

Andrzej PIECZYŃSKI

UNIwersytet Zielonogórski, Instytut Sterowania i Systemów Informatycznych

Adaptacyjny regulator z rozmytą bazą wiedzy

Dr inż. Andrzej PIECZYŃSKI

Adiunkt Uniwersytetu Zielonogórskiego. Absolwent Wydziału Elektrycznego Wyższej Szkoły Inżynierskiej w Zielonej Górze, dyplom (1978) w zakresie automatyki i metrologii. Tytuł doktora nauk technicznych uzyskał na Wydziale Elektroniki Politechniki Warszawskiej (1985). Aktualnie jest pracownikiem Wydziału Elektrotechniki, Informatyki i Telekomunikacji Uniwersytetu Zielonogórskiego. Zainteresowania naukowe w ostatnich latach koncentrują się na dwóch pokrewnych zagadnieniach. Są to: systemy ekspertowe w diagnostyce procesów przemysłowych oraz sztuczna inteligencja z rozmytą reprezentacją wiedzy.



Streszczenie

W artykule przedstawiono analizę wrażliwości układu regulacji z rozmytym regulatorem typu PD na zmiany własności dynamicznych sterowanego obiektu. W celu uzyskania mniejszej wrażliwości układu zaproponowano wprowadzenie adaptacyjnych pętli korekcyjnych. Dla regulatora rozmytego o dynamice PD wprowadzono dwie pętle adaptacyjne oparte na specjalizowanych regułowych systemach ekspertowych z rozmytą bazą wiedzy. Ocenę poprawności i efektywności zaproponowanego rozwiązania przeprowadzono w oparciu o symulacyjne eksperymenty, których wyniki zamieszczono w artykule.

Abstract

The paper presents a sensitivity analysis of a control circuit with fuzzy controller. To improve of fuzzy logic controller (FLC) features, a new version of FLC with adaptive loops is used. In the FLC with PD (proportional, differential) action, dynamics is introduced to adaptive loops, based on rule expert systems with fuzzy knowledge base. Characteristics of the adaptive FLC are tested on the base a few experiments which results are presented in this paper.

1. Wstęp

Układy adaptacyjne stanowią grupę układów sterowania, których własności dynamiczne są w określonym sensie najlepiej dopasowane do aktualnych, zmieniających się w sposób nieprzewidywany *a priori* własności sterowanego procesu. Pod względem formy realizacji funkcji adaptacyjnych wyróżnia się adaptację pośrednią i bezpośrednią.

Adaptacja pośrednia opiera się na estymacji parametrów modelu toru sterowania. Najczęściej stosowane, w metodzie adaptacji pośredniej, algorytmy identyfikacji (rekurencyjny algorytm najmniejszych kwadratów (RLS), rekurencyjny algorytm największej wiarygodności (RML)) oraz algorytmy regulacji (minimalnowariancyjny, minimalnoczasowy oraz PID) niestety nie zapewniają dobrej efektywności adaptacji dla obiektów z opóźnieniem. Ponadto obiekt i regulator muszą spełniać warunki identyfikacji [3].

Adaptacja bezpośrednia realizuje estymację takich parametrów algorytmów regulacji, które są w określonym sensie dopasowywane do aktualnych właściwości obiektu. Dostosowanie się polega najczęściej na odpowiednim nastrojeniu parametrów regulatora. Zmiana parametrów oparta jest na określonych zależnościach wiążących optymalne nastawy regulatora z wybranymi parametrami obiektu [1]. Większość adaptacyjnych układów sterowania bazuje na konwencjonalnym regulatorze PID o nastajalnych parametrach poszczególnych członów. Jednakże cechą wspólną sterowania konwencjonalnego jest fakt, że synteza takiego algorytmu sterowania wymaga sformalizowanego opisu analitycznego układu sterowania w postaci modelu matematycznego. Dla złożonych i w większości nieliniowych procesów przygotowanie opisu analitycznego jest bardzo trudne, czasami nieefektywne lub wręcz niemożliwe [3].

Alternatywnym rozwiązaniem jest zastosowanie algorytmów sterowania z wprowadzonymi zasadami ludzkiego sposobu

pojmowania i myślenia oraz logiki rozmytej [8]. Bazując na teorii zbiorów rozmytych [4] opracowano algorytm regulatora rozmytego (ang. *Fuzzy Logic Controller, FLC*) opisany heurystycznie z użyciem aparatu wnioskowania przybliżonego [2].

