



Jerzy BAJOREK

Politechnika Rzeszowska, Zakład Podstaw Elektrotechniki i Informatyki

Wybrane problemy modelowania wyładowania atmosferycznego jako zaburzenia elektromagnetycznego układów elektrycznych

Streszczenie. Omówiono współczesne problemy modelowania matematycznego niezbędnego dla badania zjawisk fizycznych wyładowania piorunowego oraz jego oddziaływania na układy elektryczne. Piorunowe zaburzenie elektromagnetyczne jest opisane jako przestrzennie-częstotliwościowa transmitancja układu. Przeanalizowano wpływ strat w gruncie na pole elektromagnetyczne wyładowania oraz efektywność obliczeniową jego modelu matematycznego.

Abstract. (Selected problems of lightning discharge modelling as electromagnetic disturbance of electrical systems) Contemporary problems of mathematical modelling needed for studying the physics of the lightning discharge and its interaction with electrical systems is presented in the paper. Lightning electromagnetic disturbance is described as a spatial-frequency response function of the system. Influence of ground losses on electromagnetic field of lightning and on computational efficiency of its mathematical model is analysed.

Słowa kluczowe: zaburzenie elektromagnetyczne, wyładowanie atmosferyczne, modelowanie matematyczne.

Keywords: electromagnetic disturbance, lightning, mathematical modelling.

Wstęp

Modelowanie matematyczne piorunowych zaburzeń elektromagnetycznych oraz komputerowe metody symulacji kanału wyładowania piorunowego i propagacji pola elektromagnetycznego wywołanego wyładowaniem mają istotne znaczenie dla określenia oddziaływania wyładowania atmosferycznego na układy izolacyjne wysokiego napięcia, a także na osprzęt elektroniczny i teleinformatyczny systemów elektroenergetycznych. W referacie [1] na VIII Sympozjum EUI'2001 omówiono trzy charakterystyczne modele do wyznaczania napięć indukowanych wyładowaniami atmosferycznymi na liniach napowietrznych, przewodach podziemnych i kablach:

- Model MTLM propagacji prądu w kanale wyładowania piorunowego,
- Model propagacji fali płaskiej dla pola elektromagnetycznego wyładowania atmosferycznego nad rzeczywistą ziemią o skończonej konduktywności,
- Model BLT sprzężenia pola elektromagnetycznego wyładowania atmosferycznego z linią napowietrzną.

Wymienione modele przytoczono jako ugruntowane w literaturze [2] i zaimplementowane w pakiecie EMCODES [3]. Dla skomplikowanych geometrii oraz skomplikowanych własności fizycznych obiektów i zjawisk fizycznych w rozważanym obszarze rozwijane są ciągle coraz bardziej efektywne techniki numeryczne modelowania matematycznego i symulacji komputerowych. Generalnie, techniki numeryczne dla piorunowych zaburzeń elektromagnetycznych wymagają bardzo złożonych modeli matematycznych i dużych mocy obliczeniowych komputerów [4, 5]. Głównymi problemami są tutaj dyskretne odwzorowanie układów ciągłych, zwłaszcza nieliniowych, oraz przekształcenie Fouriera z dziedziny czasu w dziedzinę częstotliwości, analiza częstotliwościowa sygnałów dyskretnych w układach dyskretnych i odwrotne przekształcenie Fouriera z dziedziny częstotliwości w dziedzinę czasu.

Kanał wyładowania atmosferycznego

Podstawowym zagadnieniem modelowania matematycznego kanału wyładowania atmosferycznego jest odwzorowanie bardzo złożonego fizycznie zjawiska wyładowania atmosferycznego modelami użytecznymi w

praktyce inżynierskiej, to znaczy w pakietach oprogramowania wykorzystywanego do projektowania ochrony odgromowej zarówno dużych systemów jak i pojedynczych urządzeń i układów elektrycznych czy elektronicznych. Przyjęte modele muszą zawierać wiele istotnych uproszczeń ze względu na ograniczone moce przetwarzania współczesnych komputerów, ale równocześnie otrzymane z nich wyniki analiz muszą wykazywać zadowalającą zgodność z wynikami pomiarów, które dostarczają coraz dokładniejszych informacji o parametrach wyładowań atmosferycznych i wywołanych nimi zaburzeniach elektromagnetycznych.

