ZESZYTY NAUKOWE POLITECHNIKI ŚLĄSKIEJ 1996
Seria: AUTOMATYKA z.118 Nr kol. 1338

Marek BIELECKI, Jarosław WARCZYŃSKI
Politechnika Poznańska

STANOWISKO DOŚWIADCZALNE DO BADANIA STEROWANIA ROZMYTEGO

Streszczenie. W referacie zaprezentowano stanowisko doświadczalne do badania układów sterowania rozmytego wykorzystujących paradygmat *modelu na podstawie wiedzy*. Stanowisko to umożliwia modelowanie różnych obiektów sterowania oraz formułowanie baz wiedzy, określających działanie regulatora rozmytego. Ponadto w pracy przedstawiono przykładowy eksperyment z zakresu sterowania z użyciem regulatora rozmytego działającego w układzie wolnym od zakłóceń oraz poddanym zakłóceniom przypadkowym. Omówiono wyniki eksperymentów, formułując uprzednio w poglądowy sposób zasady tego rodzaju sterowania.

AN EXPERIMENTAL SET-UP FOR STUDIES ON FUZZY CONTROL

Summary. The paper presents an original set-up dedicated for studies on fuzzy control systems. The set-up facilities modelling a wide class of plants to be controlled and enables formulation of knowledge bases determining the algorithms for fuzzy controllers. The paper is also provided with some results of an example experiment with the application of the fuzzy controller acting in the presence of stochastic disturbances and without them. The principles of the fuzzy control theory are formulated in the short demonstrative way.

1. Wstęp

Podstawowym postulatem w sprawie celów procesu kształcenia na uczelniach technicznych, formułowanym w różnych kompetentnych gremiach, jest dobre przygotowanie kadry inżynierskiej na potrzeby ośrodków przemysłowych kraju i regionu; postulat ten formułowany jest również na forum Krajowej Konferencji ADPP (porównaj np. pracę [1], w całości poświęconą kształceniu na uczelniach technicznych).

Nawiązując do powyższego, w prezentowanej pracy przedstawiono stanowisko badawcze przeznaczone do laboratoryjnej demonstracji nowej metodologii sterowania procesami przemysłowymi, wykorzystującej paradygmat *modelu na podstawie wiedzy*, nazywanej *sterowaniem rozmytym*.

W procesie nauczania teorii i praktyki sterowania automatycznego istnieje silna potrzeba demonstrowania efektów działania różnych algorytmów sterowania procesami rzeczywistymi. Brak takich obiektów podczas zajęć dydaktycznych jest znany i trudny do przezwyciężenia. Pozostaje zatem symulacja obiektów sterowania, najczęściej cyfrowa, realizowana na tym samym sprzęcie komputerowym, na którym programuje się algorytmy. Wszystko sprowadza się w końcu do "globalnej" symulacji, a zajęcia tego rodzaju są nazywane niekiedy przez studentów grami komputerowymi.

W celu częściowego zbliżenia zajęć laboratoryjnych z teorii sterowania automatycznego do badań nad obiektami fizycznymi zaprojektowano i wykonano stanowisko, które jest przedmiotem niniejszego referatu.

2. Sterowanie rozmyte

2.1. Podstawy

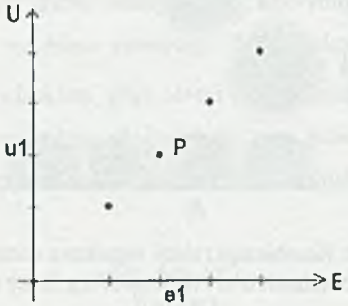
Jak wiadomo, metody klasycznej teorii sterowania opierają się na sformalizowanym opisie analitycznym, co oznacza, że wymagają one, aby algorytm sterowania był wyrażony za pomocą modelu matematycznego w postaci równań różniczkowych, różnicowych bądź algebraicznych. Idea sterowania rozmytego bazuje natomiast na opisie algorytmu za pomocą reguł logicznych [3,4,5,6].

