

Ryszard ZAJCZYK  
Katedra Systemów Elektroenergetycznych  
Politechniki Gdańskiej

## WPLYW STABILIZATORÓW SYSTEMOWYCH NA TŁUMIENIE KOŁYSAŃ WIRNIKÓW GENERATORÓW SYNCHRONICZNYCH

**Streszczenie.** W referacie przedstawiono analizę skuteczności tłumienia kołysań wirników generatorów synchronicznych przez stabilizatory systemowe. W rozważaniach rozpatrzono dwa typowe układy stabilizatorów P i P-f. Przeprowadzone badania symulacyjne modeli matematycznych pozwoliły na ocenę skuteczności działania stabilizatorów przy małych i dużych zakłóceniach.

## INFLUENCE OF THE POWER SYSTEM STABILISERS ON DAMPING OF THE SYNCHRONOUS GENERATOR SWINGS

**Summary.** The paper presents analysis of effectiveness of electromechanical swings by the power system stabilisers. Two typical types of stabilisers P and P-f were considered. The carried on, and presented in the paper, tests (time domain simulations) allowed to evaluate effectiveness of the power system stabilisers during various disturbances.

### 1. WSTĘP

Poprawę stabilności generatora synchronicznego, a tym samym i całego systemu elektroenergetycznego można uzyskać poprzez skuteczne tłumienie kołysań wirnika generatora. Tłumienie ruchu wirnika można istotnie zwiększyć poprzez wprowadzenie do układu regulacji napięcia dodatkowych sygnałów sterujących, korygujących podstawowy uchyb regulacji:

$$U_R = G_R(s)(U_{gz} - U_k) + U_{SS}, \quad (1)$$

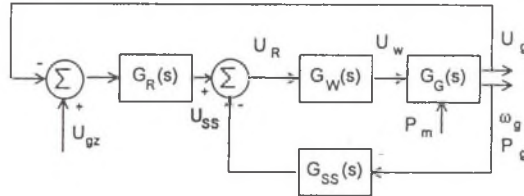
gdzie:

$U_R$  – napięcie wyjściowe regulatora generatora,

$U_{gz}$  – wartość zadana napięcia

- $U_g$  – wartość zmierzona napięcia,  
 $G_R(s)$  – transmitancja toru regulacji napięcia,  
 $U_{SS}$  – sygnał wyjściowy stabilizatora systemowego.

Schemat blokowy przedstawiono na rys. 1.



Rys.1. Schemat blokowy regulatora generatora. Transmitancje:  $G_R(s)$  – regulatora napięcia,  $G_W(s)$  – układu wzbudzenia,  $G_G(s)$  – generatora synchronicznego,  $G_{SS}(s)$  – stabilizatora systemowego

Fig.1. Block diagram of a generator governor. Transmittance:  $G_R(s)$  – voltage regulator,  $G_W(s)$  – excitation system,  $G_G(s)$  – synchronous generator,  $G_{SS}(s)$  – system stabiliser

Dodatkowe sygnały sterujące powinny być związane z wielkościami zawierającymi w sobie informacje o przebiegu kołysań wirnika. Do tych wielkości można zaliczyć:

- prędkość kątową wirnika  $\omega_g$ ,
- moc czynną generatora  $P_g$ .

Sygnały te powinny być łatwo dostępne (mieralne) w otoczeniu generatora.

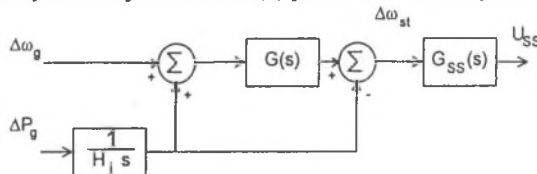
W ogólnym przypadku sygnał sterujący zależny od zmian prędkości kątowej i zmian mocy czynnej można określić zależnością [1]:

$$\Delta\omega_{st}(s) = \frac{\Delta P_e(s)}{H_j s} + G(s) \left[ \frac{\Delta P_e(s)}{H_j s} + \Delta\omega_g(s) \right] \quad (2)$$

gdzie:

- $\Delta P_e$  – zmiana mocy czynnej generatora,  
 $H_j$  – stała inercji turbozespołu,  
 $\Delta\omega_g$  – wartość prędkości kątowej wirnika generatora,  
 $G(s)$  – transmitancja,  
 $\Delta\omega_{st}$  – sygnał wyjściowy członu pomiarowego stabilizatora systemowego.

Schemat blokowy realizacji zależności (2) przedstawiono na rys.2.



Rys.2. Człon pomiarowy stabilizatora systemowego  
 Fig.2. Measurement elements of a system stabiliser

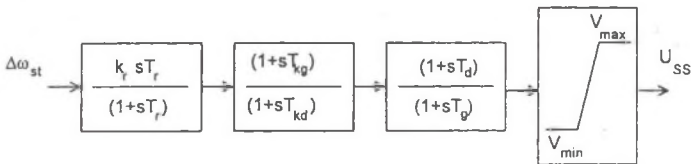
Stabilizator systemowy powinien generować sygnał wyjściowy tylko w trakcie trwania stanu nieustalonego. Po wytlumieniu kołysań jego oddziaływanie na tor regulacji napięcia powinno być zerowe, bez względu na osiągnięty końcowy stan ustalony. Z tego też powodu człon wykonawczy stabilizatora powinien zawierać człon różniczkujący. Aby zapewnić skuteczne tłumienie kołysań, stosuje się człony korekcyjne.

