

Adrian NOCOŃ

## BADANIA SYMULACYJNE GENERATORA SYNCHRONICZNEGO MAŁEJ MOCY Z KLASYCZNYM I ROZMYTYM REGULATOREM NAPIĘCIA

**Streszczenie.** W artykule przedstawiono układy regulacji napięcia generatora synchronicznego małej mocy, pracującego samotnie oraz przeprowadzono analizę porównawczą (zaprezentowano wstępne jej wyniki) dotychczas stosowanych rozwiązań klasycznych (PI) i układów opartych na logice rozmytej.

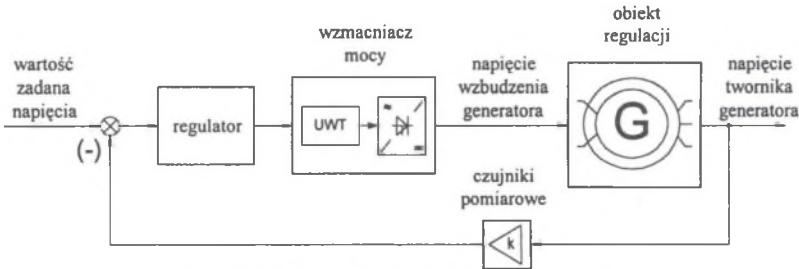
### SIMULATION INVESTIGATIONS OF LOW-POWER SYNCHRONOUS GENERATOR WITH CLASSIC AND FUZZY VOLTAGE CONTROLLER

**Summary.** The voltage control of low-power synchronous generator working standalone is described in the paper. Comparison of a analogue controller with the fuzzy one is made. The results of this comparison are given as well.

**Key words:** simulation investigation, synchronous generator, fuzzy controller.

#### 1. WPROWADZENIE

W wielu obecnie prowadzonych badaniach wykorzystuje się teorię zbiorów rozmytych do sterowania i modelowania maszyn elektrycznych [4,6,7]. Systemy rozmyte wykorzystywane są jako regulatory w przypadku silnej nieliniowości obiektu regulacji, estymacji wielkości trudno dostępnych pomiarowo (prędkość obrotowa, strumień magnetyczny) lub wspomaganie regulatora klasycznego (zmieniają jego nastawienia lub charakter w zależności od zmian w obiekcie regulacji [5]).



Rys.1. Schemat blokowy badanego układu regulacji

Fig.1. Block diagram of a simulation system

W pracy przeprowadzono badania symulacyjne układu regulacji napięcia generatora synchronicznego małej mocy, wyposażonego w klasyczny regulator typu PI oraz regulator rozmyty. Dokonano porównania ich właściwości w stanach przejściowych generatora.

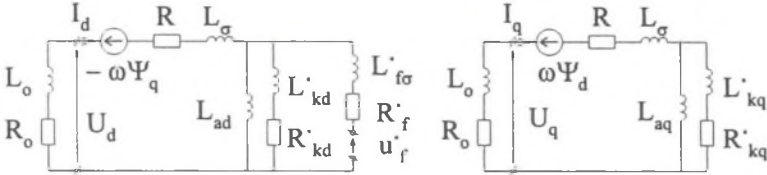
Analizowany układ regulacji napięcia przedstawiono w postaci schematu ideowego na rys.1. Składa się on z regulatora klasycznego lub rozmytego, wzmacniacza mocy i obiektu regulacji, jaki stanowi generator synchroniczny małej mocy, pracujący samotnie.

<sup>1)</sup> Mgr inż., Katedra Maszyn i Urządzeń Elektrycznych Politechniki Śląskiej, ul. Akademicka 10a, 44-100 Gliwice, tel. +4832-237-18-32, a\_nocn@kmiue.elekt.polisl.gliwice.pl

2. MODEL MATEMATYCZNY GENERATORA SYNCHRONICZNEGO MAŁEJ MOCY

Przy tworzeniu modelu matematycznego uwzględniono założenia podane w pracy [1], przyjmując dodatkowo, że generator wiruje ze stałą prędkością.

