

ASPEKTY BEZPIECZEŃSTWA W OCENIE WYNIKÓW POMIARÓW UZIEMIENŃ ODGROMOWYCH

Stanisław WOJTAS, Marek WOŁOSZYK

Politechnika Gdańska

tel: +48583471611, +48583472113

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

Streszczenie: W wyniku połączenia wszystkich elementów uzziemionych w obiekcie budowlanym do szyny ekwipotencjalnej powstaje często bardzo rozległy system uziemień. Ocena tak rozległego systemu za pomocą metod wykorzystujących przebiegi wolnozmiennne prowadzi do zbyt optymistycznych wniosków odnośnie ich właściwości podczas odprowadzania prądów wyładowań atmosferycznych. Bardziej bezpieczne wnioski powstają w wyniku pomiarów z zastosowaniem metody wykorzystującej przebiegi impulsowe, ponieważ wtedy jest uwzględniana tylko ta część nawet bardzo rozległego systemu uziemień, która bierze udział w rozpraszaniu prądu piorunowego w ziemi. Tak określona część uziumu jest nazywana jego długością efektywną. Przeprowadzone symulacje komputerowe wskazują, że zwiększanie rozmiarów uziumu poza jego długość efektywną nie wpływa na ograniczanie spadku napięcia na uziumie podczas odprowadzania prądu.

Słowa kluczowe: ochrona odgromowa, pomiary uziemień, długość efektywna uziumu.

1. WSTĘP

Przedmiotem pracy są obiekty wyposażone w główną szynę wyrównania potencjałów, która utrudnia lub uniemożliwia rozłączanie systemów uzimających poszczególnych mediów w celu przeprowadzenia indywidualnych testów kolejnych elementów uziumu. W takim przypadku bardzo niskie wartości rezystancji uzyskiwane metodą niskoczęstotliwościową uwzględniają uzimienia odległych obiektów, które nie biorą udziału w odprowadzaniu do ziemi prądów wyładowań atmosferycznych.

Poprawnie przeprowadzone pomiary parametrów uzimień, a także właściwa interpretacja uzyskanych wyników, są bardzo ważnymi elementami zapewniającymi bezpieczeństwo obsługi oraz poprawną pracę urządzeń elektrycznych i elektronicznych we wszelkich obiektach wyposażonych w uzimienia ochronne i robocze oraz narażonych na oddziaływanie przepięć spowodowanych wyładowaniami atmosferycznymi. Metody właściwej oceny uzimień odgromowych powinny być przedmiotem wytycznych normalizacyjnych. Jednak procedury takiej oceny w aktualnych normach są formułowane dość niejednoznacznie i wymagają od użytkownika sporej dozy samodzielnej interpretacji, zarówno na etapie projektowania jak również testów eksploatacyjnych oraz opracowywania wyników pomiarów.

Ogólnie można stwierdzić, że uzimienia wyraźnie dzielą się na dwie kategorie: pracujące przy częstotliwościach sieciowych oraz odgromowe, jednak pomiary rezystancji obu typów uzimień wykonuje się najczęściej przy prądach niskiej częstotliwości, a więc metodami określanymi jako statyczne. Rezystancja uziumu zmierzona w takich warunkach może być miarą przydatności uziumu tylko w zakresie częstotliwości sieciowych, a nie w dziedzinie szybkich udarów prądowych charakterystycznych dla wyładowań atmosferycznych. Ocena zdolności ochronnej uzimienia powinna uwzględniać jego właściwości przy przebiegach o parametrach czasowych podobnych do tych, jakie panują podczas rzeczywistego wyładowania [1,2]. Wprowadzona w ostatnich latach do praktyki budowlanej norma PN-EN 62305 [4] w przeciwieństwie do poprzednio obowiązującej normy PN 05003 [3] nie ogranicza długości uziumów odgromowych, a zawiera jedynie uwagę, że „redukcja rezystancji uzimienia przez wydłużenie jest praktycznie możliwa do 60 m”.

Celem pracy jest analiza możliwości oceny oraz procedur pomiarowych i wymagań stawianych układom uzimającym przez aktualne przepisy normalizacyjne z uwzględnieniem długości efektywnej uziumu. Normy generalnie sugerują ocenę parametrów uzimień w oparciu o klasyczną metodę niskoczęstotliwościową, ale również dopuszczają korzystanie podczas pomiarów z przebiegów szybkozmiennych. W pracy podjęto więc próbę odpowiedzi na pytanie, którą z metod wybrać do oceny uzimień o różnej konfiguracji i przeznaczeniu, aby zapewnić możliwie wysokie bezpieczeństwo w chronionych obiektach podczas wyładowań atmosferycznych.

