

Adam SMOLARCZYK
Waldemar CHMIELAK

PROGRAM PSCAD/EMTDC JAKO WYGODNE NARZĘDZIE DO MODELOWANIA LINII NAPOWIETRZNYCH

STRESZCZENIE *W artykule opisano jeden z programów do symulacji zjawisk dynamicznych występujących w systemie elektroenergetycznym. Program o nazwie PSCAD/EMTDC jest powszechnie używany do modelowania fragmentów systemu elektroenergetycznego i zjawisk w nich występujących. Przedstawiono dostępne w programie modele linii napowietrznych, które mogą zostać wykorzystane do modelowania takich sytuacji jak stany łączeniowe (załączenia, wyłączenia) linii, zwarcia w linii. W programie linie napowietrzne można zamodelować ręcznie za pomocą elementów pasywnych typu R, L, C, z wykorzystaniem gotowych czwórników typu PI, za pomocą gotowych modeli typu Bergeron Model, Frequency Dependent (Mode) Model, Frequency Dependent (Phase) Model. Pokazano przykładowy sposób zamodelowania linii WN 110 kV z wykorzystaniem słupów kratowych typu B2 za pomocą modelu typu Frequency Dependent (Phase) Model.*

Słowa kluczowe: linie napowietrzne, stany przejściowe, modelowanie, PSCAD/EMTDC

1. WSTĘP

Rozwój techniki informatycznej, zarówno w dziedzinie budowy komputerów jak i programów komputerowych, zaowocował powstaniem wielu nowych aplikacji wspomagających pracę badawczą. Zjawisko to objęło również programy symulacyjne, które znalazły szerokie zastosowanie w wielu dziedzinach życia.

W elektrotechnice programy symulacyjne stosowane są jako narzędzia przydatne w badaniach zjawisk zachodzących w obwodach elektrycznych. Elementy obwodów opisywane są za pomocą równań różniczkowych, które program rozwiązuje przy użyciu odpowiednich metod numerycznych (w dziedzinie czasu lub częstotliwości, ze stałym lub zmiennym krokiem obliczeniowym).

dr inż. Adam SMOLARCZYK, dr inż. Waldemar CHMIELAK
e-mail: [Adam.Smolarczyk; Waldemar.Chmielak]@ien.pw.edu.pl

Politechnika Warszawska, Wydział Elektryczny, Instytut Elektroenergetyki,
ul. Koszykowa 75, 00-662 Warszawa

PRACE INSTYTUTU ELEKTROTECHNIKI, zeszyt 272, 2016

Postęp w dziedzinie programów symulacyjnych sprawił, że obwody elektryczne budowane są przy użyciu przyjaznego dla użytkownika interfejsu graficznego (GUI – ang. *graphical user interface*), w którym poszczególnym elementom elektrycznym przyporządkowane są odpowiednie bloki (elementy) symulacyjne. Wyeliminowało to konieczność żmudnego wpisywania danych, określających liczbę węzłów, gałęzi oraz elementów elektrycznych w niej występujących. Wyniki symulacji przedstawiane są w formie graficznej, jako przebiegi zmiennych wyjściowych (najczęściej w funkcji czasu), co znacznie ułatwia ich interpretację.

Na rynku dostępnych jest wiele programów symulacyjnych, możliwych do zastosowania lub przeznaczonych wyłącznie do symulacji układów elektroenergetycznych. Oprócz opisanego w artykule programu PSCAD/EMTDC [1], do najbardziej znanych należą: ATP-EMTP, MATLAB/Simulink (wraz z biblioteką SimPower Systems), NEPLAN, PSS NETOMAC, EMTP-RV, Eurostag, PowerFactory. Programy te umożliwiają odwzorowanie większych lub mniejszych fragmentów systemów elektroenergetycznych (SEE) i pozwalają modelować stany dynamiczne (nieustalone) o różnej szybkości (czasie trwania), od falowych poprzez elektromagnetyczne, elektromechaniczne do termodynamicznych. Dzięki temu można za ich pomocą analizować i rozwiązywać problemy, takie jak: przepięcia łączeniowe, interakcje maszyn elektrycznych i sieci, kołysania wirników maszyn elektrycznych, oscylacje międzysystemowe, regulacja częstotliwości i mocy wymiany. Programy te są również wykorzystywane do: (a) projektowania i sprawdzania poprawności działania zabezpieczeń elektroenergetycznych i układów automatyki, (b) odtworzenia przebiegu awarii i ich analiz, (c) zagadnień związanych z jakością energii elektrycznej, (d) sterowania układów napędowych, (e) sterowania układów typu FACTS i innych.

W przypadku modelowania zjawisk dynamicznych w SEE do ich dokładnego odwzorowania m.in. istotny jest model zastosowanej linii napowietrznej przesyłowej. Zwykle w programach symulacyjnych są dostępne modele dokładne i mniej dokładne napowietrznych linii elektroenergetycznych. Modele dokładne (uwzględniające rodzaj słupa, rodzaj przewodów, rezystywność gruntu, itp.) mają tę zaletę, że dość wiernie odwzorowują właściwości modelowanej linii, pod warunkiem, że znane są wszystkie parametry linii, a układ modelowanej sieci nie jest zbyt rozbudowany (wielkość modelowanej sieci ma istotny wpływ na szybkość przebiegu symulacji). W przypadku wykorzystania modeli mniej dokładnych wymagane jest mniej parametrów konfiguracyjnych (zwykle jednostkowe rezystancje i reaktancje zgodne i zerowe, długość linii), a przebieg symulacji przebiega znacznie szybciej dzięki czemu można modelować dużo bardziej rozbudowane układy. Stosowanie modeli uproszczonych powoduje, że podczas przebiegu symulacji nie zauważalne są przebiegi niektórych zjawisk (np. falowych). W artykule opisane zostały dostępne w programie PSCAD/EMTDC modele linii napowietrznych, zarówno te dokładne, jak i te mniej dokładne.

