

6. Inteligentne regulatory rozmyte dla serwomechanizmów

Pojęcie regulatorów inteligentnych, w kontekście niniejszego rozdziału, określa układy sterowania powstałe przy użyciu technik wywodzących się z ludzkich lub biologicznych metod gromadzenia wiedzy, form jej reprezentacji oraz podejmowania decyzji (Turnau 2002). Określenie „inteligentny” odnosi się więc, bez wątpienia, do omówionych w rozdziale regulatorów rozmytych.

Za punkt wyjścia dla struktur rozmytych przyjęto klasyczne regulatory, których metody strojenia omówiono w rozdziałach 4 i 5. Podano założenia umożliwiające realizację liniowych układów Takagi-Sugeno równoważnych PD/PID/PI²D. Określono zależności transformujące nastawy klasycznych dyskretnych regulatorów do ich rozmytych równoważników. Przedstawiono wybrane metody modyfikacji struktur inteligentnych, zwiększające dokładność serwomechanizmów.

6.1. Liniowy regulator Takagi-Sugeno

Metody strojenia klasycznych regulatorów PD/PID/PI²D posiadają dobre podstawy teoretyczne (rozdziały 4 i 5). Dlatego też, do konstruowania układów rozmytych zastosowano następujący tok postępowania (Jantzen 1998):

- 1) dobór nastaw klasycznego regulatora PD/PID/PI²D dla rozważanego obiektu;
- 2) zastąpienie układu liniowego jego rozmytym równoważnikiem FPD/FPID/FPII²D;
- 3) uzyskanie inteligentnego regulatora poprzez modyfikację struktury rozmytej.

Przedstawiona metoda umożliwia bezpośrednie porównanie odpowiedzi układu z klasycznym i inteligentnym regulatorem. W systemach sterowania układami mechatronicznymi wykorzystuje się zarówno struktury rozmyte Mamdaniego (Turnau 2002, Pauluk, 2001, Pattaradej *et al.* 2001), jak i Takagi-Sugeno (Precup, Preitl 2002, Wiktorowicz 1998, Żabiński 2003). W niniejszym rozdziale wybrano układy Takagi-Sugeno z funkcjami stałymi w następnikach reguł. Struktury te charakteryzuje prostota i efektywność obliczeniowa, które czynią je atrakcyjnymi z punktu widzenia zastosowań praktycznych. Dla tych układów prowadzone są również intensywne badania związane ze stabilnością i jakością regulacji (np. Wiktorowicz 2001).

Rozmyty system Takagi-Sugeno

Reguły systemu Takagi-Sugeno z jednym wyjściem (u) i m wejściami (x_1, x_2, \dots, x_m), dla których określono zbiory rozmyte wejściowe odpowiednio w ilości P_1, P_2, \dots, P_m , przyjmują postać:

$$R_k : \text{Jeżeli } x_1 \text{ jest } A_{1,p_1} \text{ i } x_2 \text{ jest } A_{2,p_2} \dots \text{ i } x_m \text{ jest } A_{m,p_m} \text{ to } u = f_k(x_1, x_2, \dots, x_m), \quad (6.1)$$

gdzie f_k jest nierozmytą funkcją (często liniową) zmiennych x_1, \dots, x_m , $k = 1, 2, \dots, K$ i K określa liczbę reguł. Zbiory rozmyte dla wejścia x_i oznaczono jako A_{i,p_i} , gdzie $p_i = 1, 2, \dots, P_i$.

Wyjście systemu dane jest zależnością

$$u = \frac{\sum_{k=1}^K \mu_k \cdot f_k(x_1, x_2, \dots, x_m)}{\sum_{k=1}^K \mu_k}, \quad \mu_k = A_{1,p_1}(x_1) \mathbf{T} A_{2,p_2}(x_2) \dots A_{m-1,p_{m-1}}(x_{m-1}) \mathbf{T} A_{m,p_m}(x_m), \quad (6.2)$$

gdzie \mathbf{T} jest dowolną t-normą, zaś $A_{i,p_i}(x_i)$ to stopień przynależności wejścia x_i do zbioru rozmytego p_i .

Liniowy rozmyty regulator Takagi-Sugeno

Aby uzyskać liniowe struktury Takagi-Sugeno, należy skonstruować układy, których powierzchnia sterowania w ogólnym przypadku jest hiperpłaszczyzną. Można to zrealizować przyjmując następujące założenia (Kluska 1992, Jantzen 1998):

- 1) wejścia regulatora nie ulegają nasyceniu;
- 2) zbiory wejściowe pokrywają całe uniwersum i spełniają warunek podziału jednościi (Piegat 1999). Tak więc, suma stopni przynależności każdego x_i z przestrzeni rozważań jest równa jeden ($\sum_{p_i=1}^{P_i} A_{i,p_i}(x_i) = 1$, gdzie P_i określa ilość zbiorów dla wejścia x_i);
- 3) system reguł jest zupełny, co oznacza, że dowolna kombinacja wartości wejściowych daje w wyniku właściwą wartość wyjściową (Driankov *et al.* 1996);
- 4) wyjście regulatora opisuje zależność (6.2);
- 5) t-norma z wzoru (6.2) jest iloczynem;
- 6) następniki w regułach (6.1) są funkcjami stałymi, czyli $f_k(x_1, x_2, \dots, x_m) = u_k$, gdzie u_k jest liczbą rzeczywistą.

Wewnątrz uniwersum przestrzeni wejść, warunek podziału jednościi spełniają trójkątne symetryczne funkcje z punktami przecięcia w wartości 0.5. Na brzegach należy stosować lewą i prawą zewnętrzną funkcję przynależności (Piegat 1999). W takim przypadku mianownik wzoru (6.2) przyjmuje wartość jeden ($\sum_{k=1}^K \mu_k = 1$) a wyjście regulatora opisane jest zależnością

$$u = \sum_{k=1}^K \mu_k \cdot u_k, \quad \mu_k = A_{1,p_1}(x_1) \cdot A_{2,p_2}(x_2) \dots A_{m-1,p_{m-1}}(x_{m-1}) \cdot A_{m,p_m}(x_m), \quad u_k \in R. \quad (6.3)$$

W punktach odpowiadających wierzchołkom zbiorów rozmytych wejściowych, wyjście przyjmuje wartości określone w następnikach reguł (Kluska 1992). Ponadto system rozmyty Takagi-Sugeno jest aproksymatorem uniwersalnym (Kluska 1992) i w szczególnym przypadku jego powierzchnia jest hiperpłaszczyzną.