Podstawą konstrukcji modelu symulacyjnego generatora jest schemat zastępczy (rys.2) generatora synchronicznego, w którym uwzględniono jeden zastępczy obwód tłumiący w osi d i q, reprezentujący klatkę tłumiącą. Tłumienie od prądów wirowych nie występuje w badanej maszynie, ponieważ rdzeń jest pakietowany.



Rys.2. Schemat zastępczy generatora synchronicznego  
Fig. 2. Equivalent diagram of a synchronous generator

3. MODEL MATEMATYCZNY REGULATORA NAPIĘCIA

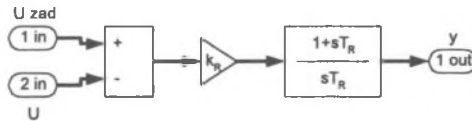
3.1. Regulator klasyczny

Model regulatora klasycznego typu PI o transmitancji operatorowej (1) przedstawia rys.3.

$$K_R(s) = \frac{W_y(s)}{W_e(s)} = k_R \frac{1 + s \cdot T_R}{s \cdot T_R}, \tag{1}$$

gdzie:  $k_R$  – wzmacnienie regulatora,  
 $T_R$  – stała czasowa zdwojenia regulatora.

Parametry regulatora zostały dobrane na podstawie Optimum Modułowego dla obiektu o dwóch stałych czasowych  $T_1$  i  $T_2$  (przyjęto  $T_1$  – przejściowa,  $T_2$  – podprzejściowa stała czasowa w osi d generatora).



Rys.3. Schemat symulacyjny (Simulink) klasycznego regulatora PI  
Fig.3. Simulation diagram (Simulink) of a classic controller PI

3.2. Regulator rozmyty

Wychodząc z funkcji przejścia regulatora klasycznego PI

$$U = k_p \cdot e + k_i \cdot \int e \cdot dt \tag{2}$$

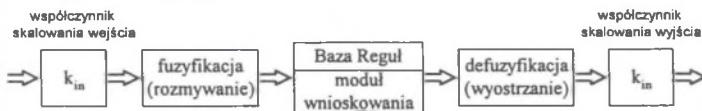
różniczkując obustronnie i przechodząc z postaci różniczkowej na postać różnicową otrzymujemy równanie (3) stanowiące podstawę budowy regulatora rozmytego typu PI [3].

$$\Delta U = k_p \cdot \Delta e + k_i \cdot e, \tag{3}$$

gdzie:  $U$  – sygnał sterujący (wyjście);  
 $e$  – błąd regulacji;  
 $k_p$  – wzmacnienie części proporcjonalnej;  
 $k_i$  – wzmacnienie części całkującej.

Regulator rozmyty oparty na równaniu (3) posiada właściwości klasycznego regulatora typu PI i w dalszej części nazywany będzie F-PI (rys.4). Na wejścia regulatora podawany jest sygnał błędu i jego przyrost, wyjście stanowi wartość przyrostu sygnału sterowania.

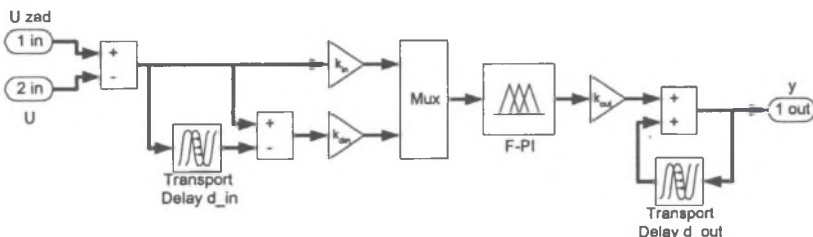
Regulatory rozmyte pracują w ściśle określonych zakresach wartości wejściowych i wyjściowych (np. przedział  $\langle -1, 1 \rangle$ ). Z tego powodu w układzie automatycznej regulacji muszą znaleźć się układy skalujące [3], dopasowujące rzeczywistą wartość sygnału do poziomu dopuszczalnego regulatora. Człony te mają duży wpływ na prace regulatora i podobnie jak Baza Reguł służą do zmiany jego własności.