Podstawowe zjawiska fizyczne w kanale wyładowania atmosferycznego ujmują modele odwołujące się do równań dynamiki gazów, opisujących zachowanie masy, momentu i energii. Wynikami modelowania są tu temperatura, ciśnienie i gęstość masy w funkcji współrzędnych przestrzennych i czasu. Wyniki te nie mają bezpośrednio przełożenia na parametry zaburzenia elektromagnetycznego generowanego przez wyładowanie atmosferyczne, a dostarczają jedynie danych pozwalających na zbudowanie dla kanału wyładowania „modeli elektromagnetycznych” i „modeli o parametrach rozłożonych”.

Pojęcia „model elektromagnetyczny” używa się najczęściej dla odwzorowania kanału wyładowania atmosferycznego stratną anteną, dla której rozwiązuje się układ równań Maxwella na prąd kanału zawierający zarówno mod antenowy jak i mod linii przesyłowej [6 - 9]. Podstawowe podejście z aproksymacją cienkim przewodem i wykorzystaniem metody momentów Visacro i in. [10, 11] rozwinęli na ostatniej konferencji ICLP w Krakowie w model hybrydowy łączący teorię pola elektromagnetycznego i teorię obwodów.

„Modele o parametrach rozłożonych” opisują kanał wyładowania linią przesyłową z równaniami

$$(1) \quad -\frac{\partial u(z,t)}{\partial z} = L' \frac{\partial i(z,t)}{\partial t} + R' i(z,t)$$

$$(2) \quad -\frac{\partial i(z,t)}{\partial z} = C' \frac{\partial u(z,t)}{\partial t}$$

w których L' , R' i C' są indukcyjnością, rezystancją pojemnością kanału wyładowania na jednostkę długości. Równania te wyprowadza się z równań Maxwella zakładając, że fala elektromagnetyczna prowadzona linią jest quasi-TEM, a parametry na jednostkę długości są stałe wzdłuż kanału wyładowania oraz niezależne od prądu i napięcia [12]. Charakter quasi-TEM oznacza, że składowa promieniowa pola elektrycznego jest znacznie większa od składowej wzdłuż osi kanału [7]. Modele o parametrach rozłożonych są rozwijane w różnych kierunkach, przede wszystkim poprzez wprowadzanie słabszych założeń upraszczających niż w pracy Agrawala i in. [12] i wykorzystanie nowoczesnych metod numerycznych [13].

Wykorzystany w referacie [1], a wprowadzony przez Nucciego i in. [14] Modified Transmission Line Model (MTLM), zaliczany jest do grupy „modeli inżynierskich”, w których przyjmuje się określoną postać prądu u podstawy kanału wyładowania oraz jego propagację do góry w postaci tłumionej fali wędrownej. W literaturze znajdujemy wiele różnych podejść do „modeli inżynierskich”, a ich obszerną analizę porównawczą podali Rakov i Uman w pracy [15].

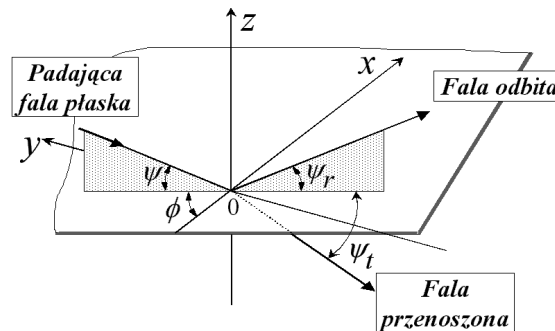
Propagacja piorunowych zaburzeń elektromagnetycznych nad stratną ziemią

W przypadku bliskiego wyładowania atmosferycznego chmura do ziemi prąd wyładowania głównego jest zawarty w pionowym kanale między ziemią i odległym punktem nad ziemią [14]. Jeżeli jest wykorzystane ujęcie Agrawala [12] dla sprężenia z linią przesyłową, to jest konieczne wyznaczenie numeryczne potrzebnych całek w członach źródłowych. W [14] wykazano, że jeżeli wyładowanie jest w pobliżu linii przesyłowej, w odległości rzędu kilkuset metrów, to w obliczeniach pola elektromagnetycznego zaburzającego linię przesyłową lub napięć i prądów linii przesyłowej ziemia może być modelowana jako doskonały przewodnik. Ten model jest zaimplementowany w EMCODES [3] jako program LTLINE i należy wraz z modelem Taylora i modelem Rachidi do grupy trzech podstawowych modeli wykorzystujących teorię linii transmisyjnych [16].