W niniejszej pracy, człon rozmyty jest traktowany jako sumator o liniowej bądź nieliniowej charakterystyce. Aby w wygodny sposób konstruować regulatory rozmyte równoważne PD/PID/PII²D, należy stosować znormalizowane przestrzenie wejściowe (Jantzen 1998). Dzięki temu uzyskuje się uniezależnienie następników reguł od nastaw regulatorów liniowych. Metoda zakłada stworzenie sumatora rozmytego o odpowiedniej ilości wejść (np. dla P - 1, PD,PI - 2, PID - 3) i powierzchni będącej hiperpłaszczyzną o równaniu

$$u = a_0 + a_1 x_1 + a_2 x_2 + \dots + a_m x_m, \quad \text{gdzie} \quad a_0 = 0, \quad a_1 \dots a_m = 1. \quad (6.4)$$

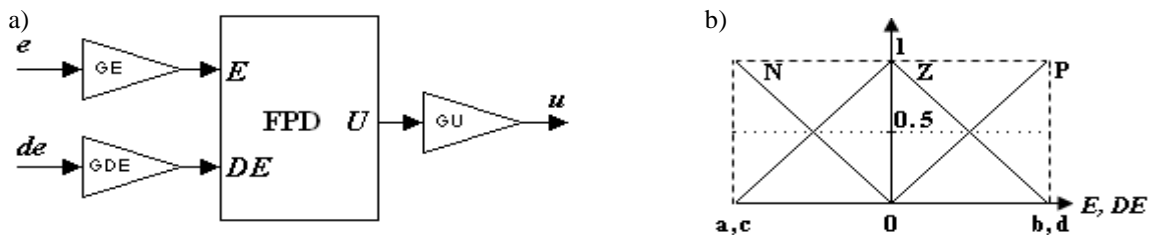
Następniki (u_k) reguł wyznacza się jako sumę wartości wejść będących jądrami zbiorów rozmytych występujących w ich poprzednikach. Współczynniki skalujące wejścia i wyjście dobiera się w taki sposób, aby uzyskana powierzchnia była zgodna z charakterystyką regulatora liniowego o ustalonych nastawach. W niniejszym rozdziale przyjęto bezpośrednią realizację rozmytych regulatorów PD/PID/PII²D ze względu na jej większą odporność na szumy pomiarowe w porównaniu z wersją przyrostową (Piegat 1999).

6.2. Regulatory rozmyte równoważne liniowym PD/PID/PII²D

Poniżej przedstawiono realizację rozmytych układów Takagi-Sugeno, równoważnych klasycznym regulatorom dyskretnym PD/PID/PII²D. Metodę zweryfikowano sterując w czasie rzeczywistym obiektem SUP2 za pomocą systemu szybkiego prototypowania MATLAB/Simulink/RT-CON.

Rozmyty regulator Takagi-Sugeno (FPD) równoważny liniowemu PD

Dla rozmytego regulatora FPD (rys. 6.1a) o wyjściu u , oraz wejściach e (błąd) oraz de (pochodna błędu) określono znormalizowane przestrzenie wejściowe (E , DE), dane przedziałami $\langle a, b \rangle$ i $\langle c, d \rangle$. Wyjście sumatora rozmytego oznaczono jako U , zaś wejściowe zbiory rozmyte pokazano na rys. 6.1b (N – ujemny, Z – zero, P – dodatni). Ilość zbiorów rozmytych jest określana przez projektanta. Zwiększenie ich liczby pozwala uzyskać bardziej skomplikowaną powierzchnię sterowania, ale powoduje wzrost ilości reguł, co utrudnia syntezę regulatora. Rzeczywista powierzchnia sterowania w układach mechatronicznych zależna jest od dynamiki wzmacniacza mocy, która w wielu przypadkach znacznie ją upraszcza (Eminoğlu, Altaş 1998). Dlatego też, często wzrost komplikacji powierzchni sterowania nie wpływa znacząco na rzeczywiste odpowiedzi układu.



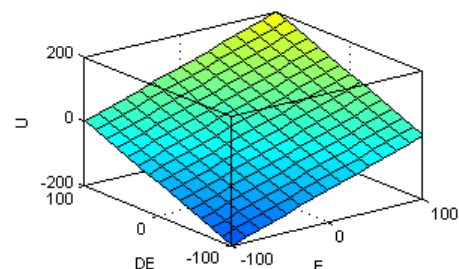
Rys. 6.1. Struktura liniowego rozmytego regulatora FPD (a), zbiory wejściowe (b)

Reguły liniowego dwuwejściowego sumatora rozmytego:

1. Jeżeli E jest Z i DE jest Z, to $U = 0$;
2. Jeżeli E jest Z i DE jest P, to $U = d$;
3. Jeżeli E jest Z i DE jest N, to $U = c$;
4. Jeżeli E jest P i DE jest Z, to $U = b$;
5. Jeżeli E jest P i DE jest P, to $U = b+d$;
6. Jeżeli E jest P i DE jest N, to $U = b+c$;
7. Jeżeli E jest N i DE jest Z, to $U = a$;
8. Jeżeli E jest N i DE jest P, to $U = a+d$;
9. Jeżeli E jest N i DE jest N, to $U = a+c$.

Powyższe reguły można zapisać w uproszczonej formie

$$\text{Jeżeli } E \text{ jest } \begin{cases} N \\ Z \\ P \end{cases} \text{ i } DE \text{ jest } \begin{cases} N \\ Z \\ P \end{cases}, \text{ to } U = \begin{cases} a \\ 0 \\ b \end{cases} + \begin{cases} c \\ 0 \\ d \end{cases}.$$



Rys. 6.2. Powierzchnia dwuwejściowego liniowego sumatora rozmytego

Na rys. 6.2 pokazano powierzchnię sumatora rozmytego dla znormalizowanych przestrzeni wejściowych o parametrach: $a, c = -100$, $b, d = 100$. Jest ona płaszczyzną o równaniu $U = E + DE$. Uwzględniając współczynniki skalujące GE , GDE , GU (rys. 6.1a), równanie powierzchni regulatora FPD wyraża się zależnością

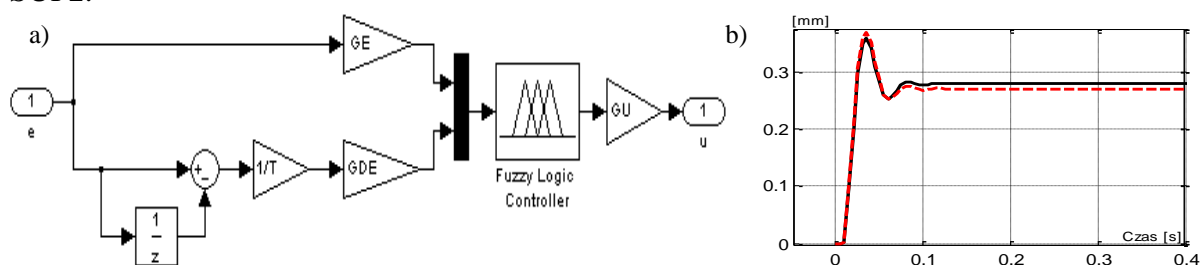
$$u = GU \cdot GE \cdot e + GU \cdot GDE \cdot \frac{de}{dt}. \quad (6.5)$$

