

Paweł SOWA

**WRAŻLIWOŚĆ PARAMETRÓW PODCZAS IDENTYFIKACJI OBIEKTÓW W STANACH  
ZAKŁÓCENIOWYCH**

**Streszczenie.** W artykule przedstawiono wyniki obliczeń przebiegów przejściowych elektromagnetycznych w trójfazowej linii przesyłowej przy pełnym odwzorowaniu pozostałej części układu oraz zastąpieniu go za pomocą prostego układu zawierającego elementy skupione. Metoda identyfikacji parametrów układu zredukowanego, opisanego za pomocą dowolnego układu równań różniczkowych zwyczajnych prowadzona jest w dziedzinie czasu przy wykorzystaniu programu komputerowego Netomac. Identyfikacja oparta na kryterium wrażliwości pozwala na uzyskanie optymalnych parametrów dla danego schematu zastępczego.

**SENSITIVITY OF PARAMETERS BY IDENTIFICATION OF TRANSIENT SYSTEMS**

**Summary.** The paper presents the results of calculation of the electromagnetic transient on three-phase transmission lines with the full system representation and the simply equivalent in the form of lumped parameter circuits. Based on the program Netomac a method has been developed for parameter identification of the reduction model described with arbitrary differential equation systems in the time domain. The identification method with the sensitivity criterion provides optimal parameters for the equivalent system.

**PARAMETEREMPFLINDLICHKEIT BEI DER IDENTIFIKATION DES FEHLERBETROFFENEN  
SYSTEMS**

**Zusammenfassung.** Im Beitrag wurden die Berechnungsergebnisse der elektromagnetischen Ausgleichsvorgängen in der dreiphasigen Übertragungsleitung mit umfangreichen originalen System und einfachen reduzierten Ersatzsystem mit konzentrierten Parametern. Ein Verfahren zur Parameteridentifikation des reduzierten Ersatzsystems, das mit beliebigen Differentialgleichungssystemen beschrieben wird, wurde mit Hilfe des Programmsystems Netomac im Zeitbereich realisiert. Die Identifikation nach der Parameterempfindlichkeit ermittelt für angegebene Ersatzschaltung die optimierten Parameter.

## 1. WPROWADZENIE

Podczas analizy stanów zakłóceń w systemie elektroenergetycznym prawie zawsze zakłada się dokładne odwzorowanie wyłącznie badanego elementu układu przy zastępowaniu pozostałej jego części za pomocą uproszczonych schematów. Przeprowadzanie obliczeń w układzie rozbudowanym - oryginalnym zawsze będzie związane z wątpliwościami dotyczącymi celowości dokładnego modelowania każdego z elementów lub zakresu uproszczeń układu oraz ich wpływu na wiarygodność otrzymywanych wyników. Badania stanów nieustalonych w układzie uproszczonym podczas zakłóceń zwarciovych mogą być prowadzone pod warunkiem optymalnego doboru oraz prawidłowej identyfikacji parametrów zastępczego układu zasilającego. Optymalny dobór schematu zastępczego oraz identyfikacja parametrów w dziedzinie czasu lub częstotliwości muszą być przeprowadzone indywidualnie dla każdego zredukowanego układu, co wyklucza możliwość zastosowania uogólnionego schematu zastępczego dla określonej grupy przypadków. W artykule przedstawiono na prostym przykładzie identyfikację parametrów schematu zastępczego opartego na kryterium wrażliwości.

## 2. KONSTRUKCJA DYNAMICZNYCH SCHEMATÓW ZASTĘPCZYCH

### 2.1. Opis matematyczny modeli zastępczych

Wśród najczęściej stosowanych form opisu schematów zastępczych można wyróżnić:

- układy równań różniczkowych lub różnicowych,
- zmienne w przestrzeni stanu,
- funkcje przejścia,

jak również metody nieparametryczne, jak na przykład funkcje korelacji lub widmowe charakterystyki częstotliwościowe. Wybór odpowiedniego opisu zależy od rozważanego problemu, jak również będących do dyspozycji programów komputerowych - ściślej metod numerycznych wykorzystanych w tych programach.

W przypadku identyfikacji opisanej poniżej wykorzystano program NETOMAC [2], w którym zastosowano prostą metodę numeryczną trapezów. Pozwala to na rozwiązywanie zagadnień opisanych wg dowolnie wybranej formy.

