

BARTOSZ ROZEGNAŁ*

ZASTOSOWANIE TRANSFORMACJI FALKOWEJ DO WYKRYWANIA ZWARĆ W LINII DWUSTRONNIE ZASILANEJ CZ. I – OKREŚLENIE BAZY DANYCH WZORCÓW TRANSFORMACJI FALKOWEJ

SHORT CIRCUITS DETECTION IN DOUBLE SOURCED ELECTRICAL LINES PART I – DWT DATABASE PREPARATION

Streszczenie

W artykule przedstawiono próbę wykorzystania transformacji falkowych do wykrywania zwarcia w elektroenergetycznej linii przesyłowej dwustronnie zasilanej. Część I jest poświęcona utworzeniu bazy danych wzorców dla takich transformacji na podstawie wyników symulacji dynamicznego modelu matematycznego linii dwustronnie zasilanej. W celu wyboru tego modelu dokonano porównania dwóch odwzorowań o różnym stopniu uproszczenia opisu linii przesyłowej. W modelu bardziej rozbudowanym wykorzystano wieloczwórnikową reprezentację linii, a w modelu uproszczonym reprezentację dwuczwórnikową, z podziałem wyznaczonym przez miejsce zwarcia. Wyniki obliczeń różnych rodzajów zwarć w stanie ustalonym wykazały wystarczającą adekwatność modelu dwuczwórnikowego. Wyniki tych symulacji wykorzystano do utworzenia baz danych zawierających informacje niezbędne dla analizy falkowej.

Słowa kluczowe: zwarcia w linii elektroenergetycznej, modele linii dwustronnie zasilanej, bazy danych procesów zwarciovych

Abstract

This paper presents an attempt to detect short circuits in double sourced electrical lines by discrete wavelet transform. First part of this talk describes a database preparation which is created by dynamic simulation base on model of double sourced transmission line. In order to choose the right model a comparison of two different represent of line has been made. In first one, transmission line is represented by two four-poles, and the second one is represented by n-four-poles. Steady state's analyses of different kinds of short-cuts show that two four-poles model line with acceptable precision. Simulation's results for all kinds of short-cuts create a vast database. The database can be used to project detection algorism based on discrete wavelet transformation.

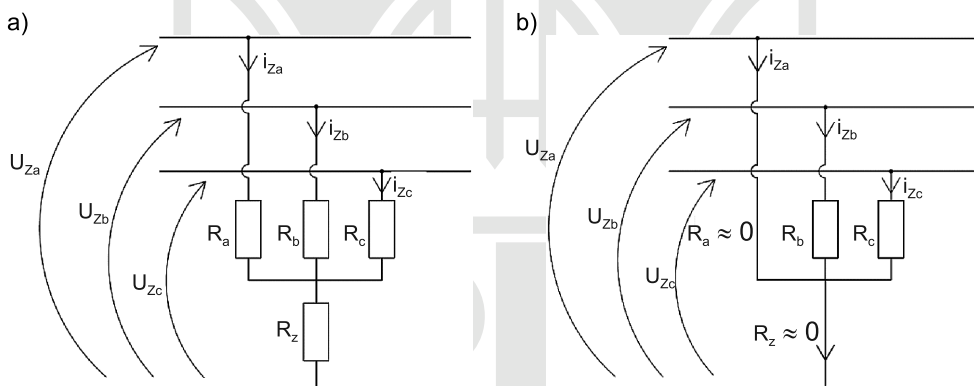
Keywords: short circuits in transmission line, models of double sourced transmission line, data bases of short circuit performances

* Mgr inż. Bartosz Rozegnał Instytut Elektromechanicznych Przemian Energii, Wydział Inżynierii Elektrycznej i Komputerowej, Politechnika Krakowska.

1. Wstęp

Modelowanie złożonych obiektów, w tym również systemów elektroenergetycznych, wymaga kompromisu między dokładnością odwzorowania ich cech a złożonością obliczeniową przekładającą się na koszty i czas pozyskiwania danych. Jest to szczególnie ważne przy wprowadzaniu do praktyki inżynierskiej nowych technik informatycznych dla monitorowania i diagnostyki układów. Systemy elektroenergetyczne są dobrym przykładem takiego typu obiektu, gdyż mają bardzo złożoną strukturę. Ich analiza nawet w stanach normalnej pracy wymaga uproszczeń i odpowiedniego zbilansowania dokładności wraz ze stopniem skomplikowania opisu matematycznego.

Podjęty w pracy problem wykorzystania transformacji falukowych dla wykrywania zwarć w systemie elektroenergetycznym, sprowadzony do wykrywania zwarć w liniach przesyłowych łączących dwa węzły systemu, wymaga także takiego kompromisu. Efektywność wykrywania zwarć z użyciem transformacji falukowych wiąże się z ciągłym monitorowaniem prądów układu przesyłowego i porównywaniem ich z wzorcami, które praktycznie można uzyskać jedynie w wyniku matematycznego modelowania stanów zwarciovych w linii. Tworzenie tych wzorców na podstawie zdarzeń na rzeczywistym obiekcie jest bowiem nieakceptowalne.



Rys. 1. Model modułu zwarciovego w przypadku: a) bezawaryjnej pracy układu, b) zwarcia fazy L1 z ziemią

Fig. 1. Model of short circuit module: a) failure-free proces, b) single phase short circuit

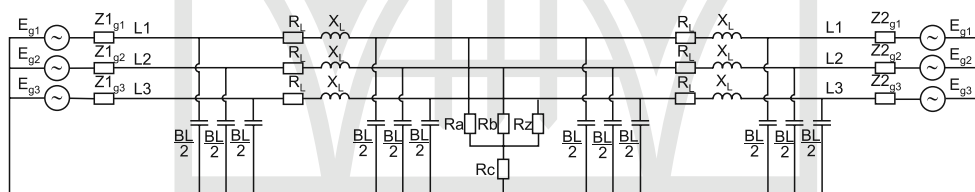
W celu wyboru modelu linii dwustronnie zasilanej dla potrzeb kreowania wzorców dla transformacji falukowych, w pracy porównano dwa modele matematyczne linii o różnym stopniu złożoności. Model bardziej rozbudowany bazuje na reprezentacji odcinka linii o założonej równej długości przez czwórnik typu π , przyjmowany powszechnie dla linii wysokich napięć. Pominięto w nim jedynie konduktancje poprzeczne. Linia przesyłowa jest wówczas modelowana jako szeregowe połączenie n czwórników. Pozwala to modelować zawarcia w linii w odległościach wynikających z założonej długości odcinka linii reprezentowanego przez elementarny czwórnik. Model uproszczony zakłada, że linia przesyłowa jest odwzorowana przez dwa czworniki: jeden reprezentujący odcinek linii od jednego z punktów wę-

