



Grzegorz MASŁOWSKI, Robert ZIEMBA

Politechnika Rzeszowska, Zakład Podstaw Elektrotechniki i Informatyki

Modelowanie przepięć atmosferycznych w liniach elektroenergetycznych z uwzględnieniem kanału pioruna

Streszczenie. W pracy przedstawiono symulacje komputerowe przepięć indukowanych w napowietrznych liniach elektroenergetycznych. Dokonano analizy wyników uzyskanych na podstawie modelu sformułowanego w dziedzinie czasu i wykorzystującego teorię linii długiej oraz modelu w dziedzinie częstotliwości opartego na teorii antenowej.

Abstract. (Modeling of overvoltages induced in power lines allowing for lightning channel). The paper presents computer simulations of overvoltages induced in overhead power lines. Analysis of obtained results has been ran based on the model formulated in the time domain, which uses the transmission line theory and the model in the frequency domain using antenna theory.

Słowa kluczowe: modelowanie matematyczne, przepięcia indukowane, wyładowanie atmosferyczne

Keywords: mathematical modeling, induced overvoltages, lightning discharge

Wstęp

Przepięcia pochodzenia atmosferycznego są jednym z głównych zagrożeń urządzeń elektrycznych i elektronicznych. Najwyższy poziom zaburzeń elektromagnetycznych występuje podczas wyładowań bezpośrednich. Jednakże znacznie częstszym zjawiskiem są wyładowania piorunowe w pobliżu obiektów budowlanych i linii napowietrznych. Prąd płynący wzdłuż kilkukilometrowego kanału generuje impulsowe pole elektromagnetyczne LEMP (ang. *Lightning Electromagnetic Pulse*), które osiąga najwyższe poziomy natężeń w trakcie trwania tzw. głównych składowych wyładowania. Przepięcia mogą się zatem indukować bezpośrednio w urządzeniach lub przenosić się do nich przez linie dochodzące do obiektów.

W ostatnich latach prowadzone są intensywne prace w zakresie projektowania nowych systemów ochrony przed LEMP, przywiązujące dużą wagę do bardziej szczegółowego modelowania matematycznego:

- zjawisk fizycznych zachodzących w kanale wyładowania atmosferycznego [1],
- propagacji impulsowego pola elektromagnetycznego generowanego przez prąd pioruna [2],
- oddziaływania pola elektromagnetycznego na linie transmisyjne, urządzenia elektryczne i elektroniczne [3].

Zaobserwować można także duże zaangażowanie ośrodków badawczych w opracowanie odpowiednich, użytecznych modeli i zaimplementowanie ich w znanych i powszechnie używanych pakietach komputerowych jak EMTP i EMTP-ATP. Pakiety te zawierają wiele gotowych zaawansowanych modeli elementów układów elektrycznych i elektroenergetycznych. Brakuje w nich jednak elementów dokładnie odwzorowujących oddziaływanie impulsowego pola elektromagnetycznego pochodzenia piorunowego (LEMP), które byłyby łatwe w użyciu w codziennej pracy z tymi pakietami.

Prowadzone badania znalazły również odzwierciedlenie w dokumentach Międzynarodowej Komisji Elektrotechnicznej IEC, dotyczących ochrony odgromowej obiektów budowlanych. Seria czterech norm IEC 61312 opisuje zalecenia odnośnie ochrony obiektów budowlanych przed piorunowym impulsem elektromagnetycznym. W Polsce opracowane zostały przez Komitet Techniczny ds. Instalacji Elektrycznych i Ochrony Odgromowej Obiektów Budowlanych trzy pierwsze dokumenty jako PN-IEC 61312-1 (2001), PN-IEC/TS 61312-2 (2003) i PN-IEC/TS 61312-3

(2003). Warto jednak wspomnieć, że od 1 stycznia 2004 komitety CENELEC stały się najważniejsze w zakresie normalizacji i aktualnie trwają prace nad nowymi wersjami dokumentów związanych z ochroną odgromową obiektów budowlanych [4].

