

## PROJEKTOWANIE I EFEKTYWNOŚĆ STABILIZATORA SYSTEMOWEGO MINIMALIZUJĄCEGO NORMĘ $H_\infty$

Zbigniew LUBOŚNY<sup>1</sup>, Krzysztof DOBRZYŃSKI<sup>2</sup>, Jacek KLUCZNIK<sup>3</sup>

Politechnika Gdańska, Wydział Elektrotechniki i Automatyki

1. tel.: 58 347 1641 e-mail: zbigniew.lubosny@pg.gda.pl  
2. tel.: 58 347 1798 e-mail: krzysztof.dobrzynski@pg.gda.pl  
3. tel.: 58 347 1798 e-mail: jacek.klucznik@pg.gda.pl

**Streszczenie:** Artykuł opisuje możliwości syntezy krzepkiego stabilizatora systemowego minimalizującego normę  $H_\infty$ , którego właściwości dynamiczne kształtowane są przez wybór odpowiedniej funkcji wagowej. Rozważana jest efektywność metody w procesie projektowania stabilizatora systemowego.

**Słowa kluczowe:** system elektroenergetyczny, stabilizator systemowy, sterowanie krzepkie, regulator  $H_\infty$ .

### 1. WSTĘP

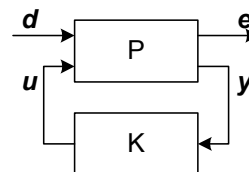
W dobie rozwoju konkurencyjnych rynków energii, ograniczane są środki finansowe na rozwój sieci i jej utrzymanie. Systemy elektroenergetyczne pracują coraz bliżej swoich ograniczeń technicznych, w tym granicy stabilności. Elementami efektywnie kształtującymi stabilność systemu elektroenergetycznego są regulatory generatorów synchronicznych, a w tym stabilizatory systemowe. Wyróżnić można tu regulatory:

- Klasyczne z regulatorami stacjonarnymi, typowe obecnie dla systemów elektroenergetycznych rzeczywistych [1].
- Nieadaptacyjne liniowe: LQR, LQG,  $H_2$ ,  $H_\infty$  i oparte o syntezy  $\mu$  (tzw. regulatory optymalne) [2-9].
- Nieadaptacyjne nieliniowe, oparte na sztucznych sieciach neuronowych i sterowaniu rozmytym.
- Adaptacyjne liniowe.
- Adaptacyjne nieliniowe, oparte na sztucznych sieciach neuronowych i sterowaniu rozmytym.

W artykule rozważany jest regulator optymalny minimalizujący normę  $H_\infty$ . Jest to tzw. regulator odporny (krzepki), dla którego na etapie syntezy istnieje możliwość kształtowania charakterystyki częstotliwościowej [2]. Metoda  $H_\infty$  została tu zastosowana do syntezy stabilizatora systemowego (PSS) [2-8], w układzie z klasycznym regulatorem napięcia (AVR).

### 2. SYNTEZA REGULATORA

W standardowym problemie sterowania (rys. 1)  $d$ ,  $u$ ,  $e$ ,  $y$  są odpowiednio sygnałami: egzogenicznymi, tj. zadaniem i zakłóceniami, sterowanymi zmiennymi wyjściowymi regulatora, uchybem który ma być zminimalizowany oraz pomiarami.



Rys. 1. Struktura układu regulacji ( $P$  – obiekt,  $K$  – regulator)

System z rysunku 1 ma sformalizowaną postać:

$$\begin{bmatrix} e \\ y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_{11}(s) & P_{12}(s) \\ P_{21}(s) & P_{22}(s) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} d \\ u \end{bmatrix} = P(s) \cdot \begin{bmatrix} d \\ u \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$u = K(s)y,$$

gdzie obiekt  $P(s)$  w postaci równań stanu jest równy:

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ e \\ y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B_1 & B_2 \\ C_1 & D_{11} & D_{12} \\ C_2 & D_{21} & D_{22} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x \\ d \\ u \end{bmatrix}. \quad (2)$$