złowych do miejsca zwarcia oraz drugi reprezentujący odcinek linii od miejsca zwarcia do drugiego punktu węzłowego. Zarówno w jednym, jak i drugim przypadku przez podział linii na określoną liczbę odcinków dokonano dyskretyzacji równań falowych w przypadku, których liczba odcinków n dążyłaby do nieskończoności. Zwarcie w linii jest modelowane przez dołączenie tzw. modułu zwarciego w punkcie zwarcia. Na rys. 1 przedstawiono schemat modułu zwarciego utworzonego z połączonych w gwiazdę rezystancji o odpowiednio dobranych wartościach.

Zwarcie jest modelowane przez zmianę wartości odpowiednich rezystancji, co przykładowo pokazano na rys. 1b. Jest to tzw. parametryczne modelowanie zwarc [1, 3]. Takie podejście pozwala na modelowanie zwarc metalicznych.

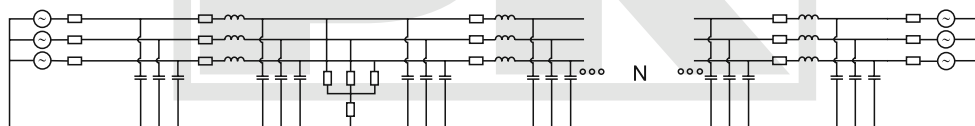
2. Modele linii o różnym stopniu złożoności w stanie ustalonym

Porównania modeli dokonano na podstawie analizy stanu ustalonego dla wszystkich możliwych typów zwarc metalicznych w liniach napowietrznych najwyższych napięć pracujących z uziemionymi punktami gwiazdowymi. Schematy zastępcze obrazujące wybrane modele: model dwuczwórnikowy oraz n -czwórnikowy zostały umieszczone odpowiednio na rys. 2 i 3 [1].



Rys. 2. Dwuczwórnikowy model linii trójfazowej dwustronnie zasilanej z modulem zwarczym

Fig. 2. Scheme of double-sourced electrical line (transmission line) consisted of 2 two-port networks



Rys. 3. Schemat linii dwustronnie zasilanej zbudowanej z N łańcuchowo połączonych ze sobą czwórników

Fig. 3. Scheme of double-sourced electrical line (transmission line) consisted of N two-port networks

Do analizy zastosowano składowe symetryczne określone przez macierz przejścia S :

$$\mathbf{S} = \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \quad (1)$$

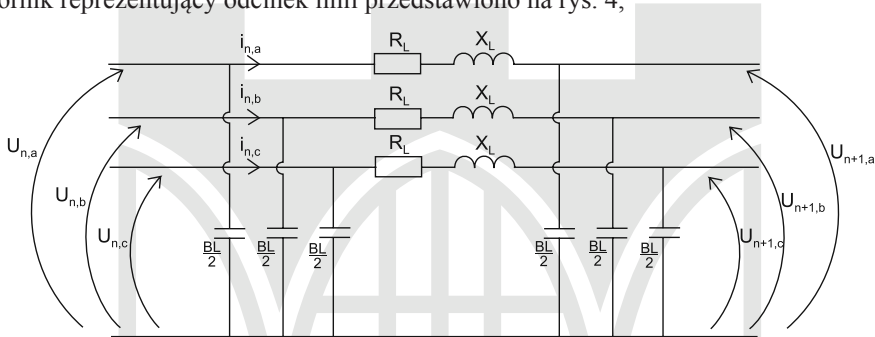
zgodnie z definicjami [3]:

$$\mathbf{U}^s = \mathbf{S} \cdot \mathbf{U}_p \quad \mathbf{I}^s = \mathbf{S} \cdot \mathbf{I}_f \quad (2)$$

Umożliwiło to modelowania całej sieci elektroenergetycznej w punktach węzłowych przez symetryczne napięcia źródłowe reprezentowane jedynie przez składową zgodną oraz impedancje wewnętrzne dla składowych zerowej, zgodnej i przeciwnej o różnych wartościach.

$$\begin{bmatrix} 0 \\ E_g^1 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_g^0 & 0 & 0 \\ 0 & Z_g^1 & 0 \\ 0 & 0 & Z_g^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_g^0 \\ I_g^1 \\ I_g^2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} U^0 \\ U^1 \\ U^2 \end{bmatrix} \quad (3)$$

Czwórnik reprezentujący odcinek linii przedstawiono na rys. 4,



Rys. 4. Schemat trójfazowej linii elektroenergetycznej

Fig. 4. Scheme of three phase electrical line (transmission line)

a jego równania w składowych symetrycznych mają postać:

$$\begin{bmatrix} U_n^0 \\ U_n^1 \\ U_n^2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_l^0 & 0 & 0 \\ 0 & Z_l^0 & 0 \\ 0 & 0 & Z_l^0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{n,l}^0 \\ I_{n,l}^1 \\ I_{n,l}^2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} U_{n+1}^0 \\ U_{n+1}^1 \\ U_{n+1}^2 \end{bmatrix} \quad (4)$$

gdzie:

$$Z_l^0 = l(R_0 + jX_0)$$

$$\begin{bmatrix} U_n^0 \\ U_n^1 \\ U_n^2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_c^0 & 0 & 0 \\ 0 & Z_c^0 & 0 \\ 0 & 0 & Z_c^0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{n,c}^0 \\ I_{n,c}^1 \\ I_{n,c}^2 \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$\begin{bmatrix} U_{n+1}^0 \\ U_{n+1}^1 \\ U_{n+1}^2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_c^0 & 0 & 0 \\ 0 & Z_c^0 & 0 \\ 0 & 0 & Z_c^0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{n+1,c}^0 \\ I_{n+1,c}^1 \\ I_{n+1,c}^2 \end{bmatrix} \quad (6)$$

gdzie:

$$Z_c^0 = \frac{2}{j(l \cdot B_0)}$$

Moduł zwarcia pokazany na rys. 1 jest opisywany w składowych symetrycznych macierzą [1, 3]:

$$\begin{bmatrix} U_n^0 \\ U_n^1 \\ U_n^2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 3R_z + R^0 & R^2 & R^1 \\ R^1 & R^0 & R^2 \\ R^2 & R^1 & R^0 \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$\begin{bmatrix} R^0 \\ R^1 \\ R^2 \end{bmatrix} = \mathbf{S} \cdot \begin{bmatrix} R_a & 0 & 0 \\ 0 & R_b & 0 \\ 0 & 0 & R_c \end{bmatrix} \cdot \mathbf{S}^{-1} \quad (8)$$

