

Edward Lawera, Krzysztof Borkiewicz,  
Zbigniew Talarek

Instytut Elektroenergetyki  
i Sterowania Układów

## ZASTOSOWANIE MODELOWANIA ANALOGOWEGO DO BADANIA STABILNOŚCI PRACY UKŁADÓW ELEKTROENERGETYCZNYCH

**Streszczenie.** W artykule omówiono możliwości wykorzystania maszyn analogowych do praktycznych badań równowagi pracy układów elektroenergetycznych. Przedstawiono wyniki badań stabilności przekładowego układu elektroenergetycznego w warunkach różnorodnych zakłóceń zwarciovych oraz przy stosowaniu automatyki (SPZ).

### 1. Wstęp

Zachowanie się układów elektroenergetycznych w stanach przejściowych staje się coraz bardziej istotne ze względów eksploatacyjnych. Dotyczy to również elektromechanicznych przebiegów przejściowych decydujących o stabilności pracy układów elektroenergetycznych. Warunki stabilności statycznej i dynamicznej układów muszą być sprawdzone przy ich projektowaniu, modernizowaniu i eksploatacji. Mimo ciągłego rozwoju teorii stabilności pracy układów, ciągle brak jest odpowiednio operatywnych metod jej badania, przydatnych do praktycznego stosowania.

Możliwości badania stabilności zostały znacznie rozszerzone w wyniku postępu ETO i coraz powszechniejszego jej stosowania. W pewnych przypadkach szczególnie korzystne może okazać się zastosowanie do tych badań maszyn analogowych. W Instytucie Elektroenergetyki i Sterowania Układów Politechniki Śląskiej prowadzone są od dłuższego czasu prace związane z rozpoznananiem możliwości zastosowania modelowania analogowego do rozwiązywania różnych problemów pracy systemu elektroenergetycznego i jego elementów.

W niniejszym artykule omówiono korzyści wynikające z zastosowania modelowania analogowego do badania stabilności pracy układów, które można sprowadzić do układów jednomaszynowych oraz podano wyniki przeprowadzonych badań.

Równowagę pracy przykładowego układu badano w warunkach różnorodnych zakłóceń zwarciovych oraz przy stosowaniu samoczynnego ponownego załączenia (SPZ).

## 2. Charakterystyka metod badania równowagi dynamicznej

Metody badania równowagi dynamicznej układów elektroenergetycznych można podzielić na dokładne i przybliżone. Założenia upraszczające w metodach przybliżonych mogą dotyczyć warunków i parametrów pracy układu oraz parametrów elementów składowych, mogą one też tkwić w samej metodzie.

Metody dokładne polegają na rozwiązywaniu układów równań różniczkowych opisujących przebiegi przejściowe w pracy układów [2], [4], [9]. Do badania równowagi dynamicznej mogą być stosowane ogólne kryteria stabilności Łapunowa [2] oraz dla układów liniowych kryterium Hurwitza.

Praktycznie stosowane analityczne metody ilościowego badania równowagi dynamicznej opierają się przede wszystkim na wykorzystaniu zasady równych pól.

Metody analityczne są uciążliwe i nawet zastosowanie maszyn cyfrowych nie rozwiązuje wszystkich związanych z nimi problemów.

Zastosowanie modelowania analogowego do analizy równowagi dynamicznej układów pozwala na:

- bezpośrednie odwzorowywanie równań różniczkowych opisujących stany przejściowe,
- uproszczenie badań wariantowych, bowiem w zamodelowanym raz układzie można w sposób prosty dokonywać zmian warunków pracy i parametrów (lokalizacji zakłóceń, czasów działania zabezpieczeń i automatyki, efektywności urządzeń regulacyjnych, itp.),
- otrzymywanie wyników w postaci bezpośredniej, łatwych do interpretacji.

## 3. Modele analogowe układów jednomaszynowych

Możliwość modelowania analogowego złożonych układów elektroenergetycznych uzależniona jest od pojemności operacyjnej maszyny analogowej. Maszyny analogowe średniej wielkości z reguły ograniczają możliwości dokładnego modelowania układów złożonych. Występuje zatem konieczność przekształcenia układu rzeczywistego do układu odpowiadającego możliwościom maszyny analogowej. Przy przekształceniach tych musimy pogodzić się zarówno z przybliżonym odwzorowaniem pewnych części układu, jak i przyjęciem założeń upraszczających odnośnie warunków jego pracy. Mimo tych ograniczeń zastosowanie modelowania analogowego do badania równowagi układów daje znaczne korzyści.

W przypadku badania równowagi dynamicznej układu jednomaszynowego z hydrogeneratorem, pracującego na "sieć sztywną" [5] wyposażonego w klasyczną, wolnodziałającą regulację wzbudzenia oraz przy pominięciu działania regulacji prędkości obrotowej, układ ten można opisać równaniem [3], [9]:

$$P_M = P_J \frac{d^2\delta}{dt^2} + P_D \frac{d\delta}{dt} + \frac{E_d U}{X_d'} \sin\delta + \frac{U^2 X_d - X}{2 X_d X} \sin 2\delta, \quad (1)$$

w którym

$P_M$  - moc mechaniczna turbiny,

$P_J$  - współczynnik bezwładności na jednostkę przyspieszenia,

$P_D$  - jednostkowa moc tłumienia,

$\delta$  - kąt między wektorami  $\hat{E}_d$  i  $\hat{U}$ ,

$E'_d$  - SEM przyłożona za reaktancją przejściową główną maszyny synchronicznej,

$U$  - napięcie sieci sztywnej,

$X'_d$  - reaktancja przejściowa główna w osi wzdłużnej maszyny,

$X_d$  - reaktancja synchroniczna wzdłużna maszyny,

$X_q$  - reaktancja synchroniczna poprzeczna maszyny.

