

REGULACJA ROZMYTA WYDAJNOŚCIĄ PYŁOWĄ MŁYNA WĘGLA

Praca dotyczy syntezy rozmytych algorytmów regulacji dla sterowania wydajnością pyłową kulowego młyna węgla za pomocą zmian nadawy. Omówiono proces wytwarzania pyłu węglowego oraz problematykę związaną z jego sterowaniem. Zaprezentowano poddane syntezie układy regulacji rozmytej (algorytmy: adaptacyjny i Mamdaniego typu FPI) oraz metodykę ich tworzenia. Przedstawiono wyniki analizy porównawczej zaprojektowanych regulatorów z regulatorem konwencjonalnym PI.

FUZZY CONTROL OF COAL MILL DUST EFFICIENCY

The paper refers to the synthesis of fuzzy control algorithms for the purpose of controlling dust efficiency of coal ball-mill. Coal dust production process and its control problem was described. Designed fuzzy control systems (adaptive and FPI Mamdani controllers) were presented. Results of the selected experiments on the control systems with designed fuzzy controllers and conventional PI controller were discussed.

1. WSTĘP

Instalacje przemiałowe, których typowym reprezentantem jest rozpatrywany w artykule „młyn węgla”, tworzą specyficzną klasę urządzeń przemysłowych często eksploatowanych w takich gałęziach jak: energetyka, hutnictwo, przemysł spożywczy, przemysł materiałów budowlanych. Charakteryzują się one zbliżonymi rozwiązaniami konstrukcyjnymi i systemami sterowania oraz ograniczeniami jak również podobnymi kryteriami oceny jakości. Podobieństwa te wynikają z zadań funkcjonalnych stawianych przed tymi urządzeniami wytwórczymi. Mówiąc ogólnie, żąda się aby ich mechatroniczne konstrukcje na etapie projektowania i w trakcie eksploatacji, spełniały warunek ogólnie pojmowanej efektywności działania.

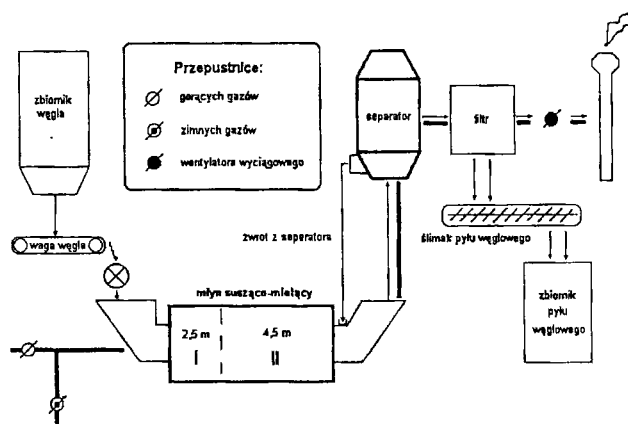
W odniesieniu do rozpatrywanych w artykule młynów węgla kamiennego, teoretyczne zadanie polioptymalizacji prowadzi w praktyce do prób pogodzenia kilku sprzecznych wymagań. Żąda się więc zapewnienia odpowiedniego stopnia przemiału i składu granulometrycznego pyłu węglowego, jego odpowiedniej wilgotności i ilości przy jednoczesnej minimalizacji kosztów jednostkowych (maksimum wydajności przy minimum np. zużycia energii elektrycznej) oraz spełnienia gwarantowanych warunków bezpieczeństwa (wybuch pyłu) i ograniczeń nakładanych przez normy ochrony środowiska. Wobec bardzo wysokiej energochłonności i niskiej sprawności tych urządzeń poprawy efektywności funkcjonowania należy upatrywać przede wszystkim w dalszej modernizacji eksploatowanych już ich układów sterowania (rozwiązania konstrukcyjne są niezwykle kosztowne). Takie próby były podejmowane przez praktyków [1, 9] i teoretyków [3, 5, 15]. Obecnie wobec gwałtownego rozwoju technologii informatycznej oraz szybko postępującego

procesu modernizacji polskiego przemysłu istnieje duża szansa praktycznych zastosowań zarówno teorii regulacji adaptacyjnej jak i „sztucznej inteligencji”.

