



Tomasz ZDIARSKI

Politechnika Warszawska, Wydział Elektryczny, Katedra Wysokich Napięć i Aparatów Elektrycznych

## Wykorzystanie biblioteki Matlab-PLECS do symulacji przebiegów spowodowanych bezpośrednim wyładowaniem piorunowym w linię wysokiego napięcia

**Streszczenie.** W pracy przedstawiono przykład zastosowania biblioteki Matlab-PLECS do symulacji przebiegów spowodowanych bezpośrednim wyładowaniem piorunowym w linię wysokiego napięcia. Przykład oparto na modelu linii 110 kV. W modelu uwzględniono możliwe sprzężenia indukcyjne i pojemnościowe. Zaprezentowano możliwość współpracy biblioteki PLECS z innymi bibliotekami pakietu Matlab ze szczególnym uwzględnieniem współpracy z pakietem Simulink. Zaproponowany model może posłużyć również do badania wpływu zaburzeń piorunowych, łączeniowych bądź zwarciovych na parametry sygnałów wysokiej częstotliwości przesyłanych linią wysokiego napięcia.

**Abstract.** (Using of the Matlab-PLECS library for simulation of overvoltages caused by direct lightning strike at high voltage line). The paper shows the example of using the Matlab-PLECS library for simulation of surges caused by direct lightning strike at HV line. The example is based on model of 110 kV line. In the model possible inductive and capacitive couplings were considered. The possibility of cooperation of the PLECS library with different libraries of the Matlab packet was presented, especially with the Simulink. Proposed model can be used for investigation of influence of lightning disturbance, switching or short-circuits on parameters of high frequency signals transmitted by HV line.

**Słowa kluczowe:** przebiegi, symulacja, Matlab, PLECS, model łańcuchowy linii 110kV, wyładowanie piorunowe.

**Keywords:** overvoltages, simulation, Matlab, PLECS, catenary model of 100kV line, lightning discharge.

### Wstęp

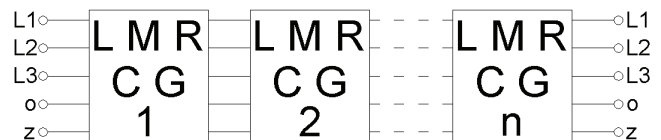
W warunkach eksploatacyjnych elektroenergetycznych linii przesyłowych występują dość często przypadki „trafienia pioruna” w linię. Podstawowym zabezpieczeniem linii WN przed skutkami oddziaływania piorunowego jest stosowanie jednego bądź dwóch przewodów odgromowych zawieszonych na odpowiedniej wysokości nad przewodami fazowymi na uziemionych konstrukcjach słupów. Zadaniem przewodów odgromowych jest przede wszystkim przejście wyładowania piorunowego tak, by nie trafiło ono w przewód fazowy i sprowadzenie ładunku do ziemi. Zarejestrowanie rozprzestrzeniania się zaburzeń piorunowych w linii, w którą trafił piorun okazuje się bardzo trudne. Trudno jest również przewidzieć, w którą linię i kiedy trafi piorun. Ewentualna rejestracja, z uwagi na fakt, że przebieg rejestrowanego sygnału zawiera składowe wysokiej częstotliwości i zastosowanie układów klasycznych dzielników wnosi duże błędy. Próba zamodelowania fizycznego linii przesyłowej i oddziałującego na nią wyładowania piorunowego również nie jest dobrym rozwiązaniem, gdyż powstaje problem „dysproporcji” między rzeczywistym wyładowaniem piorunowym, a otrzymanym sztucznie w laboratorium oraz linią o rzeczywistych parametrach i modelem fizycznym linii składającym się z cewek, kondensatorów i rezystorów. Właściwym postępowaniem, eliminującym wspomniane niedogodności, jest stworzenie modelu symulacyjnego, przy wykorzystaniu którego można badać różne przypadki zaburzeń (nie tylko piorunowych) w liniach elektroenergetycznych. Model taki, przy odpowiednio wykonanych obliczeniach parametrów linii i odpowiednim ich

odwzorowaniu w układzie symulacyjnym może dość wiernie odzwierciedlać zjawiska zachodzące w czasie wystąpienia zaburzenia.

