



Jerzy BAJOREK

Politechnika Rzeszowska, Zakład Podstaw Elektrotechniki i Informatyki

Wybrane problemy modelowania ulotu z przewodów linii elektroenergetycznych

Streszczenie. Złożoność zjawiska ulotu i nieliniowe modele ulotu z przewodów linii elektroenergetycznych oceniono pod kątem komputerowych symulacji przebiegów spowodowanych wyładowaniami atmosferycznymi. Przeanalizowano użyteczność modelu kondensatora stowarzyszonego z algorytmem trapezów dla wybranych modeli matematycznych ulotu. Otrzymane wyniki wykazują większą efektywność niż symulacje z modelem iteracyjnym dla nieliniowych węzłów ulotu.

Abstract. (Selected problems of corona modeling for HV transmission line conductors). The complex physical phenomenon of corona and its nonlinear models for the HV transmission lines in digital simulations of lightning overvoltages are discussed in the paper. The utility of capacitor model for trapezoidal rule of integration is analyzed for selected mathematical models of corona. The obtained results are more satisfactory than simulations with iterative models of nonlinear corona nodes.

Słowa kluczowe: zjawisko ulotu, modelowanie matematyczne, przebiegi przejściowe, linie elektroenergetyczne

Keywords: corona effect, mathematical models, transients, power lines

Wstęp

Modelowanie matematyczne piorunowych zaburzeń elektromagnetycznych oraz komputerowe metody symulacji przebiegów wywołanych wyładowaniem atmosferycznym mają istotne znaczenie dla określenia jego oddziaływania na układy izolacyjne wysokiego napięcia, a także na osprzęt elektroniczny i teleinformatyczny systemów elektroenergetycznych. W referacie na X Sympozjum EUI'2005 [1] wykazano, że analiza porównawcza różnych modeli zaimplementowanych w różnych symulatorach elektromagnetycznych jest niezbędnym elementem doskonalenia metod projektowania i eksploatacji układów izolacyjnych wysokiego napięcia.

Symulatory elektromagnetyczne narażeń przebiegowych układów elektroenergetycznych ciągle mają zbyt małe moce przetwarzania, by można było implementować w nich złożone modele matematyczne zjawisk fizycznych we wszystkich elementach układu. Dla wielu zjawisk fizycznych wykorzystuje się uproszczone modele fenomenologiczne, inżynierskie, o parametrach dobranych dla konkretnych układów. Taką sytuację mamy na przykład w podstawowych symulatorach zaburzeń przewodzonych w układach elektroenergetycznych, jakimi są pakiety z grupy EMTP (ang. *Electromagnetic Transients Program*). Najpopularniejszy z tej grupy pakiet ATP (ang. *Alternative Transient Program*) [2, 3] jest rozwijany od ponad trzydziestu lat i ma zaimplementowane bardzo zaawansowane modele typowych elementów układu elektroenergetycznego, a także posiada narzędzia uzupełnienia przyborka modeli o modele opracowane przez użytkownika [4, 5, 6]. Rozbudowa modeli matematycznych elementów układu elektroenergetycznego przekłada się jednak w sposób oczywisty na wydłużenie czasu symulacji i dla symulacji przebiegów przejściowych w bardziej złożonych układach konieczne jest przyjęcie szeregu istotnych założeń upraszczających dla całego układu lub przynajmniej modeli niektórych elementów układu, by symulacje wykonać w sensownych czasach przetwarzania. Pewne nadzieje na przyspieszenie symulacji można wiązać z uruchomieniem wersji pakietów na wieloprocesorowe komputery z przetwarzaniem równoległym, ale poszukiwanie bardziej efektywnych modeli obliczeniowych pozostaje zagadnieniem otwartym.