Wykorzystując zależności (1–8), model dwuczownikowy przedstawiony na rys. 2 odwzorowano układem równań węzłowych składającym się z opisu matematycznego węzłów generatorowych, dwóch odcinków linii oraz modułu zwarcia. Efektem czego jest poniższa zależność charakteryzująca trzy napięcia węzłowe występujące w omawianym schemacie:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{Y}_{G1} + \mathbf{Y}_{C1} + \mathbf{Y}_{L1} & & & & & & & \\ & -\mathbf{Y}_{L1} & & & & & & \\ & & \mathbf{Y}_{L1} + \mathbf{Y}_{C1} + \mathbf{Y}_Z + \mathbf{Y}_{C2} + \mathbf{Y}_{L2} & & & & & \\ & & & -\mathbf{Y}_{L2} & & & & \\ & & & & -\mathbf{Y}_{L2} & & & \\ & & & & & \mathbf{Y}_{L2} + \mathbf{Y}_{C2} + \mathbf{Y}_{G2} & & \\ & & & & & & & \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} U_1 \\ U_2 \\ U_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{Y}_{G1} \cdot \mathbf{E}_1 \\ \mathbf{0} \\ \mathbf{Y}_{G2} \cdot \mathbf{E}_2 \end{bmatrix} \quad (9)$$

Natomiast opis matematyczny modelu linii n -czownikowej powstały w podobny sposób, jak w przypadku modelu dwuczownikowego w postaci hypermacierzowej dla $n+1$ napięć węzłowych przedstawiają następujące równania:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{Y}_{G1} \mathbf{E}_1 \\ \mathbf{0} \\ \vdots \\ \mathbf{0} \\ \vdots \\ \mathbf{0} \\ \mathbf{Y}_{G2} \mathbf{E}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{Y}_{11} + \mathbf{Y}_{G1} & \mathbf{Y}_{12} & \cdots & \mathbf{Y}_{1i} & \cdots & \mathbf{Y}_{1,n} & \mathbf{Y}_{1,n+1} \\ \mathbf{Y}_{21} & \mathbf{Y}_{22} & \cdots & \mathbf{Y}_{2i} & \cdots & \mathbf{Y}_{2,n} & \mathbf{Y}_{2,n+1} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ \mathbf{Y}_{i,1} & \mathbf{Y}_{i,2} & \cdots & \mathbf{Y}_{i,i} + \mathbf{Y}_Z & \cdots & \mathbf{Y}_{i,n} & \mathbf{Y}_{i,n+1} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ \mathbf{Y}_{n,1} & \mathbf{Y}_{n,2} & \cdots & \mathbf{Y}_{n,i} & \cdots & \mathbf{Y}_{n,n} & \mathbf{Y}_{n,n+1} \\ \mathbf{Y}_{n+1,1} & \mathbf{Y}_{n+1,2} & \cdots & \mathbf{Y}_{n+1,i} & \cdots & \mathbf{Y}_{n+1,n} & \mathbf{Y}_{n+1,n+1} + \mathbf{Y}_{G2} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} U_1 \\ U_2 \\ \vdots \\ U_Z \\ \vdots \\ U_n \\ U_{n+1} \end{bmatrix} \quad (10)$$

gdzie:

- zarówno w zależności (9) jak i (10) wszystkie admitancje są macierzami o rozmiarze 3×3 ,
 - wektory składowych symetrycznych napięć źródłowych w węzłach,
- $\mathbf{E}_1, \mathbf{E}_2$

- Y_{G1}, Y_{G2} – macierze admitancyjne generatorów wynikające z (3),
 Y_Z – macierz admitancyjna modułu zwarciowego wynikająca z (7–8),
 Y_{L1}, Y_{L2} oraz Y_{C1}, Y_{C2} – macierze admitancyjne linii wynikające odpowiednio z (4) i (5–6), które w przypadku układu równań (10) zostały uogólnione przez zastosowanie $Y_{i,i}$ jako macierzy admitancji własnych oraz $Y_{i,j}$ jako macierzy admitancji wzajemnych.

Wpływ liczby czwórników wchodzących w skład linii na liczbę równań potrzebną do jej matematycznego opisu wyraża się zatem zależnością [1, 2]:

$$\text{Liczba równań} = 3(n + 1)$$

gdzie:

- n – liczba czwórników wchodzących w skład linii, stopień dyskretyzacji równań falowych.

3. Porównanie wyników obliczeń obu modeli

Porównania dokonano na podstawie wyników symulacji stanów ustalonych procesu zwarciowego obu modeli: modelu dwuczwórnikowego oraz n -czwórnikowego. Wyniki wszystkich symulacji zostały podane w jednostkach względnych. Odniesiono je do:

- napięcia znamionowego linii U_N ,
- impedancji znamionowej linii Z_l wynikającej z poniższego wzoru:

$$Z_l = l_c \cdot |Z_{0l}|$$

gdzie:

- Z_{0l} – impedancja jednego kilometra linii reprezentowanego przez czwórnik typu π ,
- l_c – długość całej linii.