Na podstawie (6.5) oraz wzoru definiującego regulator PD: $u = k_p e + k_d \frac{de}{dt}$ otrzymuje się zależności (6.6) wiążące nastawy klasycznego regulatora z jego rozmytym odpowiednikiem

$$GU = \frac{k_p}{GE}, \quad GDE = \frac{k_d}{k_p} GE. \quad (6.6)$$

Wartość współczynnika GE należy dobrać tak, aby przetransformować błąd e występujący w fizycznym układzie do znormalizowanego zakresu wejścia E . W przypadku symetrycznego przedziału $\langle -a, a \rangle$ współczynnik przyjmuje wartość $GE = a/e_{\max}$. Maksymalny rzeczywisty błąd e_{\max} posiada istotną interpretację praktyczną. W układach realizujących zadania śledzenia, np. obrabiarki CNC (system POZ), określa on dopuszczalny błąd, którego przekroczenie powoduje przerwanie pracy urządzenia.

Poniżej przedstawiono realizację rozmytego dyskretnego regulatora FPD w systemie MATLAB/Simulink/RT-CON oraz wyniki eksperymentów przeprowadzonych dla układu SUP2.

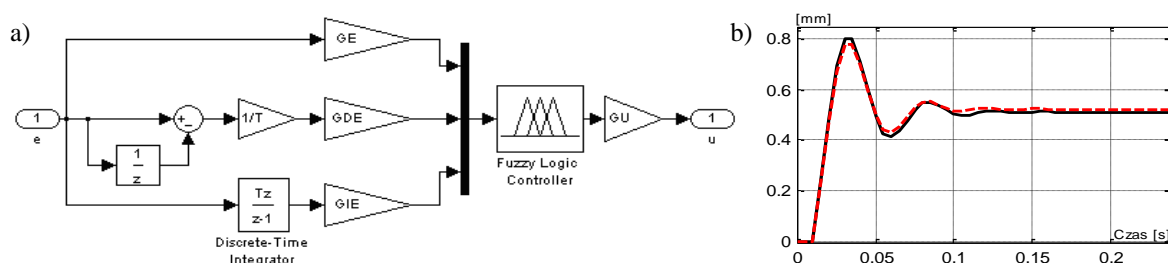


Rys. 6.3. Realizacja dyskretnego FPD w systemie MATLAB/Simulink/RT-CON (a) oraz odpowiedź skokowa układu SUP2 (b). Oznaczenia: PD (-), FPD (--)

Rozbieżności widoczne na (rys. 6.3b) wynikają ze zmiennych parametrów tarcia. W przypadku badań symulacyjnych otrzymuje się identyczne wyniki.

Rozmyty regulator Takagi-Sugeno (FPID) równoważny liniowemu PID

Rozmyty regulator FPID posiada trzy wejścia: e (błąd), de (pochodna błędu), ie (całka błędu). Określono dla nich znormalizowane przestrzenie (E, DE, IE), zdefiniowane przy pomocy przedziałów $\langle a, b \rangle, \langle c, d \rangle$ i $\langle g, h \rangle$. Funkcje rozmyte dla wejść przyjęto jak w FPD. Realizację dyskretnego FPID oraz wyniki eksperymentów pokazano na rys. 6.4.



Rys. 6.4. Realizacja dyskretnego FPID w systemie MATLAB/Simulink/RT-CON (a) oraz odpowiedź skokowa układu SUP2 (b). Oznaczenia: PID (-), FPID (--)

Reguły (w liczbie 27) liniowego trójwejściowego sumatora rozmytego o równaniu powierzchni $U=E+DE+IE$ przyjmują postać

$$\text{Jeżeli } E \text{ jest } \begin{Bmatrix} N \\ Z \\ P \end{Bmatrix} \text{ i } DE \text{ jest } \begin{Bmatrix} N \\ Z \\ P \end{Bmatrix} \text{ i } IE \text{ jest } \begin{Bmatrix} N \\ Z \\ P \end{Bmatrix}, \text{ to } U = \begin{Bmatrix} a \\ 0 \\ b \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} c \\ 0 \\ d \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} g \\ 0 \\ h \end{Bmatrix}$$

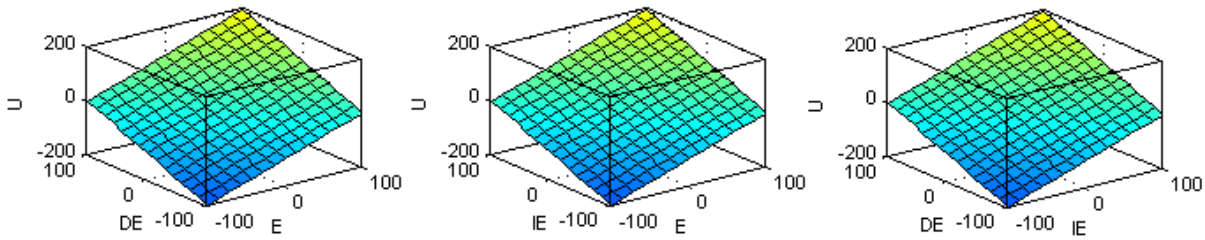
Powierzchnie sumatora rozmytego dla znormalizowanych przestrzeni wejściowych ($a, c, g = -100, b, d, h = 100$) pokazano na rys. 6.5 (wartość wejścia, która nie występuje na danym wykresie, wynosi zero).

Zależności pomiędzy nastawami regulatora $PID = k_p e + k_d \frac{de}{dt} + k_i \int_0^t edt$ a FPID (rys. 6.4a)

uzyskuje się ze wzorów

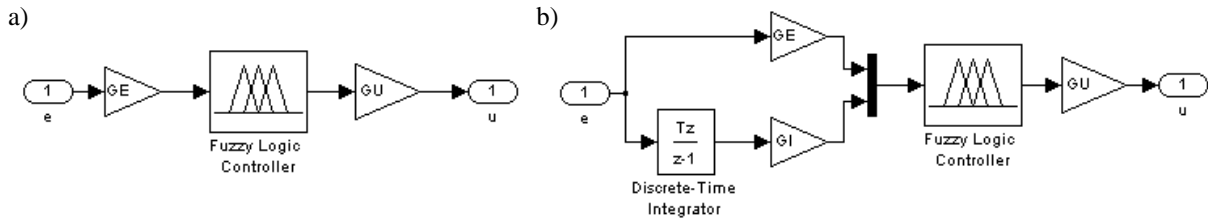
$$GU = \frac{k_p}{GE}, \quad GDE = \frac{k_d}{k_p} GE, \quad GIE = \frac{k_i}{k_p} GE, \quad (6.7)$$

gdzie GE określono identycznie jak dla FPD.