W dalszej części artykułu oznaczono odpowiednio:

- wartości modelowe

$$W_m^T = (W_{m1}, W_{m2}, W_{m1}, \dots, W_{mk}), \quad (1)$$

- wartości oryginalne

$$W_o^T = (W_{o1}, W_{o2}, W_{o1}, \dots, W_{ok}), \quad (2)$$

- parametry modelowe

$$P^T = (P_1, P_2, P_j, \dots, P_n). \quad (3)$$

Dla tak przyjętych oznaczeń matematyczny model może być opisany za pomocą funkcji:

$$W_m = f(P), \quad (4)$$

przy czym zakłada się, że funkcja ta jest zawsze dwukrotnie różniczkowalna tj. istnieją pochodne cząstkowe:

$$W_m' = \frac{\partial W_m}{\partial \{P_1, \dots, P_n\}}, \quad W_m'' = \frac{\partial^2 W_m}{\partial \{P_1, \dots, P_n\}^2} \quad (5)$$

w zakresie, w którym zdefiniowana jest funkcja  $W_m$ .

## 2.2. Kryterium optymalizacji

W celu prawidłowego dopasowania funkcji opisującej model stosowane jest kryterium optymalizacji w dziedzinie czasu lub częstotliwości. W tym celu definiowany jest wektor błędu

$$B = W_o - W_m. \quad (6)$$

Stosując jako kryterium optymalizacji osiągnięcie funkcji celu przez minimalizację sumy kwadratów błędów dla wszystkich kroków obliczeniowych otrzymuje się relację:

$$Q = \sum_{i=1}^k (W_{o,i} - W_{m,i})^2 = B^T B \Rightarrow \text{minimum.} \quad (7)$$

W celu możliwie dobrego dopasowania należy znaleźć wektor parametrów spełniający to równanie (7)

$$W_m = f(P_1, P_2, \dots, P_n). \quad (8)$$

Wymaganie dopasowania modelu do warunków realnych prowadzi do zależności:

$$Q = \sum_{i=1}^k \left[ W_{o,i} - W_{m,i} + \sum_{j=1}^n \left. \frac{\partial W_{m,i}}{\partial P_j} \right|_{P_0} \Delta P_j \right]^2 \Rightarrow \text{minimum.} \quad (9)$$

### 2.3. Kryterium wrażliwości

Optymalizacja identyfikacji parametrów schematów zastępczych według kryterium wrażliwości polega na określeniu dla każdego punktu pracy dominancji identyfikowanych parametrów. Algorytm obliczeń powinien przewidywać, dla każdego kroku obliczeniowego, które parametry mają większy lub mniejszy wpływ na określoną powyżej funkcję celu, przy jednoczesnym uzyskaniu zbieżności funkcji. Przy przejściu z przyrostów różniczkowych do różnicowych otrzymuje się:

$$\frac{\partial W_{m,i}}{\partial P_j} = \frac{\Delta W_{m,i}}{\Delta P_j} \quad (10)$$

co w konsekwencji powoduje zastąpienie przyrostu funkcji  $W_m$  w punkcie  $P_0$  przez odcinek prostej łączącej punkty  $P_0$  oraz  $P_1$ . Po otrzymaniu wartości funkcji  $W_{m,i}(P_0)$  oraz  $W_{m,i}(P_1)$  możliwe jest oszacowanie funkcji celu

$$\Delta Q = \sum_{i=1}^k \left[ W_{m,i}(P_0) - W_{m,i}(P_1) \right]^2 \cdot \Delta P_j. \quad (11)$$

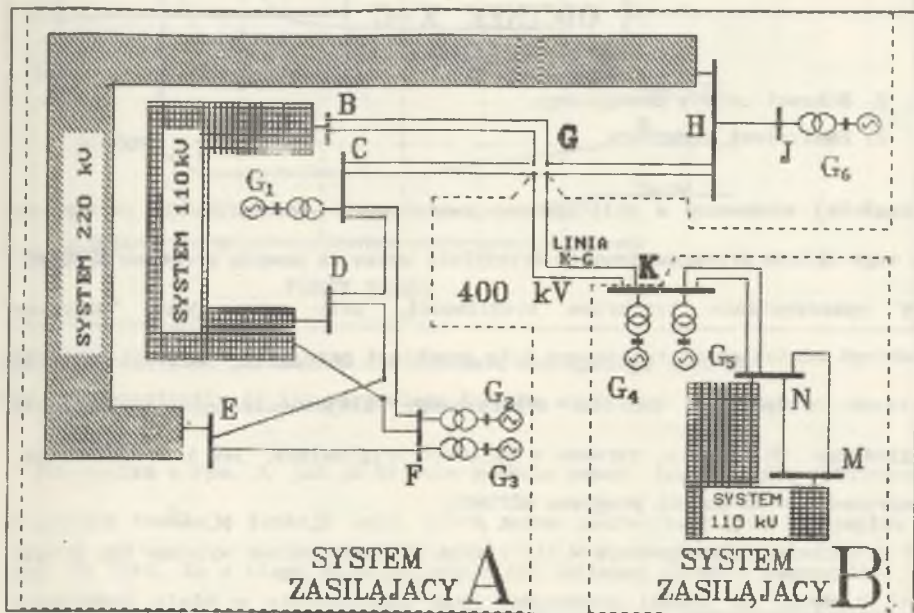
Sortując wielkości  $\Delta Q_1 \dots \Delta Q_n$  według zmniejszającej się wartości otrzymuje się kolejność dominujących parametrów dla każdego kroku obliczeniowego.

