

XVI Seminarium
ZASTOSOWANIE KOMPUTERÓW W NAUCE I TECHNICIE' 2006
Oddział Gdański PTETiS
Referat Nr 20

**MODELOWANIE ULOTU ELEKTRYCZNEGO W ANALIZIE
NARAŻEŃ PRZEPIĘCIOWYCH UKŁADÓW
ELEKTROENERGETYCZNYCH**

Wiesław NOWAK, Rafał TARKO

Akademia Górniczo-Hutnicza, Katedra Elektroenergetyki, Al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków
tel: (012) 617 28 91 fax: (012) 634 57 21 e-mail: rtarko@agh.edu.pl

Przebiecia atmosferyczne, które stanowią dla izolacji rozdzielni najbardziej niekorzystne narażenia, są konsekwencją bezpośrednich wyładowań do konstrukcji wsporczych lub przewodów linii. Ulot elektryczny w otoczeniu przewodów linii przesyłowych wysokich napięć może wpływać na poziom przepięć docierających do stacji elektroenergetycznych. W artykule przedstawiono model ulotu elektrycznego dla analizy propagacji fal przepięciowych w liniach elektroenergetycznych oraz wyniki badań przepięć w stacji elektroenergetycznej, otrzymane przy zastosowaniu programu symulacyjnego EMTP – ATP.

1. WSTĘP

Zjawisko ulotu elektrycznego w Technice Wysokich Napięć, jest przedmiotem badań od wielu już lat. Badania te mają zarówno charakter poznawczy – w odniesieniu do mechanizmów fizykalnych zjawisk w polu elektrycznym, jak i aplikacyjny – związany z projektowaniem oraz eksploatacją układów izolacyjnych wysokich i najwyższych napięć.

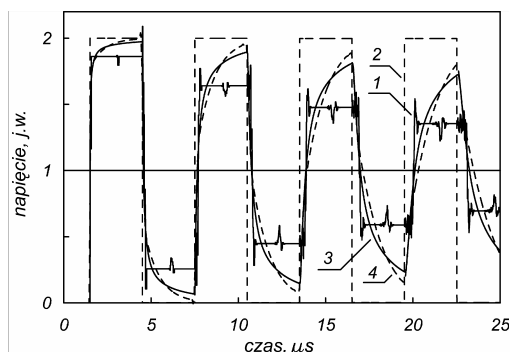
Jednym z aktualnych kierunków badawczych jest także modelowanie matematyczne ulotu elektrycznego. Nowe możliwości w tej dziedzinie wynikają przede wszystkim z rozwoju programowej realizacji stosownych algorytmów komputerowych. W odniesieniu do układów elektroenergetycznych wysokich i najwyższych napięć dotyczy to propagacji fal przepięciowych, w szczególności wytworzonych przez bezpośrednie uderzenia pioruna. Kształty przepięć oraz wartości charakterystycznych parametrów (jak wartość szczytowa czy stromość narastania), zależne są nie tylko od prądu pioruna, ale również od czynników wynikających z konstrukcji linii napowietrznych. Należy do nich zaliczyć również ulot elektryczny, który jest przyczyną deformacji i tłumienia fal przepięciowych.

W artykule przedstawiono opracowany dla programu *EMTP – ATP* (ElectroMagnetic Transients Program – Alternative Transients Program) model ulotu elektrycznego dla analizy propagacji fal przepięciowych w układach elektroenergetycznych wysokich napięć. Jego istotą jest wykorzystanie koncepcji pojemności dynamicznych oraz przekształcenie

klasycznego modelu linii długiej do postaci różnicowej. Rozłożone parametry ulotu elektrycznego odwzorowane są wówczas jako obwody o stałych skupionych w wybranych węzłach linii. W celu rozszerzenia zakresu zastosowań programu *EMTP – ATP* i uzyskania pełnego wspomaganie modelowania rozważanych zjawisk, opracowano i zastosowano w badaniach specjalistyczny program komputerowy *CORONA*.

