



Wiesław NOWAK

Akademia Górniczo-Hutnicza, Katedra Elektroenergetyki

Zastosowanie modelu udarowej wytrzymałości elektrycznej w identyfikacji narażeń przepięciowych układów elektroenergetycznych

Streszczenie. W zakresie przepięć atmosferycznych związek pomiędzy wytrzymałością elektryczną układu izolacyjnego a narażeniem w pełni opisuje odpowiednia charakterystyka udarowa. Podstawą współczesnych modeli charakterystyk udarowych przerw iskrowych są metody rozwoju lidera LDM. Metodę LDM zaimplementowano w programie EMTP – ATP, wykorzystując wewnętrzny język programowania MODELS.

Abstract. (Application of the impulse electric strength model in the identification of surge hazards of electrical power systems). In the range of lightning surges, a volt-time curve gives a complete and accurate description of a relationship between the electric strength of an insulating system and hazards. Contemporary models of volt-time curves of spark gaps are based on leader development methods known as LDM. The LDM method was implemented into the EMTP–ATP using an internal software language MODELS.

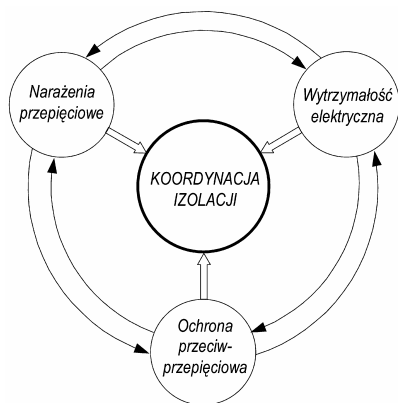
Słowa kluczowe: koordynacja izolacji, przepięcia atmosferyczne, wytrzymałość udarowa, modelowanie.

Keywords: insulation coordination, lightning surges, impulse electric strength, modelling.

Wstęp

Problem koordynacji izolacji pojawił się jednocześnie wraz z powstaniem elektroenergetyki [1]. Dobór izolacji pomiędzy przewodzącymi elementami o różnych potencjałach odbywał się początkowo bez odpowiednich podstaw naukowych zjawisk zachodzących w układach elektroenergetycznych i w dielektrykach, prowadząc na ogół do przewymiarowania konstruowanych układów izolacyjnych. Aktualnie koordynacja izolacji jest działaniem decyzyjnym, w którym stosując koncepcyjne uporządkowanie zbioru informacji, uzyskuje się optymalną pod względem technicznym oraz ekonomicznym niezawodność przesyłu i rozdziału energii elektrycznej.

Wzajemne relacje i uzgadnianie czynników koordynacji izolacji, które stanowią wytrzymałość elektryczną, narażenia przepięciowe i ochrona przeciwprzepięciowa (rys.1), jest z formalnego punktu widzenia kompleksowym problemem analizy i syntezy. Problem ten może być rozpatrywany zarówno w aspekcie poznawczym, polegającym na stwierdzeniu faktów, ich systematyzacji i wyjaśnianiu, jak i w aspekcie aplikacyjnym, związanym z określaniem celów i sposobów ich realizacji, stanowiąc jednocześnie pomost pomiędzy działalnością naukową a działalnością twórczą o charakterze inżynierskim. Wymienione czynniki są jednocześnie podstawowymi obszarami dziedziny *technika wysokich napięć*.