Stosowane są trzy rodzaje stabilizatorów (ze względu na sygnały pomiarowe):

- stabilizator działający na zmiany prędkości kątowej (poślizgu) –  $SS_{\omega}$ ,
- stabilizator działający na zmiany mocy czynnej –  $SS_P$ ,
- stabilizator działający na zmiany prędkości kątowej i mocy czynnej –  $SS_{\omega P}$ .

W przypadku stabilizatora działającego na sygnał proporcjonalny do zmian prędkości kątowej człony korekcyjne powinny wyprzedzać fazę sygnału sterującego (tzn. stałe czasowe licznika większe od stałych czasowych mianownika). Dla stabilizatora działającego na sygnał proporcjonalny od zmian mocy czynnej co najmniej jeden z członów korekcyjnych powinien opóźnić fazę sygnału [3]. Dodatkowo w celu wyeliminowania znacznego wpływu stabilizatora (przy dużych zakłóceniach) na tor regulacji napięcia i tym samym niedopuszczenie do nadmiernego forsowania bądź rewersji napięcia wzbudzenia stosuje się ograniczenie sygnału wyjściowego stabilizatora  $U_{SS}$  do poziomu  $V_{min} \div V_{max}$ .

Schemat blokowy członu wykonawczego stabilizatora przedstawiono na rys.3.



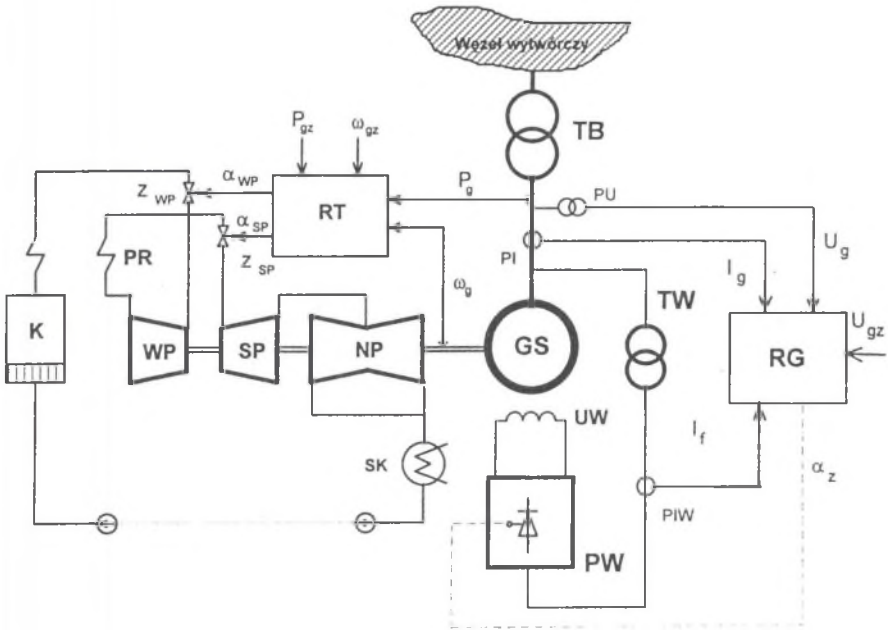
Rys.3. Schemat blokowy członu wykonawczego  $G_{SS}(s)$  stabilizatora

Fig.3. Block diagram of transmittance  $G_{SS}(s)$  of a power system stabiliser

## 2. MODELE ELEMENTÓW SYSTEMU ELEKTROENERGETYCZNEGO

Model matematyczny systemu elektroenergetycznego składa się z modeli węzłów wytwórczych, węzłów odbiorczych oraz elementów łączących te węzły, czyli z linii elektroenergetycznych i transformatorów. Węzeł wytwórczy dużej mocy składa się z bloków wytwórczych. Schemat funkcjonalny bloku wytwórczego dużej mocy, stanowiącego integralny element węzła wytwórczego przedstawiono na rys.4. W skład części elektrycznej bloku wchodzi: generator synchroniczny (GS), transformator blokowy (TB), statyczny, tyrystorowy układ wzbudzenia (składający się z transformatora wzbudzenia (TW) i tyrystorowego prostownika wzbudzenia (PW)) lub maszynowy układ wzbudzenia (składający

się ze wzбудnicy prądu przemiennego (WZ), diodowego prostownika wzбудnicy (PD), tyrystorowego prostownika sterującego wzbudnicą (PT)), regulatora generatora (RG). Część cieplną bloku stanowią: turbina kondensacyjna dużej mocy (części wysokopiętna (WP), średniopiętna (SP) i niskopiętna (NP)) z przegrzewaczem międzystopniowym (PR), regulator turbiny (RT) i kocioł (K).