W przypadku badania równowagi dynamicznej analogicznego układu z turbogeneratorem ( $X_d = X_q$ ) równanie (1) przyjmuje postać:

$$P_M = P_J \frac{d^2\delta}{dt^2} + P_D \frac{d\delta}{dt} + \frac{E'_d U}{X'_d} \sin\delta, \quad (2)$$

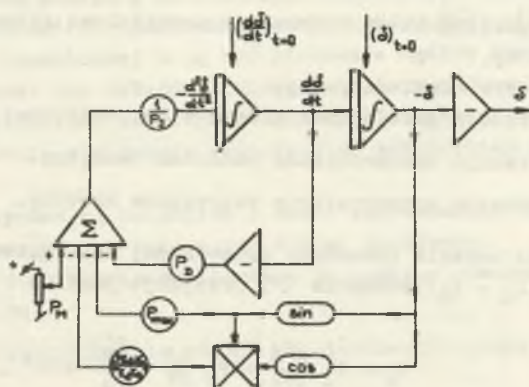
Modele analogowe układów opisanych równaniami (1) i (2) przedstawiono na rysunkach 1 i 2.

Zmienne występujące w rozwiązywanych równaniach są w maszynie analogowej przedstawione w postaci napięć na odpowiednich elementach liczących. Napięcia te z reguły nie przekraczają  $\pm 100$  V, dlatego też przed przystąpieniem do rozwiązywania zadania należy znaleźć zależności pomiędzy zmiennymi maszynowymi, a zmiennymi rzeczywistymi. Zależność tę określa współczynnik skali amplitudy, który posiada wartość i wymiar. Modelując badany układ na maszynie analogowej dobiera się również współczynnik skali czasu. Metody doboru współczynników skali amplitudy i skali czasu są wyczerpująco omówione w literaturze [3].

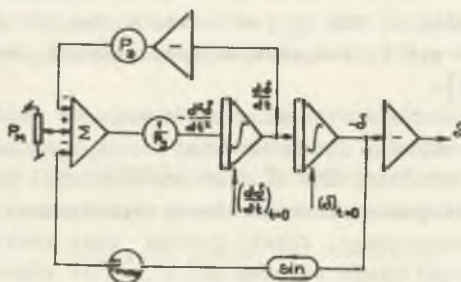
#### 4. Uwzględnienie szybkiej regulacji wzbudzenia generatorów

Założenie stałości SEM  $E'_d$  jest zasadniczym założeniem upraszczającym, które przyjmuje się we wszystkich uproszczonych badaniach równowagi dynamicznej [5], [9].

Dla czasu zakłócenia krótkiego w porównaniu ze stałymi czasowymi uzwojenia wzbudzenia maszyny synchronicznej w osi podłużnej  $T'_d$  i poprzecznej  $T'_q$ , założenie stałości SEM  $E'_d$  jest uzasadnione, gdyż w obwodach elektromagnetycznych stojana i wirnika nie występują jeszcze zmiany wypadkowego strumienia magnetycznego. Jeżeli jednak czas zakłócenia jest porównywalny lub większy niż stałe czasowe  $T'_d$  i  $T'_q$ , to wówczas tłumienie prądów wyrównawczych spowoduje wyraźne zmniejszenie wypadkowego strumienia i tym samym zmianę SEM  $E'_d$ .



Rys. 1. Schemat modelu analogowego do badania równowagi pracy układu jed-nomaszynowego z hydrogeneratorem wyposażonym w wolnodziałającą regulację wzbudzenia



Rys. 2. Schemat modelu analogowego do badania równowagi pracy układu jed-nomaszynowego z turbogeneratorem wyposażonym w wolnodziałającą regulację wzbudzenia

Możliwość założenia stałości SEM  $E'_d$  jest również zależna od rodzaju regulacji wzbudzenia. O ile dla wolnodziałającej regulacji można zakładać stałość SEM  $E'_d$ , to w przypadku regulacji szybkiej lub regulacji udarowej nie można przyjmować takiego założenia.

Proces przejściowy zachodzący w generatorze w przypadku istnienia szybkiej regulacji wzbudzenia można opisać układem równań [3], [9]:

$$\begin{aligned} \frac{dE'_d}{dt} T_{do} + E'_d &= E_{de} \\ E'_d &= \frac{X'_d + X_z}{X_d + X_z} E_d + \frac{X_d - X'_d}{X_d - X_z} U \cos \delta \\ k \frac{dE_{de}}{dt} T_e + k E_{de} &= U_p, \end{aligned} \quad (3)$$