Rys. 4. Schemat blokowy regulatora rozmytego  
Fig. 4. Block diagram of a fuzzy controller

Regulator rozmyty (rys.5) został zbudowany w oparciu o Toolbox Fuzzy Logic w programie Matlab\_Simulink. Zastosowano system rozmyty Mamdaniego z defuzyfikacją typu „centroid” (środek ciężkości) oraz wnioskowaniem typu „min-max”. Bazę Reguł (zmodyfikowana baza MacVicar-Whelelana), funkcje przynależności i współczynniki skalowania określono na podstawie uwag zawartych w pracy [3], dotyczących rozmytych regulatorów typu PI.

Jako układ obliczający wartość przyrostu błęd, zgodnie z zależnością (3), zastosowano „opóźnienie” (Transport Delay  $d_{in}$ ). Taki sam układ spełnia rolę całkowania sygnału wyjściowego z regulatora (Transport Delay  $d_{out}$ ).



Rys. 5. Schemat symulacyjny regulatora rozmytego  
Fig. 5. Simulation diagram of a fuzzy controller

Opis regulatora rozmytego bazuje na następujących zmiennych lingwistycznych:

- error* – błąd regulacji;
- derror* – przyrost błęd regulacji;
- dexit* – przyrost sygnału sterowania;

- o wartościach: *dex-u* (*dex-mu*) – zmienna ujemna (mało ujemna);
- dex-z* – zmienna o wartości zero;
- dex-d* (*edx-md*) – zmienna dodatnia (mało dodatnia)

(wartości dla zmiennych *error* i *derror* tworzone są w tej samej konwencji np. *err-u* oznacza błąd ujemny).

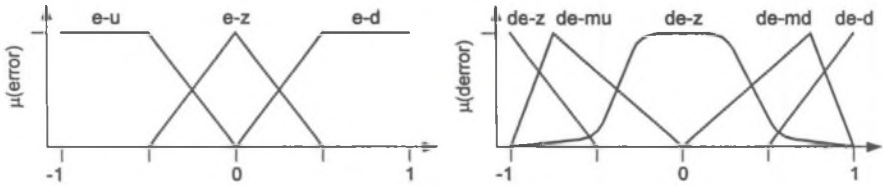
Bazę Reguł regulatora F-PI stanowią warunki (wszystkie posiadają wagę równą 1):

- 1 If (*error* is *e-u*) and (*derror* is *de-z*) then (*dexit* is *dex-u*)
- 2 If (*error* is *e-d*) and (*derror* is *de-z*) then (*dexit* is *dex-d*)
- 3 If (*error* is *e-z*) and (*derror* is *de-z*) then (*dexit* is *dex-z*)
- 4 If (*error* is *e-z*) and (*derror* is *de-d*) then (*dexit* is *dex-d*)
- 5 If (*error* is *e-z*) and (*derror* is *de-u*) then (*dexit* is *dex-u*)
- 6 If (*error* is *e-z*) and (*derror* is *de-md*) then (*dexit* is *dex-md*)
- 7 If (*error* is *e-z*) and (*derror* is *de-mu*) then (*dexit* is *dex-mu*)

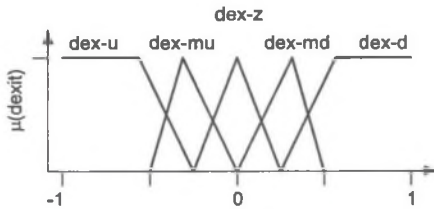
Przedstawioną Bazę Reguł możemy podzielić na trzy podstawowe grupy [3]:

- reguły 1 i 2 odpowiadają za regulację z dala od wartości zadanej (mają za zadanie jak najszybciej doprowadzić do wartości zadanej);
- reguła 3 odpowiada za sterowanie w stanie ustalonym;
- reguły 4 do 7 odpowiadają za sterowanie w pobliżu wartości ustalonej (nie mamy błędu regulacji, ale wartość przebiegu się zmienia).