2. Regulator rozmyty

Pod nazwą regulator rozmyty (FLC) rozumie się prawo sterowania, które jest opisane przez system o regułowej bazie wiedzy i mechanizmie sterowania o logice rozmytej [8]. Regulator FLC jest systemem ekspertowym z rozmytą reprezentacją wiedzy. Baza reguł jest główną częścią FLC w postaci podobnej do konwencjonalnego prawa sterowania.

Typowy FLC, zaproponowany przez Mamdaniego i Assiliana w 1975 [2], opisuje zależność między sterowaniem $u(k)$, a uchybem $e(k)$ oraz zmianą uchybu $\Delta e(k) = e(k) - e(k-1)$:

$$u(k) = F(e(k), \Delta e(k)) \quad (1)$$

Prawo sterowania F opisane jest za pomocą bazy reguł działającej na etykietach lingwistycznych wejść i wyjść. Analizując zależność (1) można zauważyć oczywiste podobieństwo między FLC typu Mamdaniego i dobrze znanym algorytmem regulatora PD:

$$u(k) = K_p e(k) + K_D \Delta e(k) \quad (2)$$

Dla typowego regulatora FLC prawo sterowania F zostało opisane w postaci tablicy decyzyjnej przez McVicara-Whelena [8]. Przy definicji zasad rozmywania wejść i wyjść FLC zaleca się przeprowadzić normalizację zakresu zmian tych wielkości do przedziału $[-1, 1]$. Wyznaczone w procedurze normalizacyjnej współczynniki (K_E, K_D, K_P) są parametrami, które można zastosować w procesie strojenia FLC. Należy zaznaczyć, że strojenie regulatora FLC jest wciąż procedurą trudniejszą i bardziej skomplikowaną niż strojenie regulatora konwencjonalnego. Przyczyną tego jest fakt, że FLC jest układem nadzwyczaj elastycznym (duża liczba parametrów definiujących funkcje przynależności i mechanizm wnioskowania). Najbardziej skuteczne wyniki otrzymuje się na podstawie kombinacji dobrego zrozumienia sterowanego obiektu przez eksperta i zastosowanie analogii między regulatorami FLC i PID.

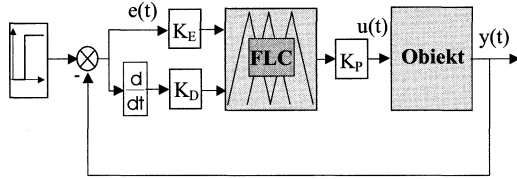
3. Sterowanie obiektem drugiego rzędu z opóźnieniem za pomocą regulatora FLC

Obiekty drugiego rzędu opisane transmitancją

$$G(s) = \frac{K_o e^{T_0}}{s(Ts + 1)} \quad (3)$$

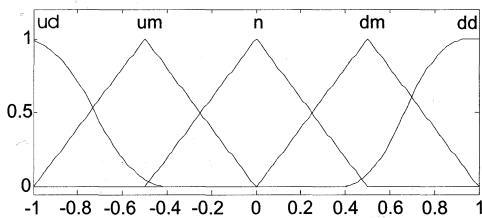
stanowią często spotykaną grupę modeli dynamicznych prostych zespołów przemysłowych. Przykładami mogą być: silnik elektryczny (pobudzany napięciem wirnika przy kącie obrotu wału wyjściowego jako odpowiedzi), silnik hydrauliczny i pneumatyczny oraz zbiornik z płynnym medium, w którym sterowaniu podlega ilość zgromadzonego płynu [5]. W przedstawionej transmitancji (3) umieszczono moduł odpowiedzialny za opóźnienie transmisyjne o parametrze T_0 . Wstępną analizę struktury systemu sterowania można przeprowadzić w oparciu o współczynnik nazywany podatnością obiektu na sterowanie i opisany zależnością $\tau = T/T_0$ [1]. Wartość współczynnika τ świadczy o złożoności układu sterowania rozpatrywanym procesem [6]. Dla wartości $\tau > 10$ mamy do czynienia z obiektami łatwymi, w przeciwnym przypadku stopień złożoności układu sterowania

wzrasta wraz z malejącą wartością tego parametru. Obiekty, dla których współczynnik $\tau \leq 2$ zaliczane są do bardzo trudnych do regulacji.

