

Andrzej BOBON^{*}, Jerzy KUDŁA^{*}, Aleksander ŻYWIEC^{*}, Stefan PASZEK^{**}

^{*}Katedra Maszyn i Urządzeń Elektrycznych

^{**}Instytut Elektrotechniki Teoretycznej i Przemysłowej

LOKALIZACJA I DOBÓR PARAMETRÓW STABILIZATORÓW SYSTEMOWYCH W WIELOMASZYNOWYM SYSTEMIE ELEKTROENERGETYCZNYM PRZY WYKORZYSTANIU PROGRAMU PSS

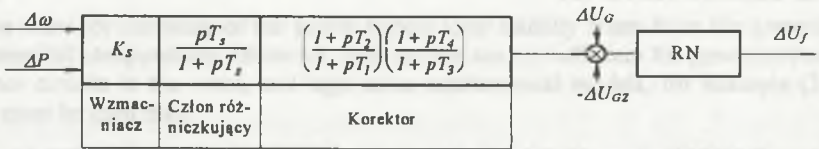
Streszczenie. Program PSS umożliwia dokonanie wyboru optymalnej lokalizacji stabilizatorów systemowych w wielomaszynowym systemie elektroenergetycznym, jak również określenie ich parametrów. W artykule przedstawiono strukturę programu, opis modelu matematycznego systemu elektroenergetycznego i opis metod obliczeniowych zastosowanych w programie. Przedstawiono wyniki obliczeń optymalnego rozmieszczenia stabilizatorów systemowych i doboru ich parametrów w KSEE.

LOCATION AND PARAMETER ADJUSTMENT OF POWER SYSTEM STABILIZERS IN MULTIMACHINE POWER SYSTEM USING COMPUTER PROGRAM PSS

Summary. The computer program PSS enables to determine the location of power system stabilizers (PSS) in the multimachine power system as well as the adjustment of their parameters. The program structure, the description of the power system mathematical model and computational methods used in the program have been presented in the paper. Computations of the location of stabilizers and their parameters adjustment have been performed for the national power system.

1. WPROWADZENIE

We współczesnych systemach elektroenergetycznych (SEE) pojawiające się często słabo tłumione kołysania wirników generatorów synchronicznych, o częstotliwościach w zakresie $(0,2 \div 2)$ Hz, mogą być wytłumione poprzez instalowanie w wybranych węzłach wytwórczych systemu stabilizatorów systemowych, o strukturze przedstawionej na rys. 1.



Rys. 1. Struktura stabilizatora systemowego (PSS) i sposób jego przyłączenia do układu regulacji napięcia (RN)

Fig. 1. The structure of the power system stabilizer (PSS) and its connection with voltage regulator (RN)

Skuteczność tłumienia kołysań elektromechanicznych zależy przy tym od właściwej lokalizacji stabilizatorów w systemie oraz prawidłowego doboru ich parametrów. Realizacja obydwu zadań wymaga dokonania globalnej analizy właściwości dynamicznych SEE. Analizę taką można przeprowadzić na podstawie badań symulacyjnych, przy wykorzystaniu wyspecjalizowanych programów komputerowych. Autorzy artykułu¹, w wyniku wieloletniej współpracy z firmą Polskie Sieci Elektroenergetyczne S. A w Warszawie i na jej zlecenie, opracowali program komputerowy o nazwie PSS ver. 2.00 realizujący wyżej wymienione zadania. Celem artykułu jest przedstawienie struktury i możliwości obliczeniowych programu, modelu matematycznego SEE i metod obliczeniowych zaimplementowanych w programie oraz prezentacja wybranych wyników obliczeń. Zebrane doświadczenia z jego użytkowania pozwalają również na dokonanie oceny efektywności działania programu ze wskazaniem kierunków ewentualnych jego modyfikacji.