W artykule dokonano analizy przepięć indukowanych w linii napowietrznej pobliskimi wyładowaniami piorunowymi. Wyniki uzyskane w oparciu o program LIOV (ang. *Lightning Induced Overvoltages*) porównano z przebiegami wyznaczonymi na podstawie własnego modelu sformułowanego w dziedzinie częstotliwości z wykorzystaniem pakietu CDEGS. Przedstawiony model umożliwi analizę złożonych układów liniowych i może być również zastosowany do oceny przepięć w liniach wysokiego napięcia zarówno w przypadku wyładowań bezpośrednich jak i w pobliżu linii.

Modele matematyczne kanału wyładowania głównego

Wyładowania piorunowe doziemne są złożonym zjawiskiem fizycznym wymagającym formułowania modeli matematycznych poszczególnych etapów jego rozwoju z pominięciem części zachodzących procesów. Aktualnie najbardziej zaawansowane są modele lidera i wyładowania głównego, tj. faz szczególnie istotnych z punktu widzenia ochrony odgromowej i przepięciowej. Podejmowane są również próby modelowania - często tylko intuicyjnego - wstępnych wyładowań w chmurach, składowych prądu typu M, procesów strimerowych typu J i K, prądu długotrwałego oraz mechanizmu łączenia się lidera odgórnego z liderem oddolnym. Korzyści płynące z zastosowania w ochronie odgromowej i przepięciowej modeli matematycznych wyładowania piorunowego wynikają z możliwości wyznaczania:

- statystycznego rozkładu parametrów prądu piorunowego na podstawie rejestracji pola elektrycznego i magnetycznego w systemach lokalizacji wyładowań w celu dokonania analizy ryzyka wystąpienia szkód,
- rozprzysywu prądów piorunowych w trakcie bezpośrednich wyładowań,
- napięć i prądów indukowanych wyładowaniami pobliskimi w instalacjach elektrycznych i liniach transmisyjnych.

Modele matematyczne wyładowania głównego opisują tylko wybrane zjawiska fizyczne zachodzące w trakcie jego trwania w kanale piorunowym pomiędzy ziemią i chmurą. Są one więc uproszczoną reprezentacją rzeczywistego procesu wymagającą weryfikacji w trakcie badań

eksperymentalnych z uwzględnieniem właściwych kryteriów klasyfikacyjnych. Zgodnie z tymi kryteriami rozróżnia się następujące cztery klasy modeli wyładowania głównego [5]:

- modele elektrotermodynamiczne oparte na gazodynamicznych równaniach stanu oraz zasadach zachowania masy, energii i pędu (klasa I),
- modele z arbitralnie zdefiniowanym rozkładem prądu (ładunku) wzdłuż całego kanału (klasa II),
- modele antenowe (klasa III),
- modele o parametrach rozłożonych oparte na teorii linii długiej (klasa IV).

Największe zastosowanie w praktyce inżynierskiej znalazły modele z klasy II i III. Do wyznaczania przepięć indukowanych w linii napowietrznej wykorzystane zostaną w artykule modele z arbitralnie założonym rozkładem prądu (ładunku). Prąd w kanale określa ogólne równanie

$$(1) \quad i(z', t) = \begin{cases} P(z') \cdot i(0, t - z'/v) & z' \leq vt \\ 0 & z' > vt \end{cases}$$