Skuteczność przeprowadzanej identyfikacji parametrów dla układu zredukowanego zależna jest od następujących czynników:

- wartości początkowej parametrów,
- długości kroku obliczeniowego,
- funkcji celu tj. ilości względnych minimów,
- struktury przyjętego modelu,
- liczby parametrów.

### 3. Dyskusja przebiegu identyfikacji dla prostego układu zastępczego

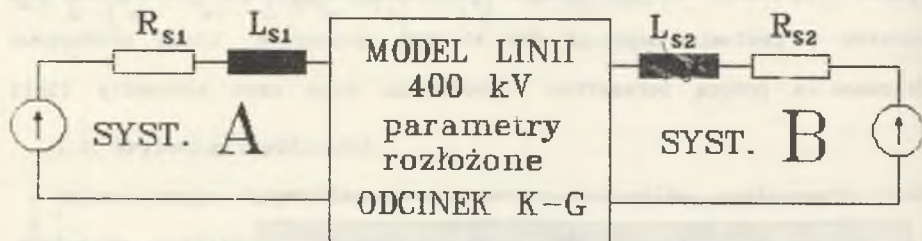
Układ oryginalny, którego schemat pokazano na rys. 1, odwzorowano dla elementów o poziomie napięcia 400 kV bez uproszczeń. Linie przesyłowe modelowano za pomocą parametrów rozłożonych, przy czym parametry linii



Rys. 1. Schemat badanego układu oryginalnego

Fig. 1. Original system configuration

obliczono na podstawie wymiarów geometrycznych przewodów oraz konstrukcji nośnych. Rezultaty obliczeń porównywane były dla układu zredukowanego oraz oryginalnego, przy czym redukcja dotyczyła systemów zasilających A oraz B, natomiast linia przesyłowa dwutorowa K-G odwzorowywana była bez zmian. Linia ta, przyłączona z jednej strony do szyn K, w punkcie G zostaje rozdzielona do dwóch odrębnych linii przesyłowych: jeden tor dołączony zostaje do linii G-H, drugi zaś do linii G-C. Punkt G wybrany został jako sztuczny punkt stanowiący szyny zastępczego systemu A, który był następnie redukowany. Układ zredukowany pokazany na rys. 2, pomimo ogromnej prostoty, jest aktualnie