2. DANE TECHNICZNE, SCHEMAT BLOKOWY I OCENA EFEKTYWNOŚCI PROGRAMU

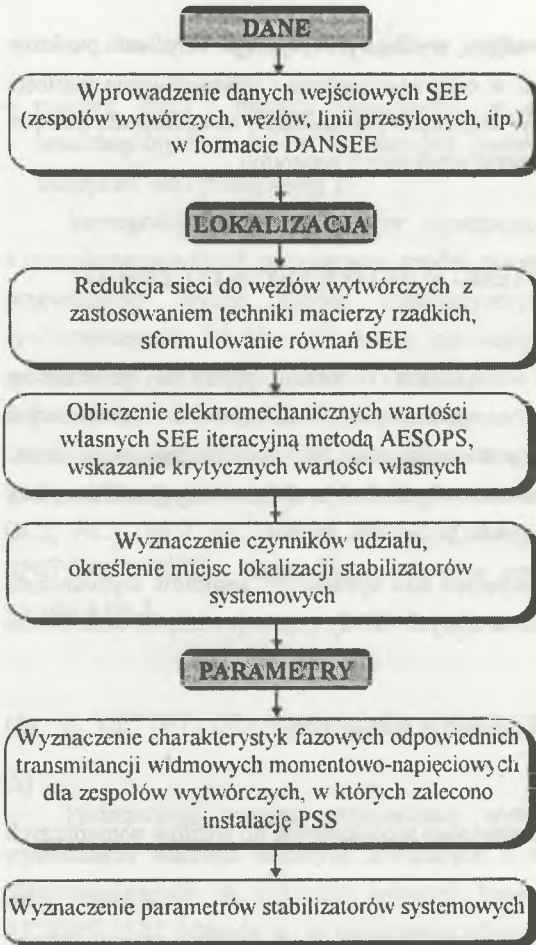
Program PSS ver. 2.00 napisany został w języku Borland Pascal ver. 7.0 dla komputerów typu IBM-PC pracujących pod kontrolą systemu operacyjnego DOS.

Tablica 1

Ograniczenia rozmiarów SEE analizowanych przez program PSS

Opis	Wartość graniczna
Maksymalna liczba zespołów wytwórczych	100
Maksymalna liczba węzłów sieci	1000
Maksymalna liczba gałęzi sieci	3000

¹ W pracach nad realizacją programu brali również udział: prof. W. Paszek, dr P. Malicki, mgr D. Szymański, mgr W. Burlikowski.



Rys.2. Schemat blokowy programu
Fig. 2. Block diagram of the program

Program skompilowany został w trybie chronionym procesora pozwalającym na dostęp do pamięci rozszerzonej komputera (XMS), radykalnie przyspieszającej obliczenia. W obecnej postaci program umożliwia lokalizację oraz dobór parametrów stabilizatorów systemowych w systemach elektroenergetycznych, których maksymalne wymiary zestawiono w tabelicy 1.

Sterowanie pracą programu odbywa się za pomocą układu menu. Menu główne programu zawiera następujące główne opcje: DANE, LOKALIZACJA_PSS, PARAMETRY_PSS, których funkcje wynikają ze schematu blokowego programu przedstawionego na rys 2.

Doświadczenia zebrane w wyniku testowania programu i jego użytkowania pokazały, że najbardziej pracochłonny i także krytyczny jest blok obliczeń elektromechanicznych wartości własnych systemu według algorytmu AESOPS. W tabelicy 2 zestawiono przykładowe czasy obliczeń lokalizacji stabilizatorów oraz doboru ich parametrów na komputerze IBM - PC 486 z zegarem 50 MHz dla testowanych systemów.

Tabelica 2

Przykładowe czasy wykonywania obliczeń przez program PSS

Układ elektroenergetyczny	9- maszynowy	14- maszynowy	19- maszynowy	27- maszynowy	50- maszynowy
Czas obliczeń lokalizacji stabilizatorów systemowych	6 s	13 s	42 s	3 min 35 s	26 min
Czas obliczeń parametrów stabilizatorów systemowych	4 s	10 s	45 s	1 min 42 s	6 min 20 s

Algorytm AESOPS, jako algorytm iteracyjny, wymaga precyzyjnego określenia punktów startowych, jak i dużej dokładności obliczeń w celu wychwycenia i odseparowania wartości własnych, których pulsacje są bliskie sobie. W niektórych przypadkach, zwłaszcza dla nowych struktur SEE, punkty startowe powinien wybierać użytkownik programu.

