

Antoni BOGUCKI,  
Zbigniew BARTON

Institut Elektroenergetyki  
i Sterowania Układów  
Politechniki Śląskiej

## STEROWANIE DYSKRETNE PRACĄ POŁĄCZONYCH SYSTEMÓW ELEKTROENERGETYCZNYCH W STANACH AWARYJNYCH

**Streszczenie.** W artykule skoncentrowano się głównie na zilustrowaniu dużych możliwości, jakie stwarza zastosowanie metody Lapunowa do sterowania pracą połączonych systemów elektroenergetycznych (SE). Gwałtowny rozwój techniki cyfrowej przy jednoczesnym obniżeniu kosztów i ogromnym wzroście niezawodności układów mikroprocesorowych zachęca wielu konstruktorów i projektantów do stosowania tzw. dyskretnego sterowania pracą SE. Wykorzystanie możliwości, jakie oferuje aktualnie technika, zwiększa dodatkowo atrakcyjność tej i podobnych metod.

Autorzy podjęli próbę bardziej kompleksowego spojrzenia na zagadnienia sterowania prędkością obrotową turbiny. Analizowano wpływ sterowania w zależności od wielkości: deficytów mocy, strefy niezułości, stałej regulacji oraz czasu trwania zakłócenia. Zaprezentowane podejście dotyczy liniowych modeli SE.

### 2. Wstęp

W ciągu ostatnich lat można zaobserwować w energetyce wiele udanych i wielce efektywnych zastosowań nowoczesnej teorii sterowania opartej na wykorzystaniu układów mikroprocesorowych. Zachęca to do wielu konstruktorów i projektantów do stosowania tzw. dyskretnego sterowania pracą SE wykorzystującego możliwości, jakie oferuje aktualnie technika cyfrowa.

W niniejszym artykule podjęto próbę bardziej kompleksowego spojrzenia na zagadnienie stabilnego sterowania prędkością obrotową turbiny, analizując wpływ czynników wspomnianych jedynie w pracy [6]. Przedstawione wyniki obliczeń wykonano zarówno dla liniowego modelu matematycznego SE prezentowanego w pracy [6] (układ 2-maszynowy), jak i dla jego znacznie rozbudowanej wersji (układ 3-maszynowy).

## 2. Strategia i algorytm dyskretnego sterowania

Wzajemnie połączone SE można opisać [3] w  $n$ -wymiarowej przestrzeni stanów układu równań różniczkowych:

$$\dot{x} = Ax + Bu, \quad (1)$$

gdzie:

$x \in R^n$  - wektor stanu systemu elektroenergetycznego,

$u \in R^m$  - wektor sterowania,

$A$  i  $B$  - macierze o wymiarach  $n \times n$  i  $n \times m$ .

W rzeczywistych warunkach wektor sterowania jest ograniczony, czyli:

$$u_i \leq |C_i| < \infty \quad \Lambda i = 1, 2, \dots, m. \quad (2)$$

System dynamiczny opisany równaniem (1) będzie asymptotycznie stabilny, jeżeli utworzona dla niego funkcja  $V$  będzie spełniała następujące warunki:

$$V(x) \geq 0 \quad \text{oraz} \quad \dot{V}(x) \leq 0. \quad (3)$$

Funkcja Lapunowa dla układu (1) ma postać [6]:

$$V(x) = x^T P x, \quad (4)$$

gdzie  $P$  - symetryczna, dodatnio określona macierz.

Różniczkując wyrażenie (4) przy uwzględnieniu wzoru (1) otrzymuje się:

$$\dot{V}(x) = x^T (A^T P + P A) x + 2u^T B^T P x. \quad (5)$$

Relacja (5) determinuje następujące warunki stabilności asymptotycznej [1], [6]:

$$A^T P + P A = -Q, \quad (6)$$

$$u^T B^T P x \leq 0. \quad (7)$$

Jeżeli macierz  $Q$  będzie symetryczna i dodatnio określona, wtedy na podstawie relacji (7) możliwe jest określenie maksymalnie dopuszczalnej wartości wektora sterowania  $u$  z zależności:

$$u_i = -C_i \text{ sign } [B^T P x]_i, \quad i = 1, 2, \dots, m, \quad (8)$$

gdzie  $C_i$  - stała regulacji.