Jako prąd odniesienia I_0 przyjęto wartość symetrycznego trójfazowego prądu zwarcia na wyjściu generatora G1, które wystąpiło dokładnie na końcu linii i w przybliżeniu obliczono z zależności:

$$I_0 = \frac{U_N}{\sqrt{3}Z_l}$$

Założone parametry symulacyjne w jednostkach względnych:

Jako źródła zasilania zarówno na początku, jak i na końcu linii zastosowano symetryczne trójfazowe siły elektromotoryczne:

$$E1 = \begin{bmatrix} E1_{g1} \\ E1_{g2} \\ E1_{g3} \end{bmatrix} = \frac{1}{\sqrt{3}} \begin{bmatrix} 1 \\ e^{j240^\circ} \\ e^{j120^\circ} \end{bmatrix}$$

$$E2 = \begin{bmatrix} E2_{g1} \\ E2_{g2} \\ E2_{g3} \end{bmatrix} = \frac{1}{\sqrt{3}} \begin{bmatrix} 1 \\ e^{j240^\circ} \\ e^{j120^\circ} \end{bmatrix}$$

Parametry generatorów w składowych symetrycznych:

Dla generatora $G1$:

$$Z_{G1}^1 = (1,8 + j36,5) / l_C$$

$$Z_{G1}^2 = (0,7 + j7,3) / l_C$$

$$Z_{G1}^0 = (0,3 + j2,9) / l_C$$

Dla generatora $G2$:

$$Z_{G2}^1 = (2,7 + j54,8) / l_C$$

$$Z_{G2}^2 = (1,1 + j11,0) / l_C$$

$$Z_{G2}^0 = (0,4 + j4,4) / l_C$$

Parametry jednostkowe linii:

Rezystancja jednostkowa linii

$$R_0 = 0,1 / l_C \text{ [1/km]}$$

Reaktancja jednostkowa linii

$$X_0 = 1,0 / l_C \text{ [1/km]}$$

Susceptancja jednostkowa linii

$$B_0 = 111,1 \cdot 10^{-8} \cdot l_C \text{ [km]}$$

Przy czym parametry czwórników w modelu dwuczwórnikowym są liczone według następujących zależności:

Parametry pierwszego odcinka linii (l_1):

$$\text{Rezystancja odcinka } l_1 \quad R_{l1} = R_0 \cdot l_1 = 0,1 \frac{l_1}{l_C}$$

$$\text{Reaktancja odcinka } l_1 \quad X_{l1} = X_0 \cdot l_1 = 1,0 \frac{l_1}{l_C}$$

$$\text{Susceptancja odcinka } l_1 \quad B_{l1} = B_0 / l_1 = 111,1 \cdot 10^{-8} \frac{l_C}{l_1}$$

Parametry drugiego odcinka linii (l_2):

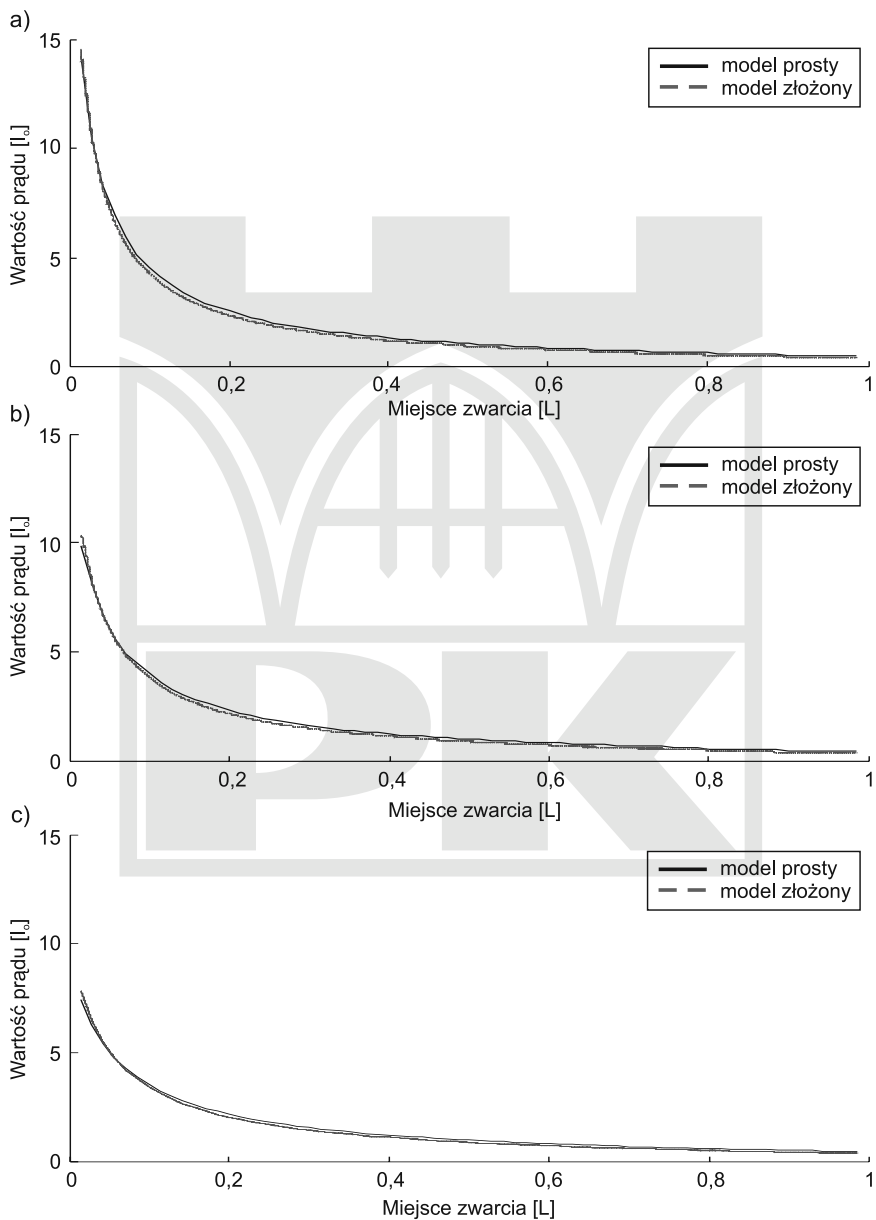
$$\text{Rezystancja odcinka } l_2 \quad R_{l2} = R_0 \cdot (l_C - l_1) = 0,1 \frac{(l_C - l_1)}{l_C}$$