Rys.1. Czynniki procesu koordynacji izolacji

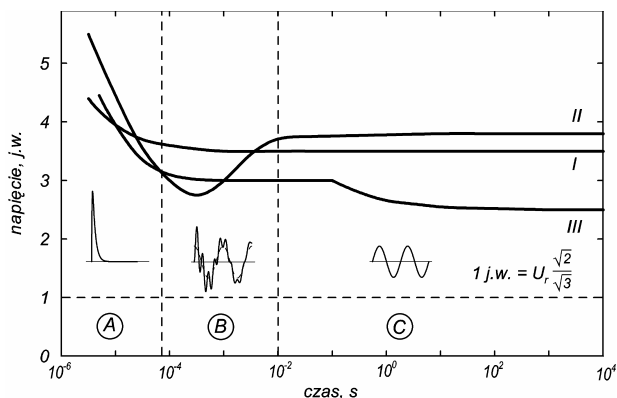
Dokonujący się postęp, wynika zarówno z nowych technologii urządzeń elektroenergetycznych, dążących do wzrostu wartości roboczych nateżeń pól elektrycznych, jak i doskonalenia środków ochrony przeciwprzepięciowej [2]. Zasadniczy wpływ posiada również rozwój możliwości identyfikacji spodziewanych narażeń przepięciowych, oddziałujących na układ izolacyjny w trakcie jego eksploatacji. Badania narażeń przepięciowych przeprowadzane są w rzeczywistych układach elektroenergetycznych wysokich i najwyższych napięć sporadycznie, głównie z przyczyn o charakterze technicznym, eksploatacyjnym oraz ekonomicznym. Z tego powodu, intensywnie rozwijane są obecnie metody teoretyczne analizy przepięć, wykorzystujące modele matematyczne zjawisk, w których zastosowanie znajduje technika komputerowa.

Wytrzymałość elektryczna a narażenia przepięciowe

Zjawiska fizyczne zachodzące w układach elektroenergetycznych i związane z nimi zmiany stanu energetycznego, są przyczyną przebiegów prądów i napięć o charakterze przejściowym w postaci przetężeń prądowych oraz przepięć. Różnorodność tych zjawisk jest przyczyną zróżnicowania zbioru przepięć pod względem kształtu, czasu trwania oraz wartości szczytowej. Tradycyjny ich podział ze względu na mechanizm powstawania na przepięcia wewnętrzne i zewnętrzne, ma w koordynacji izolacji mniejsze znaczenie, gdzie z kolei ważna staje się wytrzymałość elektryczna na dany rodzaj narażeń, a o tym decyduje zarówno wartość szczytowa przepięcia, jak i czas jej osiągnięcia oraz stromość narastania przebiegu.

Wytrzymałość elektryczna układu izolacyjnego jest wielkością zależną od czasu działania napięcia – rysunek 2. Dla izolacji powietrznej średnich napięć i izolacji gazowej SF₆ (krzywa I) wytrzymałość na przepięcia długotrwałe (obszar C) oraz łączeniowe (obszar B) charakteryzuje się prawie stałym poziomem, natomiast dla przepięć piorunowych (obszar A) występuje jej wzrost. Krzywa II obrazuje charakterystykę dla dużych odstępów powietrznych (powyżej jednego metra) w układach elektroenergetycznych wysokich i najwyższych napięć, odznaczających się znaczną wytrzymałością dla udarów stromych, spadkiem dla przepięć łączeniowych i wzrostem dla przepięć długotrwałych. Krzywa III jest natomiast typowa dla izolacji wewnętrznej

urządzeń elektroenergetycznych, która charakteryzuje się dużą wytrzymałością udarową piorunową. Dla czasów działania przepięć większych od 0,1 sekundy, wytrzymałość maleje w sposób bardzo skomplikowany, zależny między innymi od kształtu elektrod oraz materiału dielektryka.



Rys.2. Stylizowane charakterystyki wytrzymałości elektrycznej układów izolacyjnych typowych urządzeń elektroenergetycznych I – izolacja powietrzna średnich napięć i SF₆, II – duże odstępki powietrzne, III – stała izolacja wewnętrzna; A – obszar przepięć piorunowych, B – obszar przepięć łączeniowych, C – obszar przepięć długotrwałych

Dla przepięć piorunowych występuje wzrost wytrzymałości elektrycznej w stosunku do wytrzymałości przy napięciu przemiennym o częstotliwości sieciowej. Jednak ze względu na realne wartości przepięć piorunowych powstających w układach elektroenergetycznych, stanowią one istotne zagrożenie izolacji i muszą być brane pod uwagę jako jej zasadnicze narażenie, niezależnie od napięcia znamionowego. Z tego względu, znajomość charakterystyki napięciowo-czasowej w obszarze A, obrazująca wzrost wytrzymałości dla szybko narastających przepięć, ma w koordynacji izolacji istotne znaczenie.

