



Jerzy BAJOREK

Politechnika Rzeszowska, Wydział Elektrotechniki i Informatyki

Ocena użyteczności symulatorów elektromagnetycznych w analizie piorunowych zagrożeń przepięciowych

Streszczenie. Omówiono współczesne metody numeryczne modelowania matematycznego wyładowania piorunowego oraz jego oddziaływania na układy elektryczne. Przedstawiono analizę porównawczą możliwości wykorzystania różnych symulatorów elektromagnetycznych w badaniach zagrożeń układów elektroizolacyjnych piorunowymi zaburzeniami elektromagnetycznymi.

Abstract. (*Evaluation of usefulness of electromagnetic simulators in analysis of lightning overvoltage hazard*). Contemporary numerical methods of mathematical modeling of the lightning discharge and its interaction with electrical systems are described in the paper. Comparative analysis of usage of various electromagnetic simulators in the lightning hazard research of electric system insulation is presented.

Słowa kluczowe: zaburzenia elektromagnetyczne, wyładowania atmosferyczne, modele matematyczne, symulacje komputerowe.

Keywords: electromagnetic disturbances, lightning, mathematical models, computer simulations.

Wstęp

Modelowanie matematyczne i symulacje zjawisk elektromagnetycznych stają się w ostatnim okresie domeną analiz komputerowych. Duża różnorodność dostępnych symulatorów elektromagnetycznych spowodowała, że można wśród nich znaleźć szereg wyspecjalizowanych pakietów komputerowych nastawionych na analizę konkretnych zagadnień, jak również uniwersalne narzędzia, umożliwiające wykonanie analizy bardziej ogólnych przypadków. Zaimplementowane w tych pakietach algorytmy i metody numeryczne opierają się często na zaawansowanych modelach zjawisk elektromagnetycznych, lecz zawsze zawierają pewne założenia upraszczające.

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 referatach na Sympozjum EUI'2001 [1] i EUI'2003 [2] omówiono charakterystyczne modele matematyczne do wyznaczania napięć indukowanych wyładowaniami atmosferycznymi na liniach napowietrznych, przewodach podziemnych i kablach oraz zilustrowano przykładami efektywność obliczeniową wybranych modeli. Analiza porównawcza różnych modeli zaimplementowanych w różnych symulatorach elektromagnetycznych jest niezbędnym elementem doskonalenia metod projektowania i eksploatacji układów izolacyjnych wysokiego napięcia.

Metody numeryczne symulatorów EMC

Złożoność zjawisk fizycznych w kanale wyładowania atmosferycznego, a następnie propagacja fali elektromagnetycznej zaburzenia piorunowego w układach o skomplikowanej geometrii oraz złożonych własnościach fizycznych powodują, że rozwijane są ciągle coraz bardziej efektywne techniki numeryczne modelowania matematycznego układów oraz symulacji komputerowych wektorów pola, przepięć i przetężeń. Problematyka ta jest wycinkiem badań kompatybilności elektromagnetycznej, która adaptuje i doskonali metody numeryczne o charakterze uniwersalnym oraz rozwija wiele metod specjalnych, dostosowanych do specyfiki rozwiązywanych zagadnień [3]. Generalnie, techniki numeryczne dla

zagadnień kompatybilności elektromagnetycznej wymagają bardzo złożonych modeli matematycznych i dużych mocy obliczeniowych komputerów. Głównym kryterium podziału metod jest dziedzina badanych wielkości: analiza w dziedzinie czasu lub analiza w dziedzinie częstotliwości. Dla metod analizy w dziedzinie czasu ważnym kryterium jest wartość konduktywności elementów przewodzących. Modele układów bezstratnych (*PEC - Perfectly Electrically Conducting*) są znacznie prostsze niż układów stratnych (*non-PEC*), w których występuje zjawisko dyspersji fal elektromagnetycznych.