w których

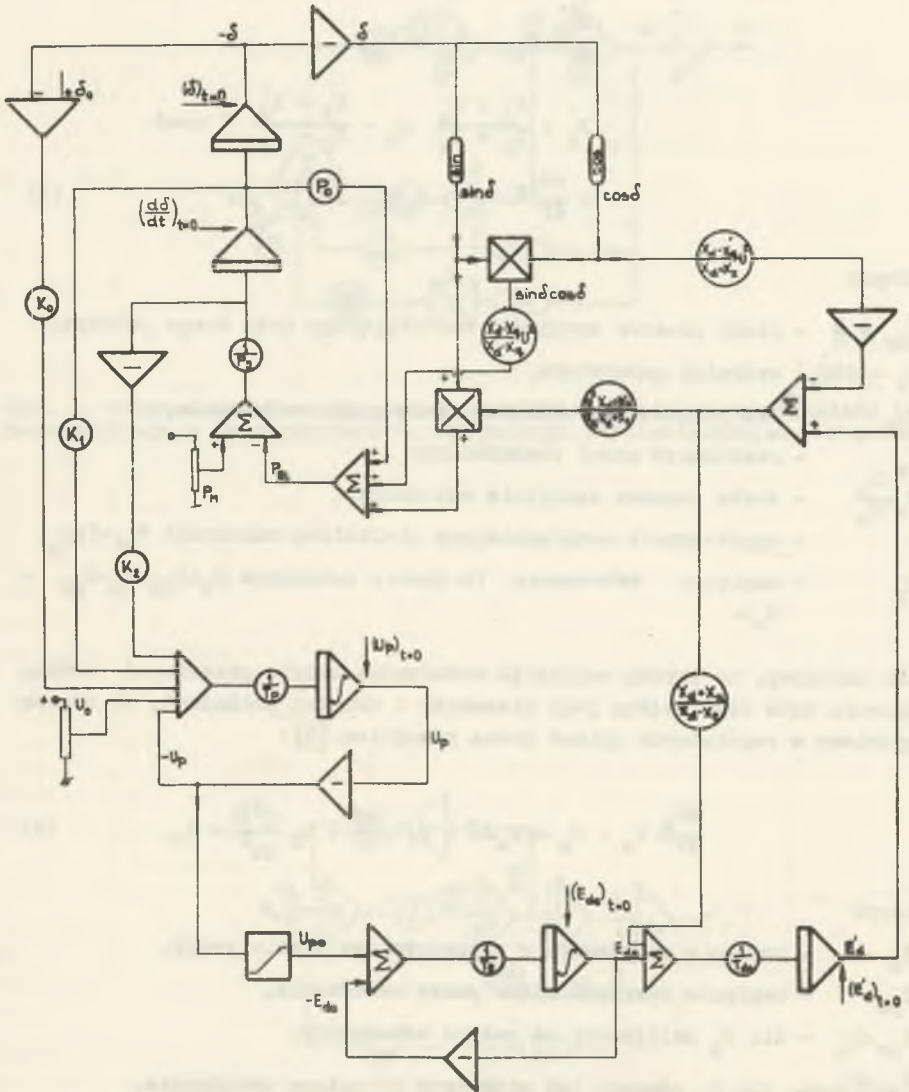
- $T_{do} = \frac{L}{R}$  - stała czasowa uzwojenia wzbudzającego przy biegu jałowym,
- $E_d$  - SEM  $\vec{r}$  wzdłużna generatora,
- $E_{de}$  - SEM związana ze składową stałą prądu wzbudzenia,
- $X_z$  - reaktancja sieci zewnętrznej,
- $T_e = \frac{L_e}{R_e}$  - stała czasowa uzwojenia wzbudnicy,
- $k$  - współczynnik uwzględniający nieliniową zależność  $E_{de} = f(U_p)$
- $U_p$  - napięcie wzbudzenia (w stanie ustalonym  $E_d = E_{de} = U_p = U_{po} = U_0$ ).

Jeżeli założymy, że szybka regulacja wzbudzenia będzie przebiegać według odchylenia kąta oraz według jego pierwszej i drugiej pochodnej, to proces przejściowy w regulatorze opisać można równaniem [9]:

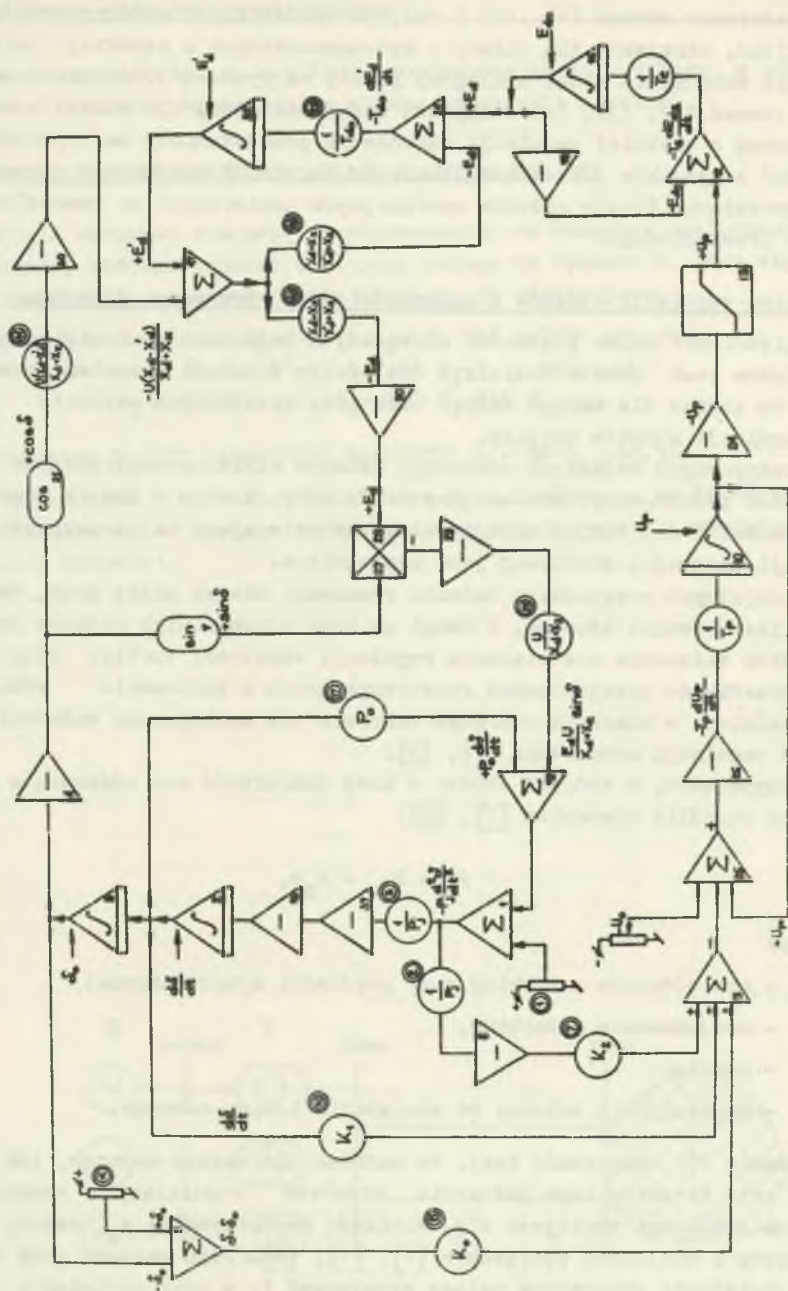
$$\frac{dU_p}{dt} T_p + U_p = k_0 \Delta \delta + k_1 \frac{d\delta}{dt} + k_2 \frac{d^2 \delta}{dt^2} + U_0, \quad (4)$$

w którym

- $U_0$  - napięcie wzbudzenia w rozpatrywanym stanie pracy,
- $U_{po}$  - napięcie uwzględniające pułap wzbudzenia,
- $U_{po} = U_p$  - dla  $U_p$  mniejszych od pułapu wzbudzenia,
- $U_{po} = U_{pmax}$  - dla  $U_p$  równych lub większych od pułapu wzbudzenia,
- $U_{pmax}$  - pułap wzbudzenia.



Rys. 3. Schemat modelu analogowego do badania równowagi pracy układu jed-  
nomaszynowego z hydrogeneratorem wyposażonym w silną regulację wzbudzenia



Rys. 4. Schemat modelu analogowego do badania równowagi pracy układu jednomaszynowego z turbogeneratorem wyposażonym w silną regulację wzbudzenia

Na podstawie równań (1), (3) i (4), po wprowadzeniu współczynników skali amplitud, otrzymano dla układu z hydrogeneratorem o szybkiej (silnej) regulacji wzbudzenia model analogowy podany na rysunku 3. Natomiast na podstawie równań (2), (3), (4) otrzymano model analogowy dla układu z turbogeneratorem o szybkiej regulacji wzbudzenia przedstawiony na rysunku 4. Jak widać z rysunków 3 i 4, uwzględnienie regulacji wzbudzenia powoduje zwielokrotnienie liczby członów operacyjnych koniecznych do zamodelowania procesu przejściowego.

##### 5. Problem regulacji obrotów i zmienności mocy otrzymanej z turbiny

Uwzględnienie zmian prędkości obrotowej w badaniach równowagi dynamicznej istotne jest przede wszystkim dla maszyn z małymi momentami bezwładności, to znaczy dla maszyn małych oraz przy specjalnych szybkich układach regulacji obrotów turbiny.

W praktycznych badaniach równowagi układów elektroenergetycznych interesują nas przede wszystkim maszyny dużej mocy, a więc o dużych momentach bezwładności i dla takich maszyn założenie polegające na nieuwzględnianiu regulacji prędkości obrotowej jest uzasadnione.

W specjalnych przypadkach badania równowagi maszyn małej mocy, założenie to jest również słuszne, z uwagi na brak odpowiednich układów regulacji. Zatem założenie niedziałania regulacji obrotowej turbiny przy badaniach przebiegów przejściowych rozstrzygających o zachowaniu równowagi jest spełnione w znacznie szerszym zakresie niż analogiczne założenie dotyczące regulacji wzbudzenia [7], [8].

W przypadkach, w których chodzi o dużą dokładność moc oddawaną z turbiny można określić równaniem [7], [8]:

$$P_M = P_{M0} - k_p s, \quad (5)$$

w którym

$P_{M0}$  - moc oddawana z turbiny przy prędkości synchronicznej,

$P_M$  - moc oddawana z turbiny,

$s$  - poślizg,

$k_p$  - współczynnik zależny od obciążenia i typu maszyny.