Prezentowana praca jest próbą oceny przydatności wybranych algorytmów opartych na logice rozmytej w zastosowaniu do regulacji obiektem o „trudnej” dynamice i statyce, szerokim zakresie złożoności i nieidentyfikowalności. Praca w szczególności podaje metodykę tworzenia i wyniki syntezy dwóch typów rozmytych algorytmów regulacji (adaptacyjny i Mamdaniego typu FPI) kulowego młyna węgla, pracującego z zawracaniem nadziarna. Omówiono pokrótce proces wytwarzania pyłu węglowego, charakteryzując młyn jako obiekt regulacji wydajności pyłowej przez zmianę nadawy węgla surowego. Zasygnalizowano główne problemy związane ze sterowaniem tej klasy obiektów. Wyniki porównano z efektami sterowania w układzie z regulatorem konwencjonalnym PI.

2. MŁYN WĘGLA JAKO OBIEKT REGULACJI WYDAJNOŚCI

Rys. 1 przedstawia ciąg technologiczny typowej instalacji przygotowania pyłu węglowego, pracującej na potrzeby systemu nawęglania pieca obrotowego do wypału klinkieru.

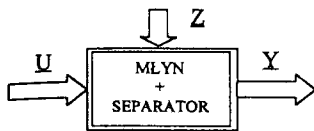


Rys. 1. Schemat technologiczny młynowni węgla

Jest to typowy system pracujący w trybie ciągłym tzn. do wlotu młyna dostarczany jest miał węglowy oraz zimne i gorące gazy z pieca obrotowego. Sam młyn jest stalowym walcem przedzielonym wewnętrznym sitem na dwie komory wypełnione częściowo mielnikami (stalowe kule). Podczas wirowania młyna miał węglowy (dozowany ze zbiornika) ulega rozdrabnianiu i przemieszczaniu (w strumieniu gazów) do urządzeń rozdzielających frakcje (separator, cyklon). Frakcje grube (nadziarno) wracają do ponownego przemiału (cykl zamknięty) a gotowy pył transportowany jest mechanicznie do zbiorników. Młyn węgla pełni w procesie rolę zarówno urządzenia susząco-mielącego jak i transportującego.

Z punktu widzenia wspomnianego we wstępie wielokryterialnego wskaźnika jakości urządzenie to jest wielowymiarowym, nieliniowym, niestacjonarnym obiektem sterowania, pracującym w warunkach silnych i różnorodnych zakłóceń stochastycznych. Ponadto występują silne ograniczenia wynikające z wybuchowości pyłu (koncentracja, wilgotność) oraz możliwości gwałtownej utraty stabilności wydajności (zamielanie), powodującej znaczne straty.

Schemat blokowy młyna rozpatrywanego jako obiekt sterowania pokazano na rys. 2.



U – wektor sygnałów sterujących
 Y – wektor sygnałów wyjściowych
 Z – wektor sygnałów zakłócających

Rys. 2. Schemat blokowy młyna węgla jako obiektu sterowania

Wśród sygnałów sterujących wyróżniono jako zasadnicze:

- nadawę węgla (regulacja poprzez zmianę prędkości podajnika),
- stopień rozdziału nadziarna (regulacja przez prędkość obrotową łopatek separatora),
- temperaturę gazów na wlocie do młyna (regulacja klapami gorących i zimnych gazów)
- intensywność strumienia gazów wentylujących (regulacja żaluzjami i klapą).

Wśród sygnałów wyjściowych o podstawowym znaczeniu dla technicznej realizacji zadań sterowania i efektywnej eksploatacji młynowni wyróżniono:

- wydajność młyna (określana zapełnieniem młyna - mierzona spadkiem ciśnienia na jego długości lub (i) poziomem hałasu generowanego podczas przemiału),
- stopień przemiału pyłu węglowego (skład granulometryczny) i jego wilgotność,
- aspirację młyna,
- temperaturę mieszanki pyłowo-gazowej na wylocie młyna.

Zasadniczy wpływ na proces przemiału węgla mają następujące sygnały zakłócające:

- fluktuacje parametrów jakościowych miazgi węglowego (granulacja, wilgotność, podatność przemiałowa, itp.),
- fluktuacje temperatur gazów pobieranych z pieca,
- wahania temperatury, wilgotności oraz ilości tzw. „powietrza fałszywego”,
- bieżące awarie i skutki przeszłych wyłączeń technologicznych,
- zaklejanie się przegród, przewodów i filtrów,
- zużycie mielników i elementów roboczych młyna,
- błędy i szумы pomiarowe.