Transmitancja układu zamkniętego pomiędzy  $d$  i  $e$ , zwana dolną liniową transformacją ułamkową, ma postać:

$$F_l(P, K) = P_{11} + P_{12} \cdot (I - P_{22} \cdot K)^{-1} \cdot K \cdot P_{21}. \quad (3)$$

Synteza regulatora polega tu na znalezieniu regulatora  $K$ , dla którego  $F_l(P, K)$  będzie minimalizowana zgodnie z normą  $H_\infty$ :

$$\|F_l(P, K)\|_\infty = \max_{0 < \omega < \infty} \sigma[F_l(P, K)(j\omega)] \quad (4)$$

gdzie:  $\sigma$  – maksymalna wartość osobliwa macierzy  $F_l$ .

Powyższy problem można rozwiązać iteracyjnie dla obiektów spełniających szereg wymagań [2]. W celu uzyskania pożądaných właściwości dynamicznych układu należy wprowadzić wymagania dla sygnałów  $e$  oraz  $u$ . Wymagania te wprowadza się w postaci funkcji wagowych pomiędzy  $d$  i  $e$  (funkcja  $W_e$ ) oraz pomiędzy  $d$  i  $u$  (funkcja  $W_u$ ). Dla tak zmodyfikowanego obiektu  $P'$  (rys. 2) poszukuje

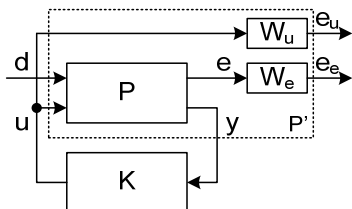
się regulatora  $K$ , który minimalizuje normę:

$$\left\| \begin{matrix} W_e \cdot F_l(P, K) \\ W_u \cdot T(P, K) \end{matrix} \right\|_{\infty}, \quad (5)$$

gdzie  $F_l(P, K)$  definiuje zależność (3), a  $T(P, K)$  jest równa:

$$T(P, K) = (I - P_{22} \cdot K)^{-1} \cdot K \cdot P_{21}. \quad (6)$$

Dla regulatora krzepkiego wartość normy (5) nie powinna przekroczyć jedności.



Rys. 2. Struktura układu regulacji wykorzystywanego w procesie syntezy regulatora ( $P$  – obiekt,  $K$  – regulator,  $W_e, W_u$  – wagi)

### 3. SYNTEZA STABILIZATORA SYSTEMOWEGO

Regulator generatora synchronicznego składa się z regulatora napięcia, stabilizatora systemowego oraz ograniczników dopuszczalnych stanów pracy. Właściwości dynamiczne systemów elektroenergetycznych (poza strukturą sieci i generatorami synchronicznymi) kształtuje regulator napięcia i stabilizator systemowy.

Stabilizator systemowy jest układem, którego celem jest tłumienie kołysań elektromechanicznych o częstotliwościach z przedziału od 0,1 do 2 Hz. Stosowane są stabilizatory systemowe jednoweściowe (z mocą czynną lub prędkością kątową wirnika na wejściu) lub wieloweściowe (z mocą czynną i częstotliwością lub prędkością kątową wirnika na wejściu). Sygnał wyjściowy PSS wprowadzany jest typowo na wejście regulatora napięcia generatora.

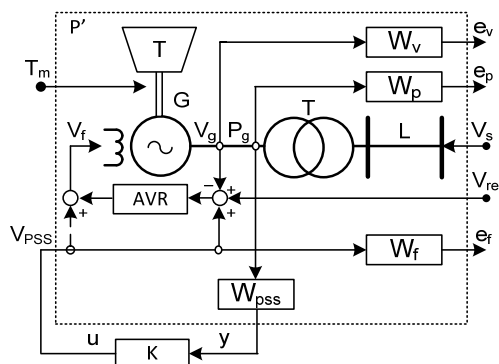
Zadaniem regulatora napięcia generatora i stabilizatora systemowego jest zapewnienie odpowiednich właściwości dynamicznych:

- Nadążnych za napięciem zadanym generatora  $V_{ref}$ . Jest to cecha ważna gdy zespół wytwórczy wykorzystywany jest przez układ regulacji nadrzędnej napięcia i mocy biernej.
- Nadążnych za mocą zadaną zespołu wytwórczego  $P_{ref}$ . Ta cecha jest ważna gdy zespół wytwórczy uczestniczy w regulacji pierwotnej lub wtórnej częstotliwości i mocy.
- Tłumiących zakłócenia (kołysania elektromechaniczne). Kołysania związane są ze zmianami napięcia w systemie, wynikającymi z różnych zakłóceń jak: zaburzenia bilansu mocy czynnej, zwarcia, operacje łączeniowe, działanie regulatorów, itp.

Do głównych problemów syntezy efektywnego stabilizatora systemowego należą:

- Silny i niestety przeciwstawny związek pomiędzy efektywnością tłumienia kołysań elektromechanicznych a efektywnością procesu regulacji napięcia.
- Silna zależność właściwości dynamicznych zespołu wytwórczego od punktu pracy generatora, tj. mocy czynnej, mocy biernej oraz struktury i parametrów sieci.
- Wymogu równoczesnego zapewnienia dobrych właściwości tłumienia zakłóceń oraz dobrych właściwości nadążnych.

Do syntezy stabilizatora systemowego wykorzystano obiekt  $P'(s)$  (rys. 2), składający się z generatora synchronicznego  $G$  (model 7-go rzędu) połączonego poprzez linię  $L$  i transformator blokowy  $T$  z zastępczym systemem elektroenergetycznym o napięciu  $V_s$ , regulatora napięcia, bloku różniczkującego nieidealnego  $W_{PSS}$  na wejściu do stabilizatora, funkcji wagowych wyjściowych  $W_p, W_v$  oraz funkcji wagowej wejściowej  $W_f$  (rys. 3).



Rys. 3. System jednomaszynowy ( $W_v, W_p$  – funkcje wagowe wyjściowe,  $W_f$  – funkcja wagowa wejściowa,  $W_{PSS}$  – blok różniczkowania nieidealnego,  $K$  – projektowany PSS)

Sygnaly egzogeniczne, zmienne sterujące, uchyby oraz wielkości mierzone zdefiniowano jako:

$$\begin{aligned} d &= [V_s \quad V_{ref} \quad T_m]^T, \quad u = [V_{PSS}], \\ e_e &= [e_v \quad e_p]^T, \quad e_u = [e_f], \quad y = [\Delta P_g] \end{aligned} \quad (7)$$

gdzie funkcje wagowe są równe:

$$W_u = W_f, \quad W_e = [W_v \quad W_p]^T \quad (8)$$

gdzie:  $V_s$  – napięcie system zastępczego,  $V_{ref}$  – napięcie zadane generatora,  $V_{PSS}$  – wyjście stabilizatora,  $T_m$  – moment mechaniczny,  $e_v$  – wyjście funkcji wagowej  $W_v$ ,  $e_p$  – wyjście funkcji wagowej  $W_p$ ,  $e_f$  – wyjście funkcji wagowej  $W_f$ ,  $\Delta P_g$  – wyjście bloku  $W_{PSS}$ .

Strukturę wszystkich funkcji wagowych określono jako:

$$W(s) = K_W \frac{1 + sT_{Wa}}{1 + sT_{Wb}} \quad (9)$$

Wartości parametrów funkcji wagowych dobrano w celu odpowiedniego ukształtowania właściwości dynamicznych:

- $W_v$  – dla zapewnienia szybkiej regulacji napięcia i dobrych właściwości nadążnych.
- $W_p$  – dla zapewnienia efektywnego tłumienia kołysań elektromechanicznych.
- $W_f$  – dla ograniczenia sygnału sterującego  $V_{PSS}$  do poziomu realistycznego.