2. OPIS PROGRAMU PSCAD/EMTDC

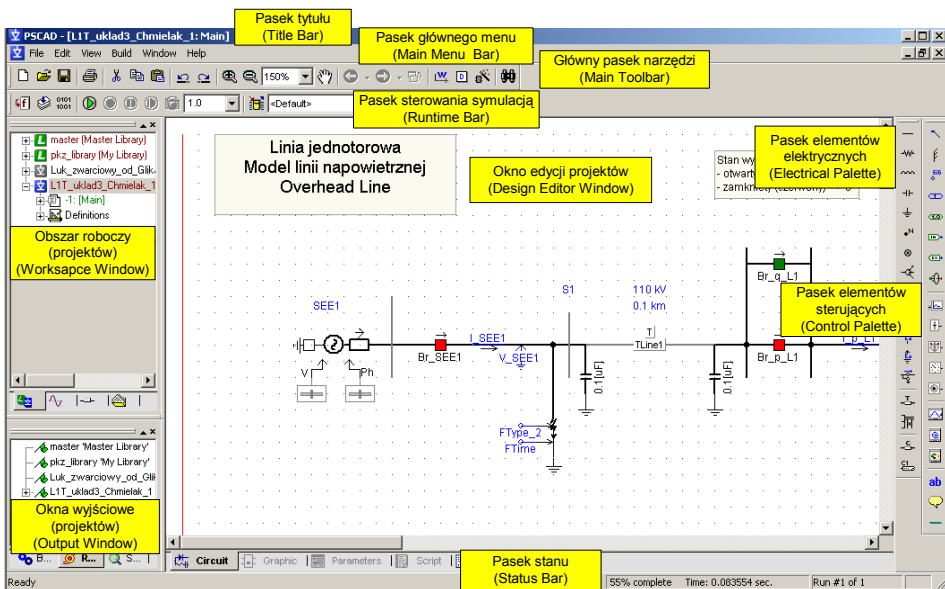
Program PSCAD (Power Systems Computer Aided Design) został opracowany przez kanadyjską firmę Manitoba HVDC Research Centre [1]. Jest on graficznym interfejsem programu symulacyjnego (obliczeniowego) EMTDC. Program PSCAD

w sposób graficzny pozwala na zaprojektowanie obwodu elektrycznego, zadanie odpowiednich parametrów oraz przeprowadzenie symulacji zjawisk zachodzących w SEE. Zawarte w głównej bibliotece narzędzia, takie jak wykresy czy mierniki, pozwalają w łatwy sposób śledzić przebieg symulacji i jej wyniki w dziedzinie czasu. W artykule opisano wersję 4.2.1 programu wykorzystywaną do badań przez autorów. Obecnie w sprzedaży dostępna jest wersja x4.5 programu [2].

2.1. Główne okno programu PSCAD

Wygląd głównego okna programu PSCAD pokazano na rysunku 1. Jego podstawowymi elementami są: (a) pasek tytułu (Title Bar), (b) pasek głównego menu (Main Menu Bar), (c) główny pasek narzędzi (Main Toolbar), (d) pasek sterowania symulacją (Runtime Bar), (e) pasek stanu (Status Bar), (f) obszar roboczy (Workspace Window), (g) okno wyjściowe (Output Window), (h) podręczne paski elementów elektrycznych (Electrical Palette) i (i) sterujących (Control Palette) oraz (j) okno edycji projektów (Design Editor Window). Oprócz wymienionych elementów okna głównego, po kliknięciu prawym przyciskiem myszy na nazwę projektu lub dowolny element projektu pojawia się menu podręczne (kontekstowe) (Pop-up Menu).

Na pasku tytułowym, obok nazwy PSCAD, znajduje się nazwa wersji programu (Professional, Educational lub Student) oraz nazwa projektu, który jest aktywny. Menu główne, umieszczone poniżej nazwy programu, zawiera podstawowe opcje dostępne dla użytkownika. Podzielone jest na grupy: File, Edit, View, Build, Window, Help. Wybranie jednej z opcji menu głównego wyświetla listę dostępnych poleceń (menu rozwijalne). W dolnej części ekranu zajmuje się pasek stanu informujący o gotowości programu do pracy, czasie przebiegu symulacji oraz wyświetlający różnego rodzaju komentarze.



Rys. 1. Główne okno programu PSCAD

Okno projektów (obszar roboczy) można wyświetlić poprzez zaznaczenie opcji Workspace w zakładce View głównego menu. Podstawowym zadaniem tego okna jest umożliwienie wybierania otwartych bibliotek i projektów, wyświetlanych w formie drzewa, w zakładce Projects. Program PSCAD automatycznie wczytuje główną bibliotekę elementów (Master Library).

Okno edycji projektów programu PSCAD, służy do graficznego zobrazowania obwodu elektrycznego. Okno to zostało podzielone na sześć zakładek umieszczonych w dolnej części okna. Domyślnie, po otwarciu projektu aktywna jest zakładka Circuit w której tworzone są schematy symulacyjne.

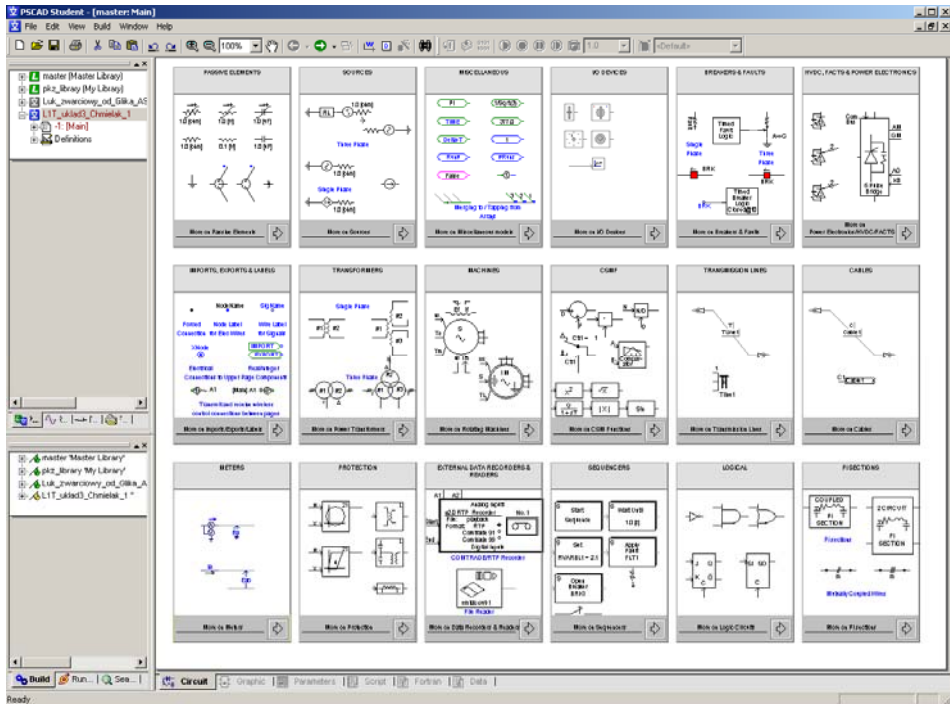
W oknie wyjściowym (projektów) wyświetlane są informacje, generowane w czasie kompilowania i przeprowadzania symulacji. Pojawiające się komunikaty wyświetlane są w kolorach czerwonym, żółtym i zielonym.

Pasek narzędzi i paski elementów (elektrycznych i sterujących) mają charakter skrótów ułatwiających korzystanie z programu PSCAD. Funkcje paska narzędzi, takie jak: zapisywanie, tworzenie nowego projektu czy uruchamianie symulacji, są proste w obsłudze. Paski elementów umożliwiają szybki dostęp do najczęściej używanych elementów elektrycznych i sterujących.