2. RÓŻNICOWY MODEL LINII Z ULOTEM ELEKTRYCZNYM

Dla szybkozmiennych przebiegów przepięć atmosferycznych linie napowietrzne rozpatrywane są jako wieloprzewodowe linie długie, których modele opracowywane są dla n wzajemnie sprzężonych pętli ziemnopowrotnych [1]. Istotnym problemem jest zależność parametrów obwodów ziemnopowrotnych od częstotliwości, co powoduje, że modele o stałych parametrach nie są adekwatne w analizie stanów przejściowych. Zmiennoczęstotliwościowe modele linii tworzone są z uwzględnieniem zależności jednostkowych parametrów *RLGC* od częstotliwości, a tym samym zależności impedancji falowej w dziedzinie modów propagacji [2, 3]. Odpowiednie charakterystyki częstotliwościowe są podstawą syntezy równoważnego obwodu zastępczego o własnościach zbliżonych do układu dynamicznego określonego charakterystykami teoretycznymi. Zasadnicze znaczenie posiadają procedury syntezy wykorzystujące aproksymację A. Semlyena [4] w dziedzinie czasu oraz procedury oparte na aproksymacji J.R. Martiego [5] w dziedzinie częstotliwości.



Rys.1. Odpowiedź jednostkowa jednorodowej linii przesyłowej o napięciu 400 kV na słupach typu Y25P i długości 450 metrów: 1 – linia długa o parametrach dla częstotliwości 400 kHz, 2 – linia długa bezstratna ($f \rightarrow \infty$), 3 – model J.R. Martiego, 4 – model A. Semlyena

Na rysunku 1 przedstawiono własności dynamiczne modeli stało- i zmiennoczęstotliwościowych odcinka jednorodowej linii 400 kV o długości 450 metrów [3]. Przebiegi napięć na końcu odcinka, które stanowią odpowiedź jednostkową na wymuszenie skokowe napięcia w fazie A na jego początku, różnią się między sobą pod względem ilościowym i jakościowym. Najbardziej ściśle są modele zmiennoczęstotliwościowe, przy czym nieznaczne różnice pomiędzy przebiegami przemawiają za aproksymacją Semlyena ze względu na mniejszą złożoność obliczeń.

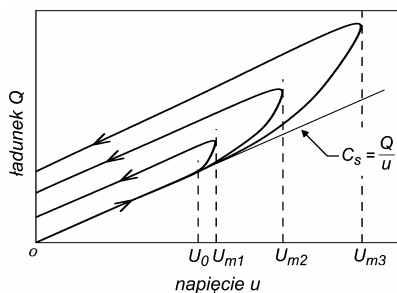
Gdy potencjał przewodu przekracza wartość napięcia początkowego ulotu U_0 , w jego otoczeniu wytwarzany jest ładunek przestrzenny. Zależności wypadkowego ładunku Q ,

stanowiącego sumę ładunku na powierzchni i w przestrzeni wokół przewodu, od wartości chwilowej u przyłożonego napięcia mają charakter pętlic (np. [6]) – rysunek 2.

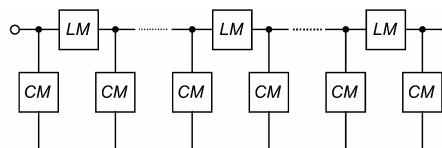
Widoczna na rysunku 2 histereza związana jest z opóźnieniem formowania ładunku przestrzennego względem zmiany napięcia. Poniżej wartości U_0 ładunek Q jest wyłącznie ładunkiem powierzchniowym, określonym przez pojemność geometryczną C_s . Dynamiczne charakterystyki $Q = f(u)$ są makroskopowym opisem ulotu elektrycznego i stanowią podstawę jego uwzględnienia w modelu linii przez wykorzystanie pojemności dynamicznej [2]:

$$C_d = \frac{dQ}{du} \quad (1)$$

Uzasadnieniem jest, że ładunek przestrzenny w otoczeniu przewodu zwiększa pozornie jego promień, co przyczynia się do wzrostu pojemności własnych i wzajemnych linii.



