

MODELOWANIE I ANALIZA PRZESKOKU ODWROTNEGO W UKŁADACH IZOLACYJNYCH NAWIETRZNYCH LINII WYSOKIEGO NAPIĘCIA

Rafał TARKO, Mariusz BENESZ, Wiesław NOWAK

Akademia Górniczo-Hutnicza, Katedra Elektrotechniki i Elektroenergetyki, Al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków

tel: (12) 617 36 53 fax: (12) 634 57 21

e-mail: rafal.tarko@agh.edu.pl; mariusz.benesz@agh.edu.pl; wieslaw.nowak@agh.edu.pl

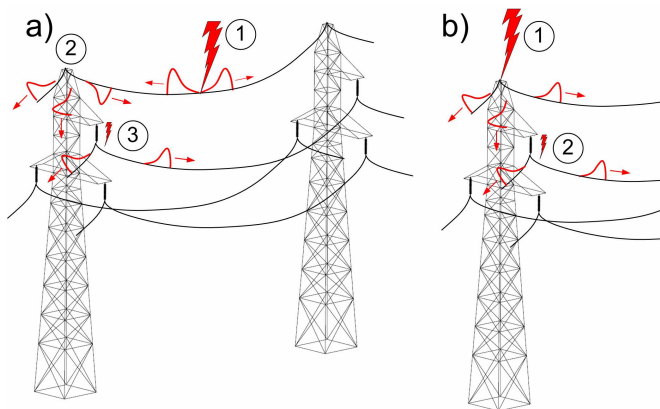
Streszczenie: Artykuł dotyczy modelowania i analizy przeskoku odwrotnego w układach izolacyjnych napowietrznych linii o napięciu 110 kV i wyższym. Przedstawione wyniki symulacji efektów falowych, wywołanych uderzeniem pioruna w rozpatrywane konstrukcje wsporcze mają na celu określenie warunków i skutków występowania przeskoku odwrotnego. Analiza obejmuje trzy typy konstrukcji wsporczych: B2P (110 kV), H52P (220 kV) oraz Y25P (400 kV). Symulacje przeprowadzone zostały przy pomocy programu *Electromagnetic Transients Program - Alternative Transients Program (EMTP-ATP)*.

Słowa kluczowe: przeskok odwrotny, modelowanie, *EMTP-ATP*.

1. WPROWADZENIE

W układach elektroenergetycznych elementami najbardziej narażonymi na wyładowania atmosferyczne są linie napowietrzne. Obok zawadości ochrony odgromowej i wynikającej z niej możliwości uderzenia pioruna w przewód fazowy linii, należy rozważyć możliwość wystąpienia zjawiska przeskoku odwrotnego.

Zjawisko przeskoku odwrotnego na izolacji linii napowietrznej wysokiego napięcia może wystąpić w przypadku bezpośredniego wyładowania atmosferycznego w przewód odgromowy lub w konstrukcję wsporcą (rys.1). W takiej sytuacji elementy te uzyskują znaczne potencjały względem ziemi oraz przewodów fazowych.



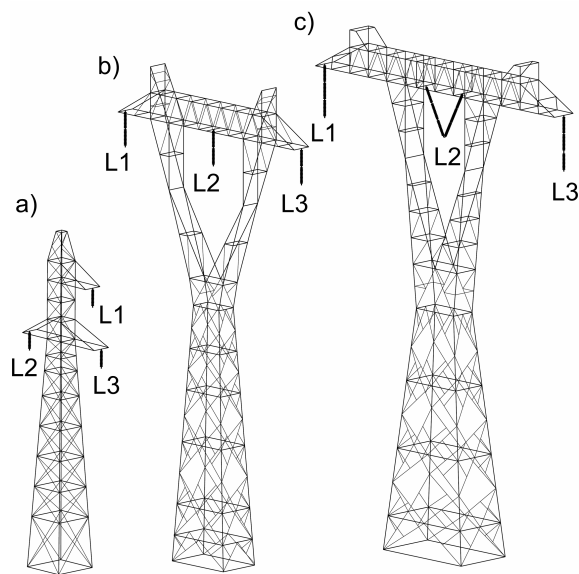
Rys. 1. Przypadki wystąpienia przeskoku odwrotnego: a) uderzenie pioruna w przewód odgromowy; b) uderzenie pioruna w konstrukcję wsporcą.