gdzie funkcja $P(z')$ określa tłumienie fali prądowej. Na przykład dla modelu MTLL [4] (ang. *Modified Transmission Line model with Linear attenuation*) funkcja ta ma postać $P(z') = 1 - z'/H$, a dla innego popularnego modelu MTLE [4] (ang. *Modified Transmission Line model with Exponential attenuation*) wynosi ona $P(z') = \exp(-z'/\lambda)$, przy czym λ oznacza współczynnik tłumienia fali prądowej, który determinuje rozkład ładunku elektrycznego wzdłuż kanału przez lider wyładowania. Ponadto v oznacza prędkość propagacji głównej składowej wyładowania, a H jest wysokością kanału piorunowego. Na rysunku 1 przedstawione zostały typowe kształty fali prądowej na różnych wysokościach kanału wraz z widmem amplitudowym prądu u podstawy kanału dla obydwu modeli. Można zauważyć, że zgodnie z modelem MTLL prąd na końcu kanału ($z = H$) wynosi zero, podczas gdy w modelu MTLE wciąż pozostaje jego niewielka wartość, która wywołuje odbicia fali. Przyjęte kształty fali prądowej (rys. 1) są typowe dla kolejnych składowych wyładowania głównego. Charakteryzują się one mniejszymi od pierwszej składowej wartościami szczytowymi, ale za to dużo większymi stromościami prądu, mogącymi przekraczać nawet wartość $100 \text{ kA}/\mu\text{s}$. Na podstawie widma amplitudowego widać również, że zakres częstotliwości mających istotny wpływ na kształt przebiegów czasowych dochodzi do kilkunastu megaherców. Walidacja modeli wyładowania głównego polega przede wszystkim na porównaniu zmierzonego pola elektrycznego i magnetycznego z wartościami wyznaczonymi teoretycznie.

Podejmuje się również próby oceny zmienności prądu wzdłuż kanału na podstawie zmian intensywności promieniowania widzialnego oraz prędkości propagacji fali prądowej, której powinna odpowiadać szybkość przemieszczania się jasno świecącego czoła wyładowania.

Wyznaczanie przepięć indukowanych wyładowaniami

Wykorzystanie modeli z arbitralnie zdefiniowanym rozkładem prądu oraz tzw. modelu Agrawala [2] linii transmisyjnej w zewnętrznym polu elektromagnetycznym umożliwia wyznaczenie przepięć indukowanych pobliskimi wyładowaniami piorunowymi. Takie rozwiązanie zastosowane zostało w programie LIOV (ang. *Lightning Induced Overvoltages*), który jest rozwijany od wielu lat w ramach współpracy Uniwersytetów w Lozannie, Bolonii i Rzymie.

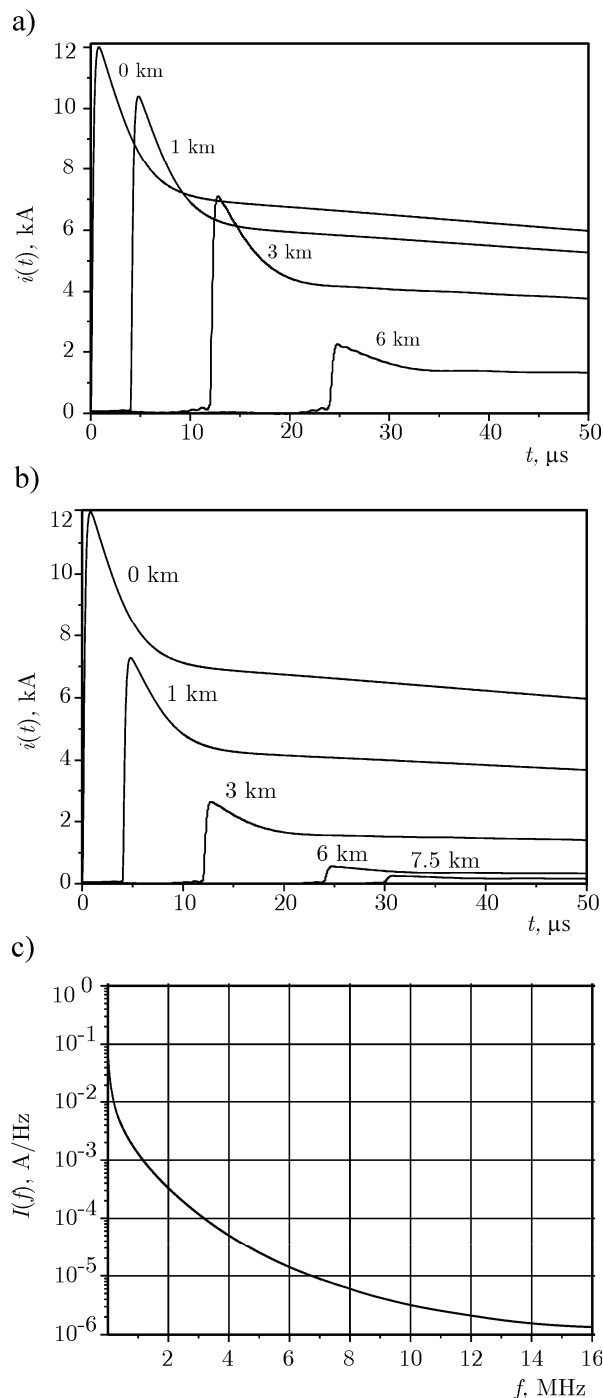
Inne podejście zastosowali autorzy wykorzystując środowisko programu CDEGS do konstrukcji modelu przepięć indukowanych. Z uwagi na to, że wykorzystany symulator elektromagnetyczny bazuje na rozwiązaniu