W symulatorach zaburzeń elektromagnetycznych o dużym stopniu uniwersalności najczęściej wykorzystywana jest metoda momentów (*MoM - Method of Moments*), metoda różnic skończonych w dziedzinie czasu (*FDTD - Finite Difference Time Domain*) i metoda linii transmisyjnej (*TLM - Transmission Line Method*). Każda z tych metod posiada charakterystyczne obszary zastosowań, w których jest efektywniejsza od innych lub najbardziej efektywna. Dla obiektów o wymiarach dużych w stosunku do długości fali istotną rolę odgrywa jeszcze metoda wykorzystująca geometryczną teorię dyfrakcji (*GTD - Geometrical Theory of Diffraction*), która dla bardzo krótkich fal przechodzi w metodę optyki geometrycznej (*GO - Geometric Optics*). Mniejsze znaczenie w symulatorach szybkozmiennych zaburzeń elektromagnetycznych odgrywa klasycznie ujęta metoda elementów brzegowych (*BEM - Boundary Element Method*), która jest szczególnie użyteczna dla problemów niskiej częstotliwości, a także metoda elementów skończonych (*FEM - Finite Element Method*), która jest niezbyt efektywna dla problemów promieniowania w przestrzeni nieograniczonej.

Podstawowe grupy symulatorów EMC

Dużą elastyczność i największe możliwości modelowania złożonych, niestandardowych układów dają programy o dużym stopniu uniwersalności. Można tu wymienić szeroko wykorzystywane pakiety ANSYS, Opera czy Maxwell. Są to przykłady bardzo zaawansowanych i rozbudowanych symulatorów elektromagnetycznych - ich użyteczność w symulacjach piorunowych zaburzeń elektromagnetycznych okazuje się jednak niewielka. Wiele symulatorów zbudowano specjalnie do analizy linii transmisyjnych, falowodów czy anten, np. do analizy mikroukładów, które przy wysokiej częstotliwości mogą zachowywać się jak anteny lub linie długie.

Obszerny przegląd podstaw teoretycznych i zastosowań symulatorów elektromagnetycznych zaprezentowali Swanson i Hoefler na seminarium w ramach konferencji EMC'2003 w Zurichu [4]. W tabeli 1 zestawiono przykłady symulatorów według zaimplementowanych trzech podstawowych metod numerycznych: metody momentów, metody różnic skończonych w dziedzinie czasu i metody elementów skończonych. W programie seminarium nie ujęto bardzo użytecznych modeli wyprowadzonych z teorii linii transmisyjnych z zaimplementowanymi źródłami napięć i prądów indukowanych przez zewnętrzne zaburzenia elektromagnetyczne.

Tabela 1. Popularne symulatory EMC wg [4]

Nazwa	Dostawca
I. Metoda momentów (MoM)	
em	Sonnet Software
EMSight	Applied Wave Research
Ensemble	Ansoft
IE3D	Zeland Software
LINMIC+/N	Jansen Microwave
Momentum	Agilent EEsos EDA
II. Metoda różnic skończonych w dziedzinie czasu (FDTD)	
Concerto	Vector Fields
CST Microwave Studio	CST
EMA3D	EMA
Empire	IMST
Fidelity	Zeland Software
QuickWave-3D	QWED
XFDTD	Remcom
III. Metoda elementów skończonych (FEM)	
FullWave	Infolytica
HFSS	Ansoft
HIFIS	Integrated MicroWave
Opera-3d	VectorFields

Wymienione w tabeli symulatory należy traktować jako wybór bez szerszego i głębszego uzasadnienia. Można podać wiele przykładów symulatorów o możliwościach i zakresie zastosowań porównywalnym z zestawionymi w tabeli.

W komputerowych symulacjach piorunowych zaburzeń elektromagnetycznych szczególną rolę odgrywają pakiety oprogramowania, w których względnie łatwo można modelować kanał wyładowania atmosferycznego, na przykład NEC [5], AWAS [6] lub CDEGS [7], albo pakiety oprogramowania z zaimplementowanym modelem kanału wyładowania atmosferycznego, na przykład EMCodes [8] czy LIOV [9]. W badaniach zagrożeń wysokonapięciowych układów elektroizolacyjnych piorunowymi zaburzeniami elektromagnetycznymi szczególną rolę odgrywają opracowane specjalnie dla systemów elektroenergetycznych pakiety oprogramowania takie jak EMTP-ATP [10].