2. POMIARY UZIEMIENŃ W PRZEPISACH NORMALIZACYJNYCH

W tematyce wymagań stawianych systemom uzimień oraz zakresowi ich kontroli dominuje przekonanie, że procedura kontrolna powinna odbywać się w oparciu o wskazania aktualnej edycji normy. Jednak w przypadku, gdy kontrolowany obiekt został zbudowany w czasie obowiązywania starszej normy, wtedy obowiązuje w stosunku do niego zasada ochrony zastanej i postanowienia tej normy są brane pod uwagę podczas kontroli. W takiej sytuacji jedynie od-

chylenia od przepisów obowiązujących podczas budowy będą wykazane w protokole jako usterki. Zasada ochrony zastanej nie powinna być stosowana, jeżeli w obiekcie budowlanym nastąpiła zmiana polegająca na przykład na:

- przebudowie dachu, albo na umieszczeniu na nim nowych konstrukcji budowlanych lub elementów dołączonych do instalacji elektrycznych obiektu,
- doprowadzeniu do obiektu nowej linii elektroenergetycznej lub telekomunikacyjnej,
- zmianach w obrębie znajdujących się w obiekcie stref zagrożenia wybuchem.

Prawidłowo sporządzony protokół w przypadku stosowania przez kontrolującego zasady ochrony zastanej powinien zawierać wskazanie odchyżeń od aktualnych przepisów. Uwagi takie oczywiście nie dyskredytują analizowanego systemu ochrony odgromowej, ale dają administratorowi obiektu informacje o tym, jak bardzo ochrona odgromowa obiektu odbiega od poziomu wiedzy inżynierskiej prezentowanego w obowiązujących aktualnie normach [5;6].

Kryterium przydatności uziemienia w obiektach podlegających ochronie obostrzonej i specjalnej, które były budowane wg PN-E 05003.03:1989 (p.1.3.7) powinna być rezystancja udarowa określana 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 wypadkowej uziemienia, czyli tej, która bierze udział w odprowadzaniu z danego punktu prądu piorunowego do gruntu [7].

Przyjęta w ostatnich latach norma PN-EN 62305 do stosowania w systemach ochrony odgromowej obiektów budowlanych wprowadza pojęcie „*umownej impedancji uziemienia*” określonej jako „*stosunek wartości szczytowej napięcia na uziomie do wartości przepływającego w nim prądu, które na ogół nie występują jednocześnie*” [4].

Impedancję udarową wyznacza się zgodnie z definicją zawartą w normach [4;7;8] według zależności:

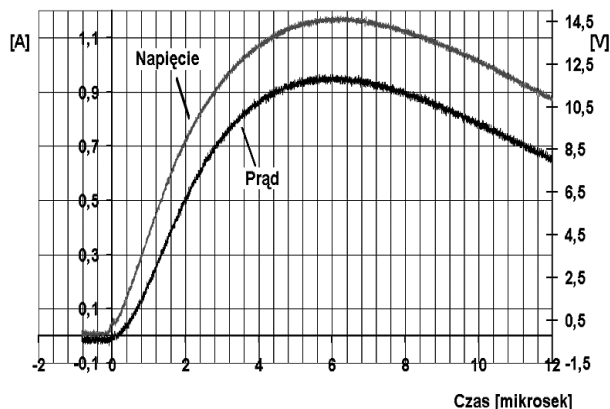
$$Z_u = \frac{U_{\max}}{I_{\max}} \quad (1)$$

gdzie U_{\max} oraz I_{\max} oznaczają odpowiednio amplitudy spadku napięcia na uziomie oraz prądu wymuszającego ten spadek i zostały pokazane na rysunku 1. W przypadku uziomu skupionego np. pionowego o niewielkiej długości można zaobserwować brak przesunięcia czasowego między ekstremami prądu i napięcia (rysunek 1a). Dla bardziej rozległego uziomu spadki napięcia na indukcyjności powodują przesunięcie między wartościami maksymalnymi obu przebiegów, jak to można zobaczyć na rysunku 1b. Impedancja uziemienia jest więc definiowana umownie w dziedzinie czasu – iloraz wielkości występujących w różnych czasach.

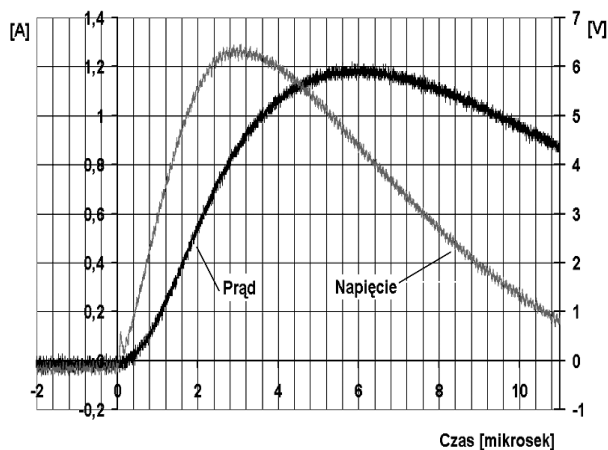
W normach dotyczących instalacji o napięciu powyżej 1 kV, do oceny spadków napięcia pod wpływem prądów zwarciowych są prezentowane nomogramy uziomów uwzględniające długości rzędu kilometrów. W celu analizy właściwości systemu uziemień podczas przebiegów szybkozmiennych zostały wprowadzone w załącznikach uwagi, że do pomiarów impedancji uziemień można używać testera

pracującego przy wysokiej częstotliwości. Celem wprowadzenia pomiaru przy przebiegach szybkozmiennych jest przede wszystkim uwzględnienie wpływu spadków napięcia na indukcyjnościach uziomów [12].

a)



b)



