

Pomiary impedancji udarowej uziemień odgromowych

ATMOR s.c. · Dokumentacja producenta opublikowana na atmor.pl. Dokument historyczny — przywołane przepisy i normy odnoszą się do daty opracowania.

POMIARY IMPEDANCJI (REZYSTANCJI) UDAROWEJ UZIEMIENŃ ODGROMOWYCH

M. Wołoszyk, M. Galewski, S. Wojtas

[Kliknij tutaj aby otworzyć plik w formacie WORD](#)

1. Rezystancja statyczna i udarowa

Uziemienia są istotnymi elementami bezpiecznego przesyłu, rozdziału i użytkowania energii elektrycznej, a także stanowią podstawę systemu ochrony odgromowej każdego obiektu.

Prawidłowo działające uziemienie zapewnia utrzymanie niskiej wartości spadku napięcia na jego impedancji (rezystancji) w trakcie odprowadzania prądów do ziemi, co sprowadza się do warunku małej impedancji (rezystancji) tego uziemienia. Uziemienia mogą odprowadzać prądy stałe, przemienne lub udarowe (pochodzące od wyładowań atmosferycznych). Ponieważ czasy zjawisk występujących przy przepływie prądów o częstotliwościach przemysłowych mierzone są w milisekundach zaś dla prądów udarowych w mikrosekundach należy więc stosować zróżnicowane metody pomiarowe do oceny jakości uziemień przeznaczonych do pracy w tak różnych warunkach. Właściwości uziemień podczas przepływu prądów przemiennych i stałych są nazywane właściwościami statycznymi, zaś podczas przepływu prądów udarowych - udarowymi. Impedancja (rezystancja) uziemienia przewodzącego prądy udarowe ma charakter nieliniowy. Jest ona funkcją natężenia oraz stromości narastania prądu, a także długości uziomu. Przy odprowadzaniu do gruntu prądu o dużym natężeniu występuje pewien spadek wartości rezystancji uziemienia w stosunku do rezystancji wyznaczonej przy niewielkich prądach pomiarowych stosowanych w miernikach. Jest to wywołane zmianą rezystywności gruntu tuż przy powierzchni uziomu na skutek występowania zjawisk wieloprądowych.

Duża stromość narastania prądów piorunowych powoduje wzrost wartości impedancji (rezystancji) udarowej w stosunku do rezystancji statycznej. Efekt ten występuje na skutek wzrostu znaczenia składowej indukcyjnej impedancji uziemienia (zależnej od długości uziomu), a także pojawienia się (dla uziomów długich) impedancji falowej.

1.1. Definicje

Według PN-86/E-05003/01 (p.1.3.16.) rezystancja uziemienia jest to:

“rezystancja statyczna między uziomem a ziemią odniesienia zmierzona przy przepływie prądu przemiennego o częstotliwości technicznej”.

Rezystancja statyczna rozumiana jest jako stosunek wartości skutecznych napięcia do prądu płynącego przez uziemienie i jest dopuszczana przez normę jako miara przydatności uziemienia dla obiektów objętych podstawową ochroną odgromową.

Wprowadzona w roku 2001 norma PN-IEC

61024-1 definiuje w p.1.2.15 zastępczą rezystancję uziemienia określaną jako:

“stosunek wartości szczytowych napięcia do prądu uziemienia, które na ogół nie występują jednocześnie. Umownie służy on za wskaźnik skuteczności uziemienia”.

Określenie powyższe jest zgodne z definicją rezystancji (impedancji) udarowej wyznaczanej przy wymuszeniu prądowymi udarami pomiarowymi (patrz rys.1 i wzór 2).

Norma PN-89/E-05003/03 definiuje w p.1.3.7 rezystancję udarową stanowiącą

kryterium przydatności uziemienia w obiektach podlegających ochronie obostrzonej i specjalnej opisaną jako:

“rezystancja między uziomem a ziemią odniesienia mierzona przy prądzie udarowym o kształcie odwzorowującym prąd pioruna”,

a także określa w p.1.3.2 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**”.

Z powyższych definicji wynikają istotne różnice w technice wykonywania pomiarów statycznych i udarowych.

W trakcie pomiarów statycznych należy wyznaczać

rezystancję uziemienia (pojedynczego uziomu lub układu połączonych uziomów). Aby zmierzyć tę rezystancję, wykrywając przy tym ewentualne wadliwe połączenie przewodu odprowadzającego z uziomem, należy rozłączyć na czas pomiaru zacisk probierczy. Można również zmierzyć rezystancję statyczną bez rozłączania zacisku, jeżeli zastosuje się do tego celu miernik wykorzystujący cęgowy pomiar prądu oraz wyznaczanie spadku napięcia w odniesieniu do sondy pomocniczej umieszczonej w strefie ustalonego potencjału.

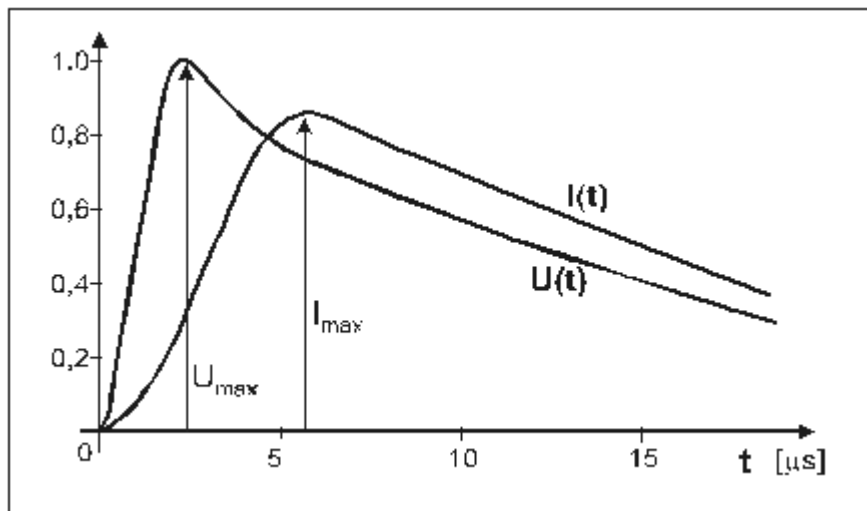
Pomiar rezystancji udarowej wykonuje się bez rozłączania zacisków probierczych ponieważ celem tego pomiaru jest (wg PN-89/E-05003/03) określenie rezystancji wypadkowej uziemienia, czyli tej, która bierze udział w odprowadzaniu z danego punktu prądu piorunowego do gruntu. Nieco inne zasady obowiązują jedynie dla obiektów zagrożonych wybuchem materiałów wybuchowych – zasady te omówione będą dokładniej w rozdz. 3.

2. Długość efektywna uziomu

Uziemienia odgromowe mają za zadanie odprowadzać do ziemi prądy udarowe o bardzo dużej stromości narastania przekraczającej nawet 100 kA/μs.