Symulatory wykorzystujące metodę momentów

Znaczącym krokiem w procesie rozwijania komputerowych metod badania pola elektromagnetycznego były prace R.F. Harringtona z lat 1967-68 zebrane w monografii z 1968 r. [11]. Połączyły one wiele rozwijanych niezależnie metod analizy pola elektromagnetycznego wspólną zasadą, nazwaną metodą momentów. Jest to podejście typowe dla metod numerycznych, które przekształcają równania analityczne opisujące ciągle przestrzennie i czasowo problem fizyczny w układ równań algebraicznych. Pierwszym etapem metody momentów jest dyskretyzacja zagadnienia ciągłego, drugim etapem jest rozwinięcie poszukiwanego rozwiązania według przyjętych funkcji bazowych i trzecim etapem jest wyznaczenie współczynników rozwinięcia.

Podstawy metody momentów podane przez R.F. Harringtona posiadają wiele różnych implementacji

komputerowych. Wiele rozwijanych w ostatnich trzydziestu latach metod analizy pola elektromagnetycznego można potraktować jako rozszerzenie klasycznej metody momentów. J.J. Wang zaproponował w 1991 roku połączenie tych zagadnień w uogólnioną metodę momentów [12].

Metoda momentów jest wykorzystywana w symulacjach komputerowych generowania, propagacji i oddziaływania zaburzeń elektromagnetycznych, jeżeli poszukiwane wielkości są rozwiązaniem niejednorodnego liniowego równania różniczkowo-całkowego postaci

$$(1) \quad L\{f(\mathbf{r})\}=g(\mathbf{r})$$

w którym L oznacza operator liniowy, $f(\mathbf{r})$ jest funkcją odpowiedzi na wymuszenie $g(\mathbf{r})$, natomiast \mathbf{r} jest współrzędną punktu pola w wybranym układzie współrzędnych. Metoda momentów wyznacza przybliżone rozwiązanie równania (1) metodami numerycznymi, w postaci rozwinięcia w nieskończenie wymiarowej przestrzeni liniowej

$$(2) \quad f(\mathbf{r}) = \sum_{i=1}^{\infty} \alpha_i f_i(\mathbf{r})$$

przy czym α_i są nieznanymi współczynnikami skalarnymi, natomiast $f_i(\mathbf{r})$ są nazywane funkcjami bazowymi lub funkcjami rozwinięcia. Współczynniki α_i wyznacza się rzutując równanie (1) z podstawieniem (2) na zbiór liniowo niezależnych funkcji testujących w_i

$$(3) \quad \sum_{j=1}^{\infty} \alpha_j \langle w_i, L\{f_j(\mathbf{r})\} \rangle = \langle w_i, g(\mathbf{r}) \rangle, i=1, 2, \dots$$

W metodzie momentów nieskończenie wymiarowe wektory $[\alpha]$ i $[w]$ są przybliżane wektorami N -elementowymi i równanie (3) przyjmuje postać układu N równań algebraicznych

$$(4) \quad [L][\alpha] = [\beta]$$

W praktyce metody momentów opracowano wiele wyspecjalizowanych technik pozwalających na uzyskanie rozwiązania równania (4) metodami bezpośrednimi i szybkozbieżnymi metodami iteracyjnymi. Podstawowym problemem metody jest postać operatora liniowego L , który decyduje o stopniu komplikacji algorytmu obliczeniowego. Powszechną praktyką w pakietach oprogramowania jest dobieranie algorytmu do założonej postaci operatora.

