



Wiesław NOWAK

Akademia Górniczo-Hutnicza, Katedra Elektroenergetyki

## Modelowanie i analiza przebiegów atmosferycznych w napowietrznych rozdzielniach wysokiego napięcia

**Streszczenie.** W artykule przedstawiono zasady modelowania napowietrznych rozdzielni wysokich napięć do analizy przebiegów atmosferycznych z zastosowaniem ElectroMagnetic Transients Program (EMTP). Przedstawiono również przykładową analizę dla rozdzielni 220 kV.

**Abstract. (Modelling and analysis of lightning overvoltages in high voltage overhead substations).** In this article are presented rules of the modelling of high voltage overhead substations to the analysis of lightning overvoltages with the use ElectroMagnetic Transients Program (EMTP). Also the example of analysis for 220 kV substation is presented.

**Słowa kluczowe:** przebiegi atmosferyczne, stacje elektroenergetyczne, modelowanie matematyczne, EMTP.

**Keywords:** lightning overvoltages, power substations, mathematical modelling, EMTP.

### Wstęp

W procedurach koordynacji izolacji według wymagań [1,2] przebiegi atmosferyczne są uwzględniane w I i II zakresie napięciowym, czyli w układach średnich, wysokich oraz najwyższych napięć. Przebiegi atmosferyczne nie są natomiast brane pod uwagę w wymiarowaniu odstępów izolacyjnych w powietrzu w stacjach w zakresie napięciowym C (najwyższe napięcie urządzeń  $U_m \geq 300$  kV) według [3], gdzie dominująca staje się wytrzymałość krytyczna na przebiegi łączeniowe biegunowości dodatniej [4].

Przebiegi atmosferyczne bezpośrednio wynikają z bezpośrednich wyładowań piorunowych do układu elektroenergetycznego. Można przyjąć, że dla prawidłowo zaprojektowanej ochrony odgromowej stacji (odpowiednie pokrycie obszaru stacji strefą osłonową zwodów pionowych), bezpośrednie uderzenie pioruna w urządzenia i aparaty tam zainstalowane jest praktycznie zdarzeniem niemożliwym. Również zagrożenie przeskokiem odwrotnym jest minimalne, co wynika z wielokrotnie mniejszych wartości oporu układu uziomowego stacji w stosunku do uziomów słupów. Narażenie izolacji stacji elektroenergetycznych wysokich i najwyższych napięć przebiegami atmosferycznymi, wynika więc przede wszystkim z wyładowań do linii wprowadzonych do stacji.

Skutki bezpośredniego wyładowania piorunowego do napowietrznych linii elektroenergetycznych są ściśle związane ze stosowaną ochroną odgromową w postaci przewodów odgromowych. Zasadą jest, że linie najwyższych napięć wyposaża się w takie przewody, ale w zakresie napięć wysokich rzędu 100 kV nie jest to już regułą. W Polsce wymaga się ochrony przez zastosowanie przewodów odgromowych na całej długości linii napowietrznych 110 – 750 kV [5].

W sytuacji, gdy wyładowanie piorunowe zostanie przechwycone przez przewody odgromowe bądź uziemione elementy konstrukcyjne (np. słupy), istnieje jednak niebezpieczeństwo, że w niesprzyjających warunkach w linii wystąpi przeskok odwrotny (np. [5,6]) i towarzyszące mu zwarcie w postaci prądu następczego. Mimo, że prąd następczy jest łatwo gaszony (zwarcie przemijające) przez automatykę samoczynnego ponownego załączenia, to wyłączenie niejednokrotnie ważnych linii systemowych obniża w ogólności niezawodność pracy układu przesyłu i rozdziału energii elektrycznej.

Pomimo stosowania przewodów odgromowych ich działanie ochronne nie jest całkowicie niezawodne, a tym samym możliwe jest uderzenie pioruna w przewód roboczy linii. Skutkiem tego jest powstanie przebiegu stanowiącego narażenie nie tylko dla izolacji linii, ale powstała fala przebiegiowa ulegając propagacji stanowi zagrożenie izolacji stacji, do których linia jest przyłączona.