Zjawiska towarzyszące odprowadzaniu prądu piorunowego z uziomu do gruntu i jego rozprzeczowi w ziemi są zupełnie inne od tych, które zachodzą przy odprowadzaniu prądu o częstotliwości technicznej. Rozkład napięcia na powierzchni gruntu oraz impedancja uziemienia są więc również odmienne w warunkach udarowych niż w warunkach statycznych.

Sposób odprowadzania prądu piorunowego, a co za tym idzie jakość ochrony odgromowej, wyraźnie zależy od wymiarów geometrycznych stosowanych uziomów. O właściwościach uziomów skupionych decyduje tylko ich rezystancja. Dla uziomów o długości do kilkudziesięciu metrów istotne znaczenie odgrywa indukcyjność, natomiast w przypadku uziomów długich o ich właściwościach decydować będzie zarówno indukcyjność jak i impedancja falowa uziomu. Duża stromość narastania prądu sprawia, iż nawet dla niewielkich indukcyjności uziemienia pojawiają się znaczne indukcyjne spadki napięcia, wyprzedzające w czasie udar prądowy. Na rysunku 1 przedstawiono typowy przebieg prądu udarowego płynącego przez uziemienie oraz wywołany tym prądem spadek napięcia. W większości przypadków uziomy należy traktować jako uziomy długie, w których zachodzą zjawiska falowe. Napięcie i prąd przesuwają się wówczas wzdłuż uziomu jako fale o ograniczonej prędkości. Zjawisko to powoduje wyraźny wzrost impedancji uziemień długich w stosunku ich właściwości statycznych.



Rys.1. Typowy przykład udaru prądowego oraz wywołanego przezeń spadku napięcia na impedancji uziemienia

Rozważania na temat stałej czasowej linii modelującej uziom długiej prowadzą do wniosku, że efektywna długość uziomu, czyli jego część biorąca udział w odprowadzaniu prądu piorunowego, wynosi

$$l \leq \frac{\pi}{2} \sqrt{\frac{T_1}{GL'}}$$

gdzie: T_1

- czas trwania czoła udaru prądowego
- L' - indukcyjność własna uziomu (1-2 mH/m)
- G - konduktywność gruntu

Z przytoczonej zależności wynika, iż dla udaru prądowego o czasie czoła rzędu pojedynczych μ s użyteczna długość uziomu wynosi kilkadziesiąt metrów (od ok. 20 do 70m - w zależności od konduktywności gruntu). Dopuszczana przez normę PN-86/E-05003/01 (p.3.6.3, i zał.

3) długość obliczeniowa uziomu wynosi 35m dla gruntu o rezystywności $\rho \leq 500 \Omega\text{m}$ oraz 60m dla $\rho > 500 \Omega\text{m}$.

Z powyższych względów wynika, że rezystancja (impedancja) uziemienia przewodzącego prądy udarowe jest nie tylko funkcją stromości narastania prądu i jego natężenia, ale także długości uziomu. Spotykane czasem łączenie uziomu odgromowego z rozległym uziomem roboczym lub z siecią wodociągową umożliwia uzyskanie bardzo niskiej wartości rezystancji uziemienia mierzonej metodą niskoczęstotliwościową. Jednakże tak wyznaczona rezystancja może prowadzić do bardzo niebezpiecznego wniosku o przydatności uziemienia dla celów ochrony odgromowej. O małej wartości zmierzonej rezystancji statycznej decydują w tym przypadku przede wszystkim odległe części uziemienia nie biorące udziału w odprowadzaniu prądu piorunowego do gruntu.

Rzeczywista rezystancja udarowa takiego uziemienia może być wielokrotnie wyższa, a to prowadzi do zagrożeń chronionego obiektu podczas wyładowania atmosferycznego.

3. Parametry dopuszczalne uziemień odgromowych

Wartości

dopuszczalne rezystancji uziemień odgromowych dla różnego typu obiektów zestawiono w tablicy 1.

Na etapie projektowania wartość rezystancji uziemienia należy oszacować na drodze obliczeniowej wg. PN-86/E-05003/01 (p.3.6.3, oraz zał. 2 i 3). Podane w normie zależności uwzględniają rodzaj i wymiary uziemienia, a także narzucają dodatkowe wymogi wynikające z ograniczonej długości efektywnej uziomu. Dla obiektów zwykłych należy również spełnić wymogi PN-IEC 61024-1 (p.2.3.2 i 2.3.3) określające minimalną długość całkowitą układu uziomów. W trakcie eksploatacji zewnętrznego systemu ochrony odgromowej wykonuje się badania okresowe uziemień obejmujące również pomiar ich rezystancji oraz ciągłości połączeń. Dla ochrony podstawowej jako kryterium przydatności uziemienia dopuszczono wartość **rezystancji statycznej** lub spełnienie warunku minimalnej długości całkowitej układu uziomów oraz prawidłowej jakości połączeń. Pomiar rezystancji statycznej z jednoczesną kontrolą połączeń przeprowadza się przy rozłączonym zacisku probierczym lub za pomocą miernika z cęgowym pomiarem prądu. W przypadku obiektów podlegających ochronie obostrzonej podane w tablicy wartości dopuszczalne dotyczą **udarowej rezystancji wypadkowej uziemienia**, a więc mierzonej bez odłączania tego uziemienia od całego systemu (bez rozłączania zacisków probierczych). Dla obiektów podlegających ochronie specjalnej również podane są w normie wartości **rezystancji udarowej uziemienia**.

Nieco inne zasady dotyczą jedynie obostrzonej ochrony odgromowej obiektów zagrożonych wybuchem materiałów wybuchowych. W takich obiektach stosuje się dwa lub trzy połączone z sobą otoki. Kontrolując stan uziemienia należy w takim przypadku wyznaczać rezystancję udarową całego uziemienia, a następnie (po rozłączeniu połączeń między otokami) rezystancję udarową

każdego z otoków. Wartości dopuszczalne rezystancji udarowej dla całego systemu jak i pojedynczych otoków w tego typu obiektach podano również w tabl.1.