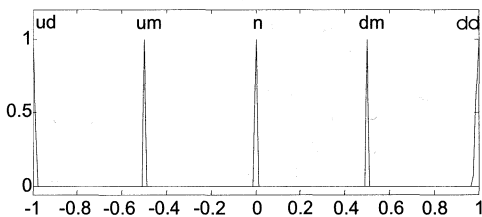


Rys. 1. Schemat blokowy układu regulacji

W przedstawionych wynikach badań zastosowano następujące wartości współczynników transmitancji (3): $K_o = 1, T = 10$ oraz w pierwszym etapie badań $T_0 = 1$. Dla obiektu opisanego powyższymi parametrami zaprojektowano układ sterowania (rys. 1) z regulatorem rozmytym. Sygnały wejściowe regulatora poddano procesowi rozmywania z równomiernym rozmieszczeniem 5 zbiorów rozmytych o funkcjach przynależności przedstawionych na rys. 2. Do opisu zbiorów oznaczonych jako *ud* i *dd* zastosowano funkcje sigmoidalne co pozwala uniknąć braku kompletności bazy wiedzy dla dużych wartości amplitudy sygnału wejściowego.



Rys. 2. Proces rozmywania wejść



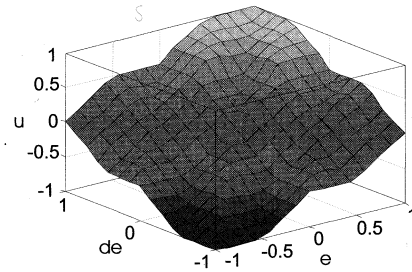
Rys. 3. Proces rozmywania wyjść

Wyjście regulatora opisano w reprezentacji rozmytej za pomocą 5 zbiorów rozmytych typu ostry trójkąt (rys. 3). Tablicę decyzyjną opisującą funkcję przetwarzania oraz powierzchnię przetwarzania rozmytego regulatora zamieszczono odpowiednio na rys. 4 i rys. 5. W procesie przetwarzania rozmytej reprezentacji wejść zastosowano operator t-normy typu *min*, s-normy typu *max*, implikacji typu *min* oraz operator akumulacji wyjść poszczególnych reguł typu *max*. Zadanie wyodróżnienia rozmytej odpowiedzi regulatora zrealizowano w oparciu o metodę środka obszaru COA (ang. *Center of Area*).

e \ de	ud	um	n	dm	dd
ud	ud	ud	um	um	n
um	ud	um	um	n	dm
n	um	um	n	dm	dm
dm	um	n	dm	dm	dd
dd	n	dm	dm	dd	dd

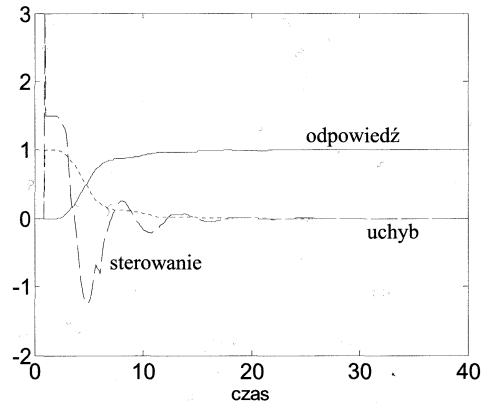
u(t)

Rys. 4. Tablica decyzyjna regulatora FLC



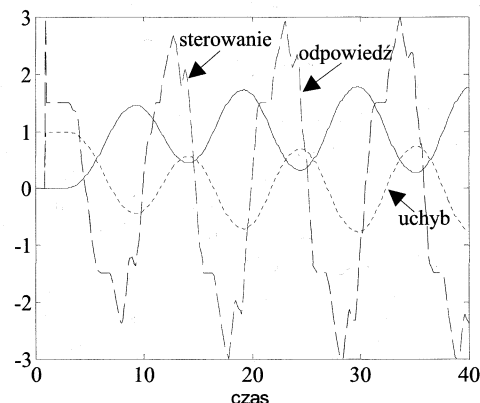
Rys. 5. Powierzchnia przetwarzania regulatora FLC

Na bazie metody Zieglera Nicolsa [1, 5] dobrano dla regulatora FLC nastawy dla przebiegu odpowiedzi bez przeregulowań i minimalizacji czasu regulacji. Przebieg procesu regulacji dla skokowej zmiany wartości zadanej oraz dla optymalnych parametrów regulatora, $K_E = 1, K_P = 3$ i $K_D = 3.5$ przedstawiono na rys. 6.



