



Rafał TARKO, Wiesław NOWAK

Akademia Górniczo-Hutnicza, Katedra Elektroenergetyki

## Implementacja modelu ulotu elektrycznego w programie *EMTP-ATP* dla analizy propagacji fal przepięciowych w układach elektroenergetycznych

**Streszczenie.** W artykule przedstawiono model ulotu elektrycznego dla analizy propagacji fal przepięciowych w liniach elektroenergetycznych wysokich napięć oraz wyniki badań, otrzymane przy zastosowaniu programu symulacyjnego *EMTP-ATP*.

**Abstract.** (Implementation of corona model in *EMTP-ATP* software for analysis of propagation surges in electrical power systems). In this paper, a corona model is presented. This model is applied for analyse the propagation of overvoltage waves in high voltage power lines. The paper also comprises results of calculations performed using the *EMTP-ATP* simulation software.

**Słowa kluczowe:** układy elektroenergetyczne, przepięcia atmosferyczne, ulot elektryczny, modelowanie

**Keywords:** electrical power systems, lightning surges, corona, modelling

### Wstęp

Ulot elektryczny jest samodzielnym, niepełnym wyłączeniem elektrycznym, które związane jest z eksploatacją powietrznych układów izolacyjnych linii i stacji elektroenergetycznych. Specyfiką tych układów jest silna niejednorodność pola elektrycznego, w wyniku której, w otoczeniu przewodzących elementów o dużej krzywiźnie, już przy napięciu roboczym mogą być inicjowane procesy jonizacyjne.

W elektroenergetyce ulot elektryczny jest zjawiskiem negatywnym, ze względu na możliwe skutki, jakie niesie jego występowanie. Wymienić tu należy przede wszystkim straty mocy czynnej w układach przesyłu i rozdziału energii elektrycznej, korozję przewodów i innych elementów przewodzących, a także oddziaływanie wysokonapięciowych układów przesyłowo-rozdziałczych na środowisko w postaci hałasu czy zakłóceń radioelektrycznych. Zjawiska te – istotne dla projektowania i eksploatacji układów elektroenergetycznych przy napięciu o częstotliwości sieciowej – nie mają znaczenia w warunkach szybkozmiennych przebiegów napięć, jakimi są przepięcia udarowe.

Impulsowy ulot elektryczny występujący w układach elektroenergetycznych w warunkach działania przepięć – szczególnie atmosferycznych – jest przyczyną deformacji i tłumienia fal przepięciowych. Przy dostatecznie dużych wartościach szczytowych przepięć propagacja fali nawet na niewielkim odcinku linii, może skutkować istotnym zmniejszeniem stromości jej czoła i wartości szczytowej. Zjawisko to jest szczególnie widoczne dla linii elektroenergetycznych, w których nie stosuje się przewodów wiązkowych. Problemy te są istotne z punktu widzenia koordynacji izolacji układów elektroenergetycznych, bowiem ulot elektryczny przyczynia się do łagodzenia narażeń przepięciowych.

W artykule przedstawiono opracowany i zaimplementowany w programie *EMTP-ATP* (ang. *ElectroMagnetic Transients Program – Alternative Transients Program*) model ulotu elektrycznego dla analizy propagacji fal przepięciowych w układach elektroenergetycznych wysokich napięć. Model zastosowano do analizy wpływu ulotu na poziom przepięć atmosferycznych, wywołanych wyładowaniami piorunowymi do przewodów fazowych linii elektroenergetycznych.

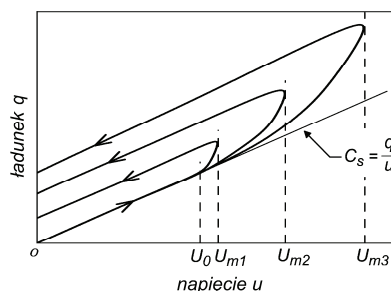
### Dyskretny model ulotu elektrycznego

Propagacja fali przepięciowej w linii elektroenergetycznej jest związana z efektami falowymi takimi jak: przepu-

szczenie fali, odbicie od węzłów nieciągłości i tłumienie. Zmiana kształtu oraz zmniejszenie wartości szczytowych fal przepięciowych wynika z dwóch zasadniczych przyczyn:

- 1) propagacja fal odbywa się w stratnych obwodach ziemno-powrotnych, które stanowią przewody linii oraz środowisko przewodzące jakim jest ziemia,
- 2) przy znacznych wartościach szczytowych fal przepięciowych na przewodach pojawia się ulot elektryczny, będący przyczyną strat energii.