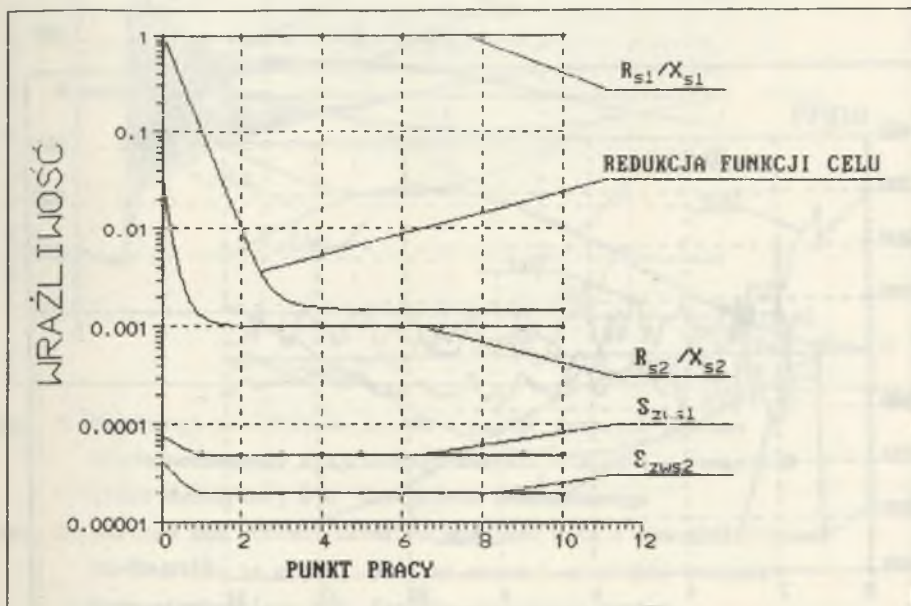
Rys. 2. Schemat układu zastępczego

Fig. 2. Equivalent structure

najczęściej stosowany w obliczeniach zwarciovych. Identyfikację parametrów dla tego układu przeprowadzono w dziedzinie czasu za pomocą programu **NETOMAC**, przy wykorzystaniu kryterium wrażliwości, przy czym jako "wzorcowe przebiegi odniesienia" traktowane były przebiegi przejściowe prądu i napięcia w fazie A podczas zwarcia trójfazowego niejednoczesnego w układzie oryginalnym. Obliczenia, zarówno w układzie oryginalnym, jak i zredukowanym, przeprowadzono za pomocą programu **NETOMAC**.

W przykładzie analizowanym w niniejszym artykule celowo wybrano tak prosty model z uwagi na niemal powszechne jego zastosowanie w wielu rozprawach naukowych, przy jednocześnie bardzo dociekliwych rozważaniach dotyczących dokładności modelu badanego obiektu. Dla modelu tego, pokazanego na rys. 2,

składającego się ze źródła napięcia, rezystancji  $R_s$  oraz indukcyjności  $L_s$ , identyfikacja polegała na poszukiwaniu optymalnych parametrów  $R_s$  i  $L_s$ . Wartości początkowe tych parametrów określone były na podstawie oszacowanych mocy zwarciovych systemów zastępczych A i B oraz wielkości  $R/X$  dla każdego systemu. Z tego powodu, jak również z uwagi na fakt częstego występowania w literaturze analiz porównawczych wyników obliczeń dla różnych  $S_{zw}$  oraz  $R/X$ , wykresy na rys. 3 przedstawiono w odniesieniu do tych pierwotnie oszacowanych wielkości.

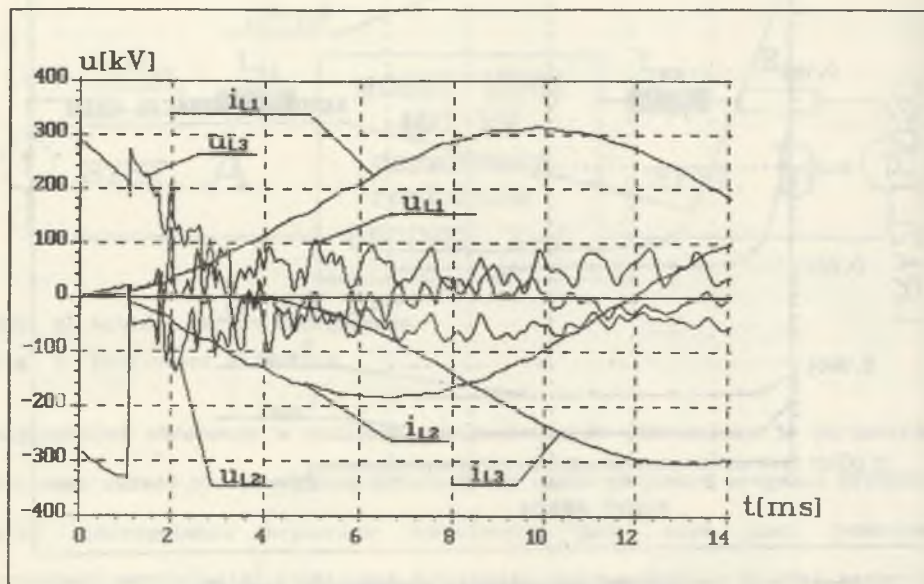


Rys. 3. Wrażliwość parametrów dla schematu zastępczego typu RL

Fig. 3. Sensitivity of the parameters for the equivalent RL system

Jak wynika z rys. 3, już po trzecim punkcie pracy (powtórzeniu obliczeń) osiągnięto redukcję funkcji celu, którą można potraktować jako optymalną z uwagi na fakt, że w ciągu dalszych powtórzeń obliczeń (kroków identyfikacji) redukcja funkcji celu następuje znacznie wolniej niż na początku procesu identyfikacji - funkcja celu osiągnęła praktycznie swoje minimum.