Równanie (5) uwzględnia fakt, że zarówno dla turbin wodnych, jak i parowych przy niezmiennym położeniu urządzeń regulujących moment ze wzrostem prędkości zmniejsza się. Wielkość współczynnika  $k_p$  zależy od typu maszyny i wielkości obciążenia [1], [7], [8]. Jego wartość przy znamionowym obciążeniu generatora należy przyjmować 1, a przy obciążeniu - od 0 do 0,5  $P_n$  równą 0,5. Zmiany mocy wynikające z równania (5) przy badaniu na maszynie analogowej można uwzględnić podając na wejście integratora wy-



tworzącego poślizg  $s$  wielkość proporcjonalną do poślizgu  $z$  odwrotnym znakiem (to znaczy wprowadzając ujemne sprzężenie zwrotne).

## 6. Charakterystyka badanego układu i zakres analizy

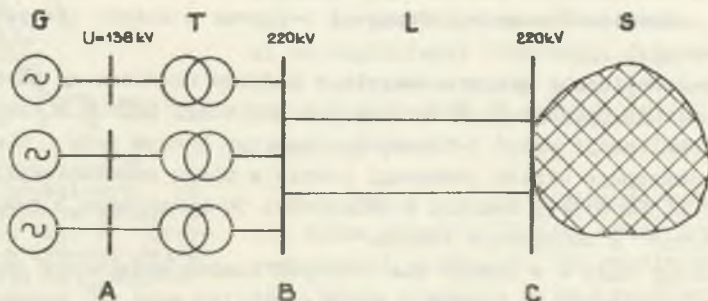
Badania warunków równowagi przeprowadzono na maszynie analogowej MA-48 dla układu, którego schemat zastępczy podano na rysunku 5. Dane tego układu konieczne dla przeprowadzenia analizy, są następujące:

Generator G - 3xTGH-120  $S_N=150\text{MVA}$   $U_N=13,8\text{kV}$   $n=3000\text{ obr./min}$   
 $\cos\phi=0,8$ ,  $GD^2=15,5\text{ T.m}^2$   $P_S=3,34\text{ MW/st.el.}$   
 $P_D=0,02\text{ MW/st.el.}$   $X_d=184\%$   $X'_d=21\%$   $T'_{do}=5\text{ s.}$

Transformator T-3XRT 140000/220  $S_N=130\text{MVA}$   $U_z=13\%$   $X_{tr}=48,5\Omega$

Linia przesyłowa L - 2xAFL-525  $L=200\text{ km}$   $X_o=0,324\Omega/\text{km}$   $r_o=0,0546\Omega/\text{km}$

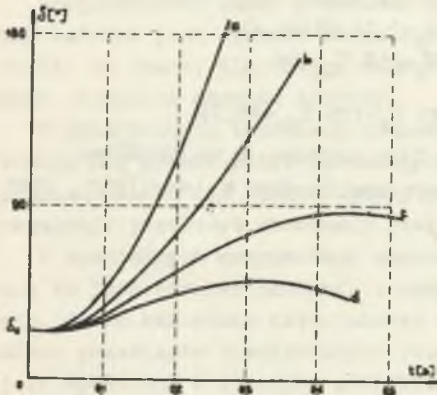
S - pozostała część systemu energetycznego przyjmowana w analizie jako "sieć sztywna".



Rys. 5. Schemat rozpatrywanego układu elektroenergetycznego

Dla podanego układu zbadano wpływ następujących czynników na równowagę dynamiczną jego pracy:

- lokalizacji zakłócenia zwarcioowego,
- rodzaju zwarcia,
- czasu trwania zwarcia,
- rodzaju regulacji wzbudzenia,
- działania automatyki SPZ.



Rys. 6. Przebiegi kąta  $\delta$  przy różnych rodzajach zwarć powstałych na jednym z torów w pobliżu szyn B w rozpatrywanym układzie:

- a) zwarcie 3-fazowe, b) zwarcie 2-fazowe z ziemią, c) zwarcie 2-fazowe, d) zwarcie 1-fazowe z ziemią

wych i wynosi 0,263 s; dla zwarć 2-fazowych z ziemią czas ten wynosi 0,303 s, natomiast zwarcia 2-fazowe i 1-fazowe z ziemią nie powodują utraty równowagi.

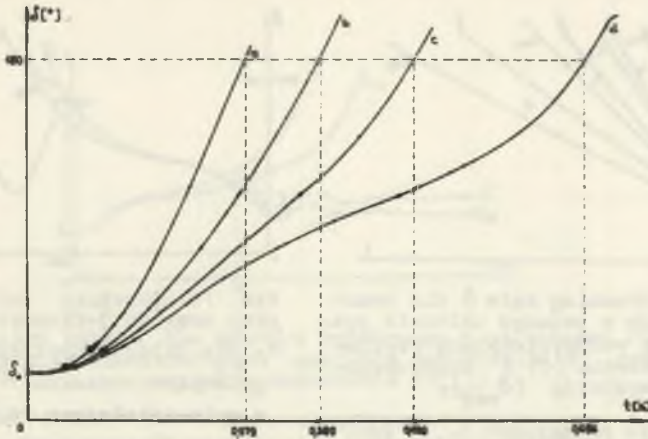
Wpływ lokalizacji miejsca zwarcia w badanym układzie na warunki równowagi ilustruje rysunek 7. Podano na nim przebiegi kąta  $\delta$  w czasie, przy różnej lokalizacji zwarć 3-fazowych. Czas, po którym przy niewyłączonym zwarceniu następuje utrata równowagi rośnie w miarę oddalania się od szyn B i wynosi 0,368 s przy zwarceniu w odległości 50 km od szyn B oraz 0,696 s przy zwarceniu w odległości 150 km.