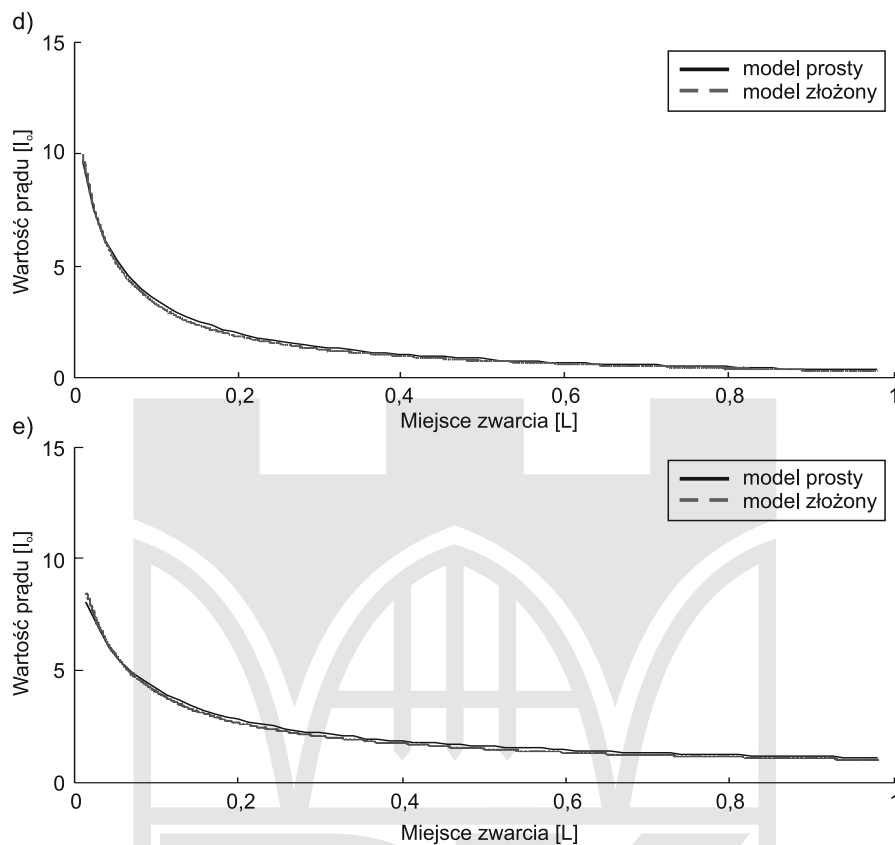
$$\text{Reaktancja odcinka } l_2 \quad X_{l2} = X_0 \cdot (l_C - l_1) = 1,0 \frac{(l_C - l_1)}{l_C}$$

Susceptancja odcinka l_2 $B_{l_2} = B_0 / (l_C - l_1) = 111,1 \cdot 10^{-8} \frac{l_C}{(l_C - l_1)}$

gdzie:

l_1 – miejsce wystąpienia zwarcia.





Rys. 5. Wykres porównawczy modeli linii NN przedstawiający wartość skuteczną prądu na wyjściu generatora $G1$ w fazie $L1$ w stanie ustalonym zwarcia: a) jednofazowego z ziemią ($L1$ z Ziemią), b) dwufazowego z ziemią ($L1-L2$ z Ziemią), c) trójfazowego z ziemią ($L1-L2-L3$ z Ziemią), d) dwufazowego bez ziemi ($L1-L2$ bez Ziemi), e) trójfazowego bez ziemi ($L1-L2-L3$ bez Ziemi)

Fig. 5. The comparative diagram of UHV lines' models showing $L1$ -phase's current: a) single phase to ground short circuit, b) two phase to ground short circuit, c) three phase to ground short circuit, d) two phase without ground short circuit, e) three phase without ground short circuit

Natomiast parametry czwórników w modelu n -czwórnikowym są liczone według następujących zależności:

Parametry pojedynczego czwórnika reprezentującego odcinek linii o długości $\frac{l_C}{n}$:

$$\text{Rezystancja odcinka } l_n \quad R_n = R_0 \cdot \frac{l_C}{n} = 0,1 \frac{1}{n}$$

$$\text{Reaktancja odcinka } l_n \quad X_n = X_0 \cdot \frac{l_C}{n} = 1,0 \frac{1}{n}$$

$$\text{Susceptancja odcinka } l_n \quad B_n = B_0 / \frac{l_C}{n} = 111,1 \cdot 10^{-8} \cdot n$$

W przypadku rezystancji R_a , R_b , R_c oraz R_z z rys. 1, będących parametrami modułu zwarcio-
wego przyjęto wartości:

- 10^6 w przypadku pracy bezawaryjnej,
- 10^{-6} w przypadku modelowania zwarcia.

Efektom rozwiązania równań (9) oraz (10) w oparciu o tak zestawione parametry są symulacje stanów ustalonych następujących rodzajów zwarć metalicznych:

- zwarcia jednofazowego z ziemią,
- zwarcia dwufazowego z ziemią,
- zwarcia trójfazowego z ziemią,
- zwarcia dwufazowe bez doziemienia,
- zwarcia trójfazowe bez doziemienia.

Za parametr n w równaniu (10) określający liczbę czwórników, na jaką została podzielona linia w modelu wieloczwórnikowym, przyjęto wartość równą 70. Umożliwiło to symulację miejsca wystąpienia zwarcia począwszy od początku linii ku jej końcowi z rozdzielczością

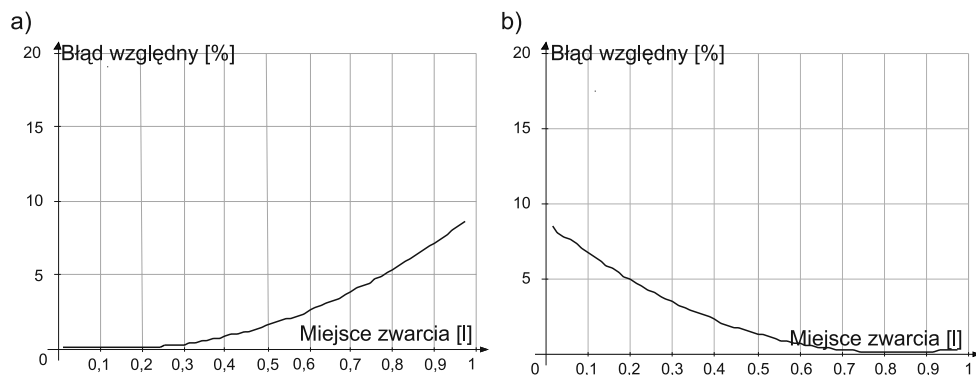
równą $\frac{l}{70}$. Równania opisujące układ dla takiej wartości n wciąż w znaczącym stopniu

odbiegają od równań falowych, natomiast dyskretyzują je z dużo większą rozdzielczością niż w przypadku modelu dwuczwórnikowego. Aby zachować zbieżność miejsc wystąpienia zwarcia w obu modelach, a tym samym wykluczyć niezgodności wynikające z różnicy tej wartości, w przypadku symulacji opartych na modelu dwuczwórnikowym zwarcie symulowano również z rozdzielczością $\frac{l}{70}$. Wyniki badań dla prądu fazy L1 zamieszczono

na rys. 5.