Jeżeli wyładowanie piorunowe jest daleko od punktu obserwacji, to modelem matematycznym pola elektromagnetycznego wyładowania atmosferycznego może być padająca fala płaska [2]. Ziemia odbija padającą falę i fala odbita wraz z falą padającą jest polem zaburzającym linię napowietrzną. W przypadku doskonale przewodzącej ziemi amplituda i kształt fali odbitej są identyczne z amplitudą i kształtem fali wymuszającej. W przypadku gruntu stratnego charakterystyka częstotliwościowa fali odbitej ulega poszerzeniu i pojawia się fala przenoszona do ziemi jak na rysunku 1. Fala przenoszona do ziemi jest polem zaburzającym dla przewodów podziemnych. W dziedzinie częstotliwości pole fali płaskiej odbitej od ziemi i wprowadzonej do ziemi jest opisane współczynnikami odbicia i transmisji Fresnela, które zależą od częstotliwości, kąta padania fali oraz parametrów elektrycznych gruntu [2].

Konduktywność i przenikalność elektryczna gruntu bardzo silnie wpływają na kształt fali odbitej i przenoszonej, a z drugiej strony parametry te zmieniają się w bardzo szerokim zakresie. Woda w zbiornikach na powierzchni Ziemi ma konduktywność od 0,001 S/m do 10 S/m i względną przenikalność elektryczną około 80. Konduktywność i przenikalność elektryczna powierzchniowych warstw łądów zależy od typu gruntu, jego wilgotności, temperatury i innych czynników. Konduktywność skał zmienia się od 10 S/m dla wilgotnego piasku do 10^{-14} S/m dla suchego granitu lub kwarcu. Względna przenikalność

elektryczna większości minerałów ma wartość od 4 do 30 [17].



Rys. 1. Układ współrzędnych oraz kąty charakteryzujące falę padającą, odbitą i przenoszoną

Wpływ parametrów elektrycznych gruntu na kształt fali odbitej i wprowadzonej do ziemi zależy przede wszystkim od relacji między czasem trwania czoła piorunowego zaburzenia elektromagnetycznego a szybkością zmiany rozkładu ładunku elektrycznego w gruncie. Szybkość zmiany rozkładu ładunku elektrycznego w gruncie charakteryzuje się zazwyczaj czasem relaksacji Maxwella, wyznaczonym jako iloraz przenikalności elektrycznej gruntu przez jego konduktywność. Z podanych oszacowań parametrów elektrycznych gruntu wynika, że czas relaksacji może się zmieniać od 10^{-10} s do 10^4 s. Jeżeli czas relaksacji jest znacznie mniejszy niż czas trwania czoła zaburzenia elektromagnetycznego wywołanego wyładowaniem atmosferycznym (kilka do kilkudziesięciu mikrosekund) ziemia może być rozważana jako doskonały przewodnik i może być założona natychmiastowa zmiana rozkładu ładunku. Przeciwnie, kiedy czas relaksacji jest znacznie większy niż czas trwania czoła zaburzenia, to można przyjąć założenie o traktowaniu gruntu jako doskonałego izolatora. Jeżeli czas relaksacji jest porównywalny z czasem trwania czoła zaburzenia, to niezbędne jest uwzględnienie zarówno konduktywności jak i przenikalności elektrycznej gruntu.

W analizie oddziaływania piorunowych zaburzeń elektromagnetycznych z ziemią należy również uwzględnić, że przy udarach prądowych dużej energii uwidaczniają się nieliniowe własności ziemi. Nieliniowość ma związek z dwoma głównymi procesami przewodzenia elektrycznego:

- zjawiska termiczne przy dużych prądach,
- jonizacja gruntu.