2. MODEL ANALIZOWANEGO UKŁADU

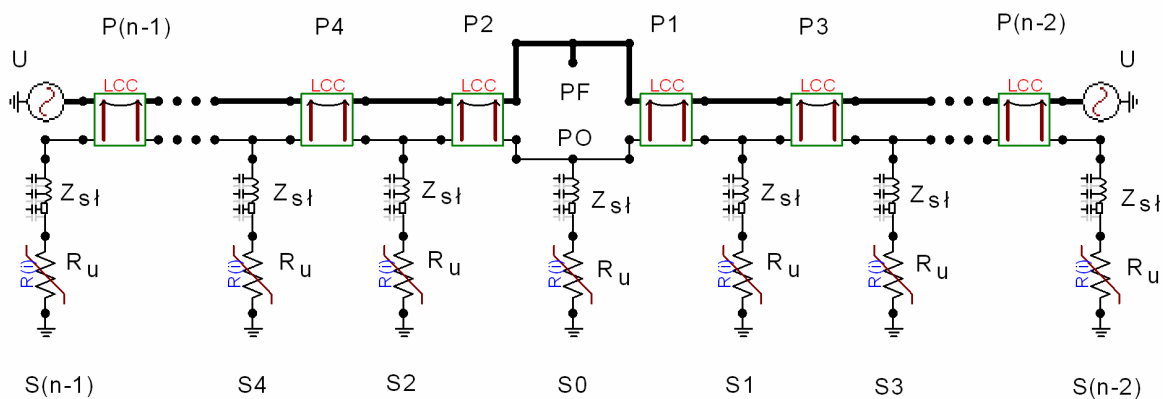
Dla analizy zjawiska przeskoku odwrotnego na izolacji linii napowietrznej należy opracować model matematyczny układu złożony z modeli cząstkowych odzwierciedlających właściwości poszczególnych elementów konstrukcyjnych oraz istotne z punktu widzenia prowadzonej analizy zjawiska fizyczne zachodzące w układzie.

W artykule przedstawiono opracowany dla programu *EMTP-ATP* model układu do analizy przeskoku odwrotnego. W układzie tym można wyróżnić następujące elementy składowe:

- model przęsła linii napowietrznej uwzględniający efekty falowe powstające przy wyładowaniu atmosferycznym (*model Semlyena*) [1],
- model impedancji falowej rozpatrywanych konstrukcji wsporczej (rys. 2),
- model nieliniowej rezystancji uziomu,
- model wytrzymałości udarowej, który opiera się na metodzie rozwoju lidera *LDM* [2,3],



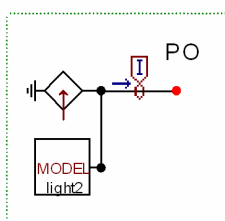
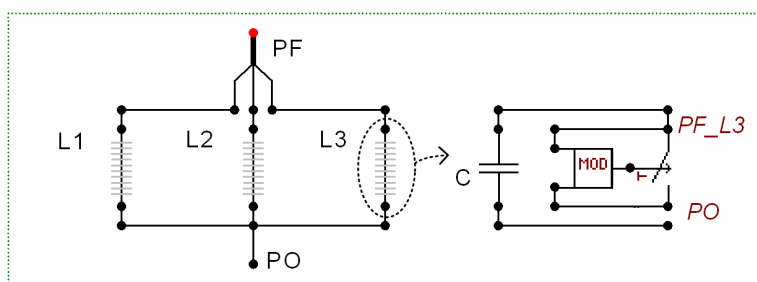
Rys. 2. Rozpatrywane konstrukcje wsporcze: a) B2P (110 kV); b) H52P (220 kV); c) Y25P (400 kV).