2.2. Główna biblioteka programu PSCAD

W trakcie uruchamiania programu PSCAD automatycznie, do okna projektów, wczytana zostaje główna biblioteka elementów zawierająca kilkadziesiąt bloków symulacyjnych, które są modelami elementów elektrycznych, sterujących i logicznych. W oknie wyjściowym (rys. 1) widoczna jest ona pod nazwą Master Library. Autorzy programu podzielili ją na 18 podrzędnych bibliotek (podbibliotek) grupujących elementy o podobnym zastosowaniu. Podbiblioteki głównej biblioteki elementów programu PSCAD to (rys. 2): elementy pasywne (PASSIVE ELEMENTS); źródła napięcia i prądu (SOURCES); transformatory (TRANSFORMERS); wyłączniki i zwarcioniki (BREAKERS & FAULTS); linie napowietrzne (TRANSMISSION LINES); kable (CABLES); czwórniki typu PI (PI SECTIONS); maszyny elektryczne (wirujące) i ich układy regulacji (MACHINES); elementy związane z zabezpieczeniami elektroenergetycznymi (PROTECTION); elementy energoelektroniczne i elementy związane z HVDC i FACTS (HVDC, FACTS & Power Electronics); mierniki (METERS); elementy funkcyjne i sterujące (CSMF – Control Systems Modeling Functions); elementy wejściowe i wyjściowe (I/O DEVICES); elementy logiczne (LOGICAL); elementy do modelowania sekwencji zdarzeń (SEQUENCERS); elementy różne nie mieszczące się w innych kategoriach (MISCELLANEOUS); elementy do przesyłania sygnałów między elementami projektu (IMPORTS, EXPORTS & LABELS) oraz elementy wyprowadzające wyniki symulacji do plików zewnętrznych i wprowadzające dane do projektu z plików zewnętrznych (EXTERNAL DATA RECORDERS & READERS).

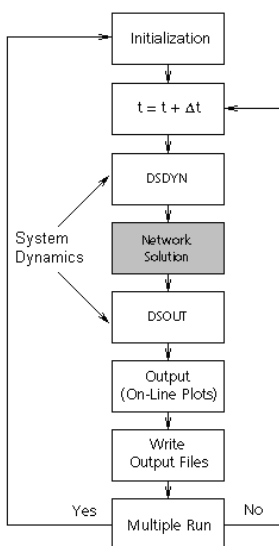
Jeśli dostępne elementy podbibliotek nie są w stanie odwzorować właściwości potrzebnego użytkownikowi elementu elektrycznego, logicznego lub sterującego, to istnieje możliwość samodzielnego zbudowania elementu symulacyjnego (polecenie „Create New Component...” z menu podręcznego) spełniającego wymagania użytkownika.



Rys. 2. Wygląd podbibliotek głównej biblioteki elementów programu PSCAD

2.3. Program symulacyjny EMTDC

Program PSCAD jest interfejsem pomiędzy użytkownikiem, a programem symulacyjnym o nazwie EMTDC (Electromagnetic Transients Including DC), który odpowiada za cały proces obliczeniowy wykonywany podczas przebiegu symulacji. Elementy SEE, wykorzystywane do symulacji zjawisk są w opisane za pomocą równań różniczkowych w dziedzinie czasu. Program EMTDC rozwiązuje te równania ze stałym krokiem całkowania Δt , równym krokowi symulacji (obliczeniowemu). Zwykle krok Δt równy jest $50 \mu s$. Sygnały wyznaczone w dziedzinie czasu mogą być przeliczone na wielkości fazowe (fazory) reprezentowane przez moduł i kąt. Zastosowanie stałego kroku symulacji powoduje pewne ograniczenia, szczególnie widoczne w elementach takich jak wyłączniki czy diody, tzn. jeśli operacja łączeniowa wypada zaraz po rozpoczęciu nowego kroku całkowania, to zostanie ona przeprowadzona dopiero w następnym kroku. Problem tego typu wyeliminowano przez zastosowanie algorytmu interpolacyjnego, wyznaczającego dokładny czas operacji łączeniowej. Po wyznaczeniu dokładnego czasu operacji łączeniowej następuje rozwiązanie równań różniczkowych dla wyznaczonej chwili czasowej, po czym następuje powrót do przyjętego kroku symulacji.



Rys. 3. Struktura głównej części programu EMTDC, zaczerpnięto z [1]

Na rysunku 3 przedstawiono strukturę głównej części programu EMTDC. Program ten kontroluje sygnały wejściowe i wyjściowe oraz strukturę modelowanej sieci. Jak widać składa się on z kilku bloków. Ich znaczenie, ze względu na ograniczoną objętość artykułu, nie zostanie opisywane.

3. DOSTĘPNE MODELE NAPOWIETRZNYCH LINII ELEKTROENERGETYCZNYCH

W programie PSCAD odwzorowanie fizycznych właściwości linii elektroenergetycznych można dokonać w oparciu o trzy modele: (a) model typu PI zbudowany w oparciu o elementy pasywne R, L, C (podbiblioteka PASSIVE ELEMENTS); (b) model o parametrach skupionych typu PI za pomocą elementów podbiblioteki PI SECTIONS, oraz (c) model o parametrach rozłożonych Overhead Transmission Line (podbiblioteka TRANSMISSION LINES). Wyniki symulacji dla pierwszych dwóch rodzajów modeli powinny być identyczne, ponieważ ich budowa jest taka sama. W przypadku modelu typu PI znajdującego się w bibliotece elementów programu PSCAD elementy pasywne R, L, C zostały „ukryte” wewnątrz modelu typu PI. Model zbudowany przez użytkownika z elementów pasywnych może być przydatny, jeśli użytkownik chce obserwować przebiegi sygnałów wewnątrz dostępnego w bibliotece elementów modelu typu PI. Trzeci model (Overhead Transmission Line) jest najbardziej zaawansowany. Parametry takie jak pojemność, czy indukcyjność linii są w nim rozłożone

wzdłuż całej długości linii. Wyboru wykorzystywanego podczas symulacji modelu linii należy dokonać w oparciu o takie parametry projektu symulacyjnego jak:

- zastosowany krok obliczeniowy podczas symulacji (Δt);
- długość odwzorowywanej linii;
- konieczność analizy stanów przejściowych i wyższych harmonicznycch.