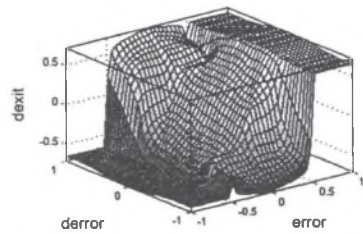
Zmienne lingwistyczne *error*, *derror* (wejścia systemu) oraz *dexit* (wyjście systemu) posiadają funkcje przynależności jak na rys.6 i rys.7.



Rys. 6. Funkcje przynależności zmiennej lingwistycznej *error* i *derror*  
Fig. 6. Membership functions of the linguistic variables *error* and *derror*



Rys. 7. Funkcje przynależności zmiennej lingwistycznej *dexit*  
Fig. 7. Membership functions of the linguistic variable *dexit*

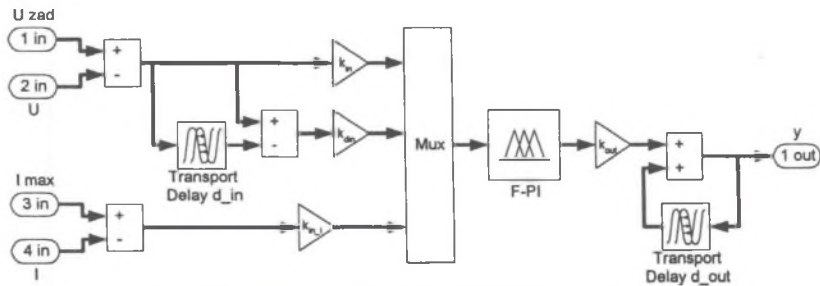


Rys. 8. Powierzchnia sterowania regulatora rozmytego  
Fig. 8. Control surface of a fuzzy controller

Na podstawie Bazy Reguł, funkcji przynależności i metody defuzyfikacji została określona powierzchnia sterowania jak na rys.8.

### 3.3. Regulator rozmyty z ograniczeniem prądu

Ponieważ w stanach dynamicznych przy dużych zmianach wartości zadanej mogłoby nastąpić przekroczenie dopuszczalnej wartości prądu wzbudzenia, mogące spowodować uszkodzenie uzwojenia, zaprojektowany regulator został wyposażony w człon odcięcia prądowego. Układ regulacji z ograniczeniem prądu przedstawia rys.9. Dodatkowym wejściem regulatora jest wartość różnicy prądu dopuszczalnego ( $I_{max}$ ) oraz prądu rzeczywistego ( $I$ ). Aby nastąpiło ograniczenie prądu regulator powinien zmniejszyć wartość sygnału wyjściowego w momencie przekroczenia przez prąd wartości zadanej. Gdy natomiast prąd jest poniżej wartości dopuszczalnej, to w układzie nic nie powinno ulec zmianie w stosunku do układu wyjściowego bez ograniczenia (rys.5).

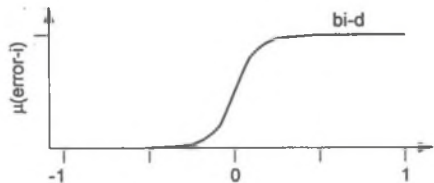


Rys. 9. Model regulatora rozmytego z ograniczeniem prądu  
 Fig. 9. Simulation diagram of a fuzzy controller with current limit

Zadanie obniżenia napięcia realizuje dodatkowy warunek w Bazie Reguł regulatora, mający następującą postać:

If (*error-i* is *erri-d*) then (*dexit* is *s-u*)