3. MODEL MATEMATYCZNY SYSTEMU ELEKTROENERGETYCZNEGO

Obliczenia wartości własnych SEE związanych z ruchem wirników generatorów synchronicznych, lokalizację oraz dobór parametrów stabilizatorów systemowych przeprowadzono w oparciu o zlinearyzowane równania stanu SEE wokół ustalonego punktu pracy. Przyjmując tradycyjne założenia stosowane w badaniach wolnozmiennych stanów pracy SEE, równania stanu systemu określono w wyniku połączenia ze sobą:

- równań algebraiczno-różniczkowych opisujących stan dynamiczny zespołów wytwórczych złożonych z zastępczych generatorów zawierających układy regulacji napięcia oraz układu regulacji turbin

$$\Delta \dot{X}_G = A_G \Delta X_G + B_G \Delta U_G + B_{GUZ} \Delta U_{GZ} + B_{GPO} \Delta P_O, \quad (1)$$

$$\Delta I_G = C_G \Delta X_G + Y_G \Delta U_G, \quad (2)$$

- równań algebraicznych zastępczej sieci przesyłowej zredukowanej do węzłów wytwórczych

$$\Delta I_G = Y_S \Delta U_G. \quad (3)$$

Po przekształceniach uzyskano ogólne równanie stanu systemu elektroenergetycznego

$$\Delta \dot{X} = A \Delta X + B \Delta U, \quad \Delta Y = C \Delta X, \quad (4)$$

gdzie:

$\Delta X = \Delta X_G$ - wektor przyrostów zmiennych stanu składający się z wektorów przyrostów zmiennych stanu poszczególnych zespołów wytwórczych,

$\Delta U = [\Delta U_{GZ}, \Delta P_O]^T$ - wektor wymuszeń składający się z wektorów przyrostów napięć zadanych w regulatorach napięcia zastępczych maszyn synchronicznych, oraz wektorów przyrostów mocy zadanych w regulatorach turbin poszczególnych zespołów wytwórczych,

$$A = A_G + B_G(Y_S - Y_G)^{-1}C_G, \quad B = [B_{GUZ}, B_{GPO}]^T \quad (5)$$

– macierz stanu i macierz transmisyjna, w skład których wchodzi macierze modeli poszczególnych zespołów wytwórczych (indeks G), oraz macierz admitancji węzłowych zastępczej sieci przesyłowej Y_S .

Szczegółowa postać macierzy występujących w równaniach stanu SEE wynika z zaimplementowanych w programie modeli matematycznych elementów SEE. W programie przewidziano wybór modeli matematycznych elementów systemu: generatorów synchronicznych, układów wzbudzenia, stabilizatorów systemowych, turbin. Dla generatorów synchronicznych przyjęto modele matematyczne od drugiego do szóstego rzędu. Układy wzbudzenia wraz z regulatorami napięcia generatorów synchronicznych, oraz turbiny parowe i wodne i ich regulatory zostały zamodelowane zgodnie ze standardami IEEE oraz zaleceniami Instytutu Energetyki w Gdańsku. Zaimplementowano następujące układy wzbudzenia: DC1, DC2, AC1, AC2, AC3, AC4, ST1, ST2, ST3, IEn_AC, IEn_TYR, RNGT-7, RNGT-8, RNGY-6, WGSY-3. Zaimplementowany w programie model stabilizatora systemowego wynika z rys. 1.

4. METODY OBLICZENIOWE WYKORZYSTYWANE W PROGRAMIE

Podstawową metodą obliczeniową wykorzystywaną w programie jest metoda wyznaczania wartości własnych związanych z ruchem wirników zespołów wytwórczych i odpowiadających im wektorów własnych lewo- i prawostronnych, oparta na algorytmie AESOPS [1,2]. Metoda ta, w odróżnieniu od algorytmu QR (umożliwiającego wyznaczenie wszystkich wartości własnych), pozwala na wyznaczenie wspomnianych wyżej wartości własnych dla systemów elektroenergetycznych, których liczba zmiennych stanu jest większa od 500. Podstawą algorytmu jest zlinearyzowane równanie ruchu wybranego i -tego zespołu wytwórczego w postaci operatorowej

$$sT_{mi}\Delta\omega_i(s) = \Delta M_{ii}(s) - \Delta M_{ei}(s) \quad (6)$$

gdzie:

T_{mi} , $\Delta\omega_i$, ΔM_{ii} , ΔM_{ei} - elektromechaniczna stała czasowa, przyrosty prędkości kątowej, momentu turbiny i momentu elektromagnetycznego i -tego zespołu wytwórczego.