Algorytm sterowania dyskretnego systemu dynamicznego opisanego układem równań (1), przy uwzględnieniu relacji (6) i (7) może być po wyznaczeniu macierzy P ze wzoru (6) i sprawdzenie jej dodatniej określoności następujący:

- I - obliczenie wartości i znaku wektora  $\{B^T P x\}$ ,  
 II - obliczenie wartości wektora sterowania z relacji (8), przy czym z uwagi na uniknięcie nieokreśloności celowe jest założenie strefy nieczułości, np.  $\epsilon_1$ , co determinuje:

$$\text{sign} [B^T P x]_1 = 1 \quad \text{gdy} \quad [B^T P x]_1 > \epsilon_1,$$

$$\text{sign} [B^T P x]_1 = 0 \quad \text{gdy} \quad [B^T P x]_1 \leq \epsilon_1, \quad (9)$$

$$\text{sign} [B^T P x]_1 = -1 \quad \text{gdy} \quad [B^T P x]_1 < -\epsilon_1,$$

- III - uwzględnienie w modelu zakłóceniovym (1) sterowania (8) i określenie reakcji systemu,  
 IV - obliczenie nowych wartości wektora stanu x,  
 V - porównanie odchylenia częstotliwości i mocy wymiennej,  
 VI - powrót do punktu I.

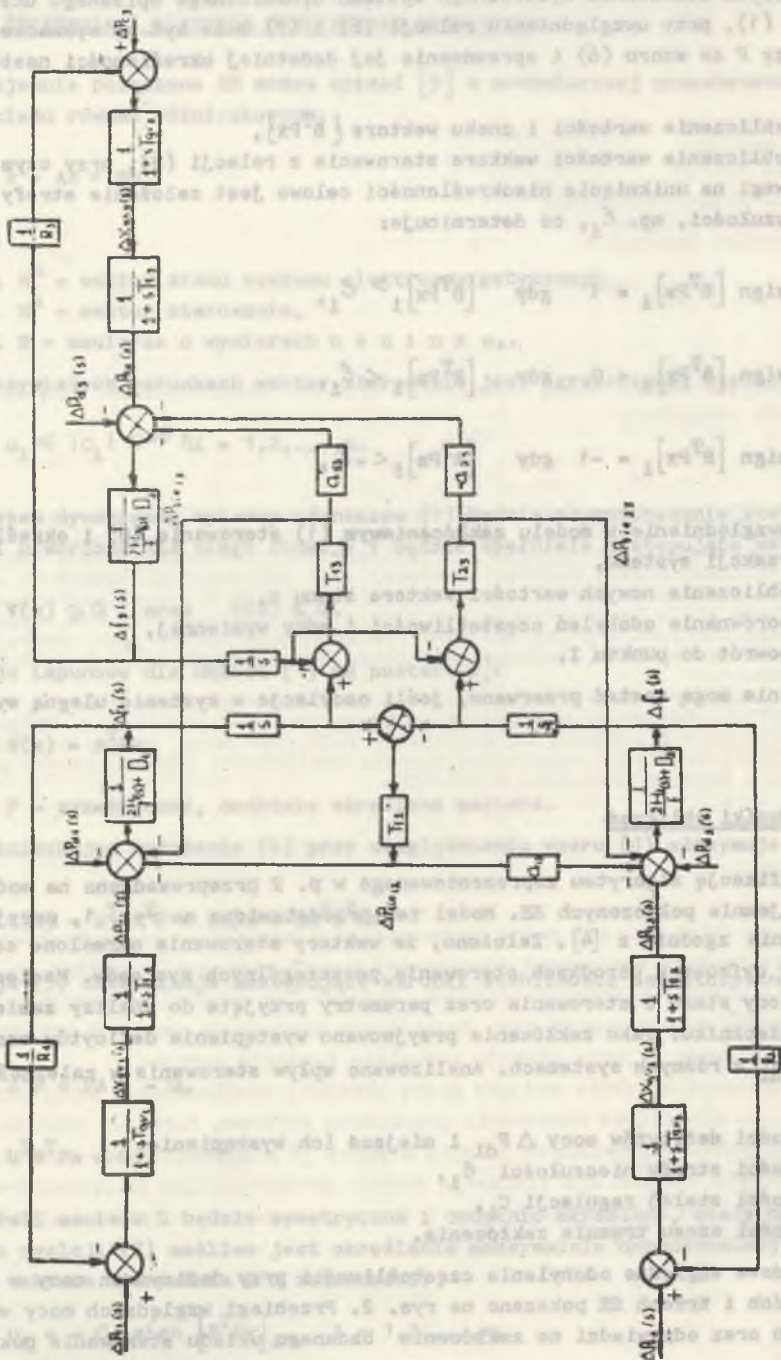
Obliczenia mogą zostać przerwane, jeśli oscylacje w systemie ulegną wytłumieniu.

