gdzie $u(A^{-1}t)$ otrzymuje się poprzez przeskalowanie „naturalnego” sygnału wejściowego $u(t)$ sterującego obiektem przy $A=1$, a $x(t)$ – jest wektorem stanu o współrzędnych $x_1(t), \dots, x_n(t)$.

Najpopularniejszą strukturą modeli układów MIMO jest tzw. struktura „P” [1]. Dla $p=q=2$ przedstawiono ją na rys.2, gdzie P_{ij} są operacjami realizowanymi na sygnale u_1 lub odpowiednio u_2 . W celu skalowania czasowego wyjść układu na rys. 2 należałoby zastąpić wszystkie składowe elementy P_{ij} typu SISO przez odpowiadające im struktury przedstawione na rys.1, gdzie rolę obiektu pełniłby element realizujący operację P_{ij} . Można zauważyć, że tak przeskalowana struktura „P” nie może być „łatwo” (drogą elementarnych przekształceń) sprowadzona do struktury równoważnej, w której będzie można wydzielić nie skalowany obiekt (dokładnie taki, jak na rys.2). Opisana droga nie prowadzi do wyznaczenia sygnałów sterujących $u_{A1}(t)$ i $u_{A2}(t)$, które idealnie skalowałyby wyjścia y_1 i y_2 .

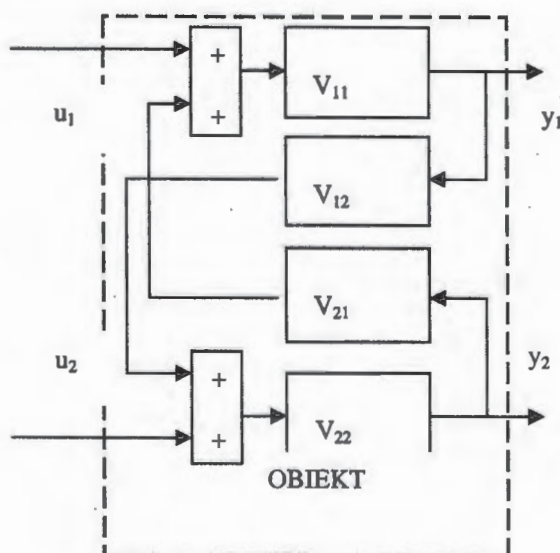
Sytuacja staje się o wiele korzystniejsza, gdy dysponujemy modelem obiektu w wersji „V”. Dla $p=q=2$ pokazano go na rys. 3, gdzie V_{ij} są operacjami realizowanymi na sygnałach – odpowiednio – wejściowych lub wyjściowych. Jeśli teraz, w celu skalowania czasowego obiektu zastąpić elementy typu SISO V_{ij} (rys. 3) przez odpowiadające im struktury jak na rys. 1 (gdzie V_{ij} pełni rolę „obektu”, zaś przez V_{ij} i V_{Fij} oznaczono odpowiednio operacje realizowane przez korektory „input” i „feedback”), wówczas drogą ekwiwalentnych przekształceń matematycznych otrzymuje się schemat pokazany na rys. 4. Na rys. 4 wyraźnie widać, że sygnał sterujący $u_{A1}(t)$, który skaluje czasowo wyjście y_1 może być generowany poprzez objęcie „obektu” zewnętrznymi pętlami korekcyjnymi, bez naruszania wewnętrznej struktury obiektu.



Rys. 1. Skalowanie czasowe obiektów SISO.