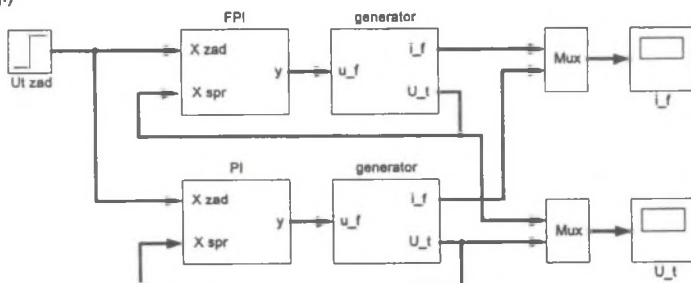
Zmienna lingwistyczna *error-i* ma tylko jedną funkcję przynależności w postaci funkcji sigmoidalnej (rys.10). Wybrana funkcja przynależności po przekroczeniu wartości zadanej w stanie dynamicznym powoduje pojawienie się ujemnego przyrostu napięcia sterowania, co zmniejsza wartość prądu wzbudzenia. Po zmniejszeniu prądu do dopuszczalnej wartości maksymalnej reguła stabilizuje wartość prądu na pochyłej części funkcji przynależności (w okolicach zera, czyli na poziomie wartości dopuszczalnej).



Rys.10. Funkcja przynależności zmiennej *error-i*  
 Fig. 10. Membership function of the linguistic variable *error-i*

#### 4. WYNIKI BADAŃ SYMULACYJNYCH, ANALIZA PORÓWNAWCZA

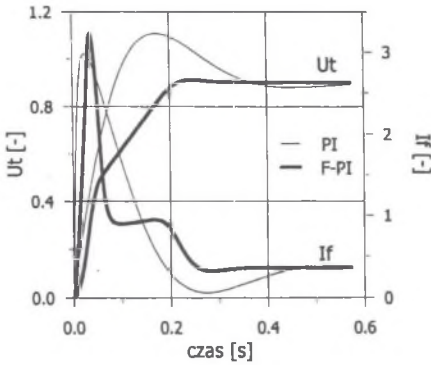
Wszystkie symulacje zostały przeprowadzone w programie Matlab-Simulink na podstawie modelu symulacyjnego przedstawionego na rys.11, gdzie PI – model klasycznego regulatora typu PI, FPI – model rozmytego regulatora typu PI, generator – model generatora synchronicznego (obiekt regulacji)



Rys.11. Model symulacyjny układu regulacji  
 Fig. 11. Simulation diagram of a control system

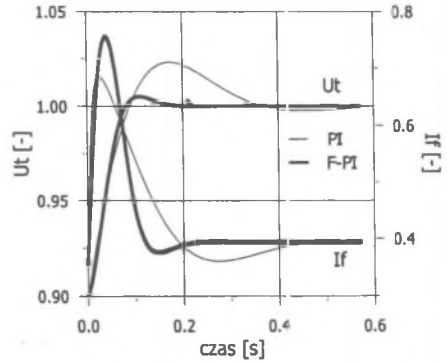
W badaniach symulacyjnych został porównany regulator klasyczny z regulatorem rozmytym przy różnych zakłóceniach, w szczególności dla zmiany wartości zadanej przy obciążeniu generatora mocą znamionową czynną i bierną [1,2]. Szczególną uwagę zwrócono na uwidocznienie

czasu regulacji i stromości narastania wielkości regulowanej [2]. Jako obiekt regulacji wykorzystano model generatora synchronicznego o mocy znamionowej - 4kW, prądzie twornika - 7A, napięciu twornika - 400V, współczynnika mocy - 1 do 0,9 indukcyjnym i prędkości obrotowej równej 3000 obr/min.