Przebiegi kąta  $\delta$  w czasie dla różnych czasów wyłączenia zwarcia 3-fazowego zaistniałego na jednym z torów w pobliżu szyn B podano na rysunku 8. Z wykresów wynika, że równowaga układu zostaje jeszcze zachowana przy wyłączeniu zwarcia po czasie 0,15 s, natomiast przy czasie równym 0,16 s następuje utrata równowagi.

### 7. Wpływ rodzaju, lokalizacji i czasu trwania zakłóceń zwarcioowych na równowagę układu

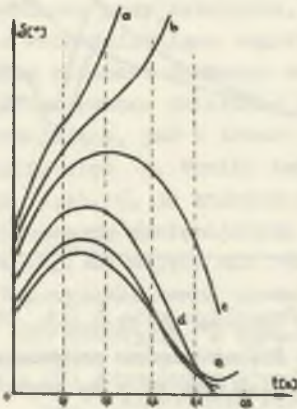
Wpływ rodzaju, lokalizacji i czasu trwania zwarć w badanym układzie z turbogeneratorem wyposażonym w konwencjonalną (wolnozdziałającą) regulację wzbudzenia przeanalizowano korzystając ze schematu podanego na rysunku 2.

Analizując wpływ rodzaju zwarć zbadano warunki równowagi przy zwarciach 3-fazowych, 2-fazowych z ziemią, 2-fazowych i 1-fazowych z ziemią. Przebiegi kąta  $\delta$  w czasie, przy występowaniu podanych rodzajów zwarć na jednym z torów w pobliżu szyn B podano na rysunku 6. Czas, po którym przy niewyłączonym zwarceniu następuje utrata równowagi, jest najkrótszy dla zwarć 3-fazo-



Rys. 7. Przebiegi kąta  $\delta$  przy zwarcjach 3-fazowych w zależności od miejsca zwarcia w badanym układzie:

- a) zwarcie w pobliżu szyn B, b) zwarcie w odległości 50 km od szyn B, c) zwarcie w odległości 100 km od szyn B, d) zwarcie w odległości 150 km od szyn B

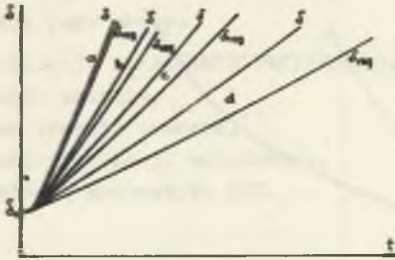


Rys. 8. Przebiegi kąta  $\delta$  w stanie pozakłóceniovym po zwarciu 3-fazowym na jednym z torów w pobliżu szyn B przy różnych czasach trwania zwarcia: a)  $t_{zw}=0,17s$  b)  $t_{zw}=0,16s$  c)  $t_{zw}=0,15s$  d)  $t_{zw}=0,13s$  e)  $t_{zw}=1,11s$

Analogiczne badania wykonano dla turbogeneratorsa z silną regulacją wzdutzenia wykorzystując schemat analogowy przedstawiony na rysunku 4. Otrzymane wyniki badań ilustrują rysunki od 9 do 13, na których podano przebiegi kąta  $\delta$  w czasie dla zwarć 3-fazowych przy różnych czasach ich trwania i różnej lokalizacji. We wszystkich przypadkach uwidocznił się korzystny wpływ silnej regulacji wzbudzenia na przebieg kąta  $\delta$  w czasie, czyli na zagadnienie równowagi. Jej wpływ jest bardziej widoczny w miarę wzrastania odległości miejsca zwarcia od szyn (rys. 9).

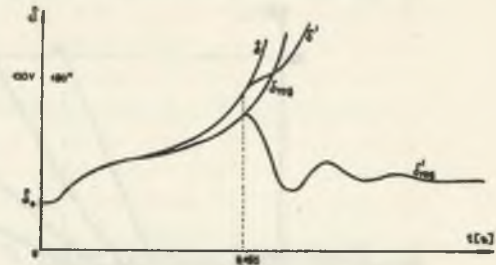
W układzie z silną regulacją wzbudzenia można dopuścić dłuższe czasy trwania zwarcia niż w układzie bez regulacji (rys. 10). Efekt działania silnej regulacji wzbudzenia jest bardziej widoczny przy dłuższych czasach trwania zwarcia (rys.

11 i rys. 12). Układ szybciej wraca do ustalonego stanu pracy (rys. 13)



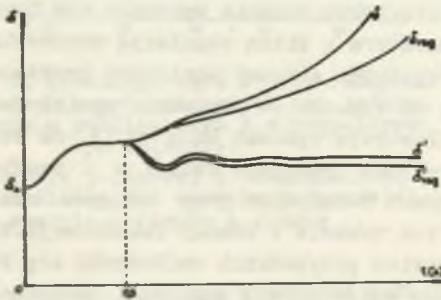
Rys. 9. Przebieg kąta  $\delta$  dla zwarcia 3-fazowych w badanym układzie pracującym z wolnodziałającą regulacją wzbudzenia ( $\delta$ ) i szybkodziałającą regulacją ( $\delta_{reg}$ ):

a) zwarcie na szynach B, b) zwarcie w odległości 50 km od szyn B  
c) zwarcie w odległości 100 km od szyn B, d) zwarcie w odległości 150 km od szyn B.