Zauważmy, że klasa modeli matematycznych, charakterystycznych dla metod klasycznej teorii sterowania, wiąże zmienne i parametry modelu wykorzystując do tego operacje matematyczne takie, jak dodawanie, różniczkowanie itd. Parametry i zmienne modelu są tutaj określane poprzez wartości liczbowe. Natomiast klasa modeli logicznych określa wzajemne relacje pomiędzy zmiennymi i parametrami modelu za pomocą operacji logicznych takich, jak koniunkcja, alternatywa, implikacja itd., przy czym zmienne oraz parametry mają tutaj charakter lingwistyczny. Wartości lingwistyczne zmiennych nie są, oczywiście, "ciągłe", lecz mają raczej charakter "dyskretny", albowiem charakteryzują one zmienne w sposób jakościowy, a nie ilościowy, np. zmienna *uchyb* mogłaby przyjmować wartości: "duży_dodatni", "mały_dodatni", "zerowy", "mały_ujemny", "duży_ujemny". Wartości te tworzą zbiór etykiet lingwistycznych jednej zmiennej. Etykiety te są reprezentowane przez zbiory rozmyte, co umożliwia uwzględnienie ich nieścisłego znaczenia, pozostawiając jednak możliwość wyprowadzania wniosków z tak nieściśle określonych danych. Zbiór reguł określający algorytm sterowania umożliwia realizację strategii heurystycznych, będących

najczęściej odbiciem ludzkiego doświadczenia i rozumowania. Reguły te operują na etykietach lingwistycznych wejść i wyjść układu sterowania, przy czym teoria zbiorów rozmytych udostępnia odpowiednie instrumentarium dla tego operowania [2,3,4].

Celem prezentacji sterowania rozmytego na stanowisku dydaktycznym było przystępne przekazanie studentom podstawowych pojęć z zakresu teorii zbiorów rozmytych, ze szczególnym uwzględnieniem analogii i różnic względem klasycznej teorii sterowania automatycznego.

Zauważmy, że przy obu sposobach sterowania regulator wypracowuje sygnał sterujący obiektem na podstawie uchybu regulacji, czyli różnicy między wartością zadaną i wielkością regulowaną. Regulator konwencjonalny (bez pamięci, liniowy lub nieliniowy) wyznacza sygnał sterujący w sposób jednoznaczny, zgodnie ze swoją charakterystyką statyczną. Algorytm regulacji dany jest zatem jako zbiór punktów na płaszczyźnie we/wy, ewentualnie z odcinkami interpolującymi (rys. 1).



Rys. 1. Algorytm regulatora konwencjonalnego
Fig. 1. Algorythm of the conventional controller

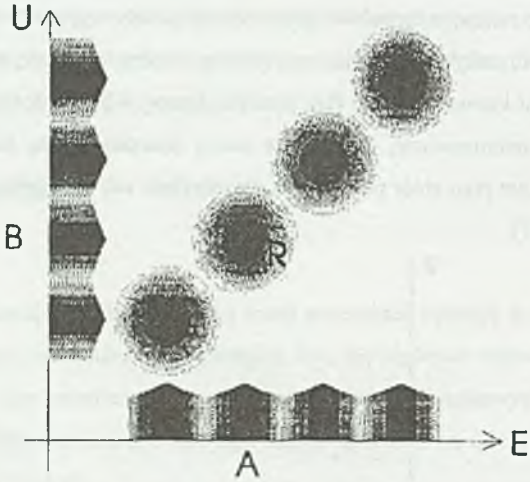
Punkty charakterystyki statycznej regulatora stanowią przecięcia prostopadłych linii wyprowadzonych z wartości sygnałów wejściowych i odpowiadających im sygnałów wyjściowych. Regulator rozmyty dokonuje podziału przestrzeni uchybu, aby można było oznaczyć uchyb poprzez zmienną rozmytą, nadając mu wartości typu "mały", "nieduży", "średni" itp. Każda z tych wartości zmiennej rozmytej stanowi pewien zbiór rozmyty A o funkcji przynależności $\mu_A(e)$. W podobny sposób określa się zmienną rozmytą dla sygnału wyjściowego u regulatora, określając ją zazwyczaj wyrażeniami takimi jak "słaby", "umiarkowany", "silny" itp. Odpowiadający im pewien zbiór rozmyty, np. B, opisany jest odpowiednio przez funkcję przynależności $\mu_B(u)$.