Zapewnienie niezawodnej eksploatacji układów elektroenergetycznych przy minimalnej wielkości kosztów inwestycyjnych i eksploatacyjnych jest nadrzędnym zadaniem koordynacji izolacji. Modelowanie matematyczne narażeń przebiegiowych wspomaga ten proces, również w obszarze narażeń przebiegiowych pochodzenia atmosferycznego. W artykule przedstawiono zasady modelowania wyposażenia napowietrznych rozdzielni elektroenergetycznych i ich przykładowe aplikacje w ElectroMagnetic Transients Program (EMTP) do analizy przebiegu w rozdzielni o napięciu 220 kV.

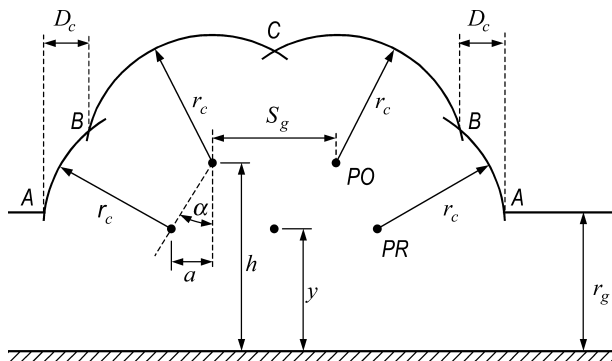
### Model elektrogeometryczny linii napowietrznej

Dla celów analizy skuteczności ochrony napowietrznych linii elektroenergetycznej przez przewody odgromowe wykorzystywana jest najczęściej uproszczona wersja teorii elektrogeometrycznej, wiążąca odległość decyzji  $r$  pioruna z wartością szczytową  $I_F$  jego prądu (rys. 1), przy czym związek ten jest najczęściej wyrażany zależnością (np. [7,8]):

$$(1) \quad r = AI_F^b$$

Łuki o promieniach  $r_c$  wykreślone z przewodów roboczych oraz odgromowych (rys. 1), stanowią wraz z prostą poziomą usytuowaną na wysokości  $r_g$  zbiór punktów, określających dla wyładowania liderowego najkrótszą odległość do przewodów odgromowych, roboczych i do powierzchni ziemi, a tym samym określają lokalizację trafienia pioruna. Powyżej pewnej wartości szczytowej  $I_{max}$  prądu pioruna, punkty A i B pokrywają się, a uderzenie pioruna w przewody robocze jest niemożliwe. Jednocześnie punkty A wyznaczają granicę pomiędzy wyładowaniami bezpośrednimi a wyładowaniami pośrednimi prowadzącymi do powstawania przebiegów indukowanych. W otoczeniu linii może więc istnieć obszar zależny od rozmieszczenia geometrycznego przewodów linii, z którego pomimo istnienia przewodów odgromowych wyładowanie uderzy w

przewód roboczy linii. Przy założeniu prostokątnego do ziemi kierunku wyładowania liderowego, wielkość tego obszaru określa pozioma odległość  $D_c$  pomiędzy punktami A i B.



Rys. 1. Model elektrogeometryczny linii napowietrznej według [7]

Nieskuteczność działania ochronnego przewodów odgromowych jest ściśle związana z odległością  $D_c$  oraz średnią roczną powierzchniową gęstością wyładowań piorunowych  $N_g$ .