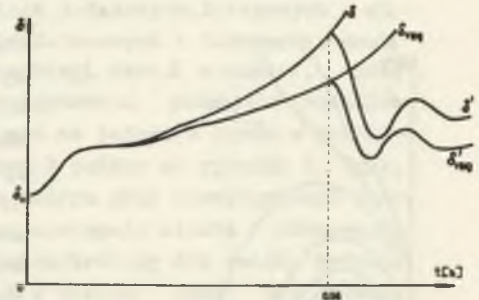


Rys. 10. Przebieg kąta  $\delta$  w czasie przy zwarciu 3-fazowym

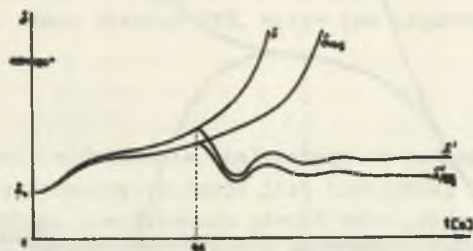
$\delta$  - dla układu z wolnodziałającą regulacją wzbudzenia,  $\delta'$  - dla układu z wolnodziałającą regulacją wzbudzenia po wyłączeniu zwartego toru,  $\delta_{reg}$  - dla układu z silną regulacją wzbudzenia,  $\delta'_{reg}$  - dla układu z silną regulacją wzbudzenia po wyłączeniu zwartego toru.



Rys. 11. Przebiegi kąta  $\delta$  dla zwarcia 3-fazowego w odległości 150 km od szyn B dla układu z wolnodziałającą regulacją wzbudzenia ( $\delta$ ) i silną regulacją wzbudzenia ( $\delta_{reg}$ ) dla czasu trwania zwarcia 0,3 s



Rys. 12. Przebiegi kąta  $\delta$  dla zwarcia 3-fazowego w odległości 150 km od szyn B dla układu z wolnodziałającą regulacją wzbudzenia ( $\delta$ ) i silną regulacją wzbudzenia ( $\delta_{reg}$ ) dla czasu trwania zwarcia 0,36 s



Rys. 13. Przebiegi kąta  $\delta$  dla zwarcia 3-fazowego w odległości 100 km od szyn B dla układu z wolnodziałającą regulacją wzbudzenia ( $\delta$ ) oraz silną regulacją wzbudzenia ( $\delta_{reg}$ )

jeżeli jest wyposażony w silną regulację wzbudzenia, niż przy istnieniu tradycyjnej wolnodziałającej regulacji wzbudzenia. Amplituda i okres drgań kąta  $\delta$  dla układu z silną regulacją po wyłączeniu zwarcia są mniejsze niż dla układu z wolnodziałającą regulacją (rys. 10,11,12,13).

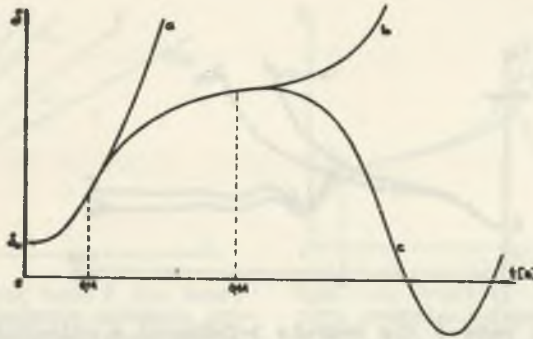
#### 8. Badanie wpływu automatyki SPZ na równowagę układu

Analizę wpływu automatyki SPZ na równowagę pracy badanego układu przeprowadzono przy założeniu, że w układzie pracuje turbogenerator wyposażony w wolnodziałającą regulację wzbudzenia. Model analogowy zrealizowano według schematu podanego na rysunku 2.

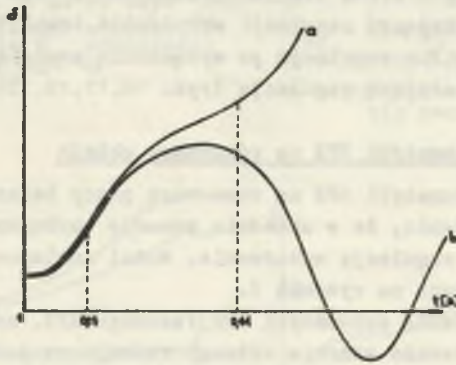
Rozpatrywano działanie automatyki trójfazowego SPZ, zakładając zarówno przemijające, jak i trwałe zwarcia różnego rodzaju na jednym z torów w pobliżu szyn B. Wyniki badań zostały częściowo przedstawione na rysunkach 14,15,16, na których podano przebiegi kąta  $\delta$  w czasie przy zwarcia trójfazowych występujących przy działającej i odstawionej automatyce SPZ. Przebiegi te zdjęto dla różnych wartości mocy przesyłanej.

W przypadku zwarć przemijających działanie automatyki SPZ wpływało zawsze korzystnie na warunki równowagi. Zastosowanie automatyki SPZ w tych przypadkach może pozwolić na zwiększenie mocy przesyłanej. Z porównania rysunków 14 i 15 wynika, że przy działaniu SPZ można zwiększyć moc przesyłaną z 320 MW do 330 MW - naruszenie równowagi następuje dopiero przy mocy równej 335 MW (krzywa "a" na rysunku 15).