### 4. WERYFIKACJA EFEKTYWNOŚCI DZIAŁANIA STABILIZATORA SYSTEMOWEGO

Analizowany zespół wytwórczy składa się z generatora synchronicznego o znamionowej mocy pozornej 426 MVA. Jako regulator napięcia przyjęto układ IEEE ST1A o parametrach:  $T_R = 0,01$  s,  $K_A = 1170$ ,  $T_A = 0,01$  s,  $T_B = 20,4$  s,  $T_C = 2,4$  s. Jako stabilizator systemowy przyjęto

układ IEEE PSS1A, o parametrach:  $K_s = -1,64$ ,  $T_1 = 0$ ,  $T_2 = 0,02$  s,  $T_3 = 0,55$  s,  $T_4 = 6,8$  s,  $T_5 = 10$  s. Powyższe parametry odzwierciedlają dane rzeczywistych jednostek wytwórczych. Zespół wytwórczy, z PSS o powyższych parametrach, w dalszej części pracy nazywany jest klasycznym i traktowany jako układ odniesienia.

W artykule przedstawiono wyniki syntezy dwóch typów stabilizatorów systemowych:

- *Hinf\_1* – PSS, którego sygnał wyjściowy  $V_{PSS}$  sumowany jest z sygnałem wyjściowym regulatora napięcia (oznaczony na rys. 3 linią przerywaną). Taka struktura nie jest typowa dla układów rzeczywistych.
- *Hinf\_2* – PSS, którego sygnał wyjściowy  $V_{PSS}$  sumowany jest z sygnałem wejściowym regulatora napięcia, co jest typowe dla rzeczywistych jednostek wytwórczych.

Celem syntezy było uzyskanie układu regulacji składającego się z regulatora napięcia i stabilizatora systemowego, którego właściwości dynamiczne są, co najmniej, porównywalne z rzeczywistymi jednostkami wytwórczymi. W związku z powyższym funkcje wagowe  $W_V$ ,  $W_P$  dobrano tak, aby charakterystyka amplitudowo-częstotliwościowa odwrotności funkcji wagowych była możliwie zbliżona do charakterystyk obiektu zawierającego regulator napięcia i klasyczny stabilizator systemowy.

Na rysunku 4 przedstawiono przykład charakterystyk amplitudowo-częstotliwościowych obiektu pokazując charakterystyki obiektu wyposażonego w stabilizator systemowy klasyczny (*Classic*) oraz w stabilizator krzepki (*Hinf\_2*). Ponadto na rysunku pokazano charakterystyki odwrotności funkcji wagowych ( $1/W_V$ ,  $1/W_P$ ).

Charakterystyka częstotliwościowa  $P_g/V_s = |G(j\omega)|$  obiektu wyposażonego w krzepki PSS (*Hinf\_2* na rys. 4.a) położona jest poniżej odwrotności funkcji wagowej ( $1/W_P$ ), co jest efektem pożądanym. Jednocześnie charakterystyka ta położona jest poniżej charakterystyki uzyskanej dla obiektu z klasycznym stabilizatorem systemowym w całym zakresie analizowanych częstotliwości, a w otoczeniu modu oscylacji własnych (około 1 Hz) charakterystyka przyjmuje wartości zdecydowanie mniejsze. Oznacza to lepsze tłumienie kołysań elektromechanicznych przez krzepki stabilizator systemowy w porównaniu do stabilizatora klasycznego.

