

Adrian NOCÓN

Katedra Maszyn i Urządzeń Elektrycznych

## KONCEPCJA ROZMYTEGO REGULATORA Z MODELEM ODNIESIENIA DLA GENERATORA SYNCHRONICZNEGO

**Streszczenie.** W artykule przedstawiono wstępną fazę badań rozmytego regulatora Takagi-Sugeno pozwalającego na sterowanie obiektem regulacji z dynamiką zadawaną przez model odniesienia. Koncepcja regulatora rozmytego została sprawdzona przy zastosowaniu badań symulacyjnych w pakiecie Matlab-Simulink. Jako obiekt regulacji przyjęto generator synchroniczny pracujący samotnie.

## A FUZZY LOGIC REFERENCE MODEL CONTROLLER FOR SYNCHRONOUS GENERATOR

**Summary.** The paper presents a Takagi-Sugeno fuzzy logic reference model controller. It allows controlling a system and compensating variation of the system parameters. The fuzzy logic controller was tested in Matlab-Simulink. A stand-alone synchronous generator was assumed to be the controlled system in simulation investigations performed.

### 1. WPROWADZENIE

W procesie projektowania układu regulacji największym problemem jest wybór rodzaju regulatora i jego dostrojenie do danego typu obiektu. W teorii regulacji [4, 13] znane są metody doboru regulatorów dla standardowych typów obiektów. Proces projektowania zaczyna się komplikować w sytuacji, gdy nie jest znany model obiektu, model znany jest tylko w przybliżeniu lub kiedy w czasie regulacji zachodzą zmiany jego parametrów. Praktycznie występuje to zawsze, gdyż stosowane formalne modele matematyczne nie uwzględniają wszystkich zjawisk, więc w konsekwencji tylko przybliżają rzeczywistość.

Jednym z rozwiązań tego problemu może być zastosowanie regulatora rozmytego, opisywane w wielu pozycjach literaturowych [1, 6, 10, 11]. Największą trudnością, przy doborze regulatora rozmytego, jest jego strojenie. Związane jest to z brakiem jednoznacznych algorytmów strojenia regulatora, co sygnalizują prace [10, 17]. W literaturze opisywane są dwa podejścia do doboru nastawień regulatora rozmytego. Po pierwsze, dostosowanie nastawień regulatora rozmytego w układzie adaptacyjnym (co opisano w pracach [6, 11] w odniesieniu do napędu prądu stałego i pracach [2, 16] w odniesieniu do generatora synchronicznego). Po drugie, ich optymalizacja w procesie projektowania (np. za pomocą algorytmów ewolucyjnych – [1]).

Zaproponowane w niniejszym artykule rozwiązanie umożliwia sterowanie napięcia generatora synchronicznego z zadaną dynamiką. Poprzez dobór parametrów modelu odniesienia istnieje możliwość bezpośredniego wpływania na dynamikę układu regulacji. Takie podejście jest uzasadnione w sytuacji, w której musimy mieć wpływ na dynamikę zmian,

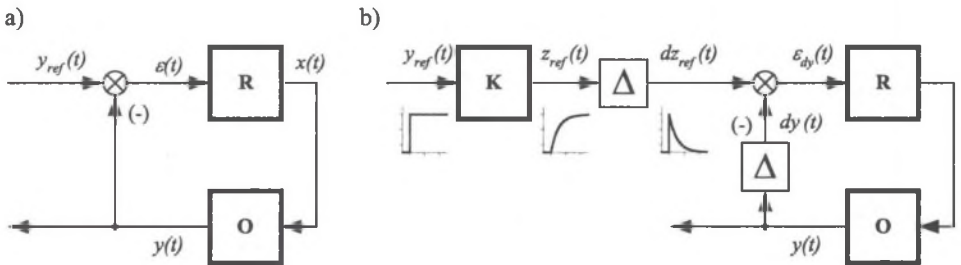
niezależnie od optymalnego procesu regulacji, np. dla generatora współpracującego z silnikiem spalinowym.

Należy jednak podkreślić, że analizowana struktura układu regulacji nie jest optymalna, a uzyskane wyniki mogą jedynie służyć do wyznaczenia dalszego kierunku badań.

## 2. ROZMYTY REGULATOR Z MODELEM ODNIESIENIA

W literaturze najczęściej prezentowanym rozwiązaniem jest zastosowanie regulatora rozmytego typu PI sterującego obiektem o określonych parametrach [14]. W takim przypadku uzyskanie wymaganej, narzuconej z góry, dynamiki wiąże się z odpowiednim doбором nastawień tegoż regulatora. Można również zastosować regulację nadążną, co jednak w odniesieniu do generatorów synchronicznych nie jest stosowane.