Tabl.1. Wartości dopuszczalne rezystancji uziemień odgromowych

Typ obiektów	Rodzaj uziomu	Grunty		
		Podmokły, bagienny, próchniczny, torfiasty, gliniasty	wszystkie rodzaje pośrednie	Kamien-ny, skalisty
OCHRONA PODSTAWOWA (OBIEKTÓW ZWYKŁYCH) (PN-IEC 61024-1)				
rezystancja statyczna uziemienia w [Ω]				
	10 Ω lub całkowita długość układu uziomów zależna od poziomu ochrony większa od wartości podanych w PN-IEC 61024-1			
OCHRONA OBOSTRZONA (PN-89/E-05003/03)				
udarowa rezystancja wypadkowa uziemienia w [Ω]				
zagrożone pożarem	uziomy poziome, pionowe, mieszane, stopy fundamentowe	10	20	40
	uziomy otokowe, ławy fundamentowe	15	30	50
zagrożone wybuchem mieszanin par i/lub pyłów z powietrzem	uziomy poziome, pionowe, mieszane, stopy fundamentowe	7		10
	uziomy otokowe, ławy fundamentowe	10		15
zagrożone wybuchem materiałów wybuch.	układ uziomów	5		10
	uziom otokowy pojedynczy	15		25
OCHRONA SPECJALNA (PN-92/E-05003/04) udarowa				
rezystancja uziemienia w [Ω]				

kominy	poziome, pionowe, mieszane	10	20	40
	otokowe, fundamentowe	15	30	50
linowe urządzenia transportowe	stacje	50		
	podpory	100		
ob. sportowe		10	20	40
dźwigi		20		50

*

- patrz komentarz w tekście rozdz. 3

Norma dopuszcza również określenie przydatności uziemień dla celów ochrony obostrzonej i specjalnej na podstawie pomiaru ich rezystancji statycznej jednakże pod następującymi warunkami:

dla ochrony obostrzonej należy odłączyć od mierzonego uziomu wszystkie połączone do niego masy metalowe (PN-89/E-05003/03 p.6.1.4.c)
dla ochrony specjalnej należy odłączyć uziomy położone dalej od rozpatrywanego zwodu niż 35m w gruncie o rezystywności $\rho \leq 500 \Omega \text{ m}$ i 60 m w gruncie o rezystywności $\rho > 500 \Omega \text{ m}$. (PN-92/ E-05003/04 p.4.1.3.2).

Wykonanie pomiarów statycznych zgodnie z powyższymi wymaganiami jest zazwyczaj bardzo trudne lub wręcz niemożliwe.

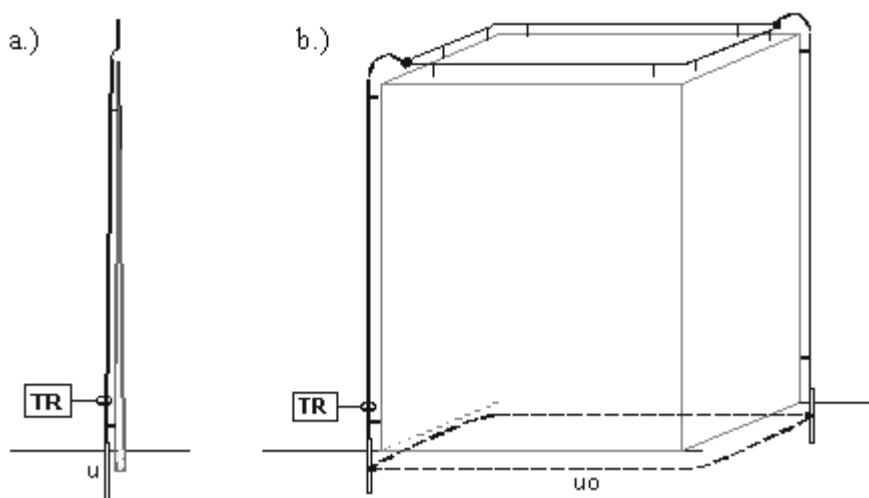
4. Pomiary uziemień odgromowych

4.1 Pomiary uziemień odgromowych metodami statycznymi

Kontrolując stan uziemień odgromowych metodami statycznymi należy mieć świadomość ograniczeń tych metod. Trzeba również zwrócić uwagę na niebezpieczeństwo stosowania niektórych mierników spotykanych na rynku.

Przykładem przyrządu pomiarowego, którego stosowanie może prowadzić do zupełnie mylnych wniosków, jest cęgowy tester pętli uziemienia traktowany często (mylnie) jako miernik rezystancji uziemienia. Jest on bardzo wygodny w użytkowaniu gdyż nie wymaga rozłączania na czas pomiaru zacisku probierczego oraz nie wykorzystuje sond pomiarowych wbijanych w grunt. Podstawową wadą takiego testera jest fakt, iż mierzy on sumę rezystancji uziemienia badanego i trudnej do oszacowania rezystancji pętli zamykającej obwód prądu pomiarowego. Należy podkreślić, że w niektórych przypadkach pomiar testerem pętli jest całkowicie błędny. Dotyczy to

zwłaszcza pomiaru uziemienia pojedynczego oraz uziemienia obiektów o zamkniętych pętlach przewodzących. Przykłady takich obiektów pokazano na rysunku 2.



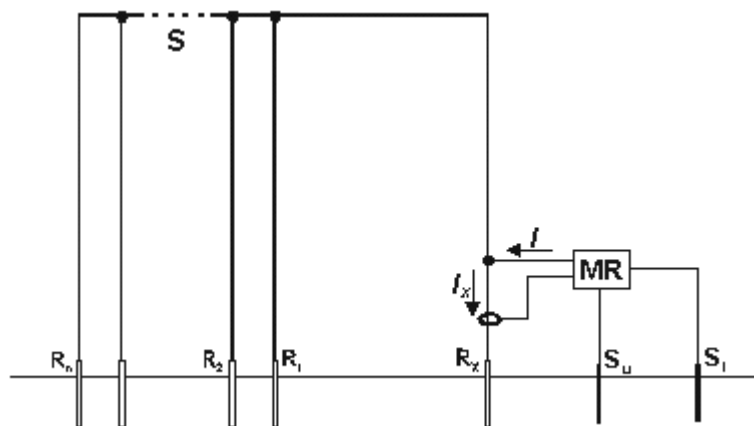
Rys.2. Przykłady błędnych pomiarów rezystancji uziemienia pojedynczego (a) oraz uziemienia obiektu o zamkniętej pętli przewodzącej (b), gdzie: TR - tester rezystancji pętli, u - uziom pojedynczy, uo - uziom otokowy.

Przy pomiarze uziemienia pojedynczego (masztu antenowego, komina, itp.) wynik pomiaru testerem będzie zawsze bardzo wysoki gdyż brak jest uziemienia zamykającego pętlę. Przykład takiego obiektu podano na rysunku 2a.

Typowymi obiektami o zamkniętych pętlach przewodzących są np. stalowe słupy linii elektroenergetycznych czy też budynki z uziomami otokowymi, do których zwód dołączony jest minimum dwoma przewodami odprowadzającymi. Sytuacja taka zobrazowana jest na rysunku 2b. W tego typu obiektach pomiar testerem nie ma nic wspólnego z uziemieniem, gdyż wyznacza on rezystancję pętli metalicznej składającej się np. ze zwodu poziomego umieszczonego na dachu budynku, dwóch przewodów odprowadzających i uziemiających oraz uziomu otokowego ułożonego w

gruncie. Wynik pomiaru będzie w tym przypadku zawsze bardzo niski, niezależnie od rzeczywistych parametrów uziemienia.