Gdy potencjał przewodu przekracza wartość napięcia początkowego ulotu  $U_0$ , w jego otoczeniu wytwarzany jest ładunek przestrzenny. Zależności wypadkowego ładunku  $q$  (rys. 1), stanowiącego sumę ładunku na powierzchni i w przestrzeni wokół przewodu, od wartości chwilowej  $u$  przyłożonego napięcia mają charakter pętlic (np. [1, 2]).



Rys.1. Dynamiczne charakterystyki ładunku  $q$  od chwilowej wartości napięcia  $u$ :  $U_0$  – wartość napięcia początkowego ulotu,  $U_m$  – wartość szczytowa udaru napięcia,  $C_s$  – pojemność geometryczna

Widoczna na rysunku 1 histereza związana jest z opóźnieniem formowania ładunku przestrzennego względem zmiany napięcia. Poniżej wartości  $U_0$  ładunek  $q$  jest wyłączone ładunkiem powierzchniowym, określonym przez pojemność geometryczną  $C_s$ . Dynamiczne charakterystyki  $q = f(u)$  są makroskopowym opisem ulotu elektrycznego i stanowią podstawą jego uwzględnienia w modelu linii przez wykorzystanie pojemności dynamicznej:

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

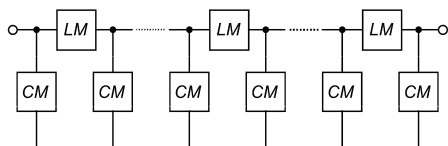
Uzasadnieniem tego jest to, że ładunek przestrzenny w otoczeniu przewodu zwiększa pozornie jego promień, co

przyczynia się do wzrostu pojemności własnych i wzajemnych linii.

Modelowanie ulotu elektrycznego z wykorzystaniem pojemności dynamicznej wymaga modyfikacji macierzy pojemności linii, w której wyodrębnia się macierz pojemności geometrycznych oraz macierz pojemności z elementami zależnymi od napięcia:

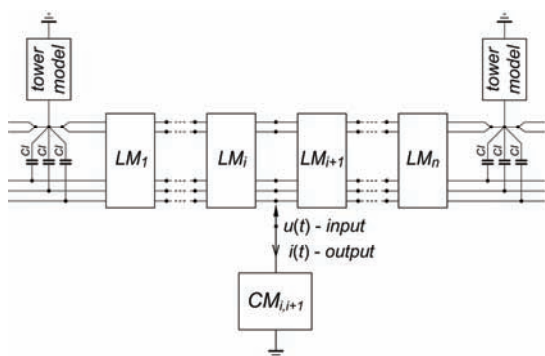
$$(2) \quad [C_d] = [C_s] + [C(u)]$$

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 (np. [3, 4, 5]), w którym rozłożone parametry ulotu elektrycznego reprezentowane są w wybranych węzłach w postaci obwodu o stałych skupionych – rysunek 2. Model różnicowy wymaga dodatkowego podziału wieloprzewodowych linii długich na odcinki, pomiędzy którymi znajdują się obwody o parametrach skupionych odwzorujące dynamiczne charakterystyki ulotu elektrycznego.



Rys. 2. Linia długa z ulotem reprezentowanym przez obwody o stałych skupionych: LM – model liniowy o stałych bądź zależnych od częstotliwości parametrach, CM – model ulotu reprezentowany przez nieliniowy obwód o stałych skupionych

Dokładność rozwiązania modelu różnicowego, zależna jest od ilości odcinków LM powstających w wyniku podziału linii. Większa dokładność wymaga gęstszego podziału i większej ilości 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.