Model wytrzymałości ości udarowej

Model pioruna

Wykaz oznaczeń:



- PF - przewód fazowy,
- PO - przewód odgromowy,
- Zsł - impedancja falowa konstrukcji wsporczej,
- Ru - rezystancja uziomu,
- Pi - numer przęsła,
- Si - numer konstrukcji wsporczej.

Rys. 3. Model n -stłupowy w programie EMTP-ATP.

- model pioruna, który odwzorowano za pomocą udarowego źródła prądowego o wklęsłym czole i zmiennej wartości maksymalnej [2].

Model układu do badania przeskoku odwrotnego, opracowany w preprocesorze graficznym ATPDraw przedstawiono na rysunku 3.

3. WYNIKI SYMULACJI

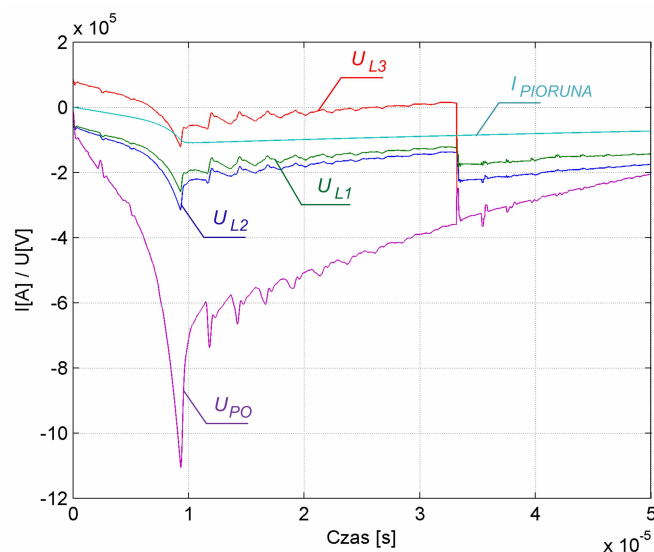
Celem symulacji jest ocena warunków i wpływu różnych parametrów na wystąpienie przeskoku odwrotnego na wybranych konstrukcjach wsporczych.

Obliczenia przeprowadzono przy następujących założeniach:

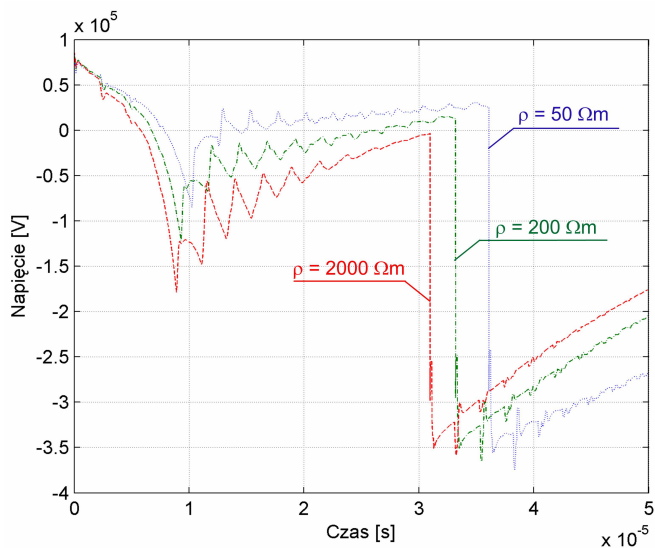
- uwzględnieniu napięcia fazowego $U_f = 89,81$ kV, $U_f = 179,63$ kV i $U_f = 326,60$ kV odpowiednio dla konstrukcji wsporczej typu B2P, H52P i Y25P,
- doborze fazy trójfazowych źródeł napięcia przemiennego, dołączonych do końcowych przęseł rozpatrywanego układu, w taki sposób, aby narażenie układu izolacyjnego było największe (wartość prądu powodującego wystąpienie przeskoku odwrotnego była najmniejsza),
- model wytrzymałości udarowej uwzględniano tylko na konstrukcji wsporczej, do której następowało wyładowanie atmosferyczne,
- rozważono układ jedno-, trój-, pięcio- i siedmiostłupowy, uwzględniając znamionowe długości przęseł dla poszczególnych konstrukcji wsporczych,
- obliczenia przeprowadzono dla różnych wartości rezystywności gruntu oraz rezystancji uziemienia,
- symulacje dotyczyły bezpośredniego uderzenia pioruna w konstrukcję wsporczą linii napowietrznej (w punkcie PO na rysunku 3) w chwili $t = 0$ s.