równań Maxwella w dziedzinie częstotliwości dokonana została transformata Fouriera przebiegów czasowych prądu wyładowania, dzięki której otrzymano zależność:

$$(2) \quad I(z', v, \omega) = P(z') \int_{z'/v}^{\infty} i(0, t - z'/v) \exp(-j\omega t) dt$$

gdzie ω oznacza pulsację.

W ogólnym przypadku parametrami transformaty częstotliwościowej prądu są prędkość propagacji wyładowania v oraz wysokość z' analizowanego segmentu kanału nad powierzchnią ziemi.



Rys. 1. Prąd typowej kolejnej składowej wyładowania głównego wyznaczony na różnych wysokościach kanału: a) dla modelu MTLL z tłumieniem liniowym prądu ($v=130 \text{ m}/\mu\text{s}$, $H=7,5 \text{ km}$); b) dla modelu MTLE z tłumieniem wykładniczym prądu ($v = 130 \text{ m}/\mu\text{s}$, $H=7,5 \text{ km}$, $\lambda=2 \text{ km}$); c) widmo amplitudowe prądu u podstawy kanału

Wykorzystując podstawienie $t' = t - z'/v$ oraz twierdzenie o przesunięciu można wzór (2) zapisać w postaci:

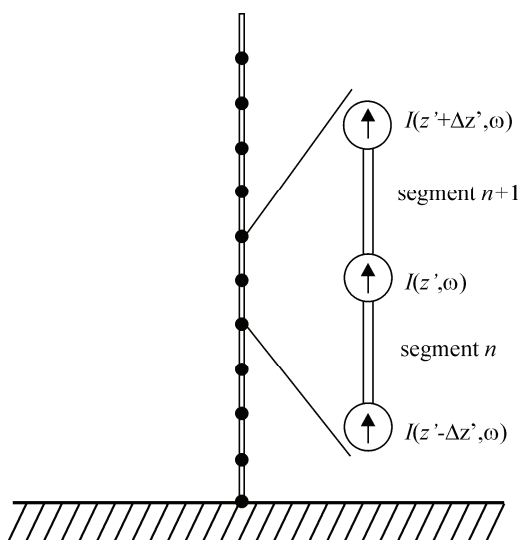
$$(3) \quad I(z', v, \omega) = P(z') \int_{z'/v}^{\infty} i(0, t') \exp[-j\omega(t' - z'/v)] dt'$$

a po wyciągnięciu przed operator całkowania czynnika niezależnego od czasu otrzymuje się

$$(4) \quad I(z', v, \omega) = P(z') D(z', v, \omega) \int_{z'/v}^{\infty} i(0, t') \exp(-j\omega t') dt'$$