### 3. Wyniki obliczeń

Weryfikację algorytmu zaprezentowanego w p. 2 przeprowadzono na modelu 3 - wzajemnie połączonych SE. Model ten przedstawiono na rys. 1, przyjmując oznaczenia zgodnie z [4]. Założono, że wektory sterowania określone są przez maszyny cyfrowe w ośrodkach sterowania poszczególnych systemów. Macierze A i B, wektory stanu i sterowania oraz parametry przyjęte do analizy zamieszczono w załączniku. Jako zakłócenia przyjmowano wystąpienia deficytów mocy czynnej  $\Delta P_{d1}$  w różnych systemach. Analizowano wpływ sterowania w zależności od:

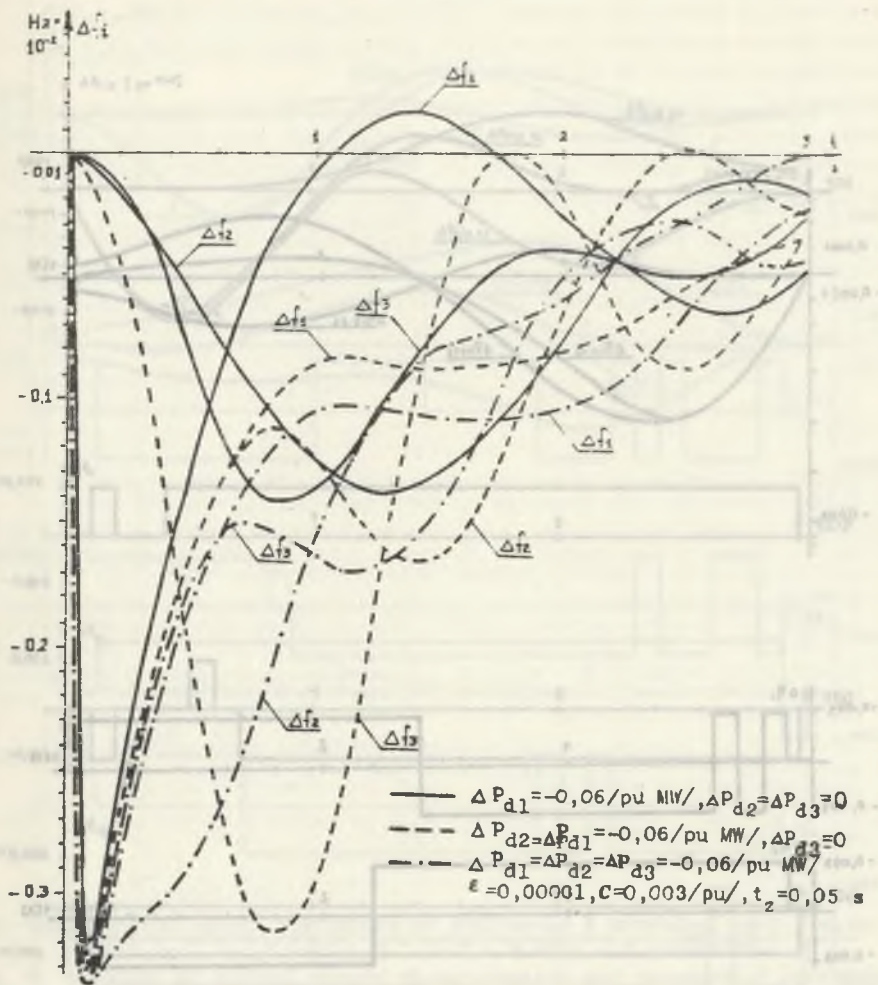
- wielkości deficytów mocy  $\Delta P_{d1}$  i miejsca ich wystąpienia,
- wielkości strefy nieczułości  $\epsilon_1$ ,
- wielkości stałej regulacji  $C_1$ ,
- wielkości czasu trwania zakłócenia.