Rys.3. Implementacja modelu ulotu w programie EMTP-ATP

### Implementacja ulotu w programie EMTP-ATP

Fragment przykładowego schematu modelu przedstawiono na rysunku 3. Dotyczy on przesyłowej linii przesyłowej, która wyposażona jest w trzy przewody robocze oraz dwa przewody odgromowe. Przewody w przesyłowej 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 zawierające aktywne dwójniki Thevenina typu 94. Ich działanie jest zdefiniowane przez użytkownika z wykorzystaniem języka programowania MODELS. Wielkościami wyjściowymi są wartości prądów gałęziowych  $i(t)$ , które na podstawie [6] wyrażono następującymi zależnościami:

$$(3) \quad i(t) = i_G(t) + i_C(t)$$

$$(4) \quad i_G(t) = \sigma_G \sqrt{\frac{r}{2h}} \cdot 10^{-11} l_{LM} \left[ 1 - \frac{U_0}{u(t)} \right]^2 u(t) \cdot S_G$$

$$(5) \quad i_C(t) = 2\sigma_C \sqrt{\frac{r}{2h}} \cdot 10^{-11} l_{LM} \left[ 1 - \frac{U_0}{u(t)} \right] \frac{du(t)}{dt} \cdot S_C$$

gdzie:  $U_0$  – napięcie początkowe ulotu,  $l_{LM}$  – długość odcinka modelu liniowego,  $r$  – promień przewodu,  $h$  – wysokość przewodu,  $\sigma_C$ ,  $\sigma_G$  – stałe, które są charakterystyczne dla konstrukcji przewodu fazowego, polaryzacji i wartości szczytowej napięcia,  $S_G$ ,  $S_C$  – funkcje  $S_1$  lub  $S_2$  zależne od wartości i pochodnej napięcia węzłowego  $u(t)$ :

$$(6) \quad S_1(t) = \begin{cases} 0 & \text{dla } u(t) \leq U_0 \text{ lub } \frac{du}{dt} \leq 0 \\ 1 & \text{dla } u(t) > U_0 \text{ i } \frac{du}{dt} > 0 \end{cases}$$

$$(7) \quad S_2(t) = \begin{cases} 0 & \text{dla } u(t) \leq U_0 \\ 1 & \text{dla } u(t) > U_0 \end{cases}$$

Na rysunku 4 przedstawiono przykładowe krzywe  $q - u$  ilustrujące funkcjonowanie powyższego modelu. Wyniki otrzymano dla pojedynczego przewodu o średnicy 46,3 mm, na którym ulot występuje w warunkach dobrej pogody przy napięciu udarowym 2,5/60  $\mu$ s biegunowości dodatniej. Parametry  $\sigma_C$  i  $\sigma_G$  są wyznaczone na podstawie danych eksperymentalnych [2] przy użyciu metody najmniejszych kwadratów [7].

### Estymacja parametrów $\sigma_G$ i $\sigma_C$ na podstawie eksperymentalnych krzywych $q - u$

Dane są pary punktów  $(q_i, u_i)$ ,  $i = 1, \dots, n$ , z eksperymentalnej krzywej  $q - u$ . Założono, że napięcie udarowe  $u(t)$  jest aproksymowane następującą funkcją [7]:

$$(8) \quad u(t) = \frac{t}{at^2 + bt + c}$$

gdzie:

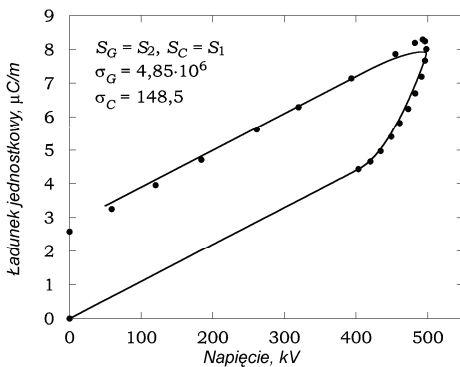
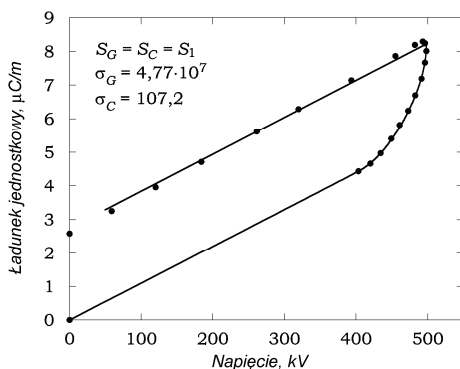
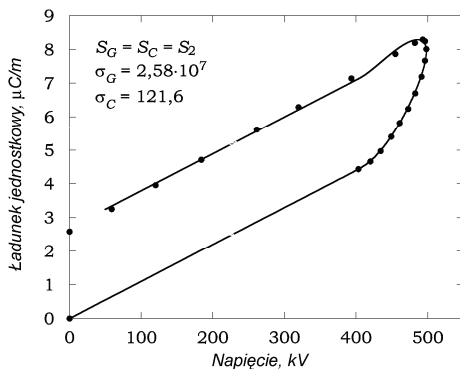
$$(9) \quad a = \frac{T_2}{U_m (T_2 - T_1)^2}$$