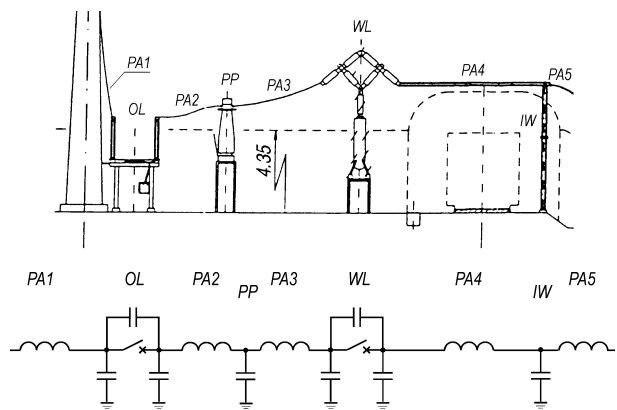
Należy wziąć pod uwagę, że model geometryczny nawet przy niezmienniej wartości szczytowej prądu słuszny jest tylko w danej płaszczyźnie prostopadłej do powierzchni linii, podlegając zmianie w zależności od rozpatrywanego miejsca w przęśle linii. Inna jego forma dotyczy także słupów linii. Z tego powodu, na przykład w publikacji [9] zaproponowano model elektrogeometryczny w przestrzeni trójwymiarowej.

#### Zasady modelowanie układów elektroenergetycznych w zakresie przepięć atmosferycznych

Do analizy przepięć atmosferycznych w układach elektroenergetycznych konieczna jest znajomość modeli matematycznych poszczególnych elementów. Przy opracowywaniu modelu matematycznego, na ogół podkreśla się cechy elementu dominujące w rozpatrywanym zjawisku oraz pomija cechy, nie mające istotnego wpływu na wyniki obliczeń. W ogólnym przypadku obliczenia wiążą się z koniecznością rozwiązywania układów równań różniczkowych nieliniowych. Należy również zaznaczyć, że w wielu przypadkach wartości parametrów modelu zależne są od częstotliwości rozpatrywanych przebiegów, jak np. w przypadku linii. Na zagadnienia te zwrócono uwagę, przedstawiając jednocześnie zasady tworzenia i aplikacje modeli linii napowietrznych, na przykład w publikacji [6].

Według publikacji [10] odcinki oszynowania rozdzielni o długości większej niż 3-15 metrów muszą być modelowane w postaci linii długich. Dla odcinków krótszych dopuszczalne jest przyjęcie ich modeli w postaci indukcyjności skupionych o wartości około  $1 \mu\text{H/m}$ . Aparaty w postaci wyłączników, odłączników, uzmienników, przekładników oraz izolatorów wsporczych, w zakresie przepięć atmosferycznych odwzorowują odpowiednie pojemności. Na rysunku 2 przedstawiono przykładowy fragment pola liniowego rozdzielni wraz z odpowiednim schematem zastępczym.

Modele transformatorów i autotransformatorów zainstalowanych w stacjach muszą odwzorowywać efekty falowe. W analizie przepięć nie wnioskującej w zjawiska zachodzące w ich wnętrzu (np. [11]) wystarczające jest przyjęcie schematu zastępczego w postaci równoległego połączenia rezystancji (odpowiadającej impedancji falowej) oraz pojemności.



Rys. 2. Ilustracja sposobu modelowania rozdzielni w zakresie przepięć atmosferycznych: OL – odłącznik liniowy, PP – przekładnik prądowy, WL – wyłącznik liniowy, IW – izolator wsporczy, PA – połączenie aparatu

W przypadku ograniczników przepięć z tlenków metali niezbędne jest dla przepięć atmosferycznych zastosowanie modelu dynamicznego, na przykład takiego jaki proponuje IEEE [12].

Obliczenia stanów nieustalonych prowadzą do konieczności zastosowania odpowiednich metod numerycznych i opracowania algorytmów oraz programów komputerowych, a także wypracowania właściwej metodyki postępowania. Wśród najszerzej stosowanych obecnie narzędzi wyróżnić należy przede wszystkim Electro-Magnetic Transients Program (EMTP), który zdominował również obszar dotyczący zagadnień koordynacji izolacji. Świadczy o tym np. wdrożenie EMTP przez Hydro-Québec i Electricité de France w statystycznych procedurach koordynacji izolacji [9], zastosowanie EMTP do analizy stanu istniejącego i sposobów poprawy odporności piorunowej irlandzkich linii o napięciu 110 kV i 220 kV [13], czy optymalizacji ochrony przepięciowych w czeskich rozdzielniach o napięciu 420 kV [14].