Przykładowe względne odchylenia częstotliwości przy deficytach mocy w jednym, dwóch i trzech SE pokazano na rys. 2. Przebiegi względnych mocy wymiennych oraz odpowiedzi na zakłócenia badanego układu sterowania pokaza-



Rys. 1. Schemat blokowy 3 wzajemnie połączonych systemów

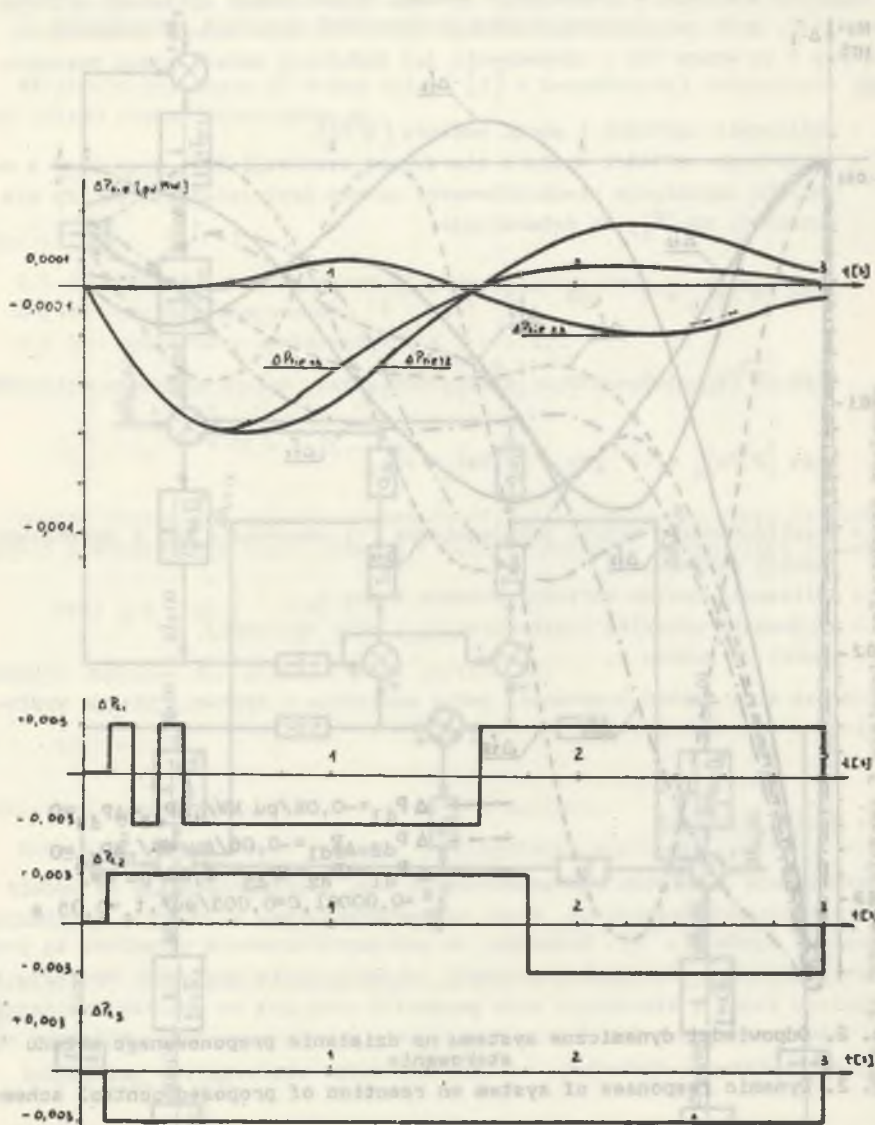
Fig. 1. Block diagram of 3-area system



Rys. 2. Odpowiedzi dynamiczne systemu na działanie proponowanego układu sterowania