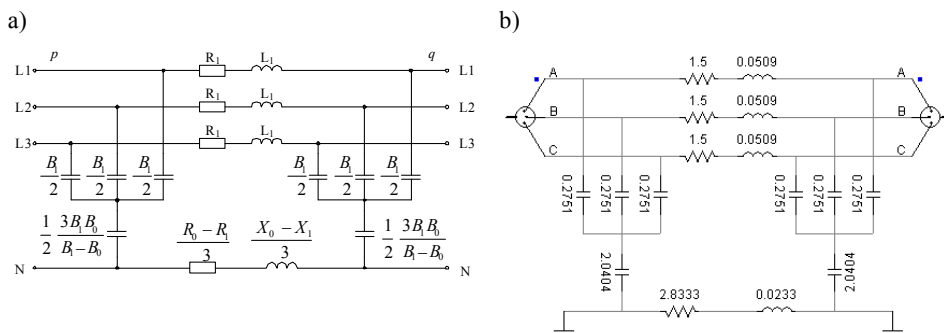
Pierwsze dwa parametry są ze sobą powiązane, w ten sposób, że im krótszy krok całkowania (obliczeniowy) Δt , tym krótszą linię można odwzorować za pomocą modelu typu PI. Dokładna długość nie powinna być większa niż droga, jaką pojedynczy elektron może przebyć w czasie równym krokowi obliczeniowemu (całkowania) Δt . Dla standardowego kroku obliczeniowego $\Delta t = 50 \mu s$ (krok odpowiedni jeśli założy się, że częstotliwości występujące podczas procesów łączeniowych są nie większe niż 2 kHz, [3]) maksymalna długość modelu linii odwzorowanego za pomocą jednego czwórnika typu PI wynosi 15 km. Autorzy programu zalecają stosowanie maksymalnie 10 czwórników typu PI połączonych szeregowo [3]. Zaleca się, aby model linii typu PI był stosowany podczas analiz wykorzystujących krótkie odcinki linii oraz w przypadku, gdy użytkownik oczekuje orientacyjnego odwzorowania zjawisk zachodzących w linii.

Model linii typu Overhead Transmission Line należy stosować w przypadku modelowania długich linii lub wówczas, gdy zachodzi konieczność dokładnej analizy zachodzących w linii zjawisk. Zwłaszcza w przypadku, gdy analizowana jest nie tylko harmoniczna podstawowa, ale również wyższe harmoniczne pojawiające się np. podczas stanów przejściowych. W modelu tego typu odwzorowane zostało falowe rozchodzenie się napięcia w linii.

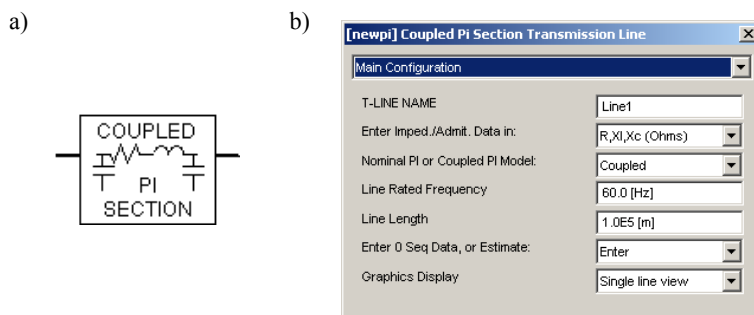
3.1. Modele linii o parametrach skupionych

Modelowanie linii za pomocą czwórników typu PI jest najbardziej uzasadnione w przypadku krótkich linii, gdy czas propagacji (rozchodzenia się) fali napięcia jest krótszy niż zastosowany krok obliczeniowy. Schemat czwórnika typu PI zbudowanego z elementów pasywnych R, L, C przedstawiono na rysunku 4. W modelu tym należy określić wartość rezystancji zgodnej (R_1), reaktancji zgodnej (X_1) i susceptancji zgodnej i zerowej (B_1 , B_0) linii (z uwzględnieniem długości linii) [4]. Na rysunku 4a podano schemat według, którego należy budować model linii oraz wzory do obliczenia poszczególnych parametrów czwórnika typu PI [4]. Natomiast na rysunku 4b pokazano przykładowe odwzorowanie modelu linii za pomocą elementów pasywnych R, L, C w programie PSCAD.

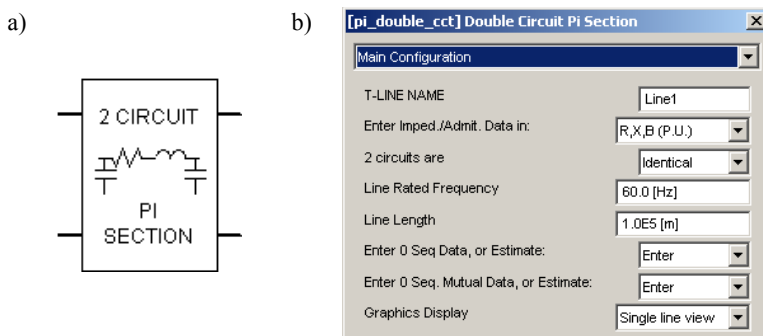
Wygląd modelu typu PI linii elektroenergetycznej jednotorowej (Coupled Pi Section Transmission Line) dostępnego w programie PSCAD pokazano na rysunku 5. Dostępne są dwa rodzaje modeli linii o parametrach skupionych. W pierwszym modelu (Coupled) (rys. 5a) uziemienie zrealizowane jest wewnątrz modelu i użytkownik nie może obserwować (za pomocą odpowiednich mierników) prądów ziemnopowrotnych. W przypadku drugiego rodzaju modelu (Nominal) uziemienie wyprowadzone jest na zewnątrz modelu i istnieje możliwość obserwacji prądów płynących ziemią. W oknie edycji parametrów modelu (rys. 5b) ustawia się m.in. długość linii, rezystancje i reaktancje jednostkowe zgodne i zerowe linii, częstotliwość znamionową napięcia sieci.



Rys. 4. Trójfazowy model linii zbudowany w oparciu o elementy pasywne R,L,C:
 a) rozmieszczenie parametrów linii w schemacie zastępczym, wg [4]; b) model zbudowany w programie PSCAD



Rys. 5. Model typu PI linii elektroenergetycznej jednorodowej:
 a) wygląd elementu; b) okno edycji parametrów modelu

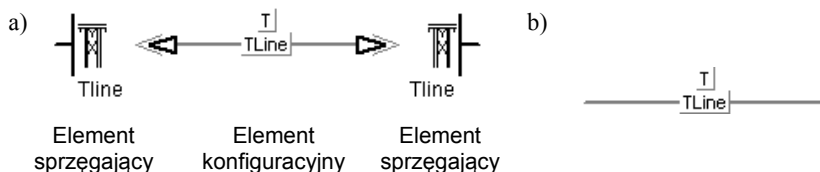


Rys. 6. Model typu PI linii elektroenergetycznej dwutorowej:
 a) wygląd elementu; b) okno edycji parametrów modelu

Wygląd modelu typu PI linii elektroenergetycznej dwutorowej (Double Circuit Pi Section) dostępnego w programie PSCAD pokazano na rysunku 6. W modelu tym zamodelowane zostały sprzężenie magnetyczne między torami równoległymi linii. Dzięki temu można odwzorować zjawiska zachodzące podczas zwarć doziemnych w linii dwutorowej, polegające na zmianie wartości prądu zwarciovego w zależności od konfiguracji linii dwutorowej. W oknie edycji parametrów (rys. 6b) modelu ustawia się m.in. długość linii, rezystancje i reaktancje jednostkowe zgodne i zerowe linii, reaktancję jednostkową (składowa zerowa) sprzężenia magnetycznego między torami równoległymi linii, częstotliwość znamionową napięcia sieci.