W prezentowanych badaniach zaproponowano rozwiązanie, w którym sygnałem wejściowym regulatora nie jest uchyb regulacji  $\varepsilon(t)$  (jak to ma miejsce w rozwiązaniach klasycznych – rys. 1a), lecz uchyb przyrostu wielkości regulowanej  $\varepsilon_{dy}(t)$  (rys.1b). W rozwiązaniu tym zadany przyrost wielkości regulowanej nie jest obliczany bezpośrednio z wartości zadanej, lecz pochodzi z modelu odniesienia. Model odniesienia w rozpatrywanym przypadku nie pełni klasycznej roli, jak ma to miejsce w układach adaptacyjnych [3, 15]. Jest on jedynie źródłem sygnału o „zadanej dynamice”. Można go więc nazwać korektorem dynamicznym.



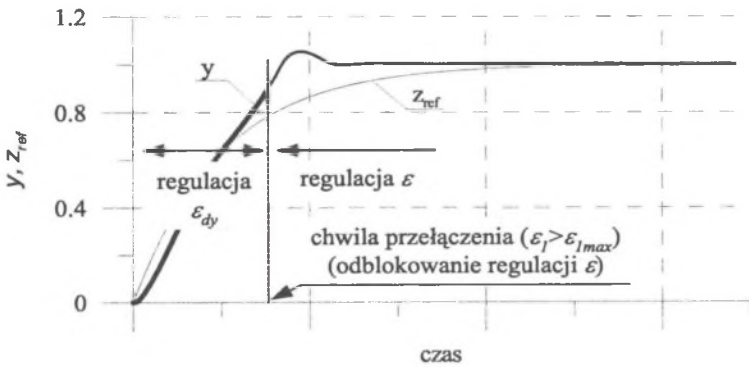
Rys. 1. Rozmyty układ regulacji: klasyczny a), badany b); R – regulator rozmyty typu PI, O – obiekt regulacji, K – model odniesienia

Fig. 1. Fuzzy controller: conventional a), novel b); R – fuzzy logic controller of type PI, O – plant (controlled system), K – reference model

Jako regulator rozmyty FLC w układzie przedstawionym na rys.1b zaproponowano regulator typu PI. W celu uproszczenia wewnętrznej struktury regulatora wybrano system rozmyty Takagi-Sugeno o następnikach w postaci singeltonów.

W układzie przedstawionym na rys.1b, do regulatora (FLC) nie jest doprowadzony sygnał uchybu regulacji  $\varepsilon(t)$ , co w konsekwencji może prowadzić do powstania statycznego uchybu regulacji, który nie jest korzystny w regulacji wzbudzenia generatora synchronicznego. Aby wyeliminować statyczny uchyb regulacji, regulator został uzupełniony o człon jego korekcji. Ponieważ w większości przypadków minimalizacja uchybu statycznego, w jak najkrótszym czasie, jest sprzeczna z wymaganiami utrzymania zadanej dynamiki (regulacja uchybu statycznego może nastąpić szybciej niż to wynika z zadanej dynamiki), dlatego człon jego korekcji musi być blokowany w czasie regulacji uchybu  $\varepsilon_{dy}$ . Zaproponowano, aby

odblokowanie następowało w chwili, gdy regulator nie jest w stanie utrzymać zadanej dynamiki (przykładowe przebiegi regulacyjne dla tego przypadku przedstawia rys. 2).



Rys. 2. Przebieg wartości zadanej  $z_{ref}$  i wyjściowej obiektu regulacji  $y$  przy odblokowaniu korekcy błędu regulacji  $\varepsilon$

Fig. 2. Waveform of reference value  $z_{ref}$  and output of the controlled system  $y$  when unlock correction of control error  $\varepsilon$

Ostatnim niezbędnym członem regulatora jest blok priorytetowego ograniczenia sterowania w sytuacji przekroczenia wartości kryterialnej, np. prądu wzbudzenia lub prądu twornika generatora (zależnie od potrzeb regulator może pracować z jednym lub wieloma ograniczeniami). Ograniczenie to działa bezpośrednio na wyjście regulatora.