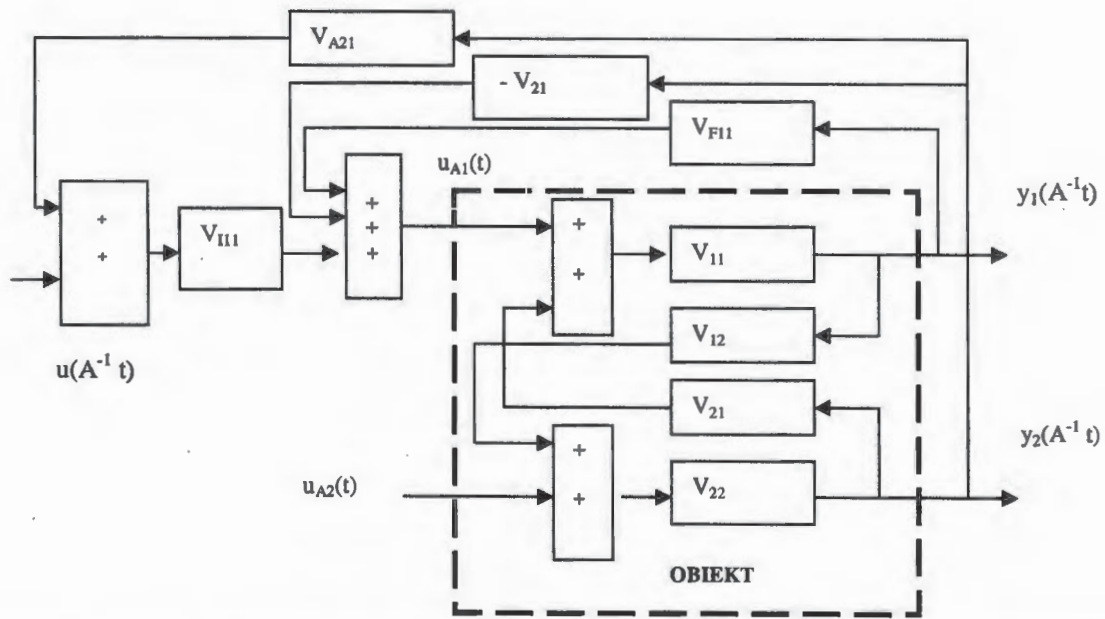


Rys. 2. Struktura układu MIMO typu „P”.



Rys.3. Struktura układu MIMO typu „V”.

Jeśli zatem „naturalne” sygnały sterujące $u_1(t)$, $u_2(t)$ na wejściach obiektu pokazanego na rys. 3 zastąpimy sygnałami $u_{A1}(t)$, $u_{A2}(t)$ uformowanymi zgodnie z poniższymi zależnościami (rys. 4)



Rys.4. Synteza sygnału $u_{A1}(t)$ skalującego wyjście y_1 . Ze względu na przejrzystość schematu na rysunku pominięto schemat syntezy sygnału $u_{A2}(t)$ skalującego wyjście y_2 . Skalowanie czasowe wyjść osiągnięto bez naruszania struktury wewnętrznej obiektu.

$$u_{A1}(t) = V_{111}(u_1(A^{-1}t) + V_{A21}(y_2)) + V_{F11}(x_{11}, y_1) - V_{21}(y_2)$$

$$u_{A2}(t) = V_{222}(u_2(A^{-1}t) + V_{A12}(y_1)) + V_{F22}(x_{22}, y_2) - V_{12}(y_1) \quad (2)$$

to na wyjściach obiektu pojawią się przeskalowane czasowo odpowiedzi „naturalne”, tzn. $y_1(A^{-1}t)$ i

$y_2(A^{-1}t)$. W wyrażeniach tych użyto następujących oznaczeń: V_{111} , V_{222} – operacje realizowane przez korektory „input” (patrz rys. 1) przyporządkowane elementom torów głównych obiektu V_{11} , V_{22} ; V_{F11} , V_{F22} – operacje realizowane przez korektory „feedback” (patrz rys.1) przyporządkowane odpowiednio elementom torów głównych obiektu V_{11} i V_{22} ; V_{21} , V_{12} – operacje realizowane przez sprzężenia „skrośne” modelu na rys. 3; V_{A21} V_{A12} – przeskalowane czasowo operacje V_{21} , V_{12} (jeśli, przykładowo, $z_1(t) = V_{21}(y_2(t))$, to $z_1(A^{-1}t) = V_{A21}(y_2(A^{-1}t))$); $x_{11}(t)$, $x_{22}(t)$ – wektory stanu dla elementów w torach głównych V_{11} , V_{22} .