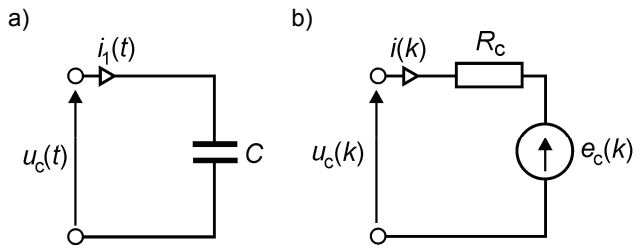
Problem poszukiwania bardziej efektywnych modeli obliczeniowych dotyczy również przypadku modelowania zjawiska ulotu z przewodów linii elektroenergetycznej jako zjawiska fizycznego zależnego od wielu parametrów przewodu i jego otoczenia. Zjawisko ulotu, niekorzystne w stanach pracy znamionowej układu elektroenergetycznego ze względu na straty ulotowe oraz zakłócenia radioelektryczne, jest zjawiskiem tłumiącym przebiegi przebiegiowe, a więc zmniejsza narażenia układów elektroizolacyjnych. Liczne publikacje pokazują, że ocena tłumienia przebiegów przebiegowych ulotem jest istotnym elementem współczesnych analiz tych układów [7, 8].

Najczęściej dyskretne modele ulotu z odcinków linii są łączone z podstawowymi metodami analizy linii elektroenergetycznej jako linii o parametrach rozłożonych [9]:

- a) metodą różnic skończonych dla równań linii,
- b) metodą charakterystyk,
- c) metodą zastępczego łańcucha czwórników,
- d) metodą podziału linii na liniowe sekcje ze zjawiskami falowymi i węzły z elementami dyskretnymi odwzorowującymi zjawiska nieliniowe.

Dla prostych układów można zbudować symulatory efektywnie wykorzystujące wszystkie cztery metody, natomiast symulatory złożonych i rozbudowanych układów elektroenergetycznych narzucają istotne ograniczenia na modele opracowane przez użytkownika. Przykładowo, w obecnej strukturze pakietu ATP metod a) i b) nie można zastosować, a metoda c) w swojej standardowej postaci nie uwzględnia charakterystyk częstotliwościowych parametrów linii i nie powinna być stosowana na przykład przy przebiegach szybkozmiennych w obwodach ziemno-powrotnych. Z kolei metoda d) w podstawowym podejściu wymaga stosowania procedur iteracyjnych dla układu nieliniowych równań różniczkowych w węzłach ulotu, co bardzo wydłuża czasy symulacji przebiegów przebiegowych. Zaproponowane w pracy zastosowanie symulatora kondensatora stowarzyszonego z algorytmem trapezów pozwala ominąć stosowanie procedur iteracyjnych dzięki schematowi zastępczemu jak na rysunku 1b, z parametrami wyznaczanymi w kolejnych krokach czasu $\Delta t = h$, to znaczy dla $k = t/h$ ze wzorów [10]

$$(1) \quad R_C = \frac{h}{2C}; \quad e_c(k) = u_c(k-1) + R_C i(k-1)$$



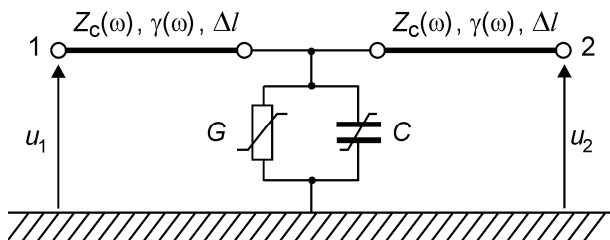
Rys. 1. Kondensator a) i jego model obliczeniowy b)