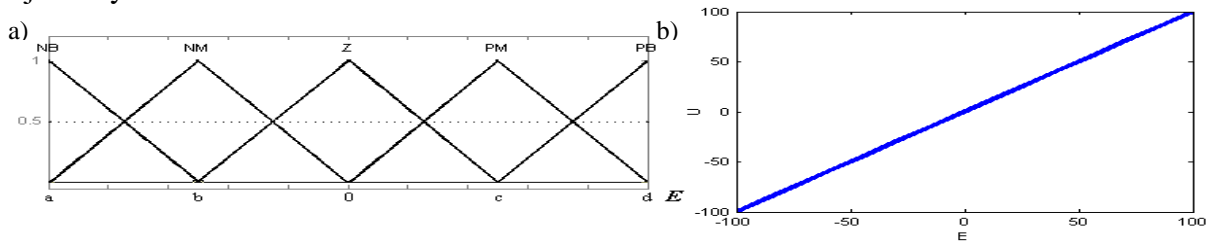
Rys. 6.5. Powierzchnie trójwejsiowego liniowego sumatora rozmytego

Dla regulatora PID realizowanego w strukturze P-PI (dodatek B) możliwe jest uzyskanie układu, w którym zarówno regulator położenia (FP), jak i prędkości (FPI), jest elementem rozmytym (FP-FPI). Realizację FP i FPI w systemie MATLAB/Simulink/RT-CON pokazano na rys. 6.6.



Rys. 6.6. Realizacja dyskretnych regulatorów FP (a) i FPI (b) w systemie MATLAB/Simulink/RT-CON

W strukturze FPI zastosowano identyczne zbiory wejściowe jak dla FPD (rys. 6.1b). Dla układu FP zwiększono ilość zbiorów do pięciu (PB – dodatni duży, PM – dodatni średni, Z – zero, NM – ujemny średni, NB – ujemny duży) (rys. 6.7a). Reguły oraz powierzchnia regulatora FPI jest taka sama jak FPD, gdyż w obu przypadkach części rozmyte są dwuwejściowymi sumatorami.



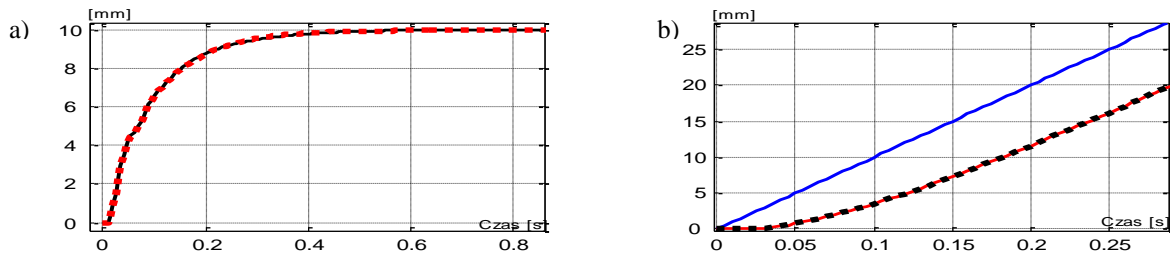
Rys. 6.7. Zbiory wejściowe FP w przestrzeni znormalizowanej $E - \langle a, d \rangle$ (a), charakterystyka FP dla $a=-100$ i $d=100$ (b)

Reguły (w liczbie 5) struktury FP mają postać (rys. 6.7a): **Jeżeli E jest** $\begin{cases} \text{NB} \\ \text{NM} \\ \text{Z} \\ \text{PM} \\ \text{PB} \end{cases}$, **to $U =$** $\begin{cases} a \\ b \\ 0 \\ c \\ d \end{cases}$.

Zależności wiążące nastawy regulatorów $P = k_p e$ oraz $PI = k_{p1} e + k_{i1} \int_0^t e dt$ z ich odpowiednikami rozmytymi FP oraz FPI (rys. 6.6) dane są wzorami (6.8)

$$FP: \quad GU = \frac{k_p}{GE}, \quad FPI: \quad GU = \frac{k_{p1}}{GE}, \quad GIE = \frac{k_{i1}}{k_{p1}} GE. \quad (6.8)$$

Współczynniki GE dobiera się niezależnie dla FP i FPI. Wyniki eksperymentów dla układu SUP2 z regulatorami P-PI oraz FP-FPI pokazano na rys. 6.8.



Rys. 6.8. Odpowiedzi układu SUP2: skokowa (a): P-PI (-), FP-FPI (..), na wymuszenie liniowe (b): wartość zadana (-), P-PI (--), FP-FPI (..)

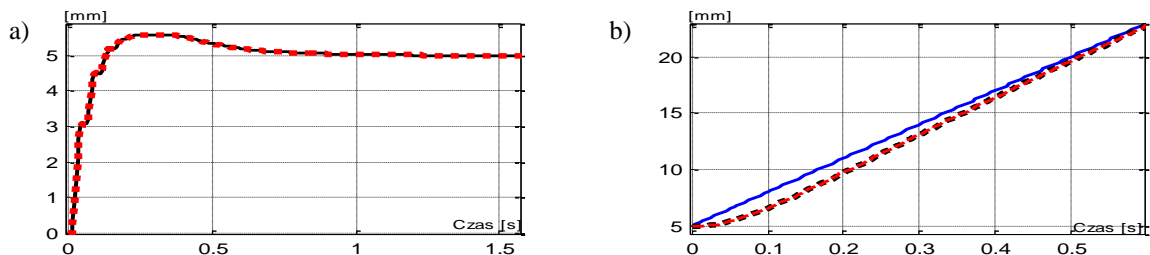
Rozmyty regulator Takagi-Sugeno (FPII²D) równoważny liniowemu PII²D

Rozmyty układ FPII²D składa się z dwóch regulatorów FPI występujących w pętłach regulacji położenia i prędkości (rozdział 5). Strukturę FPI zrealizowano identycznie jak w przypadku FP-FPI (rys. 6.6b), zaś wzory transformujące nastawy klasycznego układu PI-PI

($PI_p = k_{p1}e + k_{i1} \int_0^t edt$, $PI_v = k_{p2}e + k_{i2} \int_0^t edt$) do FPI-FPI przyjmują postać