Analizując otrzymane wyniki, stwierdzono, że modele są zbieżne. Dużo mniejszym nakładem obliczeniowym otrzymano zadowalające rezultaty. Aby jednak pokazać, że istnieją pewne różnice w otrzymanych wartościach, należy przejść do analizy błędów modelu uproszczonego. Wymaga to jednak założenia, że model złożony to wzorzec, na podstawie którego otrzymane wyniki są zgodne z tymi odczytanymi za pomocą przyrządów pomiarowych na układzie rzeczywistym. Takie podejście pozwala potraktować każdą różnicę w wartości wyników uzyskanych na odwzorowaniu uproszczonym jako błąd. Daje to możliwość wyznaczenia wykresu przedstawiającego zmieniający się wraz z miejscem wystąpienia zwarcia uchyb powstały na skutek użycia modelu uproszczonego względem modelu złożonego, co zobrazowano na rys. 6.

Na podstawie przedstawionego porównania stwierdzono, że model dwuczwórnikowy jest wystarczająco dokładny dla obliczeń rozptyłu prądów w omawianym fragmencie układu przesyłowego. Symulacje stanów przejściowych zjawiska zwarcioowego niezbędne dla utworzenia baz danych dla analiz falkowych będą zatem bazowały na modelu uproszczonym.

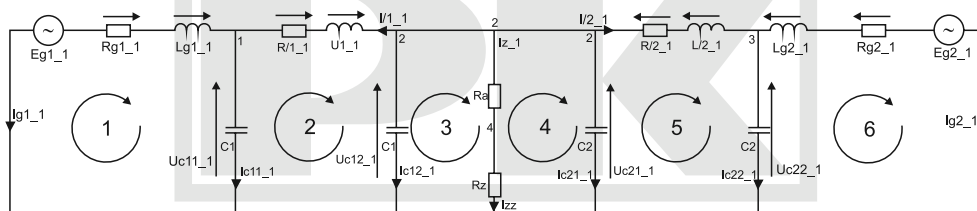


Rys. 6. Wykres wartości procentowej błędu względnego powstałego na skutek użycia uproszczonego modelu symulacyjnego dla zwarcia fazy $L1$ z Ziemią: a) prąd fazy $L1$ na wyjściu generatora $G1$, b) prąd fazy $L1$ na wyjściu generatora $G2$

Fig. 6. Approximation error caused by using two four-poles line's model: a) $G1$ generator's current, b) $G2$ generator's current

4. Model dynamiczny linii dwustronnie zasilanej

Jak pokazano we wcześniejszym rozdziale, dwuczwórnikowy model linii nie wprowadza znaczących błędów, jeśli chodzi o wartość skuteczną prądu zwarcia dla stanu ustalonego. Dlatego może stanowić podstawę do ułożenia równań stanów dynamicznych procesu zwarcia. Schemat fazy $L1$ wybranego modelu trójfazowego, na podstawie którego można zbudować bazę danych dla dyskretnej transformaty falkowej przedstawiono na rys. 7.



Rys. 7. Schemat fazy $L1$ układu z zaznaczonym rozplywem prądów oraz rozkładem napięć

Fig. 7. Scheme of single phase of model with current and voltage directions

W odróżnieniu do badań w stanach ustalonych model dynamiczny utworzono w składowych naturalnych. Ze względu na uproszczenie obliczeń przyjęto tym razem, że punkty zasilania są reprezentowane przez napięcia źródłowe oraz rezystancje i indukcyjności wynikające ze składowej zgodnej z poprzedniego badania. W tym wypadku zastosowano opis hybrydowy, przyjmując jako poszukiwane funkcje czasu prądy w indukcyjnościach oraz napięcia na kondensatorach. Pozwoliło to na zapisanie następującego układu równań [1, 3, 5]:

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} I_{G1} \\ I_{L1} \\ I_{L2} \\ I_{G2} \\ U_{C11} \\ U_{C12} \\ U_{C22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R_{G1}}{L_{G1}}E & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{L_{G1}}E & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{R_{L1}}{L_{L1}}E & 0 & 0 & -\frac{1}{L_{L1}}E & \frac{1}{L_{L1}}E & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{R_{L1}}{L_{L1}}E & 0 & 0 & \frac{1}{L_{L2}}E & -\frac{1}{L_{L2}}E \\ 0 & 0 & 0 & -\frac{R_{G2}}{L_{G2}}E & 0 & 0 & \frac{1}{L_{G2}}E \\ -\frac{1}{C_1}E & \frac{1}{C_1}E & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{1}{C_1+C_2}E & -\frac{1}{C_1+C_2}E & 0 & 0 & W & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{C_2}E & -\frac{1}{C_2}E & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} I_{G1} \\ I_{L1} \\ I_{L2} \\ I_{G2} \\ U_{C11} \\ U_{C12} \\ U_{C22} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -\frac{1}{L_{G1}}E_{G1} \\ 0 \\ 0 \\ -\frac{1}{L_{G2}}E_{G2} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (11)$$

gdzie:

E – macierz jednostkowa o wymiarze 3×3 ,

0 – macierz zerowa o wymiarze 3×3 ,

W – macierz gęsta wiążąca prądy zwarciove z aktualnie ustawionymi parametrami modułu zwarciovego.

W celu przetestowania modelu opisanego układem równań (11) pod kątem poprawności odwzorowania procesów przejściowych zjawiska zwarciovego przeprowadzono symulację jego następujących etapów.

$<0-0,15>$ [s] – stan pracy normalnej (stan ustalony),

$<0,15>$ [s] – inicjacja zwarcia fazy $L2$ z fazą $L3$ na $0,1$ długości linii,

$(0,15-0,18)$ [s] – stan zwarciovy (procesy zwarciove) – okres, w którym aparatura zabezpieczająca ma czas na wykrycie zwarcia (program oparty na dyskretnej transformacie falkowej wykrywa zwarcie, zaś sieć neuronowa identyfikuje jego rodzaj oraz miejsce wystąpienia),

$<0,18>$ [s] – zadziałanie aparatury zabezpieczającej – SPZ trójfazowego – odcięcie zwartych faz,

$(0,18-0,4)$ [s] – stan, w którym napięcie zwartych faz jest odcięte – powietrze odzyskuje swoje właściwości izolacyjne,

$<0,4>$ [s] – ponowne załączenie wcześniej odciętych faz,

$(0,45-0,6)>$ [s] – stany przejściowe zainicjowane ponownym załączeniem napięcia na wcześniej zwarte fazy – ustalanie się wartości przebiegów.