Rys. 1. Oscylogramy prądu i spadku napięcia na uziomie skupionym – a) i rozległym – b) generowane miernikiem udarowym uziemień

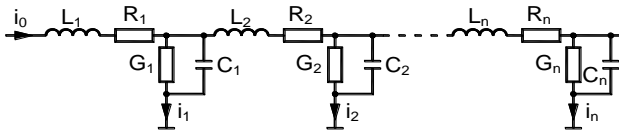
3. WPLYW DŁUGOŚCI EFEKTYWNEJ NA WŁAŚCIWOŚCI UZIOMÓW

Na rysunku 2 przedstawiono schemat zastępczy uziomu poziomego złożonego z n szeregowo połączonych czwórników, z których każdy odpowiada długości podstawowego elementu uziomu. Pomiar impedancji uziomu przy wymuszeniu $i(t)$ o częstotliwości zbliżonej do sieciowej sprowadza się praktycznie do określenia wypadkowej wartości przewodności G wynikającej z równoległego połączenia elementów G_1 do G_n . Podczas pomiaru miernik wskazuje więc rezystancję uziomu $R_u=1/G$ jako rezystancję przejścia z uziomu do otaczającego gruntu, która zależy od rezystywności gruntu oraz wymiarów uziomu. Pozostałe elementy schematu zastępczego mają niewielki wpływ na rezystancję wypadkową uziomu przy wymuszeniu wolnozmiennym, ponieważ:

- rezystancja podłużna uziomu (suma elementów R_1 do R_n) jest pomijalna ze względu na znaczny przekrój (nie mniej niż 90 mm^2) uziomu,
- indukcyjność własna poszczególnych elementów (L_1 do L_n) jest zawarta w granicach $1\text{-}2 \text{ }\mu\text{H/m}$ i nie odgrywa większej roli przy przebiegach o częstotliwości sieciowej,

- podobnie pomijane są prądy pojemnościowe związane z pojemnością własną uziomu C.

Wraz ze wzrostem częstotliwości sygnału wymuszającego $i(t)$ lub zastąpieniem tego sygnału przebiegiem udarowym rośnie reaktancja indukcyjna ωL każdego z elementów uziomu. Wzrost spadku napięcia na indukcyjności zwiększa całkowitą impedancję uziomu mierzoną na jego wejściu. Potwierdzeniem wzrostu znaczenia indukcyjnych spadków napięcia na coraz dłuższym uziemiu jest zwiększanie przesunięcia czasowego między prądem i napięciem w przykładzie pokazanym na rysunku 1b.



Rys. 2. Schemat zastępczy uziomu poziomego złożonego z n elementów jednostkowych, R – rezystancja podłużna elementu, L – indukcyjność elementu, G – przewodność między uziemem a otaczającym gruntem, C – pojemność elementu

Rozważania na temat stałej czasowej linii modelującej uziom długi pokazują, że zwiększanie długości uziomu poziomego jest skuteczne tylko do pewnej wartości l , którą można obliczyć jako [9]:

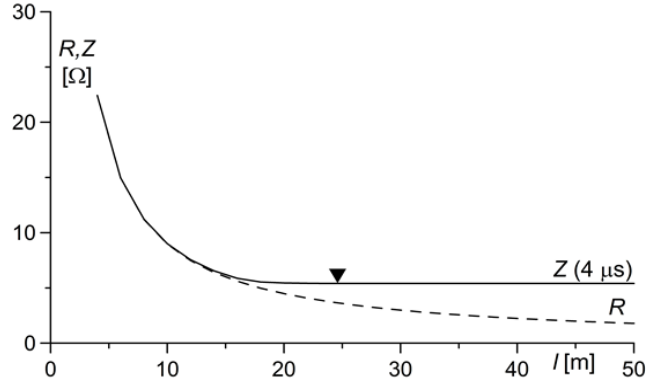
$$l \leq \frac{\pi}{2} \sqrt{\frac{T}{GL}}, \quad (2)$$

gdzie: T - czas trwania czoła udaru prądowego, L - indukcyjność jednostkowa i G - konduktancja jednostkowa uziomu.