#### Przykładowa analiza przepięć atmosferycznych w rozdzielni 220 kV

Do analizy przyjęto siedmiopolową rozdzielnię 220 kV z podwójnym niesekcjonowanym systemem szyn zbiorczych, której schemat przedstawia rysunek 3. W normalnych warunkach pracy pracuje system nr I, a system nr II pozostaje rezerwowo. Pola nr 1, 5 i 6 są to pola jednotorowych linii 220 kV. Pola nr 2 i nr 7 są polami autotransformatorów 160 MVA, 220/110 kV, natomiast pola nr 3 i 4 są polami rezerwowymi. Założono, że linia nr 2 przyłączona w polu nr 5 jest wyłączona, co zastrzaja wyniki przeprowadzanej analizy.

Linie nr 1 i nr 3 odwzorowano jako linie długie według zasad przedstawionych w [6]. Wyposażenia pól nr 1, 2, 5, 6 oraz 7 odwzorowano przy pomocy elementów biernych RLC według sposobu przedstawionego na rysunku 2. Odcinki szyn zbiorczych w polach rezerwowo nr 3 i 4 oraz połączenia do autotransformatorów w polach nr 2 i 7, przedstawiono w postaci odcinków trójprzewodowych linii długich.

Analizę przeprowadzono zakładając odgórne wyładowanie piorunowe biegunowości ujemnej w przewód roboczy fazy A w pierwszym przęśle linii nr 1. Do oszacowania wartości szczytowej prądu pioruna, zastosowano wzór 1, przyjmując według [8] wartości parametrów  $A = 8 \text{ m/kA}^{0,65}$  oraz  $b = 0,65$ . W wyniku otrzymano wartość szczytową  $I_F = 9,9 \text{ kA}$ . Zakładając zastępczy kształt prądu pioruna w postaci impulsu

trójkątnego, wartości tej odpowiada [6,7] równoważny czas jej wystąpienia  $t_m = 0,56 \mu s$ .

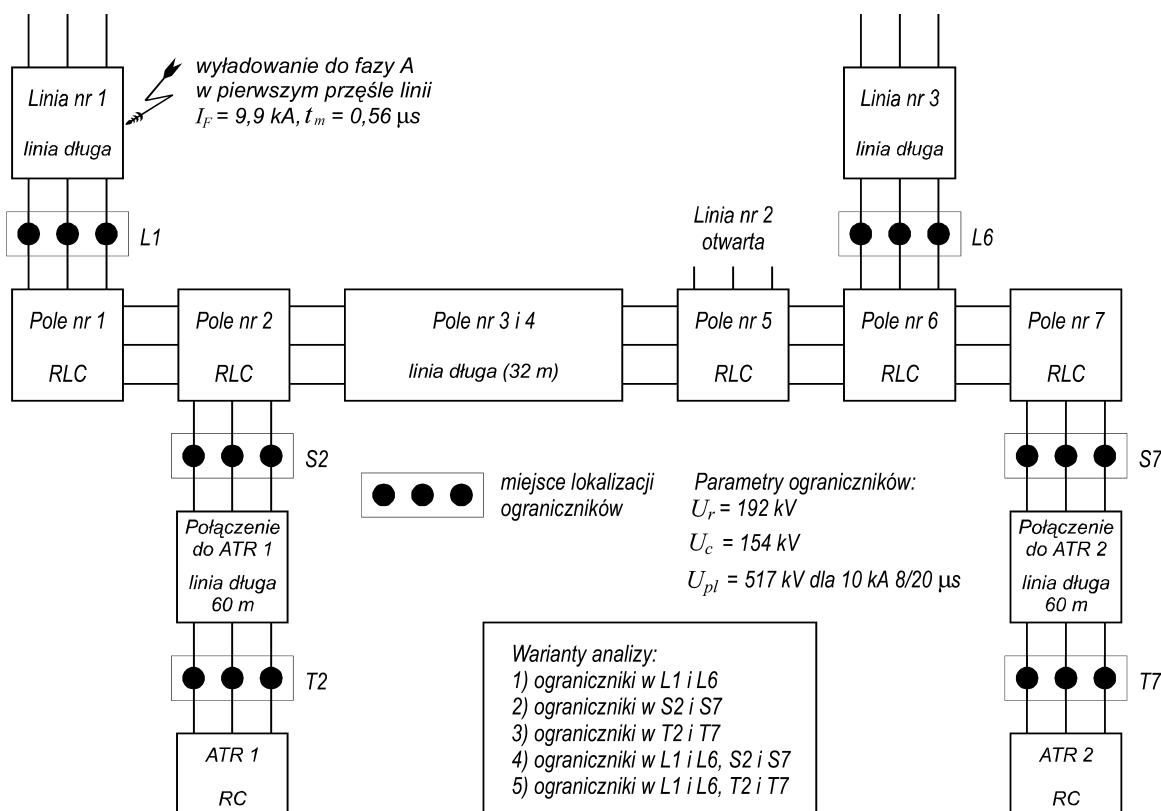
Obliczenia przepięć atmosferycznych w rozdzielni wykonano dla pięciu wariantów lokalizacji ograniczników przepięć o napięciu obniżonym  $U_{pl} = 517 \text{ kV}$  przy prądzie wyładowczym  $8/20 \mu s$  10 kA (rys.3):