Rys.4. Schemat bloku wytwórczego dużej mocy  
Fig. 4. Block diagram of a large-power generating unit

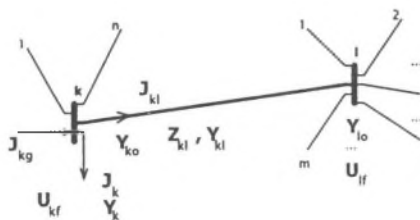
## 2.1. Model systemu elektroenergetycznego

System elektroenergetyczny modelowano z wykorzystaniem zmodyfikowanej metody równań węzłowych [6]. W modelach matematycznych linii i transformatorów uwzględniono gałęzie poprzeczne elementów. Odbiory modelowano wariantowo jako: odbiory statyczne o stałej wartości mocy pobieranej lub o stałej admitancji zastępczej oraz odbiory dynamiczne na bazie modelu silnika asynchronicznego. Generatory synchroniczne w modelu systemu uwzględniano jako elementy wytwarzające moc czynną i bierną w danym węźle. Dowolny element systemu włączony między węzły  $k, l$  opisano zależnością:

$$\left[ \delta \underline{U}_{kf} (Y_k + Y_{ko} + Y_{kk}) - \sum_{l \neq k}^{l \in n} \underline{Y}_{kl} \delta \underline{U}_{lf} = \sum_{l \in n} \underline{Y}_{kl} \delta \underline{U}_{lf} + (Y_k + Y_{k_n}) \underline{U}_{of} - \underline{J}_{kg} \right]_{k=1, l \in n} \quad (3)$$

gdzie:

- $\underline{U}_{kf}$  - napięcie w węźle  $k$ ,
- $\underline{U}_{lf}$  - napięcie w węźle  $l$ ,
- $\underline{J}_{kl}$  - prąd płynący między węzłami  $k$  i  $l$ ,
- $\underline{J}_k$  - prąd odbioru w węźle  $k$ ,
- $\underline{J}_{kg}$  - prąd generatora w węźle  $k$ ,
- $\underline{Z}_{kl}, \underline{Y}_{kl}$  - impedancja i admitancja elementu łączącego węzły  $k$  i  $l$ ,
- $\underline{Y}_{ko}, \underline{Y}_{lo}$  - admitancja gałęzi poprzecznych w węzłach  $k$  i  $l$ ,
- $\underline{Y}_k$  - admitancja zastępcza odbioru w węźle  $k$ .



Rys.5. Metoda węzłowa obliczania rozplywów  
Fig. 5. Node method of a load flow

## 2.2. Model generatora synchronicznego

Równania napięciowo-prądowo-strumieniowe opisujące dowolny stan pracy generatora synchronicznego w zapisie macierzowym mają postać:

$$\mathbf{X}_B \frac{d}{dt} \mathbf{I}_B = -\omega_s \mathbf{U}_B - \omega_s (1 + s) \mathbf{X}_B \mathbf{I}_B - \mathbf{R}_B \mathbf{I}_B, \quad (4)$$

$$\Psi_B = \mathbf{X}_B \mathbf{I}_B,$$

a równania ruchu postać:

$$H_j \frac{ds}{dt} = M_t - M_e - D_t s \quad \text{oraz} \quad \frac{d\delta}{dt} = \omega_s s, \quad (5)$$

gdzie:

- $\mathbf{I}_B$ - wektor prądów stojana  $\mathbf{I}_s$  i wirnika  $\mathbf{I}_w$ ;
- $\mathbf{U}_B$ - wektor napięć stojana  $\mathbf{U}_s$  i wirnika  $\mathbf{U}_w$ ;

$R_B$ - macierz rezystancji stojana  $R_S$  i wirnika  $R_W$ ;

$X_B$ - macierz reaktancji stojana  $X_S$  i wirnika  $X_W$

Wielkościami wejściowymi modelu matematycznego generatora synchronicznego współpracującego z systemem są: napięcia stojana  $U_d, U_q$ , wyznaczone w modelu systemu, napięcie wzbudzenia  $U_f$  wyznaczone w modelu układu wzbudzenia i regulatorze generatora oraz moment napędowy  $M_t$  wyznaczony w modelu turbiny i regulatora turbiny.

### 2.3. Model turbiny i jej regulatora

Turbina kondensacyjna dużej mocy składa się z części wysoko-, średnio- i niskoprężnej (WP, SP, NP) oraz międzystopniowego przegrzewacza pary (PR). Regulacja turbiny typu ilościowego odbywa się poprzez zmiany natężenia przepływu pary przez poszczególne części turbiny, a to uzyskuje się zmieniając stopień otwarcia zaworów regulacyjnych wysokoprężnych  $Z_{WP}$  i średnioprężnych  $Z_{SP}$ .

Elektrohydrauliczny regulator turbiny składa się z regulatora prędkości obrotowej typu PID ze statyzmem, przetwornika (PEH), zaworów wysokoprężnych (ZWP) oraz zaworów średnioprężnych (ZSP).

Regulacja zaworów średnioprężnych odbywa się dopiero przy dużych zakłóceniach, gdy występują znaczne zmiany prędkości obrotowej wirnika turbozespołu.

W procesach regulacyjnych zawory średnioprężne są pełnootwarte. Oddziaływanie na zawory SP następuje dopiero w sytuacji dużych zmian prędkości obrotowej turbozespołu.