Rys.2. Dynamiczne zależności ładunku Q od chwilowej wartości napięcia u : U_0 – wartość napięcia początkowego ulotu, U_m – wartość szczytowa udaru napięcia, C_s – pojemność geometryczna



Rys.3. Linia długa z ulotem reprezentowanym przez obwody o stałych skupionych: LM – model liniowy o parametrach stałych bądź zależnych od częstotliwości, CM – model ulotu reprezentowany przez nieliniowy obwód o stałych skupionych

Modelowanie ulotu elektrycznego z wykorzystaniem pojemności dynamicznej wymaga modyfikacji macierzy pojemności linii, w której wyodrębnia się macierz pojemności geometrycznych $[C_s]$ oraz macierz pojemności z elementami zależnymi od napięcia $[C(u)]$:

$$[C_d] = [C_s] + [C(u)] \quad (2)$$

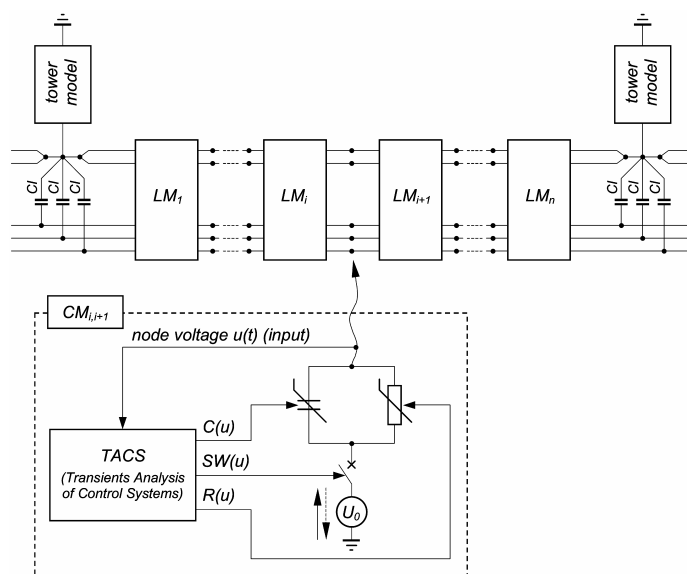
co prowadzi do nieliniowego modelu linii długiej. W wyniku tego, nie jest możliwa transformacja modelu do przestrzeni modów propagacji, jak i synteza modelu o parametrach zależnych od częstotliwości. Model linii należy więc przekształcić do postaci różnicowej (na przykład [2, 3, 7, 8, 9]), w którym rozłożone parametry ulotu elektrycznego reprezentowane są w wybranych węzłach w postaci obwodu o stałych skupionych – rysunek 3. Model różnicowy wymaga dodatkowego podziału wieloprzewodowych linii długich na odcinki, pomiędzy którymi znajdują się obwody o parametrach skupionych odwzorowujące dynamiczne charakterystyki ulotu elektrycznego.

Dokładność rozwiązania modelu różnicowego, zależna jest od liczby odcinków LM powstających w wyniku podziału linii. Większa dokładność wymaga gęstszego podziału i większej liczby elementów reprezentujących ulot. Modelowanie wpływu ulotu elektrycznego na propagację fal przepięciowych, jest więc zadaniem złożonym pod względem

matematycznym oraz numerycznym, co wpływa również na komplikację i wydłużenie czasu symulacji. Podstawowym programem komputerowym, umożliwiającym odwzorowanie układów elektroenergetycznych w warunkach występowania szybkozmiennych zjawisk przejściowych, jest obecnie program *EMTP – ATP*.