3.2. Modele linii o parametrach rozłożonych

Jak napisano wyżej linie napowietrzne o znacznej długości nie powinny być modelowane za pomocą elementów typu PI. W celu modelowania takich linii w programie PSCAD/EMTDC utworzono element o nazwie Overhead Transmission Line znajdujący się w podbibliotece TRANSMISSION LINES [1]. Wygląd tego typu modelu linii przedstawiono na rysunku 7. W modelu linii wykorzystano zasadę działania opartą na falach wędrownych polegającą na tym, że napięcie zakłóceniewe rozchodzi się wzdłuż przewodów z prędkością propagacji (bliską prędkości światła) do czasu, gdy się nie odbije od drugiego końca linii. Zatem krok obliczeniowy powinien być mniejszy od czasu propagacji fali na drugi koniec linii.



Rys. 7. Połączenie z pozostałą częścią obwodu elektrycznego modelu napowietrznej linii przesyłowej: a) zdalne; b) bezpośrednie

Na rysunku 7a pokazano model linii napowietrznej połączonej z pozostałą częścią SEE w sposób zdalny, za pośrednictwem dwóch elementów sprzęgających Transmission Line Interface. Model ten pozwala zarówno na symulację linii jednotorowej jak i dwutorowej. Jeśli elementy sprzęgające zostały dodane do projektu, a ich parametry odpowiednio ustawione należy skopiować element konfiguracyjny Transmission Line Configuration z podbiblioteki TRANSMISSION LINES.

Edycję parametrów elementów sprzęgających oraz edycję parametrów elementu konfiguracyjnego dokonuje się w odpowiednich oknach edycyjnych. W przypadku wybrania w oknie edycji parametrów elementu konfiguracyjnego połączenia bezpośredniego (Direct Connection) elementy sprzęgające stają się zbędne, a model linii (rys. 7b) może być bezpośrednio połączony z innymi elementami modelowanego układu (wyłącznik, szyni stacji).

Po włączeniu modelu linii do obwodów modelowanego fragmentu SEE, należy zdefiniować rodzaje słupów, w oparciu o jakie zbudowana jest linia. Rodzaje słupów znajdują się w podbibliotece TRANSMISSION LINES. Dostępne są słupy zarówno dla linii jednorodowych jak i dwutorowych, a nawet czterotorowej. Do jednego elementu konfiguracyjnego można wstawić kilka rodzajów słupów, modelując w ten sposób wzajemne oddziaływanie linii znajdujących się w niewielkiej odległości od siebie.

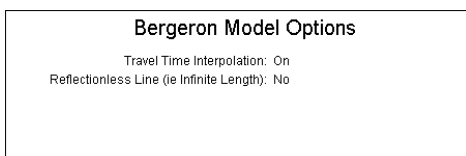
Oprócz rodzaju słupa, do obszaru edycji elementu konfiguracyjnego linii należy skopiować właściwości gruntu (element o nazwie Line/Cable Constants Entry of Ground Data), którego zadaniem jest odwzorowanie właściwości fizycznych gruntu na którym stoi słup.

Program PSCAD/EMTDC pozwala na wybranie sposobu odwzorowania zjawisk zachodzących w linii. Dostępne są następujące modele: (a) Bergeron Model, (b) Frequency Dependent (Mode) Model, (c) Frequency Dependent (Phase) Model [3]. Wyboru modelu dokonuje się poprzez skopiowanie odpowiedniej tablicy z podbiblioteki TRANSMISSION LINES do obszaru edycji parametrów linii.

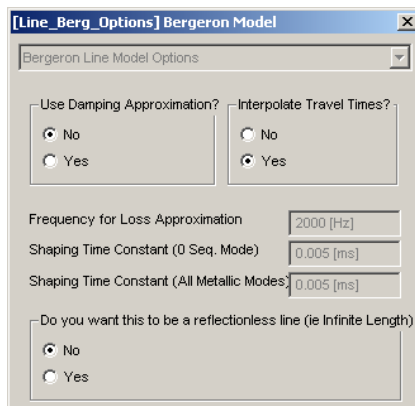
Model Bergeron jest najprostszy ze wszystkich dostępnych w programie modeli. Powinien być stosowany w projektach, w których najistotniejsze jest działanie na poprawnej wartości impedancji linii dla harmonicznej podstawowej w stanie ustalonym. W modelu Bergeron indukcyjność i pojemność jest rozłożona wzdłuż linii, natomiast rezystancja pozostaje skupiona. Model ten nie nadaje się do wykorzystania w sytuacji, gdy istotna jest analiza zachowania się linii podczas stanów przejściowych lub występowania wyższych harmonicznych w układzie. Na rysunku 8 przedstawiono wybrane opcje konfiguracyjne parametrów modelu Bergeron Model (rys. 8a) i okno edycji tego modelu (rys. 8b).

Modelu o nazwie Frequency Dependent (Mode) Model należy używać, jeśli konieczna jest analiza wpływu stanów przejściowych lub wyższych harmonicznych na linie przesyłową. Odwzorowanie propagacji fali napięcia oraz zależności parametrów linii od częstotliwości są w tym modelu przybliżone (aproksymowane). Model ten

a)



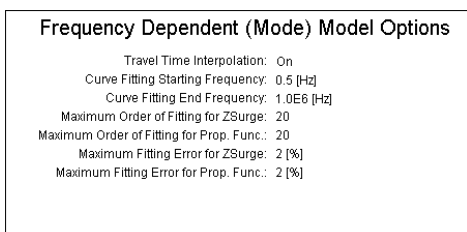
b)



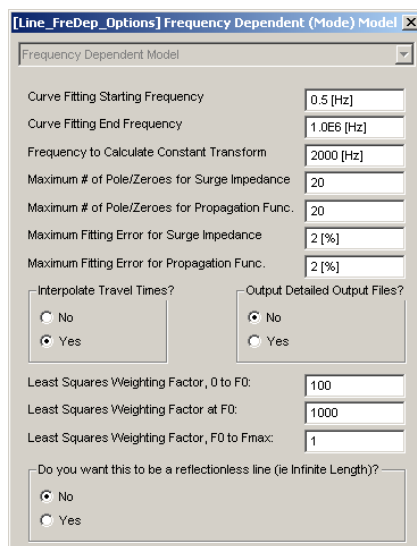
Rys. 8. Bergeron Model:

a) wybrane opcje konfiguracyjne; b) okno edycji parametrów modelu

a)



b)



Rys. 9. Frequency Dependent (Mode) Model:

a) wybrane opcje konfiguracyjne; b) okno edycji parametrów modelu

powinien być stosowany w czasie analizy układów z jednym lub dwoma przewodami fazowymi w wiązce oraz układów trójfazowych idealnie przeplecionych (transponowanych). Natomiast nie należy go stosować w układach bez przeplotu (nietransponowanych) lub gdy modelowane jest kilka różnych rodzajów słupów w jednym elemencie konfiguracyjnym (linie wielotorowe). Model ten jest podobny do modelu J. Martiego dostępnego w programie EMTP. Na rysunku 9 przedstawiono wybrane opcje konfiguracyjne parametrów modelu Frequency Dependent (Mode) Model (rys. 9a) i okno edycji tego modelu (rys. 9b).