Procesy te nie są jeszcze dostatecznie poznane. Krytyczna wartość natężenia pola elektrycznego, przy której należy uwzględnić własności nieliniowe gruntu, była analizowana przez wielu badaczy. Podawane są wartości z przedziału od 300 kV/m do 2 MV/m. Na przykład, Nor i in. [18] podają, że krytyczna wartość natężenia pola elektrycznego, powyżej której inicjowana jest jonizacja w piasku jest oszacowana na 560 kV/m i jest niezależna od zawartości wody w piasku. W tym kontekście należy podkreślić, że tak złożone własności gruntu prowadzą do bardzo złożonych charakterystyk oddziaływania pola elektromagnetycznego piorunowych wyładowań atmosferycznych na układy elektryczne, na przykład charakterystyk udarowych impedancji uziemienia w warunkach dużych impulsów prądowych [19, 20].

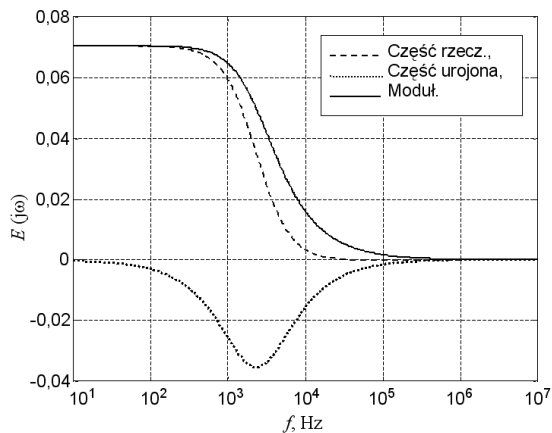
Efektywność procedur numerycznych

W badaniach napięć i prądów indukowanych w układach liniowych piorunowym zaburzeniem elektromagnetycznym szczególnie użyteczne jest przekształcenie Fouriera, ponieważ pozwala sprowadzić model matematyczny układu

do jego transmitancji częstotliwościowej z określonym rozkładem przestrzennym $T(x,y,z,j\omega)$ i wyznaczania charakterystyki częstotliwościowej odpowiedzi na dowolne wymuszenie w dowolnym punkcie przestrzeni jako iloczynu transmitancji częstotliwościowej i charakterystyki częstotliwościowej wymuszenia. W rozważanym przypadku odbicia płaskiej fali elektromagnetycznej od stratnej ziemi wymuszająca fala elektromagnetyczna wyładowania atmosferycznego, opisana wektorem natężenia pola elektrycznego $E(t)$ ma swoją charakterystyką częstotliwościową $E(j\omega)$. Charakterystyka przestrzenno-częstotliwościowa wybranego sygnału odpowiedzi układu jest iloczynem jego transmitancji przestrzenno-częstotliwościowej i charakterystyki częstotliwościowej wymuszenia

$$(3) \quad S(x,y,z,j\omega) = T(x,y,z,j\omega)E(j\omega)$$

Efektywność obliczeniowa modeli matematycznych problemów EMC oraz symulacji komputerowych zaburzeń elektromagnetycznych silnie zależy od kształtu sygnałów wymuszających zaburzenia. Na przykład, dobrze są znane problemy obliczeniowe dyskretnego przekształcenia Fouriera (DFT) dla funkcji skoku jednostkowego. Podobne problemy otrzymuje się dla impulsów wyładowań atmosferycznych z bardzo krótkim czołem fali i bardzo długim grzbietem fali. Przykładem takiego impulsu jest impuls napięciowy o kształcie $1,2/50 \mu s$ do badań odporności na udary dużej energii [21]. Jeżeli jego dwuwykładniczy model zostanie przyjęty jako kształt wymuszającej płaskiej fali elektromagnetycznej [22, 23], to charakterystyka częstotliwościowa sygnału wymuszającego zaburzenia elektromagnetyczne ma dla amplitudy 1 kV/m postać przedstawioną na rysunku 2.



