

Stanisław WOJTAS

POLITECHNIKA GDAŃSKA, WYDZIAŁ ELEKTROTECHNIKI I AUTOMATYKI

Ocena uzemień odgromowych metodami: udarową i wysokoczęstotliwościową

Dr inż. Stanisław WOJTAS

Od wielu lat prowadzi działalność naukową i dydaktyczną na Wydziale Elektrotechniki i Automatyki Politechniki Gdańskiej, którego jest absolwentem. Stopień doktora uzyskał za pracę dotyczącą oceny izolacji kabli polietylenowych. Obok problematyki izolacji urządzeń wysokonapięciowych interesuje się metodami pomiarowymi służącymi do oceny przydatności uzemień w systemie ochrony odgromowej obiektów energetycznych i budowlanych.



e-mail: s.wojtas@ely.pg.gda.pl

Streszczenie

Uziemienia odgromowe przeznaczone do odprowadzania do ziemi prądów piorunowych pracują w zakresie znacznie szybszych przebiegów (μs) niż uziemienia robocze (ms), a więc wymagają innych metod badań, zwłaszcza uwzględniających spadki indukcyjne w systemie uziemiającym. Wyniki uzyskane metodami udarową i wysokoczęstotliwościową są zbieżne i pozwalają na dobrą ocenę przydatności uzemień do celów ochrony odgromowej. Pomiary takie mogą być przeprowadzane bez konieczności rozłączania zacisków kontrolnych.

Słowa kluczowe: uziemienia odgromowe, pomiary uzemień.

Lightning earthing evaluation by impulse and high frequency methods

Abstract

A safety earthing designed for short circuit currents is not always good enough to carry away lightning current. For lightning protection purposes impedance of earthing, instead of its resistance, should be taken into account. Dynamic changes of these groups are very different. The duration of an instantaneous state is in the order of milliseconds and the duration of lightning is in microseconds. Because the times of these phenomena differ so much, technical protection means and methods for tests of the means must be properly chosen for a given situation. The impulse and high frequency methods allow for evaluation of lightning protection installations. Impulse impedances of earthings measured in the time domain by an impulse meter are comparable to those measured by a high frequency meter in the frequency domain (Fig. 3 and 4). The impulse and high frequency methods allow for evaluation of lightning protection installations of different objects without disconnections of testing terminals of the installation (Fig. 8).

Keywords: lightning protection earthings, earthing tests.

1. Wprowadzenie

Właściwości systemu uzemień poddanych oddziaływaniu udarów prądowych o znacznej amplitudzie mają decydujący wpływ na bezpieczeństwo użytkownika systemu energetycznego oraz obiektów budowlanych. Skuteczność ochrony odgromowej obiektów zależy przede wszystkim od charakterystyk częstotliwościowych lub udarowych impedancji uzemień. Zjawiska zakłócające pracę systemu energetycznego, które wymagają sprawnego uziemienia mogą być podzielone ogólnie na dwie grupy: stany nieustalone i zwarcia w sieci elektroenergetycznej oraz wyładowania atmosferyczne. Dynamika zmian w czasie w obu typach zjawisk różni się znacznie. Czas trwania zakłóceń wywołanych stanami nieustalonymi w systemie jest rzędu kilkudziesięciu milisekund, a czas wyładowań atmosferycznych jest liczony w setkach mikrosekund. Ze względu na tak zasadniczą różnicę czasów obu zjawisk, procedury i metody pomiarów kontrolnych uzemień powinny być adekwatne do ich roli w systemie. Skuteczność ochrony

odgromowej jest szczególnie ważna w obiektach usytuowanych w strefach zagrożonych niebezpieczeństwem wybuchu.