Model o nazwie Frequency Dependent (Phase) Model jest najbardziej dokładny ze wszystkich modeli linii dostępnych w programie PSCAD/EMTDC. Odzworowuje zależność wszystkich parametrów linii od częstotliwości w pełnym zakresie jej zmian. Model ten powinien być stosowany, jeśli konieczna jest analiza stanów przejściowych lub wyższych harmonicznych na linię przesyłową oraz w przypadku modelowania linii o dużej liczbie przewodów fazowych. Na rysunku 10 przedstawiono wybrane opcje konfiguracyjne parametrów modelu Frequency Dependent (Phase) Model (rys. 10a) i okno edycji tego modelu (rys. 10b).

Na rysunku 11 przedstawiono obszar edycji wszystkich elementów konfiguracyjnych potrzebnych do konfiguracji modelu linii napowietrznej (sposób odwzorowania zjawisk, kształt i wymiary słupa, właściwości gruntu). Jak widać, na rysunku przedstawiono wygląd słupa dla linii jednotorowej o nazwie L1_A o długości 50 km z dwoma przewodami odgromowymi (G1, G2) i odwzorowaniem zjawisk w linii za pomocą modelu typu Frequency Dependent (Phase) Model.

a)

Frequency Dependent (Phase) Model Options

Travel Time Interpolation: On
 Curve Fitting Starting Frequency: 0.5 [Hz]
 Curve Fitting End Frequency: 1.0E6 [Hz]
 Total Number of Frequency Increments: 100
 Maximum Order of Fitting for YSurge: 20
 Maximum Order of Fitting for Prop. Func.: 20
 Maximum Fitting Error for YSurge: 2 [%]
 Maximum Fitting Error for Prop. Func.: 2 [%]

b)

[Line_FrePhase_Options] Frequency Dependent (Phase) ...

Configuration

Interpolate Travel Times? No Yes

Output Detailed Output Files? No Yes

Do you want this to be a reflectionless line (ie Infinite Length)? No Yes

[Line_FrePhase_Options] Frequency Dependent (Phase) ...

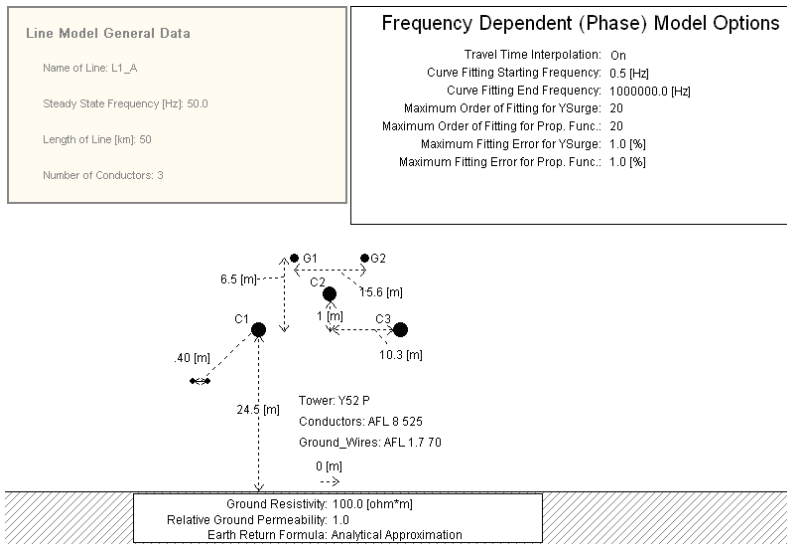
Curve Fitting Controls

Lower Frequency Limit: 0.5 [Hz]
 Upper Frequency Limit: 1.0E6 [Hz]
 Total Number of Frequency Increments: 100
 Max # of Poles per Column for Surge Admittance: 20
 Max # of Poles per Delay Group for Prop. Func.: 20
 Maximum Fitting Error for Surge Admittance: 2 [%]
 Maximum Fitting Error for Propagation Func.: 2 [%]

Least Squares Weighting Factors:

0 to F0: 100
 F0: 1000
 F0 to Fmax: 1

Rys. 10. Frequency Dependent (Phase) Model:
 a) wybrane opcje konfiguracyjne; b) okno edycji parametrów modelu



Rys. 11. Obszar edycji linii napowietrznej (element Transmission Line Configuration)

Jeśli wymiary geometryczne słupów lub parametry przewodów nie są znane, to użytkownik może ręcznie wpisać parametry modelowanej linii do których należą jednostkowe składowe symetryczne zgodne i zerowe rezystancji i reaktancji. Do tego celu służy tablica o nazwie Manual Entry of Y, Z. Tablicę tę należy skopiować z podbiblioteki TRANSMISSION LINES i umieścić w obszarze edycji parametrów elementu konfiguracyjnego. Jeśli do obszaru edycji linii wstawi się tablicę Manual Entry of Y, Z, to nie należy wstawiać rodzaju słupa ani właściwości gruntu (element o nazwie Line/Cable Constants Entry of Ground Data). Ta metoda podawania parametrów linii może być użyta jedynie w przypadku modelu zjawisk odwzorowanych za pomocą modelu o nazwie Bergeron Model.

W przypadku, gdy wśród dostępnych w programie przykładowych sylwetek słupów nie ma sylwetki słupa, o geometrii takiej jaką użytkownik chce wykorzystać, to istnieje możliwość samodzielnego zamodelowania geometrii słupa za pomocą elementu o nazwie Universal Line Geometry. Element ten może być użyty wielokrotnie razem z innymi sylwetkami słupów. W kolejnym rozdziale opisano użycie właśnie tego typu elementu do konfiguracji sylwetki słupa kratowego serii B2 na napięcie znamionowe 110 kV.