Wytrzymałość udarowa izolacji zewnętrznej

Doświadczalne wyznaczanie charakterystyk udarowych jest złożonym zadaniem zarówno pod względem technicznym, jak i przede wszystkim pod względem ekonomicznym. Z tego powodu badania takie dotyczą na ogół modelowych układów izolacyjnych lub wybranych fragmentów układów rzeczywistych. Również powyższe względy powodują, że nie są wyznaczane charakterystyki udarowe kosztownej izolacji wewnętrznej urządzeń elektroenergetycznych.

Prowadzone w świecie badania zmierzały więc do wypracowania analitycznych procedur estymacji charakterystyk udarowych, w szczególności dla specyficznego kształtu przepięć atmosferycznych. Obecnie podstawowe znaczenie posiadają metody rozwoju lidera LDM (*Lider Development Method*), w których upraszcza się rzeczywisty proces wyładowania elektrycznego, zakładając że składa się on z trzech zasadniczych faz: fazy o czasie trwania t_p , w której napięcie osiąga wartości początkową ulotu, fazy strimerowej o czasie trwania T_S oraz fazy liderowej o czasie trwania T_L . W konsekwencji czas do przeskoku jest sumą czasów trwania poszczególnych faz:

$$(1) \quad t_b = t_p + T_S + T_L$$

przy czym w praktycznych zastosowaniach, zakłada się na ogół $t_p = 0$. Tak więc zasadniczą kwestią jest określenie czasów T_S i T_L .

H. Motoyama [3] zaproponował na podstawie badań eksperymentalnych warunki konieczne rozpoczęcia rozwoju

fazy liderowej przeskoku w układzie ostrze-ostrze, pozwalające przy założeniu $t_p = 0$ wyznaczyć czas trwania fazy strimerowej w oparciu o wartość średnią napięcia:

$$(2) \quad \frac{1}{T_S} \int_0^{T_S} u(t) dt > \begin{cases} 400D + 50 \text{ dla polaryzacji dodatniej} \\ 460D + 150 \text{ dla polaryzacji ujemnej} \end{cases}$$

gdzie D jest wielkością odstępki międzyelektrodowej wyrażonego w metrach, napięcie $u(t)$ w kilowoltach, a czas T_S w mikrosekundach.

Prędkość rozwoju lidera v wyrażana jest jako funkcja różnicy efektywnego natężenia pola elektrycznego w niezwartej przez lider przestrzeni międzyelektrodowej i minimalnej wartości E_0 natężenia pola elektrycznego warunkującej rozwój lidera:

$$(3) \quad \frac{dL}{dt} = f \left[\frac{u(t)}{D-L} - E_0 \right] \text{ dla } t > T_S$$

z warunkiem początkowym $L(T_S) = 0$, gdzie L jest długością lidera. Postać funkcji w równaniu różniczkowym (3), jak i wartości jej parametrów są ustalane na podstawie badań eksperymentalnych. W sytuacji, gdy w przestrzeni międzyelektrodowej rozwijają się dwa lidery, jeden dodatni i drugi ujemny, to długość L jest sumą długości obu liderów.

W badaniach czeskich [4] L. Kocis i in. stosują postać równania zalecaną przez CIGRÉ [5]:

$$(4) \quad \frac{dL}{dt} = aL \left[\frac{u(t)}{D-L} - E_0 \right] \exp \left[b \frac{u(t)}{D} \right]$$

z parametrami a , b oraz E_0 dla układu ostrze-ostrze. Z kolei w badaniach irlandzkich [6] T. Gallagher i in. wykorzystują inną postać proponowaną w [5]:

$$(5) \quad \frac{dL}{dt} = ku(t) \left[\frac{u(t)}{D-L} - E_0 \right]$$

z parametrami k oraz E_0 sugerowanymi przez CIGRÉ dla łańcuchów izolatorów kołpakowych bez osprzętu.

W badaniach japońskich [7, 8] zastosowano natomiast model H. Motoyamy [3] opracowany na podstawie badań układu ostrze-ostrze:

$$(6) \quad \frac{dL}{dt} = \begin{cases} k_1 \left[\frac{u(t)}{D-L} - E_0 \right] & \text{dla } 0 \leq L \leq \frac{D}{2} \\ k_2 \left[\frac{u(t)}{D-L} - E_0 \right] & \text{dla } \frac{D}{2} < L \leq D \end{cases}$$

z parametrami k_1 oraz k_2 wyznaczonymi na podstawie badań układów o odstępki międzyelektrodowym od 1 metra do 3 metrów.