Pełną strukturę badanego regulatora przedstawia rys. 3 (oznaczenia zgodne z rys. 1 i 2 oraz zależnościami (2.1) do (2.4)), przy czym:

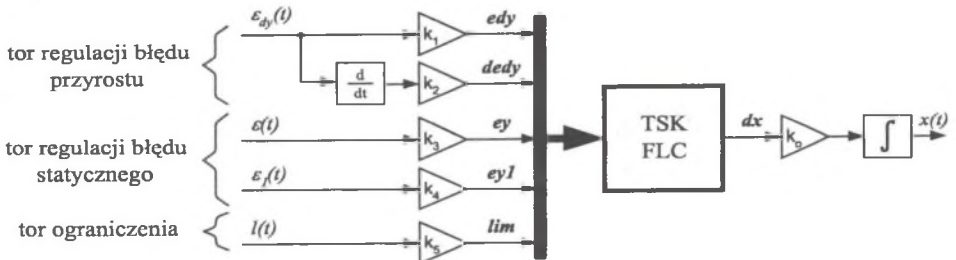
$$\varepsilon_{dy} = dz_{ref} - dy \quad - \text{wartość błędu przyrostu,} \quad (2.1)$$

$$\varepsilon = y_{ref} - y \quad - \text{uchyb regulacji,} \quad (2.2)$$

$$\varepsilon_1 = z_{ref} - y \quad - \text{uchyb śledzenia wartości z obiektu odniesienia,} \quad (2.3)$$

$$l = o_{max} - o \quad - \text{sygnał ograniczający,} \quad (2.4)$$

gdzie:  $o_{max}$  – wartość maksymalna wielkości ograniczanej,  $o$  – wielkość ograniczana



Rys. 3. Struktura regulatora rozmytego (TSK FLC – regulator rozmyty Takagi-Sugeno)

Fig. 3. Fuzzy controller structure (TSK FLC – Takagi-Sugeno fuzzy logic controller)

Bazę wiedzy analizowanego regulatora można podzielić (w świetle powyższych rozważań) na trzy podstawowe części związane z funkcjami, jakie pełnią poszczególne reguły. Grupę pierwszą stanowią reguły odpowiadające za regulację uchybu przyrostu  $\varepsilon_{dy}$  zgodnie ze standardowym algorytmem typu PI dla regulatorów rozmytych, przedstawionym w pracy [17] (reguły zostały oparte na zmodyfikowanej standardowej bazie McVicara-Whelana). Do tej grupy należą następujące reguły:

IF ( $edy$  is n) THEN ( $dx$  is n)  
 IF ( $edy$  is z) AND ( $dedy$  is z) THEN ( $dx$  is z)  
 IF ( $edy$  is p) THEN ( $dx$  is p)  
 IF ( $edy$  is z) AND ( $dedy$  is n) THEN ( $dx$  is n)  
 IF ( $edy$  is z) AND ( $dedy$  is p) THEN ( $dx$  is p)

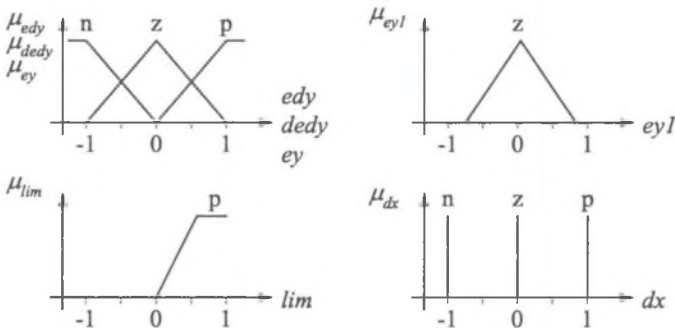
Drugą grupę stanowią reguły korygujące uchyb regulacji  $\varepsilon$ . Reguły te blokowane są przez zmienną  $\varepsilon_f(t)$ , która informuje o poprawności odtwarzania zadanego przyrostu (rys. 2). Do tej grupy należą następujące reguły:

IF ( $ey$  is n) AND ( $eyl$  is not z) THEN ( $dx$  is n)  
 IF ( $ey$  is z) AND ( $eyl$  is not z) THEN ( $dx$  is z)  
 IF ( $ey$  is p) AND ( $eyl$  is not z) THEN ( $dx$  is p)

Ostatnią, trzecią grupę stanowi jedna reguła nadrzędnego odcięcia sterowania w sytuacji przekroczenia wartości przez sygnał ograniczenia. Reguła ta ma na celu jak najszybsze zmniejszenie wartości wyjściowej regulatora.

IF ( $lim$  is p) THEN ( $dx$  is n)

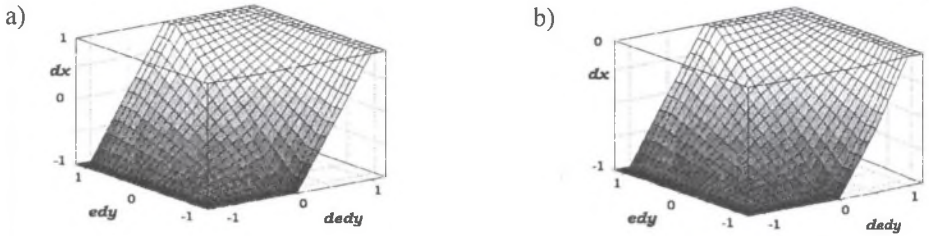
Do analizy przyjęto funkcje przynależności zgodnie z założeniami zawartymi w pracach [7, 17] (rys. 4).