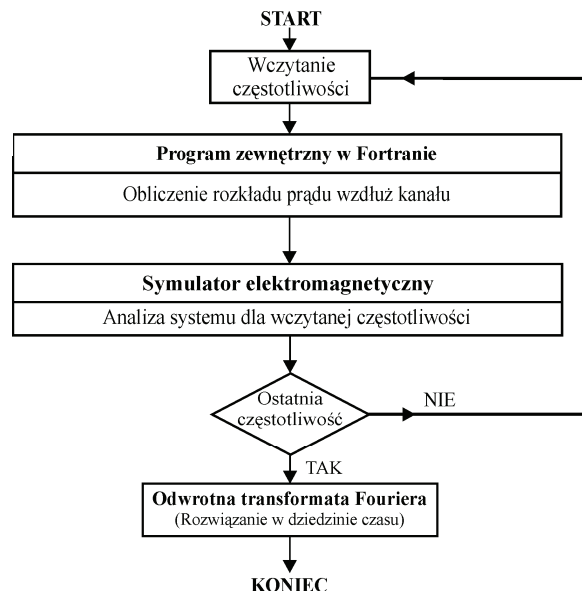
gdzie $D(z', v, \omega) = \exp(j\omega z'/v)$ jest przesunięciem fazowym poszczególnych składowych harmonicznych prądu wyładowania, natomiast całka wyraża transformatę Fouriera prądu u podstawy kanału.

Implementacja modelu do programu CDEGS oznacza konieczność uwzględnienia zmiennego opóźnienia fazowego wzdłuż całego kanału. Zostało to zrealizowane poprzez zdefiniowanie wzdłuż kanału źródeł prądowych o jednostkowych amplitudach i odpowiednich przesunięciach fazowych (rys. 2). Praktyczna implementacja modelu polegała na opracowaniu własnego programu do wyznaczania parametrów źródeł rozłożonych, a następnie wykorzystaniu ich w środowisku programu CDEGS.



Rys. 2. Kanał wyładowania piorunowego z zaznaczonymi źródłami uwzględniającymi przesunięcie fazowe transformaty prądu

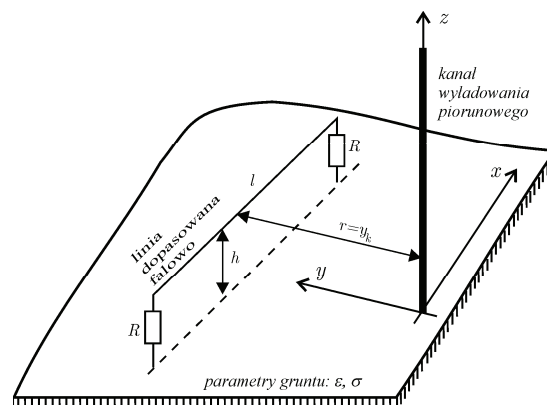
Szczegółowy algorytm wyznaczania napięć indukowanych został przedstawiony na rysunku 3. Wymieniony w artykule program LIOV wyposażony został w interfejs pozwalający na jego implementację między innymi do znanego programu EMTP (ang. *ElectroMagnetic Transients Program*). Popularna wersja tego programu EMTP-ATP (ang. *EMTP - The Alternative Transients Program*) jest powszechnie wykorzystywana do analizy przebiegów przejściowych w systemach elektroenergetycznych. Ostatnio dostępny jest w EMTP-ATP również inny program LIV (ang. *Lightning Induced Voltages*) do wyznaczania napięć indukowanych wyładowaniami. Wyniki uzyskane z obydwu programów porównane zostały w pracy [6]. Poniżej przedstawiono natomiast napięcia wyznaczone na podstawie programu LIOV i z wykorzystaniem algorytmu przedstawionego na rysunku 3.