System uzemień przeznaczony do ochrony odgromowej powinien charakteryzować się przede wszystkim niewielkim spadkiem napięcia w czasie odprowadzania prądu piorunowego do ziemi. Powstające w tym procesie przepięcia zakłócające pracę systemu energetycznego mogą być niebezpieczne dla ludzi jak również stanowić zagrożenie dla urządzeń podłączonych do sieci, zwłaszcza sprzętu komputerowego. Ze względu na znaczne stromości prądów piorunowych (rzędu nawet $100 \text{ kA}/\mu\text{s}$), skuteczność systemu uzemień jest najczęściej ograniczana przez indukcyjne spadki napięć, a w układach o znacznej rozległości występującymi w takich uziomach zjawiskami falowymi [1, 2].

Wspomniane wyżej procesy należy uwzględniać na etapie projektowania instalacji odgromowej biorąc pod uwagę fakt, że wymagana mała wartość rezystancji uziemienia odgromowego nie może być osiągnięta poprzez wzrost jego długości i rozległości, jak to zwykle praktykuje się w przypadku uzemień roboczych [3, 4].

W praktyce eksploatacyjnej do badań uzemień używane są metody techniczne oparte na przebiegach niskiej częstotliwości, metody wysokiej częstotliwości oraz rozwijana zwłaszcza w ostatnich latach metoda udarowa. Procedury dwóch pierwszych metod są realizowane w dziedzinie częstotliwości, trzeciej - w dziedzinie czasu. Metoda niskoczęstotliwościowa powinna być stosowana przede wszystkim do oceny właściwości uzemień roboczych, ponieważ dobrze odzwierciedla ich zachowanie przy przepływie prądów o częstotliwości sieciowej. Pomiary uzemień odgromowych należy prowadzić przy wymuszeniach wysokiej częstotliwości lub przy udarach o parametrach czasowych zbliżonych do rzeczywistych wyładowań atmosferycznych, aby prawidłowo ocenić właściwości badanych obiektów przy przepływie prądów piorunowych. [5, 6, 7].

Głównym celem prezentowanej pracy jest analiza i porównanie wyników symulacji komputerowych oraz rzeczywistych pomiarów uzemień odgromowych otrzymywanych metodami udarową i wysokoczęstotliwościową.

2. Praktyka normalizacyjna

W przepisach normalizacyjnych jest niewiele wzmianek na temat pomiarów udarowych lub wysokoczęstotliwościowych, przede wszystkim ze względu na niewielkie tradycje dotyczące takich pomiarów. Norma międzynarodowa [8] zawiera definicję rezystancji zastępczej określanej jako "stosunek wartości szczytowej napięcia do prądu uziemienia, które na ogół nie występują równocześnie", która "umownie służy za wskaźnik skuteczności uziemienia". Tak określona rezystancja zastępcza jest definiowana w dziedzinie czasu. Wspomniana norma nie zawiera jednak procedur i kryteriów oceny uzemień na podstawie tego typu pomiarów.

W polskich przepisach normalizacyjnych dotyczących obiektów podlegających ochronie obostrzonej ze względu na niebezpieczeństwo wybuchu [9] już w roku 1989 wprowadzono termin rezystancji udarowej uziemienia definiowanej jako „rezystancja między uziomem a ziemią odniesienia mierzona przy prądzie udarowym o kształcie odwzorowującym prąd pioruna”. Norma ta określa również sprzęt potrzebny do wyznaczenia tej rezystancji jako mostek (miernik) udarowy, czyli „urządzenie pomiarowe umożliwiające pomiar rezystancji tylko tej części uziemienia, która bierze udział w odprowadzaniu prądu pioruna”. Pomiar rezystancji udarowej wykonuje się bez rozłączania zacisków probierczych, ponieważ celem tego pomiaru jest określenie rezystancji wypad-

kowej uziemienia, czyli tej, która zgodnie z definicją odprowadza prąd piorunowy do gruntu.

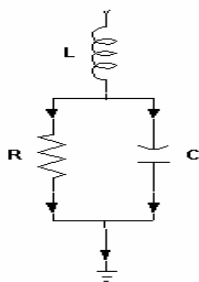
W przypadku rozległych systemów uziemień przepisy dotyczące instalacji elektroenergetycznych powyżej 1 kV [10] zalecają zastosowanie w pomiarach testera uziemień wysokiej częstotliwości. Częstotliwość pomiarowa powinna być tak wysoka, aby impedancja długich przewodów odprowadzających i zwodów była na tyle duża, aby tę drogę przepływu prądu pomiarowego można było pominąć.