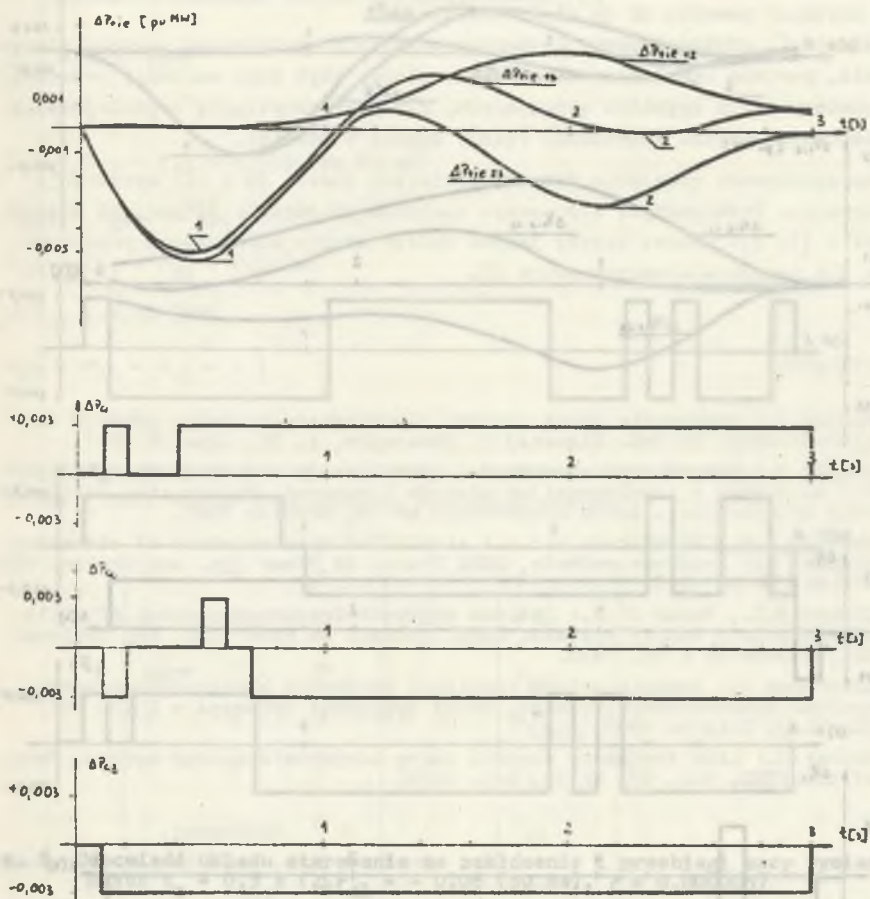
Fig. 2. Dynamic responses of system on reaction of proposed control scheme

no na rys. 3, 4 i 5. Na rys. 6. zaprezentowano przebiegi przy zwiększeniu dziesięciokrotnym czasu trwania zakłócenia (do 0,5 s) i dwukrotnym zmniejszeniu wartości stref nieczułości. Stabelaryzowane wyniki badań wpływu wszystkich wspomnianych wyżej czynników na stabilność połączonych SE zestawiono w pracy [5].



