

Zastosowanie systemu wspomagania projektowania algorytmów regulacji do testowania regulatorów nieliniowych

W referacie omówiono przykład testowania regulatorów nieliniowych na stanowisku badawczym przeznaczonym do projektowania i badania algorytmów regulacji. Przedstawiono pokrótce użyte stanowisko badawcze. W dalszej kolejności omówiono badane układy regulacji z rozmytymi wieloobszarowymi regulatorami nieliniowymi. Pierwszy układ regulacji zawiera w swojej strukturze rozmyty regulator ze sprzężeniem od stanu obserwowanego, zaś drugi, rozmyty regulator DMC.

Application of a computer aided controller design system to testing of nonlinear controllers

An example of nonlinear controller testing is presented in the paper. The controllers were tested on a simulation system that enables design and research of control algorithms. The system is shortly presented. Then considered control systems with fuzzy multiregional nonlinear controllers are discussed. The first control system has in its structure a fuzzy controller with the feedback from state variables and the second one a fuzzy DMC controller.

1. WSTĘP

Podczas opracowywania nowych algorytmów regulacji istnieje potrzeba bardzo starannego ich przetestowania w warunkach możliwie zbliżonych do rzeczywistych. W referacie zostało przedstawione wykorzystanie do tego celu sposobu postępowania zaproponowanego przez autora w [1]. Zostało ono zastosowane do badania działania układów regulacji z nieliniowymi regulatorami opartymi na podejściu wieloobszarowym (Takagi-Sugeno). Propozycja polega na tym, aby oprócz sprawdzenia zachowania projektowanego układu regulacji za pomocą symulacji na jednym komputerze, dokonać analogicznych badań w układzie, w którym symulator obiektu i symulator urządzenia sterującego pracują na różnych maszynach. Wówczas poszczególne elementy układu regulacji są symulowane jako niezależne bloki i nie są synchronizowane programem obliczeniowym, jak w przypadku symulacji na jednym komputerze. Umożliwia to wykrycie ewentualnych problemów związanych ze współpracą regulatora z obiektem i usunięcie ich zawczasu.

W pierwszej części referatu został przytoczony opis użytego stanowiska badawczego oraz proponowany sposób jego wykorzystania. Stanowisko to jest złożone z dwóch elementów. Pierwszym z nich jest komputer z symulatorem obiektu. Maszyna ta jest połączona interfejsem analogowym z drugim elementem zestawu. Elementem tym może być drugi komputer, na

Praca została wykonana w ramach działalności statutowej Politechniki Warszawskiej (pracy nr 506G.).

którym jest symulowane urządzenie sterujące lub rzeczywiste urządzenie sterujące w postaci przemysłowego sterownika programowalnego PLC [1].

W dalszej części referatu omówiono dwa układy regulacji, zawierające regulatory wieloobszarowe. Pierwszy z tych układów jest złożony z silnie nieliniowego obiektu elektromechanicznego i rozmytego regulatora ze sprzężeniem od stanu [2]. Drugi układ sterowania zawiera w swojej strukturze silnie nieliniowy obiekt z opóźnieniem oraz rozmyty regulator DMC [5]. Przedstawiona w referacie wersja algorytmu regulacji bazuje na zwartej postaci konwencjonalnego (nierozmytego) algorytmu DMC [3]. Dzięki temu regulator jest stosunkowo prosty i wymaga niewielkiej mocy obliczeniowej.