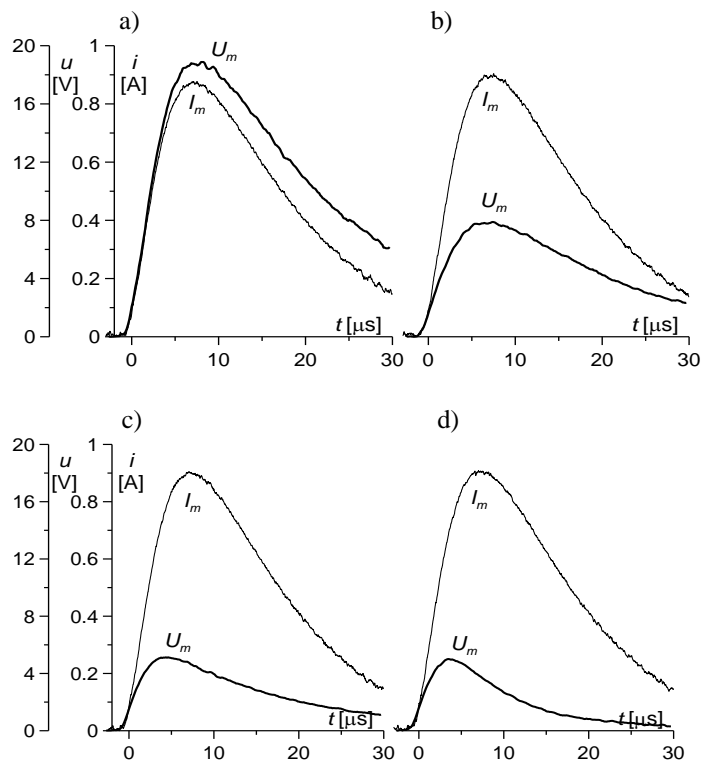
Rysunek 3 przedstawia wyniki symulacji komputerowych impedancji uziomu poziomego w funkcji jego długości. Przy pomiarach statycznych (częstotliwość zbliżona do sieciowej) rezystancja maleje raz z wydłużaniem uziomu bez względu na przedział tego wzrostu długości. Otrzymana wartość rezystancji uziomu R wynika z równoległego połączenia coraz większej liczby n elementów o przewodności G każdego z nich jak to przedstawiono na rysunku 2. Przy wymuszeniu prądem udarowym (tutaj udar o czasie czoła $4 \mu s$) spadek impedancji uziomu przez dodawanie coraz większej liczby elementów jest obserwowany tylko do pewnej długości uziomu zbliżonej do długości efektywnej obliczonej ze wzoru (2) – wartość ta wynosi 26 m i została zaznaczona trójkątem na rysunku 3. Po osiągnięciu długości efektywnej dodawanie kolejnych elementów uziomu nie ma wpływu na impedancję wypadkową Z .

Potwierdzeniem tych spostrzeżeń są wyniki rejestracji prądu i napięcia na początku rzeczywistego uziomu poziomego o długości 50 m złożonego z łączonych szeregowo odcinków po 5 m przedstawionego na rysunku 4. Badany uziom był zagłębiony w gruncie o rezystywności $85 \Omega m$ i dla impulsów o czasie czoła $4 \mu s$ jego długość efektywna wynosiła ok. 20 m. Ponieważ impulsy prądowe miały stałą amplitudę (ok. 0,9 A), wartość maksymalna napięcia może być traktowana jako wskaźnik impedancji udarowej uziomu. Przyrost długości uziomu o 10 m w zakresie poniżej długości efektywnej wywołuje zdecydowany (w tym przypadku ok. 2-krotny) spadek napięcia, a więc także impedancji uziomu - przebiegi a i b na rysunku 4. Taki sam 10-metrowy przyrost długości uziomu poza jego długością efektywną nie wpływa na jego impedancję udarową - podobna amplituda napięcia na oscylogramach c i d. Efekt odprowadzania pewnej wartości ładunku przez dodaną długość można zauważyć

dopiero na grzbiecie przebiegu napięciowego, co nie ma wpływu na impedancję udarową uziomu.



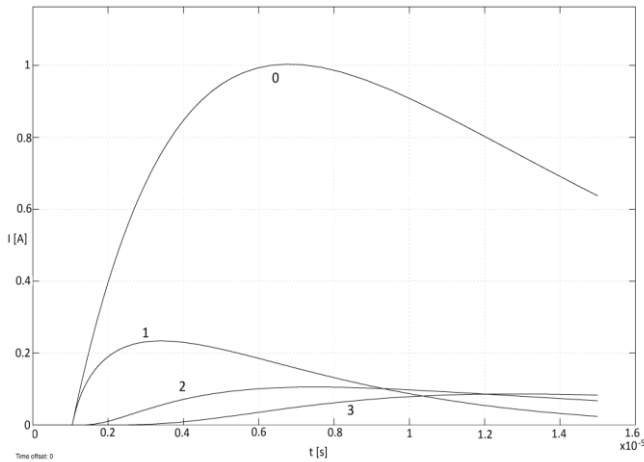
Rys. 3. Impedancja uziomu poziomego w funkcji jego długości przy wymuszeniu sinusoidalnym wolnozmiennym (R) oraz przy wymuszeniu udarami o czasie czoła $4 \mu s$ (Z); na krzywej zaznaczono długość efektywną uziomu obliczoną ze wzoru (2)



Rys. 4. Wpływ przyrostu długości l uziomu poziomego o 10 m w zakresie poniżej długości efektywnej (a - 5 m, b - 15 m) oraz powyżej tej długości (c - 20 m, d - 30 m) na przebiegi napięcia na początku uziomu przy zasilaniu impulsami prądowymi o stałej amplitudzie i o czasie czoła $4 \mu s$