Przy założeniu że

$$\Delta M_{ei} = \left(K_i(s) \frac{\omega_N}{s} + D_i(s) \right) \Delta\omega_i(s), \quad \Delta M_{ii} = -a_{ii}(s)\Delta\omega_i(s) + b_{ii}(s)\Delta P_{Oi},$$

przy czym

$K_i(s), D_i(s)$ - współczynniki momentu synchronizującego i tłumiącego,

ΔP_{Oi} - przyrost mocy zadanej turbiny,

$a_{ii}(s), b_{ii}(s)$ - transmitancje operatorowe turbiny,

ω_N - znamionowa prędkość kątowna maszyny synchronicznej,

równanie (6) można doprowadzić do postaci transmitancji

$$\frac{\Delta \omega_i(s)}{\Delta P_{Oi}(s)} = \frac{1}{b_{ii}(s)} \frac{1}{sT_{mi} + K_i(s) \frac{\omega_N}{s} + D_i(s) + a_{ii}(s)}, \quad (7)$$

której bieguny o pulsacjach w zakresie $(0,2 + 2)$ Hz są elektromechanicznymi wartościami własnymi systemu. Bieguny te można znaleźć rozwiązując nieliniowe równanie algebraiczne metodą Newtona-Raphsona

$$\left[sT_{mi} + K_i(s) \frac{\omega_N}{s} + D_i(s) + a_{ii}(s) \right] \Delta \omega_i(s) = 0. \quad (8)$$

Rozwiązując powyższe równania dla zespołów wytwórczych występujących w SEE, można wyznaczyć wszystkie elektromechaniczne wartości własne oraz dokonać oceny, które z nich są dla systemu krytyczne i wymagają przesunięcia (za krytyczne uznaje się zwykle wartości własne, których część rzeczywista jest większa od $-0,3$).

Do wyznaczenia lokalizacji stabilizatorów systemowych w SEE, zapewniającej najbardziej skuteczne przesunięcie krytycznych własności własnych, posłużono się badaniem modułów czynników udziału [3]. Czynniki udziału dla h -tej składowej modalnej, określone za pomocą składowych lewo- i prawostronnych wektorów własnych związanych z prędkością kątowną wirników w postaci

$$P_{ih} = W_{ih} V_{ih} \quad (9)$$

gdzie:

W_{ih}, V_{ih} - składowe lewo- i prawostronnego wektora własnego h -tej wartości własnej, odpowiadające prędkości kątownej i -tego zespołu wytwórczego,

wyrażają bowiem wrażliwość wartości własnej λ_h na działanie „idealnego” stabilizatora w i -tym zespole wytwórczym, a więc na zdolność stabilizatora do jej przesunięcia.

Parametry stabilizatorów systemowych instalowanych w wybranych zespołach wytwórczych określa się na podstawie charakterystyki fazowej transmitancji widmowej [4]

$$\Phi_{Mez}(\omega) = -Arg \left\{ \frac{\Delta M_{ei}(j\omega)}{\Delta U_{Gi}(j\omega)} \right\} \quad (10)$$

gdzie:

ΔM_{et} , ΔU_{Gzi} - przyrosty momentu elektromagnetycznego i napięcia zadanego regulatora napięcia.

Korzystając z koncepcji „idealnego” stabilizatora, jako elementu wysterowującego dodatkowy moment tłumiący w zespole wytwórczym, stałe czasowe członu korekcyjnego stabilizatora (którego sygnałem wejściowym jest prędkość kątowna) wyznacza się minimalizując, w zakresie częstotliwości kołysań, błąd średniokwadratowy pomiędzy wyżej wymienioną charakterystyką a charakterystyką fazową członu korekcyjnego stabilizatora, wykorzystując w tym celu algorytm Levenberga - Marquardta. Pozostałe parametry (wzmocnienie oraz stałą czasową członu różniczkującego) zadaje się z klawiatury.