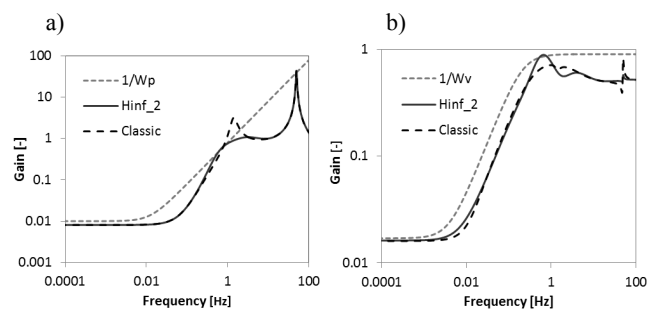
Charakterystyka częstotliwościowa  $V_g/V_s = |G(j\omega)|$  obiektu wyposażonego w krzepki PSS (*Hinf\_2* na rys. 4.b) położona jest w pobliżu charakterystyki uzyskanej dla układu z PSS klasycznym, poza zakresem częstotliwości odpowiadających modowi oscylacji własnych. Oznacza to, że uzyskany układ różni się, od układu wyposażonego w klasyczny PSS, w sensie jakości regulacji napięcia generatora. Dla częstotliwości mniejszych od częstotliwości modu lokalnego tłumienie oscylacji napięcia będzie lepsze, wydłuży się jednak czas regulacji.

W celu potwierdzenia powyższego na rys. 5-7 przedstawiono odpowiedź układu (z nieliniowym modelem generatora) wyposażonego w krzepki PSS (*Hinf\_1*, *Hinf\_2*) oraz wyposażonego w PSS klasyczny.

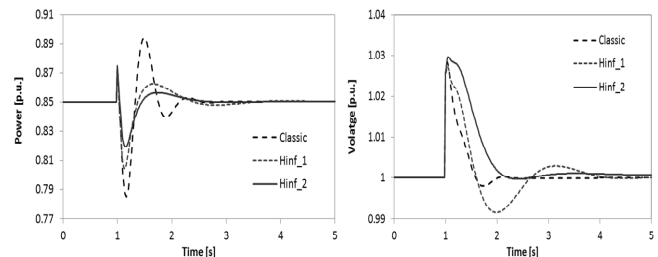
Odpowiedzi układu przedstawione na rys. 5 potwierdzają efektywność tłumienia kołysań mocy czynnej przez zaprojektowany PSS. Kołysania elektromechaniczne najefektywniej tłumia stabilizator systemowy *Hinf\_2*, jednak proces regulacji napięcia w tym przypadku jest wolniejszy niż dla pozostałych układów. Czas regulacji napięcia wzrasta tu z 0,4 s do 0,8 s, co nie jest jednak złym wynikiem. Jest to typowy efekt, cena jaką się płaci za zwiększenie tłumienia kołysań elektromechanicznych. PSS oznaczony jako *Hinf\_1*,

pomimo bardzo dobrego tłumienia kołysań mocy czynnej, powoduje powstawanie nieakceptowalnych kołysań napięcia generatora.

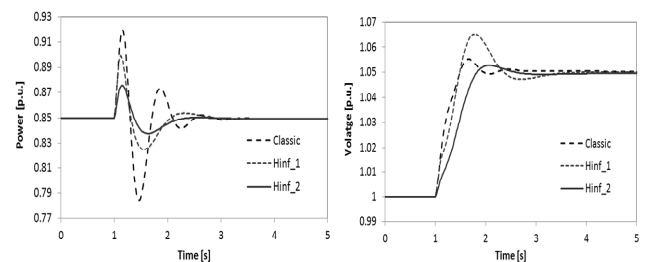
Na rysunkach 6 i 7 przedstawiono odpowiedzi układu na zmianę wartości zadanych napięcia i mocy czynnej. Nie obserwuje się tu zasadniczych różnic pomiędzy trzema porównywanymi układami. Jednak na rys. 7 widoczny jest długotrwały wzrost napięcia generatora, co jest typowe dla jednowęściowych, klasycznych stabilizatorów systemowych wykorzystujących moc czynną generatora jako sygnał wejściowy. Oba stabilizatory oparte o minimalizację normy  $H_\infty$  wykazują tu przewagę nad układem klasycznym. Najmniejsze przeregulowanie w zakresie mocy czynnej uzyskiwane jest dla układu wyposażonego w PSS *Hinf\_2*. Również jakość regulacji napięcia zapewniana w układzie z tym stabilizatorem systemowym jest poprawna.