Osiągnięcie identyczności przebiegów prądowych w układzie oryginalnym oraz zredukowanym już po 2 - 3 iteracjach może prowadzić do błędnego wniosku, że tak prosty schemat zredukowany może, po odpowiedniej identyfikacji parametrów, w skuteczny sposób zastępować złożony układ oryginalny. W przebiegach prądowych, w przeciwieństwie do napięciowych, nie występują (lub mają bardzo małą amplitudę) składowe oscylacyjne wyższych częstotliwości, bardzo trudne do identyfikacji. Porównując wykresy prądów oraz napięć w układzie oryginalnym (rys.4) oraz zredukowanym (rys.5) można zauważyć,



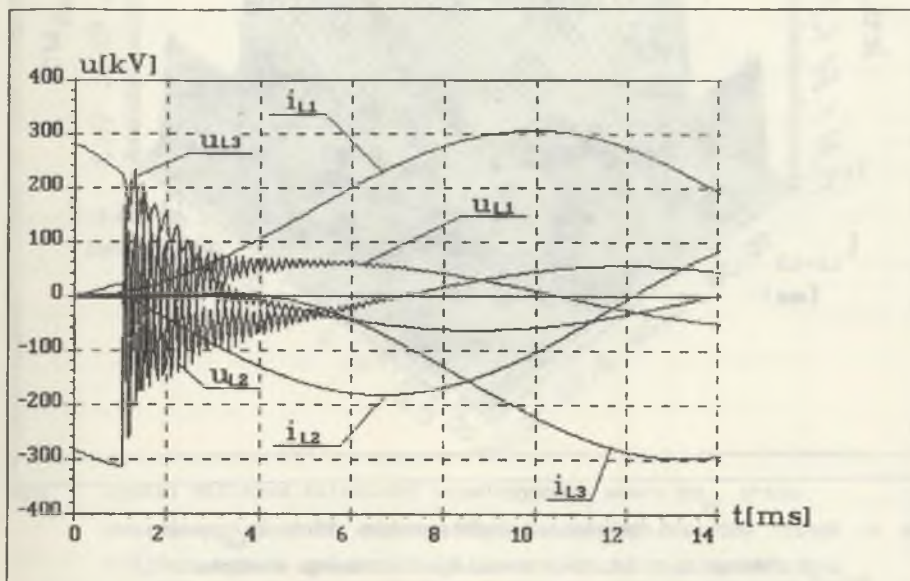
Rys. 4. Przebiegi przejściowe prądów i napięć fazowych podczas niejednoczesnego trójfazowego zwarcia z ziemią w punkcie G linii dwutorowej K-G, dla układu oryginalnego

Fig. 4. Voltage and current waveform obtained with a non-simultaneous three-phase to ground fault at point G of double circuit transmission line K-G, for the full system



że pomimo identycznych przebiegów prądowych, przebiegi napięciowe różnią się znacznie ilościowo oraz jakościowo.

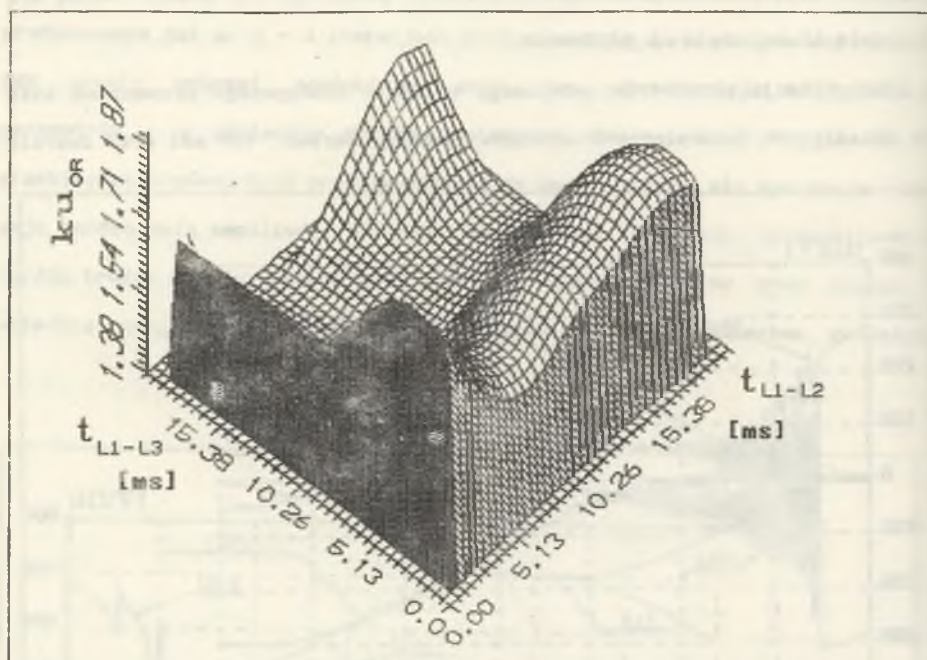
Identyfikacja parametrów omawianego schematu zastępczego prowadzona była dla określonych, niezmiennych warunków: jednego okresu (20 ms) oraz zwarcia