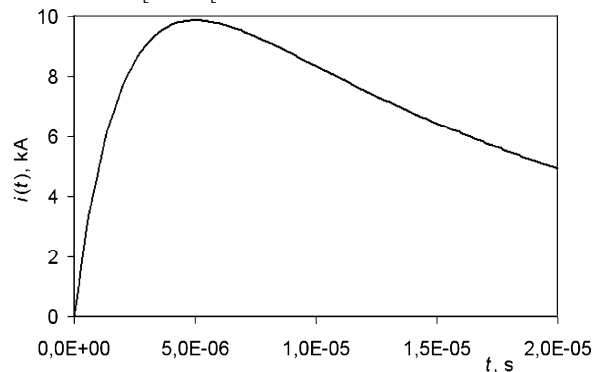
Rys. 3. Algorytm wyznaczania napięć indukowanych wykorzystujący opracowany program w Fortranie i środowisko programu CDEGS

Napięcia indukowane w linii napowietrznej

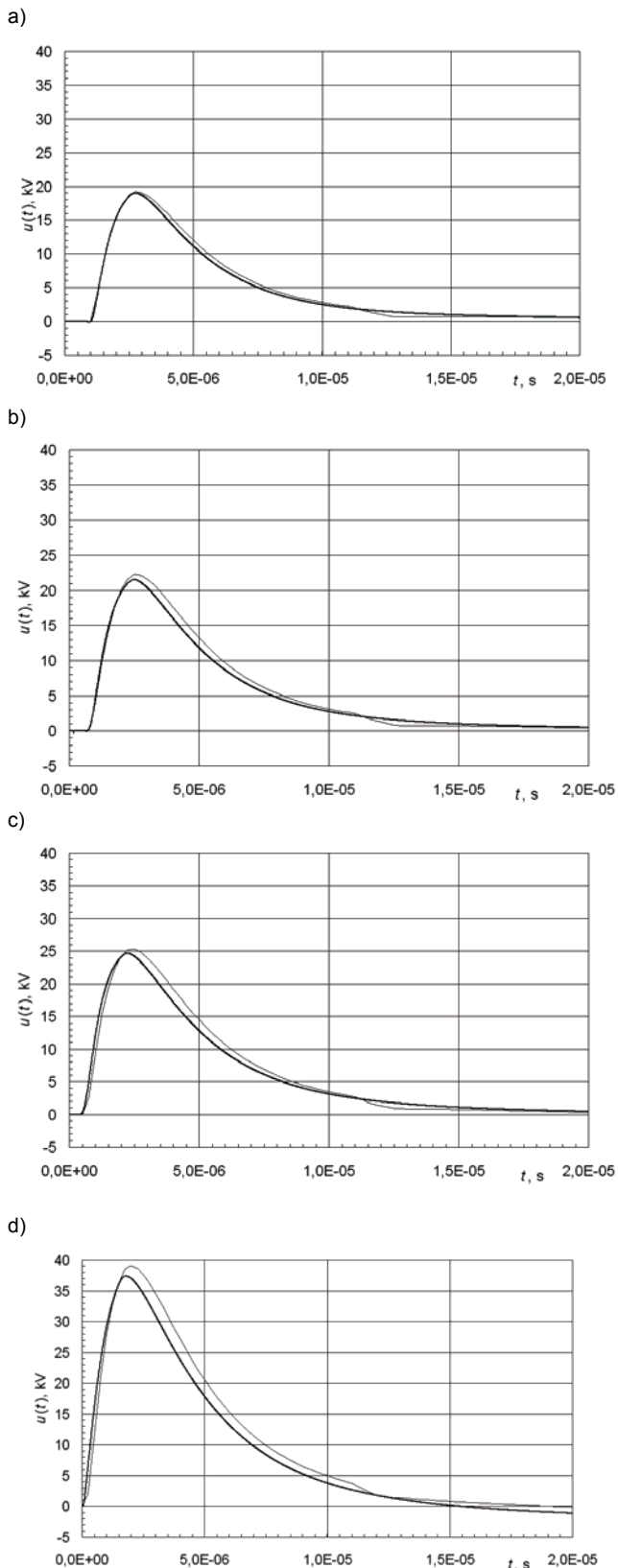
Do analizy porównawczej przyjęto układ jak na rysunku 4. Założono, że linia napowietrzna, dopasowana falowo na końcach, znajduje się 7,5 m nad powierzchnią stratnej ziemi o konduktywności $\gamma = 0,01$ S/m, a jej długość l wynosi 500 m. Prostopadły do powierzchni ziemi kanał wyładowania piorunowego o wysokości $H=7,5$ km usytuowano w odległości $r=50$ m od środka linii.