Zaproponowana idea i wynikający z niej algorytm syntezy sterowań realizujących skalowanie czasowe wyjść obiektu o dwóch wejściach i dwóch wyjściach mogą być w sposób oczywisty uogólnione na obiekty MIMO o większej ilości wejść i wyjść:

$$u_{A i}(t) = V_{1 i i}(u_i(A^{-1}t) + \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^p V_{A j i}(y_j)) + V_{F i i}(x_{i i}, y_i) - \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^p V_{j i i}(y_j); \quad i, j = 1, \dots, p; \quad (3)$$

2.2. Przykład

Rozważmy przykładowo przypadek liniowy, gdy „obiekt” można modelować przy pomocy struktury „V”

pokazanej na rys. 3, a jej elementy reprezentowane są przez transmitancje:

$$\begin{aligned} V_{11}(s) &= \frac{s+4}{s^3+5s^2+7s+3} \\ V_{22}(s) &= \frac{s+4}{(s+2)^2}, \\ V_{21}(s) &= -\frac{1}{s+3}, \\ V_{12}(s) &= -\frac{s+1}{s+2} \end{aligned} \quad (4)$$

Dla tak przyjętego $V_{11}(s)$, zgodnie z regułami przedstawionymi w [2, 4], mamy:

$$V_{111}(s) = \frac{A^2 s + 4 A^3}{s+4}$$

$$V_{F11}(x_{11}, y_1) = -3(A^3-1)x_{111} - 7(A^2-1)x_{112} - 5(A-1)x_{113}$$

$$V_{A21}(s) = -\frac{A}{s+3A}$$

Odpowiednio dla $V_{22}(s)$ mamy:

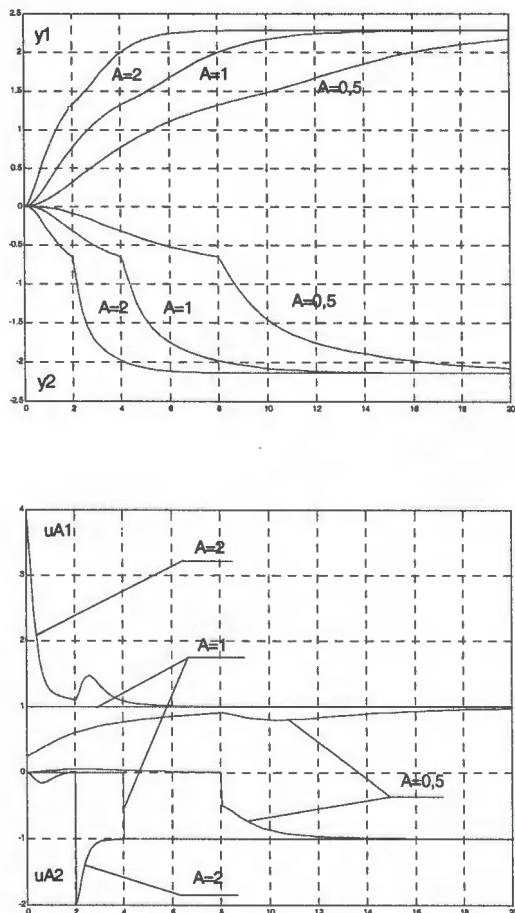
$$V_{122}(s) = \frac{As+4A^2}{s+4}$$

$$V_{F22}(x_{22}, y_2) = -4(A^2-1)x_{221} - 4(A-1)x_{222}$$

$$V_{A21}(s) = -\frac{s+A}{s+2A}$$

Współrzędne wektorów stanu x_{11} i x_{22} dla transmitancji $V_{11}(s)$ i odpowiednio $V_{22}(s)$ dobrano stosując wariant 1 metody bezpośredniej [2,4,7]. Wyniki symulacji dla

powyższych danych, w przypadku, gdy $u_1(t) = 1(t)$, $u_2(t) = -1(t-4)$ i odpowiednio $u_1(A^{-1}t) = 1(t)$, $u_2(A^{-1}t) = -1(t-4A^{-1})$ pokazano na rys. 5.



Rys.5. U góry: Sygnały wyjściowe y_1 i y_2 układu (4) skalowanego zgodnie z (2) i rys.4. Poniżej: sygnały sterujące u_{A1} i u_{A2} podane bezpośrednio na wejścia obiektu. Odpowiedzi y_1 i y_2 dla $A=0.5$ i 2 dokładnie zachowują kształt odpowiedzi „naturalnych” otrzymanych dla $A=1$. Dla $A=1$ jest $u_1(t) = u_{A1}(t)$, $u_2(t) = u_{A2}(t)$.