Rys.12. Porównanie przebiegów napięcia twornika i prądu wzbudzenia generatora dla „dużej” zmiany wartości zadanej

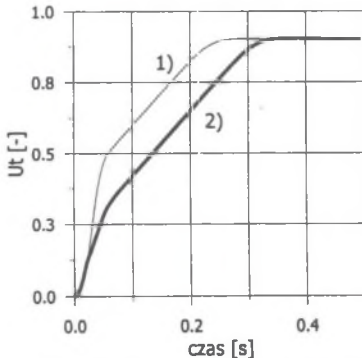
Fig. 12. Waveforms of stator voltage and exciting current for “big” jump of the fixed stator voltage



Rys.13. Porównanie przebiegów napięcia twornika i prądu wzbudzenia generatora dla „małej” zmiany wartości zadanej

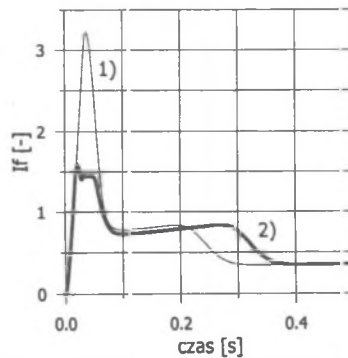
Fig. 13. Waveforms of voltage stator and exciting current for “small” jump change of the fixed stator voltage

Ponieważ regulator rozmyty inaczej reaguje na „duże” i „małe” zakłócenia przeprowadzono symulacje dla dwóch skoków wartości zadanej, z 0,0 do 0,9 (zakłócenie „duże” – rys.12) oraz z 0,9 do 1,0 (zakłócenie „małe” – rys.13).

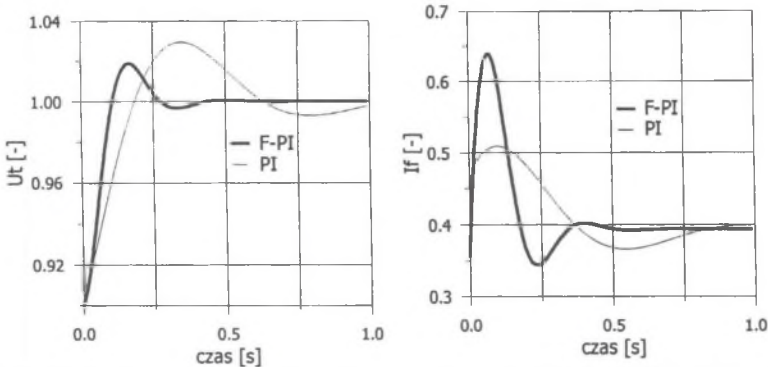


Rys.14. Ograniczające prąd wzbudzenia działanie regulatora rozmytego, przebieg 1) dla regulatora nie wyposażonego w regulę ograniczającą prąd, przebieg 2) dla regulatora z ograniczeniem

Fig. 14. Voltage stator and exciting current for a controller without limiting 1) and with limiting excitation current



Badania możliwości ograniczenia wartości prądu wzbudzenia przez regulator rozmyty przedstawia rys.14.



Rys.15. Adaptacyjne właściwości regulatora rozmytego, przy zmianie wartości stałej czasowej obwodu wzbudzenia

Fig.15. Adapting properties of a fuzzy controller

W niektórych sytuacjach istnieje konieczność zastosowania układu regulacji do obiektu o nieznanymi parametrach lub w trakcie pracy układu następują niekontrolowane zmiany tychże parametrów. W większości przypadków przy zmianie parametrów obiektu regulacji (np. zmiana wartości stałych czasowych) układ klasyczny nie jest w stanie spełnić wymagań dotyczących dynamiki układu. Badany regulator rozmyty w porównaniu z regulatorem klasycznym zachowuje pełne możliwości poprawnej regulacji w szerokim zakresie zmian parametrów obiektu regulacji, co przedstawia rys.15. W badaniach symulacyjnych w celu sprawdzenia „adaptacyjnych” właściwości regulatora rozmytego wprowadzono zmianę parametrów generatora, to jest zwiększono stałą czasową obwodu wzbudzenia o 50%.