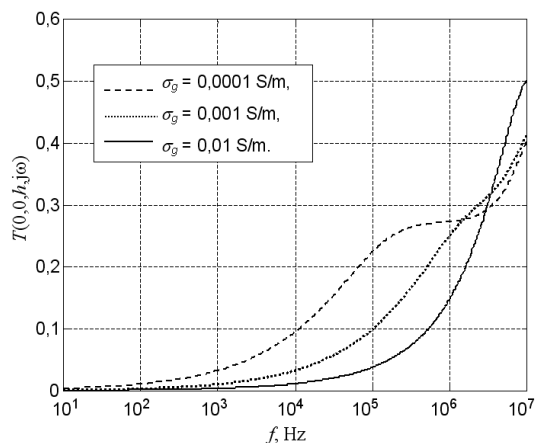
Rys. 2. Charakterystyka częstotliwościowa udaru $1,2/50 \mu s$ [23]

W pracach [23] i [24] analizowano wpływ parametrów procedur numerycznych na wyniki symulacji składowej osiowej natężenia pola elektrycznego dla przewodu umieszczonego na wysokości $z = h$, wzdłuż osi x (rys. 1) i zaburzonego płaską falą elektromagnetyczną o charakterystyce jak na rysunku 2. W punkcie $(x,y,z) = (0,0,h)$ zależność (3) przyjmuje wówczas postać

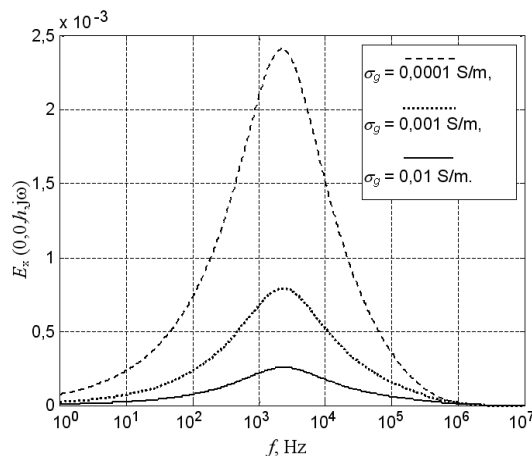
$$(4) \quad E_x(0,0,h,j\omega) = T(0,0,h,j\omega)E(j\omega)$$

Zależność modułu transmitancji częstotliwościowej $T(0,0,h,j\omega)$ od częstotliwości dla różnych konduktywności gruntu zilustrowano na rysunku 3 [23]. Dla układu przyjęto, że padająca fala płaska ma kąt polaryzacji $\pi/4$, to znaczy

składowa spolaryzowana pionowo jest równa składowej spolaryzowanej poziomo, oraz kąt padania $\psi = \pi/3$ w płaszczyźnie pionowej i kąt padania $\phi = 0$ w płaszczyźnie poziomej jak na rysunku 1, a fala odbita ma w płaszczyźnie pionowej taki sam kąt odbicia ψ jak kąt padania. Dla gruntu przyjęto względną przenikalność elektryczną $\epsilon_r = 10$, a punkt obserwacji został umieszczony na wysokości $h=10 \text{ m}$. Iloczyn charakterystyk częstotliwościowych przedstawionych na rysunkach 2 i 3 daje charakterystykę częstotliwościową odpowiedzi (4), której moduł podano na rysunku 4. Z rysunku wynika, że nałożenie na siebie charakterystyki częstotliwościowej wymuszenia, która ma pomijalnie małe wartości powyżej kilku MHz, oraz charakterystyki częstotliwościowej transmitancji układu, która ma małe wartości dla małych częstotliwości, otrzymujemy charakterystykę częstotliwościową odpowiedzi z wyraźnymi maksimami dla kilku kHz, bardzo silnie uzależnioną od konduktywności gruntu.