Rys. 6. Przebiegi sygnałów dla FLC typu PD przy opóźnieniu $T_0 = 1$

Obiekty przemysłowe wykazują tendencje do zmian własności dynamicznych. Przyczyn zmian można oczekiwać w procesie starzenia się wybranych podzespołów lub drobnych uszkodzeń. W przypadku przyjętego do badań obiektu założono zmiany czasu opóźnienia (wzrost) jako skutek starzenia się podzespołów obiektu. W kolejnym etapie badań dokonano symulacyjnej oceny wrażliwości opracowanego regulatora FLC na zmianę czasu opóźnienia do wartości $T_0 = 2$. Na rys. 7 zamieszczono przebieg regulacji dla regulatora FLC z poprzednio dobranymi nastawami. Analizując otrzymane wyniki należy zauważyć, że układ regulacji z nastawami dobranymi dla obiektu o małym czasie opóźnienia jest niestabilny. Zatem regulator FLC dla nastaw wyznaczonych przy wskaźniku jakości bez przeregulowań wykazuje dużą wrażliwość na zmiany dynamiki sterowanego procesu.

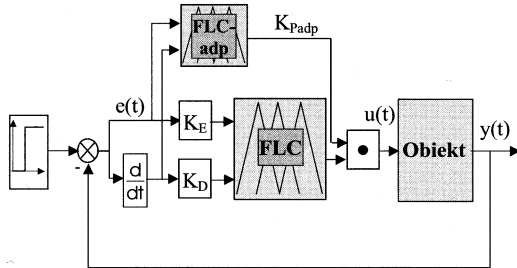


Rys. 7. Przebiegi sygnałów dla FLC typu PD przy opóźnieniu $T_0 = 2$

4. Adaptacyjny regulator FLC

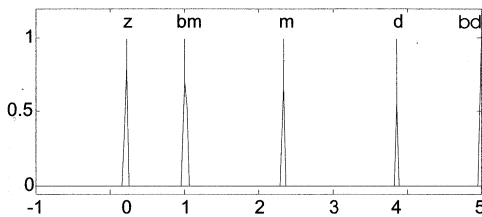
4.1. Układ regulacji z adaptacją wzmocnienia K_p

Aby poprawić własności dynamiczne układu regulacji zaproponowano stosowanie regulatora adaptacyjnego [7], w którym wbudowano pętlę adaptacji wartości wzmocnienia K_p (rys. 8).



Rys. 8. Schemat blokowy układu regulacji z pętlą adaptacji wzmocnienia K_p

Wyjście bloku FLC-adp zastosowanego w pętli adaptacyjnej K_p opisano w reprezentacji rozmytej za pomocą 5 zbiorów rozmytych typu ostry trójkąt (rys. 9). Proces rozmywania sygnałów wejściowych przeprowadzono w oparciu o zasady zastosowane w regulatorze FLC.



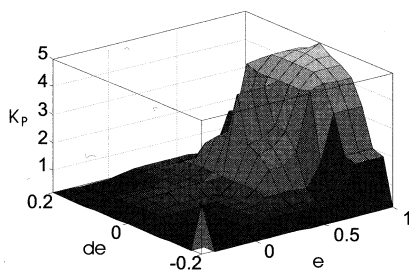
Rys. 9. Proces rozmywania wyjścia bloku FLC-adp dla adaptacji K_p

$e \setminus \Delta e$	ud	um	n	dm	dd
ud	z	z	z	z	z
um	z	z	bm	z	z
n	z	bm	m	bm	z
dm	z	m	d	m	z
dd	z	d	bd	d	z

K_p

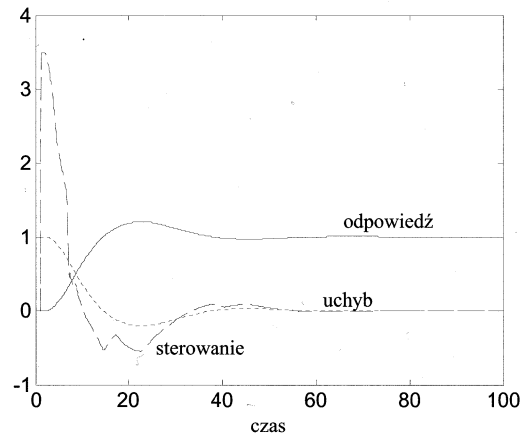
Rys. 10. Tablica decyzyjna bloku FLC-adp dla adaptacji K_p

Tablicę decyzyjną opisującą funkcję przetwarzania oraz powierzchnię przetwarzania rozmytego bloku FLC-adp zamieszczono odpowiednio na rys. 10 i 11. Rozmieszczenie zbiorów rozmytych opisujących wyjście bloku FLC-adp oraz tablicę decyzyjną dobrano w oparciu o zasady regulacji zdroworozsądkowej i kombinacji dobrego zrozumienia sterowanego obiektu przez eksperta i zastosowania analogii między regulatorami FLC i PID.