W sytuacji, gdy efektywne natężenie pola elektrycznego zmniejszy się poniżej wartości E_0 :

$$(7) \quad \frac{u(t)}{D-L} < E_0$$

rozwój lidera jest zatrzymany. Natomiast warunkiem przeskoku w przerwie iskrowej jest, aby długość lidera była równa odstępki międzyelektrodowemu:

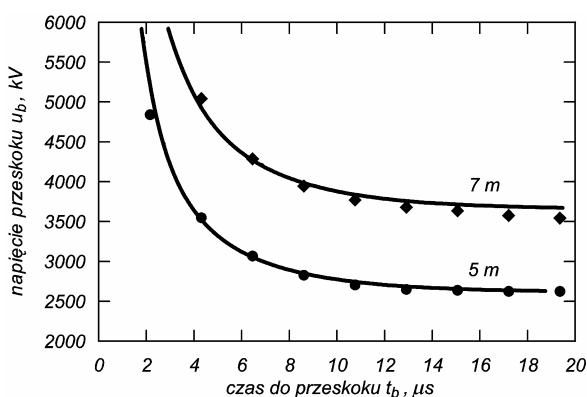
$$(8) \quad L(t) = D$$

Czas t_b do przeskoku jest wówczas sumą czasu trwania fazy strimerowej T_S oraz czasu trwania fazy liderowej T_L :

$$(9) \quad t_b = T_S + T_L$$

Pomimo przyjmowanych założeń upraszczających metody LDM dają poprawne rezultaty dla szerokiej klasy układów izolacyjnych i kształtów napięć innych niż standardowy udar 1,2/50. Zostało to potwierdzone na przykład w publikacjach [3, 9] dla napięć, których kształt zbliżony był do rzeczywistych narażeń przepięciowych pochodzenia piorunowego.

Dla metody LDM opracowano [10] program komputerowy *IMPULS* do estymacji charakterystyk udarowych w oparciu o warunki Motoyamy (2) dla fazy strimerowej oraz równanie różniczkowe (5) dla fazy liderowej. Rysunek 3 przedstawia otrzymane przy zastosowaniu tego programu, przykładowe wyniki aproksymacji empirycznej charakterystyki udarowej układu ostrze-ostrze dla udarów biegunowości dodatniej 2,5/53 μ s.



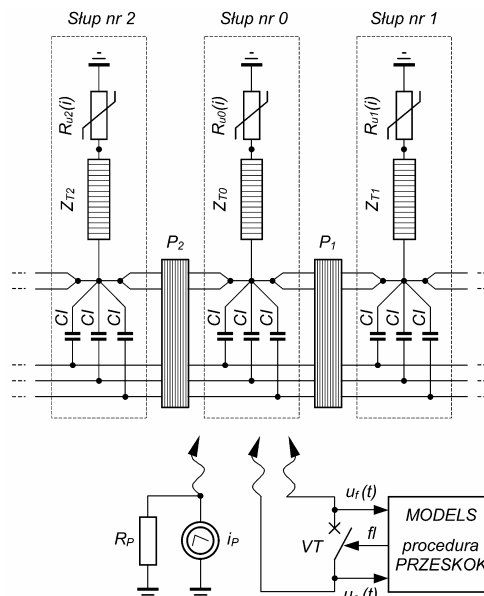
Rys.3. Charakterystyki udarowe dla układu ostrze-ostrze o odstępzie międzyelektrodowym $D = 5$ m i $D = 7$ m: udar +2,5/53 μ s (punkty pomiarowe według T. Shindo i T. Suzuki [11])

Oszacowane wartości parametrów E_0 oraz k pozwalają na modelowanie charakterystyk udarowych dla przerw iskrowych o innych wielkościach odstępów międzyelektrodowych, jak również na zastosowanie modelu dla innych kształtów napięć. Stanowi to podstawową zaletę metod LDM, która uwidacznia się szczególnie w analizie zjawisk w rzeczywistych układach elektroenergetycznych, gdzie kształt i wartość przepięć zdeterminowana jest wieloma czynnikami.