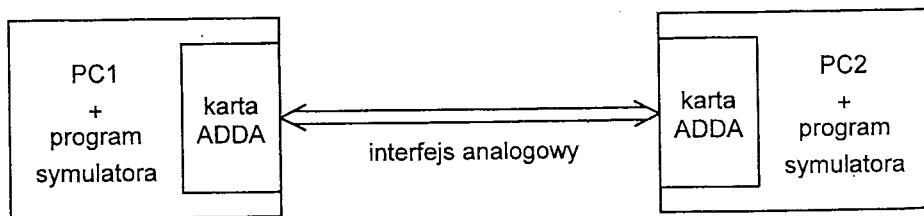
Poszczególne elementy badanych układów sterowania, tzn. obiekt i regulator, zostały zasy-mulowane najpierw na jednym komputerze, a następnie na oddzielnych maszynach. Uzyskane wyniki badań zaprezentowanych układów regulacji, zostały omówione w dalszej części referatu. Świadczą one o zadowalającym działaniu testowanych regulatorów w warunkach stworzonych na zastosowanym stanowisku badawczym.

W dalszej kolejności, opisano oprogramowanie użyte podczas eksperymentów. Umożliwia ono wygodne testowanie zaproponowanych algorytmów regulacji oraz symulację komputerową stanów nieustalonych zachodzących w badanych układach regulacji. Referat zamyka podsumowanie oraz wykaz cytowanej i zalecanej literatury.

2. SYSTEM WSPOMAGANIA PROJEKTOWANIA REGULATORÓW

System, który został wykorzystany do badań jest złożony ze stanowiska laboratoryjnego oraz oprogramowania symulacyjnego (rozdz. 5). Stanowisko badawcze umożliwia badanie algorytmów regulacji dla różnych obiektów. Zostało ono zaprojektowane w taki sposób, aby możliwie wiernie były na nim odtwarzane rzeczywiste sytuacje, dlatego zachowano analogowy charakter sygnałów sterujących i pomiarowych [1].

Na stanowisku badawczym jest możliwe prowadzenie badań przy dwóch jego konfiguracjach. W pierwszym przypadku urządzenie sterujące i obiekt sterowania są symulowane na oddzielnych komputerach PC, połączonych interfejsem analogowym za pośrednictwem kart przetworników A/C (rys. 1). W drugiej konfiguracji, obiekt jest symulowany na komputerze, a urządzeniem sterującym jest programowalny sterownik przemysłowy PLC z modułem wejść/wyjść analogowych.



Rys. 1. Struktura stanowiska laboratoryjnego z dwoma komputerami

Dla potrzeb badań układów regulacji, opisanych w niniejszym referacie, skorzystano z pierwszej konfiguracji stanowiska badawczego, tzn. z dwóch komputerów PC połączonych interfejsem analogowym (rys. 1). Obiekt regulacji był symulowany na maszynie z procesorem klasy Pentium, zaś urządzenie sterujące – na komputerze klasy 486. Dane pomiędzy częściami składowymi tego zestawu były przesyłane za pośrednictwem kart wejść/wyjść analogowych PCL-812 firmy ADVANTECH.

Podczas prowadzonych badań, zastosowano wieloetapowy tok projektowania i testowania algorytmów regulacji [1]. Składa się on z następujących etapów:

1. do danego obiektu jest projektowany układ sterowania;
2. układ regulacji z zaprojektowanym regulatorem jest testowany na symulatorze całego układu, uruchomionym na jednym komputerze;
3. układ regulacji jest testowany na, opisanym w poprzedniej części rozdziału, stanowisku złożonym z dwóch elementów (komputera z symulatorem obiektu połączonego z drugim komputerem z symulatorem regulatora lub za sterownikiem programowalnym PLC).

Na każdym z etapów, mogą być wprowadzane modyfikacje i udoskonalenia tak, aby działanie układu regulacji spełniało przyjęte wymagania. Następnie realizowany jest kolejny etap. Urządzenie sterujące, projektowane i testowane według powyższej procedury, może zostać zastosowane do sterowania rzeczywistego obiektu, jeżeli uzyskane rezultaty są zadowalające.