Efektywność modelu Kudłana & Shiha

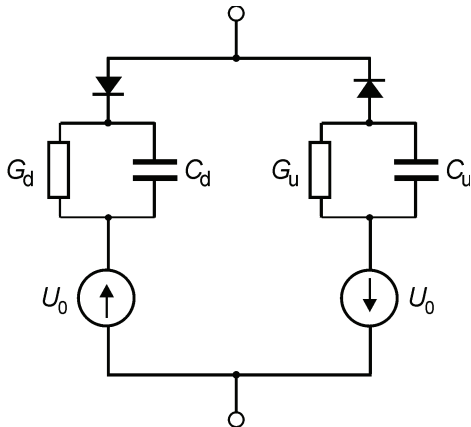
Modelowanie linii ze zjawiskiem ulotu w pakiecie ATP realizowane jest już ponad dwadzieścia lat [9, 11]. Pierwszy model Kudłana i Shiha (1981) z dodatkową pojemnością i upływnością, załączoną po przekroczeniu napięcia początkowego ulotu U_0 , implementowali w ATP Lee (1983) oraz Semlyen & Gang (1986, 1987). Podstawowe podejście, pozwalające uwzględnić zarówno charakterystyki częstotliwościowe rezystancji i indukcyjności linii, jak i nieliniową pojemność i upływność ulotu, to podział linii na liniowe odcinki o parametrach rozłożonych, opisane charakterystykami częstotliwościowymi impedancji falowej $Z_c(\omega)$ i współczynnika przenoszenia $\gamma(\omega)$ oraz węzły ulotu, z dyskretnymi, nieliniowymi kondensatorami i konduktancjami jak na rysunku 2, przy czym model Kudłana i Shiha ma postać jak na rysunku 3 z parametrami zadanymi dla dwóch polaryzacji napięcia. Dla przewodu stalowo-aluminiowego o średnicy 0,927 cala, zbliżonego do stosowanego w polskich liniach 110 kV przewodu AFL-6 240 mm², w pracy [12] przyjęto:

$$(2) \quad C_d = 5,13 \text{ pF/m}; \quad C_u = 3,42 \text{ pF/m}$$

$$G_d = G_u = 1,67 \text{ nS/m}; \quad U_0 = 386 \text{ kV}$$



Rys. 2. Model linii z wyodrębnionym węzłem ulotu

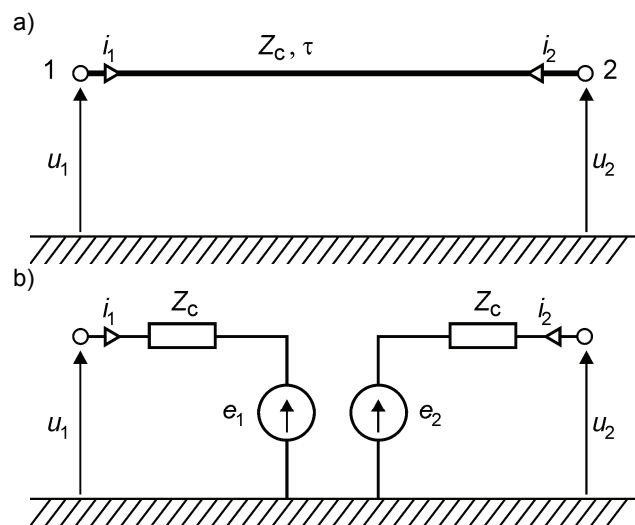


Rys. 3. Model węzła ulotu z liniową pojemnością i upływnością

Podstawowe parametry numeryczne przyjętego modelu linii z ulotem to krok dyskretyzacji zagadnienia ciągłego w czasie $\Delta t=h$ oraz liczba węzłów ulotu N równa liczbie odcinków, na jakie podzielono linię. Dla uwypuklenia wpływu parametrów numerycznych na wyniki symulacji warto wybrać jako rozwiązanie odniesienia przypadek linii bezstratnej, ponieważ jej model jest opisany tylko dwoma parametrami: niezależną od częstotliwości impedancją falową Z_c i czasem propagacji w linii τ , co zdecydowanie ułatwia interpretację wyników. Model linii w postaci pary źródeł sterowanych jak na rysunku 4 [6] można wówczas łatwo powiązać w węzłach ulotowych z pojemnością ulotową i upływnością ulotową wykorzystując model obliczeniowy kondensatora jak na rysunku 1. Napięcia źródeł sterowanych na rysunku 4b wyznaczane są z zależności