$$(10) \quad b = \frac{(T_2 - T_1)^2 - 2T_1 T_2}{U_m (T_2 - T_1)^2}$$

$$(11) \quad c = \frac{T_1^2 T_2}{U_m (T_2 - T_1)^2}$$

gdzie  $U_m$  jest wartością szczytową,  $T_1$  jest czasem czoła, a  $T_2$  czasem do półszczytu. Dla kolejnych wartości  $u_i$  wyznaczone są z zależności odwrotnej do zależności (8) czasy  $t_i$ :

$$(12) \quad t_i(u_i) = \frac{1 - bu_i \mp \sqrt{(1 - bu_i)^2 - 4acu_i^2}}{2au_i}$$



Rys. 4. Krzywe  $q - u$  dla jedнопроводовой линии o średnicy 46,3 mm, w warunkach dobrej pogody przy napięciu udarowym 2,5/60  $\mu$ s biegunowości dodatniej; dane eksperymentalne (•) według [2]

Ładunek przestrzenny  $q_{SC}$  warstwy ulotowej jest określony zależnością:

$$(13) \quad q_{SCi} = q_i - C_s \frac{t_i}{at_i^2 + bt_i + c}$$

gdzie  $C_s$  jest pojemnością geometryczną. W ten sposób otrzymywane są pary danych  $(t_i, q_{SCi})$ , które aproksymowane są funkcją:

$$(14) \quad q(t) = \int_0^t [i_G(z) + i_C(z)] dz = q_G(t) + q_C(t)$$

Na podstawie zależności (4), (5) i (8) można zapisać:

$$(15) \quad q_G(t) = \left\{ \frac{1}{2} k_G U_0^2 a z^2 - 2k_G U_0 z + k_G U_0^2 b z + k_G U_0^2 c \ln(z) + \frac{1}{2} \frac{k_G \ln(az^2 + bz + c)}{a} + \frac{k_G b \arctan \left[ \frac{(2az + b) / \sqrt{4ac - b^2}}{a \sqrt{4ac - b^2}} \right] \right\} \Bigg|_{z=0}^{z=t}$$

$$(16) \quad q_C(t) = \left[ 2k_C U_0 \ln(z) + 2k_C U_0 \ln(az^2 + bz + c) + 2 \frac{k_C z}{az^2 + bz + c} \right] \Bigg|_{z=0}^{z=t}$$

gdzie:

$$(17) \quad k_G = \sigma_G \sqrt{\frac{r}{2h}} \cdot 10^{-11} l_{LM}$$

$$(18) \quad k_C = \sigma_C \sqrt{\frac{r}{2h}} \cdot 10^{-11} l_{LM}$$

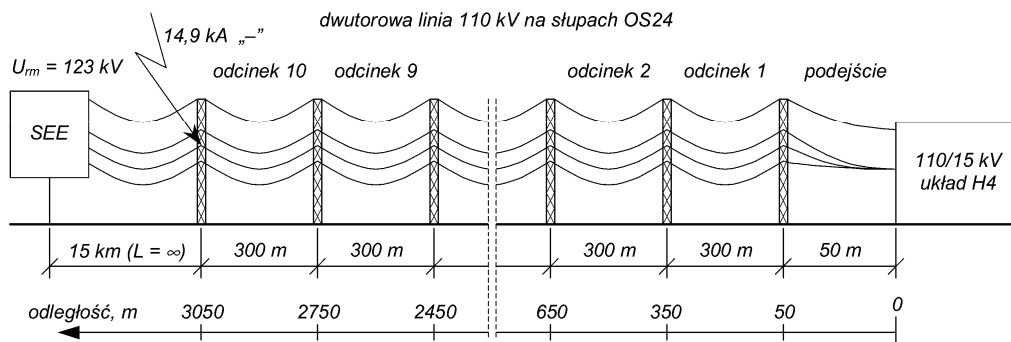
Jako wartości parametrów  $\sigma_G$ ,  $\sigma_C$  przyjmowane są takie wartości, dla których:

$$(19) \quad \sum_{i=1}^n [q_{SCi} - q_G(t_i, \sigma_G, \sigma_C) - q_C(t_i, \sigma_G, \sigma_C)]^2 = \min$$

przy znanych wartościach  $U_0$ ,  $l_{LM}$ ,  $r$ ,  $h$ .

### Wyniki symulacji

Opracowany model ulotu elektrycznego zastosowano do badań propagacji przepięć atmosferycznych w układzie elektroenergetycznym o napięciu znamionowym 110 kV – rysunek 5. Analizowany układ składa się z dwutorowej linii 110 kV zasilającej stację elektroenergetyczną 110/15 kV.

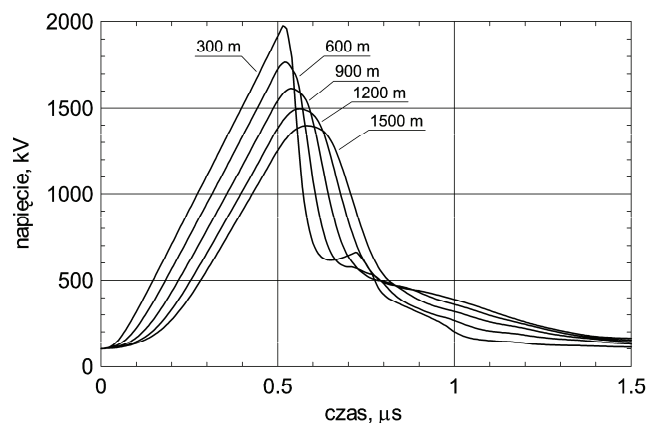


Rys.5. Schemat układu elektroenergetycznego 110 kV

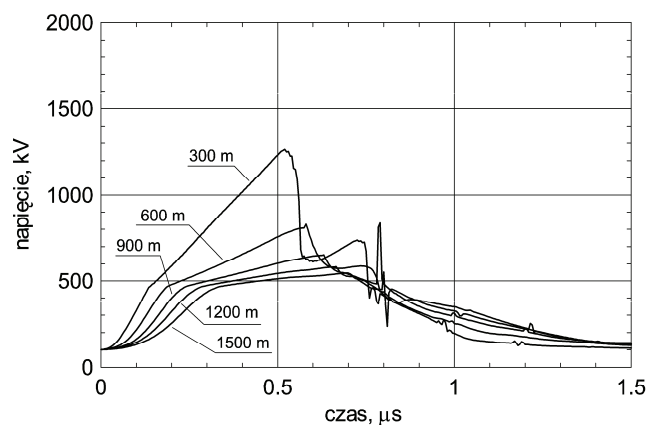
W modelu wyodrębniono dziesięć trzystumetrowych odcinków, reprezentujących dziesięć przęseł przed wprowadzeniem linii do rozdzielni i jeden odcinek pięćdziesięciometrowy – reprezentujący podejście do stacji. Odcinki te odwzorowano jako wieloprzewodowe linie długie o parametrach zależnych od częstotliwości. Do węzłów pomiędzy odcinkami podłączono elementy reprezentujące zjawiska falowe w konstrukcjach wsporczych, wytrzymałość udarową izolacji linii, udarowe właściwości uziemień słupów oraz model ulotu elektrycznego. W modelu rozdzielni uwzględniono aparaty i urządzenia stanowiące węzły nieciągłości na drodze fal przejściowych, odcinki szyn zbiorczych oraz połączenia międzyaparaturowe, a także bezsiekierkowe ograniczniki przepięć.

Wyładowanie piorunowe stanowiło trójkątny impuls prądowy biegunowości ujemnej o wartości szczytowej 14,9 kA, przyłączony 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.