3. UKŁADY REGULACJI Z REGULATORAMI NIELINIOWYMI

W niniejszym rozdziale przedstawiono dwa układy regulacji, zawierające regulatory wieloobszarowe. Pierwszy z tych układów jest złożony z silnie nieliniowego obiektu elektromechanicznego i rozmytego regulatora ze sprzężeniem od stanu obserwowanego [2]. Drugi jest układem sterowania silnie nieliniowego obiektu chemicznego z opóźnieniem i zawiera rozmyty regulator DMC [5]. W dalszej części rozdziału opisano elementy każdego z badanych układów regulacji.

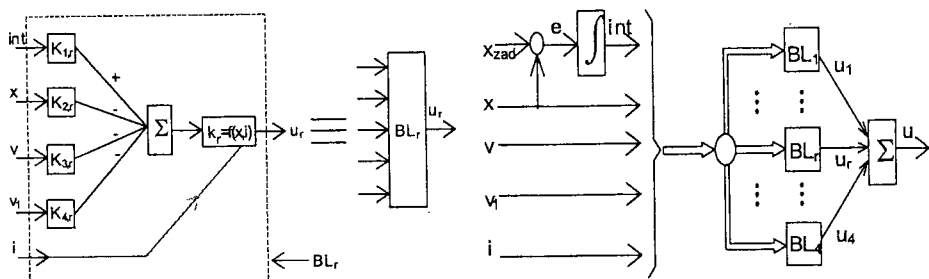
3.1 Układ regulacji z rozmytym regulatorem ze sprzężeniem od stanu obserwowanego

Obiektem regulacji w pierwszym z badanych układów jest silnik o ruchu prostoliniowym, w którym występują silne nieliniowości (niejednoznaczność charakterystyki, tarcie). Do dalszych badań przyjęto następujące równania silnika:

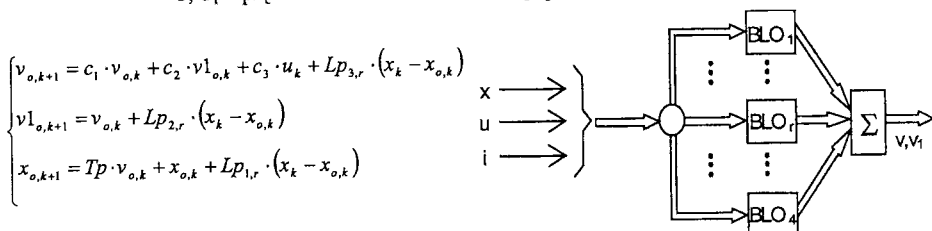
$$\begin{cases} F_e(k) = K_m \cdot i(k) \\ K_m^e = a_4 \cdot \{ [1 + \operatorname{sgn}(i(k))] \cdot [1 - (1 - a_5) \cdot x(k)] + [1 - \operatorname{sgn}(i(k))] \cdot [a_5 + (1 - a_5) \cdot x(k)] \} \\ w(k) = u(k) - s(k) \\ i(k) = a_1 \cdot i(k-1) + a_3 \cdot w(k-1) \\ F(k) = F_e(k) - F_{tc} \\ v(k) = a_2 \cdot v(k-1) + a_8 \cdot F(k-1) \\ s(k) = [a_6 \cdot (x(k) - 0,5)^2 + a_7] \cdot v(k) \\ x(k) = x(k-1) + T_p \cdot v(k-1) \end{cases} \quad (1)$$

gdzie: u – napięcie cewki ruchomej, s – siła elektromotoryczna indukowana w cewce, i – prąd cewki ruchomej, F – siła działająca na cewkę, F_e – siła elektromagnetyczna, x – położenie wózka na bieżni, v – prędkość wózka, a_1, a_2, \dots, a_8 – współczynniki stałe, F_{tc} – tarcie coulombowskie, T_p – okres próbkowania.