3. IMPLEMENTACJA MODELU ULOTU W PROGRAMIE *EMTP – ATP*

Fragment przykładowego schematu modelu przedstawiono na rysunku 4. Dotyczy on przęśla jednotorowej linii przesyłowej, która wyposażona jest w trzy przewody fazowe oraz dwa przewody odgromowe. Przewody w przęśle linii podzielone są na n odcinków LM , które odwzorowane są jako wieloprzewodowe linie długie o parametrach zależnych od częstotliwości. Do węzłów pomiędzy odcinkami LM przyłączane są bloki CM , które zawierają następujące elementy: połączony równolegle nieliniowy kondensator o pojemności $C(u)$ i nieliniowy rezystor o rezystancji $R(u)$, wyłącznik sterowany oraz źródło napięcia stałego o wartości napięcia początkowego ulotu U_0 . Elementy nieliniowe oraz wyłącznik są sterowane przez układ *TACS (Transients Analysis of Control Systems)*, dla którego sygnałem wejściowym jest napięcie węzłowe $u(t)$.



Rys.4. Implementacja modelu ulotu w programie *EMTP – ATP*

Sygnał $SW(u)$, który steruje wyłącznikiem, zależy od wartości i pochodnej napięcia węzłowego $u(t)$:

$$SW(u) = \begin{cases} 0 & \text{for } u(t) < U_0 \vee \frac{du}{dt} \leq 0 \\ 1 & \text{for } u(t) \geq U_0 \wedge \frac{du}{dt} > 0 \end{cases} \quad (3)$$

Zależności nieliniowej części pojemności dynamicznej oraz nieliniowej rezystancji (reprezentującej straty energii) wyrażono na podstawie [10] następującymi równaniami:

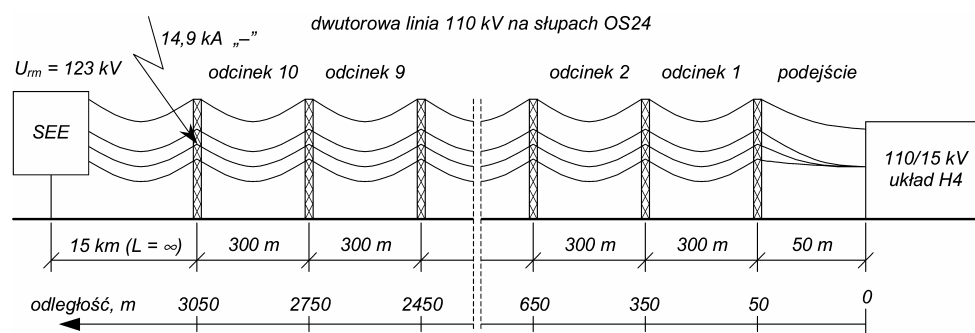
$$C(u) = 2\sigma_C \sqrt{\frac{r}{2h}} \cdot 10^{-11} l_{ML} \left(1 - \frac{U_0}{u}\right) \cdot SW(u) \quad [\text{F}] \quad (4)$$

$$R(u) = \frac{1}{\sigma_G \sqrt{\frac{r}{2h}} \cdot 10^{-11} l_{ML}} \left(\frac{u}{u - U_0}\right)^2 \cdot SW(u) \quad [\Omega] \quad (5)$$

gdzie: U_0 – napięcie początkowe ulotu, l_{ML} – długość odcinka modelu liniowego ML , r – promień przewodu, h – wysokość przewodu, σ_C , σ_G – stałe, które są charakterystyczne dla konstrukcji przewodu fazowego, polaryzacji i wartości szczytowej napięcia.

4. APLIKACJE MODELU ULOTU W ANALIZIE PROPAGACJI PRZEPIĘĆ ATMOSFERYCZNYCH

Przedmiotem analizy był wpływ ulotu elektrycznego na poziom przepięć, powstających w rozdzielni elektroenergetycznej, jako efekt wyładowania piorunowego do przewodu fazowego linii zasilającej. Rozważania przeprowadzono dla stacji elektroenergetycznej o napięciu znamionowym 110 kV w układzie H4, wyposażonej w dwa transformatory 110/15 kV – rysunek 5.