Rys. 5. Przebiegi przejściowe prądów i napięć fazowych podczas niejednoczesnego trójfazowego zwarcia z ziemią w punkcie G linii dwutorowej K-G, dla układu zredukowanego

Fig. 5. Voltage and current waveform obtained with a non-simultaneous three-phase to ground fault at point G of double circuit transmission line K-G, for the equivalent system

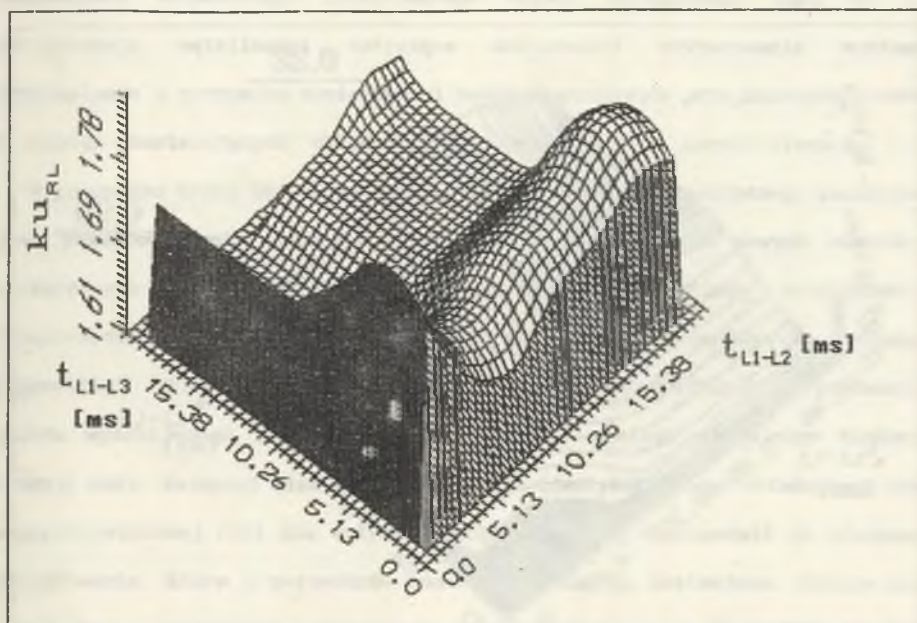
trójfazowego przy stałych wartościach początkowych. W celu weryfikacji uzyskanego układu przeprowadzono dodatkowe obliczenia dla szerszego zakresu danych. Dla układu rzeczywistego oraz zredukowanego obliczano współczynnik  $k_u$  określony przez stosunek prądu szczytowego do amplitudy składowej okresowej w chwili zwarcia, podczas niejednoczesnego zwarcia trójfazowego z ziemią dla zmieniających się czasów opóźnienia zwierania poszczególnych faz. Wyniki obliczeń dla układu oryginalnego (rys.6) oraz zredukowanego (rys.7) są



Rys. 6. Wyniki obliczeń zależności współczynnika uderu  $k_{u_{OR}}$  prądu zwarciovego fazy L1, podczas niejednoczesnego zwarcia trójfazowego, w zależności od czasu opóźnienia zwierania  $t_{L1-L2}$  i  $t_{L1-L3}$ , dla układu oryginalnego

Fig. 6. Factor  $k_{u_{OR}}$  for the peak current for phase L1 in non-simultaneous three phase faults for various time differences  $t_{L1-L2}$  and  $t_{L1-L3}$  for the full system

identyczne tylko dla niektórych zakresów - czasów opóźnień  $t_{L1-L2}$  oraz  $t_{L1-L3}$ . Dla niektórych zakresów różnica wartości  $k_{u_{RL}}$  (dla układu zredukowanego) oraz  $k_{u_{OR}}$  (dla układu oryginalnego) wynosi nawet 0.22 (rys.8). Zastosowanie tak prostego schematu zredukowanego, zastępującego złożony układ oryginalny do obliczeń zwarciovych, może być ryzykowne - pomimo prawidłowo zidentyfikowanych parametrów dla określonych warunków początkowych, występować będą znaczne błędy obliczeń dla innych zakresów obliczeń.