Analizując postanowienia i wytyczne norm, można zauważyć, że generalnym wymaganiem jest ograniczenie największej wartości rezystancji uziemienia odgromowego do poziomu np. 10 Ω [11] lub 15 Ω [9]. Jednocześnie wskazuje się możliwości konstrukcyjne zmniejszenia tej rezystancji zauważając, że ograniczenie "kształtu i wymiarów uziemienia jest często ważniejsze niż sama wartość rezystancji". W pomiarach rezystancji uziemień rozległych obok najbardziej rozpowszechnionej metody niskoczęstotliwościowej rekomendowane są metody udarowa lub wysokoczęstotliwościowa.

3. Metodyka pomiarów i symulacji komputerowej

Ze względu na falowy charakter przemieszczania się impulsów prądu i napięcia w uziemieniach, analiza tych zjawisk zwykle opiera się na modelu zbliżonym do linii długiej. W modelu tym przyjmuje się parametry jednostkowe uziemienia, czyli rezystancję R , indukcyjność L , pojemność C oraz przewodność G . Rozważania teoretyczne wskazują, że dla bardzo dużej liczby takich elementów składowych, zjawiska w uziemiu są podobne do przebiegów falowych w linii długiej z otwartym końcem i metody obliczeń są słuszne w szerokim zakresie częstotliwości.

Ponieważ uziomy analizowane w niniejszej pracy mają ograniczone rozmiary, model uziomu może być uproszczony do postaci przedstawionej na rys. 1, gdzie L oznacza indukcyjność własną uziomu, R jest rezystancją przejścia z uziomu do gruntu, a C - pojemnością tego układu. Parametry te były obliczane według wyrażen zaproponowanych w pracy Vermy i Mukhedkara [12].



Rys. 1. Uproszczony model uziomu
Fig. 1. Simplified model of earthing

Dla prostych uziomów o długości l i promieniu przewodu a , indukcyjność może być obliczona jako [12]:

$$L = 2 \cdot l \cdot \ln \left[\frac{2l}{a} \right] \cdot 10^{-7} \text{ [H]} \quad (1)$$

Wartość rezystancji uziomu zagłębionego w gruncie o rezystywności ρ była obliczana z zależności:

$$R = \frac{\rho}{\pi \cdot l} \ln \frac{2l}{a} \text{ [\Omega]} \quad (2)$$

Natomiast pojemność obliczono ze wzoru:

$$C = \frac{\rho \cdot \varepsilon}{R} \text{ [F]} \quad (3)$$

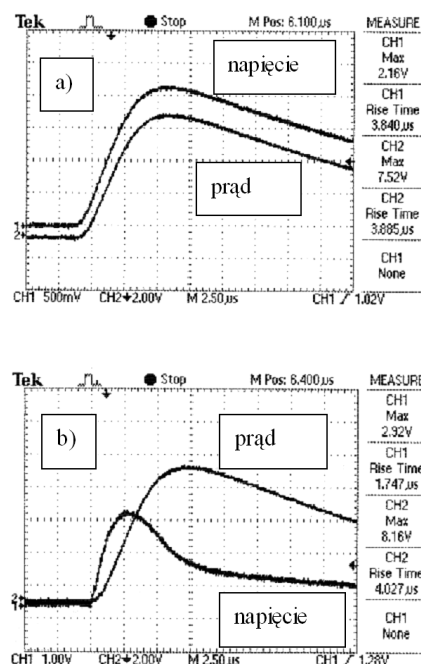
gdzie ε jest iloczynem ε_0 oraz ε_g , przy czym ε_0 - przenikalność próżni, ε_g - przenikalność względna gruntu, która w zależności od jego wilgotności może zawierać się w przedziale od 4 (bardzo suchy grunt) do 70 (destylowana woda). Dla gruntu o średniej wilgotności przyjmuje się przenikalność ok. 9.