Symulacje komputerowe piorunowych zaburzeń elektromagnetycznych wymagają rozwiązania zagadnień promieniowania, propagacji i rozpraszania pola elektromagnetycznego. Jeżeli dopuszczalne jest założenie, że źródłem pola elektromagnetycznego są powierzchniowe prądy i ładunki przewodników, to pole elektromagnetyczne może być wyrażone znanymi wzorami na potencjały opóźnione: wektorowy potencjał pola magnetycznego i skalarny potencjał pola elektrycznego. Jeżeli dodatkowo można założyć, że prądy płyną w cienkich przewodach wzdłuż ich osi (nie mają składowej promieniowej), to równania całkowe metody potencjałów opóźnionych można sprowadzić do układu równań dla segmentów przewodów. Podana idea dyskretyzacji może być traktowana jako sprowadzenie problemu pola elektromagnetycznego do metody momentów, ale także jako szczególny przypadek

metody elementów brzegowych - jest nazywana czasem metodą elementów brzegowych w przybliżeniu cienkoprzewodowym.

Podane ogólne zasady zastosowania metody momentów do symulacji piorunowych zaburzeń elektromagnetycznych wymagają rozwiązania wielu problemów szczegółowych, takich jak:

- dobór funkcji bazowych pozwalających na stosowanie dłuższych segmentów przewodów, szczególnie przy wielkich częstotliwościach (krótkich falach);
- numeryczne eliminowanie osobliwości funkcji podcałkowych, na przykład przez uwzględnienie promienia przewodu;
- wprowadzenie nieosiowej składowej prądu w przypadku zbliżeń przewodów, a także w pobliżu połączeń i zakończeń przewodów;
- uwzględnienia rzeczywistej impedancji przewodów, na przykład efektu naskórkowości i zbliżenia przy wielkich częstotliwościach itp.

Powyższe problemy numeryczne są różnie rozwiązane w różnych pakietach oprogramowania i przyjęte w pakiecie rozwiązywania algorytmiczne oraz założenia upraszczające decydują o jego obszarze zastosowania.

W klasyfikacji modeli kanału wyładowania atmosferycznego metodą momentów wiąże się z grupą „modeli elektromagnetycznych” [2]. Użyteczne są tutaj pakiety oprogramowania przeznaczone przede wszystkim do obliczeń układów antenowych, jak wspomniany już NEC [5] i AWAS [6]. Możliwość wykorzystania ich do modelowania kanału wyładowania atmosferycznego są zbliżone, przy czym pakiet AWAS umożliwia uwzględnienie stratnej ziemi w ograniczonym zakresie. W efekcie tych ograniczeń w nowym modelu antenowym kanału wyładowania atmosferycznego z dodatkową, zależną od częstotliwości indukcyjnością rozłożoną wzdłuż przewodu zastosowano pakiet AWAS, zakładając bezstratną ziemię [13]. Istotną zaletą pakietu AWAS jest wykorzystywanie funkcji bazowych w postaci wielomianu, ze stopniem wielomianu zależnym od proporcji między długością segmentu przewodu a długością fali elektromagnetycznej. Dzięki takiej aproksymacji możliwe jest stosowanie segmentów o długości przekraczającej długość fali i istotne skrócenie czasu obliczeń.

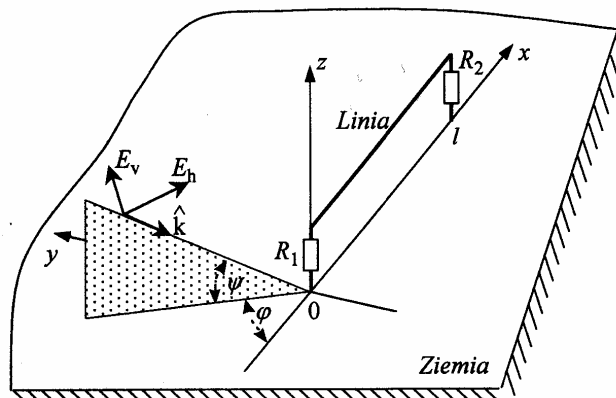
Metodę momentów wykorzystuje również pakiet CDEGS (*Current Distribution, Electromagnetic Fields, Grounding and Soil Structure Analysis*) [7], przy czym w swoich typowych zastosowaniach jest najbliższy piorunowym zaburzeniom elektromagnetycznym spośród wymienionych trzech pakietów [14]. Przykładowo, moduł MultiFields pakietu CDEGS jest szczególnie użyteczny w badaniach własności rozległych uziomów przy udarach piorunowych.