Na podstawie powyższych równań opracowano rozmyty model omawianego silnika, a następnie, bazując na otrzymanym modelu, regulowy regulator ze sprzężeniem od stanu obserwowanego [2]. Poniżej zaprezentowano schematy struktur otrzymanego regulatora regulowego (rys. 2) i obserwatora regulowego (rys. 3). Współczynniki wzmocnienia każdego z regulatorów składowych oraz współczynniki pętli korekcyjnej dla każdego z podobserwatorów wyznaczono w sposób konwencjonalny. Wyjścia regulatora oraz obserwatora są sumą ważoną wyjść poszczególnych ich elementów składowych, przy czym wagi są wyznaczane w sposób rozmyty, na podstawie funkcji przynależności przyjętych w rozmytym modelu obiektu.



Rys. 2. Regulator regulowy: a) schemat pojedynczego bloku; b) schemat regulatora; $K_{w,r}$ — wzmacnienie na wejściu w , w bloku r , u_r — ważone wyjście bloku r , k_r — waga wyjścia bloku r , u, u_1 — prędkość wózka w chwili bieżącej i w chwili poprzedniej



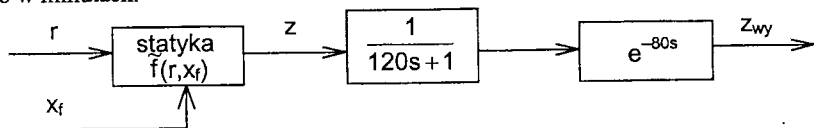
Rys. 3. Obserwator regulowy: a) równania pojedynczego bloku; b) schemat obserwatora; x_o — obserwowana wielkość wyjściowa, $Lp_{n,r}$ — współczynniki pętli korekcyjnej dla obserwatora

3.2 Układ regulacji z rozmytym regulatorem DMC

Ten układ sterowania jest złożony z silnie nieliniowego obiektu z opóźnieniem, oraz z rozmytego regulatora DMC bazującego na zwartej postaci konwencjonalnego (nierozmytego) algorytmu DMC [5].

Obiektem regulacji jest kolumna etylenowa z układami regulacji. Model obiektu, zaprezentowany pokrótce poniżej, jest owocem prac prowadzonych w Instytucie Automatyki i Informatyki Stosowanej PW wspólnie z zespołem specjalistów z Instytutu Chemii Przemysłowej.

Przyjęto, że model ten ma postać Hammerstein'a, tzn. składa się z nieliniowej statyki poprzedzającej liniową dynamikę. Struktura tego modelu została pokazana na rys. 4. Stałe czasowe podano w minutach.



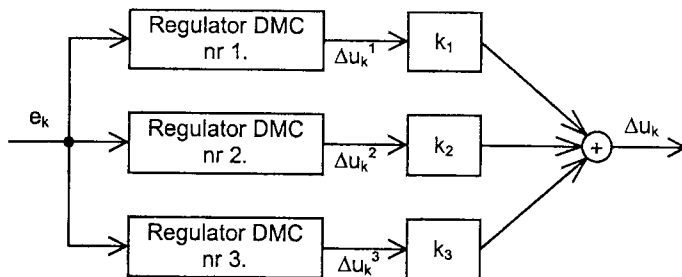
Rys. 4. Schemat blokowy modelu obiektu regulacji; r — sygnał sterujący, z_{wy} — wyjście obiektu regulacji (zanieczyszczenie produktu liczone w ppm), z — wyjście modelu statyki, x_f — zakłócenie mierzalne

Rozważany obiekt ma znaczne opóźnienie oraz jest silnie nieliniowy. Na podstawie otrzymanych przez autora próbek z modelu fizykochemicznego kolumny opracowano modele statyki badanego obiektu. Do dalszych badań wykorzystano model wielomianowy, wyznaczony metodą najmniejszych kwadratów. Jest on dany wzorem:

$$\begin{cases} z = b_0 + b_1 \cdot r + b_2 \cdot r^2 + b_3 \cdot r^3 + b_4 \cdot r^4 + b_5 \cdot r^5 \\ b_i = (a_{0i} + a_{1i} \cdot x_f + a_{2i} \cdot x_f^2) \end{cases} \quad (2)$$