Rys. 4. Funkcje przynależności  
 Fig. 4. Membership function

Przy tak skonstruowanej bazie reguł, dla części głównej (tj. regulatora uchybu  $\varepsilon_{dy}$ ) powierzchnia sterowania wygląda jak na rys. 5a. Pozostałe części, mianowicie regulacja uchybu statycznego i ograniczenie, jedynie przesuwają powierzchnię w górę lub w dół w zależności od tego, czy regulator ma zwiększyć (np. gdy wystąpi ujemny uchyb regulacji  $\varepsilon$ )

czy zmniejszyć (np. dla przekroczenia wartość dopuszczalnej wielkości ograniczanej -  $l = 1$  - zmienna  $dx$  może przyjmować wartości z przedziału  $\langle -1; 0 \rangle$ , rys. 5b) wartość wyjściową  $dx$ .



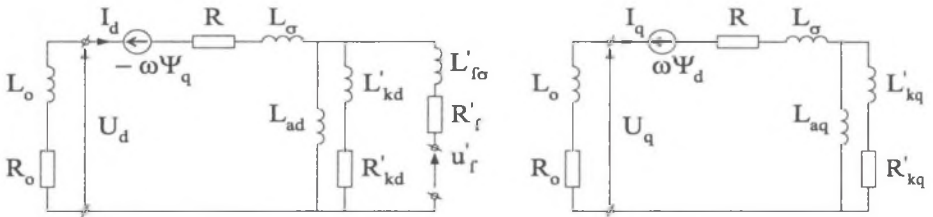
Rys. 5. Powierzchnia sterowania regulatora dla stanu normalnej pracy a) i przy działaniu ograniczenia b)  
 Fig. 5. Surface of the fuzzy controller – normal a) and limited b)

### 3. MODEL MATEMATYCZNY GENERATORA SYNCHRONICZNEGO

Przy tworzeniu modelu matematycznego uwzględniono założenia podane w pracy [12], przyjmując dodatkowo, że generator wiruje ze stałą prędkością.

Wszystkie analizy przeprowadzono korzystając ze schematu zastępczego generatora synchronicznego (rys.6), w którym uwzględniono po jednym zastępczym obwodzie tłumiącym w osi  $d$  i  $q$ , reprezentującym podłużno-poprzączną klatkę tłumiącą.

Do badań przyjęto generator dwubiegunowy o mocy 4 kW i napięciu znamionowym 400 V.



Rys. 6. Schemat zastępczy generatora synchronicznego  
 Fig. 6. Equivalent circuit of a synchronous generator

### 4. ROZMYTE STEROWANIE GENERATORA SYNCHRONICZNEGO Z MODELEM ODNIESIENIA

Ze względu na stopień skomplikowania modelu matematycznego generatora synchronicznego i trudności identyfikacji jego parametrów ([18]) można uznać, że zasadniczą staje się analiza zasadności dokładnego (optymalnego) doboru regulatora. W pewnych przypadkach (tj. dla mało odpowiedzialnych zastosowań) korzystniejsze może być zastosowanie regulatora nieoptymalnego (np. ze zgrubnie dobranymi parametrami). Warunkiem poprawnej pracy takiego regulatora jest możliwość regulacji parametrów w szerokich granicach bez utraty stabilności i z zachowaniem narzuconej dokładności regulacji.

Ze względu na powyższe, w celu przetestowania zaproponowanego regulatora wybrano analizę wpływu poszczególnych współczynników wzmocnienia regulatora (parametry  $k_1$ ,  $k_2$ ,  $k_3$ ,  $k_4$  i  $k_0$  na rys. 3) na jakość regulacji. Wzmocnienie toru ograniczenia ( $k_5$  na rys. 3) nie podlegało analizie ze względu na nadrzędny charakter ograniczenia i brak bezpośredniego związku z dynamiką procesu regulacji.

We wszystkich badaniach symulacyjnych założono, że nie nastąpi ograniczanie żadnej z wielkości, z uwagi na fakt niepożądanego wpływu tychże ograniczeń na wybrane wskaźniki jakości regulacji, co jest sygnalizowane w pracy [5].