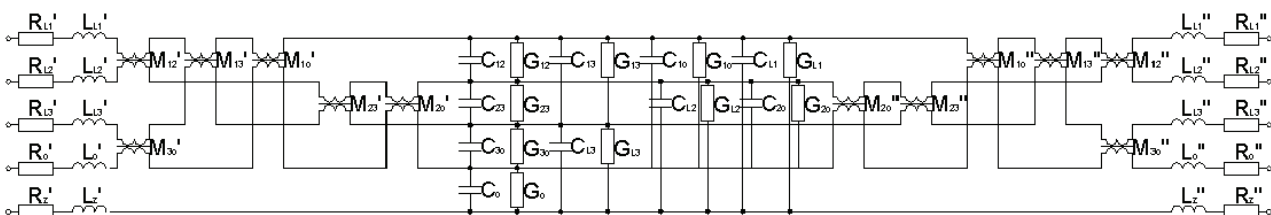
Linie WN posiadają różnego rodzaju zabezpieczenia, układy do transmisji danych (ETN) itp. Badania przeprowadzone na modelu linii mogą posłużyć np. do sprawdzania czy dany rodzaj zaburzenia może negatywnie wpływać na nastawy zabezpieczeń w linii, na transmisję sygnałów wysokiej częstotliwości w linii WN czy np. na jakość danych rejestrowanych w stacjach elektroenergetycznych.

### Model linii 110 kV

Ze względu na to, że przebiegi wyładowań atmosferycznych są przebiegami wysokoczęstotliwościowymi należy uwzględnić fakt, że są one zależne od czasu i odległości, a więc należy posługiwać się modelem o parametrach rozłożonych. W prezentowanej pracy zastosowano model obwodowy linii WN (110 kV). Linia jest modelowana przez kilka wielowrotników połączonych szeregowo tworząc łańcuch o postaci jak na rysunku 1.



Rys. 2. Model wielowrotnikowy przęsła linii 110 kV (typu „T”)



Rys. 1. Łańcuchowy model przęsła linii 110 kV

Przyjęto model przęsła o strukturze jak na rysunku 2. Każde przęsło odwzorowane jest przez dwa szeregowo połączone wielowrotniki. W modelu przęsła uwzględniono zarówno sprzężenia indukcyjne jak i pojemnościowe pomiędzy przewodami fazowymi i przewodami fazowymi a odgromowym. Model linii i symulacje wykonano w pakiecie Matlab-Simulink wykorzystując głównie elementy zawarte w bibliotece PLECS.

Do obliczeń przyjęto linię o następujących parametrach:

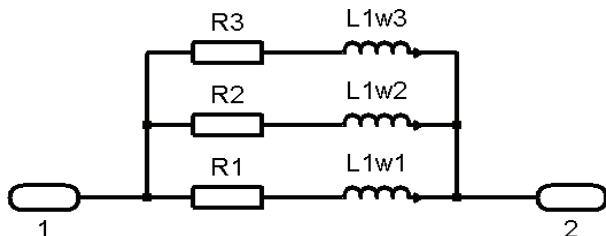
- odległość pomiędzy przęsłami 350 m,
- słupy stalowe serii B2,
- przewody fazowe 3xAFL-6 (240mm<sup>2</sup>),
- przewód odgromowy 1xAFL-1,7 (70mm<sup>2</sup>)
- izolatory liniowe długopniowe o wysokości 1,395 m (przyjęto napięcie przebicia 670kV),

Przyjęto następujące uproszczenia i założenia:

- przyjęto, że parametry elektryczne ( $R$ ,  $L$ ) gruntu nie zmieniają się ze zmianą częstotliwości sygnału;
- przyjęto rezystancje uzziemienia słupa 8  $\Omega$ ;
- nie uwzględniono nieliniowej charakterystyki pojemności i konduktancji linii wynikających ze zjawiska ulotu;
- założono, że linia ma 7 przęsła czyli 2.1 km;
- założono, że do linii podłączony jest symetryczny odbiór trójfazowy o współczynniku mocy  $\cos\phi=0,93$ ;
- linia zasilana jest z sieci sztywnej;
- linia nie jest na końcach zabezpieczona odgromnikami;
- założono że w czasie symulacji linia nie jest zasilana (napięcie sieci sztywnej jest 0 V).

### Modelowanie naskórkowości przewodów linii

Zjawisko naskórkowości, czyli zwiększanie rezystancji przewodnika i zmniejszanie jego indukcyjności wewnętrznej ze wzrostem częstotliwości sygnału, zamodelowano - zgodnie z [1] - jako model drabinkowy przedstawiony na rysunku 3. Model składa się z trzech połączonych równolegle gałęzi o odpowiednio dobranych elementach  $R$  i  $L$ . Jego zaletą jest to, że pozwala dokonywać symulacji w dziedzinie czasu z uwzględnieniem elementów ( $R$  i  $L$  przewodu), których parametry zmieniają się w dziedzinie częstotliwości sygnału.