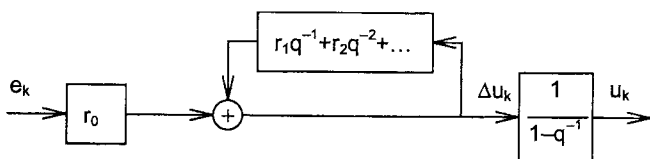
gdzie z – wielkość wyjściowa modelu statyki, r – wielkość wejściowa modelu statyki, x_j – wielkość zakłócająca, a_{ji} dla $j = 0, \dots, 2$ – stałe współczynniki.

Następnie opracowano model rozmyty, statyki kolumny, który jest połączeniem modelu wielomianowego z modelem wieloobszarowym (Takagi–Sugeno). Model ten posłużył (analogicznie jak w przypadku opisanym w rozdz. 3.1) do opracowania rozmytego regulatora DMC. Struktura tego regulatora została pokazana na rys. 5.



Rys. 5. Schemat blokowy rozmytego regulatora DMC; e_k – uchyb regulacji, Δu_k – przyrost sterowania, k_n ($n=1, 2, 3$) – wagi, Δu_k^n ($n=1, 2, 3$) – wyjścia regulatorów składowych

Każdy z regulatorów składowych jest konwencjonalnym regulatorem DMC w wersji zwartej zaproponowanej przez J. Pułaczewskiego w [3]. Struktura takiego regulatora została pokazana na rys. 6.



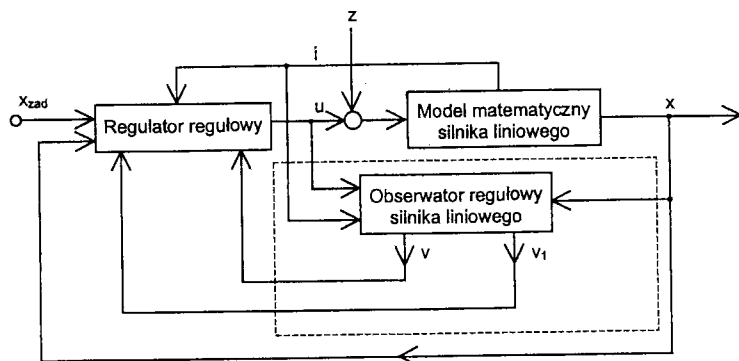
Rys. 6. Schemat blokowy regulatora DMC opisanego wzorem, u_k – sterowanie w chwili k , e_k – uchyb regulacji w chwili k , r_i ($i=0, \dots, m$) – współczynniki regulatora, Δu_k – przyrost sterowania w chwili k , q^{-1} – operator opóźnienia

Zaprezentowany powyżej rozmyty regulator DMC dzięki temu, że bazuje na wersji zwartej konwencjonalnego regulatora DMC, jest stosunkowo prosty i wymaga niewielkiej mocy obliczeniowej (główna część obliczeń, czyli wyznaczenie współczynników r_i , jest wykonywana tylko raz off-line). Na rys. 6 pokazano wersję podstawową regulatora składowego. Jednak w każdym obszarze można również zastosować scenariusz z uwzględnieniem zakłócenia mierzonego lub przewidywanego zaproponowany w [4].