### 2.4. Model układu wzbudzenia i regulatora generatora

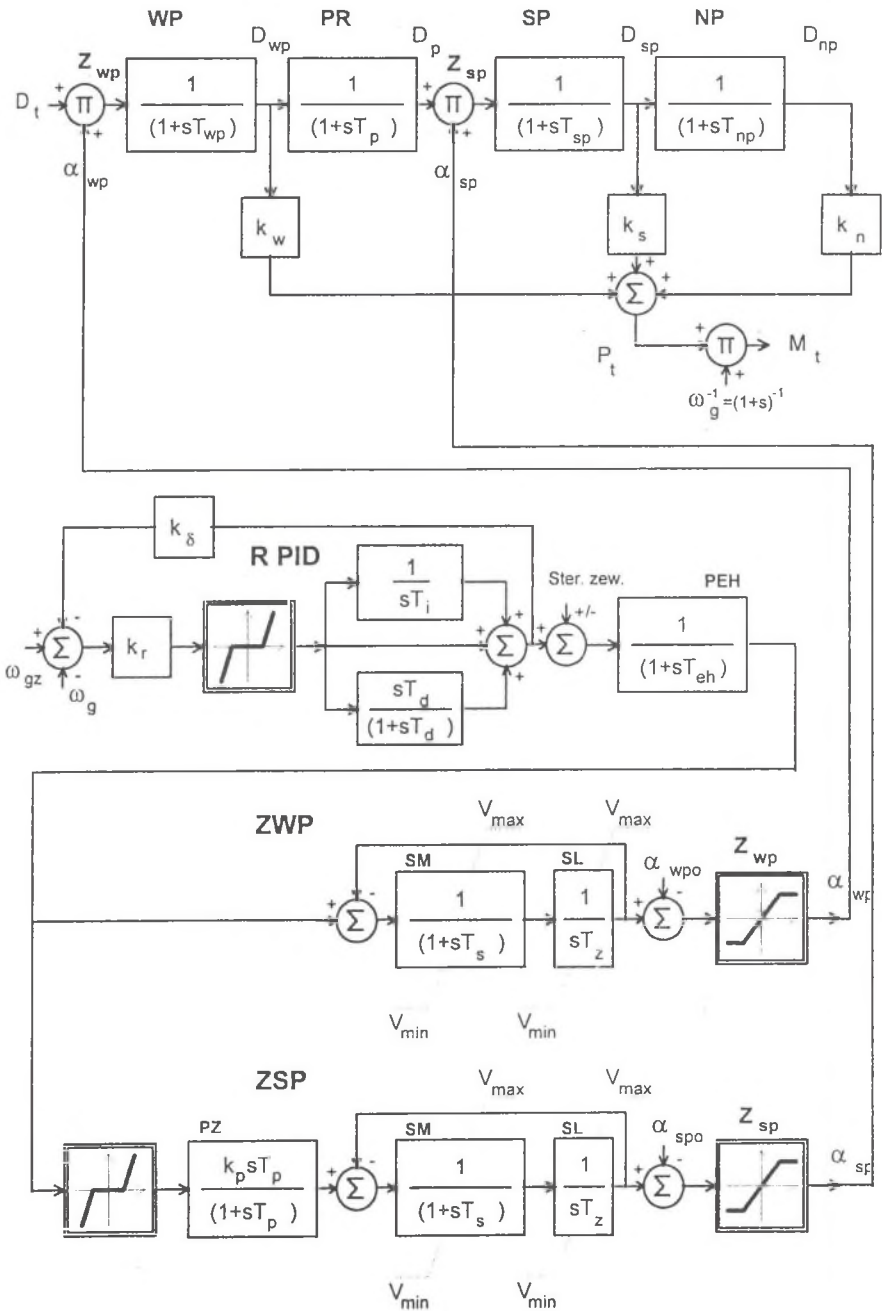
Generatory synchroniczne dużej mocy wyposażane są w statyczny tyrystorowy układ wzbudzenia lub maszynowy układ wzbudzenia oraz wieloparametrowy regulator generatora [3,4,6]. W obu wariantach układu wzbudzenia wieloparametrowy regulator generatora składa się z toru głównego regulacji napięcia, ograniczników układu regulacji oraz elementów dodatkowych. Schemat blokowy wieloparametrowego regulatora generatora przedstawiono na rys.7.

Regulator generatora (tor główny regulacji napięcia) mierzy wartość napięcia na zaciskach generatora, porównuje ją z wartością zadaną z nastawnika i steruje kątem zapłonu tyrystorów prostownika wzbudzenia w układzie statycznym lub kątem zapłonu tyrystorów prostownika zasilającego uzwojenie wzbudzenia wzbudnicy.

Schemat toru głównego regulacji napięcia przedstawiono na rys.8. Toru głównego regulacji napięcia składał się z: nastawnika wartości zadanej - NS, członu pomiarowego napięcia generatora - CPU, wzmacniacza wstępnego -WW ze sprzężeniem korekcyjnym - SK, wzmacniacza głównego - WG, układu zapłonowego - UZ.