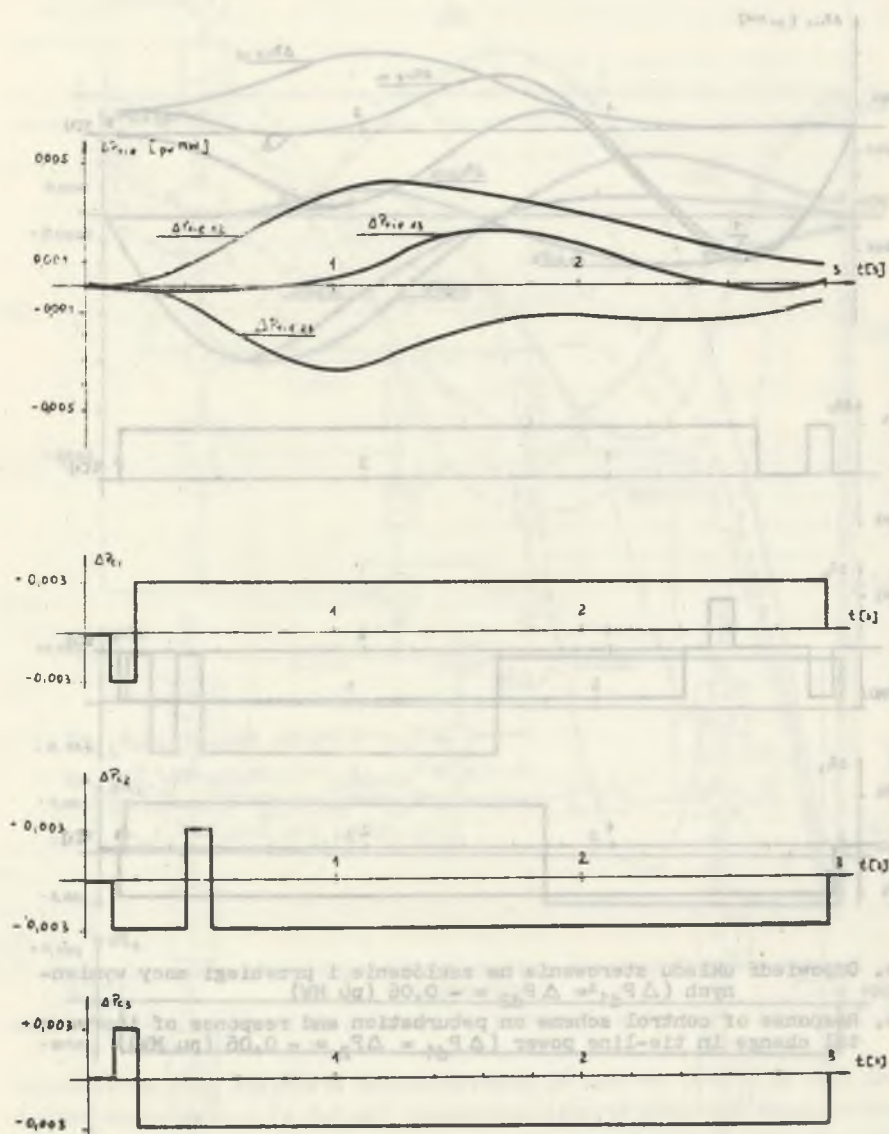
Rys. 3. Odpowiedź układu sterowania na zakłócenie i przebiegi mocy wymiennych ( $\Delta P_{dl} = -0,06$  (pu MW))

Fig. 3. Response of control schema on perturbation and response of incremental change in tie-line power ( $\Delta P_{dl} = -0,06$  (pu MW))



Rys. 4. Odpowiedź układu sterowania na zakłócenie i przebiegi mocy wymiennych ( $\Delta P_{d1} = \Delta P_{d2} = -0,06$  (pu MW))

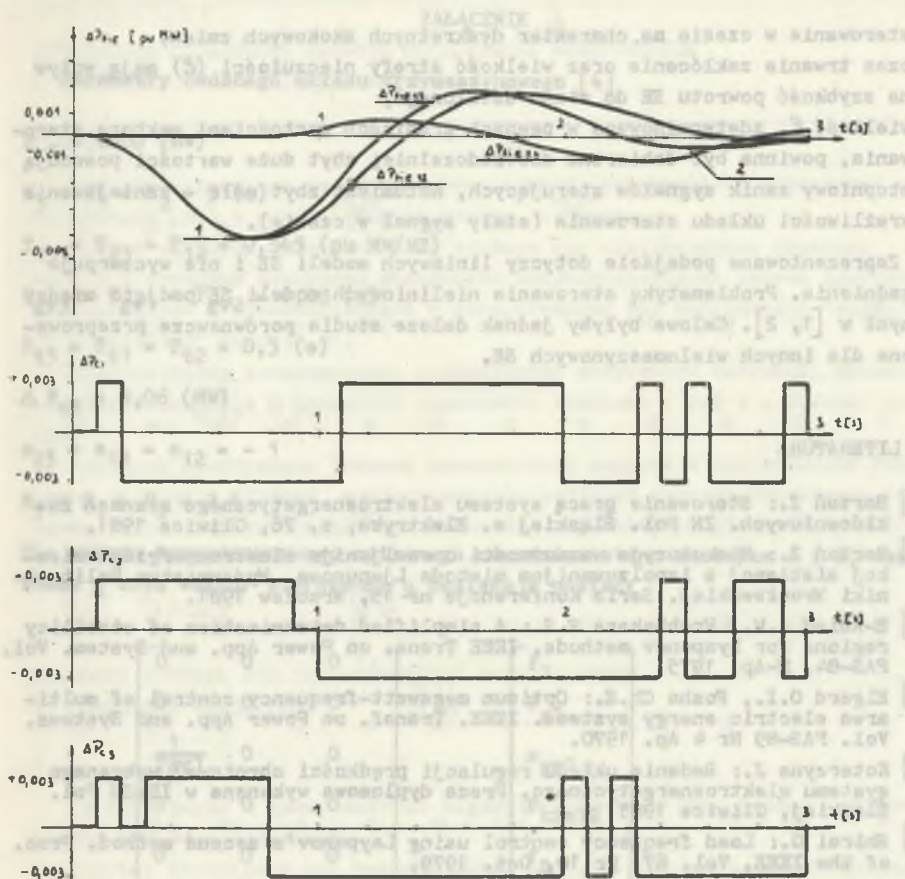
Fig. 4. Response of control scheme on perturbation and response of incremental change in tie-line power ( $\Delta P_{d1} = \Delta P_{d2} = -0,06$  (pu MW))