Rezystancję statyczną uziemienia wyznacza się zwykle przy użyciu mierników, z których większość realizuje różne odmiany metody technicznej. Aby zmierzyć tą metodą rezystancję uziemienia, należy rozłączyć na czas pomiaru zacisk probierczy i dołączyć wyjście prądowe miernika do przewodu uziemiającego odizolowanego od całej reszty zewnętrznej instalacji odgromowej. Sytuacja taka zobrazowana jest na rysunku 3. Wynik pomiaru ustalany jest na podstawie wyznaczanych w mierniku wartości prądu płynącego przez badany uziom do pomocniczej sondy prądowej oraz spadku napięcia w odniesieniu do sondy napięciowej umieszczonej w strefie ustalonego potencjału. W trakcie takiego pomiaru wyznaczana jest rezystancja statyczna uziomu, a jednocześnie podlega kontroli stan połączenia między przewodem uziemiającym i uziomem. W przypadku złego połączenia (lub np. przerwanego przewodu poniżej poziomu gruntu) wynik pomiaru będzie nadmiernie wysoki.

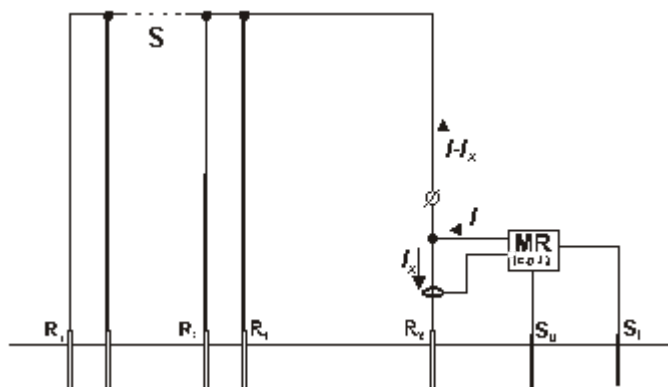


Rys.3. Pomiar rezystancji statycznej uziemienia metodą techniczną, gdzie: MR – miernik rezystancji statycznej, I_x – prąd płynący przez uziemienie badane, S_u - sonda pomocnicza napięciowa, S_l - sonda pomocnicza prądowa, R_x - uziemienie badane, S - system uziemień

Swoistą odmianę metody technicznej realizuje również miernik z cęgowym pomiarem prądu. W przypadku wykorzystywania takiego miernika nie rozłącza się zacisków probierczych, a prąd generowany w mierniku rozplywa się na w systemie połączonych uziemień na dwie części. Jedna z nich przepływa przez badany przewód uziemiający druga zaś przez całą resztę systemu

. Omawiany przypadek zilustrowany jest na rysunku 4.

Wynik pomiaru ustalany jest na podstawie wartości tylko tej części prądu, która przepływa przez badany przewód uziemiający. Spadek napięcia, tak jak uprzednio, wyznaczany jest w odniesieniu do sondy pomocniczej umieszczonej w strefie ustalonego potencjału. Wykorzystując taki miernik należy zwrócić uwagę aby cęgi prądowe były umieszczone na badanym przewodzie uziemiającym poniżej punktu przyłączenia wyjścia prądowego miernika, gdyż wynik pomiaru musi być ustalany na podstawie pomiaru prądu wpływającego przez dany przewód uziemiający do uziemienia. W przeciwnym przypadku zostanie wyznaczona rezystancja statyczna równolegle połączonych wszystkich uziemień w połączonym systemie za wyjątkiem uziemienia badanego.



Rys.4. Pomiar rezystancji statycznej uziemienia przyrządem z cęgowym

pomiarem prądu, gdzie: MR(c.p. I_x) - miernik, I - prąd generowany w mierniku, I_x - prąd płynący przez uziemienie badane, S_u - sonda pomocnicza napięciowa, S_l - sonda pomocnicza prądowa,

R_X - uziemienie badane, $R_{1...n}$ - pozostałe uziemienia w systemie, S - system uziemień

4.2. Metoda pomiaru udarowego

Impedancja (rezystancja) udarowa uziemienia wyznaczana jest w warunkach zbliżonych do tych jakie panują podczas odprowadzania prądu piorunowego do ziemi. Określa się ją przy impulsie prądowym o czasie czoła narastania równym 4 μ s (lub 1 μ s) zgodnym z normą PN-92/E-04060. Impedancję udarową określa zależność

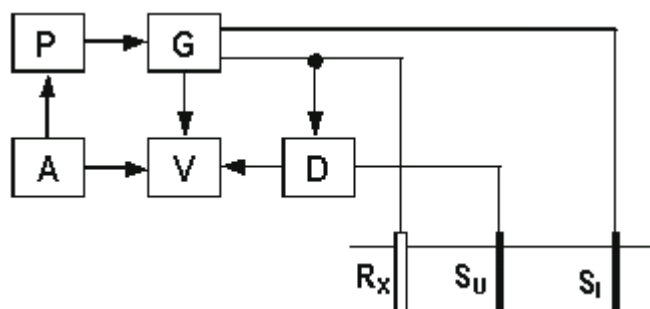
$$Z_m = \frac{U_{max}}{I_{max}}$$

gdzie:

I_{max} - wartość maksymalna impulsu prądowego

U_{max} - wartość maksymalna spadku napięcia na uziemieniu

W oparciu o tę definicję pracuje udarowy miernik uziemień WG 307, którego schemat blokowy przedstawiono na rysunku 5.



Rys 5. Schemat blokowy udarowego miernika uziemień WG-307, gdzie: P - przetwornica, G - generator impulsów prądowych, A - układ automatyki, V - woltomierz wartości szczytowych, D - dzielnik napięcia, R_X - uziemienie badane, S_I S_U - sondy pomocnicze prądowa i napięciowa

Po uruchomieniu miernika, przetwornica P zasila napięciem ok. 1 kV generator uderów G, który emituje paczkę uderów prądowych o amplitudzie ok. 1

A i mocy dochodzącej do 1 kW (w impulsie). Woltomierz stosunkowy wartości szczytowych V porównuje sygnał z sondy napięciowej przekształcony w dzielniku D z sygnałami wzorcowymi z generatora uderów i wyświetla uśredniony wynik pomiaru. Blok automatyki A steruje pracą miernika.

Dla poprawy bezpieczeństwa obsługi i podniesienia dokładności wskazań w pierwszym etapie pomiaru wykonywany jest test ciągłości obwodu sondy napięciowej a następnie prądowej przy napięciu obniżonym do ok. 10 % napięcia roboczego.

Mierniki udarowe wykorzystuje konfigurację sondy prądowej i napięciowej podobną do występującej w miernikach niskoczęstotliwościowych o długościach przewodów pomiarowych odpowiednio 40 i 30 m. Aby uniknąć sprzężeń między przewodami pomiarowymi przewody łączące miernik z sondami pomocniczymi powinny być rozstawione pod kątem nie mniejszym niż

60° (optymalnie 90...180°).