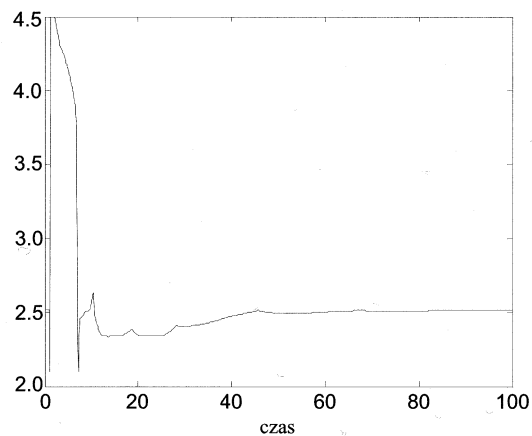
Rys. 11. Powierzchnia przetwarzania bloku FLC-adp dla adaptacji K_p

Przebieg procesu regulacji dla optymalnej nastawy regulatora FLC $K_D = 3.5$ i adaptacyjnie dobranej nastawy K_p oraz czasu opóźnienia $T_0 = 1$ przedstawiono na rys. 12.



Rys. 12. Przebiegi sygnałów dla FLC typu PD z adaptacją K_p i opóźnieniem w obiekcie $T_0 = 1$

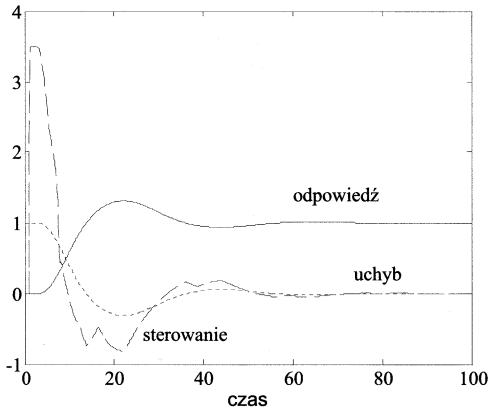
Na rys. 13 przedstawiono przebieg zmian wzmocnienia K_p wyznaczonego w pętli adaptacyjnej. Regulator FLC z pętlą adaptacyjną prowadzi proces regulacji z przeregulowaniem na poziomie 10%. Należy zwrócić uwagę, że nastawy regulatora FLC dobierano dla przebiegu bez przeregulowań. Ponadto dla regulatora FLC z adaptacją K_p uzyskano większą wartość sumy kwadratu błędów (ang. *Sum Square Error*, SSE), która wynosi $SSE=6.3$; dla przebiegu regulacji bez adaptacji K_p uzyskano $SSE=3.16$. Zauważone zmiany wynikają z dużej wartości wzmocnienia w pierwszym okresie procesu regulacji (rys. 13).



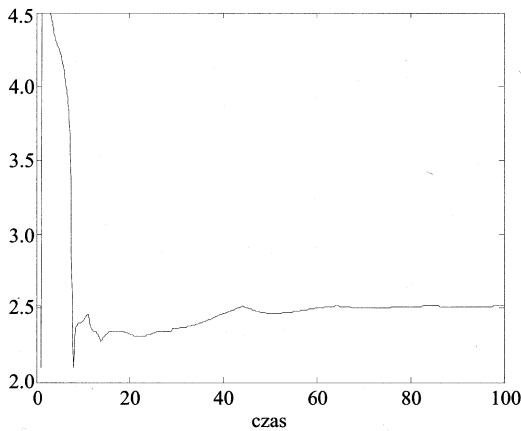
Rys. 13. Przebieg strojenia wzmocnienia K_p przy opóźnieniu w obiekcie $T_0 = 1$

W kolejnym etapie badań dokonano analizy wrażliwości opracowanego regulatora FLC z adaptacją K_p na zmianę czasu opóźnienia do wartości $T_0 = 2$.

Analizując przebiegi procesu regulacji dla regulatora FLC z poprzednio dobranymi nastawami (rys. 14) należy zauważyć, że układ regulacji prawidłowo prowadzi proces regulacji. Zmianie ulegają jedynie wskaźniki jakości regulacji, wzrasta współczynnik przeregulowania do poziomu 13%, czas regulacji do wartości $t_r = 45$ sek. oraz $SSE=7.64$. Zatem regulator FLC dla nastaw wyznaczonych przy wskaźniku pracy bez przeregulowań wykazuje małą wrażliwość na zmiany dynamiki sterowanego procesu. Na rys. 15 przedstawiono przebieg zmian wzmocnienia K_p wyznaczonego w pętli adaptacyjnej.