- wariant 1 – lokalizacja ograniczników tylko w polach liniowych,
- wariant 2 – lokalizacja ograniczników tylko w polach transformatorowych od strony szyn zbiorczych,
- wariant 3 – lokalizacja ograniczników tylko w polach transformatorowych od strony autotransformatorów,
- wariant 4 – lokalizacja ograniczników w polach liniowych i transformatorowych od strony szyn zbiorczych,

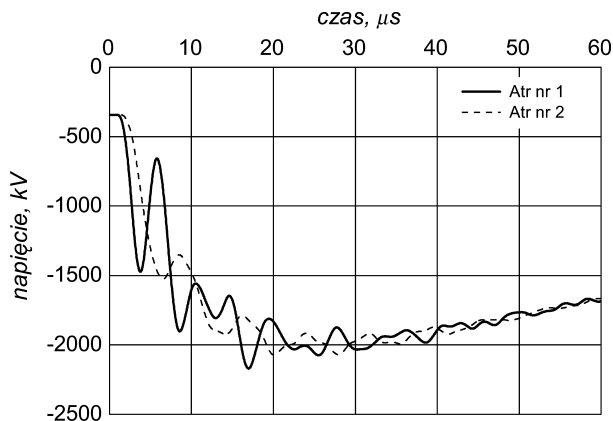
- wariant 5 – lokalizacja ograniczników w polach liniowych i transformatorowych od strony autotransformatorów.

Zastosowano model dynamiczny ograniczników proponowany w publikacji IEEE [12].

Przykładowe przebiegi czasowe napięć fazy A autotransformatorów nr 1 i nr 2 w rozdzielni całkowicie nie chronionej ogranicznikami przepięć przedstawiono na rysunku 4. Otrzymano je przy pomocy zaimplementowanego w programie EMTP układu z rysunku 3. Sytuacja ta ma znaczenie tylko teoretyczne. Przebiegi te pokazują złożony charakter zjawisk zachodzących w analizowanym układzie, uwidaczniając jednocześnie poważne narażenie izolacji w wyniku oddziaływania przepięć atmosferycznych. Największa oszacowana spodziewana wartość szczytowa przepięć bez stosowania ograniczników występuje na autotransformatorze nr 2 i wynosi 2170 kV.