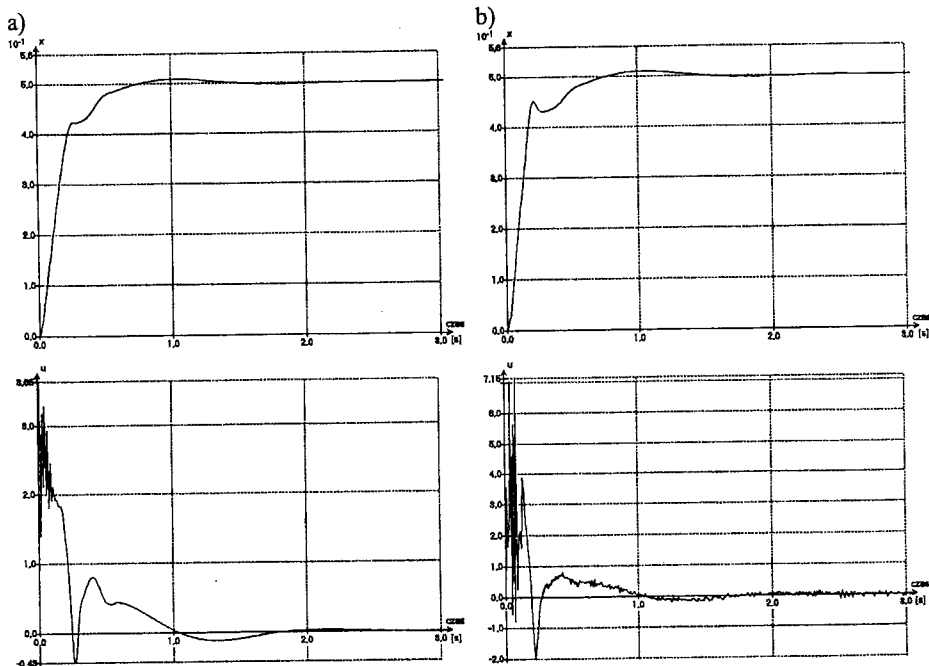
4. WYNIKI BADAŃ SYMULACYJNYCH

W niniejszym rozdziale przedstawiono wyniki badań symulacyjnych obu układów regulacji. Badania te prowadzono zarówno na jednym komputerze, jak również na stanowisku złożonym z dwóch maszyn (rys. 1).

Pierwszym z rozważanych jest układ regulacji obiektu elektromechanicznego z rozmytym, wieloobszarowym regulatorem ze sprzężeniem od stanu obserwowanego. Układ ten był symulowany w strukturze pokazanej na rys. 7. Poszczególne bloki układu regulacji opisano w rozdz. 3.1 i tak: model matematyczny silnika liniowego jest dany równaniami (1), zaś struktury bloków regulatora regulowego oraz obserwatora regulowego silnika liniowego są pokazane, odpowiednio, na rys. 2 i 3. Użyto oznaczeń przyjętych w rozdz. 3.1.



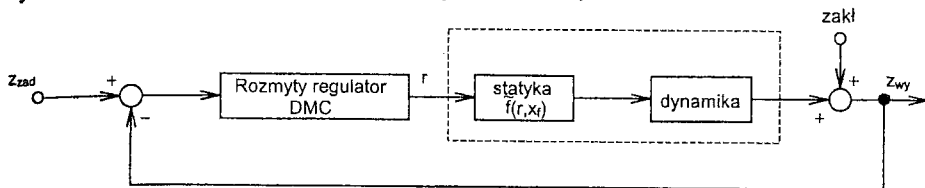
Rys. 7. Układ regulacji położenia wózka silnika o ruchu prostoliniowym z obserwatorem