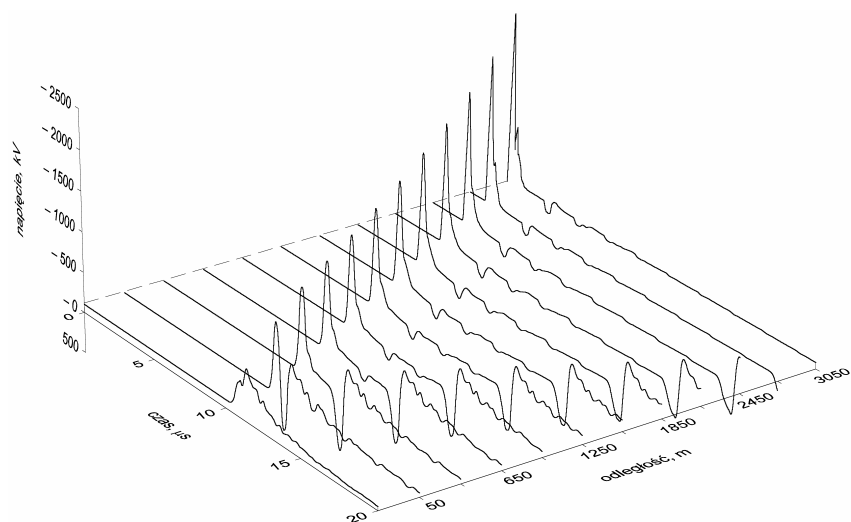


Rys. 5. Schemat analizowanego układu elektroenergetycznego 110 kV

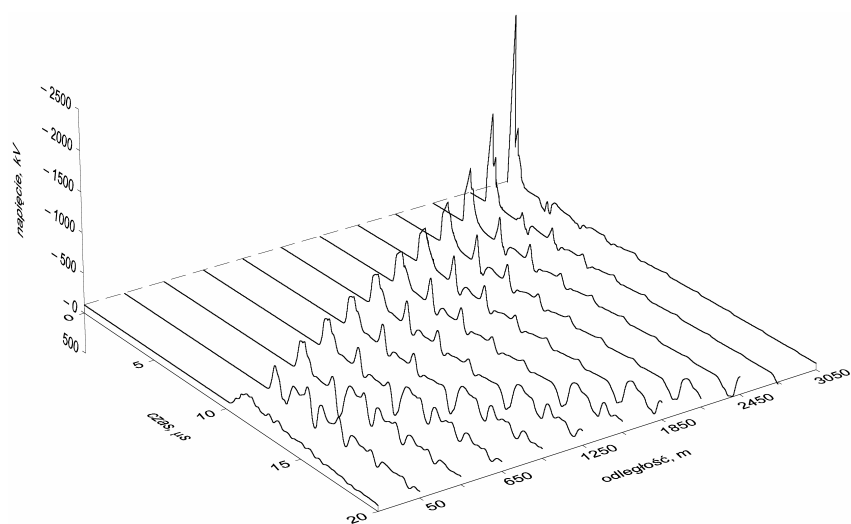
W tym celu opracowano w programie *EMTP-ATP* kompleksowy model komputerowy [2, 3, 7, 8, 9, 11] dwutorowej linii zasilającej 110 kV, która prowadzona jest na słupach serii OS24. W linii wyodrębniono dziesięć trzystumetrowych odcinków, reprezentujących ostatnich dziesięć przęseł przed wprowadzeniem linii do rozdzielni i jeden odcinek pięćdziesięciometrowy – reprezentujący podejście do stacji. Odcinki te odwzorowano w programie jako wieloprzewodowe linie długie o parametrach zależnych od częstotliwości. Do węzłów pomiędzy odcinkami linii podłączono elementy reprezentujące zjawiska falowe w konstrukcjach wsporczych, wytrzymałość udarową izolacji linii oraz udarowe właściwości ziemi słupów. Zaimplementowano także model ulotu elektrycznego, wykorzystując

konceptę pojemności dynamicznej oraz przekształcenie modelu linii długiej do postaci różnicowej. Wspomaganie modelowania rozważanych zjawisk w programie *EMTP – ATP* uzyskano dzięki autorskiemu programowi komputerowemu *CORONA* [7].