Wybrane wyniki przeprowadzonych symulacji przedstawiono na rysunkach 4 – 12, przy czym:

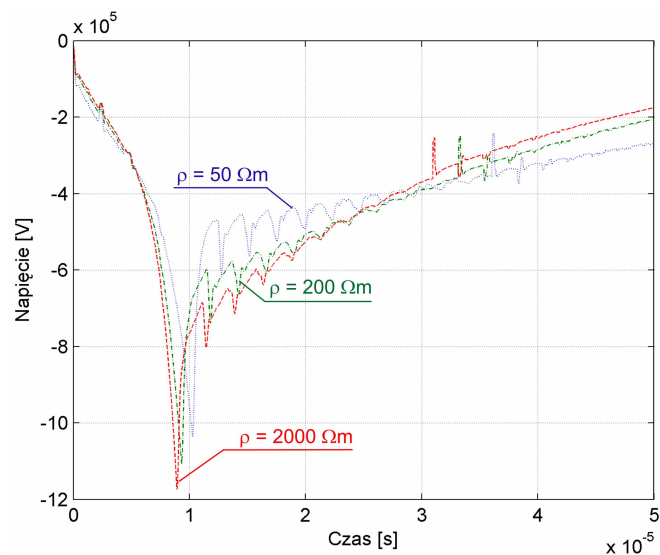
- na rysunku 4 przedstawiono przykładowe przebiegi napięć na tle przebiegu prądu pioruna po wystąpieniu przeskoku odwrotnego (układ 7-stłupowy, $\rho = 200 \Omega\text{m}$),
- rysunki 5 – 7 przedstawiają wpływ rezystywności gruntu na przebieg napięcia fazy, na której wystąpił przeskok odwrotny (układ 7-stłupowy),
- rysunki 8 – 10 przedstawiają wpływ rezystywności gruntu na przebieg napięcia przewodu odgromowego, podczas wystąpienia przeskoku odwrotnego (układ 7-stłupowy),
- na rysunku 11 przedstawiono wpływ rezystywności gruntu oraz liczby konstrukcji wsporczych na wystąpienie przeskoku odwrotnego (wartość minimalnego prądu),
- na rysunku 12 przedstawiono przebieg rozwoju lidera w funkcji wartości prądu pioruna.



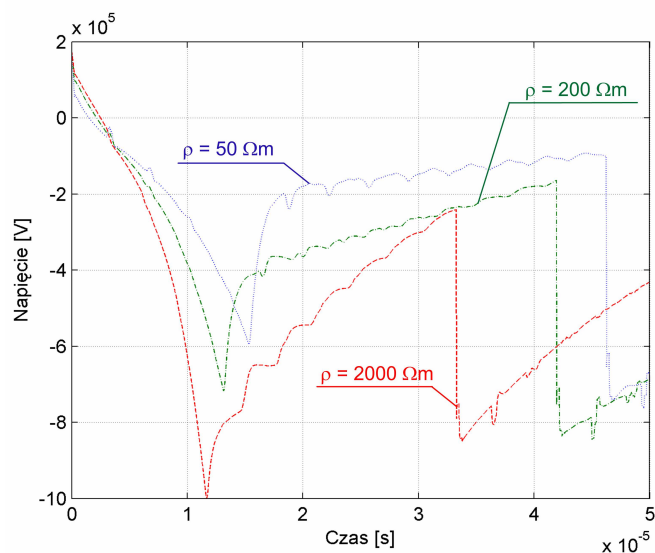
Rys. 4. Przebiegi napięć i prądu podczas wystąpienia przeskoku odwrotnego na konstrukcji wsporczej B2P.