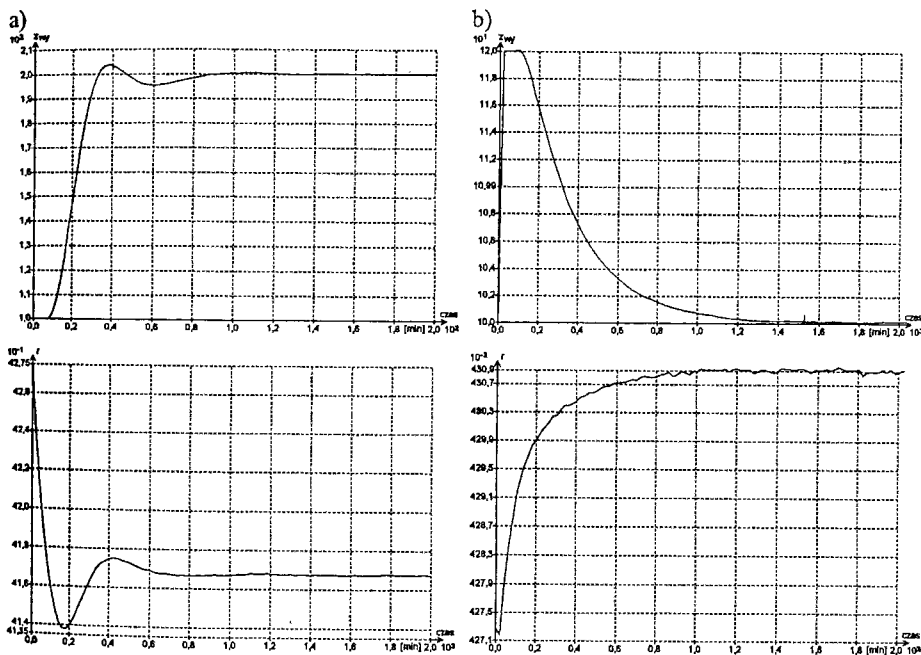
Rys. 8. Odpowiedzi układu regulacji z regulatorem rozmytym z obserwatorem na skok wartości zadanej; symulacja prowadzona a) na jednym, b) na dwóch komputerach; powyżej przebiegi położenia, poniżej przebiegi sterowania

Przykładowe wyniki symulacji zostały pokazane na rys. 8 [1]. W przypadku symulacji układu regulacji na dwóch komputerach, przesyłane sygnały są obciążone szumami (widać to szczególnie dobrze na przebiegu sterowania). Szумы te są związane z przetwarzaniem sygnałów. Zaprezentowane odpowiedzi układu regulacji na skok wartości zadanej różnią się w zależności od sposobu symulacji (jedna/dwie maszyny). W przypadku wykorzystania stanowiska dwukomputerowego, na początku odpowiedzi, sygnał sterowania przyjmuje większe wartości, a ponadto następuje chwilowe cofanie się wózka silnika. W dalszej części odpowiedzi, przebiegi mają już ten sam charakter i układ regulacji, z niewielkim przeregulowaniem dochodzi do stanu ustalonego.

Układ sterowania kolumny etylenowej z obszarowym regulatorem DMC został przedstawiony na rys. 9. Linia przerywaną oddzielono część przedstawiającą obiekt sterowania (rys. 4). Struktura rozmytego regulatora DMC została pokazana na rys. 5 (rozdz. 3.2). Przykładowe wyniki symulacji układu sterowania z rys. 9 pokazano na rys. 10.



Rys. 9. Układ regulacji z rozmytym regulatorem DMC; z_{wy} – wielkość wyjściowa, r – wielkość sterująca, z_{zad} – wartość zadana, x_i – zakłócenie mierzalne



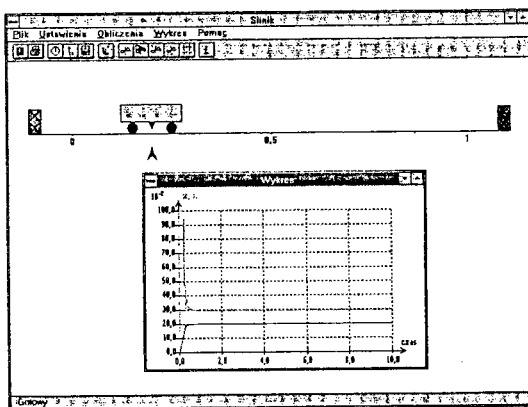
Rys. 10. Odpowiedzi układu regulacji z rozmytym regulatorem DMC a) na skok wartości zadanej, b) na skok zakłócenia na wejściu obiektu; symulacja prowadzona na dwóch komputerach; powyżej przebiegi wyjścia, poniżej przebiegi sterowania