W celu weryfikacji tezy o braku wpływu elementów uziomu poza jego długością efektywną na wartość amplitudy spadku napięcia, podczas symulacji komputerowych zarejestrowano kształty prądów i_1 do i_n . Zgodnie ze schematem pokazanym na rysunku 2 są to prądy odprowadzane do gruntu przez poszczególne odcinki uziomu. Wyniki rejestracji przedstawiono na rysunku 5. Prąd o czasie czoła $4 \mu s$ wpływający do uziomu i został oznaczony jako 0, a prądy odprowadzane przez odcinki: pierwszy, piąty oraz siódmy oznaczono odpowiednio jako przebiegi 1, 2 oraz 3. Porównanie czasów czoła prądów odprowadzanych do gruntu przez odcinki znajdujące się coraz dalej od miejsca zasilania wskazuje na stopniowy wzrost ich czasu czoła. Czoło prądu odpływającego w

pierwszym odcinku (0 - 5 m) jest znacznie krótsze niż czoło prądu zasilającego uziom. Czas czoła prądu odcinka znajdującego się w pobliżu długości efektywnej uziomu osiąga wartość czasu czoła prądu wpływającego, czyli w analizowanym przypadku 4 μ s. Czasy czoła prądów odprowadzanych przez odcinki znajdujące się dalej niż długość efektywna rosną i przewyższają czas czoła prądu zasilającego uziom, i dlatego nie mają wpływu na wartość maksymalną napięcia.



Rys. 5. Prądy udarowe w uziemiu o długości 50 m: prąd wpływający do uziomu (0) oraz prądy odpływające do gruntu w poszczególnych odcinkach uziomu: 1 - odcinek 0-5 m; 2 - odcinek 20-25 m; 3 - odcinek 30-35 m

4. BEZPIECZNA OCENA WYNIKÓW POMIARÓW UZIEMIENŃ ODGROMOWYCH

Ponieważ prądy piorunowe cechuje znaczna stromość narastania (rzędu 100 kA/ μ s), o skuteczności uziemienia decydują często indukcyjne spadki napięcia na poszczególnych elementach systemu uziemień. Impedancja uziemienia przewodzącego prądy udarowe jest funkcją stromości narastania prądu i jego natężenia, ale także długości uziomu. Wpływ długości na parametry udarowe uziemienia ilustruje rysunek 1, na którym porównano przebiegi udarowe na uziemieniu rozległym i skupionym przy założeniu wartości prądu poniżej zjawisk jonizacji w gruncie. Miarą tego wpływu jest przesunięcie czasowe między szczytami prądu i wywołanego przezeń spadku napięcia. Spotykane czasem łączenie uziomu odgromowego z rozległym uziemem roboczym lub z siecią wodociągową umożliwia uzyskanie bardzo niskiej wartości rezystancji uziomu mierzonej metodą niskoczęstotliwościową. Impedancja udarowa takiego uziemienia może jednak być wielokrotnie wyższa, co prowadzi do zagrożeń chronionego obiektu podczas wyładowania atmosferycznego.

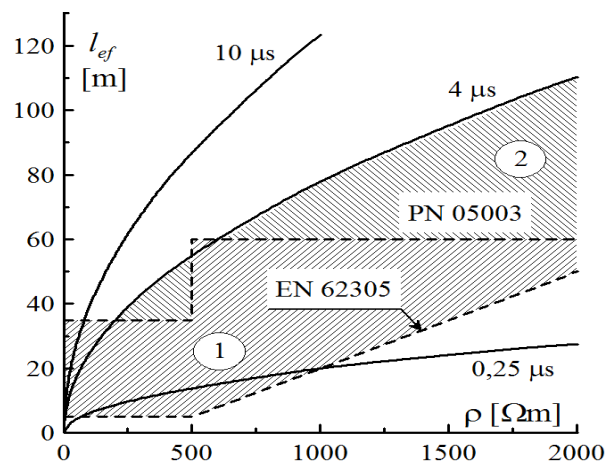
Problem ten został częściowo uwzględniony w poprzednich przepisach normalizacyjnych, które dopuszczały ocenę przydatności uziemienia dla celów ochrony obostrzonej i specjalnej na podstawie pomiarów ich rezystancji metodami statycznym jedynie pod następującymi warunkami:

- dla ochrony obostrzonej należy odłączyć od mierzono uziomu wszystkie przyłączone do niego masy metalowe (p. 6.1.4.c) [7]
- dla ochrony specjalnej należy odłączyć uziomy położone dalej od rozpatrywanego zwodu niż 35 m w gruncie o rezystywności $\rho \leq 500 \Omega$ m i 60 m w gruncie o rezystywności $\rho > 500 \Omega$ m (p. 4.1.3.2) [10]. Wykonanie pomiarów

metodami statycznymi zgodnie z powyższymi wymaganiami jest często bardzo trudne lub wręcz niemożliwe.

Długość uziomu obliczona z wyrażenia (2) jest często nazywana długością efektywną uziomu, a jej wartość zależy przede wszystkim od rezystywności gruntu otaczającego analizowany uziom oraz stromości czoła odprowadzanego do ziemi udaru. Na rysunku 6 zamieszczono krzywe przedstawiające długość efektywną uziomu w funkcji rezystywności gruntu dla udarów o czasach czoła 0,25, 4 oraz 10 μ s. Liniami przerywanymi zaznaczono maksymalną długość uziomu dopuszczalną przez normy PN-E 05003 [7;10] oraz minimalną długość uziomu sugerowaną przez normę PN-EN 62305 dla ochrony odgromowej klasy I [4].