Rys. 5. Odpowiedź układu sterowania na zakłócenie i przebiegi mocy wymiennych ( $\Delta P_{d1} = \Delta P_{d2} = \Delta P_{d3} = -0,06$  (pu MW))

Fig. 5. Response of control scheme on perturbation and response of incremental change in tie-line power ( $\Delta P_{d1} = \Delta P_{d2} = \Delta P_{d3} = -0,06$  (pu MW))





Rys. 6. Odpowiedź układu sterowania na zakłócenie i przebiegi mocy wymien-  
nnych  $t_z = 0,5$  s ( $\Delta P_{dl} = -0,06$  (pu MW),  $\xi = 0,000005$ )

Fig. 6. Response of control scheme on perturbation and response of incremen-  
tal change in tie-line power  $t_z = 0,05$  s ( $\Delta P_{dl} = 0,06$  (pu MW),  $\xi = 0,000005$ )

#### 4. Wnioski i uwagi końcowe

W artykule zaprezentowano stosunkowo prostą i łatwą do zastosowania, u-  
względniając aktualny poziom rozwoju techniki cyfrowej, metodę sterowania  
połączonych SE zapewniającą ich stabilność.

Wyniki przeprowadzonych obliczeń pozwalają na sformułowanie następują-  
cych wniosków:

- do sterowania liniowych modeli SE wygodnie jest stosować metodę Lapuno-  
wa,

- sterowanie w czasie ma charakter dyskretnych skokowych zmian,
- czas trwania zakłócenia oraz wielkość strefy nieczułości ( $\epsilon$ ) mają wpływ na szybkość powrotu SE do stanu ustalonego,
- wielkość  $\epsilon$ , zdeterminowana w pewnych granicach wartościami wektora sterowania, powinna być dobierana doświadczalnie; zbyt duże wartości powodują stopniowy zanik sygnałów sterujących, natomiast zbyt małe - zmniejszenie wrażliwości układu sterowania (stały sygnał w czasie).

Zaprezentowane podejście dotyczy liniowych modeli SE i nie wyczerpuje zagadnienia. Problematykę sterowania nieliniowych modeli SE podjęto między innymi w [1, 2]. Celowe byłyby jednak dalsze studia porównawcze przeprowadzone dla innych wielomaszynowych SE.

#### LITERATURA

- [1] Bartoń Z.: Sterowanie pracą systemu elektroenergetycznego stanach zakłóceńowych. ZN Pol. Śląskiej s. Elektryka, z. 76, Gliwice 1981.
- [2] Bartoń Z.: Niektóre możliwości uprzejmienia elektroenergetycznej sieciowej z ispolzowanijem metoda Ljapunowa. Wydawnictwa Politechniki Wrocławskiej. Seria Konferencje nr 15, Wrocław 1981.
- [3] E-Abiad A.H., Prabhakara F.S.: A simplified determination of stability regions for Lyapunov methods. IEEE Trans. on Power App. and System. Vol. PAS-84, M-Ap. 1975.
- [4] Elgerd O.I., Fosha Ch.E.: Optimum megawatt-frequency control of multi-area electric energy systems. IEEE. Trans. on Power App. and Systems. Vol. PAS-89 Nr 4 Ap. 1970.
- [5] Koterzyna J.: Badanie układu regulacji prędkości obrotowej wybranego systemu elektroenergetycznego. Praca dyplomowa wykonana w IEiSU Pol. Śląskiej, Gliwice 1983.
- [6] Shirai G.: Load frequency control using Layponov's second method. Proc. of the IEEE, Vol. 67, Nr 10, Oct. 1979.