Implementacja metody LDM w *ElectroMagnetic Transients Program (EMTP)*

Metody LDM implementowane w programach symulacyjnych umożliwiają jednocześnie odwzorowanie wytrzymałości elektrycznej wyrażonej charakterystyką udarową oraz atmosferycznych narażeń przepięciowych.

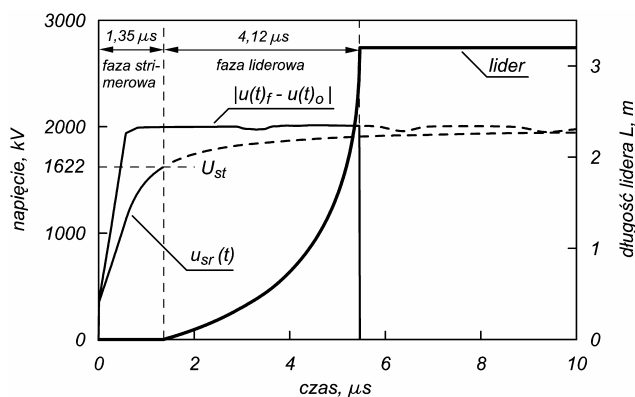
Metodę LDM zaimplementowano w programie *EMTP - ATP*, wykorzystując wewnętrzny język programowania *MODELS*, w środowisku którego opracowano procedurę *PRZESKOK* [10]. Parametrami formalnymi procedury są napięcia węzłowe $u_i(t)$ oraz $u_o(t)$ – rysunek 4, których różnica stanowi przebieg napięcia na pojemności CI dołączony jest wyłącznik idealny *VT*, sterowany sygnałem f pochodzącym z procedury *PRZESKOK*, którego zamknięcie nastąpi jeżeli w przerwie iskrowej wystąpią warunki do rozwoju lidera i w dalszej konsekwencji jego długość osiągnie wartość odstępów międzyelektrodowych.



Rys.4. Implementacja metody LDM w modelu linii napowietrznej do analizy przepięć atmosferycznych

W momencie rozpoczęcia obliczeń zostaje przeprowadzona inicjalizacja procedury, podczas której przypisywane są stosowne wartości początkowe zmiennym, w tym sygnałowi f nadana zostaje wartość -1, dla której wyłącznik *VT* pozostaje otwarty. Następnie w każdym kroku symulacji wyznaczana jest wartość średnia $u_{sr}(t)$ napięcia, która porównywana jest z wartością U_{st} , określającą przejście wyładowania z fazy strimerowej do fazy liderowej według zależności (2). Jeżeli zostanie spełniony $u_{sr}(t) > U_{st}$, to w kolejnym etapie symulacji przeprowadzane jest rozwiązywanie równania różniczkowego (5) dla długości L lidera, z uwzględnieniem warunku (7). Rozwiązanie to jest kontynuowane w każdym kroku symulacji do momentu, gdy długość L stanie się równa bądź większa od wartości odstępów międzyelektrodowych D . Oznacza to zwarcie przerwy iskrowej przez lider wyładowania i zmianę wartości sygnału f z -1 na +1, powodującą zamknięcie wyłącznika *VT*.

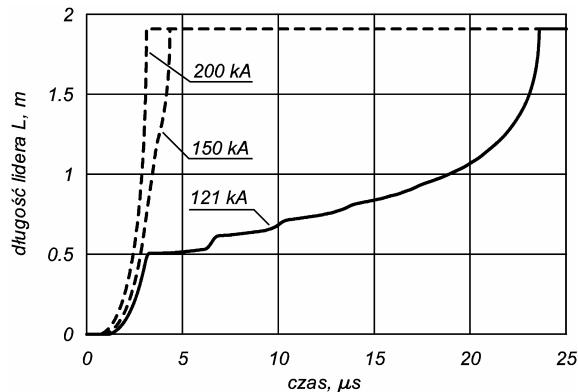
Dynamiczne modele charakterystyk udarowych pozwalają na ocenę zachowania się układu izolacyjnego w wyniku oddziaływania przepięć pochodzenia atmosferycznego, z uwzględnieniem wpływu zasadniczych czynników determinujących kształt i wartości narażeń oraz udarową wytrzymałość elektryczną.