Rys. 3. Charakterystyka częstotliwościowa transmitancji układu [23]



Rys. 4. Charakterystyka częstotliwościowa odpowiedzi układu [23]

Podane ujęcie wyznaczania impulsu zaburzenia w wybranym punkcie przestrzeni pozwala na wykorzystanie dwóch procedur numerycznych. W pakiecie EMCODES dla zadanego impulsu wymuszającego zakłada się ograniczenie analizy do przedziału $t \in (0,t_0)$ oraz ograniczenie widma impulsu do pulsacji Ω . Można wówczas wybrać zgodnie z twierdzeniem o próbkowaniu krok (okres) próbkowania w dziedzinie czasu $\Delta t \leq \pi/\Omega$ i uformować ciąg N próbek, a następnie za pomocą dyskretnego przekształcenia Fouriera (DFT) lub jego algorytmu FFT obliczyć dyskretne wartości charakterystyki częstotliwościowej impulsu wymuszającego z krokiem $\Delta\omega$, przy

czyż $\Delta\omega = 2\Omega/N = \pi/t_0 = 2\pi/(N \cdot \Delta t)$. Po wykonaniu mnożenia dyskretnych charakterystyk częstotliwościowych impulsu wymuszającego i transmitancji układu otrzymuje się dyskretne wartości charakterystyki częstotliwościowej odpowiedzi układu i przebieg impulsu odpowiedzi w dziedzinie czasu można wyznaczyć wykonując odwrotne dyskretnie przekształcenie Fouriera algorytmem IFFT.

W pracy [24] wykazano dużą wrażliwość opisanego algorytmu na szerokość okna $(0, t_0)$ obcinającego impuls wymuszający oraz liczbę próbek N . Bardzo stromo narastające czoło uderzenia i wolno zanikający grzbiet oraz niekorzystna relacja między charakterystyką wymuszenia i charakterystyką transmitancji układu dają w odpowiedzi układu takie niefizyczne efekty jak oscylacje i ujemne wartości rozwiązania. Wrażliwość na parametry numeryczne jest ponadto silnie związana z konduktywnością ziemi – dla małych wartości konduktywności gruntu występują duże wartości ujemne na początku przebiegu, natomiast dla dużych wartości konduktywności występują coraz silniejsze oscylacje rozwiązania.

Analityczna postać współczynników odbicia Fresnela umożliwia w omawianym przypadku zastosowanie algorytmu analityczno-numerycznego, w którym obliczenia analityczne są doprowadzone do charakterystyki częstotliwościowej odpowiedzi i numerycznie jest obliczana tylko cała odwrotność przekształcenia Fouriera. Rozwiązanie to jest znacznie mniej wrażliwe na parametry numeryczne procedury i może być wykorzystane jako rozwiązanie odniesienia dla omówionej wcześniej procedury numerycznej FFT – IFFT.

Podsumowanie

Omówione uproszczenia opisu zjawisk fizycznych występujących przy generowaniu i propagacji piorunowych zaburzeń elektromagnetycznych obejmują jedynie fragment tego intensywnie badanego obszaru. Także opisane problemy dokładności procedur numerycznych dotyczą bardzo specyficznego problemu, jakim jest odbicie płaskiej fali elektromagnetycznej od stratnej ziemi. Uogólnienie prezentowanych wyników wymaga dalszych badań, zarówno eksperymentalnych dla pomiarowej weryfikacji modeli matematycznych, jak i symulacyjnych dla zbudowania efektywniejszych algorytmów badania zaburzeń elektromagnetycznych.

Praca została częściowo sfinansowana z tematu działalności statutowej Wydziału Elektrotechniki i Informatyki Politechniki Rzeszowskiej