Działanie automatyki SPZ przy zwarcia przemijających pozwala również dopuścić większe czasy trwania zwarcia przy danych wartościach mocy przesyłanej. Jak wykazały przeprowadzone badania, skrócenie czasu przerwy automatyki SPZ nie zawsze prowadzi do poprawy warunków równowagi, można mówić o pewnym optymalnym czasie przerwy dla określonego czasu trwania zwarcia, w danych warunkach pracy układu.

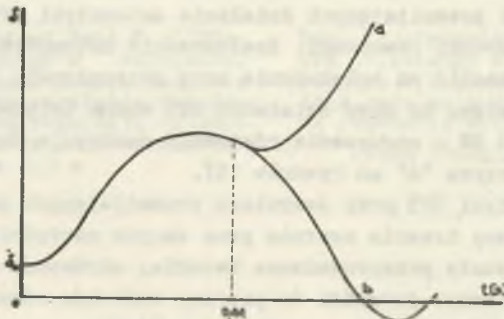


Rys. 14. Wpływ działania SPZ na przebieg kąta  $\delta$  przy zwarciu 3-fazowym przemijającym dla  $P = 330$  MW,  $t_{zw} = 0,14$ s,  $t_p = 0,3$ s ( $t_p$ -czas przerwy SPZ):  
 a) zwarcie nie zostało wyłączone, b) SPZ nie działa, c) SPZ działa



Rys. 15. Przebiegi kąta  $\delta$  w zależności od wielkości przenoszanej mocy dla  $t_{zw} = 0,14$ s,  $t_p = 0,3$ s:

a)  $P = 335$  MW, b)  $P = 320$  MW



Rys. 16. Wpływ działania SPZ na przebieg kąta  $\delta$  przy zwarciu 3-fazowym trwałym dla  $P = 320$  MW,  $t_{zw1} = t_{zw2} = 0,14$ s,  $t_p = 0,3$ s:

a) SPZ działa, b) SPZ nie działa

Dla rozważanego układu wpływ działania automatyki SPZ, przy zwarciach trójfazowych trwałych, dla analizowanych czasów zwarć i przerwy SPZ, był niekorzystny i powodował pogorszenie warunków równowagi. Dla określonego czasu zwarcia i czasu przerwy SPZ, wpływ ten ilustrują wykresy z rysunku 16.

## 9. Wnioski

- a) Zastosowanie modelowania analogowego do badania równowagi pracy układów elektroenergetycznych jest korzystne, z uwagi na możliwości bezpośredniego odwzorowania równań różniczkowych opisujących przebiegi przejściowe decydujące o zachowaniu równowagi oraz znaczne ograniczenie czasochłonności analizy.
- b) Dokładność analizy równowagi prowadzona przy pomocy modelowania analogowego jest duża. Różnice otrzymanych wyników, przy wyznaczaniu przebiegu kąta  $\delta$  w czasie na maszynie analogowej i na drodze obliczeń analitycznych przeprowadzonych wrywkowo, nie przekraczały 3%.
- c) Stosowanie modelowania analogowego jest szczególnie celowe i korzystne przy analizie wpływu znacznej ilości czynników na warunki równowagi danego układu. Zmianę czynników można łatwo zrealizować na raz zamodelowanym układzie - taka konieczność cechuje z reguły praktyczne badania równowagi pracy układów elektroenergetycznych.

## LITERATURA

1. S.Grarty: Power System Stability. Vol.1,2. London 1945, 1947.
2. Cukiernik L.: Obszczaja teoria ustojczivosti Lapunowa. Elektriczesstwo 1962 r. Nr 1.
3. Hellmann W.: Zastosowanie analogowych maszyn matematycznych. WNT, Warszawa 1970 r.
4. Jasicki Z.: Zjawiska nieustalone w układach elektroenergetycznych. WNT Warszawa, 1970 r.
5. Kamiński A.: Równowaga współpracy układów elektroenergetycznych. PWT, 1956 r.
6. Paszek Wł.: Wybrane zagadnienia regulacji napięcia generatorów synchronicznych. Przegląd Elektrotechniczny Nr 10 1961 r.
7. Sokołow N.: Primienienie anałogowych wyczislitelnych maszin w energeticheskich sistemach. "Energija", Moskwa 1970 r.
8. Wienikow W.: Tieoria podobija i modielirowania primienitelno k zadaczam eliektroeniergetiki. Moskwa Wyższ.Szkoła 1966 r.
9. Wienikow W.: Eliektromiechaniczeskije pieriechodnyje procesy w eliektricheskich sistemach. Izdatielstwo "Energija". Moskwa 1964 r.

ПРИМЕНЕНИЕ АНАЛОГОВОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРИ ИСПЫТАНИЯХ  
УСТОЙЧИВОСТИ РАБОТЫ ЭНЕРГОСИСТЕМ

**Резюме**

В статье представлены возможности использования аналоговых вычислительных машин при испытаниях устойчивости работы энергосистем. Приведены результаты испытаний устойчивости примерной энергосистемы в условиях разных видов коротких замыканий, а также при применении АПЗ.

APPLICATION OF THE ANALOGUE SIMULATION FOR POWER SYSTEMS STABILITY  
ANALYSIS

**S u m m a r y**

In the article the possibilities of analogue computers utilization for practical analysis of power systems stability are discussed. Results of stability analysis of an exemplary power system in conditions of various short-circuit disturbances and by the application of autoreclosing are presented.