W warunkach przemysłowej eksploatacji występują bardzo duże trudności w identyfikacji tak złożonego obiektu. W licznych badaniach identyfikacyjnych [1, 4], z konieczności wykorzystywano eksperyment bierny, szukano modeli jednowymiarowych, traktując jednak instalacje przemiałowe całościowo. Prowadziło to do lokalnych, liniowych modeli dyskretnych, których dynamika toru sterowania zawierała efekty oddziaływań istniejących układów stabilizujących a tor zakłóceń był skorelowany ze sterowaniem. Jakościowo lepsze wyniki uzyskiwano na drodze ograniczonych eksperymentów czynnych [2, 3, 4]. Uzyskiwane wyniki ugruntowują pogląd, iż młyn węgla w odniesieniu do regulacji jakości przemiału i wydajności może być traktowany jako obiekt z samowyrównywaniem o czasach opóźnień rzędu kilku do kilkunastu minut. Badania te bezsprzecznie potwierdzają istnienie wiarogodnych korelacji pomiędzy jakością przemiału a sygnałem akustycznym lub spadkiem ciśnienia oraz nieliniowej, ekstremalnej charakterystyki statycznej wydajność-zapełnienie [4, 8]. Prowadzone są też dalsze badania ściśle traktujące młyn jako obiekt wielowymiarowy [2] oraz próby formalizacji procesu przemiałowego oparte na teorii sztucznych sieci neuronowych [5].

Zdaniem autorów uparte dążenie do bardzo złożonych i dokładnych modeli na drodze trudnych i kosztownych eksperymentów nie wydaje się obecnie celowe. Dostępne modele wydają się wystarczające w kontekście wykorzystania ich w charakterze symulacyjnych narzędzi syntezy i weryfikacji algorytmów sterowania, bazujących na logice rozmytej.

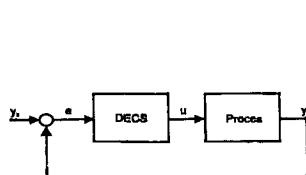
W prezentowanej pracy ostatecznie wyodrębniono z instalacji przemiałowej i wzięto do rozważań sam młyn węgla wraz z separatorem. Tak otrzymany, pracujący w cyklu zamkniętym układ technologiczny, potraktowano jako jednowymiarowy obiekt regulacji wydajnością pyłową poprzez zmiany nadawy miazgi węglowego podawanego na jego wejście.

Do badań symulacyjnych przyjęto model o strukturze Wienera, w którym odwzorowująca dynamikę część liniowa ma postać modelu ARMAX, a statyczny blok nieliniowy modeluje zależność wydajności od zapełnienia młyna (model separatora). Część liniową modelu wyestymowano na podstawie wyników czynnego eksperymentu przeprowadzonego na jednym z młynów węgla Cementowni „Chełm” [3]. Zapełnienie młyna mierzono alternatywnie zarówno czujnikami mikrofonowym jak i miernikiem spadku ciśnienia na długości młyna, uzyskując porównywalne wyniki. Nie identyfikowano statycznej charakterystyki separatora, przyjmując jej jakościowy przebieg na podstawie swojej i operatorów wiedzy oraz dostępnych w literaturze wyników badań [8].

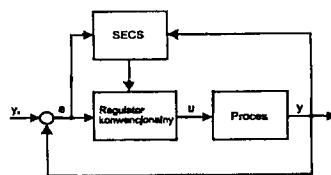
3. SYNTEZA ALGORYTMU STEROWANIA

Można wyodrębnić dwa zasadnicze zastosowania algorytmów sterowania rozmytego [6]:

- w bezpośrednim systemie ekspertowym sterowania DECS (ang. *direct expert control system*),
- w systemie ekspertowym z nadzorem SECS (ang. *supervisory expert control system*).