Rys. 3. Schemat siedmiopolewej napowietrznej rozdzielni o napięciu znamionowym 220 kV

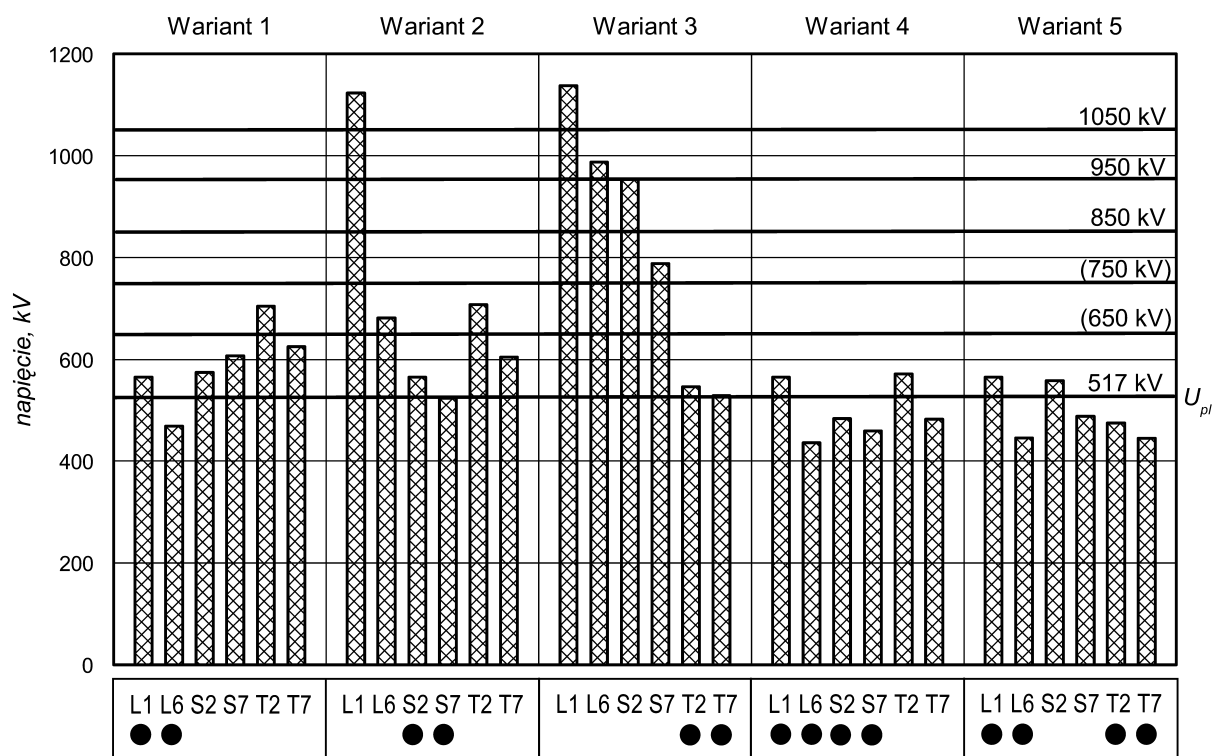


Rys. 4. Spodziewane przepięcia na fazach A transformatorów przy braku ograniczników przepięć w rozdzielni

Otrzymane wartości szczytowe przepięć w punktach L1, L6, S2, S7, T2 oraz T7 rozdzielni (rys.3) przedstawiono dla rozważanych wariantów na rysunku 5.

Na spodziewany poziom przepięć wpływa zarówno ilość, jak i miejsce lokalizacji ograniczników. Największe wartości przepięć występują dla wariantu nr 3, chociaż narażenie autotransformatorów nie jest w tym przypadku największe. Z kolei najmniejsze poziomy przepięć występują w wariantcie 5, a więc przy usytuowaniu ograniczników w polach liniowych oraz najbliższej autotransformatorów. Rozwiązanie to jest powszechnie stosowane w energetyce krajowej, a przeprowadzona przykładowa analiza potwierdza jego zasadność.

Na rysunku 5 zaznaczono również wartość napięcia obniżonego ograniczników  $U_{pl} = 517 \text{ kV}$  oraz znormalizowane według normy [1] wytrzymawane napięcia udarowe piorunowe. Otrzymane wyniki mogą być wykorzystane w koordynacji izolacji rozdzielni.