Obliczenia impedancji prostych uziomów były przeprowadzane w programie MATLAB przy wykorzystaniu pakietu Simulink. Prądy i spadki napięcia były rejestrowane w obwodzie złożonym z modelu według Rys. 1 zasilanym ze źródła o zmiennej częstotliwości lub z generatora udarów prądowych o czasach czoła 1 μ s i 4 μ s.

Ze względu na szybkość przebiegów udarowych oraz przesunięcie w czasie między prądem i wywołanym przez niego spadkiem napięcia na badanym uziemieniu, techniczna realizacja pomiarów udarowych nie jest rzeczą oczywistą. Można stosować różne definicje rezystancji udarowej, także operujące wartościami chwilowymi, ale praktyczną realizację znalazła jedynie definicja wykorzystująca pomiary wartości szczytowej prądu i napięcia według następującego wyrażenia:

$$Z_m = \frac{U}{I} \quad (2)$$

gdzie U_{max} oraz I_{max} zostały pokazane na rys. 2. Ten sposób obliczeń jest zgodny z definicją rezystancji zastępczej uziemienia zawartą we wspomnianych wyżej przepisach normalizacyjnych [8].



Rys. 2. Przykłady oscylogramów udarów prądu i napięcia na: a) skupionym uziemiu pionowym, b) uziemiu otokowym rozległym
Fig. 2. Oscillograms of impulse current and voltage on: a) vertical concentrated earthing and b) rectangular wide earthing

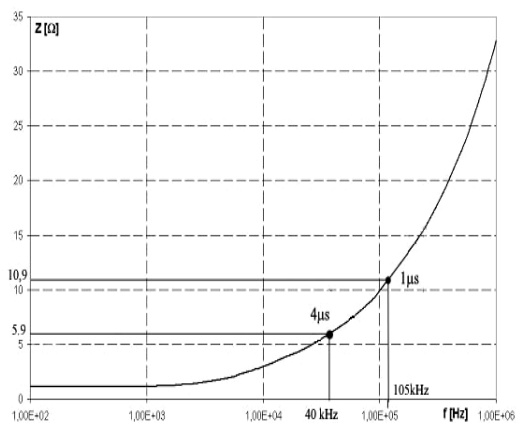
Badania porównawcze metodą udarową oraz wysokiej częstotliwości przeprowadzono na następujących typach uziemień:

- z uziemem pionowym o długości 10 m wbitym w grunt o rezystywności 50 Ω m,
- z uziemem poziomym o długości 70 m zagłębionym w gruncie o rezystywności 50 Ω m,
- z uziemem otokowym w budynku zagłębionym w gruncie o rezystywności 130 Ω m.

Do pomiarów metodą uderową wykorzystano polski miernik typu WG-307 emitujący udary o amplitudzie prądu ok. 1 A przy napięciu 1000 V o dwóch standardowych czasach czoła 1 μ s oraz 4 μ s. Pomiarów metodą wysokoczęstotliwościową zostały przeprowadzone przy pomocy miernika francuskiego AES 1002, który pozwala uzyskać charakterystykę impedancji uziemienia w funkcji częstotliwości w zakresie od 100 Hz do 1 MHz. Procedura pomiarowa jest tutaj sterowana mikroprocesorem i w pełni zautomatyzowana, a wynikowa charakterystyka częstotliwościowa obiektu jest zapamiętywana dla 20 częstotliwości leżących w zakresie roboczym miernika.