Podstawą określania związku wejścia regulatora (uchyb e) z wyjściem (sterowanie u) jest relacja rozmyta [2,3,4,6]. Stanowi ona, podobnie jak punkt charakterystyki statycznej

z rys. 1, przecięcie (część wspólną) dwóch zbiorów rozmytych - wejściowego i wyjściowego. Jest więc w istocie dwuwymiarowym zbiorem rozmytym o funkcji przynależności zdefiniowanej jako:

$$\mu_R(e,u) = \min[\mu_A(e), \mu_B(u)]$$

Oznacza to, że wartości funkcji przynależności relacji R stanowią mniejszą z dwóch wartości tej funkcji dla elementów e i u zbiorów A i B. Należy zauważyć, że w tak określonej części wspólnej operator logiczny AND został zastąpiony operatorem "min".



Rys. 2. Kombinacja relacji regulatora rozmytego
Fig. 2. Combination of relations of the fuzzy controller

Jak wspomniano, relacja rozmyta odpowiada jednemu punktowi charakterystyki statycznej regulatora. W celu określenia pełnego algorytmu działania regulatora rozmytego potrzebna jest więc większa ilość takich relacji, zgodnie z podziałem przestrzeni wejścia E i wyjścia U. Taką kombinację relacji R otrzymuje się po zastosowaniu operatora logicznego OR, a jej funkcję przynależności definiuje się jako [2,3,4,6]:

$$\mu_R = \max[\mu_{R_1}, \mu_{R_2}, \ldots, \mu_{R_n}]$$

Przykładową kombinację takich relacji przedstawiono na rys. 2.

Najistotniejszym zadaniem regulatora rozmytego, realizowanego praktycznie przez program komputerowy, jest wyznaczenie sterowania u na podstawie relacji rozmytej R_i i wejścia rozmytego e danego jako zbiór rozmyty A. Odbywa się to według tzw. złożeniowej reguły wnioskowania [2,3,4,6]. Wnioskowanie należy tu rozumieć jako wybór właściwego sterowania na podstawie rozmytego wejścia i odpowiedniej relacji rozmytej. Zgodnie z tą

regułą, dla danej relacji R w przestrzeni ExU można określić podzbiór B' przestrzeni U, na podstawie podzbioru A' przestrzeni E:

$$B' = A' \circ R$$

gdzie $\circ$ jest złożeniem typu max-min o funkcji przynależności określonej jako

$$\mu_{B'}(u) = \max\{\min[\mu_{A'}(e), \mu_R(e,u)]\}$$

Powyższe złożenie polega zatem na utworzeniu najpierw dwuwymiarowego zbioru rozmytego o funkcji przynależności wynikającej z operacji "min", a następnie jednowymiarowego podzbioru rozmytego o funkcji przynależności wynikającej z operacji "max". Ten podzbiór rozmyty stanowi poszukiwane sterowanie w odpowiedzi na uchyb A' (rys. 2).

Warto również zauważyć, że ten sam wynik można otrzymać wykonując formalnie mnożenie wektora wierszowego A' przez macierz R, przy czym mnożenie elementów należy zastąpić operacją "min", a dodawanie - operacją "max".