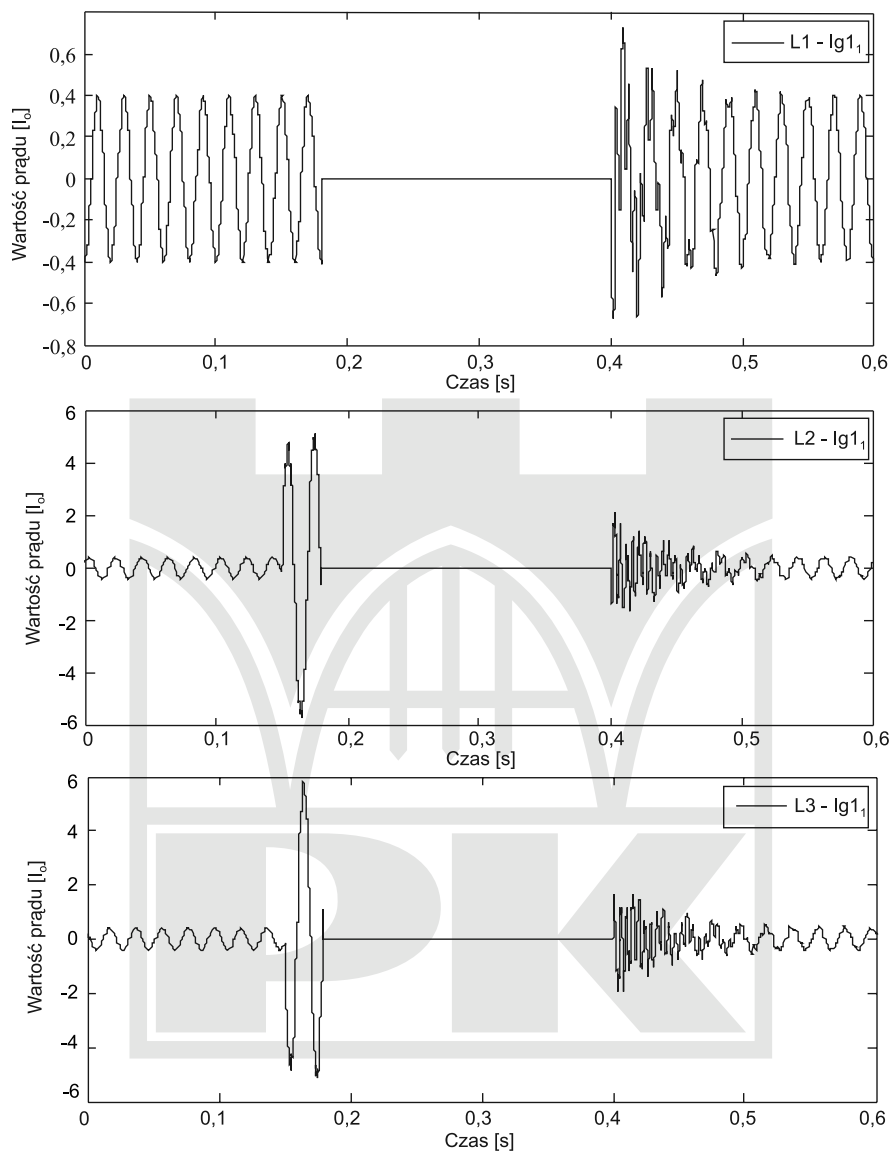
Przykładowe przebiegi symulacyjne prądów fazy $L1$ pokazano na rys. 8.

Charakter zobrazowanych na rys. 8 zmian wartości prądu w stanach awaryjnych wskazuje na to, że zaprezentowane równania różniczkowe oparte na układzie dwuczwońnikowym poprawnie oddają przebieg zjawiska zwarciovego i towarzyszących mu procesów. Sama baza danych będąca wzorcem do budowy algorytmu detekcyjnego dyskretnej transformaty falkowej będzie zawierała standardowe przebiegi złożone z niżej wymienionych faz:

$<0-0,15>$ [s] – stan pracy normalnej,

$<0,15>$ [s] – inicjacja zwarcia,

$(0,15-0,6)$ [s] – stan zwarciovy.



Rys. 8. Przebiegi zwarciove prądu na wyjściu generatora $G1$ w przypadku zwarcia dwufazowego ($L2-L3$)

Fig. 8. $G1$ generator's current in two-phase short circuit process ($L2-L3$ without ground)

W algorytmie detekcyjnym do wykrycia zwarcia wystarczające są dane pochodzące z pierwszych chwil po pojawieniu się tego zjawiska (maksymalny wykorzystywany przedział czasowy $<0,15-0,18$ [s]), natomiast pozostała część symulacji jest przeznaczona do pokazania, jak algorytm DWT zachowuje się w dalszych chwilach zwarcia.

Przeprowadzenie dynamicznych symulacji zwarciovych na podstawie powyższego schematu dla wszystkich rodzajów zwarcia zasymulowanych w 10 wybranych miejscach linii zaowocowało stworzeniem obszernej bazy danych zawierającej przebiegi wszystkich prądów oraz napięć, jakie można było określić na podstawie modelu uproszczonego. Przedstawiona baza danych *zwarcia-przebiegi_dynamiczne* została zorganizowana w następujący sposób. Wszystkie zarejestrowane przebiegi podzielono na podgrupy, w których umiejscowiono dane dotyczące tylko jednego rodzaju i miejsca zwarcia, jak pokazano na rys. 9, natomiast informacje dotyczące wybranego zwarcia uszeregowano według schematu przedstawionego na rys. 10.