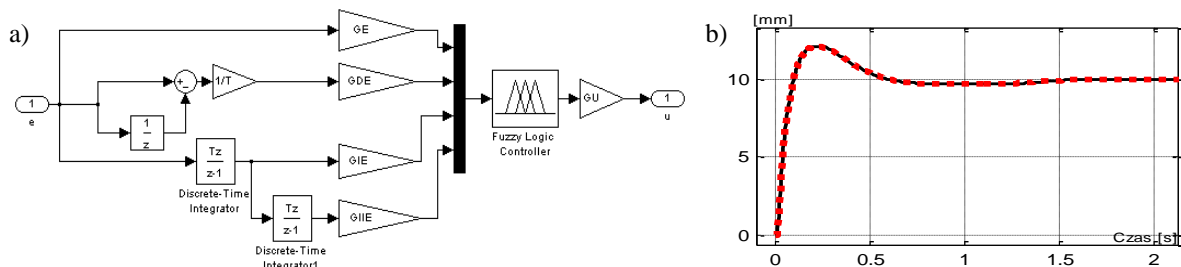
$$FPI_p: \quad GU = \frac{k_{p1}}{GE}, \quad GIE = \frac{k_{i1}}{k_{p1}} GE, \quad FPI_v: \quad GU = \frac{k_{p2}}{GE}, \quad GIE = \frac{k_{i2}}{k_{p2}} GE. \quad (6.9)$$

Współczynniki GE dobiera się niezależnie dla PI_p i PI_v.



Rys. 6.9. Odpowiedzi układu SUP2: skokowa (a): PI-PI (-), FPI-FPI (..), na wymuszenie liniowe (b): wartość zadana (-), PI-PI (--), FPI-FPI (..)

FPII²D z pojedynczym sprzężeniem położeniowym (rozdział 5, dodatek B) jest czterowejściowym sumatorem rozmytym i wymaga podania 81 reguł (przy przyjęciu trzech zbiorów dla każdego wejścia). Realizację FPII²D w systemie MATLAB/Simulink/RT-CON pokazano na rys. 6.10.



Rys. 6.10. Realizacja dyskretnego czterowejściowego FPII²D w systemie MATLAB/Simulink/RT-CON (a) oraz odpowiedź skokowa układu SUP2 (b). Oznaczenia: PII²D (-), FPII²D (..)

Wzory definiujące współczynniki realizacji rozmytej (rys. 6.10a) dla $PID(z) = K_{p1} + K_{i1} \frac{z\Delta}{z-1} + K_{d1} \frac{z-1}{z\Delta}$ oraz $PI(z) = K_{p2} + K_{i2} \frac{z\Delta}{z-1}$ (dodatek B) dane są zależnościami

(6.10)

$$GU = \frac{K_P}{GE}, \quad GDE = \frac{K_D}{K_P} GE, \quad GIE = \frac{K_I}{K_P} GE, \quad GIIE = \frac{K_{II}}{K_P} GE, \quad (6.10)$$

$$K_p = K_{p1} \cdot K_{p2} + K_{d1} \cdot K_{i2}, \quad K_D = K_{d1} \cdot K_{p2}, \quad K_I = K_{i1} \cdot K_{p2} + K_{i2} \cdot K_{p1}, \quad K_{II} = K_{i1} \cdot K_{i2}.$$

Zbiory wejściowe, reguły oraz współczynnik GE dobiera się zgodnie z zasadami podanymi we wcześniejszej części rozdziału.

6.3. Inteligentne rozmyte struktury typu PD/PID/PII²D

Poniżej omówiono wybrane modyfikacje rozmytych struktur FPD/FPID/FPPII²D zwiększające dokładność serwomechanizmów. Przedstawiono odpowiedzi układu SUP2 z klasycznymi i inteligentnymi regulatorami. Dokonano ich porównania na podstawie

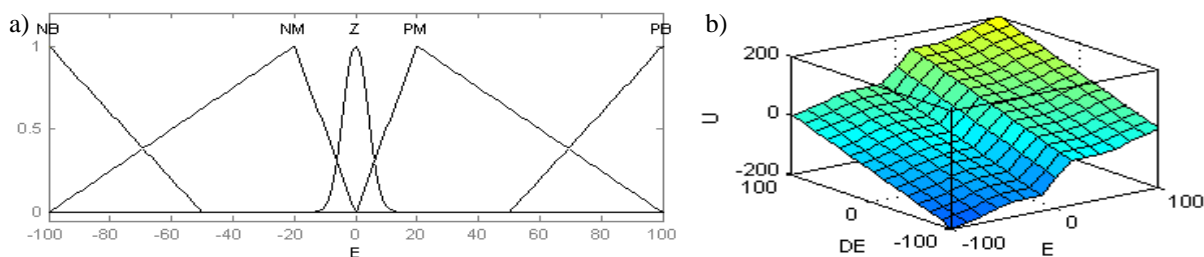
kryteriów całkowych, określających dokładność sterowania $I_1 = \int_0^{t_1} |e| dt$ oraz jego koszt

$$I_2 = \int_0^{t_1} |u| dt \quad (\text{z uwzględnieniem ograniczenia sygnału sterującego}).$$

Inteligentna struktura FPD

Ze względu na brak całkowania w regulatorze, serwomechanizmy z układami PD posiadają błędy ustalone wprowadzane przez zakłócenia, np. tarcie. Poniżej przedstawiono modyfikację struktury FPD, która redukuje błąd ustalony, nie zwiększając przeregulowania.

Regulator PD dla układu SUP2 nastrojono dla czasu regulacji równego 0.5 s. Następnie zastąpiono go równoważnym FPD, w którym dla małych błędów zwiększono wzmocnienie części proporcjonalnej. Modyfikację uzyskano zmieniając kształt funkcji przynależności dla wejścia błędu (rys. 6.11a). Otrzymana powierzchnia sterowania (rys. 6.11b) posiada nieliniową charakterystykę. Przebiegi odpowiedzi skokowej oraz śledzenia wymuszenia liniowego dla układu SUP2 ze zmodyfikowanym regulatorem FPD pokazano na rys. 6.12.

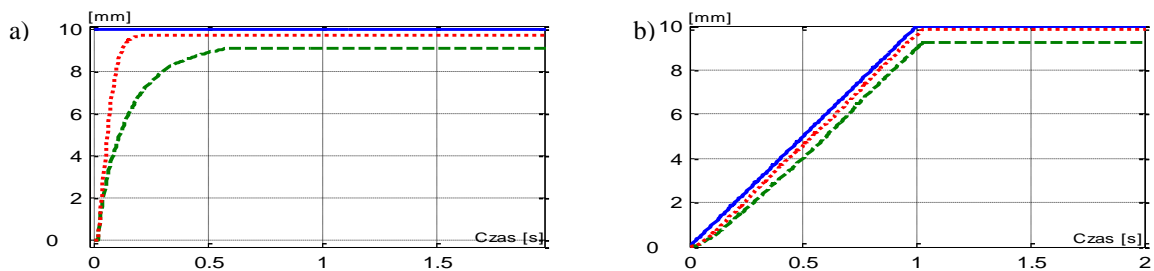


Rys. 6.11. Funkcje przynależności dla wejścia błędu regulacji (a), powierzchnia sterowania nieliniowej struktury FPD (b)

Wartości kryteriów całkowych (tab. 6.1) dla odpowiedzi skokowej wskazują, iż otrzymano około 60% polepszenie dokładności, przy około 30% wzroście kosztów sterowania. W przypadku wymuszenia liniowego uzyskano około 55% polepszenie dokładności, przy wzroście kosztów jedynie o około 2%.