Ostatnim zadaniem programu realizującego algorytm regulatora rozmytego jest przetworzenie wynikowego podzbioru rozmytego B' o funkcji przynależności $\mu_{B'}(u)$ na konkretną wielkość sterującą obiektem, gdyż obiekt (jako urządzenie techniczne) nie daje się sterować w sposób nieściśle określony. Rozwiązanie tego zadania otrzymuje się zazwyczaj drogą uśredniania wyjścia z wagą określoną przez funkcję przynależności $\mu_{B'}(u)$.

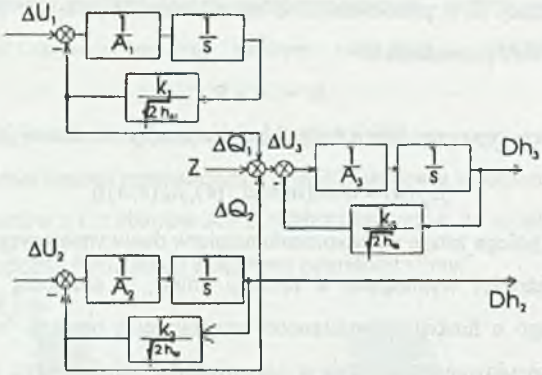
Wówczas otrzymujemy:

$$\bar{u} = \frac{\Sigma u_i \times \mu_{B'}(u_i)}{\Sigma \mu_{B'}(u_i)}$$

gdzie u_i - elementy podzbioru rozmytego B'.

2.2. Układ sterowania

Do demonstracji działania układu sterowania rozmytego wybrano obiekt dwuwymiarowy w postaci trzech zbiorników, z których dwa pierwsze są bezpośrednio sterowane strumieniami dopływów U1 i U2, a wypływające z nich strumienie mieszają się napełniając trzeci zbiornik. Jako sygnały wyjściowe przyjęto poziomy cieczy w zbiornikach drugim i trzecim. Przyjęto, że układ jest liniowy w otoczeniu punktu pracy i zamodelowano go za pomocą uniwersalnego modelu analogowego opisanego w p. 3. Schemat analogowy takiego obiektu przedstawiono na rys. 3.



Rys. 3. Model obiektu sterowania
Fig. 3. Model of the Plant

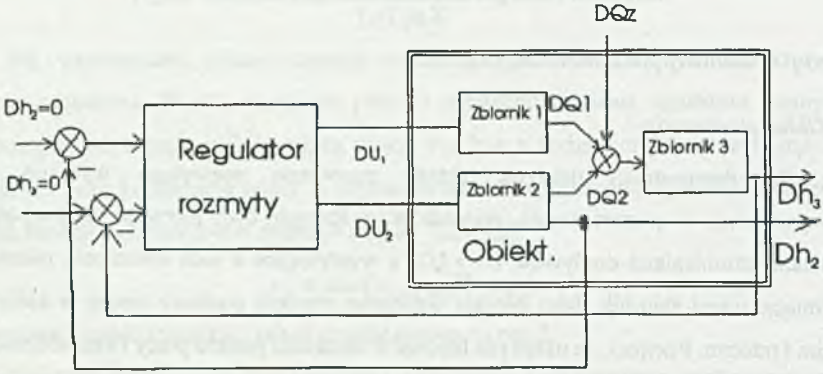
Przyjęto, że wydajność dopływów jest ograniczona, czyli

$$0 \le U_1 \le U_{1max}$$

$$0 \le U_2 \le U_{2max}$$

Zakłóceniem jest dopływ dodatkowy do zbiornika 3 o charakterze losowym, o rozkładzie normalnym, wartości oczekiwanej równej 0 i zadanej wariancji.

Na rys. 4 przedstawiono zamknięty układ sterowania z opisanym powyżej obiektem, zawierający regulator rozmyty. Zakłada się stałe wartości zadane poziomów w zbiornikach 2 i 3, czyli zadaniem regulatora jest stabilizacja poziomów w obecności zakłóceń.