4. MODEL PRZYKŁADOWEJ LINII WN

Poniżej podano sposób zamodelowania linii 110 kV o długości 15 km umieszczonej na słupach kratowych typu B2. Dane dotyczące zamodelowanej linii (w tym rodzaje zastosowanych przewodów) pokazano w tabeli 1, natomiast parametry jednostkowe linii przedstawiono w tabeli 2. Do zamodelowania linii wykorzystano model typu Frequency Dependent (Phase) Model opisany wyżej. Modelowanie geometrii słupa wykonano za pomocą elementu Universal Line Geometry (w zestawie dostępnych geometrii słupów nie było geometrii odpowiadającej słupom z serii B2). Sylwetkę i wymiary słupa zaczerpnięto z [5] i przedstawiono na rysunku 12.

TABELA 1

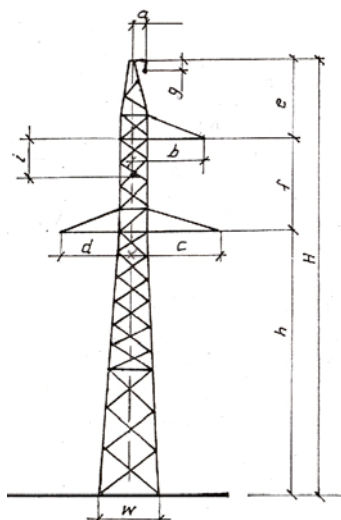
Dane dotyczące zamodelowanej linii 110 kV, wg [4]

Napięcie znamionowe linii	110 kV
Typ słupa	B2
Liczba torów	1
Typ przewodów	3 x AFL6 240 mm ²
Liczba przewodów odgromowych	1
Typ przewodów odgromowych	1 x AFL1.7 70 mm ²
Liczba przewodów w wiązce	1

TABELA 2

Parametry jednostkowe zamodelowanej linii napowietrznej 110 kV na słupach serii B2, wg [4]

Parametry dla rezystywności gruntu 100 Ωm					
R_1	X_1	R_0	X_0	B_1	B_0
Ω/km	Ω/km	Ω/km	Ω/km	$\mu\text{S}/100 \text{ km}$	$\mu\text{S}/100 \text{ km}$
0,12	0,41	0,34	1,08	277,40	168,08



Typ słupa - P

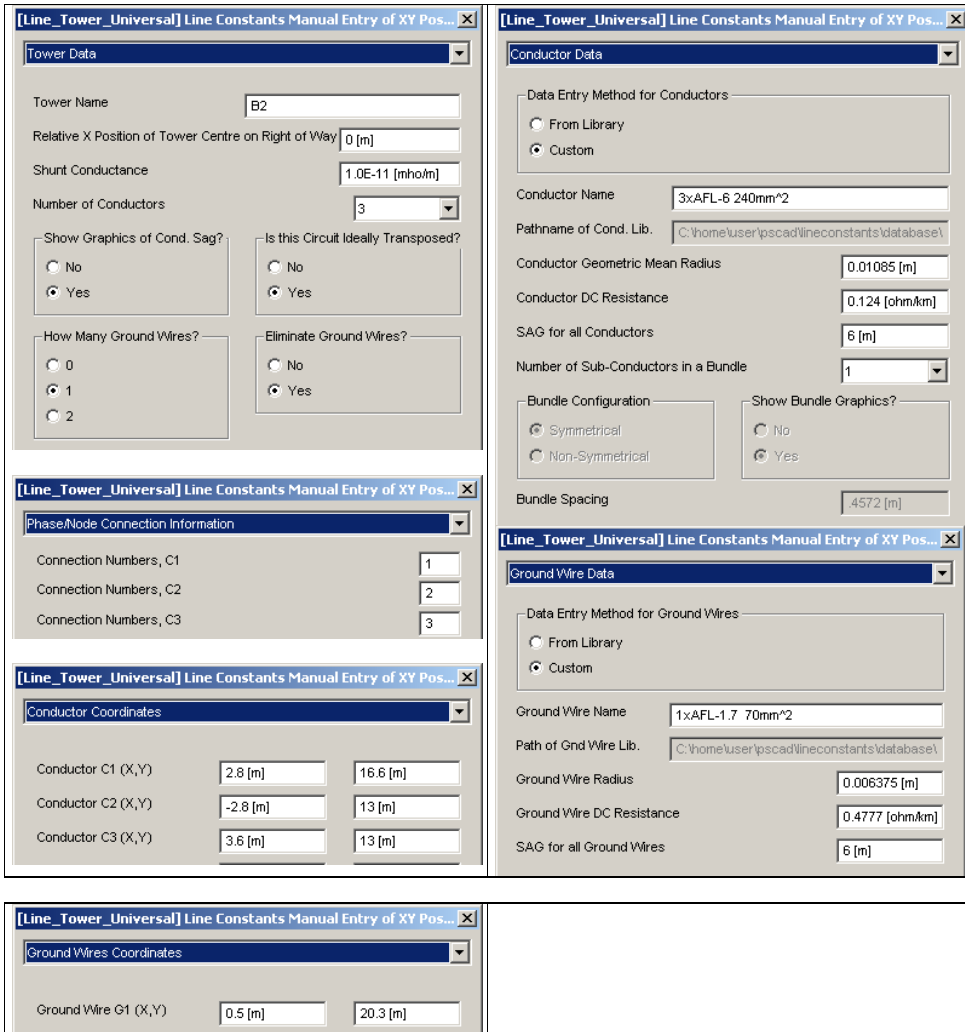
Wymiary:

- a - 0,5 m,
- b - 2,8 m,
- c - 3,6 m,
- d - 2,8 m,
- e - 3,0 m,
- f - 3,6 m,
- g - 0,3 m,
- i - ---,
- h - 14,0 m,
- H - 20,6 m,
- W - 2,8 m x 2,0 m.

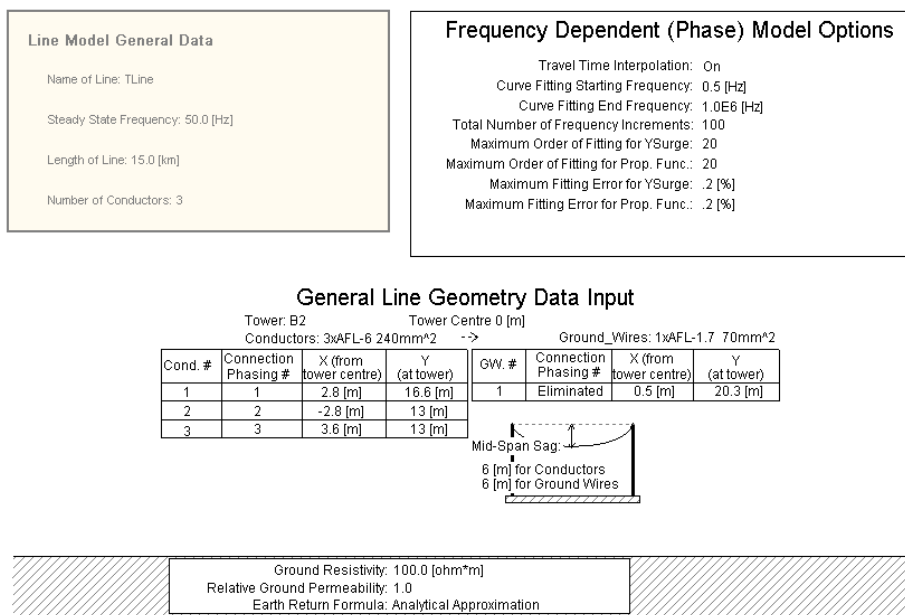
Długość izolatorów (założona) - 1,0 m

Rys. 12. Sylwetka i wymiary słupa serii B2, zaczerpnięto z [5]