3. PRAKTYCZNE ASPEKTY WYKORZYSTANIA SKALOWANIA CZASOWEGO W UKŁADACH REGULACJI TYPU „MIMO”

Przedstawiona idea może być zastosowana w praktyce, gdy zmienne stanu reprezentujące model obiektu typu „V” są dostępne na obiekcie rzeczywistym (co jest mało prawdopodobne) lub mogą być estymowane w trybie on-line (obserwatory, wykorzystanie modelu obiektu). Dlatego właśnie do praktycznej implementacji idei skalowania czasowego nadaje się znana z szeregu korzystnych własności struktura MFC (Model Following Control) – rys.6. Sygnał $u_A(u_{A1}, u_{A2})$ wygenerowany w pętli sterowania modelem jest podawany na wejście obiektu rzeczywistego, które „dosterowywane” jest dodatkowo poprzez Regulator 2 (w razie istnienia różnic pomiędzy dynamiką obiektu rzeczywistego i jej

modelem). Należy pamiętać, że generując odpowiedzi obiektu rzeczywistego $y(y_1, y_2)$ dla różnych A należy także zmieniać (skalować czasowo) wszystkie stałe czasowe użytych regulatorów według wzoru: $T_A = A^{-1}T$, gdzie T – „naturalna” stała czasowa. Warto też nadmienić, że obiekt rzeczywisty może posiadać dowolną strukturę wewnętrzną (nie musi to być wcale struktura typu „V”). W przypadku, gdy możliwa jest autonomizacja obiektu MIMO, wtedy skalowanie czasowe wyjść tak otrzymanego układu autonomizacyjnego w sensie dynamicznym może odbywać się także w oparciu o schemat na rys.6. Wówczas sygnały u_{A1} , u_{A2} możemy generować w dwóch nie sprzężonych ze sobą pętlach, każda typu SISO, w których regulatory będą sterowały modelami o strukturze pokazanej na rys. 1 utworzonymi dla operacji realizowanych w torach głównych układu zastępczego dla „zespołu” układ rozprzegający-obiekt. W pętli sterowania obiektem (rys.6) zamiast obiektu należy umieścić „zespół” układ rozprzegający – obiekt. Warto dodać, że korektory (układy rozprzegające) autonomizujące obiekt mogą być w tym przypadku obliczone dla dowolnej struktury modelu obiektu (nie musi to być struktura „V”). Należy jednak pamiętać [1,8], że autonomizacja obiektu MIMO nie zawsze jest realizowalna, a nawet gdy jest realizowalna, to nie zawsze jest celowa (poprzez autonomizację układu regulacji można pogorszyć na przykład tłumienie zakłóceń [8]).

3.1. Przykład

Obiekt nieautonomiczny posiada strukturę „P” (rys. 2), gdzie :

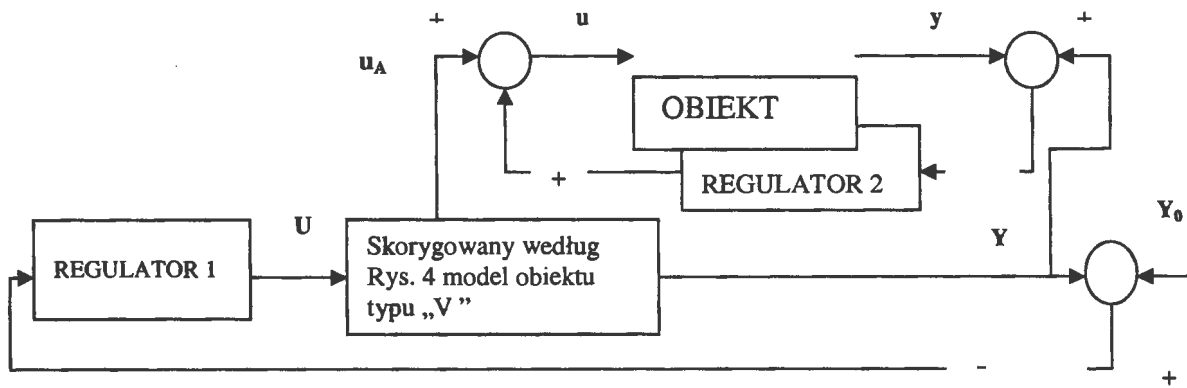
$$P_{11}(s) = \frac{s^5 + 13s^4 + 66s^3 + 166s^2 + 200s + 96}{s^7 + 14s^6 + 82s^5 + 260s^4 + 471s^3 + 500s^2 + 276s + 56}$$

$$P_{22}(s) = \frac{s^5 + 13s^4 + 65s^3 + 155s^2 + 174s + 72}{s^6 + 13s^5 + 69s^4 + 191s^3 + 280s^2 + 220s + 56} \quad (5)$$