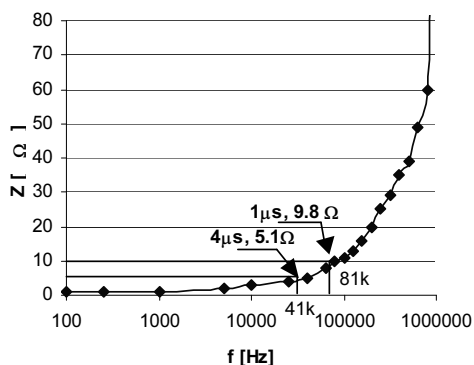
4. Wyniki symulacji i rzeczywistych pomiarów

Wyniki symulacji komputerowych oraz rzeczywistych pomiarów impedancji przeprowadzonych na uziemieniu poziomym o długości 70 m w gruncie o rezystywności 50 Ω m zostały przedstawione na rys. 3 i 4. Na obu rysunkach można zauważyć, że wartość impedancji uziemienia rośnie w podobny sposób ze wzrostem częstotliwości. Na charakterystykach częstotliwościowych zaznaczono obliczone i pomierzone wartości rezystancji uderowej dla impulsów o czasach czoła 1 μ s i 4 μ s. Zaprezentowane wykresy wskazują na dobrą zgodność wyników symulacji komputerowych oraz rezultatów pomiarów metodą uderową i wysokoczęstotliwościową.



Rys. 3. Wyniki symulacji komputerowych impedancji uziemienia poziomego w funkcji częstotliwości; na wykresie zaznaczono rezultaty obliczeń rezystancji uderowej

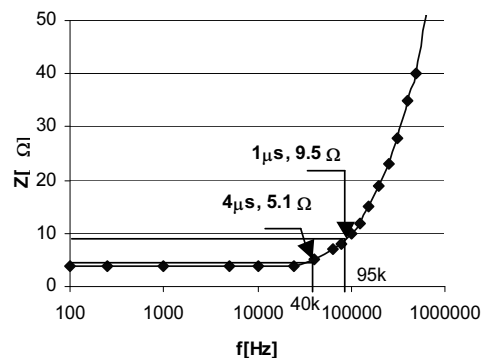
Fig. 3. Calculation results of impedance of horizontal earthing versus frequency; impulse resistance values have been marked on the frequency diagram



Rys. 4. Wyniki pomiarów impedancji uziemienia poziomego w funkcji częstotliwości; na wykresie zaznaczono rezultaty uzyskane miernikiem uderowym o czasach czoła 1 μ s i 4 μ s

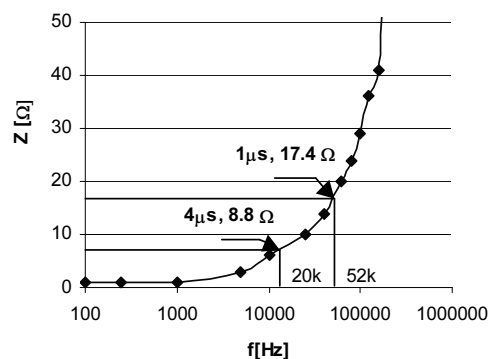
Fig. 4. Test results of impedance of horizontal earthing versus frequency; resistance values obtained from impulse meter 4 μ s and 1 μ s have been marked on the frequency diagram

Na rys. 5 przedstawiono wyniki pomiarów impedancji uziemienia pionowego w funkcji częstotliwości. Badania dotyczyły uziemienia pionowego o długości 10 m wbitego w grunt o rezystywności 50 Ω m. Na charakterystyce naniesiono rezultaty z miernika uderowego, czyli wartości 5,1 Ω i 9,5 Ω odpowiednio dla czasów czoła 4 μ s i 1 μ s. Wyniki podobnych badań przeprowadzonych na uziemieniu otokowym budynku przedstawiono na rys. 6. Wartości 8,8 Ω i 17,4 Ω uzyskane z mierników uderowych przy obu zastosowanych uderzeniach zaznaczono na charakterystyce impedancji. Sumując można powiedzieć, że prezentowane rodzaje uziemień mogą być badane za pomocą obu analizowanych metod pomiarów z podobnymi rezultatami. Przeprowadzone badania wskazują, że w pomiarach rzeczywistych uziemień ekwiwalentną dla udaru o czasie czoła 1 μ s jest częstotliwość w przedziale 50 - 100 kHz, a dla czoła 4 μ s - częstotliwość 20 - 40 kHz.