Rys.5. Rozwój lidera wyładowania elektrycznego w przerwie iskrowej tańcucha ŁP-400 kV przy uderzeniu pioruna o wartości krytycznej 10,2 kA do przewodu fazowego fazy skrajnej linii na konstrukcjach typu Y25P

W przypadku przepięć atmosferycznych związanych z wyładowaniami do przewodów fazowych linii, zastosowanie modelu pozwala ocenić możliwość wystąpienia przeskoków w przerwach iskrowych, jak również ich wpływ na powstające fale przepięciowe, których propagacja odbywa się wzdłuż zaatakowanej linii. Działanie opracowanej procedury PRZESKOK ilustruje rysunek 5, na którym przedstawiono przykładowo rozwój lidera w przerwie iskrowej łańcucha ŁP-400 kV fazy skrajnej linii na konstrukcjach typu Y25P, wywołany uderzeniem w przewód fazowy pioruna o wartości krytycznej 10,2 kA. Wyładowanie piorunowe o krytycznej wartości szczytowej prądu jest przyczyną wystąpienia przeskoku w chwili czasu $t = 5,47 \mu\text{s}$, o którym decyduje czas trwania fazy strimerowej wynoszący $1,35 \mu\text{s}$ oraz czas trwania fazy liderowej równy $4,12 \mu\text{s}$.

Udarowy model wytrzymałości elektrycznej znajduje także zastosowanie w analizie zjawisk towarzyszących wyładowaniom do konstrukcji wsporczych oraz przewodów odgromowych linii. W odróżnieniu od wyładowań do przewodów fazowych linii, wyładowania elektryczne w przerwach iskrowych stanowią wówczas przeskoki odwrotne, których występowanie związane jest z przekroczeniem krytycznej wartości szczytowej I_{CBF} prądu pioruna. Sytuację tę przedstawia rysunek 6, na którym zawarto wyniki badań [10] jednorodnych linii o napięciu znamionowym 220 kV na konstrukcjach wsporczych typu H52P.



Rys.6. Rozwój lidera w przerwie iskrowej łańcucha ŁP-220 kV fazy skrajnej na konstrukcji wsporczej typu H52P jednorodnej linii napięciu znamionowym 220 kV dla wartości szczytowych prądów pioruna $I_F \geq I_{CBF} = 121 \text{ kA}$: rezystancja uziemienia 15Ω , rezystywność gruntu $300 \Omega \cdot \text{m}$.

Wartość szczytowa prądu wynosząca 121 kA (rys.6) jest wartością krytyczną, poniżej której spodziewane przepięcia w przerwie iskrowej łańcucha nie stwarzają warunków do występowania przeskoków odwrotnych. Warunki takie pojawiają się natomiast dla prądów większych bądź równych od wartości krytycznej. Pomimo, iż każdemu wyładowaniu piorunowemu o wartości szczytowej prądu większej od wartości krytycznej I_{CBF} towarzyszyć będzie przeskok odwrotny, to z punktu widzenia statystycznych metod oceny tego zjawiska wymagana jest znajomość przede wszystkim wartości I_{CBF} . Umożliwia to opracowany dla programu EMTP-ATP model wytrzymałości udarowej izolacji zewnętrznej.

Podsumowanie

Ze względu na wzajemny wpływ, poszczególne czynniki koordynacji izolacji nie mogą być rozpatrywane niezależnie, szczególnie w relacji narażenia przepięciowe – wytrzymałość elektryczna, gdzie istotne staje się zróżnicowanie przepięć co do kształtu ich przebiegów, wartości oraz czasu trwania. Przedstawione sformułowanie problemu pozwoliło na opracowanie modelu matematycznego wytrzymałości

udarowej izolacji zewnętrznej w warunkach oddziaływania przepięć atmosferycznych.