Jak już wcześniej wspomniano, pomiary impedancji (rezystancji) udarowej uziemienia wykonuje się bez rozłączania zacisków probierczych. Wynik pomiaru odzwierciedla dzięki temu wartość wypadkową impedancji udarowej w miejscu pomiaru. Należy jednak pamiętać, że dla tego samego uziemienia (np. dla dużego otoku) wartość zmierzona może być różna w różnych miejscach wobec czego trzeba dokonywać pomiarów na każdym przewodzie uziemiającym.

Udarowy miernik uziemień produkowany jest w dwóch wersjach:

WG-307 W – o czasie narastania czoła impulsu 4 μ s – przeznaczony jest do kontroli uziemień odgromowych budynków, zbiorników i innych obiektów kubaturowych;
WG-307 S – o czasie narastania czoła impulsu 1 μ s – jest wersją specjalizowaną przeznaczoną do kontroli uziemień słupów elektroenergetycznych linii przesyłowych;

Mierniki WG-307 posiadają zatwierdzenie typu wydane przez Prezesa GUM oraz potwierdzenie właściwości wydane przez Instytut Energetyki w Warszawie.

4.3. Wpływ konstrukcji uziomu na jego współczynnik udaru

Miernik udarowy wyznacza impedancję (rezystancję) odnoszącą się tylko do strefy efektywnej uziemienia wobec czego uzyskane wartości są zazwyczaj wyższe od otrzymanych przy częstotliwości przemysłowej. Różnica tych wartości zależy od konstrukcji i rozległości uziemienia. W warunkach rzeczywistych prąd piorunowy odprowadzany jest ze zwodu przede wszystkim przez przewód odprowadzający znajdujący się najbliżej miejsca uderzenia pioruna. Jednakże część prądu piorunowego odpływa

również do uziomów przez sąsiednie przewody odprowadzające, przy czym im dalej od miejsca wyładowania znajduje się dany przewód, tym mniejszą część prądu odprowadza. Zazwyczaj część prądu piorunowego odprowadzana jest do gruntu także poprzez fundament obiektu, na konstrukcji którego zamontowana jest instalacja odgromowa.

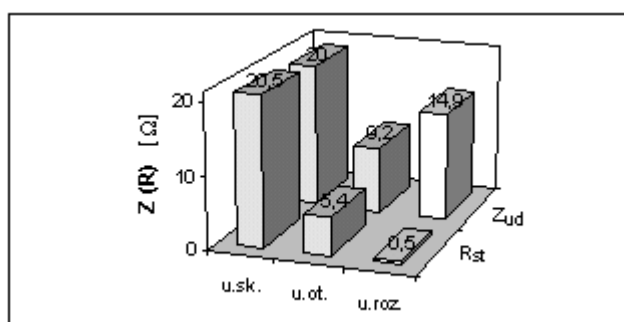
Powyższe zagadnienie uwzględniane jest również w pomiarach udarowych, gdyż zgodnie z normą, pomiary takie wykonuje się bez rozłączania zacisków probierczych. Dokonując pomiaru w danym punkcie wyznacza się wynik pomniejszony, w stosunku do wyniku jaki uzyskano by przy rozwartym zacisku probierczym, o wpływ równolegle połączonych sąsiednich przewodów odprowadzających. Wyraźny udział składowej indukcyjnej w impedancji udarowej powoduje, iż wpływ równoległych przewodów odprowadzających jest tym mniejszy im większa jest odległość danego przewodu od miejsca wykonywania pomiaru. Odległość, o której mowa, należy liczyć wzdłuż przewodów odprowadzających oraz zwodów, a więc np. dla budynku będzie ona równa sumie podwójnej wysokości tego budynku oraz odległości od sąsiedniego przewodu uziemiającego na poziomie gruntu. Wynika z tego, iż wpływ sąsiednich przewodów odprowadzających na pomniejszenie wypadkowej rezystancji udarowej uziemienia jest tym większy im niższy jest obiekt kontrolowany. Wpływ odległych części instalacji odgromowej na wynik pomiaru jest zupełnie pomijalny. Dalsze pomniejszenie wyniku następuje na skutek wpływu fundamentu obiektu, przez który odpływa część prądu udarowego. Wpływ ten nie jest uwzględniany w trakcie pomiarów przy użyciu niskiego napięcia wykorzystywanego przy pomiarach rezystancji statycznej uziemienia. Stosunek wartości rezystancji uziemienia mierzonej metodą udarową do rezystancji uziomu przy napięciu wolnozmiennym jest zwykle oznaczany jako

współczynnik udarowy k_u i zależy od indukcyjności badanego obwodu oraz od zjawiska wieloprądowego wzdłuż przejścia z uziomu do gruntu. Uziomy pod względem wielkości współczynnika k_u można podzielić na trzy zasadnicze grupy:

uziomy skupione, dla których współczynnik udaru wynosi zazwyczaj $k_u = 0,95 - 1,2$
uziomy otokowe - dla typowych otoków $k_u = 1,3 - 2,0$
rozbudowane systemy uziomów i rozległe uziomy kratowe gdzie współczynnik udaru wynosi od kilku nawet do kilkudziesięciu

Wartość współczynnika udarowego dla danego uziomu nie jest stała i waha się wraz ze zmianami wartości rezystancji statycznej oraz składowej rezystancyjnej impedancji udarowej, występującymi np. na skutek zmian wilgotności gruntu. Ponieważ wartość składowej indukcyjnej jest praktycznie stała, wobec tego wahania współczynnika udaru będą tym większe im mniejszy będzie udział indukcyjności w impedancji udarowej uziemienia.

Przykładowe wyniki pomiarów rezystancji statycznej i impedancji udarowej typowych obiektów pokazano na rysunku 6, z którego widać jak mylne mogą być wnioski dotyczące skuteczności ochrony odgromowej wyciągnięte na podstawie pomiarów rezystancji statycznej. Dla uziemienia bardzo rozbudowanego wartość rezystancji zmierzonej metodą statyczną jest prawie trzydziestokrotnie zaniżona w stosunku do tej, która będzie decydowała o odprowadzaniu w badanym miejscu prądu piorunowego do ziemi.