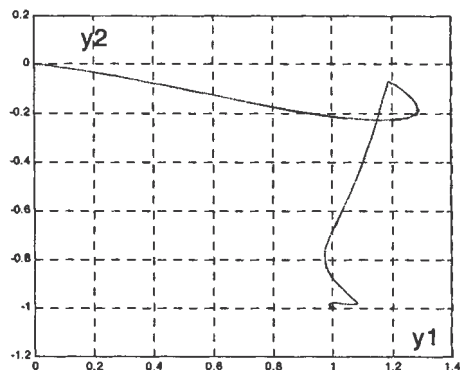
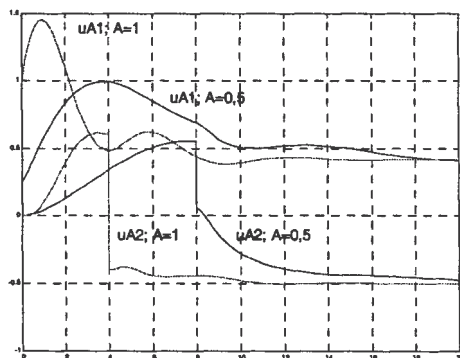
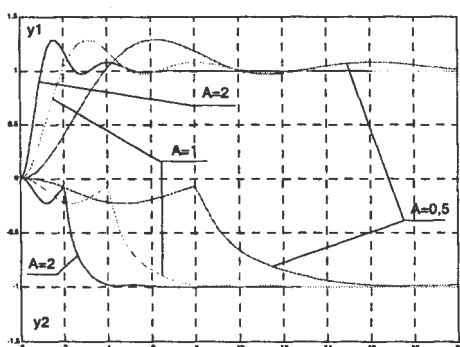
$$P_{12}(s) = -\frac{s^3 + 10s^2 + 32s + 32}{s^7 + 14s^6 + 82s^5 + 260s^4 + 471s^3 + 500s^2 + 276s + 56}$$

$$P_{21}(s) = -\frac{s^3 + 11s^2 + 40s + 48}{s^6 + 13s^5 + 69s^4 + 191s^3 + 280s^2 + 220s + 56}$$

Skalowanie odpowiedzi obiektu odbywa się w strukturze MFC (rys.6), przy czym w obu pętlach



Rys. 6. Implementacja idei skalowania czasowego obiektem rzeczywistym w ramach struktury MFC.



Rys.7. U góry: precyzyjnie skalowane (dla $A = 0.5, 1, 2$) odpowiedzi obiektu (sygnały regulowane) y_1 i y_2 dla sygnałów sterujących u_{A1}, u_{A2} pokazanych pośrodku. U dołu: identyczne dla wszystkich A trajektorie $y_2(y_1)$.

regulacyjnych, to jest do sterowania obiektem i modelem obiektu, zastosowano regulatory diagonalne PI o identycznych transmitancjach $(I + A s^{-1})$. Można pokazać, że model „V” dla obiektu (5) dany jest równaniami (4) – **Przykład 1**. Zatem sterowania $u_A(u_{A1}, u_{A2})$ mogą być generowane przy pomocy korygowanego według algorytmu (2) modelu (4). Sygnały w tak zdefiniowanej strukturze MFC, dla $Y_{01}(t) = 1(t)$ i $Y_{02}(t) = -1(t - 4A^{-1})$, pokazano na rys. 7.