$$(3) \quad e_1(t) = u_2(t - \tau) + Z_c i_2(t - \tau)$$

$$(4) \quad e_2(t) = u_1(t - \tau) + Z_c i_1(t - \tau)$$



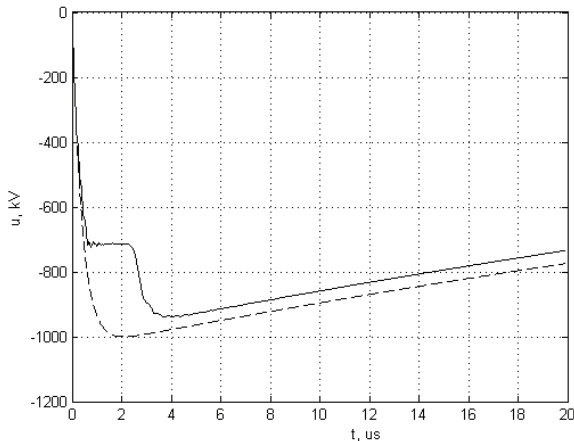
Rys. 4. Odcinek linii bezstratnej a) i jej model obliczeniowy b)

Zastosowane modele obliczeniowe linii i kondensatora umożliwiają obliczanie w kolejnych krokach czasowych wszystkich napięć i prądów w układzie, bez iteracyjnych procedur rozwiązywania zagadnienia nieliniowego w węzłach ulotowych dla każdego kroku w dziedzinie czasu. Efektywność obliczeniową modelu zilustrowano na rysunkach 5 i 6 dla linii $Z_c=400\Omega$ w stanie jałowym, o długości $l=3 \text{ km}$ ($\tau=10\mu\text{s}$), pobudzonej ujemnym impulsem napięcia udarowego 1,2/50 μs o amplitudzie $U_m=500 \text{ kV}$, przybliżonym przebiegiem dwuwykładniczym według wzoru [13]:

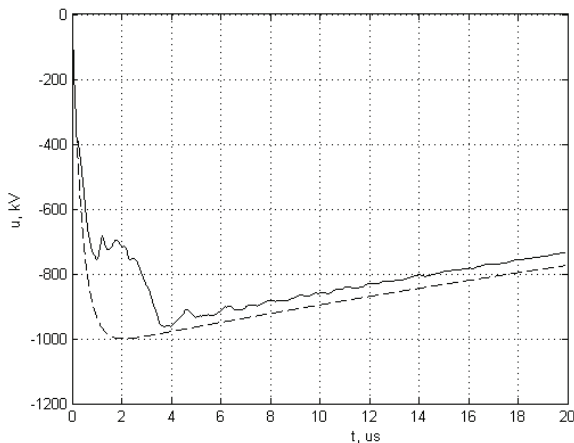
$$(5) \quad u(t) = 1,037U_m (\exp(-1,466 \cdot 10^4 t) - \exp(-2,474 \cdot 10^6 t))$$

Rozwiązanie na rysunku 5 można traktować jak rozwiązanie odniesienia, ponieważ dalsze zmniejszanie kroku dyskretyzacji w dziedzinie czasu oraz zmniejszanie długości odcinków linii (zwiększanie liczby węzłów ulotowych) nie wpływa wyraźnie na otrzymany wynik. Także zwiększanie kroku dyskretyzacji w dziedzinie czasu z $h=10 \text{ ns}$ do $h=100 \text{ ns}$ nie zmienia wyraźnie wyniku symulacji. Z rysunku 6 wynika natomiast, że zwiększenie długości odcinków linii z $\Delta l=30 \text{ m}$ do $\Delta l=150 \text{ m}$ (zmniejszenie liczby węzłów ulotowych z $N=100$ do $N=20$) bardzo wyraźnie

zmienia wyniki symulacji – model matematyczny układu jest bardzo wrażliwy na ten parametr procedur numerycznych, a równocześnie jest to parametr decydujący o czasie przetwarzania.



Rys. 5. Napięcie na końcu linii z ulotem (linia ciągła) i linii bezstratnej (linia przerywana) dla $h=10$ ns i $\Delta l=30$ m



Rys. 6. Napięcie na końcu linii z ulotem (linia ciągła) i linii bezstratnej (linia przerywana) dla $h=10$ ns i $\Delta l=150$ m