## 5. WNIOSKI

Przeprowadzone badania dowiodły, że istnieje możliwość zastosowania regulatorów rozmytych do sterowania generatorami synchronicznymi. Jednakże brak jednoznacznych kryteriów pozwalających konstruować systemy rozmyte, przydatne w układach regulacji, powoduje konieczność zastosowania metody „prób i błędów” na etapie doboru struktury i nastawień systemu rozmytego. Staje się niezbędne wykorzystanie symulacji komputerowych w procesie projektowania.

Możliwość praktycznie dowolnego kształtowania płaszczyzny sterowania daje dużą dowolność w kształtowaniu dynamiki generatora.

Podobnie jak w klasycznym regulatorze typu PI istnieje możliwość budowy regulatora rozmytego pozwalającego na ograniczenie prądu wzbudzenia oraz innych wielkości kryterialnych. Pozwala to na zintegrowanie funkcji regulacyjnych i zabezpieczeniowych w jednym systemie bez wyraźnej utraty dynamiki układu.

Regulator rozmyty posiada własności adaptacyjne (ma możliwość optymalnego sterowania dla dużych zmian parametrów - dynamiki obiektu regulacji, w przeciwieństwie do regulatora klasycznego zdolnego do poprawnej pracy dla ściśle określonego obiektu regulacji); przy zmianach parametrów obiektu dynamika ulega zmianom w mniejszym stopniu niż dla układu klasycznego.

## LITERATURA

1. Paszek W.: Dynamika maszyn elektrycznych. Wydawnictwo Helion, Gliwice 1998.
2. Paszek W.: Zastosowanie wzmacniaczy magnetycznych do układów regulacji napięcia. PWN, Warszawa 1967.
3. Yager R., Filev D.: Podstawy modelowania i sterowania rozmytego. WNT, Warszawa 1995.
4. Vas.p.: Artificial - Intelligence - Based Electrical Machines and Drives, Oxford Science Publications, Oxford 1999.

5. Ferenc J., Urbański K., Zawirski K.: Sterowanie rozmyte prądem twornika w napędzie tyrystorowym prądu stałego, materiały konferencyjne SENE'97 Łódź, str. 143-148.
6. Grabowski P.: Sterowanie neuro-fuzzy w układzie DTC dla silnika klatkowego zasilanego z falownika napięcia PWM, materiały konferencyjne SENE'97 Łódź, str. 189-194.
7. Nowak M., Dzieńkowski M., Barlik R.: Trójfazowy prostownik PWM z regulatorem napięcia typu „fuzzy logic”, Przegląd elektrotechniczny, nr 7'98, str. 165-171.

Recenzent: Dr hab. inż. Teresa Orłowska-Kowalska  
Profesor Politechniki Wrocławskiej

Wpłynęło do Redakcji dnia 15 lutego 2001 r.

### Abstract

The paper presents voltage control systems of a low power synchronous generator operating standalone. The comparative analysis of the PI classic controller used so far and those based on the fuzzy logic is made.

The general structure of the simulated control system is shown in Fig. 1 (Chapter 1). The system consists of a controller (classic or fuzzy one), a power amplifier and a synchronous generator being the controlled system.

Chapter 2 presents the basic information on the synchronous generator mathematical model (Fig 2) used for simulation investigations.

Chapter 3 describes the mathematical models of the controller investigated. Fig. 3 shows the simulation model (Matlab-Simulink) of the PI classic controller with the transmittance given by the equation (1). Basing on the relationship (2) and the general structure of a fuzzy controller (Fig. 4) its model was worked out. It is presented in Fig. 5. The control surface of the investigated controller is shown in Fig. 8. It was determined basing on the membership functions (Figs. 6 and 7) and the modified Mac Vicar-Whelan base assumed to be the Rule Base of the controller investigated.

Chapter 4 presents the results of simulation investigations performed in the system shown in Fig. 11. Comparison of the dynamics of the system for the classic controller with that for the fuzzy one was made (Figs. 12 and 13). The way of limiting the current (Fig. 9) consisting in introducing the additional constraint of the exciting current (Fig.14) to the Rule Base is given in Chapter 4 as well.