Rys. 4. Geometria układu podczas analizy napięć indukowanych w linii nad stratną ziemią



Rys. 5. Przyjęty w trakcie obliczeń dwuwykładniczy przebieg prądu 5/20 μ s u podstawy kanału pioruna



Rys. 6. Napięcia indukowane w linii z rysunku 4: a) na końcu linii, $x = 250$ m; b) dla $x = 150$ m; c) dla $x = 50$ m; d) w środku linii, $x = 0$ m. Grubą linią pokazane zostały przebiegi uzyskane z programu LIOV, natomiast cienka linia odpowiada rezultatom obliczeń na podstawie proponowanego algorytmu (CDEGS)

Aby zredukować czas trwania obliczeń numerycznych w dziedzinie częstotliwości przyjęto aproksymację kształtu prądu u podstawy kanału przebiegiem dwuwykładniczym $5/20 \mu\text{s}$, którego wartości szczytowa wynosiła $I_m = 10$ kA (rys. 5). Mniej strome zbocze narastające wpływa bowiem na ograniczenie zakresu wysokich częstotliwości, które wymagają wyznaczania tzw. całek Sommerfelda bez możliwości zastosowania efektywnych aproksymacji.

Uzyskane wyniki symulacji komputerowych, przedstawione na rysunku 6, wykazują dużą zgodność. Obliczenia wykonane za pomocą programu LIOV w dziedzinie czasu oraz programu CDEGS wykorzystującego metodę momentów w dziedzinie częstotliwości nie różnią się więcej niż o 5%, przy czym największe odchyłki występują w środku linii, gdy kanał wyładowania jest bardzo blisko. Poprawę dokładności można uzyskać zwiększając liczbę przyjmowanych wartości częstotliwości, dla których analizowany jest system.

Wnioski

Zaproponowany w artykule algorytm w dziedzinie częstotliwości może być wykorzystany do wyznaczania napięć indukowanych w liniach napowietrznych. Dzięki zastosowanemu podejściu opierającemu się na rozwiązaniu ogólnych równań Maxwella można przedstawić metodę wykorzystać do analizy złożonych układów, nie posiadających symetrii osiowej. Takich możliwości nie posiada program LIOV oraz inne programy oparte na modelach linii transmisyjnej.

LITERATURA

- [1] Masłowski G., Rakov V. A., A study of the lightning channel corona sheath, *J. Geophys. Res.*, vol. 111, D14110, 2006
- [2] Masłowski G., Ziemia R., The magnetic field attenuation inside a structure with an unscreened window for the case of direct and nearby lightning strikes, *15th Int. Zurich Symposium on EMC, Zurich 2003*, pp. 575-580
- [3] Cooray V. (Editor), The lightning flash, Institute of Electrical and Electronic Engineers, England, 2003
- [4] Bouquegneau Ch., The Lightning Protection International Standard, *28th Int. Conference on Lightning Protection (ICLP), Kanazawa, Japan 2006, invited lectures*
- [5] Rakov V.A., Uman M.A., Review and Evaluation of Lightning Return Stroke Models Including Some Aspects of Their Application, *IEEE Trans. Electromagn. Compat.*, vol. 40, pp. 403-426, 1998
- [6] Paolone M., Perez E, Borghetti A., Nucci C.A., Rachidi F., Torres H., Comparison of Two Computational Programs for the Calculation of Lightning-Induced Voltages on Distribution Systems, *Proc. of the Int. Conf on Power Syst. Transients, IPST '05 - Montréal, Canada, June 19-23, 2005*.

Autorzy: dr inż. Grzegorz Masłowski, maslowski@prz.edu.pl; dr inż. Robert Ziemia, ziemia@prz.edu.pl; Politechnika Rzeszowska, Zakład Podstaw Elektrotechniki i Informatyki, ul. W. Pola 2, 35-959 Rzeszów