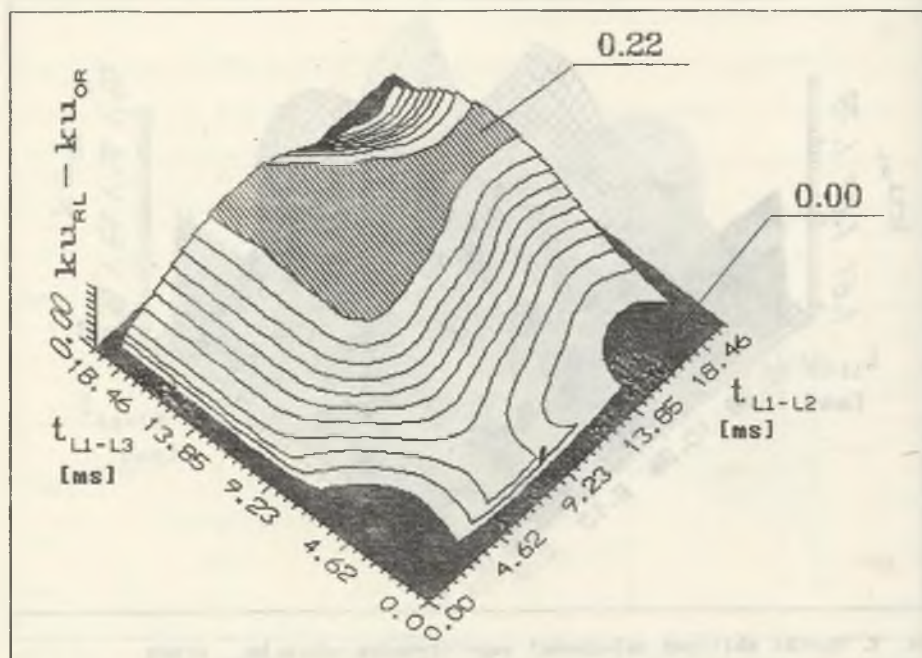


Rys. 7. Wyniki obliczeń zależności współczynnika udaru  $k_{u_{RL}}$  prądu zwarciowej fazy L1, podczas niejednoczesnego zwarcia trójfazowego, w zależności od czasu opóźnienia zwierania  $t_{L1-L2}$   $t_{L1-L3}$ , dla układu zredukowanego

Fig. 7. Factor  $k_{u_{RL}}$  for the peak current of phase L1 in non-simultaneous three phase faults for various time differences  $t_{L1-L2}$  and  $t_{L1-L3}$  and the equivalent system

#### 4. WNIOSKI I UWAGI KOŃCOWE

Jednym z głównych zadań systemów ekspertowych w elektroenergetyce jest diagnoza zakłóceń w sieci. Zjawiska przejściowe występujące zawsze podczas zakłóceń zwarciowych utrudniają analizę stanu układu. Konieczność dogłębnego poznania tych zjawisk powoduje powstawanie nowszych modeli elementów układu oraz konstrukcję nowych programów komputerowych - użytkowych. Dla obliczeń projektowych lub przeprowadzenia szybkiej diagnozy układu podczas zakłóceń złożoność struktury badanej sieci odgrywa istotną rolę, zarówno z uwagi na



Rys. 8. Porównanie współczynników udaru dla układów oryginalnego  $ku_{OR}$  i zredukowanego  $ku_{RL}$ .

Fig. 8. Comparison of the factors for full system  $ku_{OR}$  and equivalent one  $ku_{RL}$ .

żmudność, jak i czas prowadzonych analiz.

Dla systemów, w których mają być prowadzone badania stanów przejściowych, brak jest uogólnionego kryterium, na podstawie którego można by z góry określić strukturę zredukowanego schematu zastępczego. Dopiero po przeprowadzeniu procesu identyfikacji oraz porównaniu przebiegów z rzeczywistymi można ocenić wybrany układ zredukowany. W przypadku gdy wybrana struktura nie spełnia wymagań dokładności odwzorowania przebiegów w układzie oryginalnym, należy zmienić układ zastępczy, a następnie przeprowadzić kolejną identyfikację parametrów nowego układu.