Recenzent:

prof. dr hab. inż. Marian Cegielski

Wpłynęło do Redakcji dn. 5 stycznia 1987 r.

## ZAŁĄCZNIK

Parametry badanego układu trzymaszynowego [4]

$$P_{r3} = 2000 \text{ (MW)}$$

$$H_3 = H_1 = H_2 = 5 \text{ (s)}$$

$$T_{13} = T_{23} = T_{12} = 0,545 \text{ (pu MW/HZ)}$$

$$T_{gv3} = T_{gv1} = T_{gv2} = 0,08 \text{ (s)}$$

$$T_{t3} = T_{t1} = T_{t2} = 0,3 \text{ (s)}$$

$$\Delta P_{d3} = 0,06 \text{ (MW)}$$

$$a_{23} = a_{13} = a_{12} = -1$$

$$R_3 = R_1 = R_2 = 2,4$$

Dla układu trzymaszynowego opisanego równaniem stanu macierze A i B, wektor stanu  $\underline{x}$  oraz wektor sterowania  $\underline{u}$  posiadają postać:

$$B = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ \frac{1}{T_{gv1}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{T_{gv2}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{T_{gv3}} \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad \underline{x} = \begin{bmatrix} f_1 \\ P_{g1} \\ x_{gv1} \\ P_{tie12} \\ f_2 \\ P_{g2} \\ x_{gv2} \\ f_3 \\ P_{g3} \\ x_{gv3} \\ P_{tie13} \\ P_{tie23} \end{bmatrix}$$

$$\underline{u} = \begin{bmatrix} P_{c1} \\ P_{c2} \\ P_{c3} \end{bmatrix}$$

**WZNIKI**

$$A = \begin{bmatrix} \frac{-f D_1}{2H_1} & \frac{f}{2H_1} & 0 & \frac{-f}{2H_1} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{-1}{T_{t1}} & \frac{1}{T_{t1}} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \frac{-1}{T_{GV1}} & 0 & \frac{-1}{T_{GV1}} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ T_{12} & 0 & 0 & -T_{12} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{-a_{12}f}{2H_2} & \frac{-fD_2}{2H_2} & 0 & \frac{f}{2H_2} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{-1}{T_{t2}} & \frac{1}{T_{t2}} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{-1}{T_{GV2}} & 0 & \frac{-1}{T_{GV2}} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{-fD_3}{2H_3} & \frac{f}{2H_3} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{-1}{T_{t3}} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{-1}{T_{GV3}} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ T_{13} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -T_{13} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -T_{23} & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

ДИСКРЕТНОЕ УПРАВЛЕНИЕ РАБОТОЙ СОЕДИНЕННЫХ ЭНЕРГОСИСТЕМ  
В АВАРИЙНЫХ (УСЛОВИЯХ) РЕЖИМАХ

Р е з ю м е

В настоящей статье рассматривается одна из возможностей управления энергосистемой (ЭС) с использованием метода Ляпунова.

Бурное развитие вычислительной техники при одновременном снижении стоимости и огромном повышении надежности микропроцессорных систем привлекает конструкторов и проектировщиков к использованию так называемого "дискретного управления" работой ЭС.

Использование возможностей, предлагаемых актуальной техникой, повышает заинтересованность и добавочно привлекает внимание к ней и к похожим методам.

Авторами предпринята попытка комплексного подхода к проблематике управления скоростью турбины. Анализировалось действие системы управления в зависимости от величин: дефицитов мощности, зоны нечувствительности, постоянной управления и продолжительности повреждения.

DISCRETE CONTROL FOR INTERCONNECTED POWER SYSTEMS  
IN EMERGENCY CONDITIONS

S u m m a r y

In this paper a power control algorithm based on the second Lyapunov method has been suggested.

Digital techniques are predestinated to these functions as the microcomputer can be programmed to solve the mathematical which define the desired control operation.

Authors describe a digital control designed for this purpose.

The easy control law based on the derivatie of the Lyapunov function along the faulted system has been developed. Application of this lew lead to determination of the value and sign of the controlvector.

Influence of value variations: load demand, sensitivity zones, regulation constants and the clearing time is discussed.

Conclusion are presented as results of system dynamic responses illustrating the influence of control systems on variations of this factors.