Miejsce zwarcia [km] \ Rodzaj zwarcia	10	50	100	200	300
L1 -z Ziemią	Baza 1	Baza 2	Baza 3	Baza 4	Baza 5
L2 -z Ziemią	Baza 11	Baza 12	Baza 13	Baza 14	Baza 15
L3 -z Ziemią	Baza 21	Baza 22	Baza 23	Baza 24	Baza 25
L1-L2 z Ziemią	Baza 31	Baza 32	Baza 33	Baza 34	Baza 35
L1-L3 z Ziemią	Baza 41	Baza 42	Baza 43	Baza 44	Baza 45
L2-L3 z Ziemią	Baza 51	Baza 52	Baza 53	Baza 54	Baza 55
L1-L2-L3 z Ziemią	Baza 61	Baza 62	Baza 63	Baza 64	Baza 65
L1-L2 bez Ziemi	Baza 71	Baza 72	Baza 73	Baza 74	Baza 75
L1-L3 bez Ziemi	Baza 81	Baza 82	Baza 83	Baza 84	Baza 85
L2-L3 bez Ziemi	Baza 91	Baza 92	Baza 93	Baza 94	Baza 95

Rys. 9. Wycinek interfejsu bazy danych zwarcia-przebiegi_dynamiczne

Fig. 9. A part of interface of database zwarcia-przebiegi_dynamiczne

Baza1						
Czas [s]	Wartość prądu na wyjściu generatora G1 [A]			Wartość prądu płynącego przez pierwszy odcinek linii [A]		
	Faza L1	Faza L2	Faza L3	Faza L1	Faza L2	Faza L3
2,24E-05	-875,08	451,86	435,87	-775,83	394,14	374,;
4,49E-05	-874,99	451,86	435,81	-775,82	394,18	374,;
6,73E-05	-874,91	451,87	435,75	-775,82	394,22	374,;
8,98E-05	-874,83	451,87	435,69	-775,81	394,26	374,;
0,000112238	-874,75	451,88	435,63	-775,81	394,30	374,;
0,000134685	-874,35	451,91	435,34	-775,78	394,49	374,;
0,000157133	-873,95	451,94	435,04	-775,76	394,68	374,;
0,00017958	-873,55	451,97	434,75	-775,73	394,88	374,;
0,000202028	-873,16	452,00	434,45	-775,70	395,07	374,;
0,000224475	-871,25	452,14	432,97	-775,57	396,04	374,;
0,000246923	-869,45	452,30	431,50	-775,42	397,01	374,;
0,00026937	-867,76	452,46	430,02	-775,27	397,97	374,;
0,000291818	-866,18	452,62	428,53	-775,11	398,93	369,;
0,000314265	-861,34	453,34	422,88	-774,41	402,57	365,6
0,000336713	-858,55	454,25	417,24	-773,59	406,15	361,5
0,000359161	-857,97	455,40	411,64		409,66	356,;

Rys. 10. Sposób uszeregowania danych odpowiadających wybranemu rodzajowi zwarcia

Fig. 10. Single cell of database configuration

5. Podsumowanie

W tej części artykułu przeprowadzono analizy umożliwiające utworzenie baz danych dla algorytmów DWT w celu wykrywania zwarć metalicznych występujących w dowolnym miejscu, w obrębie badanej linii przesyłowej. W tym celu wykorzystano uproszczony, dwuczwońnikowy model dynamiczny linii przesyłowej pomiędzy dwoma węzłami sieci elektroenergetycznej. Model ten wybrano na podstawie analizy porównawczej prądów w węzłach sieci przy zwarcia w wybranych punktach linii przesyłowej w stanie ustalonym. Obliczenia ustalonych prądów zwarciovych przeprowadzono dla dwóch modeli linii: modelu uproszczonego, w którym linia jest reprezentowana przez dwa czwońniki, przed i za miejscem zwarcia, oraz modelu bardziej rozbudowanego, w którym linia jest reprezentowana przez układ wieloczwońnikowy. Wykazano, że uproszczony model dwuczwońnikowy z wystarczającą dokładnością odwzorowuje prądy zwarcia w punktach węzłowych sieci. Model dynamiczny, oparty na takiej konfiguracji czwońników, pozwolił wygenerować bazy danych, w których znajdują się informacje o wszystkich rodzajach zwarć metalicznych w wybranych punktach linii przesyłowej. Te bazy danych zostaną wykorzystane w drugiej części pracy jako wzorce do budowy algorytmu DWT rozpoznającego pojawienie się i typ zwarcia. Rozbudowa układu o elementy odbiorcze oraz kolejne odcinki linii wraz z wprowadzeniem modeli zwarć łukowych oraz przez rezystancję przejścia umożliwiłaby znaczące poszerzenie otrzymanego wzorca jak również wypróbowanie algorytmu DWT do wykrywania zwarć występujących poza obszarem linii przesyłowej. Dlatego będzie to tematem kolejnych badań.

Model dwuczwońnikowy zastosowany do symulacji stanów przejściowych w linii przesyłowej przy pojawianiu się zwarć pozwolił zmniejszyć pracochłonność, a także koszty wytworzenia omawianego wzorca detekcyjnego. Z modelu złożonego uzyskano by dużo więcej danych, które w analizie falkowej nastawionej na wykrycie pojawienia się zwarcia byłyby nieprzydatne. Analiza wyników symulacji przebiegów przy pojawianiu się zwarć linii pozwala stwierdzić, że stany przejściowe nie odgrywają znaczącej roli. Istnieje zatem możliwość odtworzenia przebiegów dynamicznych z informacji otrzymanych w wyniku analizy zwarciovych stanów ustalonych. Można to osiągnąć, tworząc fragment przebiegu prądów zwarciovych z wartości skutecznej prądu otrzymanego z symulacji stanu ustalonego, odpowiadającej pracy bezawaryjnej oraz kolejny fragment, tym razem zwarciovym, z wartości otrzymanej z symulacji stanu ustalonego odpowiadającej zwarcia. W celu wygenerowania baz danych wystarczająca może się okazać analiza stanu ustalonego w okresie przed zwarcie i w trakcie jego trwania, przy założeniu, że analiza ta dotyczy zwarcia metalicznego przy przyjętych w treści artykułu założeniach.

Literatura

- [1] Kacejko P., Machowski J., *Zwarcia w systemach elektroenergetycznych*, Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, Warszawa 2002.
- [2] Strojny J., Strzałka J., *Zbiór zadań z sieci elektrycznych, Część I, Część II*, Skrypty Uczelniane nr 999, Kraków 1986.
- [3] Yoshihide Hase, *Handbook of Power System Engineering*, WILEY 2007.

- [4] Chul-Hwan Kim, Hyun Kim, *A Novel Fault-Detection Technique of High-Impedance Arcing Faults in Transmission Lines Using the Wavelet Transform*, IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 17, no. 4, October 2002.
- [5] Mrozek B., Mrozek Z., *MATLAB i Simulink, Poradnik Użytkownika*, Wydanie III, Helion, 2010.