Rys. 3. Struktura systemu DECS

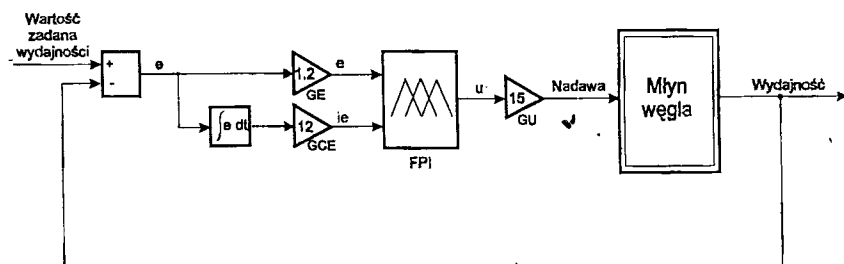


Rys. 4. Struktura systemu SECS

Bezpośredni system ekspertowy regulacji jest niczym innym jak tradycyjnym układem sterowania w pętli zamkniętej (UAR), w którym klasyczny regulator zastępowany jest przez regulator rozmyty. W systemach ekspertowych regulacji z nadzorem regulator rozmyty pracuje jako nadzorca regulatora konwencjonalnego (poza główną pętlą sterowania). Rola tego nadzoru polega na rozszerzeniu działania regulatora konwencjonalnego o dodatkowe funkcje np. samodostrajanie i adaptację. Regulatory rozmyte są z natury regulatorami nieliniowymi i dlatego mogą z powodzeniem być stosowane do sterowania procesami określonymi mianem „trudnych” i takich, dla których otrzymanie ścisłego modelu matematycznego jest niemożliwe. W pracy poddano syntezie algorytmy należące do obydwu przedstawionych wyżej systemów opartych na wiedzy.

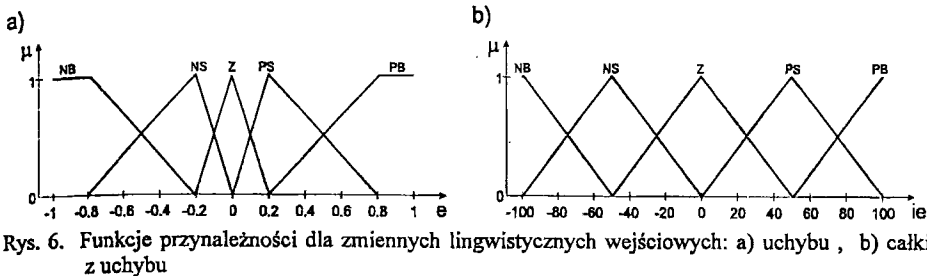
3.1. Układ regulacji bezpośredniej

Do realizacji zadania wybrano regulator Mamdaniego [10] typu FPI (ang. *fuzzy proportional-integral*) tj. proporcjonalno-całkujący, pracujący w układzie przedstawionym na rys. 5.



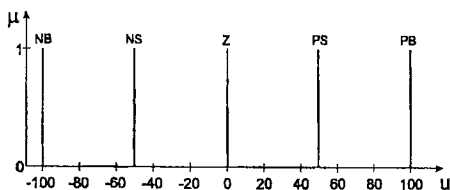
Rys. 5. Układ regulacji z regulatorem typu FPI

Funkcje przynależności dla zmiennych lingwistycznych wejściowych regulatora (uchybu e i całki z uchybu ie) dobrane zostały intuicyjnie, opierając się częściowo na doświadczeniach operatora procesu. Funkcje te prezentowane są na rys. 6.



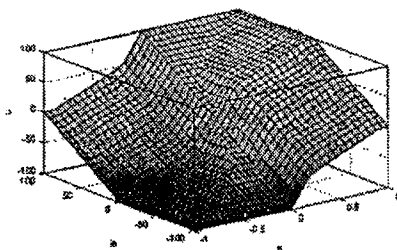
Rys. 6. Funkcje przynależności dla zmiennych lingwistycznych wejściowych: a) uchybu, b) całki z uchybu

Jako funkcje przynależności dla zmiennej wyjściowej regulatora (sterowania) postanowiono zastosować singletony [11] (patrz rys. 7). Wybór ten był podyktowany względami ekonomicznym tj. szybkością obliczeń i łatwością ewentualnej implementacji algorytmu w rzeczywistym sterowniku.