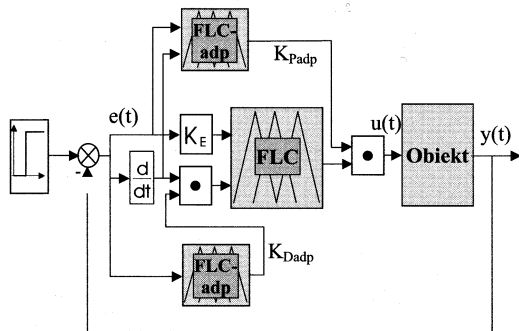
Rys. 14. Przebiegi sygnałów dla FLC typu PD z adaptacją K_p i opóźnieniem w obiekcie $T_0 = 2$



Rys. 15. Przebieg strojenia wzmocnienia K_p przy opóźnieniu w obiekcie $T_0 = 2$

4.2. Układ regulacji z adaptacją wzmocnienia K_p i K_D

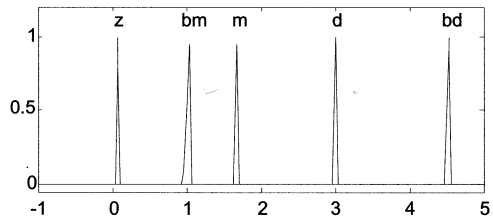
Kolejnym etapem poprawy własności dynamicznych układu regulacji było wprowadzenie drugiej pętli adaptacji wartości wzmocnienia K_D . Strukturę regulatora z dwoma pętlami adaptacyjnymi przedstawiono na rys. 16.



Rys. 16. Schemat blokowy układu regulacji z pętlami adaptacji wzmocnienia K_p i K_D

Wyjście bloku FLC-adp zastosowanego w pętli adaptacyjnej K_D opisano w reprezentacji rozmytej za pomocą 5 zbiorów rozmytych typu ostry trójkąt (rys. 17). Proces rozmywania sygnałów wejściowych przeprowadzono w oparciu o zasady zastosowane w regulatorze FLC.

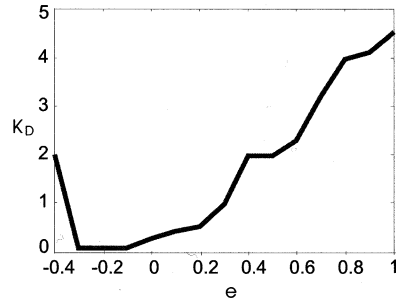
Tablicę decyzyjną opisującą funkcję przetwarzania bloku FLC-adp oraz jego krzywą przetwarzania zamieszczono odpowiednio na rys. 18 i 19.