Tab. 6.1. Wskaźniki jakości dla sterowania SUP2 ze strukturami PD i FPD

Wartość zadana ($t_1 = 1$ s)	Skokowa		Linowa	
	PD	FPD	PD	FPD
I_1	0.0022	0.0009	0.0008	0.0004
I_2	0.0178	0.0232	0.0143	0.0146

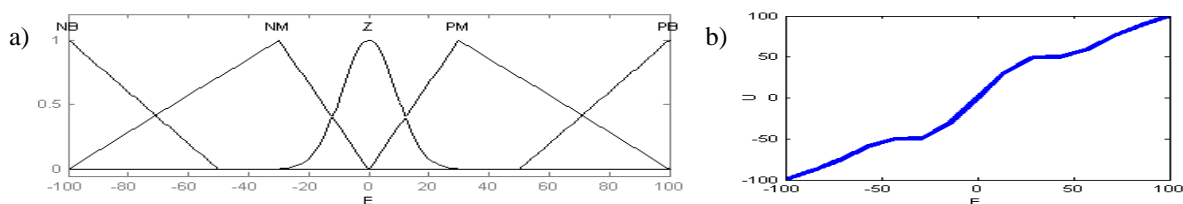


Rys. 6.12. Odpowiedzi układu SUP2: skokowa (a), na wymuszenie liniowe (b). Oznaczenia: wartość zadana (-), PD (--), FPD (..)

Zmodyfikowany regulator zmniejsza niekorzystny wpływ tarcia na dokładność serwomechanizmu. Powinien być stosowany, gdy mała sztywność konstrukcji mechanicznej lub długi czas cyklu, nie pozwalają na nastrojenie klasycznego PD na wymagane (wystarczająco krótkie – rozdział 8.3) czasy regulacji.

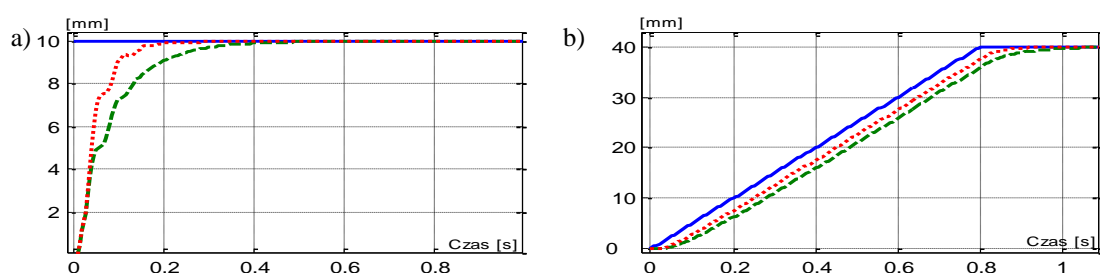
Inteligentna struktura FP-FPI

Podstawową zaletą struktury P-PI jest brak przeregulowania dla odpowiedzi skokowej (rys. 6.8a) zaś wadą ustalony błąd śledzenia (rys. 6.8b). Zaproponowana modyfikacja członu FP struktury FP-FPI zmniejsza wartość błędu ustalonego śledzenia oraz skraca czas narastania, przy jednoczesnym braku przeregulowania lub też jego niewielkiej wartości. Wykorzystano identyczne założenie jak w FPD, polegające na zwiększeniu wzmocnienia dla małych błędów (rys. 6.13).



Rys. 6.13. Funkcje przynależności dla wejścia błędu regulacji (a), charakterystyka sterowania nieliniowej struktury FP (b)

Poniżej zamieszczono wyniki eksperymentów ze strukturą P-PI nastrojoną dla czasu regulacji 0.35 s (dodatek B) oraz z zmodyfikowanym regulatorem FP-FPI.



Rys. 6.14. Odpowiedzi układu SUP2: skokowa (a), na wymuszenie liniowe (b). Oznaczenia: wartość zadana (-), P-PI (--), FP-FPI (..)

Kryteria całkowite (tab. 6.2) pokazują, iż otrzymano około 37% polepszenie dokładności, przy około 26% wzroście kosztów sterowania w przypadku odpowiedzi skokowej. Dla wymuszenia liniowego uzyskano około 37% polepszenie dokładności, przy wzroście kosztów jedynie o około 1%.

Tab. 6.2. Wskaźniki jakości dla sterowania SUP2 z strukturami P-PI i FP-FPI

Wartość zadana ($t_1 = 0.8$ s)	Skokowa		Linowa	
	P-PI	FP-FPI	P-PI	FP-FPI
I_1	0.0009	0.0006	0.0030	0.0019
I_2	0.0422	0.0533	0.0236	0.0239