Rys. 7. Funkcje przynależności dla zmiennej lingwistycznej wyjściowej

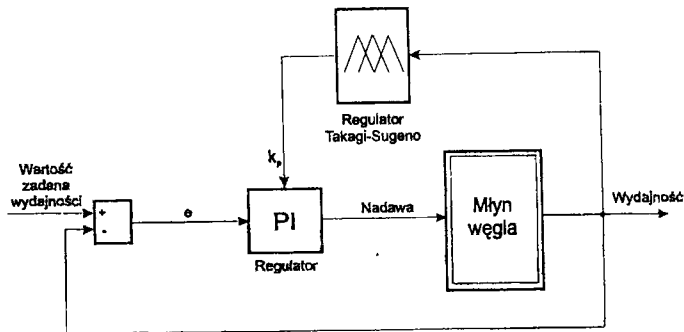
Jako reguły sterowania dla regulatora wybrano reguły ze standardowej bazy reguł Mac Vicara-Whelana [6]. Tak zaprojektowany regulator posiada nieliniową powierzchnię sterowania przedstawioną na rysunku 8.



Rys. 8. Nieliniowa powierzchnia sterowania regulatora FPI

3.2. Układ regulacji adaptacyjnej

Dla porównania wzięto również algorytm adaptacyjny z programowanymi zmianami parametrów regulatora (ang. *gain scheduling*). Podobne rozwiązanie zastosowali twórcy regulatora Efronik XF [12]. Cechą szczególną przyjętego rozwiązania (patrz rys. 9) jest to, że nastawy konwencjonalnego regulatora PI znajdującego się w pętli głównej sterowania są zmieniane w zależności od aktualnej wartości sygnału sterowanego (wydajności). Dobór nastaw w aktualnym punkcie pracy realizowany jest w oparciu o algorytm rozmyty.



Rys. 9. Schemat układu regulacji adaptacyjnej

Synteza algorytmu regulacji polega (w pierwszej fazie) na identyfikacji obiektu sterowania w różnych punktach jego pracy (dla czterech wartości wydajności). Obiekt identyfikowano stosując metodę odpowiedzi skokowej oraz przybliżając go członem inercyjnym pierwszego rzędu z opóźnieniem:

$$G(s) = \frac{k}{1 + sT} \cdot e^{-\tau_0 s}$$

Dla powyższego modelu, kierując się minimum całkowego wskaźnika jakości ISE (ang. *Integrated Square Error*):

$$J_{ISE} = \int e^2(t) \cdot dt$$

obliczono zamieszczone w tabelicy 1 optymalne nastawy dla regulatora PI. Przyjęcie stałej wartości czasu całkowania T_i wynika z faktu, iż stała czasowa oraz czas opóźnienia obiektu były praktycznie niezienne.

Tabela 1. Nastawy dla regulatora PI dla czterech punktów pracy

Nastawy	Wydajność			
	20%	35%	55%	80%
k_p	1235	1811	3023	5434
T_i	21,2			

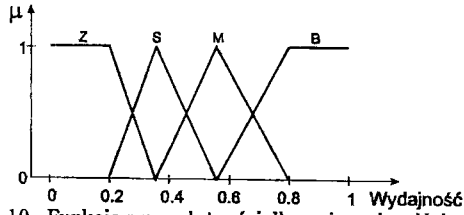
W drugiej fazie syntezy zaprojektowano strukturę regulatora rozmytego typu Takagi-Sugeno [10,14] obliczającego nastawy (współczynnik wzmocnienia) regulatora PI w innych poza identyfikowanymi punktami pracy. Funkcje przynależności dla zmiennej lingwistycznej wejściowej regulatora rozmytego (tj. wydajności) prezentuje rys. 10. Baza reguł dla tego regulatora jest następująca:

Jeżeli *Wydajność* jest Z to $k_p=1235$

Jeżeli *Wydajność* jest S to $k_p=1811$

Jeżeli *Wydajność* jest M to $k_p=3023$

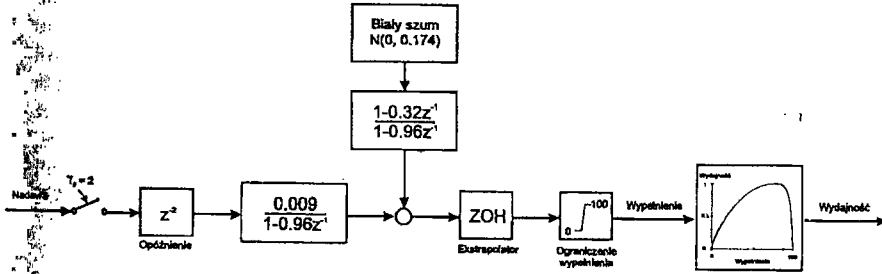
Jeżeli *Wydajność* jest B to $k_p=5434$



Rys. 10. Funkcje przynależności dla zmiennej wejściowej

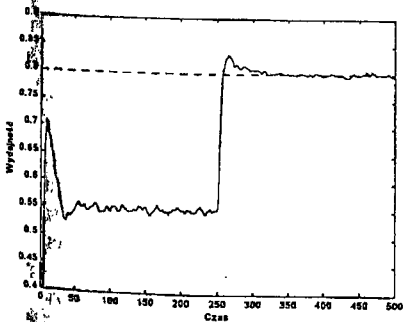
4. WYNIKI BADAŃ SYMULACYJNYCH

Skuteczność działania zaprojektowanych układów regulacji sprawdzono przeprowadzając badania symulujące uproszczony rozruch młyna węgla. Badania te polegały na obserwacji odpowiedzi układu na dwa skoki wartości zadanej wydajności: pierwszy z 0 na 0,55 a następnie drugi z 0,55 na 0,8. Dla potrzeb symulacji wzięto model młyna węgla (rysunek 11), który wyznaczono drogą czynnego eksperymentu przeprowadzonego na instalacji przemiałowej węgla kamiennego z młynem kulowym, pracującym w warunkach przemysłowej eksploatacji [3].

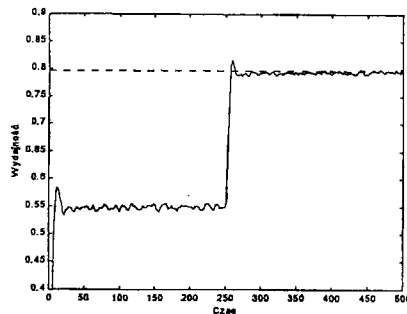


Rys. 11. Model młyna węgla

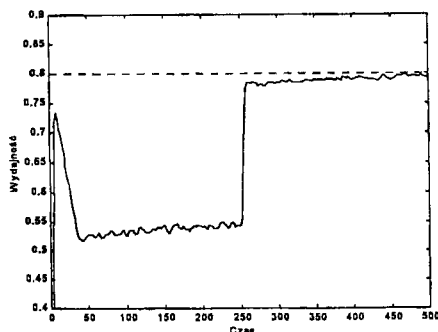
W celach porównawczych przeprowadzono również symulację tradycyjnego układu regulacji z konwencjonalnym regulatorem PI. Optymalne nastawy regulatora ($k_p=3020$, $T_i=21.2$) dobrano na podstawie minimum wskaźnika ISE. Zarejestrowane odpowiedzi skokowe dla trzech układów regulacji prezentują rysunki 12, 13 i 14.



Rys. 12. Odpowiedź skokowa w układzie z regulatorem FPI



Rys. 13. Odpowiedź skokowa w układzie z regulatorem adaptacyjnym



Rys. 14. Odpowiedź skokowa w układzie z regulatorem PI

Porównując przebiegi w układzie z konwencjonalnym regulatorem PI z układami, w których zastosowano logikę rozmytą zauważyć można znaczne różnice czasów regulacji. Wyniósł on dla regulatora adaptacyjnego ok. 40 min. a dla regulatora FPI - ok. 60 min., zaś dla regulatora PI jest on znacznie większy. W przypadku regulatora adaptacyjnego występują ponadto najmniejsze przeregulowania. Zwrócić należy uwagę na niedoregulowanie występujące przy odpowiedzi (0,55 → 0,8) w układzie z regulatorem PI. Spowodowane jest to faktem, iż nastawy dobierane były dla punktu pracy 0,55 (patrz tablica 1) a nie 0,8. Zestawione w talicy 2 wskaźniki ISE dowodzą również iż najlepsze jakościowo przebiegi występują w układzie z regulatorem adaptacyjnym.