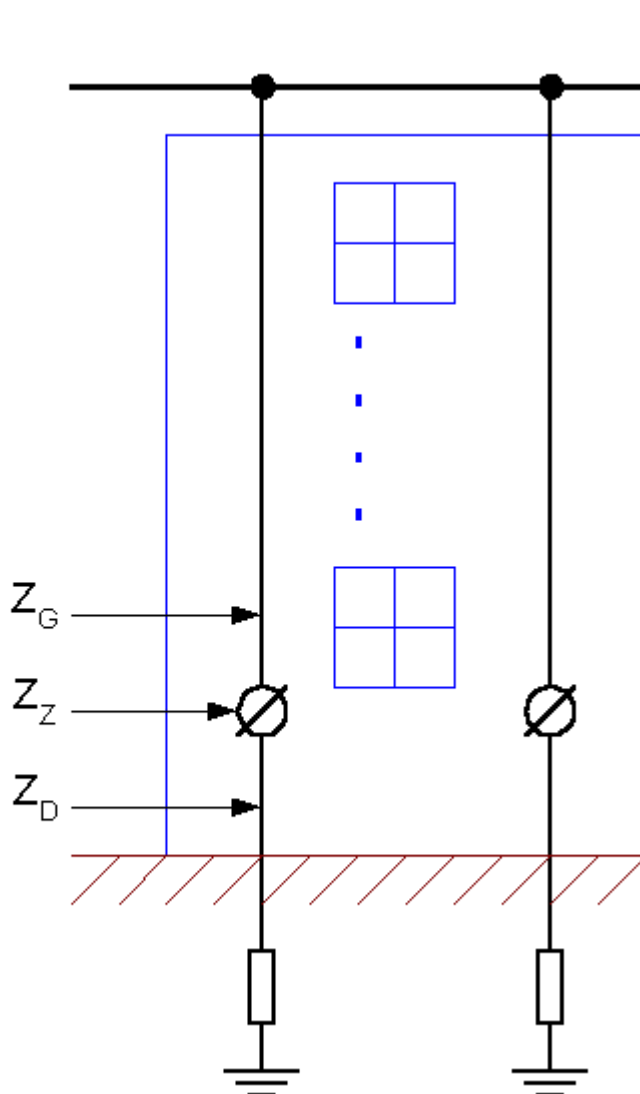
Rys.6. Przykładowe wartości rezystancji statycznej R

R_{st} oraz impedancji udarowej Z_{ud} zmierzone dla typowych obiektów reprezentujących: uziemienia skupione (u.sk.), średniej wielkości otoki (u.ot.) oraz uziemienia rozbudowane (u.roz.)

Podobna sytuacja może wystąpić w przypadku gdy wykonawca chcąc uzyskać bardzo niską wartość rezystancji uziemienia wykorzysta do tego celu np. sieć wodociągową. Wartość rezystancji mierzona w warunkach statycznych spada wówczas zwykle do poziomu pojedynczych omów. Ochrona w warunkach udarowych może okazać się w tym przypadku nieskuteczna, gdyż o niskiej wartości rezystancji statycznej decydują przede wszystkim odległe części uziemienia, nie biorące udziału w odprowadzaniu prądu piorunowego do gruntu.

4.4. Pomiary uziemień odgromowych obiektów kubaturowych (budynków, zbiorników, itp.)

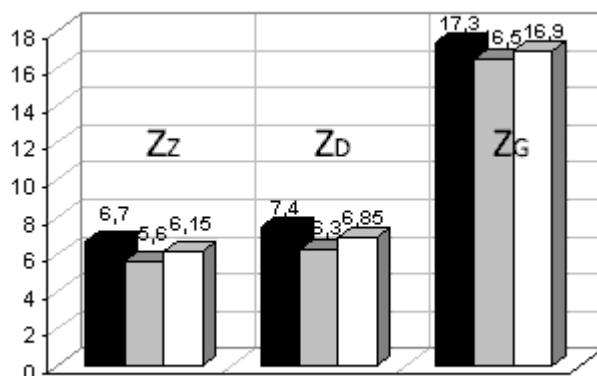
Metoda udarowa pomiaru rezystancji uziemień jest zalecana w obiektach podlegających ochronie obostrzonej. W takich przypadkach ze względów bezpieczeństwa przewody odprowadzające są często łączone z przewodami uziemiającymi poprzez spawanie, które uniemożliwiają ich rozłączanie podczas pomiarów. Przydatność udarowego miernika uziemień do oceny takich systemów ochrony pokazano na przykładzie wyników uzyskanych dla 1-klatkowego budynku mieszkalnego o 8 kondygnacjach zaopatrzonego w 6 przewodów odprowadzających z rozłączalnymi zaciskami probierczymi. Uproszczony schemat instalacji odgromowej budynku pokazano na rysunku 7 zaś uzyskane wyniki pomiarów zobrazowano na rysunku 8.



Rys.7. Instalacja odgromowa budynku mieszkalnego(1 klatka, 8 kondygnacji, 6 przewodów odprowadzających)

Pomiary rezystancji udarowej uziemienia wykonano przy:

Z_Z – zwartym zacisku probierczym;
Z_D – mierniku dołączonym do przewodu uziemiającego poniżej rozwartego zacisku probierczego;



Rys. 8. Wartości maksymalne, minimalne oraz średnie rezystancji udarowej systemu ochrony odgromowej budynku mieszkalnego uzyskane dla poszczególnych przewodów uziemiających przy: zwartym zacisku probierczym (Z_z), rozwartym zacisku probierczym i mierniku dołączonym poniżej zacisku (Z_D) oraz powyżej zacisku (Z_G)

Z rysunku 8 wynika, iż przy zwartym zacisku probierczym (Z_z) otrzymuje się wartości obniżone o ok. 10 % w stosunku do zacisku rozwartego (Z_D). Przy obiektach niższych różnice te będą nieco większe ze względu na mniejszą indukcyjność przewodów odprowadzających i zwodów bocznikujących mierzonego uziomu. Wyniki oznaczone jako Z_G odpowiadają sytuacji, w której mierzony przewód uziemiający jest przerwany poniżej powierzchni gruntu.

Analiza pomiarów wykonanych na wszystkich przewodach uziemiających obiektu bez rozłączania zacisków probierczych pozwoli na szybkie wykrycie przewodu nie mającego galwanicznego połączenia z otokiem uziemienia, ponieważ uzyskany w tym przypadku wynik będzie znacznie przewyższał (w przypadku analizowanego budynku ponad 2,5-krotnie) poziom wyników uzyskanych dla pozostałych przewodów uziemiających.

4.5. Pomiary uziemień słupów linii elektroenergetycznych

W energetyce

zawodowej wykorzystywana jest wersja miernika udarowego o czasie czoła udaru 1 μ s, która dając nieco wyższe wartości jest mało wrażliwa na wpływ bocznikujących połączeń uziomów sąsiednich. Ta wersja miernika jest szczególnie przydatna do badań uziemień słupów linii elektroenergetycznych bez ich odłączania od konstrukcji słupa, a więc również bez konieczności wyłączania linii z ruchu na czas badań.