5. WYNIKI OBLICZEŃ LOKALIZACJI STABILIZATORÓW SYSTEMOWYCH I DOBORU ICH PARAMETRÓW W KSEE



Rys.3. Wybrane zespoły wytwórcze rozpatrywanego KSEE. Zalecane miejsca instalacji PSS zaznaczono ramkami zacieniowanymi

Fig.3. Selected generating nodes of the examined power system. Recommended places of installing PSS are marked by filled frames

W celu przedstawienia możliwości programu przeprowadzono obliczenia dla krajowego systemu elektroenergetycznego połączonego z systemem UCPTE, składającego się z 49 krajowych i 8 zagranicznych zespołów wytwórczych (rys. 3).

Dla macierzy stanu rozpatrywanego układu wyznaczono elektromechaniczne wartości własne, określające jego dynamiczne właściwości. W tabelicy 3 (w lewej kolumnie) zamieszczono wartości własne o największych częściach rzeczywistych (większych od -0.3), które zagrażają stabilności systemu.

Tablica 3

Krytyczne wartości własne (λ_h) 57-maszynowego systemu KSEE bez stabilizatorów systemowych oraz z zainstalowanymi stabilizatorami systemowymi (PSS)

Wartość własna	Wartości własne bez PSS	Wartości własne przesunięte przez PSS
λ_1	-0.034 ± j 9.344	-0.519 ± j 9.375
λ_2	-0.103 ± j 8.209	-0.364 ± j 8.135
λ_3	-0.110 ± j 8.578	-0.361 ± j 8.585
λ_4	-0.147 ± j 9.569	-0.610 ± j 9.594
λ_5	-0.161 ± j 9.305	-0.435 ± j 9.328
λ_6	-0.251 ± j 7.151	-0.369 ± j 7.146
λ_7	-0.259 ± j 6.578	-0.314 ± j 6.581

Dla każdej wartości własnej systemu zostały wyznaczone lewo- i prawostronne wektory własne, a na ich podstawie - czynniki udziału, które posłużyły do lokalizacji stabilizatorów systemowych. W tablicy 4 podano, dla krytycznych wartości własnych, maksymalne czynniki udziału oraz węzły i zespoły wytwórcze, jako zalecane miejsca instalowania stabilizatorów systemowych.

Tablica 4

Maksymalne czynniki udziału oraz węzły i zespoły wytwórcze zalecane do instalowania stabilizatorów systemowych

Wartość własna	Maksymalny czynnik udziału	Węzeł wytwórczy	Zespoły wytwórcze
λ_1	0.585	ROG 221	ROG-G3+ROG-G5
λ_2	0.391	ROG 411	ROG-G6+ROG-G11
λ_3	0.521	DBN 113	DBN-G1
λ_4	0.817	ROG 211	ROG-G1+ROG-G2
λ_5	0.581	DBN 133	DBN-G2
λ_6	0.566	ZRC 415	ZRC-G1+ZRC-G4
λ_7	0.235	ZRC 415	ZRC-G1+ZRC-G4

Dla wybranych węzłów wytwórczych wyznaczono parametry stabilizatorów systemowych, przedstawione w tablicy 5. Stabilizatory te powodują przesunięcie krytycznych wartości własnych systemu w lewo na płaszczyźnie liczb zespolonych (tablica 3).

6. UWAGI KOŃCOWE

Opracowany w Katedrze Maszyn i Urządzeń Elektrycznych program komputerowy PSS ver. 2.00, wdrożony do użytkowania w PSE. S.A., stanowi dobre narzędzie do prowadzenia badań i analiz wolnozmiennych kołysań w KSEE oraz do lokalizacji i doboru parametrów

Tablica 5

Parametry stabilizatorów systemowych w wybranych węzłach wytwórczych

Zespoły wytwórcze	K_s	T_s	T_1	T_2
ROG-G3÷ROG-G5	1.24	4 s	6.52 s	0.17 s
ROG-G6÷ROG-G11	1.28	4 s	7.04 s	0.17 s
DBN-G1	1.20	4 s	11.78 s	0.17 s
ROG-G1÷ROG-G2	1.12	4 s	6.79 s	0.18 s
DBN-G2	1.12	4 s	12.15 s	0.18 s
ZRC-G1÷ZRC-G4	1.26	4 s	7.49 s	0.10 s
$T_3 = T_4 = 0$				

stabilizatorów systemowych. Przedstawione w rozdziale 2 dane liczbowe, ograniczające rozmiar badanych systemów, mogą zostać powiększone przez wykorzystanie szybszych i wydajniejszych środków obliczeniowych oraz przez przystosowanie programu do 32-bitowego systemu operacyjnego. Wykorzystanie w programie nakładki DanSEE, opracowanej przez Instytut Elektroenergetyki Politechniki Warszawskiej, ujednotacza sposób wprowadzania i edycji danych wejściowych, tworząc podstawę do jego unifikacji z innymi programami użytkowymi w PSE S.A.