Wyniki obliczeń zaprezentowane powyżej, dla wybranego prostego, aczkolwiek

powszechnie stosowanego zredukowanego układu zastępczego typu R, L, potwierdzają wątpliwości dotyczące dokładności odwzorowania systemu oryginalnego w przypadku konieczności badania przebiegów przejściowych prądów i napięć zawierających składowe swobodne wyższych częstotliwości.

W przypadku braku możliwości zmiany struktury układu zastępczego konieczne jest przeprowadzenie ponownej identyfikacji po przyjęciu nowych wartości początkowych parametrów oraz zastosowaniu kryterium wrażliwości. Przeprowadzenie ponownej identyfikacji dla nowych początkowych wartości parametrów układu zastępczego pozwoli uniknąć niedokładnego dopasowania układu wynikającego z osiągnięcia względnego, zamiast globalnego minimum funkcji celu. Wartości niektórych parametrów identyfikowanego układu mogą nie odgrywać większej roli dla małych sygnałów, co może doprowadzić do błędnego przyjmowania, które z parametrów badanego układu są dominujące. Wydaje się zatem celowe określanie dominancji parametrów dopiero na podstawie ich wrażliwości określonej podczas identyfikacji. W porównaniu jednak do głównych czynników wpływających na optymalną strukturę oraz wartości parametrów, takich jak: rodzaj i miejsce zakłócenia, struktura i rodzaj układu oryginalnego, sposób opisu matematycznego modelu zastępczego oraz założony czas identyfikacji, znacznie mniejszą rolę odgrywają: wartości początkowe parametrów i liczba punktów pracy - powtórzeń obliczeń.

Badania stanów nieustalonych w liniach w.n. podczas zakłóceń niejednoczesnych można przeprowadzać w układach zredukowanych, przy czym redukcja nie może dotyczyć linii odwzorowywanych za pomocą parametrów rozłożonych.

## LITERATURA

- [1] Sowa P.: Modelowanie linii przesyłowych w.n. w badaniach numerycznych stanów zakłóceńowych w układzie elektroenergetycznym, ZN Pol. Śl. serii Elektryka, z.116, Gliwice 1991, s.96-109.
- [2] Kulicke B.: Simulationsprogramm NETOMAC: Differenzleitwertverfahren bei kontinuierlichen und discontinuierlichen Systemen. Siemens Forsch. und Entw. Ber. Bd.10, 1981, nr 5, s.299-302.
- [3] Sowa P.: Computation of electro-magnetic transients in transmission network equivalent models AMSE, Modelling, Simulation & Control, A, Vol. 34, nr 4, 1991, s.57-63.

Recenzent: prof. dr hab. inż. Zbigniew Kowalski

Wpłynęło do redakcji dnia 27 stycznia 1992 r.

## SENSITIVITY OF PARAMETERS BY IDENTIFICATION OF TRANSIENT SYSTEMS

## A b s t r a c t

Fault transients for the original network of figure 1 were calculated. The results which follow apply to both pre- and post-fault variations of voltage and current at the sending end of the line K - G for the reduced and the full network representation. The full system was reduced to the equivalent with the simple structures of the systems A and B (fig.2) but the transmission line was represented by its transient model for both cases. The program Netomac has been developed for parameter identification of the network equivalent in time domain. The identification method with the sensitivity criterion provides optimal parameters for the equivalent system. The comparison of voltage and current by non-simultaneous three phase to ground fault calculated with the full representation (fig.3) and that calculated

with the equivalent models (fig.4) shows that the developed model gives a good current results. However the voltage transients in developed equivalent and original networks are not similar. The parameter identification and reduction of network system must be used for any separate case, because with this reduction is not possible the generalize equivalents for all cases. The faktor  $k_u$  used in this paper can be defined by ratio of the maximum possible peak of non-simultaneous short-circuit current to the peak value of the a.c. component of three phase fault currents. The calculation for the full (fig.6) and equivalent (fig.7) system has been made with the varying current initiations  $t_{L1}$  and  $t_{L2}$ , from the beginning of the L1-phase fault to the second and third phases (L2 or L3) in the range of 0...20 ms. The comparison of the results for the both cases shows (fig.8) that in this simply equivalent system can appear significant errors.