Modele matematyczne zjawisk dynamicznych w układach elektroenergetycznych są złożonymi strukturami matematycznymi, w których z powodu braku możliwości sformułowania zupełnych opisów matematycznych, podkreśla się istotne właściwości układu rzeczywistego. W odróżnieniu od modeli fizycznych, modelem matematycznym stawia się szersze wymagania co do możliwości jednoczesnej analizy istotnych zjawisk (kompleksowość modelu), uwzględnienia różnych rozwiązań konstrukcyjnych (wariantowość modelu), zdolności rozwiązywania problemów analizy i syntezy (uniwersalność modelu) oraz dokładności obliczeń.

W odpowiednio skonstruowanych modelach, uzyskanie rozwiązań szczegółowych ze złożonych opisów matematycznych możliwe jest obecnie dzięki zastosowaniu komputerowych technik obliczeniowych, co implikuje wieloetapowość procesu tworzenia modelu matematycznego. W efekcie jego realizacji oprócz formy analitycznej będącej zespołem odpowiednich równań matematycznych, otrzymuje się także formę algorytmiczną oraz formę programową, która posiada bezpośrednie zastosowanie w analizie związków jakościowych oraz ilościowych badanego zjawiska. Programowa realizacja modelu w programie EMTP-ATP, istotnie rozszerza możliwości tego pakietu obliczeniowego w obszarze symulacji przebiegów oraz oceny narażeń przepięciowych.

LITERATURA

- [1] Jaczewski M., *Koordinacja izolacji*, PWN, Warszawa 1966
- [2] Kosztaluk R., Flisowski Z., *Ekspansje tlenkowych ograniczników przepięć w sieciach elektrycznych, VIII Sympozjum „Problemy eksploatacji układów izolacyjnych wysokiego napięcia EUI'01”*, Zakopane 18-20 października 2001, 279-284
- [3] Motoyama H., *Experimental study and analysis of breakdown characteristics of long air gaps with short tail lightning impulse*, *IEEE Transactions on PWRD*, Vol. 11, No. 2, April 1996, 972-979
- [4] Kocis L., Svancar M., Zeman I., Arnold A., *Optimization of lightning overvoltage protection in HV substation*, CIGRÉ, Session 2000, paper 33-102
- [5] CIGRÉ Working Group 33-01 of Study Committee 33 Overvoltages and Insulation Coordination, *Guide to procedures for estimating the lightning performance of transmission lines*, CIGRÉ Publication No. 63, 1991
- [6] Gallagher T., Duduryn I., Corbett J., Val Escudero M., *Towards the improvement of the lightning performance of 110 kV unshielded overhead lines*, *26th Intern. Conference on Lightning Protection ICLP2002*, Cracow, Poland, 2-6 September 2002, 458-463
- [7] Motoyama H., Shinjo K., Matsumoto Y., Itamoto N., *Observation and analysis of multiphase back flashover on the Okushishiku test transmission line caused by winter lightning*, *IEEE Trans. on PWRD*, Vol. 13, No. 4, October 1998, 1391-1398
- [8] Mozumi T., Baba Y., Ishii M., Nagaoka N., Ametani A., *Numerical electromagnetic field analysis of archon voltages during a back-flashover on a 500-kV twin-circuit line*, *IEEE Trans. on PWRD*, Vol. 18, No.1, January 2003, 207-213
- [9] Shindo T., Kishizima I., Suzuki T., *Flashover characteristic of air gaps under partly chopped waves*, *IEEE Trans. on PWRD*, Vol. 3, No. 4, October 1988, 1887-1891
- [10] Nowak W., *Identyfikacja narażeń przepięciowych układów elektroenergetycznych wysokich napięć przy wyładowaniach atmosferycznych*. Rozprawy i Monografie nr 139, Uczelniane Wydawnictwa Naukowo-Dydaktyczne AGH, Kraków 2005
- [11] Shindo T., Suzuki T., *A new calculation method of breakdown voltage-time characteristic of long air gaps*. *IEEE Trans. on PAS*, Vol. PAS-104, 1985, 1556-1563

Autor: dr inż. Wiesław Nowak, AGH, Katedra Elektroenergetyki, al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków, E-mail: wiesio@agh.edu.pl