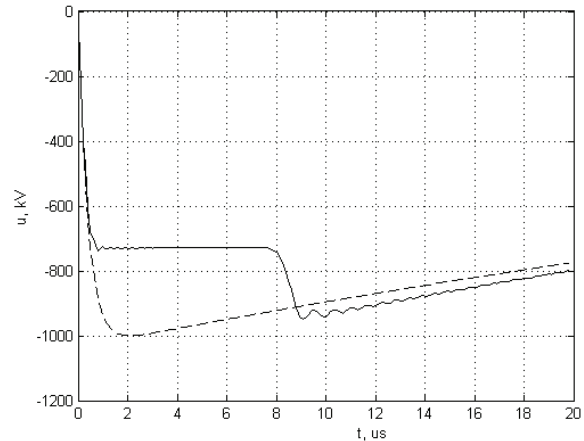
Dla dłuższych linii liczba niezbędnych węzłów ulotowych jest podstawowym problemem symulacji. Zilustrowano to na rysunkach 7 i 8 dla linii o długości $l=12$ km ($\tau=40\mu s$). Zwiększenie długości odcinków linii z $\Delta l=30$ m (rys. 7) do $\Delta l=300$ m (rys. 8), to znaczy zmniejszenie liczby węzłów ulotowych z $N=400$ do $N=40$, prowadzi do wyników symulacji bardzo wyraźnie różniących się między sobą.

Efektywność modelu Skillinga & Umoto

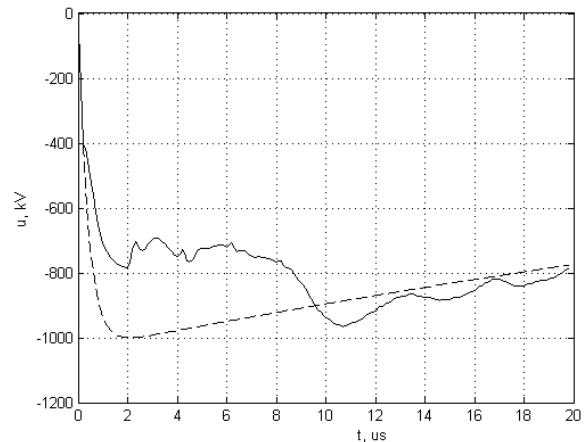
W wielu pracach analizujących przepięcia w układach z ulotem, na przykład w badaniach przepięć atmosferycznych w rozdzielni 110 kV [7], w linii 400 kV [8], czy w badaniach modelu linii wyprowadzonego z metody zmiennych stanu [14, 15] wykorzystano dla ulotu model Skillinga (1937) rozwinięty przez zespół Umoto & Hara (1969) według zależności na dodatkową, nieliniową pojemność po przekroczeniu napięcia początkowego ulotu:

$$(6) \quad C_u(u) = 2\sigma_C \sqrt{\frac{r}{2h}} \left(1 - \frac{U_0}{u}\right) \cdot 10^{-11} [\text{F/m}]$$

w której σ_C jest stałą pojemnościową ulotu, oraz dodatkową, nieliniową upływność według zależności Peeka (1912).



Rys. 7. Napięcie na końcu linii z ulotem (linia ciągła) i linii bezstratnej (linia przerywana) dla $h=100$ ns i $\Delta l=30$ m

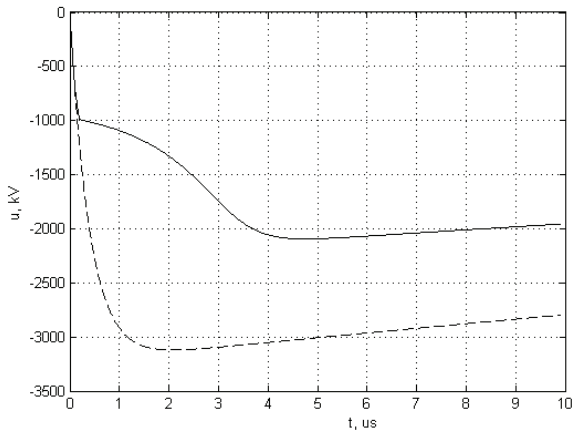


Rys. 8. Napięcie na końcu linii z ulotem (linia ciągła) i linii bezstratnej (linia przerywana) dla $h=100$ ns i $\Delta l=300$ m