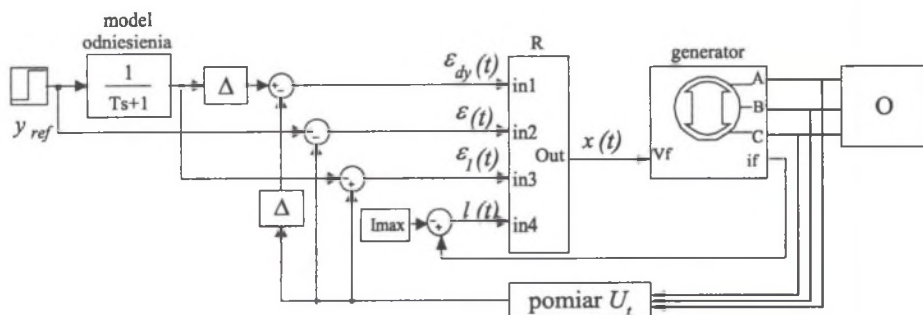
Jako badane wskaźniki jakości regulacji za pracę [4] przyjęto:

$$I_r = \int_0^{\infty} \varepsilon_1^2(t) dt \quad - \text{kwadratowy wskaźnik jakości,} \quad (4.1)$$

$$E_r = \max(|\varepsilon_1(t)|) \quad - \text{maksymalną wartość błędu przyrostu.} \quad (4.2)$$

W obliczeniach pominięto inercje układów pomiarowych (prądu, napięcia) i czas opóźnienia układu przekształtnikowego zasilającego obwód wzbudzenia generatora (prostownik sterowany zamodelowany jako element wzmacniający). Ponadto przyjęto ciągły układ regulacji. Model odniesienia, ze względu na uproszczenie analizy, przyjęto w postaci elementu inercyjnego pierwszego rzędu o stałej czasowej  $T$ .

Do analizy wykorzystano pakiet Matlab-Simulink. Wyniki wszystkich badań symulacyjnych przedstawiono w jednostkach względnych dla skokowej zmiany wartości zadanej napięcia twornika generatora synchronicznego ( $y(t)=1(t)$ ). Jako wielkości odniesienia dla współczynników wzmocnienia regulatora ( $k_1$ ,  $k_2$ ,  $k_3$ ,  $k_4$  i  $k_0$ ) przyjęto nastawy dobrane eksperymentalnie przy założeniu poprawnej regulacji, bez przeregulowań i oscylacji. Jako wielkość odniesienia dla wartości stałej czasowej inercji modelu odniesienia przyjęto wartość przejściowej stałej czasowej w osi  $d$  przy rozwartym obwodzie twornika  $T_{d0}$ . Testy przeprowadzono w układzie podanym na rys. 7, zmieniając wartości współczynników wzmocnienia w poszczególnych torach regulatora dla parametrycznie zmienianej stałej czasowej modelu odniesienia  $T$ .

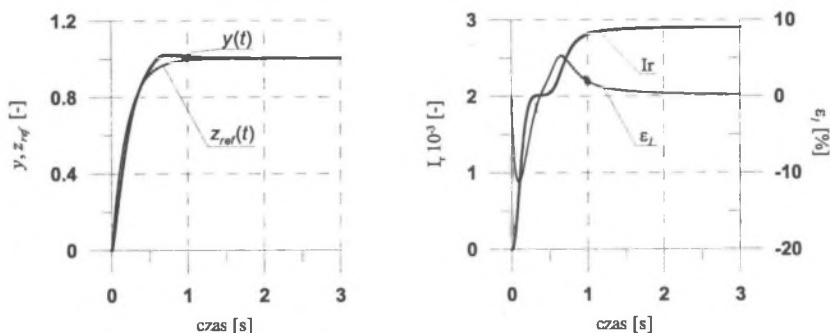


Rys. 7. Model symulacyjny układu regulacji

Fig. 7. Simulation diagram of a control system

Dla zobrazowania przykładowych wyników symulacyjnych na rys. 8 przedstawiono przebieg napięcia generatora –  $y(t)$ , wartość zadaną tego przebiegu –  $z_{ref}(t)$  (sygnał z modelu odniesienia – por. rys.1b) oraz przebiegi wybranych wskaźników jakości regulacji jako

odpowieź na skok jednostkowy ( $1(t)$ ) wartości zadanej  $y_{ref}$  dla eksperymentalnie dobranych nastawień regulatora.