Przedstawiono jedynie odpowiedzi uzyskane na stanowisku złożonym z dwóch komputerów, ponieważ nie wiele różnią się od wyników symulacji prowadzonej na jednym komputerze. Główną różnicą jest widoczne zaszumienie sygnałów sterowania, wyraźne szczególnie w odpowiedzi na skok zakłócenia. Ponadto widoczne są niewielkie wahania przebiegów wyjściowych. Ogólnie jednak, układ sterowania działa w sposób zadowalający.

5. OPIS WYKORZYSTANEGO OPROGRAMOWANIA

Wyniki badań zamieszczone w niniejszym referacie zostały otrzymane za pomocą symulatorów opracowanych przez autora w taki sposób, aby możliwe było ich zastosowanie na stano-

wisku badawczym opisanym w rozdz. 1. Symulatory (zarówno obiektów jak i urządzeń sterujących) napisano używając kompilatora Visual C++. Starano się, aby programy były przyjazne dla użytkownika i łatwe w obsłudze (rys. 11).



Rys. 11. Przykładowy ekran użytkownika wraz z oknem wykresu

Opracowane aplikacje dysponują graficznym interfejsem użytkownika. Żądane polecenia oraz opcje sterujące pracą programu można wybrać myszą z menu głównego programu, jak również z paska narzędzi. Ponadto w dolnej części okna każdej z aplikacji umieszczono pasek stanu, na którym wyświetlane są komunikaty oraz informacje o znaczeniu poszczególnych poleceń.

Uzyskane w wyniku obliczeń przebiegi mogą zostać pokazane na wykresie, jak również przeniesione do innych programów w celu ich dalszej analizy (w formie pliku tekstowego). Istnieje możliwość wyboru zmiennych, które mają być pokazane na wykresie, do-

wolnego jego skalowania, kopiowania w standardowy sposób, a także wydrukowania.

6. PODSUMOWANIE

W referacie omówiono zastosowanie stanowiska badawczego przeznaczonego do projektowania i badania regulatorów, do testowania opracowanych regulatorów nieliniowych (rozmytych regulatorów wieloobszarowych). Przedstawiono użyte stanowisko badawcze oraz zaproponowaną procedurę testowania algorytmów sterowania.

Omówiono badane układy regulacji silnie nieliniowych obiektów z wiloobszarowymi regulatorami nieliniowymi. Zastosowanie obu regulatorów: rozmytego regulatora ze sprzężeniem od stanu obserwowanego i rozmytego regulatora DMC dały zadowalające rezultaty potwierdzone wynikami przeprowadzonych badań symulacyjnych.

LITERATURA

- [1] Piotr Marusak: *System wspomagania projektowania i badania algorytmów regulacji ze sterownikami PLC i symulatorami obiektów*, Prace X konferencji Symulacja Procesów Dynamicznych SPD-10, Zakopane-Kościelisko 15-19 czerwca 1998.
- [2] Piotr Marusak, Jerzy Pułaczewski: *Fuzzy nonlinear servo. Identification, designing, testing*. Prace sympozjum MMAR'98, Międzyzdroje 1998.
- [3] Jerzy Pułaczewski: *Algorytm regulacji DMC. Przypadek obiektu z opóźnieniem o jednym wejściu i jednym wyjściu*, raport IAiS PW nr 98-02, Warszawa, styczeń 1998.
- [4] Piotr Marusak, Jerzy Pułaczewski: *Szczególne zalety algorytmu regulacji Dynamic Matrix Control (DMC)*. Prace konferencji Automation'99, Warszawa, 24-26 marca 1999.
- [5] Piotr Marusak: *Rozmyte algorytmy regulacji typu DMC dla obiektów nieliniowych*, raport IAiS PW nr 99-33, Warszawa, maj 1999.