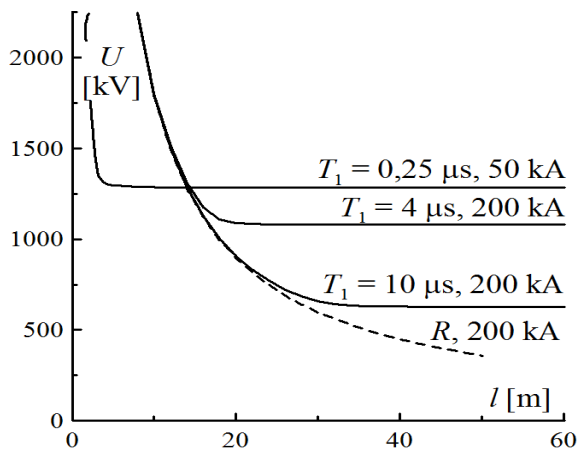
Wpływ indukcyjności uziomu zależny od jego geometrii jest uwzględniony poprzez badania metodami udarowymi. Krzywa długości efektywnej dla udarów o czasie czoła 4 μ s jest położona w bezpośrednim sąsiedztwie zaznaczonych liniami przerywanymi maksymalnych dopuszczalnych długości uziemień dla ochrony obostrzonej oraz specjalnej i może być uznana jako dość dobrze przybliżająca intencje wyrażone w poszczególnych arkuszach normy PN 5003 [3;7;10]. Wobec tego należy przyjąć, że użyteczny zakres długości uziomu w funkcji rezystywności gruntu dla norm PN 05003 oraz PN-EN 62305 jest ograniczony do pola oznaczonego na rysunku 6 jako 1. Analiza wyników obliczeń wskazuje, że zwłaszcza dla gruntów o wyższej rezystywności, użyteczna długość uziomu może być większa od ograniczeń normalizacyjnych, jak to pokazuje pole 2 na rysunku 6.



Rys.6. Wpływ rezystywności gruntu na długość efektywną uziomu przy czasach czoła udaru 0,25, 4 oraz 10 μ s; liniami przerywanymi zaznaczono minimalną długość uziomu wg normy PN-EN 62305 dla poziomów ochrony I, a przerywaną - maksymalną wg normy PN 05003

Bezpieczeństwo istot żywych oraz skutki działania na instalację elektryczną obiektu zależy od spadku napięcia na uziemiu podczas odprowadzania prądu piorunowego. Analizę spadków napięcia na uziemieniu wywołanych przez prądy wymienione w normie PN-EN 62305 przeprowadzono w oparciu o symulację komputerową w programie PSpice. Symulacja została wykonana dla uziomu poziomego pograżonego w gruncie o rezystywności 100 Ω m, którego długość była zmieniana w granicach od 2 do 60 m. Wykresy pokazane na rysunku 7 przedstawiają spadki napięcia w funkcji długości uziomu dla prądów i czasów czoła przewidzianych dla ochrony klasy I, czyli: 50 kA i 0,25 μ s oraz 200 kA i 10 μ s. Analizując oba przebiegi można zauważyć, że dla czasu czoła 0,25 μ s otrzymano ponad 2-krotnie większy spadek

napięcia na uziemieniu, mimo mniejszej amplitudy prądu. W celu porównania na rysunku 7 zamieszczono wykres uzyskany dla prądu 200 kA i czasu czoła 4 μ s, który leży zaledwie 20 % poniżej najbardziej niekorzystnego dla systemu ochrony przebiegu uzyskanego dla czasu czoła 0,25 μ s. Obliczony spadek napięcia przy założeniu pomiaru statycznego R daje znacznie niższą, czyli pozornie zapewniającą wysoki poziom bezpieczeństwa, wartość spadku napięcia dla dłuższych uziomów, co w praktyce jest nieosiągalne.



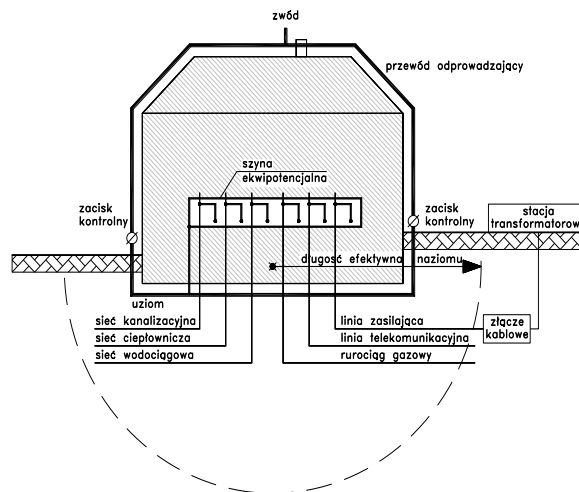
Rys. 7. Wyniki symulacji komputerowych spadku napięcia na uziemiu poziomym w funkcji jego długości dla udarów prądowych przewidzianych normie PN-EN 62305

Uzyskanie czasu czoła udaru testującego na poziomie 0,25 μ s byłoby bardzo trudne w praktyce pomiarowej. W świetle wyżej opisanej sytuacji ocena impedancji uziemienia oraz spadków napięć może odbywać się według następującej procedury: amplituda prądu powinna być równa prądowi o czasie czoła 10 μ s sugerowanej przez normy [4;8] dla poszczególnych klas ochrony, a czas czoła udaru równy 4 μ s przewidziany przepisach normalizacyjnych dotyczących techniki badań wieloprądowych [11]. Podobny zakres długości czasu czoła jest przypisana do większości głównych wyładowań atmosferycznych na podstawie wieloletnich rejestracji i przewidziany do testów w normie amerykańskiej [13].