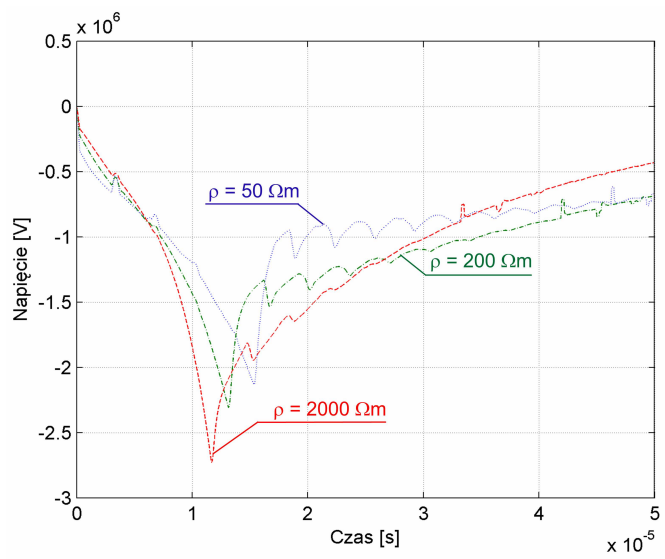
Rys. 5. Przebiegi napięć fazy $L3$ (konstrukcja wsporcza B2P) w funkcji rezystywności gruntu.



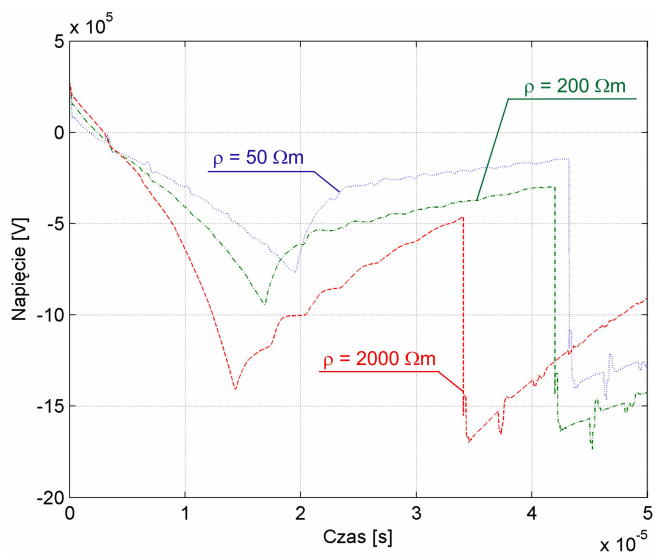
Rys. 8. Przebiegi napięć przewodów odgromowych (konstrukcja wsporcza B2P) w funkcji rezystywności gruntu.



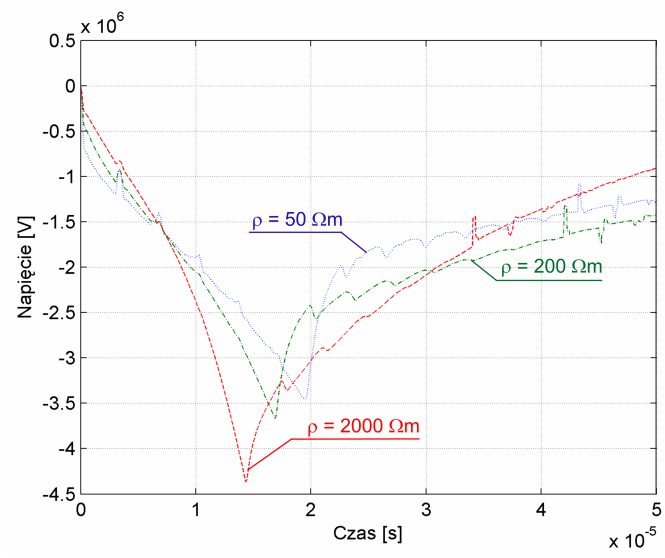
Rys. 6. Przebiegi napięć fazy $L1$ (konstrukcja wsporcza H52P) w funkcji rezystywności gruntu.