Symulatory wykorzystujące metodę FDTD

Zestawione w tabeli 1 pakiety wykorzystujące metodę różnic skończonych w dziedzinie czasu wyznaczają rozwiązanie dla wektorów pola elektromagnetycznego w wybranych zagadnieniach kompatybilności elektromagnetycznej. W ocenie piorunowych zagrożeń przepięciowych w systemach elektroenergetycznych podstawowe znaczenie ma propagacja zaburzeń wzdłuż linii, przy czym modelowanie propagacji zaburzeń przewodzonych można uznać za ugruntowane, natomiast problematyka zaburzeń indukowanych jest ciągle na etapie doskonalenia modeli oddziaływania fali zaburzenia z linią.

Piorunowe zagrożenia przepięciowe są istotne, jeżeli energia zaburzenia elektromagnetycznego jest dostatecznie duża. W przypadku układów wysokiego napięcia oznacza to, że pole własne linii jest wyraźnie słabsze w stosunku do pola zaburzenia, dlatego można przyjąć, że linia znajduje

się w polu zewnętrznym. Najprostszym przypadkiem jest tutaj bezstratna linia jednorodna w polu fali płaskiej jak na rys. 1. Pole zewnętrzne jest opisane przez pokazane na rysunku kąty padania ψ oraz φ .



Rys.1. Linia w polu płaskiej fali zaburzenia

Jeżeli padająca fala zaburzenia jest opisana zależnością $E_0(t)$ w punkcie $(x,y,z)=(0,0,0)$, to jej opis w dowolnym punkcie jest wyrażony przez składowe pola i składowe prędkości propagacji

$$(5) \quad \mathbf{E}^{\text{pad}}(x, y, z, t) = (e_x \mathbf{i} + e_y \mathbf{j} + e_z \mathbf{k}) E_0(t - x/v_x - y/v_y - z/v_z)$$

Równania linii umieszczonej wzdłuż współrzędnej x na wysokości $z=h$ nad bezstratną ziemią przyjmują wówczas postać [15]

$$(6) \quad \frac{\partial u(x,t)}{\partial x} + L' \frac{\partial i(x,t)}{\partial t} = 2h \left(\frac{e_z}{v_x} - \frac{e_x}{v_z} \right) \frac{\partial E_0(t - x/v_x)}{\partial t}$$

$$(7) \quad \frac{\partial i(x,t)}{\partial x} + C' \frac{\partial u(x,t)}{\partial t} = -2hC' e_z \frac{\partial E_0(t - x/v_x)}{\partial t}$$

gdzie $u(x,t)$ i $i(x,t)$ są napięciem i prądem linii, L' i C' są jednostkową indukcyjnością i pojemnością, składowe pola dane są zależnościami

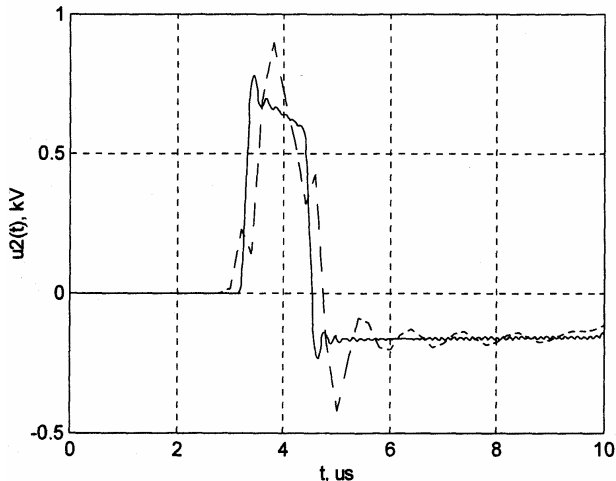
$$(8) \quad \begin{aligned} e_x &= \cos \alpha \sin \psi \cos \varphi - \sin \alpha \sin \varphi \\ e_z &= \cos \alpha \cos \psi \end{aligned}$$

i składowe prędkości zależnościami

$$(9) \quad v_x = \frac{v}{\cos \psi \cos \varphi}; \quad v_z = -\frac{v}{\sin \psi}$$