Rys. 5. Wyniki pomiarów impedancji uziemienia pionowego w funkcji częstotliwości; na wykresie zaznaczono rezultaty uzyskane miernikiem uderowym o czasach czoła 1 μ s i 4 μ s

Fig. 5. Test results of impedance of vertical earthing versus frequency; resistance values obtained from impulse meter of 1 μ s and 4 μ s have been marked on the frequency diagram

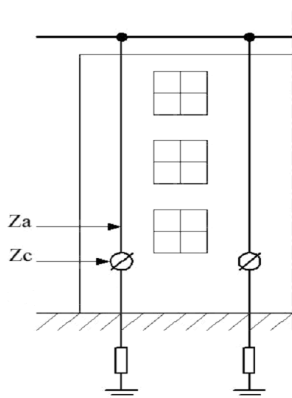


Rys. 6. Wyniki pomiarów impedancji uziemienia otokowego w funkcji częstotliwości; na wykresie zaznaczono rezultaty uzyskane miernikiem uderowym o czasach czoła 1 μ s i 4 μ s

Fig. 6. Test results of impedance of mesh type earthing versus frequency; resistance values obtained from impulse meter of 1 μ s and 4 μ s have been marked on the frequency diagram

Przydatność obu analizowanych metod do oceny stanu połączeń i ciągłości przewodów wchodzących w skład urządzenia piorunochronnego testowano na przykładzie instalacji ogromowej 3-kondygnacyjnego budynku. Instalacja ta zawierała 6 przewodów odprowadzających połączonych z uziemieniem otokowym, a każdy z przewodów odprowadzających był zaopatrzony w zacisk kontrolny. Pomiarów impedancji i rezystancji uderowej przeprowadzono przy następujących dwóch sposobach połączeń przedstawionych na rys. 7:

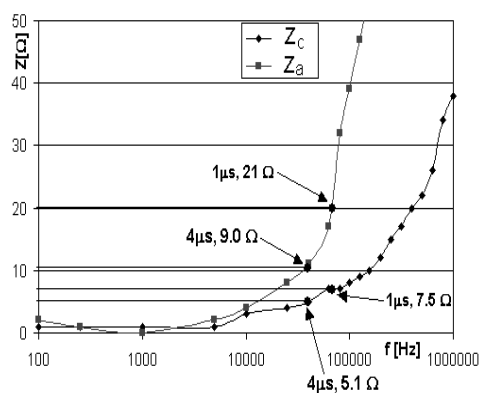
- Z_c - zacisk kontrolny zwarty,
- Z_a - zacisk kontrolny rozarty, a miernik dołączony do przewodu odprowadzającego powyżej zacisku.



Rys. 7. Sposoby podłączenia miernika do przewodu odprowadzającego podczas pomiarów, Z_c - zacisk kontrolny zwarty, Z_a - zacisk kontrolny rozarty i miernik dołączony powyżej zacisku

Fig. 7. The manner of meter connection during earthing impedance tests, Z_c - the testing terminal connected, Z_a - the terminal disconnected and the meter connected to the tested conductor above the terminal

Na rys. 8 można zauważyć, że charakterystyka częstotliwościowa impedancji otrzymana przy rozwartym zacisku kontrolnym (oznaczona jako Z_a) przebiega wyżej i przyjmuje większe wartości niż charakterystyka Z_c dla zwartego zacisku.



Rys. 8. Porównanie charakterystyk uziemienia otokowego uzyskanych w układach Z_a i Z_c , wartości rezystancji udarowych dla czasów 1 μ s i 4 μ s zostały zaznaczone na wykresach

Fig. 8. Comparison of frequency characteristics of a mesh type earthing measured in connections Z_a and Z_c , resistance values obtained from impulse meter of 1 μ s and 4 μ s have been marked on the frequency diagrams