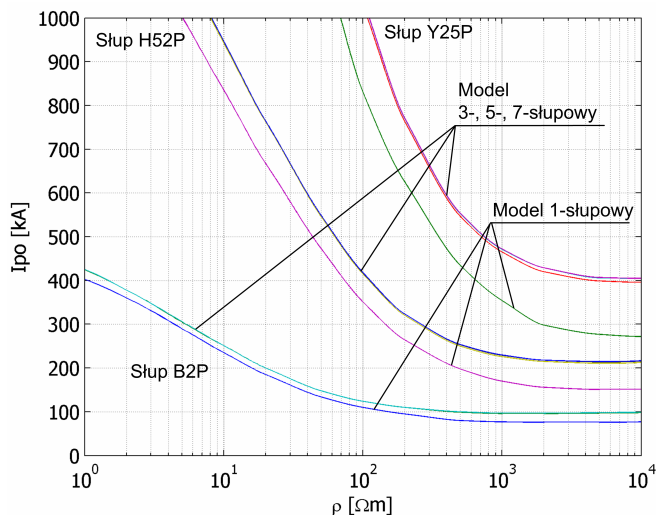
Rys. 9. Przebiegi napięć przewodów odgromowych (konstrukcja wsporcza H52P) w funkcji rezystywności gruntu.



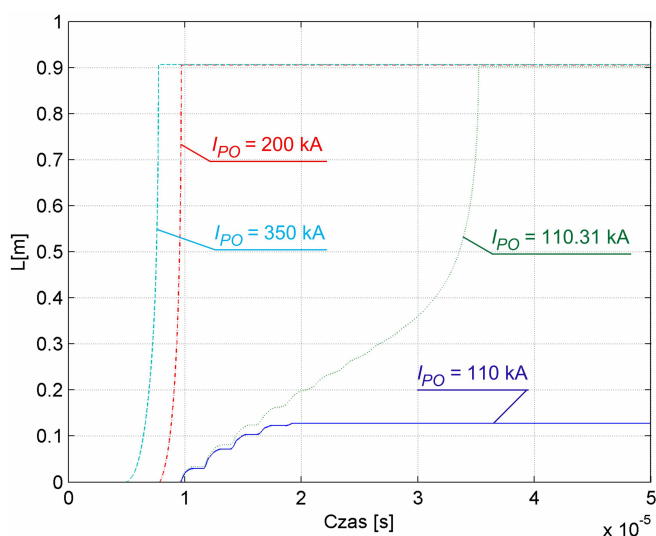
Rys. 7. Przebiegi napięć fazy $L1$ (konstrukcja wsporcza Y25P) w funkcji rezystywności gruntu.



Rys. 10. Przebiegi napięć przewodów odgromowych (konstrukcja wsporcza Y25P) w funkcji rezystywności gruntu.



Rys. 11. Zależność minimalnego prądu powodującego przeskok odwrotny (I_{PO}) w funkcji rezystywności gruntu (ρ) i liczby konstrukcji wsporczych.



Rys. 12. Rozwój lidera podczas wystąpienia przeskoku odwrotnego na konstrukcji wsporczej B2P dla wybranych wartości I_{PO} (układ 7-słupowy, $\rho = 100 \Omega m$).