Podczas pomiarów uziemienie badane o impedancji (rezystancji) Z_x jest bocznikowane impedancjami falowymi Z_f przewodów odgromowych biegnących do obu sąsiednich słupów, a więc wartość mierzona Z_m wynosi $Z_m = (Z_x \times 0,5 Z_f) / (Z_x + 0,5 Z_f)$

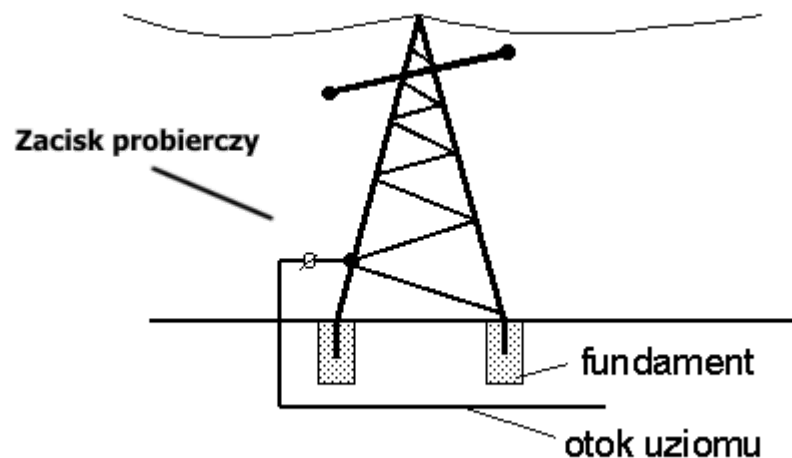
gdzie $0,5 Z_f$

oznacza równoległe połączenie dwóch przewodów odgromowych

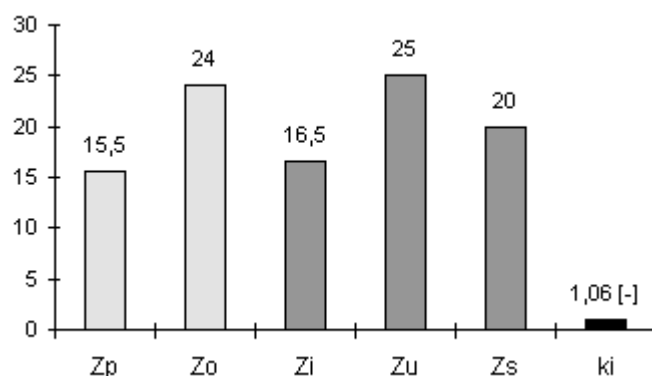
Wyznaczana w taki sposób impedancja uderowa uziemienia słupa uwzględnia boczniujący wpływ słupów sąsiednich w podobnym stopniu w

jakim biorą one udział w odprowadzaniu do gruntu prądu piorunowego, którego główna część odpływa przez uziemienie badane.

Dodatkową zaletą tego typu pomiarów jest wyznaczanie rezystancji uderowej rzeczywistego obiektu odprowadzającego prąd piorunowy do gruntu, a więc połączonego układu uziomu oraz fundamentu słupa. Przy rozwartym zacisku probierczym, czyli przewodach uziemiających odpiętych od konstrukcji słupa, mierzona jest rezystancja samego uziomu, bez fundamentu, a więc tylko część rzeczywistego układu odprowadzającego prąd piorunowy do gruntu. Schemat połączeń konstrukcji kratowej słupa i jego fundamentów z otokiem uziomu poprzez zacisk probierczy przedstawiono na rysunku 9. Przykładowe wyniki pomiarów przeprowadzone po odizolowaniu przewodów odgromowych od konstrukcji na wierzchołku słupa przedstawiono na rysunku 10, na którym Z_p oznacza rezystancję uderową w stanie gotowym do pracy linii (przewody uziemiające i odgromowe przyłączone do konstrukcji słupa), Z_o - rezystancję uziemienia po odłączeniu przewodów uziemiających od słupa, Z_i - rezystancję uziemienia z przewodami uziemiającymi połączonymi ze słupem, lecz z odizolowanymi przewodami odgromowymi, Z_u oraz Z_s - rezystancje odpowiednio uziomu i fundamentów słupa przy odizolowanych przewodach odgromowych i odłączonych przewodach uziemiających. Stosunek rezystancji Z_i do Z_p , obrazujący rzeczywisty wpływ na pomiar sąsiednich słupów wynosi $k_i = 1,06$.



Rys. 9. Schemat połączeń konstrukcji kratowej słupa i jego fundamentów z otokiem uziomu poprzez zacisk probierczy.



Rys. 10. Wartości impedancji udarowej uziemienia słupa zmierzone przy: a) przewodach odgromowych połączonych z konstrukcją słupa, Z_p - zwarty zacisk probierczy, Z_o - rozarty zacisk probierczy; b) przewodach odgromowych odizolowanych od konstrukcji słupa, Z_i - słup wraz z uziomem, Z_u - uziom, Z_s - słup z fundamentami bez uziomu

W prezentowanym przykładzie impedancja Z_o ma wartość większą od Z_p o ponad 50% co jest pozornie sprzeczne z przytoczonym wzorem 3. W rzeczywistości wyniki pomiarów Z_p

i Z_o nie mogą być porównywane, gdyż jak widać z rysunku 9 dotyczą one zupełnie różnych obiektów. Tak duża różnica uzyskanych wartości obu impedancji wynika przede wszystkim z uwzględnienia wpływu fundamentu w odprowadzaniu prądu piorunowego do gruntu. Wpływ sąsiednich słupów może być analizowany poprzez porównanie Z_i oraz Z_p . W omawianym przykładzie wpływ ten jest na poziomie zaledwie 6%.

Praktyka pomiarów uziemień słupów z przewodami odgromowymi wskazuje, że jako miarodajny przyjmuje się najczęściej wynik uzyskany metodą statyczną po odpięciu przewodów uziemiających od konstrukcji słupa, czyli rozwarciu zacisków probierczych. Sposób taki eliminuje z badań fundamenty słupa, które odgrywają znaczną rolę w odprowadzaniu prądu piorunowego do ziemi. W rezultacie badania odbywają się w zupełnie innej konfiguracji obwodu, niż obwód, w którym płyną prądy podczas wyładowania atmosferycznego. Rezystancja udarowa fundamentu słupa może mieć wartość porównywalną z rezystancją uziomu sztucznego i w badaniach skuteczności uziemienia nie można pomijać drogi prądu do ziemi poprzez zbrojone stopy fundamentowe. Do badania uziemienia słupów wykorzystywane są również niekiedy mierniki statyczne z cęgowym pomiarem prądu. W takim przypadku wykonuje się (bez rozłączania zacisków probierczych) pomiary częściowe na każdej z nóg słupa, a wynik zostaje wyznaczony na drodze obliczeniowej. Niezwykle istotne jest w tym przypadku, aby nie zmieniać miejsca przyłączenia wyjścia prądowego miernika do konstrukcji słupa przy wszystkich pomiarach częściowych. Nie dotrzymanie tego warunku powoduje, iż obliczony wynik pomiaru jest błędny.