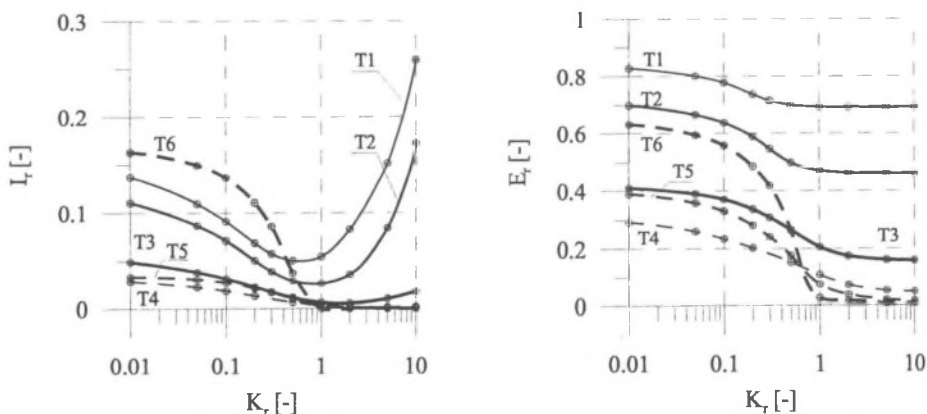


Rys. 8. Przykładowe przebiegi wartości zadanej  $z_{ref}$ , napięcia generatora  $y$  oraz wskaźników jakości przy skokowej zmianie wartości zadanej napięcia generatora  $y_{ref}$

Fig. 8. Examples of waveforms of reference value  $z_{ref}$ , stator voltage  $y$  and performance criterion for step change of the fixed stator voltage  $y_{ref}$

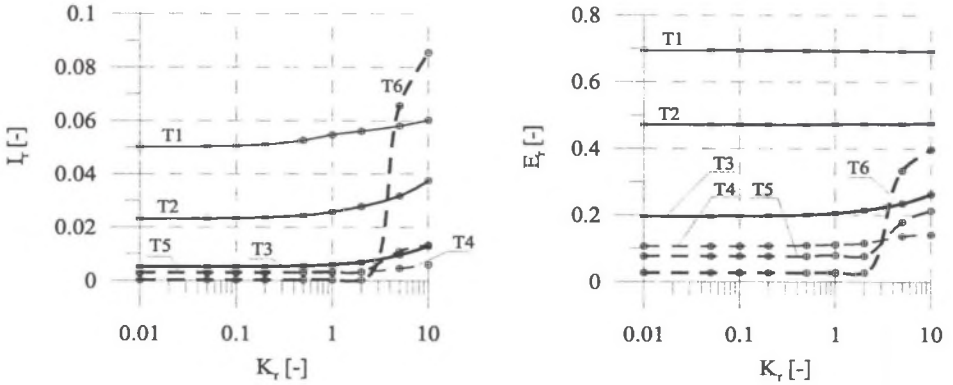
Wpływ współczynników wzmocnienia poszczególnych wejść regulatora na przyjęte wskaźniki jakości regulacji przedstawiają rys. 9 – 13, przy czym  $K_r$  jest względnym wzmocnieniem danego toru regulatora oraz:

- T1 – stała czasowa modelu odniesienia  $T = 0,2 T_{d0}$ ,
- T2 – stała czasowa modelu odniesienia  $T = 0,4 T_{d0}$ ,
- T3 – stała czasowa modelu odniesienia  $T = T_{d0}$ ,
- T4 – stała czasowa modelu odniesienia  $T = 2 T_{d0}$ ,
- T5 – stała czasowa modelu odniesienia  $T = 5 T_{d0}$ ,
- T6 – stała czasowa modelu odniesienia  $T = 10 T_{d0}$ .