Rys. 3. Model drabinkowy naskórkowości przewodu

### Model słupa

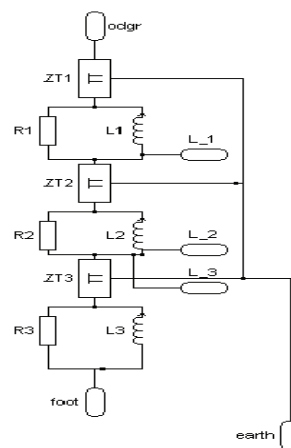
Z uwagi na fakt występowania zjawisk falowych w słupie (np. skutek uderzenia pioruna w wierzchołek słupa) słup zamodelowano - zgodnie z [2, 3, 4] - jako szeregowo połączenie odpowiednio obliczonych impedancji falowych i elementów  $R$ ,  $L$  (rys. 4). W modelu pominięto impedancje ramion słupa.

### Model izolatora

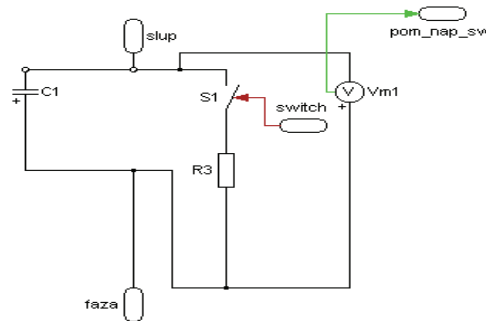
Do modelowania izolatora wybrano izolator liniowy długopniowy kompozytowy. Zgodnie z [7, 8] łańcuch izolatorów wiszących można przedstawić dla napięć o częstotliwości 50 Hz oraz napięć udarowych jako kondensatory o pojemności  $C$ . Dla izolatorów suchych i czystych prądy pojemnościowe przy tych napięciach znacznie przewyższają prądy przewodzenia. W modelu zastosowano zatem uproszczony układ składający się jedynie z pojemności  $C$  [8]. Mechanizm przebicia izolatora

przy przekroczeniu napięcia przebicia zamodelowano, zgodnie z rysunkiem 5, przez zbocznikowanie pojemności  $C$  łącznikiem połączonym szeregowo z rezystancją o niewielkiej wartości. Sterowanie załączaniem i wyłączeniem łącznika zamodelowano w Simulink'u zgodnie ze schematem na rysunku 6.

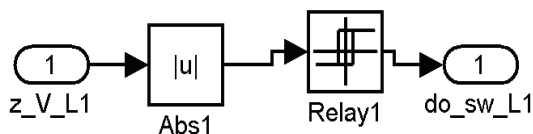
Jako element „decydujący” o zmianie stanu logicznego na wejściu łącznika wykorzystano element *Relay* z biblioteki Simulink, posiadający pętlę histerezy. Przy odpowiedniej wartości napięcia na pojemności  $C$  (tu 670 kV) przełącznik zwiera styki łącznika i utrzymuje ten stan dopóki wartość napięcia nie spadnie do wartości minimalnej (tu kilkadziesiąt V).



Rys. 4. Model falowy słupa



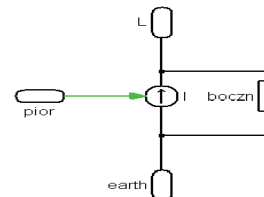
Rys. 5. Model izolatora linii 110 kV



Rys. 6 Sterowanie łącznikiem w modelu izolatora

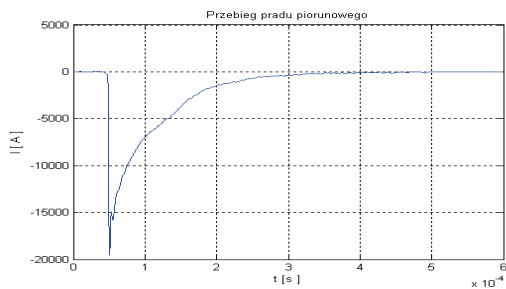
### Model wyładowania piorunowego

Wyładowanie piorunowe zamodelowano zgodnie z [3, 5] jako sterowane źródło prądowe zbocznikowane rezystancją 400 $\Omega$ . Model przedstawiono na rysunku 7.



Rys. 7. Model wyładowania piorunowego

Jako wymuszenie wykorzystano przebieg impulsowy o kształcie rzeczywistego przebiegu piorunowego przedstawionego na rysunku 8. Przebieg jest zarejestrowanym rzeczywistym prądem piorunowym (odfiltrowano składowe o częstotliwościach > 20 MHz).