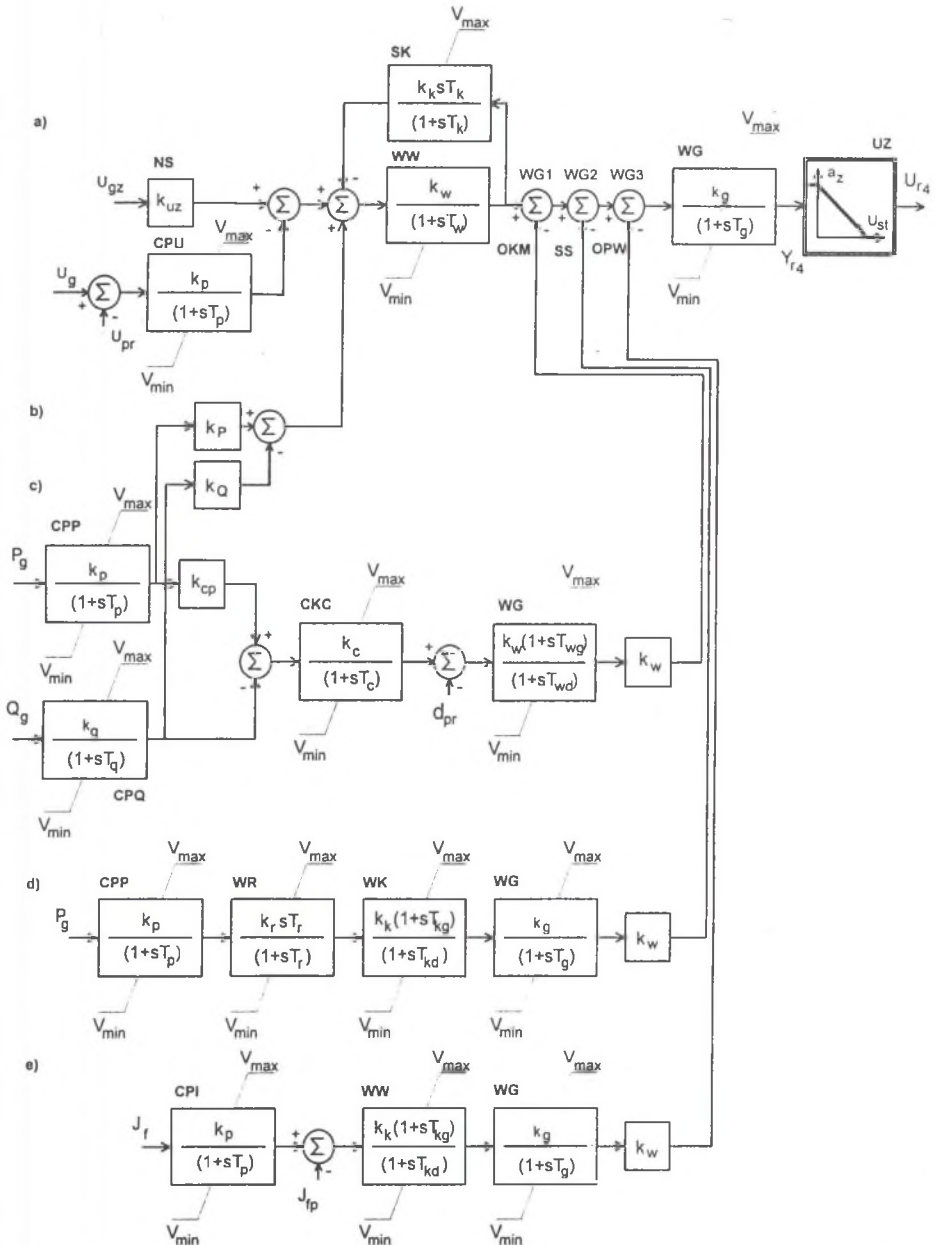
W badaniach symulacyjnych modelowano dwa rodzaje stabilizatorów systemowych:

- stabilizator od mocy czynnej (rys.9),
- stabilizator od prędkości ~~rotowej~~ i mocy czynnej (rys.10).



Rys.6. Schemat blokowy turbiny z regulatorem

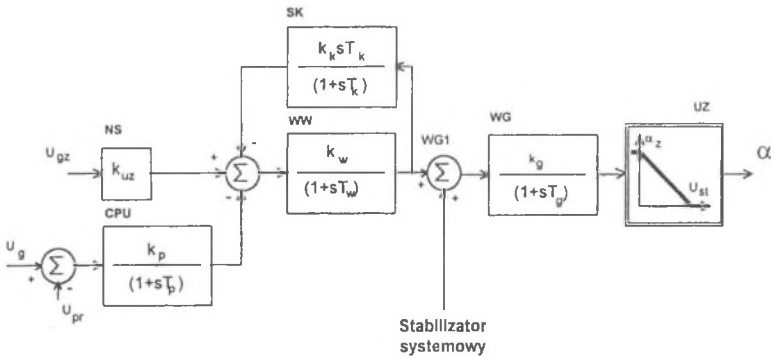
Fig. 6. Block diagram of a large-power turbine with turbine governor



Rys.7. Schemat wieloparametrowego regulatora generatora. a) tor główny regulacji napięcia, b) układ kompensacji prądowej, c) ogranicznik kąta mocy, d) stabilizator systemowy od mocy czynnej, e) ogranicznik pułapu prądu wzbudzenia