Model rozdzielni [2, 9, 12, 13, 14] stanowi zbiór elementów odwzorowujących jej istotne wyposażenie. Wyodrębniono w nim aparaty i urządzenia stanowiące węzły nieciągłości na drodze fal przepięciowych, odcinki szyn zbiorczych oraz połączenia międzyaparaturowe, a także beziskiernikowe ograniczniki przepięć.



Rys. 6. Obraz propagacji fali przepięciowej w linii 110 kV wywołanej uderzeniem pioruna w odległości 3050 m od rozdzielni, przy nieuwzględnieniu ulotu elektrycznego



Rys. 7. Obraz propagacji fali przepięciowej w linii 110 kV wywołanej uderzeniem pioruna w odległości 3050 m od rozdzielni, z uwzględnieniem ulotu elektrycznego

Wyładowanie piorunowe zostało przedstawione w postaci trójkątnego impulsu prądowego biegunowości ujemnej o wartości szczytowej 14,9 kA, przyłączonego do atakowanego przewodu fazowego. Wartość ta odpowiada krytycznej wartości szczytowej prądu pioruna, powyżej której w myśl teorii elektrogeometrycznej nie jest możliwe uderzenie pioruna w przewód fazowy linii [2, 9].

Na rysunku 6 przedstawiono przykładowy obraz propagacji fali przepięciowej docierającej do rozdzielni 110 kV, otrzymany przy założeniu uderzenia pioruna w odległości 3050 m od rozdzielni nie chronionej ogranicznikami przepięć oraz nieuwzględnieniu ulotu elektrycznego w modelu linii. Obraz ten pokazuje zarówno złożone efekty falowe występujące w układzie, jak i oporowe tłumienie fali wynikające ze zmiany impedancji wzdłużnych pętli ziemnopowrotnych w zmiennoczęstotliwościowym modelu linii. Analogiczny obraz, ale otrzymany z uwzględnieniem ulotu elektrycznego przedstawiono na rysunku 7.

Efektywność tłumienia ulotowego zależy od wielu czynników, jak promień przewodu, jego wysokość czy stosunek wartości szczytowej fali przepięciowej w miejscu jej powstania do wartości napięcia początkowego ulotu. Istotnym czynnikiem jest również miejsce uderzenia pioruna, przy czym tłumienie jest tym większe im większa jest droga propagacji fali przepięciowej. O kształcie przepięć i ich wartościach wewnątrz rozdzielni decyduje zastosowana ochrona przeciwprzepięciowa. Największe wartości przepięć występują przy uderzeniu pioruna w pierwszy słup linii od strony rozdzielni i w tym przypadku brak jest praktycznie tłumienia ulotowego, a o poziomie przepięć decyduje jedynie sposób rozwiązania ochrony przeciwprzepięciowej rozdzielni. Dla dalszych odległości uderzenia poziom przepięć ulega zmniejszeniu, a ich wartości szczytowe zależne są wówczas zarówno od sposobu ochrony, jak i dodatkowo od tłumienia ulotowego.

5. PODSUMOWANIE

Ulot elektryczny występujący w linii elektroenergetycznej wpływa na kształt przepięć docierających do stacji elektroenergetycznej oraz wartości charakterystycznych parametrów. Ze względu na duże wartości powstających fal przepięciowych wywołanych bezpośrednim uderzeniem pioruna do przewodu fazowego, naogół znacznie jest przekroczone napięcie początkowe ulotu elektrycznego, a tym samym powstałe wyładowanie ulotowe łądzi narażenie przepięciowe stacji.

Analiza propagacji fal przepięciowych w liniach napowietrznych z uwzględnieniem ulotu elektrycznego jest problemem złożonym zarówno pod względem matematycznym, jak i numerycznym. Opracowany program komputerowy *CORONA* stanowi istotne rozszerzenie obszaru zastosowań pakietu *EMTP – ATP* w zakresie analizy przepięć atmosferycznych w układach elektroenergetycznych wysokich i najwyższych napięć.