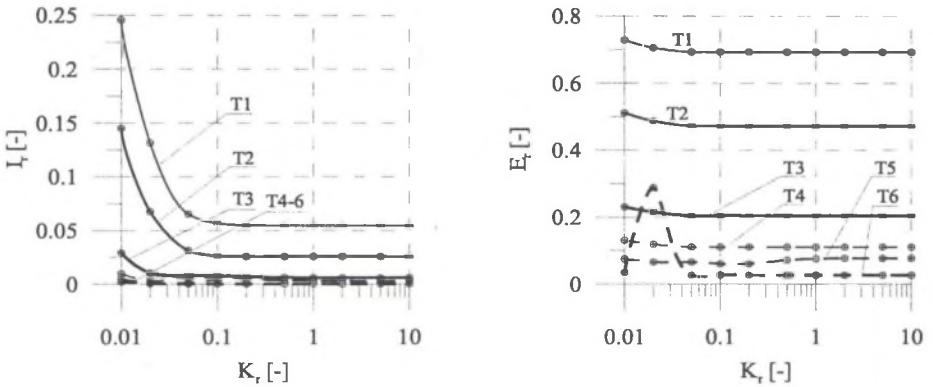


Rys. 9. Wpływ wzmocnienia  $k_f$  regulatora rozmytego na jakość regulacji

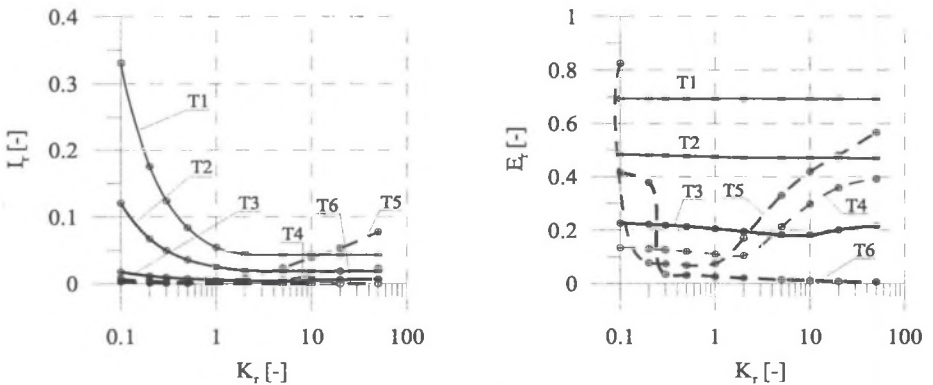
Fig. 9. Influence of the fuzzy controller gain  $k_f$  on the quality coefficient



Rys. 10. Wpływ wzmocnienia  $k_2$  regulatora rozmytego na jakość regulacji  
 Fig. 10. Influence of the fuzzy controller gain  $k_2$  on the quality coefficient

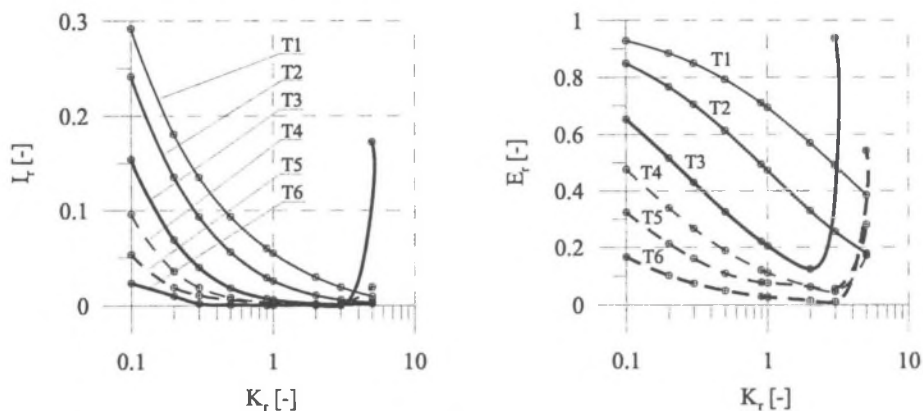


Rys. 11. Wpływ wzmocnienia  $k_3$  regulatora rozmytego na jakość regulacji  
 Fig. 11. Influence of the fuzzy controller gain  $k_3$  on the quality coefficient



Rys. 12. Wpływ wzmocnienia  $k_4$  regulatora rozmytego na jakość regulacji  
 Fig. 12. Influence of the fuzzy logic controller  $k_4$  on the quality coefficient





Rys. 13. Wpływ wzmocnienia  $k_o$  regulatora rozmytego na jakość regulacji  
 Fig. 13. Influence of the fuzzy controller gain  $k_o$  on the quality coefficient

## 5. PODSUMOWANIE

Przedstawiony regulator rozmyty Takagi-Sugeno zawiera w bazie wiedzy 9 reguł, więc może być zrealizowany w prostym systemie (np. moduł logiki rozmytej sterownika PLC – [9]).

Analizując przedstawione charakterystyki (rys. 9 – 13) można stwierdzić, że zmiany w szerokich granicach współczynników wzmocnienia, poza  $k_o$ , nie prowadzą do nadmiernego pogorszenia wybranych wskaźników jakości regulacji. Zatem przedstawiony regulator wymaga jedynie zgrubnego strojenia, w celu uzyskania poprawnych przebiegów (rys. 6).

Największym błędem przedstawionego regulatora jest znacząca wartość niedokładności odtwarzania przebiegu zadanego (duża wartość maksymalna błędu regulacji). Jednakże można przypuszczać, że dalsze badania mogą wyeliminować ten błąd.

Największy wpływ na jakość regulacji ma wzmocnienie wyjścia regulatora  $k_o$  (podobne rezultaty przedstawia praca [10]). Dzięki prawie liniowej zależności wybranych wskaźników jakości od tego wzmocnienia można zastosować adaptację tego wzmocnienia w zależności od wielkości wybranego wskaźnika, podobnie jak to zaproponowano w pracy [6, 11].