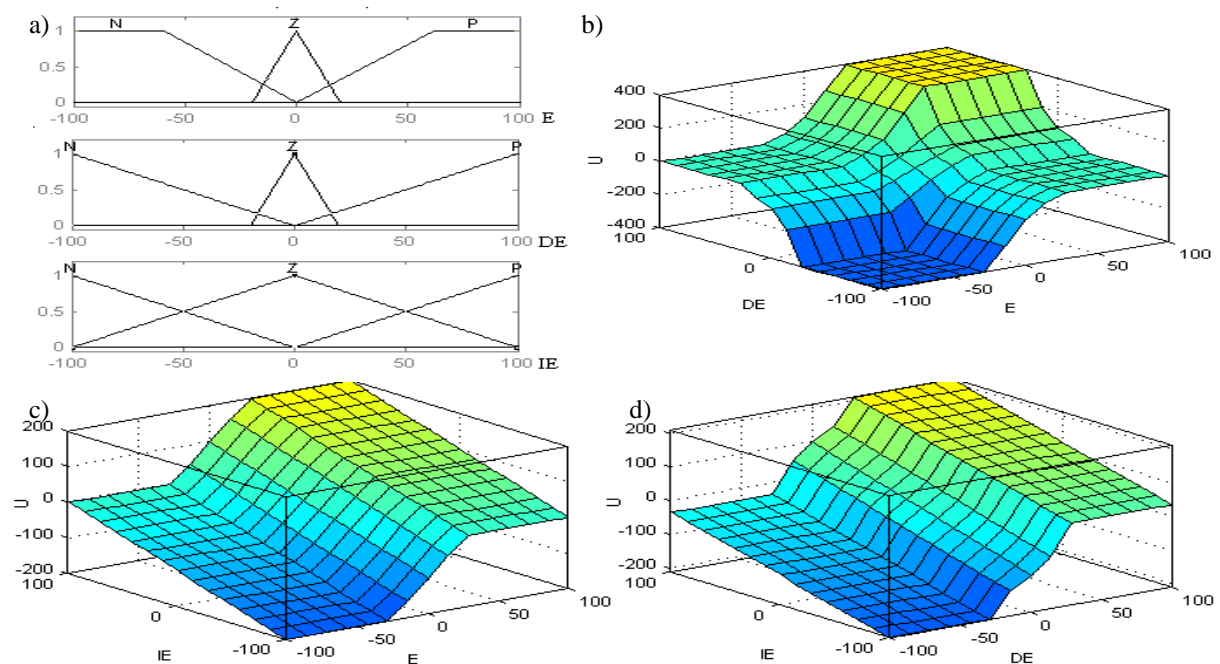
Inteligentna struktura FPID

Serwomechanizm z regulatorem PID śledzi wymuszenie liniowe bez błędu ustalonego, jednakże posiada około 20% przeregulowanie dla odpowiedzi skokowej. Zmniejszenie przeregulowania w strukturze FPID uzyskano wzmacniając akcję sterującą, gdy błąd oraz jego pochodna mają zgodny znak (Armstrong, Wade 2000). Odpowiednie powierzchnie sterowania (rys. 6.15 b, c, d) uzyskano modyfikując kształt wejściowych zbiorów rozmytych (rys. 6.15a) oraz zwiększając wartości stałych w następnikach poniższych reguł:

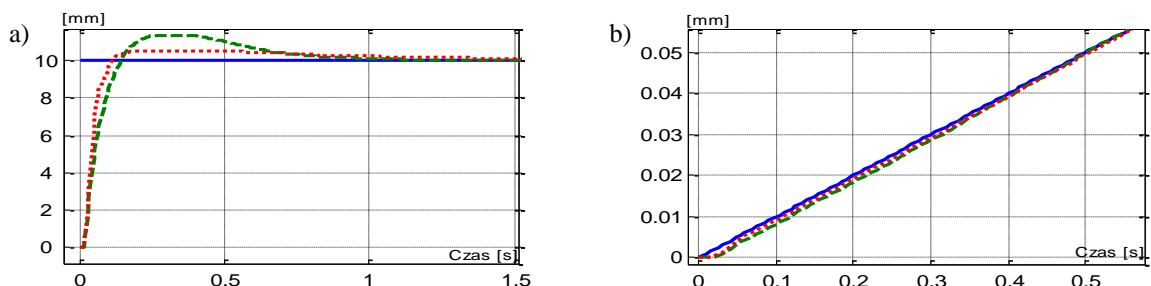
Jeżeli E jest N i DE jest N i IE jest N ;
Jeżeli E jest N i DE jest N i IE jest Z ;
Jeżeli E jest N i DE jest N i IE jest P ;

Jeżeli E jest P i DE jest P i IE jest N ;
Jeżeli E jest P i DE jest P i IE jest Z ;
Jeżeli E jest P i DE jest P i IE jest P .

Wyniki eksperymentów z regulatorem PID (czas regulacji 0.6 s) oraz z nieliniowym FPID przedstawiono na rys. 6.16. Modyfikacja FPID zredukowała przeregulowanie ($P_{PID} \cong 13.3\%$, $P_{FPID} \cong 5.3\%$), nie wpływając niekorzystnie na parametry śledzenia (rys. 6.16b) i nie wydłużając znacznie czasu regulacji ($t_{rPID} \cong 0.9s$, $t_{rFPID} \cong 1.1s$). Porównanie kryteriów całkowych (tab. 6.3) dla odpowiedzi skokowej wskazuje, iż otrzymano około 26% polepszenie dokładności, przy około 51% wzroście kosztów sterowania. Dla wymuszenia liniowego uzyskano około 25% polepszenie dokładności, przy wzroście kosztów o około 1%.



Rys. 6.15. Funkcje przynależności dla wejść E, DE, IE (a), powierzchnie sterowania nieliniowej struktury FPID (b, c, d)



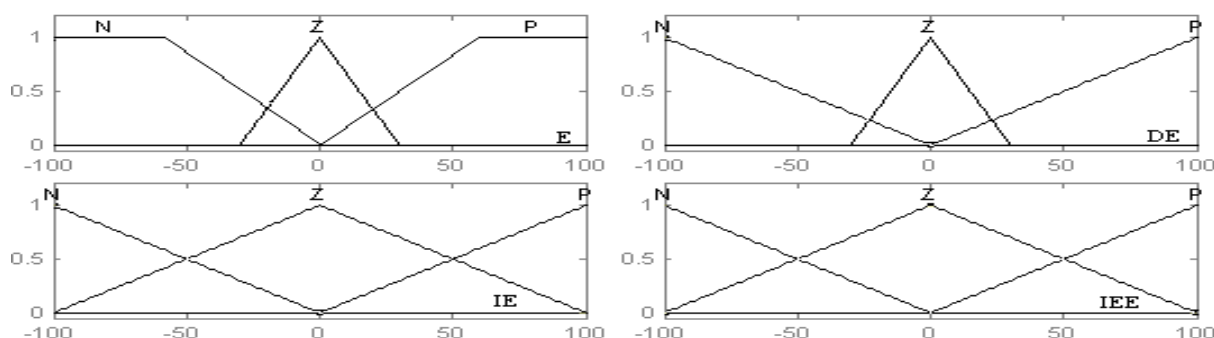
Rys. 6.16. Odpowiedzi układu SUP2: skokowa (a), na wymuszenie liniowe (b). Oznaczenia: wartość zadana (-), PID (--), FPID (..)