Rys. 4. Układ sterowania zbiornikami z regulatorem rozmytym
Fig. 4. Fuzzy Control System for three Tanks

Program realizujący algorytm regulatora rozmytego zawiera szereg procedur związanych z wykonaniem zadań opisanych powyżej:

1. Procedura odczytująca sygnały analogowe z modelu.
2. Procedura dokonująca podziału (rozmycia) wejścia i wyjścia przy użyciu "łuków rozmytometrycznych" [3]. W jej wyniku otrzymuje się uchyb w postaci rozmytej oraz wartość zmiennej dwustanowej określającą,czy uchyb jest dodatni czy ujemny.
3. Procedura definiująca relacje pomiędzy poszczególnymi zmiennymi rozmytymi na wejściu i wyjściu regulatora.
4. Procedura składająca poszczególne relacje w jedną. Parametrami jej są liczba wejść i wyjść oraz składane relacje.
5. Procedura składająca wejścia z odpowiednią relacją zgodnie ze złożeniową regułą wnioskowania.
6. Procedura zmieniająca wartość rozmytą na określoną wielkość sterującą obiektem.

3. Stanowisko doświadczalne

Przedstawiony powyżej układ został zamodelowany w ramach specjalnie wykonanego stanowiska doświadczalnego, którego głównym elementem jest komputer klasy PC, na którym realizowany jest regulator rozmyty. Komputer ten wyposażony jest w moduł we/wy analogowych, poprzez który jest on połączony z niewielkim urządzeniem, będącym w istocie małą maszyną analogową, nazwaną tutaj uniwersalnym modelem analogowym (UMA). Komputer i model połączone są przewodem wielożyłowym, po którym komunikacja odbywa się za pośrednictwem sygnałów analogowych. Istnieje zatem możliwość obserwacji, rejestracji i przetwarzania tych sygnałów przy użyciu przyrządów analogowych, czyli tak, jak gdyby sygnały te były bezpośrednimi nośnikami informacji o stanach ciągłych i dyskretnych procesów przemysłowych. Niezależnie od tego wstępna wizualizacja dynamiki modelu odbywa się już w nim samym dzięki zastosowaniu linijek świetlnych i wyświetlacza cyfrowego.

UMA jest urządzeniem przeznaczonym nie tylko do współpracy z komputerem, lecz może on również funkcjonować autonomicznie. Spełnia wówczas rolę podręcznej maszyny analogowej z własnym źródłem sygnału wymuszającego i prostym układem pomiarowym. Niewielkie wymiary (27×6cm), wbudowany zasilacz i dwie linijki świetlne do wizualizacji działania umożliwiają posługiwanie się tym urządzeniem nawet na wykładach, np. do ilustracji zagadnień stabilności i dokładności statycznej układów zamkniętych.

Możliwości modelu są jednak większe, gdyż ma on również dwa bloki sprzęgające go z modułem A/C i C/A komputera. Założono przy tym, że model powinien umożliwiać symulację

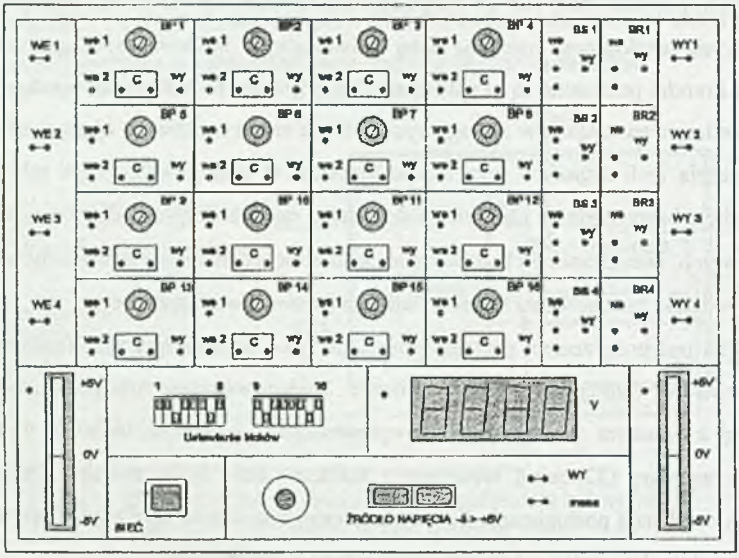
analogową obiektów wielowymiarowych o liczbie do 4 wejść i 4 wyjść. Z uwagi na to, że zastosowana karta we/wy analogowych firmy AMBEX ma tylko 2 wyjścia analogowe, model został wyposażony we własny demultiplekser jednego sygnału wyjściowego karty na swoje 4 sygnały wejściowe.