Rys. 8. Przebieg zarejestrowanego prądu piorunowego

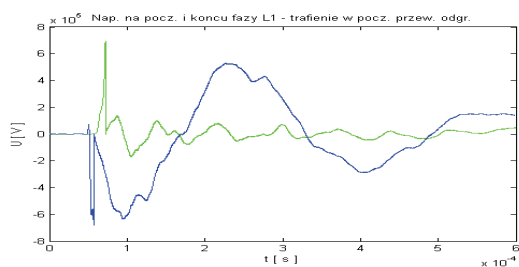
### Symulacja

Dla zwiększenia czytelności wyników obliczeń założono, że badana linia jest podłączona do sieci sztywnej, ale napięcie przyłożone do faz linii wynosi 0 V. Jedynym wymuszeniem jest zatem wyładowanie piorunowe.

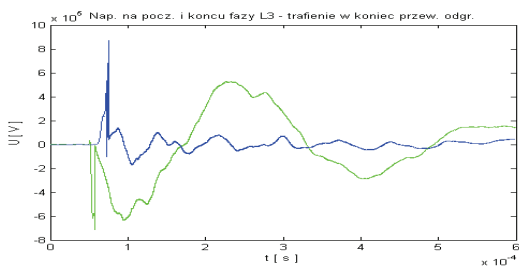
Założono następujące warianty badań:

- piorun trafia w środek przewodu odgromowego;
- piorun trafia w pierwsze przęsło (od strony sieci) w przewód odgromowy;
- piorun trafia w ostatnie przęsło (od strony odbioru) w przewód odgromowy;
- piorun trafia w środek przewodu fazowego (rozpatrzono trafienie pioruna w fazę L2);
- piorun trafia w pierwsze przęsło przewodu fazowego (rozpatrzono trafienie pioruna w fazę L2);
- piorun trafia w ostatnie przęsło przewodu fazowego (rozpatrzono trafienie pioruna w fazę L2);
- piorun trafia w wierzchołek środkowego słupa;
- piorun trafia w wierzchołek pierwszego słupa;
- piorun trafia w wierzchołek ostatniego słupa;

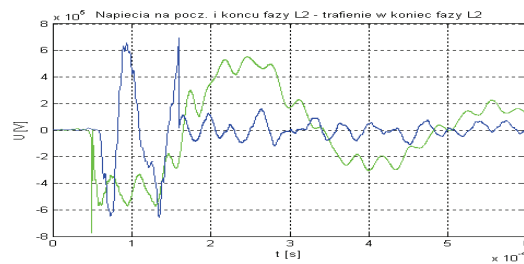
Wyniki obliczeń przedstawiono na rysunkach od 9 do 14, w postaci przebiegów napięć poszczególnych faz na początku i końcu linii. Napięcia na początku i końcu odpowiednich faz przedstawiono na jednym wykresie (kolorem zielonym oznaczono przebieg napięć na początku a niebieskim na końcu linii).



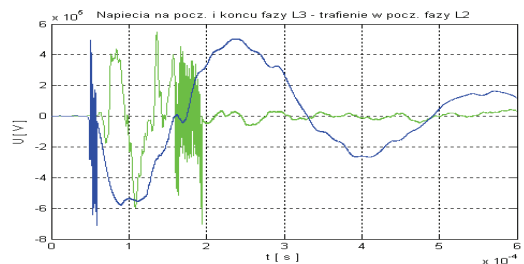
Rys. 9. Przebieg napięcia na początku i końcu fazy L1 w przypadku trafienia pioruna w pierwsze przęsło przewodu odgromowego



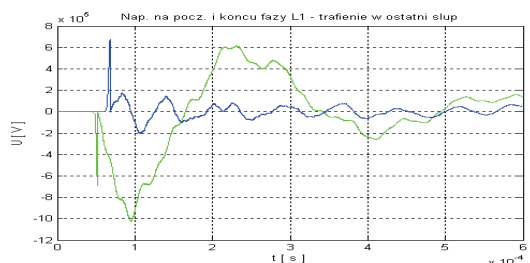
Rys. 10. Przebieg napięcia na początku i końcu fazy L3 w przypadku trafienia pioruna w ostatnie przęsło przewodu odgromowego