Tab. 6.3. Wskaźniki jakości dla sterowania SUP2 z strukturami PID i FPID

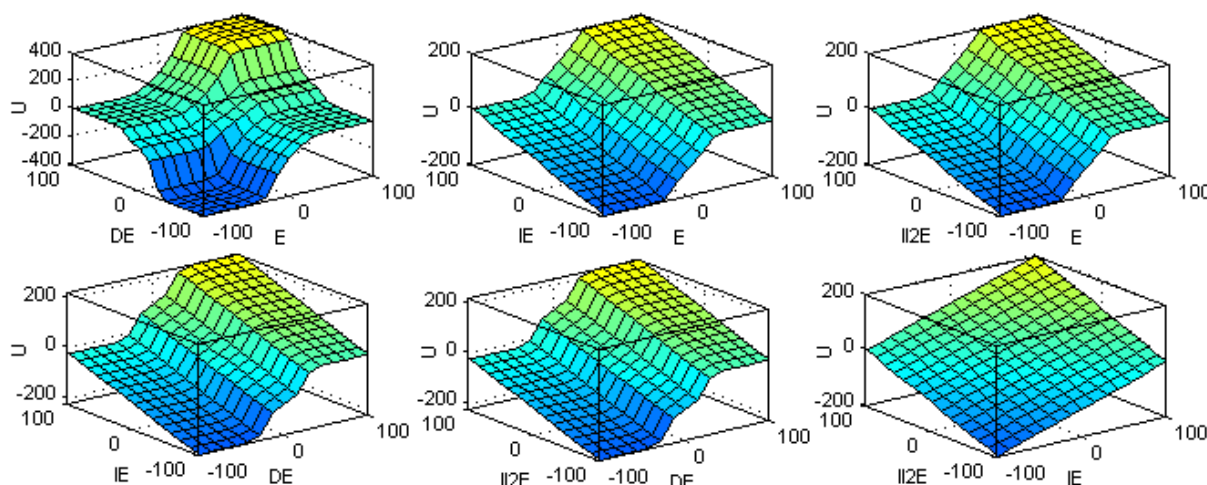
Wartość zadana	Skokowa ($t_1=1.5$ s)		Linowa ($t_1=1.5$ s)	
Wskaźniki jakości	PID	FPID	PID	FPID
I_1	0.0012	0.0009	0.00008	0.00006
I_2	0.0380	0.0574	0.0213	0.0215

Inteligentna struktura FPII²D

Dla FPII²D, identycznie jak w przypadku FPID, wzmocniono akcję sterującą, gdy błąd oraz jego pochodna mają zgodny znak. Zredukowano przeregulowanie, nie pogarszając tłumienia zakłóceń liniowych i nie wpływając niekorzystnie na jakość śledzenia. Wykorzystano czterowejściowy układ FPII²D, modyfikując jego reguły oraz zbiory wejściowe analogicznie do FPID. Na rys. 6.17 przedstawiono zbiory wejściowe, zaś na rys. 6.18 powierzchnie sterowania.



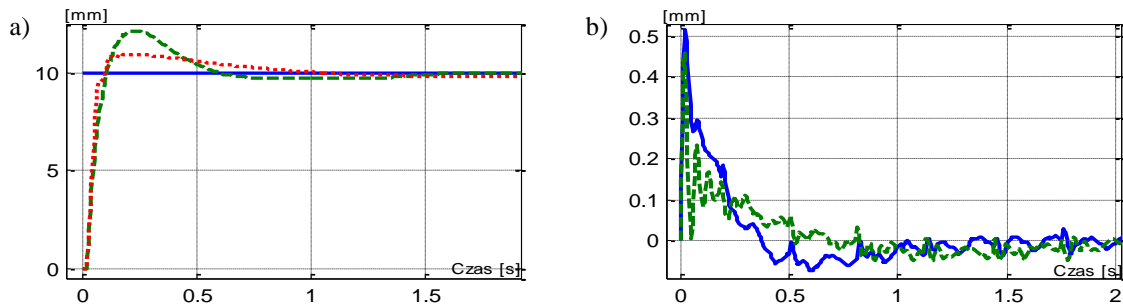
Rys. 6.17. Zbiory wejściowe nieliniowej struktury FPII²D



Rys. 6.18. Powierzchnie sterowania nieliniowej struktury FPII²D

Uzyskano zmniejszenie przeregulowania z $P_{PII^2D} \cong 22\%$ do $P_{FPII^2D} \cong 10.5\%$, nie wydłużając znacznie czasu regulacji. Eksperyment śledzenia wymuszenia liniowego został przeprowadzony w obecności zakłóceń liniowych, generowanych przez zestaw sprężyn (rozdział 2.1).

Porównanie kryteriów całkowitych (tab. 6.4) dla odpowiedzi skokowej wskazuje, iż otrzymano około 16.5% polepszenie dokładności, przy około 67.5% wzroście kosztów sterowania. Dla wymuszenia liniowego uzyskano około 17.0% polepszenie dokładności, przy wzroście kosztów o około 3.9%.



Rys. 6.19. Odpowiedzi układu SUP2: skokowa (a): wartość zadana (-), PI^2D (--), FPI^2D (..), błąd śledzenia wymuszenia liniowego w obecności zakłócenia liniowego (b): PI^2D (-), FPI^2D (--)

Tab. 6.4. Wskaźniki jakości dla sterowania SUP2 z strukturami PI^2D i FPI^2D

Wartość zadana ($t_1 = 2.5$ s)	Skokowa		Linowa	
	PI^2D	FPI^2D	PI^2D	FPI^2D
I_1	0.0013	0.0011	0.0001	0.00009
I_2	0.0549	0.0920	0.1538	0.1598

Powyższe przykłady pokazują, że w przypadku serwomechanizmów (modelowanych zazwyczaj jako obiekty liniowe podwójnie całkujące - rozdział 2.1), możliwe jest uzyskanie poprawy ich dokładności przy pomocy inteligentnego nieliniowego regulatora. Dlatego też, często spotykany w literaturze pogląd, że regulatory rozmyte należy stosować do obiektów nieliniowych (np. Isermann 1996), jest dyskusyjny.

Przedstawione struktury nie uwzględniają ograniczeń elementów wykonawczych, dlatego też struktury z członami całkującymi należałoby uzupełnić o blokadę integratora (*anti-wind-up*) (Franklin *et al.* 1994, Goodwin *et al.* 2001).

W rozdziale przedstawiono nieliniowe regulatory inteligentne zwiększające dokładność serwomechanizmów. Dla rozmytych struktur FPD oraz FP-FPI zmniejszono błędy ustalone bez wzrostu przeregulowania. Modyfikację uzyskano zwiększając wzmocnienie części proporcjonalnej dla małych błędów. W regulatorach FPID oraz FPI^2D wzmocniono akcję sterującą, gdy błąd oraz jego pochodna mają zgodny znak. Zredukowano tym samym przeregulowanie, nie pogarszając parametrów śledzenia oraz tłumienia zakłóceń.

Identycznie jak w przypadku regulatorów klasycznych realizacja praktyczna dyskretnych struktur rozmytych wymaga stabilnego i precyzyjnego czasu cyklu. Wpływ zmiany długości cyklu na przebiegi dynamiczne jest identyczny dla klasycznych i rozmytych realizacji liniowych regulatorów.

Wzrost ilości obliczeń dla układów rozmytych, w porównaniu do klasycznych PD/PID/ PI^2D , wymaga od systemu sterowania większej mocy obliczeniowej.