Istotnym zagadnieniem jest ustalenie odpowiedniej liczby konstrukcji wsporczych oraz pręseł, niezbędnych do właściwego odwzorowania zjawisk falowych. Z przeprowadzonych analiz dla układów z zmienną liczbą słupów n wynika, że zasadnicza różnica jakościowa w przebiegach narażeń występuje pomiędzy układem 1-słupowy oraz 3-słupowym. Z kolei dla liczby $n \geq 3$ różnice te są głównie o charakterze ilościowym, a dla $n = 5$ oraz $n = 7$ są one praktycznie do pominięcia. Analizowanie przeskoku odwrotnego w układzie 7-słupowym, niezależnie od poziomu napięcia znamionowego linii, zapewnia dostateczną dokładność wy-

ników, a dalsze zwiększanie ilości rozważanych konstrukcji wsporczych nie powoduje znacznych zmian.

Fazą najbardziej narażoną na wystąpienie przeskoku odwrotnego (rys. 4) jest faza najdalej oddalona od punktu, w którym dochodzi do wyładowania atmosferycznego. Wynika to z tego, że czym dalej od miejsca uderzenia pioruna tym mniejszy potencjał indukuje się w danym przewodzie fazowym, a to skutkuje większą różnicą potencjałów między przewodami fazowymi i odgromowymi.

Cechą charakterystyczną przeskoku odwrotnego jest to, że występuje on po przekroczeniu pewnej minimalnej wartości prądu pioruna I_{POmin} . Na rysunku 12 przedstawiono rozwój lidera w czasie dla różnych wartości prądu pioruna (konstrukcja wsporcza B2P). Dla rozpatrywanej konstrukcji wartość $I_{POmin} = 110,31$ kA. Dla wartości $I_{PO} < I_{POmin}$ zjawisko przeskoku odwrotnego nie występuje, zaś dla $I_{PO} > I_{POmin}$ do zjawiska przeskoku odwrotnego dochodzi szybciej.

4. PODSUMOWANIE

Zagadnienia związane z narażeniami przepięciowymi w napowietrznych układach izolacyjnych należą do istotnych badań w elektroenergetyce. Z przyczyn o charakterze technicznym, eksploatacyjnym i ekonomicznym na chwilę obecną przy analizie zjawisk fizycznych tego typu duże znaczenie mają intensywnie rozwijane metody teoretyczne. Metody te, wykorzystując komputerowe techniki obliczeniowe, pozwalają analizować zjawiska wielokrotnych odbić, które są wywołane wyładowaniami atmosferycznymi.

Analiza przeskoku odwrotnego w układach izolacyjnych napowietrznych linii wysokiego napięcia jest problemem złożonym zarówno pod względem matematycznym, jak i numerycznym. Program EMTP-ATP umożliwia efektywne rozwiązywanie tego typu zjawisk fizycznych, zachodzących w izolacyjnych układach elektroenergetycznych.

5. BIBLIOGRAFIA

1. Alternative Transients Program. *Theory Book*. Canadian/American EMTP User Group, 1987-92.
2. CIGRÉ Working Group 33-01 of Study Committee 33 Overvoltages and Insulation Coordination, *Guide to procedures for estimating the lightning performance of transmission lines*, CIGRÉ Publication No. 63, 1991.
3. Nowak W.: *Identyfikacja narażeń przepięciowych układów elektroenergetycznych wysokich napięć przy wyładowaniach atmosferycznych*, Kraków 2005, ISSN 0867-6631.

MODELLING AND ANALYSIS OF BACK FLASHOVER IN OVERHEAD TRANSMISSION LINES

Key-words: back flashover, modelling, EMTP-ATP

In article modelling and analysis of back flashover in the overhead line insulation with a voltage of 110 kV and higher are presented. Back flashover across line isolators is one of the main causes of transmission line outages, even when ground wires are used. The simulation of this phenomenon can be useful to determine the consequences of the occurrence of back flashover. Simulations involved three types of tower: B2P (110 kV), H52P (220 kV) and Y25P (400 kV). All simulation cases are made in simulation software *The Electromagnetic Transients Program - Alternative Transients Program (EMTP-ATP)*.