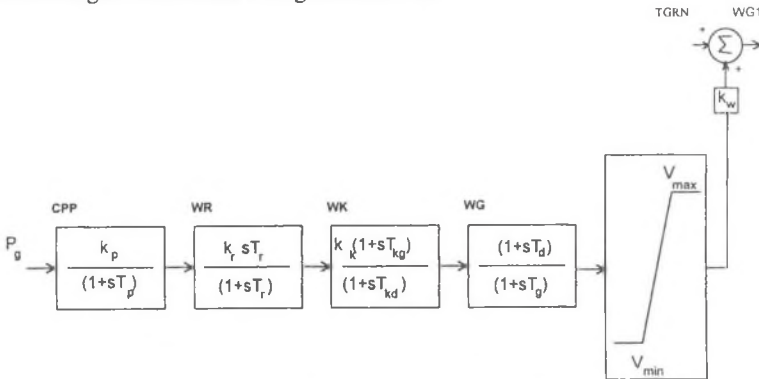
Fig. 7. Block diagram of a multiparameter generator governor. a) main voltage control line , b) current compensation system, c) power angle limiter, d) system stabiliser, e) ceiling excitation current limiter





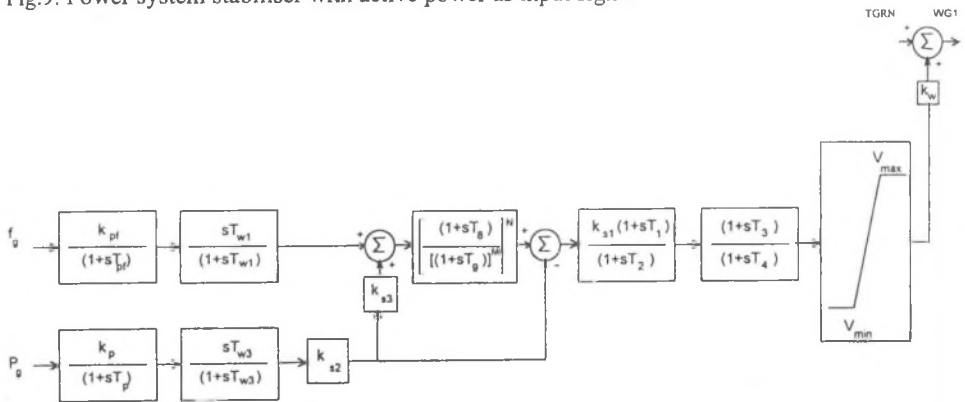
Rys.8. Schemat blokowy toru głównego regulacji napięcia

Fig.8. Block diagram of a main voltage control line



Rys.9. Stabilizator systemowy działający na sygnał mocy czynnej

Fig.9. Power system stabiliser with active power as input signal



Rys.10. Stabilizator systemowy działający na sygnał prędkości kątowej i mocy czynnej

Fig.10. Power system stabiliser with shaft slip and active power as input signals

Stabilizator systemowy działający na sygnał mocy czynnej składał się z: członu pomiarowego mocy czynnej - CPP, członu różniczkującego - WR, członów korekcyjnych -WK, WG.

### 3. WYNIKI SYMULACJI CYFROWEJ

W celu określenia własności dynamicznych generatora synchronicznego wyposażonego w regulator generatora, zawierający w swej strukturze stabilizator systemowy, przeprowadzono badania symulacyjne różnych stanów pracy bloku wytwórczego współpracującego z systemem elektroenergetycznym (rys.4). Badano zachowanie się układu w czasie następujących zakłóceń:

- skokowe zmiany wartości zadanej regulatora napięcia  $U_{gz}$ .
- skokowe zmiany napięcia w systemie elektroenergetycznym  $U_s$ ,
- skokowe zmiany strumienia pary świeżej – na wlocie do części WP turbiny  $D_t$ ,
- zwarcia w układzie przesyłowym,
- kołysania w systemie elektroenergetycznym o częstotliwości  $f=0,4\div 1$  Hz.

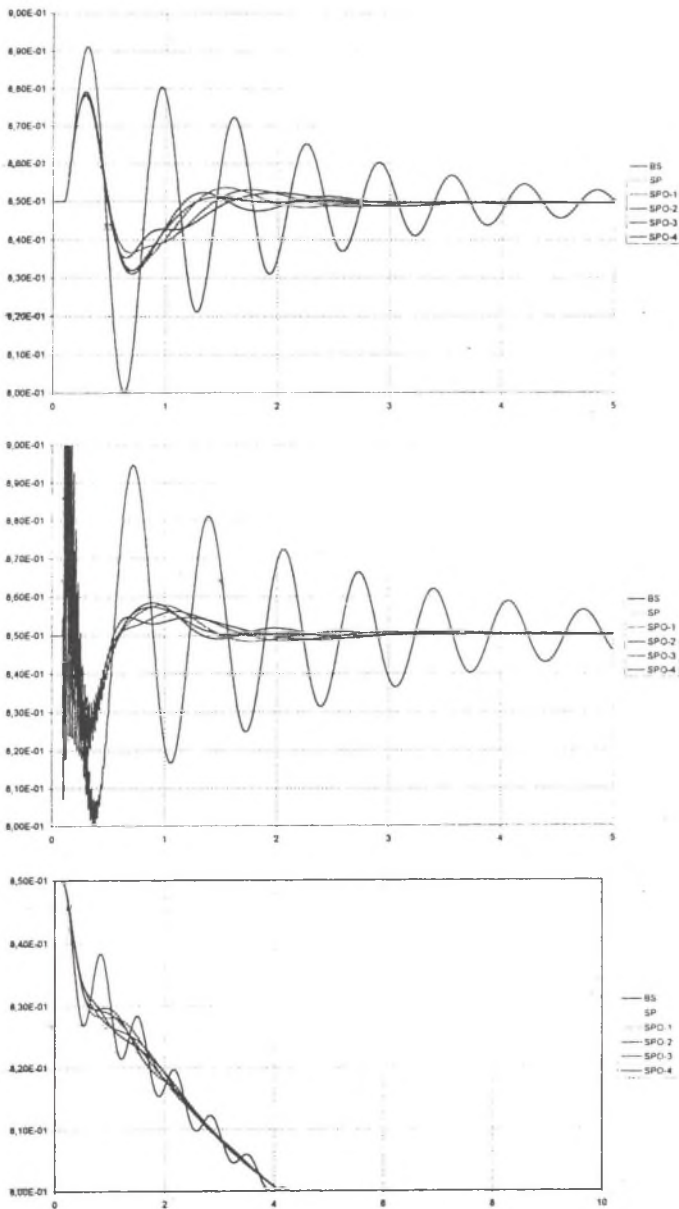
Modelowano następujące struktury regulatora generatora:

- tylko tor główny regulacji napięcia – brak stabilizatora (BS),
- tor główny regulacji napięcia i stabilizator z sygnałem wejściowym od mocy czynnej – (SP),
- tor główny regulacji napięcia i stabilizator z sygnałem wejściowym od prędkości kątowej i mocy czynnej – (SPO) w następujących wariantach:
  - M=2, N=1 – SPO-1,
  - M=2, N=2 – SPO-2,
  - M=2, N=3 – SPO-3,
  - M=2, N=4 – SPO-4,

M i N oznaczają stopnie transmitancji  $G(s)$  stanowiącej filtr szerokopasmowy (rys.10):

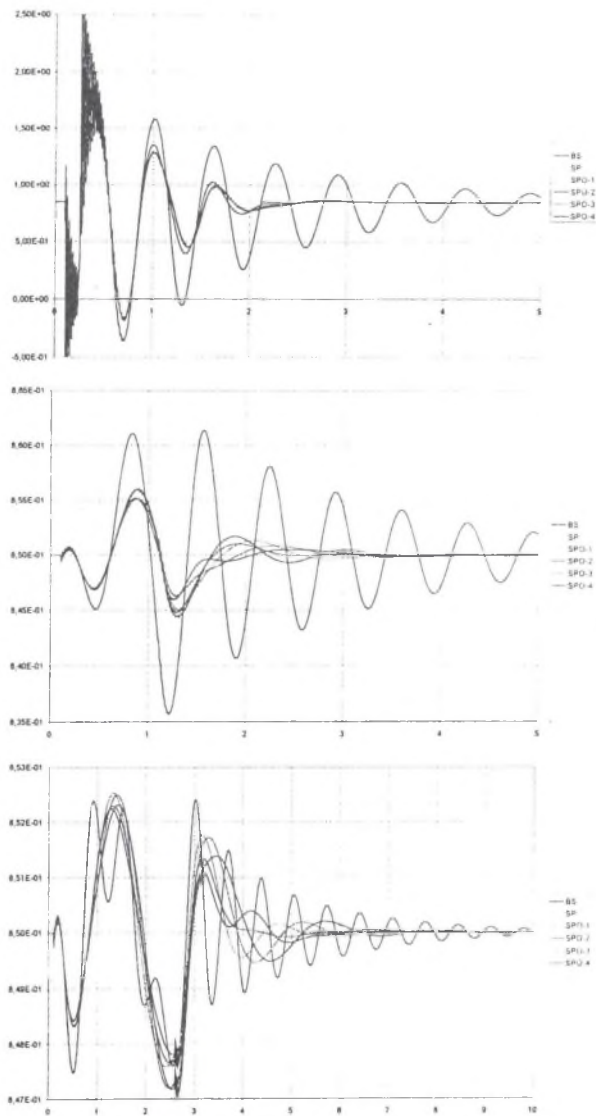
$$G(s) = \left[ \frac{(1 + sT_g)}{(1 + sT_d)^M} \right]^N.$$

Uzyskane wyniki przedstawiono na rys.11÷12.



Rys.11. Przebieg mocy czynnej wytworzonej przez generator dla różnych struktur stabilizatora systemowego. A) Skokowa zmiana wartości zadanej  $U_{gz}$  o +5%. B) Skokowa zmiana napięcia w systemie  $U_s$  o +5%. C) Skokowa zmiana strumienia pary  $D_t$  o -10%

Fig.11. Generator real power for variations types of PSS after: a) +5% step change  $U_{gz}$ . b) +5% step change  $U_s$ . c) -10% step change  $D_t$  (steam flow)



Rys.12. Przebieg mocy czynnej wytworzonej przez generator dla różnych struktur stabilizatora systemowego A) Zwarcie trójfazowe w układzie przesyłowym. Czas trwania zwarcia  $t_z=0,15$ s. B) Jednookresowe kołysanie napięcia w systemie o częstotliwości  $f=1$ Hz i amplitudzie 0,01. C) Jednookresowe kołysanie napięcia w systemie o częstotliwości  $f=0,4$  Hz i amplitudzie 0,01