4. WNIOSKI

1. Przedstawiono algorytmy skalowania czasowego odpowiedzi obiektów MIMO w oparciu o ich modele o strukturze „V”, jeśli elementy składowe SISO tych modeli – tak liniowe, jak i nieliniowe - dają się modelować przy pomocy struktury pokazanej na rys. 1. W przypadku skalowania odpowiedzi układów autonomicznych w sensie dynamicznym (zespoły układ rozprzegający-obiekt) sygnały sterujące do skalowania odpowiedzi można generować jak dla układów SISO, a procedury syntezy korektorów rozprzegających mogą bazować na dowolnych strukturach modeli obiektu. W obu wymienionych wyżej przypadkach efekt skalowania czasowego wyjść obiektu osiąga się bez ingerencji w wewnętrzną strukturę obiektu (rys. 4), a jedynie poprzez realizację sprzężeń zewnętrznych od zmiennych stanu i wyjść obiektu (lub jego modelu w przypadku zastosowania struktury MFC).
2. Rozważania prowadzono w zasadzie dla obiektów o dwóch wejściach i dwóch wyjściach. Wynikające z nich algorytmy skalowania można uogólnić na przypadki większej ilości wejść i wyjść - zależność (3).
3. Przyspieszenie odpowiedzi obiektu wymaga zwiększenia maksymalnych amplitud sygnałów sterujących, prędkości i przyspieszeń członów wykonawczych, itd., co wywoła wzrost amplitud sygnałów „wewnątrz” obiektu. Zatem względy techniczne będą decydować o dopuszczalnym zakresie zmian współczynnika A . Stosując inne metody przyspie-

szania odpowiedzi obiektu napotkamy na podobne ograniczenia techniczne.

4. Skalowanie czasowe nie destabilizuje układu, zachowuje kształt odpowiedzi, ma prostą interpretację w dziedzinie częstotliwości (problem tłumienia zakłóceń!). Jeśli odpowiedziami obiektu MIMO są przemieszczenia, to przyspieszanie czy spowalnianie ruchu (np. ramienia robota) przez skalowanie czasowe przemieszczeń wzdłuż osi x, y, z , nie zmienia trajektorii przestrzennej reprezentującej ruch (rys. 7).

THE TIME - SCALING OF RESPONSES OF LINEAR AND NONLINEAR MIMO SYSTEMS

Abstract: The idea of time-scaling of output signals of linear and nonlinear MIMO plants has been presented. The proposed method of perfect scaling can be applied, if so-called V-model of MIMO plant can be determined and SISO components of this model can be scaled separately by equipping them with input and feedback correctors, "supplied" with associated state variables. It has been shown, that control algorithms basing on idea of time-scaling can be implemented by using of typical Model Following Control (MFC) structure for MIMO plants. The considerations are illustrated with examples.

Literatura

- [1] Chen Hui L. (1983) *General Decoupling Theory of Multivariable Process Control Systems*. Berlin, New York, Springer -Verlag.

- [2] Durnaś M., Grzywacz B. (2001) Application of idea of time-scaling to synthesis of linear and nonlinear control systems. *Proc. 7th IEEE Int. Conf. Methods and Models in Automation and Robotics, Międzyzdroje, Poland*, 284-290.
- [3] Durnaś M., Grzywacz B. (2002) Application of idea of time-scaling to control of nonlinear plants represented by cascade consisting of Wiener and Hammerstein models. *Proc. 8th IEEE Int. Conf. Methods and Models in Automation and Robotics, Szczecin, Poland*, 1263-1268.
- [4] Durnaś M., Grzywacz B. (2002) Zastosowanie skalowania czasu do syntezy sterowań obiektami liniowymi i nieliniowymi. *XIV Krajowa Konferencja Automatyki, Zielona Góra*, 175-180.
- [5] Grzywacz B. (2003) The forming of electrical excitations by application of rules of time scaling. *Proc. of 16th ECS, IEEE European Conf. On Circuit Theory and Design, Cracow, Poland*, 1, 294-299.
- [6] Grzywacz B. (2004) The Forming of Electrical Excitations by Using of Rules of Time Scaling. *The 12th IEEE Mediterranean Electrotechnical Conference MELECON, Dubrovnik, Croatia*, 359- 363.
- [7] Kaczorek T. (1996) *Teoria sterowania i systemów*. PWN, Warszawa.
- [8] Niederliński A. (1974) *Układy wielowymiarowe automatyki*. WNT, Warszawa.



**Instytut Badań Systemowych
Polskiej Akademii Nauk**

ISBN 83-89475-02-2