LITERATURA

- [1] Bajorek J.: Modelowanie matematyczne przepięć indukowanych wyładowaniami atmosferycznymi, *Materiały VIII Sympozjum „Problemy Eksploatacji Układów Izolacyjnych Wysokiego Napięcia”*, Zakopane, 2001, 47-52
- [2] Tesche F.M., Ianoz M.V., Karlsson T., EMC analysis methods and computational models, *John Wiley & Sons, Inc.*, New York 1997
- [3] Tesche F.M., EMCODES, *EMC – Electromagnetic Consulting Service*, www.tesche.com
- [4] Chowdhuri P., Li S., Yan P., Review of Research on Lightning-induced Voltages on an Overhead Line, *IEE Proceedings: Generation, Transmission and Distribution*, 148 (2001), No. 1, 91-95
- [5] Ney M.M., Electromagnetic Modeling in EMC, *Proceedings of 14th International Symposium and Technical Exhibition on Electromagnetic Compatibility*, Zurich, 2001, L1-4
- [6] Podgórski A.S., Landt J.A., Three dimensional time domain modeling of lightning, *IEEE Trans. on Power Delivery*, 2 (1987), 931-938
- [7] Paul C.R., *Analysis of multiconductor transmission lines*, John Wiley & Sons, Inc., New York 1994
- [8] Moini R., Rakov V.A., Uman M.A., Kordi B., An antenna theory model for the lightning return stroke, *Proceedings of 12th International Symposium and Technical Exhibition on Electromagnetic Compatibility*, Zurich, 1997, 149-152
- [9] Baba Y., Ishii M., Numerical electromagnetic field analysis of lightning current in tall structures, *IEEE Transactions on Power Delivery*, 16 (2001), s. 324-328.
- [10] Visacro S., Soares A., Schroeder M.A.O., An interactive computational code for simulation of transient behavior of electric system components for lightning currents, *Proceedings of 26th International Conference on Lightning Protection*, Cracow, 2002, 732-737
- [11] Visacro S., Silveira F.H., Evaluation of current distribution along the discharge channel by an electromagnetic model, *Proceedings of 26th International Conference on Lightning Protection*, Cracow, 2002, 42-45
- [12] Agrawal A.K., Price H.J., Gurbaxani S.H., Transient response of multiconductor transmission lines excited by a nonuniform electromagnetic field, *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 22 (1980), 119-129
- [13] Ribeiro E.J., Miranda G.C.: FDTD simulation of the lightning return stroke channel using a charged transmission line. *Proceedings of 26th International Conference on Lightning Protection*, Cracow, 2002, 56-59
- [14] Nucci C.A., Rachidi F., Ianoz M. V., Mazzetti C., Lightning-induced voltages on overhead lines. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 35 (1993), No. 1, 75-94
- [15] Rakov V.A., Uman M.A., Review and evaluation of lightning return stroke models including some aspects of their application, *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 40 (1998), 403-426
- [16] Masłowski G., Analiza przepięć indukowanych w napowietrznych liniach elektroenergetycznych wywołanych wyładowaniami atmosferycznymi, *Praca doktorska, Wydział Elektrotechniki, Automatyki, Informatyki i Elektroniki Akademii Górniczo-Hutniczej*, Kraków 1999
- [17] Noskov M.D., Pleshkov O.I., Lopatin V.V., Computer Modeling of Earth Conductivity and Relief Effects on Lightning Orientation, *Proceedings of 25th International Conference on Lightning Protection*, Rhodes 2000, 389-394
- [18] Nor N.M., Srisakot S., Griffiths H., Haddad A., Characterisation of Soil Ionisation under Fast Impulse, *Proceedings of 25th International Conference on Lightning Protection*, Rhodes 2000, 417-422
- [19] Sekioka S., Hayashida H., Hara T., Ametani A., Measurements of Grounding Resistances for High Impulse Currents. *IEE Proceedings, Generation, Transmission and Distribution*, 145 (1998), No. 6, 693-699
- [20] Sonoda T., Takesue H., Sekioka S., Measurements on Surge Characteristics of Grounding Resistance of Counterpoises for Impulse Currents. *Proceedings of 25th International Conference on Lightning Protection*, Rhodes 2000, 411-416
- [21] PN-EN 61000-4-5:1998, Kompatybilność elektromagnetyczna (EMC). Metody badań i pomiarów. Badanie odporności na udary
- [22] Bajorek J., Ochrona sieci teleinformatycznych przed zakłóceniami elektromagnetycznymi, Seminarium techniczne EMC, Rzeszów 2001, A1-A22
- [23] Bajorek J., Gamracki M., Effectiveness of mathematical modeling of lightning coupling to overhead conductors, *Proceedings of 26th International Conference on Lightning Protection*, Cracow 2002, 208-213
- [24] Bajorek J., Gamracki M., Model of a Lightning Electromagnetic Disturbance as a Spatial System Input/output Relation, *Proceedings of 26th International Conference SPETO*, Niedzica 2003, 21-25

Autor: dr hab. inż. Jerzy Bajorek, Politechnika Rzeszowska, Zakład Podstaw Elektrotechniki i Informatyki, ul. Wincentego Pola 2, 35-959 Rzeszów, E-mail: jbajorek@prz.rzeszow.pl