W metodzie FDTD dla linii w zewnętrznym polu dzielimy linię na N odcinków, każdy o długości Δx , a czas obserwacji rozwiązania na odcinki o długości Δt . Dla zapewnienia stabilności schematu dyskretyzacji oraz uzyskania dokładności drugiego rzędu przeplata się $N+1$ punktów napięciowych oraz N punktów prądowych, to znaczy kolejne punkty napięciowe i prądowe są odległe o $\Delta x/2$. Podobnie przesuwa się punkty w dziedzinie czasu i każdy punkt napięciowy oraz odpowiadający mu punkt prądowy są przesunięte o $\Delta t/2$. Aproksymacja równań (6) i (7) schematem różnic centralnych drugiego rzędu prowadzi do wyrażen rekurencyjnych dla napięcia i prądu. Rozwiązanie jest stabilne jeżeli jest spełniony warunek Couranta.

Na rys. 2 zilustrowano wrażliwość na krok dyskretyzacji rozwiązania na napięcie na końcu linii o długości $l=1$ km, promieniu przewodu $a=5$ mm, na wysokości $h=7,5$ m nad ziemią [16]. Linia jest obciążona rezystancjami $R_1=500 \Omega$ i $R_2=500 \Omega$, a padająca fala płaska $E_0(t)$ ma kształt $1,2/50 \mu\text{s}$ i jest przybliżona liniowo narastającym czołem i liniowo opadającym grzbietem z punktami: $(0; 0)$, $(1,2 \mu\text{s}; 1 \text{ kV/m})$, $(50 \mu\text{s}, 0,5 \text{ kV/m})$. Użyty symulator jest opracowaniem własnym. W zakresie algorytmu FDTD jest on zbliżony do programu FDTDINC [15].



Rys.2. Napięcie na końcu linii dla $\psi=5\pi/12$ i $\varphi=0$: a) $\Delta x=100$ m, $\Delta t=200$ ns (linia przerywana), b) $\Delta x=10$ m, $\Delta t=20$ ns (linia ciągła)

Podobne ujęcie metody FDTD jest zastosowane w pakiecie LIOV [9], przy czym zaimplementowany w programie MTLF model kanału wyładowania atmosferycznego pozwala na badanie linii w pobliżu wyładowania, w polu niejednorodnym. Sprężenie linii z polem wyładowania atmosferycznego zrealizowane jest w ujęciu Agrawala [17]. W [16] wykazano istotny wpływ na wyniki symulacji parametru t_{\min} , który określa przedział $(0, t_{\min})$ obliczeń dla wszystkich kroków czasowych oraz przedział $t > t_{\min}$, w którym krok jest zwiększany i wykorzystywane są procedury aproksymacji.

Symulatory wykorzystujące model linii w dziedzinie częstotliwości

Przejdźcie z opisem linii w dziedzinę częstotliwości pozwala w prosty sposób uwzględnić rezystywność i przenikalność elektryczną ziemi, zjawisko naskórkowości i zbliżenia w przewodach linii, charakterystyki częstotliwościowe współczynników odbicia i przenoszenia fali do stratnej ziemi itp. W grupie pakietów symulujących przepięcia indukowane na uwagę zasługuje tu EMCodes [8], chociaż można podać przykłady, kiedy wyniki symulacji z tego pakietu obciążone są istotnymi błędami - błędy te można wyraźnie zmniejszyć formując odpowiednio zaburzenie [18].

W przypadku zaburzeń przewodzonych w układach elektroenergetycznych na czołowym miejscu należy wymienić pakiet EMTP-ATP [10], który ma zaimplementowane najbardziej zaawansowane modele częstotliwościowe typowych elementów układu.