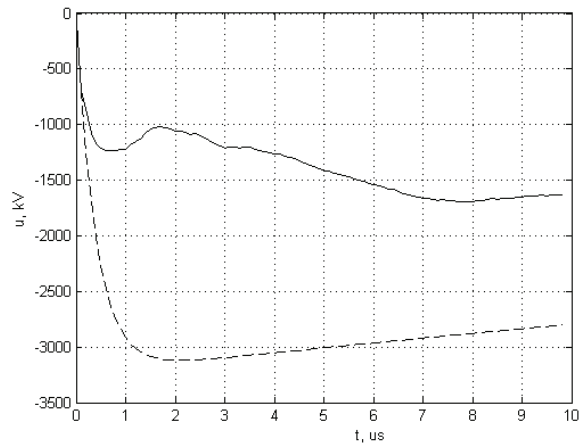
$$(7) \quad G_u(u) = \sigma_G \sqrt{\frac{r}{2h}} \left(1 - \frac{U_0}{u}\right)^2 \cdot 10^{-11} [\text{S/m}]$$

w której σ_G jest stałą upływnościową ulotu Dla danych układu, w którym wykonano pomiary ulotu [15]: napięcie początkowe ulotu $U_0=550$ kV, promień przewodu linii $r=2,54$ cm, średnia wysokość zawieszenia nad ziemią $h=18,9$ m, stałe ulotu przyjmują wartości $\sigma_C=30$ i $\sigma_G=10^7$.

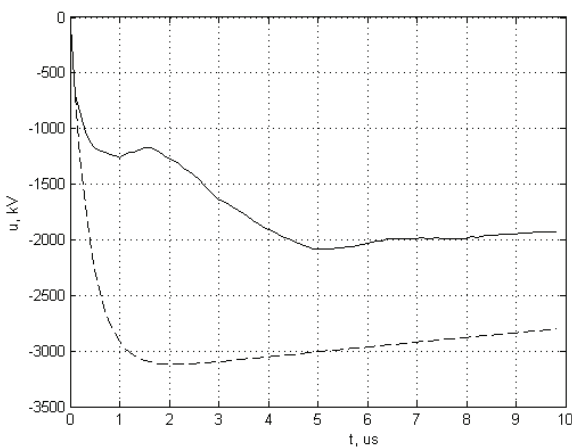
Na rysunkach 9 – 12 zilustrowano wyniki symulacji napięcia na końcu linii wymuszonego udarem $1,2/50\mu s$ o amplitudzie $U_m=1560$ kV. Rysunki 9 i 10 otrzymano dla linii o długości $l=1,5$ km ($\tau=5\mu s$), natomiast rysunki 11 i 12 otrzymano dla linii o długości $l=3$ km ($\tau=10\mu s$). Z porównania rysunków wynika, że parametry numeryczne modelu mają istotny wpływ na wyniki, przy czym zniekształcenia rozwiązania dla zbyt dużego kroku dyskretyzacji w dziedzinie czasu lub zbyt małej liczby węzłów ulotowych mają inny charakter niż na rysunkach 6 i 8. Na rysunku 10, nawet przy dużym kroku $h=100$ ns i niewielkiej liczbie węzłów ulotowych $\Delta l=150$ m, $N=10$, charakter rozwiązania jest bardzo zbliżony do rozwiązania na rysunku 9. Podobne wnioski wynikają z porównania rozwiązania na rysunkach 11 i 12. Pewnym ograniczeniem przyjętego modelu jest duża wrażliwość rozwiązania na wynik numerycznych obliczeń przyjętego w pracach [7] i [8] warunku $du/dt > 0$ dla załączenia pojemności (6) i upływności (7).