Wyniki opisane jako Z_a nawiązują do sytuacji braku połączenia testowanego przewodu uziemiającego z uziomem np. wskutek korozji, do której dochodzi najczęściej poniżej powierzchni gruntu. Podobne zależności otrzymano dla metody udarowej - wartości rezystancji udarowej uzyskane w układzie połączeń Z_a są około 2-krotnie wyższe, niż w przypadku Z_c . Przyczyną otrzymanych różnic są dodatkowe spadki napięcia na indukcyjności przewodów odprowadzających, ponieważ przy otwartym zacisku probierczym prąd przepływający od miejsca przyłączenia miernika do uziomu zamyka się przez przewody odprowadzające biegnące do zwodów znajdujących się na dachu budynku. Analiza wyników pomiarów przeprowadzonych bez rozłączania zacisków kontrolnych przy pomocy przynajmniej jednej z omawianych metod, dla wszystkich przewodów odprowadzających, pozwala na wykrycie braku połączenia testowanego przewodu z uziomem. O braku takiego połączenia świadczy znacznie wyższa wartość impedancji lub rezystancji udarowej otrzymana dla uszkodzonego przewodu. Wykry-

cie takiego uszkodzenia przy pomocy pomiarów klasycznych metodą niskiej częstotliwości wymaga rozłączania zacisków kontrolnych.

5. Wnioski

Rezystancja udarowa uziemień mierzona w dziedzinie czasu za pomocą mierników udarowych jest porównywalna z impedancją mierzona w dziedzinie częstotliwości przez miernik wysokiej częstotliwości. Badania porównawcze wskazują na podobne tendencje wzrostu impedancji w funkcji narastającej częstotliwości lub obniżania czasu czoła udaru.

Metody impulsowa lub wysokoczęstotliwościowa pomiaru impedancji uziemienia pozwalają na dobrą ocenę przydatności uziemień do celów ochrony odgromowej z uwzględnieniem spadków indukcyjnych napięcia. Możliwe jest także sprawdzenie ewentualnego braku połączenia przewodów uziemiających z uziomem, czego najczęstszą przyczyną jest korozja przewodu poniżej poziomu gruntu. Zaletą obu metod jest fakt, że cel ten jest osiągnięty poprzez pomiary realizowane bez rozłączania zacisków kontrolnych.

6. Literatura

- [1] Gupta B. R., Thapar B., "Impulse impedance of grounding grids", IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, vol. PAS-99, No 6, 1980
- [2] Mazzetti C., Veca G. M., "Impulse behaviour of ground electrodes", IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, vol. PAS-102, No. 9, 1983
- [3] Lorenzou M. I., Hatzigiorgiou N. D. „Effective dimensioning of extended grounding systems for lightning protection”, Proceedings of 25-th LCLP, Rhodes, Greece, 18-22 Sept. 2000
- [4] Ziemba R. "Propagation of high frequency disturbances in underground conductors", Proceedings of International Carpathian Conference on EMC (ICC'02): Protection of Computer Systems against Electromagnetic Disturbances, 19-20 Sept. 2002, Łańcut – Rzeszów, Poland
- [5] Wojtas S. "Efficiency evaluation methods of earthing systems for lightning protection purposes", Proceedings of 26-th ICLP, Krakow, Poland, 2-6 Sept. 2002
- [6] Galewski M., Wojtas S., Wołoszyk M., „Impulse earthing measurement”, IMEKO XIV International Congress, Tampere (Finlandia) 1997
- [7] Wojtas S., Rousseau A. " Impulse and high frequency tests of lightning earthing", Proceedings of 27-th ICLP, Avignon, France, 13-16 Sept. 2004
- [8] PN-IEC 61024-1 "Ochrona odgromowa obiektów budowlanych. Zasady ogólne"
- [9] PN-89/E-05003/03 „Ochrona odgromowa obiektów budowlanych. Ochrona obostrzona"
- [10] PN-E-05115:2002 „Instalacje elektroenergetyczne prądu przemiennego o napięciu wyższym od 1 kV"
- [11] BS 6651, 1999 "Protection of structures against lightning"
- [12] Verma R., Mukhedhar D. „Fundamental considerations and impulse impedance of grounding grids“, IEEE Transaction on Power Apparatus and Systems, vol. PAS-100, No 3, 1981