Tablica 2. Wskaźniki jakości regulacji ISE dla odpowiedzi skokowych

Wymuszenie skokowe	Typ regulatora		
	FPI	adaptacyjny	PI
0 -> 0,55	1,46	1,38	1,63
0,55 -> 0,8	0,34	0,32	0,37

5. UWAGI I WNIOSKI

Dobre efekty regulacji w układzie z regulatorem adaptacyjnym są następstwem przyjęcia nastaw na podstawie modelu matematycznego obiektu sterowanego, który został wykorzystany do symulacji. W rzeczywistych warunkach strojenie regulatora realizowane jest na podstawie reakcji obiektu i dobrane nastawy nie są jednoznaczne. W tym kontekście wyraźnie uwidaczniają się zalety klasycznej regulacji rozmytej (regulator FPI). Struktura regulatora rozmytego tworzona jest bowiem w oparciu nie o model lecz o wiedzę ekspercką na temat procesu sterowanego.

Prezentowany układ regulacji adaptacyjnej w praktyce może być zrealizowany na przykład na bazie regulatora Efronik XF firmy Mera-Pnefal. Przeprowadzone badania w niniejszej pracy oraz przez twórców Efronika Xf dowiodły iż zastosowanie logiki rozmytej już w tak prostej formie dało pozytywne rezultaty.

LITERATURA

- [1] Bogacki M., Chorowski B.: *Koncepcja automatyzacji młyna walcowo-misowego*, XI KKA, Białystok 1991, str. 339-346.
- [2] Bielecki T., Żak E.: *Identyfikacja młyna węgla jako wielowymiarowego obiektu sterowania*, Praca w przygotowaniu.
- [3] Bortnik P., Zguczyński A.: *Koncepcja komputerowego sterowania procesem przygotowania pyłu węglowego w cementowni*, Praca dyplomowa, Politechnika Lubelska, Lublin 1996.
- [4] Bursy G., Rojek R.: *badania identyfikacyjne młyna cementu z wykorzystaniem modelu neuronowego*. Materiały konferencyjne XIII Krajowej Konferencji Automatyki, Opole 1999.
- [5] Bursy G., Rojek R.: *Nowoczesne układy sterowania procesami przemysłowymi oparte na teorii sztucznych sieci neuronowych*, Materiały Konferencji Naukowo-Technicznej nt. „Automatyzacja – Nowości i Perspektywy” – AUTOMATION'98, Warszawa 1998.
- [6] Driankov D., Hellendoom H., Reinfrank M.: *Wprowadzenie do sterowania rozmytego*, WNT, Warszawa 1996.
- [7] Duda J., Rojek R. i Wrzuszczak J.: *Analiza metrologiczna młyna kulowego do przemiału cementu dla potrzeb sterowania*, XII Krajowa Konferencja Automatyki, Gdynia 1994, str. 403-407.
- [8] Gelfand J. E.: *Statistyczjeskoje metody v upravlenii cementnom proizvodstvom*, Strojizdat, Leningrad 1979.
- [9] Jurewicz H., Polednia E.: *Układ automatyki młyna do węgla*, Cement-Wapno-Gips 10/77
- [10] Jurkiewicz S., Kurnicki A.: *Synteza algorytmów sterowania rozmytego w środowisku Matlab-Simulink*, III Sympozjum Naukowe Sterowanie i Monitorowanie układów przemysłowych SM'99, Kazimierz Dolny 1999, str. 64-70.
- [11] Pedrycz W.: *Fuzzy Control and Fuzzy Systems*, ResStudPress, Taunton 1993.
- [12] Pułaczewski J., Szkolnikowski W.: *Nowy regulator rodziny Efronik XF*, PAK 3/1998
- [13] Wrzuszczak J.: *Układ sterowania adaptacyjnego młyna cementu*, Materiały Konferencyjne XIII Krajowej Konferencji Automatyki, Opole 1999.
- [14] Ying H.: *Takagi-Sugeno fuzzy control*, Automatica 1998, str.157.
- [15] Żak E.: *Adaptive Stochastic Control Of Extreme Electromechanical Devices*, Proceedings of the 7-th Power Electronics and Motion Control Conference (PEMC'96), Budapest - Hungary 1996, Volume 1 str.327-381.