Rys.5. Wartości szczytowe spodziewanych przepięć atmosferycznych w rozdzielni 220 kV oraz znormalizowane według [1] wytrzymawane napięcia udarowe piorunowe

## Podsumowanie

Racjonalny dobór układów izolacyjnych urządzeń elektroenergetycznych wysokich i najwyższych napięć związany jest z możliwością identyfikacji narażeń występujących podczas ich eksploatacji. Jednymi z najważniejszych są przepięcia atmosferyczne, które docierają do stacji elektroenergetycznych w wyniku bezpośrednich wyładowań piorunowych do przewodów roboczych linii wprowadzonych do rozdzielni.

Analiza matematyczna przepięć atmosferycznych w napowietrznych rozdzielniach wysokich i najwyższych napięć jest problemem złożonym. Stosując jednak odpowiednie modele matematyczne i aplikując je w Electro-Magnetic Transients Program otrzymuje się, dzięki między innymi przyjmowaniu mniejszej ilości założeń upraszczających, ważne narzędzie mogące wspomagać analizę układów elektroenergetycznych również w zakresie koordynacji izolacji.

*Niniejsza praca finansowana jest przez Komitet Badań Naukowych w ramach projektu badawczego nr 8T10B05220*

## LITERATURA

- [1] PN-E 60071-1:1999 Koordynacja izolacji. Definicje, zasady i reguły
- [2] PN-E 60071-2:2000 Koordynacja izolacji. Przewodnik stosowania
- [3] PN-E 05115 Instalacje elektryczne prądu przemiennego o napięciu wyższym niż 1 kV
- [4] Flisowski Z., Kosztaluk R., Mikulski J., Wytrzymałość elektryczna i odstępy powietrzne w instalacjach elektrycznych wysokich napięć, *Przegląd Elektrotechniczny*, zeszyt specjalny 10s'2002, 69–75
- [5] Kosztaluk R., Mikulski J., Dąbrowski J., Rola i zadania przewodów odgromowych, *Energetyka*, zeszyt tematyczny I/2003, 76–81
- [6] Nowak W., Włodek R., Analiza przeskoaku odwrotnego na izolacji linii napowietrznych wysokich i najwyższych napięć, *Przegląd Elektrotechniczny*, zeszyt specjalny 10s'2002, 226–229
- [7] CIGRÉ WG 33–01 (Lightning) of Study Committee 33 (Overvoltages and Insulation Coordination), Guide to procedures for estimating the lightning performance of transmission lines, Publ. 63, 1991
- [8] IEEE WG on Estimating the Lightning Performance of Transmission Lines, Estimating lightning performance of transmission lines — Updates to analytical models, *IEEE Trans. on PD*, 1993, Vol. 8, 1254–1267
- [9] Cabriel G., et al., Presentation of an efficient approach for the study of fast front overvoltages using statistical methods - its application to practical cases, CIGRÉ 2002 Session, paper 33-104
- [10] IEEE Modeling and Analysis of System Transients Working Group, Modeling guidelines for fast front transient, *IEEE Trans. on PD*, 1996, vol. 11, pp. 493–506
- [11] Malewski R., Franchek M.A., McWhirter J., Experimental validation of a computer model simulating an impulse voltage distribution in HV transformer windings, *IEEE Trans. on PD*, 1994, vol. 9, 1789–1798
- [12] IEEE Working Group 3.4.11, Modeling of metal oxide surge arresters, *IEEE Trans. on PD*, 1992, vol. 7, 302–309
- [13] Corbett J., et al., Statistical analysis and modeling of lightning performance of 110 kV and 220 kV overhead networks in Ireland, CIGRÉ 2002 Session, paper 33-204
- [14] Kocis L., et al., Optimisation of lightning overvoltage protection in HV substation, CIGRÉ 2000 Session, paper 33-102

**Autor:** dr inż. Wiesław Nowak, Akademia Górniczo-Hutnicza, Katedra Elektroenergetyki, Al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków, E-mail: [wiesio@agh.edu.pl](mailto:wiesio@agh.edu.pl)