Rys. 17. Proces rozmywania wyjścia bloku FLC-adp dla adaptacji K_D

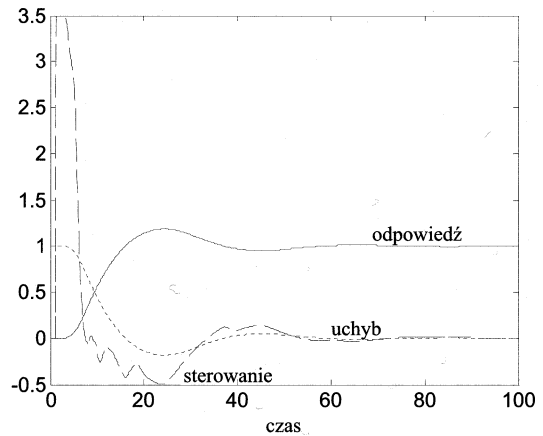
e	ud	um	n	dm	dd
K_D	z	bm	m	d	bd

Rys. 18. Tablica decyzyjna bloku FLC-adp dla adaptacji K_D

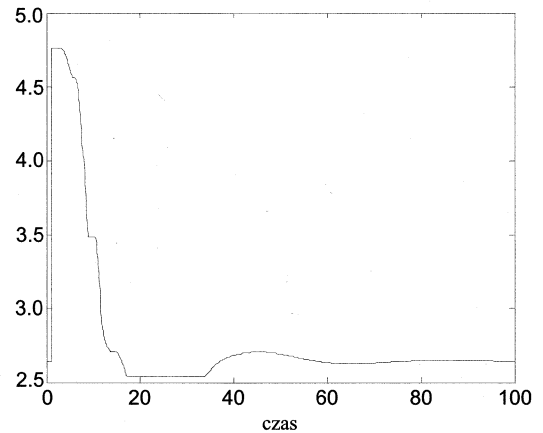


Rys. 19. Krzywa przetwarzania bloku FLC-adp dla adaptacji K_D

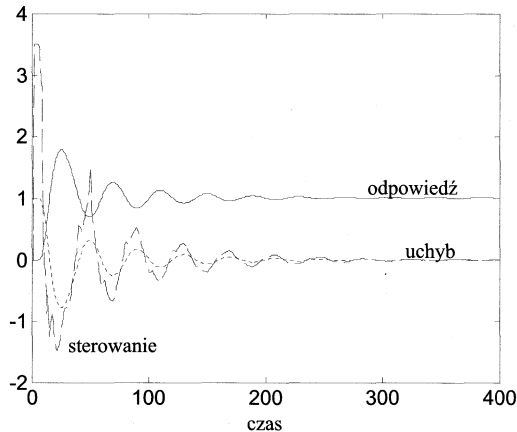
Regulator FLC z pętlami adaptacyjnymi prowadzi proces regulacji (rys. 20) z przeregulowaniem na poziomie 12%, czas regulacji wynosi $t_r = 40$ sek. oraz $SSE=7.12$. Przebieg zmian wzmocnienia K_D wyznaczonego w pętli adaptacyjnej przedstawiono na rys. 21.



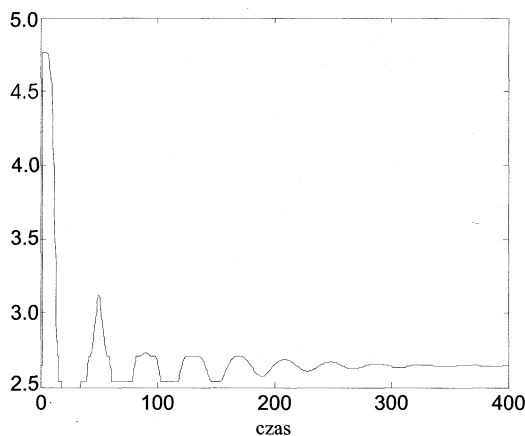
Rys. 20. Przebiegi sygnałów dla FLC typu PD z adaptacją K_p i K_D oraz opóźnieniem w obiekcie $T_0 = 2$



Rys. 21. Przebieg strojenia wzmocnienia K_D przy opóźnieniu w obiekcie $T_0 = 2$



Rys. 22. Przebiegi sygnałów dla FLC typu PD z adaptacją K_p i K_d oraz opóźnieniem w obiekcie $T_0 = 5$



Rys. 23. Przebieg strojenia wzmocnienia K_d przy opóźnieniu w obiekcie $T_0 = 5$

Dodatkowo dokonano analizy wrażliwości regulatora FLC z pełną adaptacją obu nastaw dla obiektu bardzo trudnego przy $T_0 = 5$ ($\tau = 2$). Przebieg procesu regulacji dla adaptacyjnie dobieranych nastaw K_p i K_d i czasu opóźnienia $T_0 = 5$ oraz przebieg zmian wzmocnienia K_d wyznaczonego w pętli adaptacyjnej przedstawiono odpowiednio na rys. 22 i 23. Regulator FLC z pętlami adaptacyjnymi prowadzi proces regulacji z przeregulowaniem na poziomie 18%, czas regulacji wynosi $t_r = 250$ sek. oraz $SSE = 18.45$.

5. Uwagi końcowe

Regulator FLC dla nastaw wyznaczonych przy wskaźniku jakości bez przeregulowań wykazuje dużą wrażliwość na zmiany dynamiki sterowanego procesu. Poprawę odporności układu sterowania można uzyskać stosując pętlę adaptacyjną dla nastawy K_p . Pętli adaptacyjne omawianego układu regulatora FLC można zrealizować na bazie systemu ekspertowego z rozmytą reprezentacją wiedzy. Heurystyczny algorytm, oparty na wiedzy eksperta, definicji parametrów adaptacyjnej pętli zapewnia znaczny wzrost odporności układu regulacji na zmiany dynamiki sterowanego obiektu. Adaptacyjny regulator FLC z pełną adaptacją obu nastaw wykazuje małą wrażliwość na zmiany dynamiki sterowanego procesu. Układ regulacji z zaproponowanym adaptacyjnym regulatorem FLC w warunkach nominalnych realizuje zadanie przestawiania przy gorszych wskaźnikach jakości regulacji niż klasyczny regulator FLC z zoptymalizowanymi nastawami. Wynika to z zasady doboru, przez pętlę adaptacyjną, dużej wartości wzmocnienia w pierwszym etapie przestawiania układu (rys. 13 i 15). W kolejnym etapie badań można przygotować algorytm automatycznego doboru parametrów systemów realizujących zadanie adaptacyjnego doboru nastaw regulatora głównego. Regulator FLC z pętlami adaptacyjnymi można zaliczyć do grupy samo-przestrzegających się układów sterowania.