## LITERATURA

1. Akee J., Steiner S. J.: Genetic-algorithms-based parameter and rule learning for fuzzy logic control systems, 5th International Conference on FACTORY 2000, p. 325-328.
2. Brown M. D., Swidenbank E., Hogg B. W.: Transputer implementation of adaptive control for a turbogenerator system, Electrical Power & Energy Systems, Vol. 17, No. 1, 1995, p. 21-38.
3. Firlit A., Jarocho R.: Sterowanie adaptacyjne silnika prądu stałego z modelem odniesienia, Konferencja SENE 1999, s. 155-160.
4. Gessing R.: Podstawy automatyki, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 2001.
5. Gutenbaum J.: Problemy teorii regulatorów, WNT, Warszawa 1975.
6. Jaszczak K., Orłowska-Kowalska T.: Zastosowanie regulatora rozmytego z adaptacją parametrów w układzie regulacji prędkości silnika prądu stałego, Mat. konf. SENE 1999, s. 279-286.
7. Kluska J.: Sterowanie z logiką rozmytą, Zeszyty Naukowe Politechniki Rzeszowskiej, seria Elektrotechnika z.12, Rzeszów 1999.

8. Lown M., Swidenbank E., Hogg B.W.: Adaptive fuzzy control of a pilot turbo-generator plant. IEE publication 1997.
9. Nocoń A.: Sterownik programowalny TSX37 Micro jako rozmyty regulator napięcia generatora synchronicznego małej mocy, *Zeszyt Naukowy Politechniki Śląskiej* z. 177, seria: Elektryka, Gliwice 2001, s. 227-232.
10. Orłowska-Kowalska T., Szabat K., Jaszczak K.: Analiza wpływu parametrów regulatora rozmytego na właściwości dynamiczne napędu prądu stałego, *Mat. konf. SENE 1999*, s. 513-520.
11. Orłowska-Kowalska T., Szabat K., Jaszczak K.: The influence of parametres and structure of PI-type fuzzy-logic controller on DC drive system dynamics, *Fuzzy sets and systems* 131/2002, p. 251-264.
12. Paszek W.: *Dynamika maszyn elektrycznych prądu przemiennego*, Wydawnictwo Helion, Gliwice 1998.
13. Pułaczewski J.: *Dobór nastaw regulatorów przemysłowych*, WNT, Warszawa 1966.
14. Reznik L., Ghanayem O., Bourmistrov A.: PID plus fuzzy controller structures as a design base for industrial application, *Engineering Applications of Artificial Intelligence* 13/2000, p. 419-430.
15. Skalny A.: Adaptacyjne sterowanie napędu ze zmiennym momentem bezwładności z rekursywnym wyznaczaniem sterowań, *Konferencja SENE 2001*, p. 555-561.
16. Su C.-T., Hwung H.-R., Lii G.-R.: Fuzzy logic based voltage control for a synchronous generator. *Electric Power Systems Research* 41/1997, p. 225-231.
17. Yager R. R., Filev D. P.: *Podstawy modelowania i sterowania rozmytego*. WNT, Warszawa 1995.
18. Mizia W. (red.): *Maszyny synchroniczne. Badania i pomiary*. Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 1999.

Recenzent: Dr hab. inż. Zbigniew Lubośny

Wpłynęło do Redakcji dnia 22 stycznia 2004 r.

## Abstract

The paper presents a novel Takagi-Sugeno fuzzy logic reference model controller. It allows controlling a controlled system and compensating variation of the system parameters. A stand-alone synchronous generator was assumed to be the controlled system in simulation investigations.

The idea of the investigated fuzzy controller (Fig. 2b) is presented in Section 2. There is proposed a system Takagi-Sugeno of 5 inputs, 1 output and 9 rules in Rule Base (Fig. 3). The controller does not adjust the error  $\varepsilon$  (Fig. 1a) but the error of the derivative stator voltage of synchronous generator  $\varepsilon_{df}$  (Fig. 1b). It is equipped with an additional element for correction of the static error  $\varepsilon$ . This correction element is blocked by the variable  $\varepsilon_1$  (Fig. 2). Fig. 4 presents the membership functions of the fuzzy controller. The control surface of the investigated controller (for normal operation and operation with limitation) is shown in Fig. 5.

Section 3 describes the basic information on the synchronous generator mathematical model (Fig. 6) used for simulation investigations.

In Section 4 the results of simulation investigations are given. The influence of the fuzzy controller gain on the selected performance criteria described by equations (4.1) and (4.2) is presented. The fuzzy logic controller was tested in Matlab-Simulink (simulation diagram shown in Fig. 7). For the analysis a linear controlled system was assumed. The results of simulation investigations are presented in Figs. 9 to 13.