Na rys. 5 przedstawiono górną płytę modelu uniwersalnego, stanowiącą też tablicę łączeniową bloków dynamicznych.

Na tylnej płycie znajduje się gniazdo wielostykowe do podłączenia specjalnego przewodu karty we/wy analogowych LC011.

Model uniwersalny składa się z następujących elementów funkcjonalnych:

- 16 bloków dynamicznych BP1 - BP16 o dwóch wejściach addytywnych, regulowanym wzmocnieniu, z wymiennym kondesatorem i przełącznikiem funkcji,
- 4 bloków sumujących BS1 - BS4 o 3 wejściach,
- 4 bloków różnicowych BR1 - BR4 o dwóch wejściach,
- 4 gniazd wejściowych, sprzężonych poprzez demultiplekser z wyjściem analogowym karty AMBEX,
- 4 gniazd wyjściowych, sprzężonych bezpośrednio z 4 wejściami analogowymi karty AMBEX,



Rys. 5. Widok uniwersalnego modelu analogowego
Fig. 5. View of the universal analog model

- 2 linijek świetlnych z gniazdami wejściowymi,
- 1 wyświetlacza cyfrowego,
- 1 źródła napięcia z możliwością zadawania nastawionego skoku.

Łączenie bloków funkcjonalnych odbywa się poprzez ich gniazda, za pomocą przewodów z wtykami. Gniazda i wtyki są złocone, zgodne ze standardem Cannon.

Komputer w trybie "On line" spełnia w stanowisku dwa podstawowe zadania:

- steruje modelem według zaprogramowanego algorytmu,
- zapewnia wizualizację i zapis uzyskanych przebiegów.

Program komputera steruje również demultiplekserem 4 sygnałów wejściowych modelu, wykorzystując do ich adresowania dwa wyjścia cyfrowe karty AMBEX.

W trybie "Off line" odbywa się analiza i przetwarzanie uzyskanych przebiegów, np. w celu optymalizacji sterowania. Przewiduje się również demonstrację optymalizacji czynnej (np. samonastrajanie regulatora PID, korekcja nieliniowa).

Do obsługi stanowiska utworzono specjalny moduł programowy pracujący w środowisku Windows. Umożliwia on m.in. konfigurację układu rejestracji, wybór okien do wizualizacji ON LINE i OFF LINE, uruchamianie i zatrzymywanie procesu sterowania.