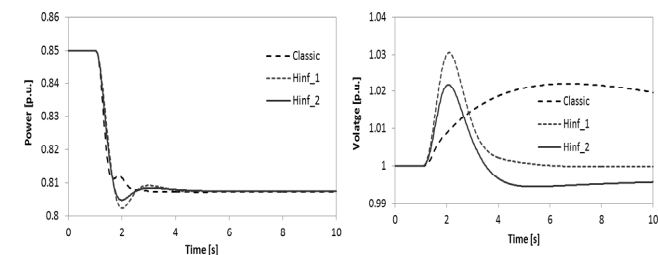
Rys. 4. Charakterystyki amplitudowo-częstotliwościowe: a)  $P_g/V_s = G(j\omega)$ , b)  $V_g/V_s = G(j\omega)$



Rys. 5. Odpowiedź układu na skokową zmianę napięcia systemu  $\Delta V_s = 0,05$



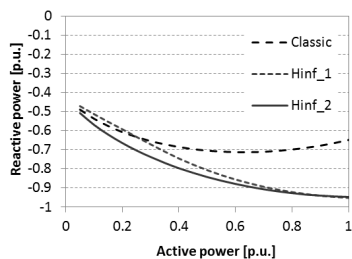
Rys. 6. Odpowiedź układu na skokową zmianę napięcia zadanego  $\Delta V_{ref} = 0,05$



Rys. 7. Odpowiedź układu na skokową zmianę mocy zadanej  $\Delta P_{ref} = -0,041$

Na rysunku 8 przedstawiono wpływ rozważanych PSS na granicę stabilności układu. Oba rozważane stabilizatory systemowe minimalizujące normę  $H_\infty$  znacząco zwiększają zapas stabilności.

Syntezy krzepkiego PSS dokonano dla punktu pracy odpowiadającego znamionowej mocy czynnej i biernej generatora  $P_{gn}$ ,  $Q_{gn}$  dla impedancji zewnętrznej  $Z_{ext} = 0,23$  p.u. Okazuje się, że efektywność PSS w innym punkcie pracy, np.  $P_{gn}$ ,  $Q_g = 0$ , jest zbliżona do przedstawionej na rys. 5. Wartość graniczna impedancji zewnętrznej jest tu równa  $Z_{ext} = 0,95$  p.u., a dla impedancji  $Z_{ext} = 0,45$  p.u. oscylacje elektromechaniczne są jeszcze bardzo dobrze tłumione. Tak zaprojektowany PSS zwiększa tłumienie modu lokalnego z  $\xi = 0,17$  do 0,9, dodając jednocześnie do układu nowe mody:  $f = 0,67$  Hz,  $\xi = 0,98$ ,  $f = 0,61$  Hz,  $\xi = 0,999$  (dla  $H_{inf\_2}$ ).



Rys. 8. Granica stabilności generatora

## 5. PODSUMOWANIE

Przedstawione w referacie rozważania pozwalają na sformułowanie następujących wniosków.

Jako pozytywne cechy metody można uznać:

- Możliwość syntezy PSS, który pozwala na uzyskanie właściwości dynamicznych układu nie gorszych niż dla układów klasycznych, przy jednoczesnym rozszerzeniu obszaru stabilności generatora.
- Kształtowanie właściwości dynamicznych układu przez dobór funkcji wagowych jest proste, ale wymaga wiedzy o związkach pomiędzy charakterystyką amplitudowo-częstotliwościową a właściwościami dynamicznymi.
- Pomimo, że synteza PSS dokonywana jest dla modelu układu jednomaszynowego, to jest on również efektywny w układzie wielomaszynowym.

Napotyka się natomiast następujące trudności:

- Metoda syntezy regulatora  $H_\infty$  jest bardzo wrażliwa na strukturę obiektu, jego parametry i punkt pracy obiektu.
- Rząd regulatora będącego wynikiem syntezy jest równy rządowi obiektu  $P'$  (liczbie zmiennych stanu). Tym samym metoda ta nie może być stosowana bezpośrednio dla układów wielomaszynowych. Model systemu musi być maksymalnie ograniczony [11].