Fig.12. Generator real power for variations types of PSS after: a) Three-phase short-circuit in a transient network ( $t_z=0,15$ s). b) interarea oscillation ( $f=1$ Hz and  $\Delta_r=0,01$ ). c) interarea oscillation ( $f=0,4$ Hz and  $\Delta_r=0,01$ )

#### 4. WNIOSKI

Przeprowadzone badania symulacyjne wykazały, że stabilizatory systemowe są skutecznym środkiem tłumiącym kołysania wirników generatorów. W przypadku małych zakłóceń pochodzących od strony systemu (zmiany napięć w systemie) jak i bloku wytwórczego (zmiany wartości zadanych napięć, zakłócenia od strony turbiny) dobre właściwości regulacyjne można uzyskać zarówno dla stabilizatorów systemowych jednowęjsiowych ( $P_g$ ), jak i dwuwięjsiowych ( $P_g, \omega_g$ ) przy  $M=2$  i  $N=1$  lub 2.

W przypadku kołysań o częstotliwości  $f=(0,4+1)$  Hz (tzw kołysania międzysystemowe) lepszymi właściwościami tłumienia kołysań posiada stabilizator dwuwięjsiowy ( $P_g, \omega_g$ ) przy  $M=2$  i  $N=3$  lub 4.

Skuteczność tłumienia kołysań przy dużych zakłóceniach dla obu wariantów stabilizatorów jest porównywalna.

#### LITERATURA

1. Kundur P.: Power system stability and control. McGraw-Hill, New York 1994
2. Machowski J., Bialek J. W., Bumby J. R.: Power system dynamics and stability. J. Wiley, London 1997.
3. Zajczyk R., Garski W., Ołowski J.: Statyczny tyrystorowy układ wzbudzenia i regulacji napięcia do generatora synchronicznego typu TWW-200-2. „Przegląd Elektrotechniczny” 1994, nr 7.
4. Grabowski A.: Wpływ układów wzbudzenia na stabilność pracy generatorów synchronicznych. Prace Instytutu Energetyki, 1991, z. 21.
5. IEEE Std 421.5-1992. IEEE Power engineering society. Recommended practice for excitation system models for power system stability studies.
6. Zajczyk R.: Sterowanie pracą elektroenergetycznego węzła wytwórczego w stanach nieustalonych. Zeszyty Naukowe PG 542, Elektryka nr LXXXI, Gdańsk 1996.

Recenzent: Dr hab. inż. Aleksander Żywiec  
Prof. Politechniki Śląskiej

Wpłynęło do Redakcji dnia 20 kwietnia 2000 r.

## Abstract

Improvement of the synchronous generator stability and simultaneously the whole power system can be achieved by effective damping of synchronous generator electromechanical oscillations. This damping can be reinforced by introducing, to the synchronous generator controller, additional control signals that can modify the control error (Eq. 1) of a voltage controller. The block diagram of the synchronous generator controller of such a type is presented in Fig. 1.

The additional damping signals should be related to measures carrying information about the shaft swing process. Additionally, these signals should be accessible (measurable) in generator environment. The following types of signals can be used:

- shaft speed  $\omega_g$ ,
- active power of a synchronous generator  $P_g$ .

Generally, these damping signals which depend on the shaft speed and/or the active power change can be described by Eq. 2 [1]. Realisation of the idea is presented in Fig. 2.

The power system stabiliser should generate signals only during transient process. After this process, the output signal should be equal to zero. For achieving effectiveness of the oscillations damping the additional corrective elements should be (and are) used: in the generator control system. The three types of the power system stabilisers are applied:

- power system stabiliser with shaft slip  $SS_\omega$  as input signal,
- power system stabiliser with active power  $SS_P$  as input signal,
- power system stabiliser with shaft slip and active power  $SS_{\omega,P}$  as input signals.

In the first type of the mentioned above stabiliser the corrective elements  $(1+sT_i)/(1+sT_d)$  should be of lead type (i.e. time constants of nominator should be greater than time constants of denominator). In the second type of the stabiliser at least one corrective element should be of lag type [3]. Additionally to eliminate the influence of the stabiliser (during severe disturbances) on voltage control, and at the same time, to eliminate over excitation the limitation  $V_{\min} \div V_{\max}$  of output signal  $U_{SS}$  is introduced.

In order to determine the dynamic properties of the synchronous generator equipped with the power system stabiliser there was made a test in single machine - infinite bus system (Fig. 4). There were tested responses of the system on various disturbances in various operating points. The obtained results are presented in Figs. 11÷12.

The tests showed that the power system stabilisers are very effective systems improving damping of electromechanical oscillations.

During small disturbances resulting in power system (i.e. voltage drop) and resulting in generating unit (i.e. change of reference values) good control properties can be obtained by use of single ( $P_g$ ) and multi-input ( $P_g, \omega_g$ ) stabilisers. But considering oscillations of range  $f=(0.4 \div 1)$  Hz (interarea oscillations) the better dynamic properties are achievable by using the power system stabilisers with two inputs ( $P_g, \omega_g$ ).

On the other hand, during small disturbances the both types of power system stabilisers are comparable and effective.