6. Literatura

- [1] Findeisen W.: Technika regulacji automatycznej. - PWN, Warszawa, 1978.
- [2] Mamdani E.H., Assilian S.: An experiment in linguistic synthesis with a fuzzy logic controller. - *International Journal of Man-Machine Studies* 7, 1975, pp. 1-13.
- [3] Niederliński A.: Systemy komputerowe automatyki przemysłowej, Zastosowania. - WNT, Warszawa, 1985.
- [4] Piegat A.: Modelowanie i sterowanie rozmyte. - *Akademicka Oficyna Wydawnicza EXIT*, Warszawa, 1999.
- [5] Poradnik inżyniera automatyka. WNT, Warszawa, 1973.
- [6] Skoczowski S.: Technika regulacji temperatury. - *Pomiary Automatyka Kontrola*, listopad 2000.
- [7] Skrajnc I., Kavsek-Biasizzo K., Matko D.: Real-Time Fuzzy Adaptive Control. - *Engineering Applications of Artificial Intelligence, The International Journal of Intelligent Real-Time Automation*, Vol. 10, No 1, February 1997, pp. 53-61.
- [8] Yager R. R., Filev D. P.: Podstawy modelowanie i sterowania rozmytego, - *J. Wiley & Sons. Inc.* 1994.

Artykuł recenzowany

INFORMACJE

Złoty Jubileusz Endress+Hauser

Pięćdziesiąt lat temu - 1. lutego 1953 roku szwajcarski inżynier Georg H. Endress oraz niemiecki bankier Ludwig Hauser założyli firmę L. Hauser KG z siedzibą w Lorrach (Niemcy). Kilka lat później została ona przemianowana na Endress+Hauser GmbH.

Firma rozpoczęła swoją aktywność sprzedażą innowacyjnych, elektronicznych (pojemnościowych) czujników poziomu importowanych z Anglii. Dzisiaj taka firma była by nazwana „garażową”, tym bardziej, że jej ówczesną siedzibą była zaadoptowana na ten cel stolarnia.

Czujniki poziomu wkrótce odniosły sukces, a założyciele firmy szybko rozpoczęli budowę własnych zakładów produkcyjnych. Sprzedaż, która koncentrowała się na południowej części Niemiec została rozszerzona na cały kraj i państwa sąsiedzkie. Do oferty produkcyjnej zostały dodane kolejne typy czujników i urządzeń pomiarowych, dla innych wielkości fizycznych - ciśnienia, przepływu, temperatury, analizy fizykochemicznej. Sieć sprzedaży i usług objęła całą zachodnią Europę. W 1970 roku rozpoczęły swoją działalność biura w Japonii i USA.

W latach 80-tych firma rozpoczęła kampanię na rzecz mikroelektroniki i próbę objęcia technologicznej dominacji. Zmiana trendów automatyki z orientacji sygnałowej na informacyjną sprawiła, że grupa Endress+Hauser aktywnie uczestniczyła w przedsięwzięciach związanych z powstaniem i rozwojem sieci przemysłowych (Profibus, Foundation Fieldbus) i obecnie, również w tych obszarach, postrzegana jest jako światowy lider.

W 1995 roku kierownictwo w firmie zostało przekazane synowi założyciela - Klausowi Endressowi.

Podczas ostatnich dziesięciu lat szwajcarska firma ewoluowała od producenta czujników dla przemysłowej automatyki procesowej do międzynarodowego dostawcy rozwiązań automatyki. Dzisiaj Endress+Hauser oferuje szeroki wachlarz usług powiązanych z najbardziej kompleksowym, z dostępnych na rynku, pakietem przemysłowych przyrządów pomiarowych. Firma posiada przedstawicielstwa na pięciu kontynentach, zatrudnia w zakładach produkcyjnych, sprzedaży i usługach ponad 6 tysięcy osób.

Reklama firmy na IV stronie okładki