Stabilizatory systemowe stosowane w rzeczywistych systemach elektroenergetycznych, to struktury standardowe, sprawdzone i względnie proste. Pomimo tego cechują się

one dużą efektywnością działania. Uzyskany w wyniku syntezy krzepki PSS może teoretycznie zostać przekształcony w strukturę standardową, jednak w praktyce jest to trudne, bądź wręcz niemożliwe ze względu na niemożność redukcji rzędu przy zachowaniu odpowiednich właściwości dynamicznych.

## 6. BIBLIOGRAFIA

1. Quinot H., Bourles H., Margotin T.: Robust Coordinated AVR+PSS for Damping Large Scale Power Systems, IEEE Trans. on Power Systems, vol. 14, no. 4, pp. 1446-1451, Nov. 1999.
2. Skogestad S., Postlethwaite I.: Multivariable feedback control, John Wiley & Sons, Chichester 1996.
3. Swarczewicz A., Lubośny Z.: The  $\mu$ -synthesis in power system stabilizer design, Archives of Electrical Engineering, vol. L, no 3, pp. 235-248, 2001.
4. Asgharian R.: A robust  $H_\infty$  power system stabiliser with no adverse effect on shaft torsional modes, IEEE Transaction on Energy Conversion, vol. 9, no. 3, pp. 475-481, Sept. 1994.
5. Chen S., Malik O. P.:  $H_\infty$  optimisation-based power stabiliser design, IEE Proc.-Gener. Transm. Distrib., vol. 142, no. 2, pp. 179-184, March 1995.
6. Klein M., Le L. X., Rogers G. J., Farrokhpay S., Balu H. J.:  $H_\infty$  damping controller design in large power systems, IEEE Trans. on Power Systems, vol. 10, no. 1, pp. 158-166, Feb. 1995.
7. Zhao Q., Jiang J.: Robust controller design for generator excitation systems, IEEE Transaction on Energy Conversion, vol. 10, no. 2, pp. 201-209, June 1995.
8. Chung C. Y., Tse C. T., David A. K.: Partial pole placement of  $H_\infty$  based PSS design using numerator-denominator perturbation representation, IEE Proc.-Gener. Transm. Distrib., vol. 148, no. 5, pp. 413-419, Sept. 2001.
9. Komla F. A., Yorino N., Sasaki H.: Design of  $H_\infty$ -PSS using numerator-denominator uncertainty representation, IEEE Trans. on Energy Conversion, vol. 12, no. 1, pp. 45-50, March 1997.
10. Wróblewska-Swarzewicz K., Swarczewicz A.: Design of synchronous generator two inputs regulator based on  $H_{inf}$  control theory, Proc. of MMAR 2004 Conference, Międzyzdroje, Poland, 30.08-02.09.2004, pp. 537-544.
11. Modi N., Saha T. K.: Application of extremum seeking control to design power oscillation damping controller, Electric Power Systems Research, vol. 101, pp. 49-55, 2013
12. Lubośny Z., Dobrzyński K., Klucznik J.: Effectiveness of the robust PSS design, 2015 IEEE Power & Energy Society General Meeting, Denver, USA, June 2015.

## DESIGN AND EFFICENCY OF THE ROBUST $H_\infty$ PSS DESIGN

The paper discusses robust PSS synthesis. The PSS is an  $H_\infty$  controller, what means that minimises  $H_\infty$  norm of transfer function between the exogenous signals such as reference inputs and disturbances, and the error signals which are to be minimised to meet the control objective. The dynamic properties of the plant are shaped by choosing appropriate weighting function applied to the plant output and input signals. Question appears: does such type of PSS design lead to effective PSS which can be applied in real power system?

**Keywords:** power system, power system stabilizer, robust control,  $H_\infty$  controller.