Na rysunku 13 pokazano nastawienia związane z geometrią słupa i rodzajami przewodów fazowych i odgromowych wprowadzone w oknie Tower_Universal 'Line Constans Manual Entry of XY Positions' elementu Universal Line Geometry (General Line Geometry Data Input). Natomiast na rysunku 14 przedstawiono końcowy wygląd obszaru edycji linii napowietrznej 110 kV umieszczonej na słupie Serii B2 (element konfiguracyjny Transmission Line Configuration, rys. 7a). Zamodelowana zgodnie z powyższym opisem linia może zostać wykorzystana przy analizie zjawisk dynamicznych podczas których istotny nacisk jest położony na analizę stanów przejściowych i pojawienie się wyższych harmonicznych w zamodelowanym fragmencie SEE.



Rys. 13. Nastawienia związane z geometrią słupa i rodzajami przewodów fazowych i odgromowych wprowadzone w oknie Tower_Universal 'Line Constans Manual Entry of XY Positions' elementu General Line Geometry Data input



Rys. 14. Obszar edycji linii napowietrznej 110 kV zawieszanej na słupach Serii B2 (element Transmission Line Configuration)

5. PODSUMOWANIE

Opisany w artykule program PSCAD/EMTDC do symulacji zjawisk występujących w systemach elektroenergetycznych jest stabilny numerycznie i wyposażony jest w intuicyjny interfejs graficzny przyjazny dla użytkownika. Jest on powszechnie wykorzystywany do symulacji zjawisk w SEE i można uznać modele w nim dostępne za wiarygodne. Dzięki dostępnym modelom linii napowietrznych o różnym stopniu skomplikowania, z powodzeniem może być wykorzystany do symulacji zjawisk dynamicznych w sieciach elektroenergetycznych. Można w nim tworzyć, zarówno projekty symulacyjne układów przesyłowych dość rozbudowane (odzworowujące większe fragmenty sieci elektroenergetycznej), dzięki zastosowaniu mniej dokładnych modeli linii napowietrznych, np. czwórników typu PI, jak i projekty mniej rozbudowane (odzworowujące mniejsze fragmenty sieci elektroenergetycznej), ale wykorzystujące dokładne modele linii (odzworowujące zjawiska falowe, geometrię słupów, średnice i rozmieszczenie przewodów zarówno fazowych, jak i odgromowych). Dzięki tym ostatnim modelom można dokładniej analizować zjawiska, takie jak stany przejściowe podczas procesów łączeniowych, czy też wpływ wyższych harmonicznych na zachowanie się sieci.

LITERATURA

1. Manitoba HVDC Research Centre Inc.: User's Guide on the use of PSCAD version 4.2.1, Winnipeg, 2006.
2. Manitoba HVDC Research Centre: PSCAD. Dostęp on-line (05-2015) <https://hvdc.ca/pscad/versions>.
3. Manitoba HVDC Research Centre: Introduction to PSCAD. Winnipeg, Canada, 2004.
4. Kacejko P., Machowski J.: Zwarcia w systemie elektroenergetycznym. Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa, 2002
5. Trąbka M.: Charakterystyki słupów krajowych 110, 220, 400 kV. Energoprojekt Kraków 1980.
6. Praca zbiorowa: Poradnik inżyniera elektryka. Tom 3. Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa, 1996.

Przyjęto do druku dnia 19.02.2016 r.

MODELLING OF OVERHEAD LINES BY THE PSCAD/EMTDC

Adam SMOLARCZYK, Waldemar CHMIELAK

ABSTRACT *The article describes one of the programs for the simulation of dynamic phenomena occurring in the power system. The program called PSCAD/EMTDC is commonly used to model the parts of the power system and phenomena occurring in them. The models of the overhead lines that can be used for modelling situations such as switching states of the line, short-circuit line have been presented. Overhead lines can be manually modelled using passive R, L, C elements by using prepared PI section elements, using prepared Bergeron Model, Frequency Dependent (Mode) Model, Frequency Dependent (Phase) Model. It was shown how to model a high-voltage line 110 kV with the use of type B2 towers by the Frequency Dependent (Phase) Model.*

Keywords: *overhead lines, transients in power system, power system modelling, PSCAD/EMTDC software*

Dr inż. Adam SMOLARCZYK ukończył studia wyższe na Wydziale Elektrycznym Politechniki Warszawskiej w 1995 roku uzyskując stopień magistra inżyniera. W 1995 roku podjął studia doktoranckie zakończone w 1999 roku obroną pracy doktorskiej. W grudniu 1999 roku rozpoczął pracę w Instytucie Elektroenergetyki. Aktualnie jest adiunktem na Wydziale Elektrycznym Politechniki Warszawskiej. Autor oraz współautor raportów z badań cyfrowych przekaźników elektroenergetycznych. Jego zainteresowania naukowe związane są z cyfrową elektroenergetyczną automatyką zabezpieczeniową i symulacją stanów dynamicznych w systemie elektroenergetycznym.





Dr inż. Waldemar CHMIELAK ukończył studia wyższe na Wydziale Elektrycznym Politechniki Warszawskiej w 1998 roku uzyskując stopień magistra inżyniera. W 2007 roku obronił pracę doktorską. W 2006 roku rozpoczął pracę w Katedrze Wysokich Napięć i Aparatów Elektrycznych, a od roku 2012 w Instytucie Elektroenergetyki. Od roku 2007 jest kierownikiem Laboratorium Aparatów Elektrycznych i Procesów Łączeniowych Instytutu Elektroenergetyki. Aktualnie jest adiunktem na Wydziale Elektrycznym Politechniki Warszawskiej. Autor oraz współautor artykułów i raportów z badań aparatów elektrycznych i procesów łączeniowych. Jego zainteresowania naukowe związane są z budową i właściwościami wysokonapięciowych aparatów elektrycznych oraz z badaniami eksperymentalnymi i szeroko rozumianą diagnostyką urządzeń elektrycznych.