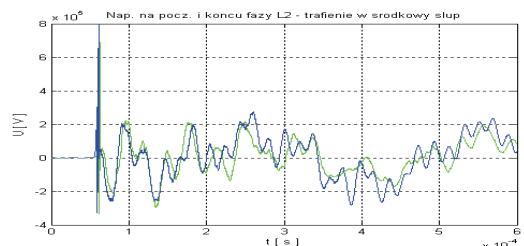
Rys. 11. Przebieg napięcia na początku i końcu fazy L2 w przypadku trafienia pioruna w ostatnie przęsło przewodu fazowego L2



Rys. 12. Przebieg napięcia na początku i końcu fazy L3 w przypadku trafienia pioruna w pierwsze przęsło przewodu fazowego L2



Rys. 13. Przebieg napięcia na początku i końcu fazy L1 w przypadku trafienia pioruna w wierzchołek ostatniego słupa



Rys. 14. Przebieg napięcia na początku i końcu fazy L2 w przypadku trafienia pioruna w wierzchołek środkowego słupa

### Wnioski

Na podstawie przeprowadzonych symulacji można stwierdzić, że:

- w modelu uwzględniono sprzężenia indukcyjne i pojemnościowe. Trafienie pioruna np. w przewód fazowy L2 lub w przewód odgromowy powoduje, że wskutek tych sprzężeń pojawiają się przebiegi na pozostałych fazach i przewodzie odgromowym;
- na przebiegach czasowych napięć można zaobserwować moment, w którym następuje przebicie izolatora; przy uwzględnieniu w modelu linii jej rzeczywistych parametrów, w szczególności rezystancji przewodów następuje wyraźne tłumienie wyładowania piorunowego. Jest to szczególnie widoczne w przypadku uderzenia pioruna w środek przewodu fazowego);
- pomimo, że piorun uderza w przewód odgromowy powstają dość duże przepięcia w przewodach fazowych, głównie wskutek uwzględnienia w modelu sprzężeń indukcyjnych i pojemnościowych.

Warto podkreślić łatwość współpracy biblioteki PLECS z biblioteką Simulink. Model wykonany w bibliotece PLECS

można w dość prosty sposób „wysterować” używając elementów biblioteki Simulink. Dodatkową zaletą biblioteki PLECS, w stosunku do równoważnej jej biblioteki SimPowerSystems, jest możliwość modelowania elementów nieliniowych. PLECS pozwala również na wykonywanie obliczeń ze stałym krokiem całkowania.

#### LITERATURA

- [1] Sen B.K., Alto P., Wheeler R.L., Jose S., Skin effects models for Transmission Line Structures using Generic SPICE Circuit Simulators
- [2] Yen C. S., Fazarinc Z., Wheeler R. L., Time Domain Skin Effect model for Transient Analysis of Lossy Transmission Lines, *Proceedings of the IEEE*, 70, 750-757, 1982
- [3] Ishii M., Kawamura T., Kouno T., Osaki E., Murovani K., Higuchi T., Multistory transmission Tower model for lightning surge analysis, *IEEE Trans. on PWRD*, Vol. 6, No. 3, July 1991, 1327-1335
- [4] Wagner C.F., Hileman A.R., A new approach to calculation of lightning performance of transmission lines III- A simplified method: Stroke to tower. *AIEE Trans. on PAS*, Vol. 79, 1960, 589-603
- [5] Matsumoto Y., Sakuma O., Shinto K., Saiki M., Wakai T., Saiki T., Nagasaki H., Motoyama H., Ishii M., Measurement of lightning surges on test transmission line equipped with arresters struck by natural and triggered lightning, *IEEE Trans. on PWRD*, Vol. 11, No. 2, April 1996, 996-1002
- [6] IEEE Modeling and Analysis of System Transients Working Group, Modeling guidelines for fast front transient, *IEEE Trans. on PWRD*, Vol. 11, No. 1, January 1996, 493-506
- [7] Flisowski Z., Kuźmiński M., Łoboda M., Rogulski Z., Ślusarek S., Laboratorium techniki wysokich napięć, *Oficyna wydawnicza Politechniki Warszawskiej*, Warszawa, 2006
- [8] Corbett J., Dudurych I., Gallagher T., Val Escudo M., Towards the improvements of the lightning performance of 110 kV unshielded overhead lines, *International Conference on Lightning Protection*, Cracow, Poland, September 2-6, 2002

**Autor:** mgr inż. Tomasz Zdziarski, Politechnika Warszawska, Katedra Wysokich Napięć i Aparatów elektrycznych, e-mail: [Tomasz.Zdziarski@ien.pw.edu.pl](mailto:Tomasz.Zdziarski@ien.pw.edu.pl)