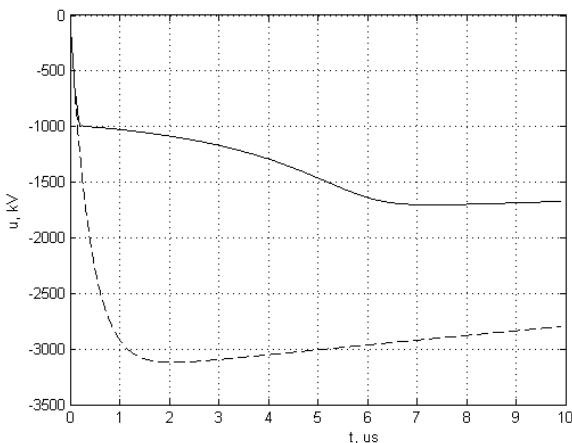
Rys. 9. Napięcie na końcu linii z ułotem (linia ciągła) i linii bezstratnej (linia przerywana) dla $h=5$ ns i $\Delta l=1,5$ m



Rys. 12. Napięcie na końcu linii z ułotem (linia ciągła) i linii bezstratnej (linia przerywana) dla $h=100$ ns i $\Delta l=150$ m



Rys. 10. Napięcie na końcu linii z ułotem (linia ciągła) i linii bezstratnej (linia przerywana) dla $h=100$ ns i $\Delta l=150$ m



Rys. 11. Napięcie na końcu linii z ułotem (linia ciągła) i linii bezstratnej (linia przerywana) dla $h=10$ ns i $\Delta l=6$ m

Wnioski

Przedstawione wyniki ilustrują efektywność obliczeniową modelu kondensatora stowarzyszonego z algorytmem trapezów w zastosowaniu do odwzorowania nieliniowej pojemności ułotowej. Odwzorowanie ma charakter uniwersalny i może być rozszerzone na inne modele ułotu, na przykład na model Gary'ego [15], a także na modele wyższych rzędów dla kondensatora [10].

LITERATURA

- [1] Bajorek J., Ocena użyteczności symulatorów elektromagnetycznych w analizie piorunowych zagrożeń przepięciowych, *Przegląd Elektrotechniczny - Konferencje*, 3 (2005), Nr 1, 6-9
- [2] Alternative Transient Program. *European EMTP-ATP Users Group*, www.eeug.org
- [3] EEUG Annual Distribution 2006. *European EMTP-ATP Users Group*, Offenbach am Mein, Germany.
- [4] Kizilcay M., Review of solution methods in ATP-EMTP, *EEUG News*, 7 (2001), No. 1-2, 25-36
- [5] ATP-EMTP Rule Book, *Canadian/American EMTP Users Group*, 1987-92
- [6] Dommel H.W., Electromagnetic Transients Program. Reference Manual (EMTP Theory Book), *Bonneville Power Administration*, Portland 1986
- [7] Nowak W., Tarko R., Florkowska B., Wpływ ułotu elektrycznego na poziom przepięć atmosferycznych w rozdzielni 110 kV. *Przegląd Elektrotechniczny - Konferencje*, 3 (2005), Nr 1, 180-183
- [8] Florkowska B., Nowak W., Tarko R., Modelling of the corona for analysis of overvoltage waves propagation in the overhead high-voltage transmission line. *Archives of Electrical Engineering*, 60 (2006), No. 1, 47-62
- [9] Gallagher T.J., Dudurych I.M., Model of corona for an EMTP study of surge propagation along HV transmission lines. *IEEE Proceedings: Generation, Transmission & Distribution*, 151(2004), No 1, 61-66
- [10] Chua L.O., Lin P.M., *Komputerowa analiza układów elektronicznych*. WNT, Warszawa 1981
- [11] Ciudad R., Alvira D., Soto F., Corona modeling for attenuation and distortion of lightning surges in overhead transmission lines. *EEUG News*, 3 (1997), No 3, 47-52
- [12] Kudyan H.M., Shih I.M., A nonlinear circuit model for transmission lines in corona. *IEEE Transactions PAS*, 100(1981), No 3, 1420-1430
- [13] Gamracki M., Modelowanie matematyczne piorunowych zaburzeń elektromagnetycznych w liniach transmisyjnych, *Rozprawa doktorska*, Wydział Elektrotechniki i Informatyki Politechniki Rzeszowskiej, Rzeszów 2004
- [14] Herdem S., Mamis M.S., Computation of corona effects in transmission lines using state-space techniques. *Computers and Electrical Engineering*, 29(2003), 603-611
- [15] Mamis M.S., State-space transient analysis of single-phase transmission lines with corona. *International Conference on Power System Transients – IPST 2003*, 2003, 1-5

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