Na rysunku 6 przedstawiono przykładowe przebiegi czasowe przepięć w atakowanej fazie linii 110 kV, otrzymane dla miejsca uderzenia pioruna 3050 m od rozdzielni. W przebiegach tych nie uwzględniono tłumienia ulotowego, a jedynie tłumienie o charakterze oporowym, wynikające przede wszystkim ze zmian impedancji wzdłużnych pętli ziemnopowrotnych w zmiennoczęstotliwościowym modelu linii.



Rys.6. Przebiegi przepięć w wybranych odległościach od miejsca uderzenia pioruna w przewód fazowy linii 110 kV przy tłumieniu oporowym



Rys.7. Przebiegi przepięć w wybranych odległościach od miejsca uderzenia pioruna w przewód fazowy linii 110 kV przy tłumieniu oporowym i ulotowym

Na rysunku 7 przedstawiono analogiczne przebiegi przepięć, lecz przy uwzględnieniu tłumienia ulotowego. Efektywność tłumienia ulotowego zależna jest od wielu czynników, jak promień przewodu, jego wysokość czy stosunek wartości szczytowej fali przejściowej w miejscu jej powstania do wartości napięcia początkowego ulotu. Istotnym czynnikiem jest miejsce uderzenia pioruna, przy czym tłumienie jest tym większe im większa jest droga propagacji fali przejściowej. O kształcie przepięć i ich wartościach wewnątrz rozdzielni [8] istotnie decyduje również zastosowany w rozdzielni system ochrony przejściowej.

## Podsumowanie

Badania ulotu elektrycznego prowadzone są aktualnie w kilku kierunkach, wśród których szczególnie intensywnie rozwijany jest obszar modelowania matematycznego. Nowe możliwości w tej dziedzinie, wynikają przede wszystkim z rozwoju programowej realizacji stosownych algorytmów komputerowych.

W odniesieniu do układów elektroenergetycznych wysokich i najwyższych napięć, możliwości te dotyczą modelowania propagacji fal przejściowych, 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. Należy do nich zaliczyć ulot elektryczny, który jest przyczyną deformacji i tłumienia fal przejściowych. Modelowanie tych zjawisk istotne jest dla właściwego rozpoznania narażeń przejściowych układów elektroenergetycznych.

## LITERATURA

- [1] 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, 2003, 307-314
- [2] Maruvada P.S., Menemenlis H., Malewski R., Corona characteristics of conductor bundles under impulse voltages, *IEEE Trans. on PAS*, Vol. 96, No.1, 1977, 102-115
- [3] Barros H.M., Carneiro S., Azevedo R.M., An efficient recursive scheme for the simulation of overvoltages on multiphase systems under corona, *IEEE Trans. on PWRD*, vol. 10, 1995, 1443-1452
- [4] Guillier J.F., Rioual M., Damping model of travelling waves by corona effect along extra high voltage three phase lines, *IEEE Trans. on PWRD*, vol. 10, 1995, 1851-1861
- [5] 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. LV-No 215-1, 2006, 47-62
- [6] Lee K.C., Non-linear corona models in an Electromagnetic Transients Program (EMTP), *IEEE Trans. on PAS*, vol. 102, 1983, 2936-2939
- [7] Nowak W., Tarko R., Florkowska B., Modelling of Corona for Analysis of the Lightning Surges Propagation in High Voltage Power Systems, 15<sup>th</sup> Inter. Symposium on High Voltage Engineering, Ljubljana, Slovenia, August 27<sup>th</sup>, 2007
- [8] Nowak W., Tarko R., Florkowska B., Modelowanie ulotu elektrycznego dla oceny narażeń przejściowych układów elektroenergetycznych (w druku), *Energetyka*, 2007

**Autorzy:** mgr inż. Rafał Tarko, AGH, Katedra Elektroenergetyki, Al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków, E-mail: [rtarko@agh.edu.pl](mailto:rtarko@agh.edu.pl); dr hab inż. Wiesław Nowak, AGH, Katedra Elektroenergetyki, Al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków, E-mail: [wiesio@agh.edu.pl](mailto:wiesio@agh.edu.pl)