4. ROZLEGŁE UZIEMIENIA OBIEKTÓW KUBATUROWYCH

Współczesne obiekty podlegające ochronie ogromowej są wyposażone w główną szynę wyrównania potencjałów, do której są dołączone elementy uziemiające poszczególnych mediów zasilających dany obiekt, jak to zostało przedstawione na rysunku 8. W przypadku zastosowania do pomiaru rezystancji uziemienia miernika niskiej częstotliwości, na uzyskaną wartość rezystancji mają wpływ uziomy położone nawet w znacznej odległości od badanego obiektu, np. system uziemień transformatora zasilającego. Pomierzona w ten sposób rezystancja wypadkowa uziemienia osiąga zwykle bardzo małe wartości, często znacznie poniżej 1 Ω . Taka ocena systemu uziemień może być miarodajna dla prądów zwarciovych, ale w przypadku wyładowań atmosferycznych należy oczekiwać znacznie wyższej impedancji. W rozpraszaniu prądu o czasie czoła na poziomie mikrosekund, czyli zbliżonym do prądów piorunowych, biorą udział elementy uziomu oddalone od miejsca wyładowania poniżej długości efektywnej uziomu, jak to zostało zaznaczone na

rysunku 8. Pojęcie długości efektywnej uziomu zostało omówione w poprzednim rozdziale.



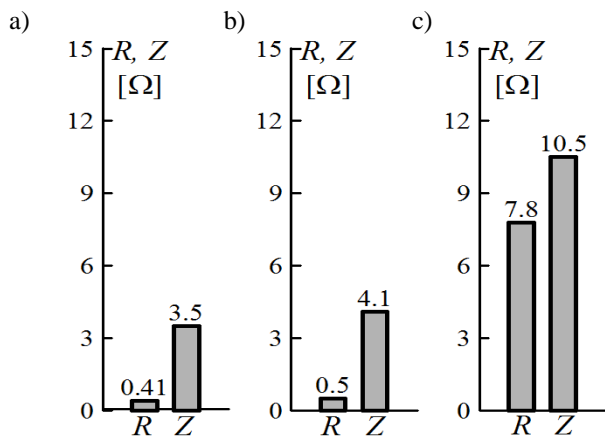
Rys.8. Przykład obiektu z rozległym systemem uziemień wnoszonym przez media dołączone do szyny wyrównania potencjału, zaznaczono półokrąg o promieniu równym długości efektywnej uziomu

Na rysunku 9 zostały przedstawione wartości rezystancji statycznej oraz impedancji udarowej trzech różnych obiektów. Rysunek 9a przedstawia rezultaty pomiarów rezystancji niskoczęstotliwościowej oraz impedancji udarowej systemu uziemień stadionu. Pokazany histogram wskazuje, że tak rozbudowany system charakteryzuje się bardzo małą rezystancją statyczną równą 0,41 Ω . Podczas pomiarów udarowych użyteczny system uziemień jest ograniczony do długości efektywnej i jego impedancja wynosi 3,5 Ω , a więc jest ponad 8 razy wyższa. Podobne wyniki zaprezentowane na rysunku 9b uzyskano dla budynku mieszkalnego o 3 kondygnacjach i długości ok. 30 m. System uziemień budynku jest zaopatrzony w szynę wyrównania potencjałów, zasilany linią kablową ze stacji transformatorowej położonej w odległości kilkaset metrów i zbliżony do zaprezentowanego na rysunku 8. Taki przypadek charakteryzuje się również bardzo małą rezystancją o wartości 0,5 Ω , a impedancja w warunkach udarowych wynosi 4,1 Ω . Różnica ta wynika przede wszystkim z faktu, że na rezystancję statyczną wpływa cały system uziemień, a miernik udarowym uwzględnia wyłącznie elementy uziemiające znajdujące się w odległości mniejszej niż długość efektywna określona czasem czoła udaru i rezystywnością gruntu (2). Wykres 9c dotyczy domu jednorodzinnego zasilanego linią napowietrzną. Pomierzone wartości rezystancji oraz impedancji udarowej wynoszą odpowiednio 7,8 i 10,5 Ω , a więc współczynnik udarowy uziemienia wynosi 1,35 i wskazuje na znacznie mniejszy wpływ odległych elementów systemu uziemień na rezystancję statyczną.

Impedancja udarowa pozwala na lepszą ocenę zachowania się rozległego systemu uziemień podczas przepływu prądu piorunowego, co zostało potwierdzone pomiarami uziemień w tak nietypowym obiekcie jakim jest stadion sportowy, jak również pomiarami współczesnych budynków mieszkalnych z układem wyrównania potencjałów łączącym elementy uziemień mediów wchodzących do budynku.