6. BIBLIOGRAFIA

1. Krakowski M.: Obwody ziemnopowrotne, Warszawa, WNT 1980, s. XXX, ISBN 83-204-0053-8
2. Nowak W.: Identyfikacja narażeń przepięciowych układów elektroenergetycznych wysokich napięć przy wyładowaniach atmosferycznych. Seria: Rozprawy i Monografie nr 139, Kraków, Uczelniane Wydawnictwa Naukowo-Dydaktyczne AGH 2005, s. 172, ISSN 0867-6631
3. Florkowska B., Nowak W., Tarko R.: Modelling of the corona for the analysis of the

- overvoltage waves propagation in the overhead high voltage transmission lines, Archives of Electrical Engineering, vol. LVI, No 215-1/2006, s. 47-62, ISSN 0004-0746
4. Semlyen A., Dabuleany A.: Fast and accurate switching transient calculation on transmission lines with ground return using recursive convolutions, IEEE Trans. on PAS, Vol. PAS-94, 1975, s. 561-571, ISSN 0018-9510
 5. Marti J.R.: Accurate modeling of frequency-dependent transmission lines in electromagnetic transient simulation, IEEE Trans. on PAS, Vol. PAS-101, 1982, s. 147-155, ISSN 0018-9510
 6. Noda T., Ono T., Matsubara H., Motoyama H., Sekioka S., Ametani A.: Charge-voltage curves of surge corona on transmission lines: Two measurement methods, IEEE Trans. on PWRD, Vol. 18, No. 1, January 2003, s. 307-314, ISSN 0885-8977
 7. Florkowska B., Nowak W., Tarko R.: Modelowanie ulotu elektrycznego dla analizy propagacji fal przepięciowych w liniach elektroenergetycznych wysokich napięć, Przegląd Elektrotechniczny, 1'2004, s. 69-72, ISSN 1731-6103
 8. Florkowska B., Nowak W., Tarko R.: Model of the corona for the computer simulations of the overvoltage waves propagation, 3rd International Scientific Symposium „Elektroenergetika 2005”, Stará Lesná, Slovakia, 2005, paper B-6
 9. Nowak W., Tarko R., Florkowska B.: Wpływ ulotu elektrycznego na poziom przepięć atmosferycznych w rozdzielni 110 kV. Przegląd Elektrotechniczny, 1'2005, s. 180-183, ISSN 1731-6103
 10. Lee K.C.: Non-linear corona models in an Electromagnetic Transients Program (EMTP), *IEEE Trans. on PAS*, Vol.PAS-102, No.9, September 1983, s. 2936-2939, ISSN 0018-9510
 11. Nowak W.: The analysis of backflashovers in high voltage overhead lines, Archives of Electrical Engineering, vol. LIV-No 213-3/2005, s. 321-341, ISSN 0004-0746
 12. Nowak W.: Modelowanie i analiza przepięć atmosferycznych w napowietrznych rozdzielniach wysokiego napięcia, Przegląd Elektrotechniczny, 1'2003, s. 160-163, ISSN 1731-6103
 13. Nowak W.: Numerical modelling of lightning surges in high voltage substations, Archives of Electrical Engineering, vol.LVI, No 215-1/2006, s. 31-45, ISSN 0004-0746
 14. Nowak W., Tarko R.: Ocena poziomu przepięć atmosferycznych w rozdzielni elektroenergetycznej 110 kV (w druku), Przegląd Elektrotechniczny, 2006, ISSN 1731-6103

MODELLING OF THE CORONA FOR THE ANALYSIS OF THE OVERVOLTAGE STRESSES IN THE POWER SYSTEMS

Lightning overvoltages are the most unfavorable voltage stresses for the substation insulation. They are result of the direct lightning stroke to the support or the line wires. Corona discharges occurring in the vicinity of conductors of high voltage power lines may influence the level of the overvoltage waves arriving to the power substation. This model was applied to analyze the propagation of overvoltage waves in high voltage power lines. The paper also comprises results of calculations of overvolrages in the substation, performed using software package a EMTP – ATP simulation software.