Prace badawcze prowadzone w zakresie modelowania generatorów synchronicznych wykazały konieczność implementacji w programie nowych modeli matematycznych, lepiej odwzorowujących właściwości tłumiące SEE w zakresie kołysań lokalnych i międzyobszarowych. Natomiast przy badaniach kołysań międzyobszarowych, sygnalizowanych przez PSE S.A., które wystąpiły w KSEE po połączeniu z UCPTE, trzeba uwzględnić w programie nowe rozwiązania techniczne stabilizatorów systemowych zapewniające efektywne tłumienie tych kołysań.

LITERATURA

1. Saue P. W., Rajagopalan C., Pai M. A.: An explanation and generalization of the AESOPS and PEALS algorithms, IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems, Vol. 6. No. 1. Feb. 1991. pp. 293-299.
2. Boboń A., Paszek S., Szymański D.: Zastosowanie iteracyjnego algorytmu AESOPS do wyznaczania wartości i wektorów własnych systemu elektroenergetycznego. Sympozjum „Symulacja Procesów Dynamicznych” - SPD-8, Dolina Chochołowska, 1994, s. 17-24.
3. Żywiec A., Boboń A., Malicki P.: Wyznaczenie optymalnej lokalizacji stabilizatorów systemowych w systemie elektroenergetycznym na podstawie analizy wartości i wektorów własnych. Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej ELEKTRYKA z. 138, Gliwice 1994, s. 35-48.

4. Paszek W., Kudła J., Paszek S.: Metodyka doboru parametrów stabilizatorów systemowych w układzie jednomaszynowym typu generator-sieć sztywna, VI Międzynarodowa Konferencja Naukowa „Aktualne Problemy w Elektroenergetyce”, Gliwice-Kozubnik 1993, s. 123-130.

Recenzent: Dr hab. inż. Piotr Wach
Profesor Politechniki Opolskiej

Wpłynęło do Redakcji dnia 30 maja 1997 r.

Abstract

The computer program PSS was elaborated for the determination of the location of power system stabilizers (PSS) in the multimachine power system as well as for the adjustment of their parameters. The basic technical data of the program, size limits of the analysed power systems (table 1) and the example of computing time for different size of power systems (table 2) are presented in the paper. The block diagram of the program is shown in Fig.2, which illustrates successive stages of its operation. The mathematical model of the power system is determined by linearized state equations (4) around a steady working point, which results both from the equations of generating units (1), (2), and from the equations of equivalent transmission network (3). The program enables to choose the mathematical models of: synchronous generators (of II÷VI order), excitation systems, power system stabilizers, turbines, according to IEEE Standards and recommendations of the Institute of Power Engineering in Gdansk. Eigenvalues associated with the rotor motion of generating units, and corresponding to the left- and right-sided eigenvectors are determined by the iterative method basing on AESOPS algorithm [1, 2]. The relationships (6), (7), (8) explain theoretical grounds of this method. From computed eigenvalues and eigenvectors of the system, magnitudes of the participation factors are computed, which are used for finding a power system stabilizer siting in a power system. Parameters of the power system stabilizers, in selected generating units, are determined by approximation of the phase characteristic of the spectral transmittance $\Phi_{Mez}(\omega)$ (10). Calculations of the power system stabilizer siting and the adjustment of their parameters are performed by the program PSS for the national power system consisting of 49 national and 8 foreign generating nodes (Fig. 2). Critical eigenvalues of the system with and without power system stabilizers are given in table 3 (their real parts are greater than -0.3). Computing results of the power system stabilizer location are shown in table 4. For each critical eigenvalue a generating node is selected, basing on the greatest value of the participation factor. For such generating nodes, parameters of power system stabilizers are determined (they are given in table 5).