W tej sytuacji nie powinien dziwić fakt, że w literaturze pojawiają się stwierdzenia o braku konieczności mierzenia rezystancji statycznej podczas sprawdzania stanu technicznego urządzenia piorunochronnego [5]. Mała wartość rezystancji uziemienia nie musi świadczyć o jego dobrym stanie, podobnie jak wysoki wynik rezystancji nie musi dyskwalifi-

kować przydatności uziomu w systemie ochrony odgromowej. Dla wydania ostatecznej oceny konieczna jest znajomość konfiguracji sieci uziemiającej i weryfikacja połączeń zapewniających ciągłość przewodu uziemiającego oraz połączeń przewodów odprowadzających z uziomem. W wielu przypadkach nieodzownym warunkiem oceny uziemień może być ich odkopanie, a to często okazuje się niewykonalne i wtedy metoda udarowa stanowi rozsądną alternatywę.



Rys. 9. Wartości rezystancji oraz impedancji udarowej systemu ochrony odgromowej stadionu - a) i budynku mieszkalnego o 3 kondygnacjach z mediami dołączonymi do szyny ekwipotencjalnej - b)

5. WNIOSKI

Metoda udarowa pozwala na określenie impedancji uziemienia, która jest miarą jego przydatności do celów ochrony odgromowej. Przydatność takiej metody jest ważna przede wszystkim w przypadku rozległych systemów uziemień, a zwłaszcza przy połączeniu elementów uziemiających mediów z szyną wyrównania potencjału. Wtedy są uwzględniane tylko te części systemu instalacyjnego, które biorą udział w odprowadzaniu prądu piorunowego do ziemi, czyli w zakresie do jego długości efektywnej.

Na podstawie przeprowadzonej analizy czoło udaru pomiarowego o czasie $4 \mu\text{s}$ należy uznać jako najbardziej uniwersalne oraz przydatne w testach uziemień.

Sugerowane w niektórych przepisach normalizacyjnych dotyczących ochrony odgromowej wymaganie, aby w po-

miarach rezystancji uziemień prowadzonych metodą niskoczęstotliwościową uwzględniać ich ograniczoną długość, może sprowadzać się nawet do konieczności odkrywania uziomów podczas procedury weryfikacyjnej, co najczęściej okazuje się niewykonalne.

Metody udarowe i wysokoczęstotliwościowe pozwalają oceniać przydatność uziemień do celów ochrony odgromowej bez czasochłonnych zabiegów związanych odłączeniem dalej położonych mas metalowych oraz podnoszą bezpieczeństwo obiektów chronionych podczas wyładowań atmosferycznych ze względu na bardziej wiarygodną ocenę systemu uziemień.

5. BIBLIOGRAFIA

1. Wojtas S.: Lightning impulse efficiency of horizontal earthings, *Przegląd Elektrotechniczny*, Nr 10, 2012
2. Wojtas S., Wołoszyk M.: Ocena uziemień odgromowych według aktualnych przepisów normalizacyjnych, VI Krajowa Konferencja N-T "Urządzenia Piorunochronne w Projektowaniu i Budowie, SEP Kraków, 20.10.2011
3. PN-E 05003-1:1986 - Ochrona odgromowa obiektów budowlanych. Wymagania ogólne.
4. PN-EN 62305-1:2008 - Ochrona odgromowa. Część 1: Zasady ogólne.
5. Musiał E.: Kontrola stanu technicznego urządzeń ochrony odgromowej i przeciwprzepięciowej, *Biul. SEP INPE*, 2008, Nr 100, s. 18-36
6. Markowska R., Sowa A.: Ochrona odgromowa obiektów budowlanych, Dom Wydawniczy MEDIUM, Warszawa, 2009.
7. PN-E 05003-3:1989 – Ochrona odgromowa obiektów budowlanych. Ochrona obostrzona.
8. PN-IEC 61024-1-1:2001 - Ochrona odgromowa obiektów budowlanych. Zasady ogólne. Wybór poziomów ochrony dla urządzeń piorunochronnych.
9. Szpor S., Samuła J.: Ochrona odgromowa, WN-T, Warszawa, 1983.
10. PN-E 05003-4:1992 – Ochrona odgromowa obiektów budowlanych. Ochrona specjalna.
11. PN-EN 62475:2010E - Wielkopądowa technika probiercza. Definicje i wymagania dotyczące prądów probierczych i układów pomiarowych.
12. PN-E 05115: 2002 – Instalacje elektroenergetyczne prądu przemiennego o napięciu wyższym niż 1 kV.
13. ANSI/IEEE Std 81-1983 - IEEE Guide for Measuring Earth Resistivity, Ground Impedance and Earth Surface Potentials of a Ground System.

SAFETY PROBLEMS IN ASSESSMENT OF LIGHTNING PROTECTION EARTHING TEST RESULTS

Key-words: lightning protection, earthing tests, effective length of earthing

Summary: Earthings of the electrical power systems can achieve wide sizes. Due to equipotential bonding and a presence of main equipotential bar the earthing system can be directly connected even to a power transformer neutral point. Evaluation of such wide earthings for lightning protection purposes can not be easy to perform because only a part of the earthing system should be taken into account. This useful part of the earthing is described as its effective length. The paper deals with procedures and requirements up to standards for earthings from the point of view of their effectiveness in lightning protection systems. Impulse measurements of earthings prove to be a base of such evaluations and it is especially useful in the case of very wide earthing systems.