4.6. Pomiary rezystancji udarowej uziemienia rozległego

Uziemienia łączone są często w większe systemy. W skrajnym przypadku może to być uziemienie rozległe wykonane na przykład jako kratownica z bednarki ułożonej w gruncie na obszarze obejmującym duży zakład przemysłowy lub stację transformatorową. Do takiej kratownicy dołącza się zarówno uziemienia ochronne i robocze (pracujące przy częstotliwości technicznej) jak również przewody

odprowadzające zewnętrznej instalacji odgromowej. Uziemienie rozległe musi więc również bezpiecznie odprowadzić do gruntu prądy udarowe pochodzące od wyładowań atmosferycznych. W uziemieniu rozległym może dochodzić do sytuacji, w której spełnia ono swoje zadania jako uziemienie ochronne dla częstotliwości przemysłowej, natomiast skuteczność ochrony odgromowej w wybranym jego punkcie jest wątpliwa. Stosowana czasami praktyka kontroli uziemienia w danym punkcie, polegająca na pomiarze rezystancji statycznej względem sondy napięciowej wbitej w grunt wewnątrz obszaru objętego uziemieniem rozległym, jest całkowicie błędna. Pomiar impedancji udarowej uziemienia pozwala w takich warunkach na znacznie lepszą ocenę skuteczności uziemienia rozległego w wybranym jego punkcie dla celów ochrony odgromowej. W przypadku tego typu uziemień wartość rezystancji udarowej stanowi informację w jakim stopniu uziom rozległy odprowadza z tego punktu prąd piorunowy do ziemi.

5. Metody zmniejszania wypadkowej rezystancji uziemienia

W trakcie użytkowania uziemienia niejednokrotnie dochodzi z czasem do pogorszenia jego parametrów. Jeżeli w trakcie badań okresowych zostanie stwierdzone przekroczenie dopuszczanej przez normę wartości rezystancji uziemienia, to wówczas należy podjąć działania zmierzające do zmniejszenia wartości tej rezystancji.

Często najłatwiejszym dla wykonawców sposobem osiągnięcia tego celu jest połączenia badanego uziomu z innym uziomem położonym niejednokrotnie dosyć daleko od miejsca, w którym stwierdzono nadmierną wartość rezystancji (np. stosowanie tzw. "przeciwwagi" w liniach elektroenergetycznych). Takie postępowanie jest z punktu widzenia ochrony odgromowej działaniem pozornym. Co prawda rezystancja statyczna połączonego układu uziomów wyraźnie spada, jednakże

dalekie części uziemienia w sposób znikomy wpływają na rezystancję udarową decydującą o własnościach ochronnych uziemienia w warunkach piorunowych.

W celu radykalnego polepszenia sytuacji należy rozbudować uziemienie i to w pobliżu miejsca, w którym stwierdzono nadmierną wartość rezystancji udarowej. Rozbudowa uziomów poziomych może się okazać kłopotliwa i kosztowna, szczególnie jeśli grunt charakteryzuje się dużą rezystywnością. W takim przypadku znacznie lepsze efekty można zazwyczaj uzyskać umieszczając w ziemi dodatkowy uziom pionowy sięgający głębszych warstw gruntu o niższej rezystywności. Jeżeli grunt ma charakter kamienisty w głębszych warstwach również stosowanie szpilek o znacznej długości często bywa bardzo kłopotliwe. W takim przypadku pożądany efekt można uzyskać stosując żel zmniejszający rezystancję uziemienia. W celu zastosowania takiego rozwiązania należy odkopać część uziomu znajdującą się w pobliżu miejsca, w którym stwierdzono nadmierną wartość rezystancji. Następnie po wymieszaniu dwóch płynnych składników żelu polewa się nim odkryte fragmenty uziomu i zasypuje wykop. Po zastygnięciu, przewodzący żel powoduje pozorne zwiększenie powierzchni styku uziomu z gruntem co skutkuje zmniejszeniem rezystancji wypadkowej uziemienia. Omawiany żel, nierozpuszczalny w wodzie, można stosować dla wszystkich rodzajów gruntu zarówno w trakcie budowy nowych instalacji odgromowych, jak i w celu poprawy własności uziemień eksploatowanych od dłuższego czasu. Metodę poprawy stanu uziemienia należy dostosować do istniejących warunków oraz posiadanych możliwości, jednakże w każdym przypadku trzeba bezwzględnie zadbać o to aby uziemienie odgromowe spełniało stawiane przez normy wymagania, gdyż decyduje to o bezpieczeństwie ludzi oraz o ochronie majątku często znacznej wartości.

LITERATURA

- Polska Norma PN-IEC 061024-1: *Ochrona odgromowa obiektów budowlanych. Zasady ogólne*.
Polska Norma PN/E-05003: *Ochrona odgromowa obiektów budowlanych*. (ark.01, 03 i 04).
Wołkowiński K.: *Uziemienia urządzeń elektroenergetycznych*, WNT, Warszawa, 1982.
Szpor S., Samuła J.:
Ochrona odgromowa, WNT, Warszawa, 1983.
Kosztaluk R. i inni: *Technika badań wysokonapięciowych*, WNT, Warszawa, 1985.
Jabłoński W.: *Zapobieganie porażeniom elektrycznym w urządzeniach elektroenergetycznych wysokiego napięcia*, WNT, Warszawa, 1992.
Galewski M., Wojtas S., Wołoszyk M.:
Impulse earthing measurement, IMEKO XIV International Congress, Tampere (Finlandia), 1997.
Markiewicz H.: *Bezpieczeństwo w elektroenergetyce*, WNT, Warszawa, 1999.
Wojtas S., Wołoszyk M
., Galewski M.: *Badania udarowe uziemień odgromowych*, Elektroinstalator, nr 10(60), 1999.
Wojtas S., Wołoszyk M., Galewski M.: *Właściwości udarowe uziemień odgromowych w praktyce pomiarowej*, III Krajowa Konferencja Naukowo-Techniczna "Urządzenia piorunochronne w projektowaniu i budowie", Kraków, 26-27.10.2000.
Wołoszyk M.: *Wyznaczanie impedancji uziemienia w obecności zakłóceń metodą podharmonicznych*, Krajowy Kongres Metrologii KKM'2001, Warszawa, 24-27.06.2001.
Wołoszyk M., Galewski M., Wojtas S.:
Pomiary impedancji udarowej uziemień odgromowych, Elektrosystemy, nr 9(20), 2001.
LEM Electrical Grounding Techniques, Unilap GEO X; Materiały firmowe LEM Instruments Inc.

Zaprezentowany materiał przekazany został do Centralnego Ośrodka Szkolenia i Wydawnictw SEP w celu wykorzystania go w publikacji pt. "Prace kontrolno-pomiarowe przy urządzeniach elektroenergetycznych o napięciu znamionowym do 1 kV".