Podsumowanie

Spośród bardzo bogatej oferty symulatorów do badań kompatybilności elektromagnetycznej układów i urządzeń tylko niektóre są użyteczne w symulacjach przepięć atmosferycznych w układach wysokich napięć. Decyduje o tym

specyfika piorunowych zaburzeń elektromagnetycznych oraz struktura typowych układów elektroenergetycznych.

Przedstawione analizy należy kontynuować w dalszych badaniach efektywności różnych symulatorów dla wyboru optymalnych narzędzi do projektowania i eksploatacji układów izolacyjnych wysokiego napięcia.

LITERATURA

- [1] Bajorek J.: Modelowanie matematyczne przepięć indukowanych wyładowaniami atmosferycznymi, *Materiały VIII Symposium „Problemy Eksploatacji Układów Izolacyjnych Wysokiego Napięcia”*, Zakopane, 2001, 47-52
- [2] Bajorek J.: Wybrane problemy modelowania wyładowania atmosferycznego jako zaburzenia elektromagnetycznego układów elektrycznych, *Materiały IX Symposium EUI, Przegląd Elektrotechniczny – Konferencje*, vol. 1, nr 1/2003, str. 11-14
- [3] Kodali V Prasad, Engineering Electromagnetic Compatibility. Principles, Measurements, Technologies and Computer Models, *Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc.*, New York 2001
- [4] Swanson D.G., Hofer W.J.R., Electromagnetic simulators - theory and practice. A full-day tutorial, *Proceedings of 15th International Zurich Symposium and Technical Exhibition on Electromagnetic Compatibility*, February 18-20, 2003
- [5] Numerical Electromagnetics Code (NEC), www.nec2.org
- [6] Djordjevic A.R., Bazdar M.B., Petrovic V.V., Olcan D.I., Sarkar T.K., Harrington R.F., *Awars for Windows Version 2: Analysis of Wire Antennas and Scatterers, Software and User's Manual with Book*, Artech House Publishers, New York 2002
- [7] CDEGS - User's Manuals, *Safe Engineering Services & Technologies Ltd.*, Montreal, Canada 1997, www.sestech.com
- [8] Tesche F.M., EMCODES, *EMC – Electromagnetic Consulting Service*, www.tesche.com
- [9] LIOV: Lightning Induced Over Voltage Code, *University of Bologna*, www.tori.ing.unibo.it/die/liov/
- [10] EMTP-ATP: Electromagnetics Transients Program - Alternative Transients Program. *European EMTP Users Group*, www.eeug.de
- [11] Harrington R.F., Field computation by moment methods, *MacMillan*, New York 1968
- [12] Wang J.J., Generalized moment methods in electromagnetics, *John Wiley & Sons, Inc.*, New York 1991
- [13] Anisierowicz K., A new algorithm for antenna theory modelling of a lightning return stroke, *Proceedings of 27th International Conference on Lightning Protection*, Avignon, September 13-16, 2004, Session 9b, Paper 2, 1-5
- [14] Masłowski G., Some aspects of numerical modeling of lightning return stroke current based on antenna theory, *Proceedings of 27th International Conference on Lightning Protection*, Avignon, September 13-16, 2004, Session 1b, Paper 3, 1-4
- [15] Paul C.R., Analysis of multiconductor transmission lines, *John Wiley & Sons, Inc.*, New York 1994
- [16] Bajorek J., Effectiveness of FDTD method in analysis of lightning electromagnetic disturbances, *13th International Symposium on Theoretical Electrical Engineering*, Lviv, July 4-7, 2005
- [17] Nucci C.A., Rachidi F., Ianoz M., Mazzetti C., Lightning-induced voltages on overhead lines, *IEEE Trans. EMC*, 35 (1993), n.1, 75-86
- [18] Gamracki M., Modelowanie matematyczne piorunowych zaburzeń elektromagnetycznych w liniach transmisyjnych, *Rozprawa doktorska*, Wydział Elektrotechniki i Informatyki Politechniki Rzeszowskiej, Rzeszów 2004

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