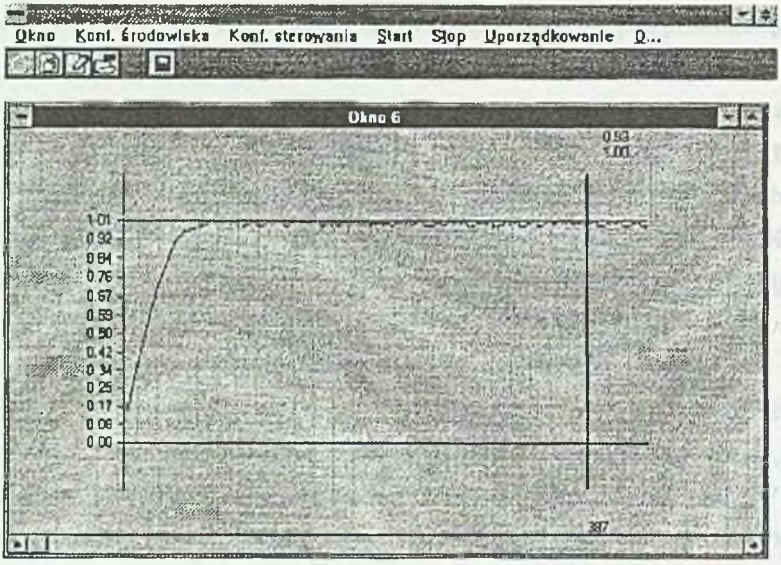
4. Eksperyment

Przeprowadzone eksperymenty ukazały charakterystyczne cechy sterowania rozmytego, objawiające się jako nieregularne oscylacje. Są one związane z konieczną dyskretyzacją przestrzeni wejść i wyjść, a także, co dotyczy przetwarzania analogowo-cyfrowego, z częstotliwością próbkowania.

Wykonano badania nad układem bez zakłóceń zewnętrznych, z zakłóceniami zdeterminowanymi i o charakterze przypadkowym.

Na rys. 6 przedstawiono przebieg poziomu w trzecim zbiorniku dla przypadku bez zakłóceń.

Wprowadzenie zakłóceń powoduje wzrost amplitudy oscylacji, aż do przebiegu niestabilnego, zarówno dla zakłóceń skokowych, jak i przypadkowych. Przewiduje się przeprowadzenie badań ilościowych tego rodzaju zjawisk.



Rys.6. Przebieg poziomu w zbiorniku 3
Fig. 6. Trend of the level in the 3-th tank

LITERATURA

1. Filipowicz B., Oborski W., Borowik B.E.: Optymalizacja strukturalna systemów edukacyjnych, IX KK ADPP, Kozubnik k. Porąbki, 14-17.09.1994, Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, seria Automatyka, z. 115, Gliwice 1994, s.13-23.
2. Kacprzyk J. Zbiory rozmyte w analizie systemowej, PWN, Warszawa 1986.
3. Kouatli I., Jones B.: A guide to the design of fuzzy control systems for manufacturing processes. Journal of Intelligent Manufacturing, vol.1 No.4, 1990, pp. 231-244.
4. Sugeno M.:Industrial Applications of Fuzzy Control, North-Holland Amsterdam, 1985
5. Zadeh L.: Fuzzy sets. Information Control, vol. 8, 1965, pp. 338-353.
6. Zadeh L.: Outline of a new approach to the analysis of complex systems and decision processes. IEEE Trans. Systems, Man and Cybernetics SMC-3, 1973, pp. 28-44.

Recenzent: Dr hab.inż. Andrzej Świerniak, prof.Pol.Śl.

Wpłynęło do Redakcji do 30.06.1996 r.

Abstract

This paper presents an original experimental set-up for studies on fuzzy control systems. It facilities modelling a wide class of plants to be controlled and enables formulation of knowledge bases determining algorithms for the fuzzy controllers. Programs resulting from

the fuzzy control algorithms are composed of procedures aimed at calculation of the current error, assignment of the error value to a fuzzy variable, development of the fuzzy relation between the input and output signals of the controller, and calculation of the deterministic output required to regulate the process.

The set-up consists of the universal analogue model connected with a PC- compatible machine via AMBEX LC011 measurement and control card. The model is a small analogue computer equipped with an input signals demultiplexer, 16 dynamic and 8 static blocks, input signal source, digital and LED displays and a set of cables. It enables modelling of a various multidimensional (up to 4 input and 4 output) interfaced with the PC plants. A special Windows-based user interface has been designed for running control strategies as well as for visualisation and analysis of the results of experiments.

The paper is also provided with some results of an example control experiment involving application of the fuzzy controller which was to act in the presence of stochastic disturbances and without them. Previously the principles of the fuzzy control theory in the short demonstrative way have been formulated.