

Marek WOŁOSZYK, Stanisław WOJTAS
POLITECHNIKA GDAŃSKA, WYDZIAŁ ELEKTROTECHNIKI I AUTOMATYKI

Wyznaczanie właściwości uziemień metodami statycznymi, wysokoczęstotliwościowymi i udarowymi

Dr inż. Marek WOŁOSZYK

Uzyskał dyplom magistra inżyniera na Wydz. Elektrycznym Politechniki Gdańskiej w 1978r. w zakresie przetwarzania i użytkowania energii elektrycznej. Stopień doktora nauk technicznych uzyskał na tym samym wydziale w 1988r. Obecnie pracuje w Katedrze Metrologii i Systemów Informatycznych Wydz. Elektrotechniki i Automatyki Politechniki Gdańskiej. Główny kierunek działalności naukowej związany jest ze statycznymi i udarowymi metodami pomiarów uziemień.

e-mail: mawo@ely.pg.gda.pl



Dr inż. Stanisław WOJTAS

Studia ukończył 1970 roku na Wydz. Elektrycznym Politechniki Gdańskiej uzyskując dyplom magistra inżyniera w specjalności aparaty elektryczne. Stopień naukowy doktora nauk technicznych uzyskał na tym samym wydziale w 1983 roku. Obecnie pracuje w Katedrze Wysokich Napięć i Aparatów Elektrycznych na Wydziale Elektrotechniki i Automatyki PG. W działalności naukowej zajmuje się diagnostyką wysokonapięciowych układów izolacyjnych oraz ochroną odgromową.

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



Streszczenie

Podstawowym parametrem charakteryzującym skuteczność działania uziemienia jest jego rezystancja, a niekiedy rezystancja udarowa lub impedancja. Parametry te stosowane są często zamiennie chociaż wyznacza się je różnymi metodami i często mają one różne wartości liczbowe dla tego samego uziemienia. W artykule przedstawiono różne metody pomiaru tych parametrów oraz zaprezentowano wyniki badań porównawczych wykonanych przy użyciu metody statycznej, wysokoczęstotliwościowej oraz udarowej. Omówiono obszary zastosowań oraz ograniczenia omawianych metod, a także typowe błędy związane z interpretacją wyników i błędy w dobrze metody.

Słowa kluczowe: uziemienie, rezystancja, metoda udarowa, metoda wysokoczęstotliwościowa.

Determination of earthing properties using static, high frequency and impulse methods

Abstract

The basic parameter for evaluating the earthing is usually its resistance. Sometimes the earthing properties are described by means of its impulse resistance or impedance. These parameters are determined by different methods and they often have different numerical values for the same earthing. The paper presents different methods for measuring the earthing parameters mentioned above and the results of comparative investigations obtained from the static, high frequency and impulse procedures. The application areas and limitations of all the described measurement methods as well as typical mistakes are described. The main reasons for the mistakes are usually wrong interpretations of the obtained results and wrong choice of the measurement method.

Keywords: earthing, resistance, impulse method, high frequency method.

1. Wstęp

Podstawowym parametrem charakteryzującym skuteczność działania uziemienia jest jego rezystancja, a niekiedy rezystancja udarowa lub impedancja. Parametry te stosowane są często zamiennie chociaż wyznacza się je różnymi metodami i często mają one różne wartości liczbowe dla tego samego uziemienia.

Właściwości uziemień ochronnych i roboczych pracujących przy częstotliwościach bliskich częstotliwości sieci w pełni określa rezystancja statyczna. Dla uziemień stosowanych w telekomunikacji i w stacjach radarowych należy niekiedy wyznaczać impedancję przy częstotliwości zmieniającej się w szerokim zakresie. Uziemienia odgromowe charakteryzuje natomiast rezystancja wyznaczana przy wymuszeniu udarowym.

Dla zapewnienia bezpieczeństwa obsługi i sprzętu należy kontrolować okresowo wartość rezystancji lub impedancji uziemienia metodami adekwatnymi do rodzaju chronionego obiektu, wykorzystując do tego celu narzędzia zapewniające uzyskanie wiarygodnych wyników [1-4].

2. Metody pomiarowe

Rezystancję lub impedancję uziemienia można mierzyć różnymi metodami. Rezystancję statyczną wyznacza się zazwyczaj z wykorzystaniem metody technicznej lub kompensacyjnej. Rzadziej stosowana jest metoda dwucegowa, a bardzo rzadko – rezonansowa. Miernik wysokoczęstotliwościowy pozwala na wyznaczenie zarówno rezystancji statycznej jak i impedancji uziemienia dla wyższych częstotliwości. Metoda udarowa przeznaczona jest natomiast do wyznaczania rezystancji udarowej charakteryzującej stan uziemień odgromowych. Poniżej przedstawiono główne cechy wspomnianych metod pomiarowych.

Większość produkowanych obecnie mierników rezystancji statycznej uziemienia realizuje różne odmiany metody technicznej, w której mierzony jest prąd I_g (o częstotliwości wybranej z zakresu 95 ... 128 Hz) wpływający do uziemienia oraz spadek napięcia U_x na jego rezystancji w odniesieniu do strefy ustalonego potencjału. Rezystancja R_x wyznaczana jest zgodnie z prawem Ohma:

$$R_x = \frac{U_x}{I_g} \quad (1)$$

W Polsce najbardziej rozpowszechnionym przyrządem tego typu jest prawdopodobnie miernik MRU-101 firmy Sonel.

Podstawową wadą klasycznej metody technicznej jest jej duża pracochłonność gdyż na czas wykonania pomiaru należy rozkręcać zaciski kontrolne uziemienia. Pewne ograniczenia uwidaczniają się również w przypadku kontroli uziemień obiektów, w których oprócz uziomu metalicznego część prądu odprowadzana jest do gruntu poprzez fundament. Rozkręcając zacisk kontrolny eliminuje się wpływ fundamentu na wynik pomiaru.

Swoistą odmianę metody technicznej realizuje miernik z cęgowym pomiarem prądu. W przypadku takiego pomiaru nie rozłącza się zacisków kontrolnych, a prąd generowany w mierniku dołączonym do przewodu odprowadzającego uziemienia rozplywa się w systemie połączonych uziemień na dwie części. Jedna z nich przepływa przez badany przewód uziemiający druga zaś przez całą resztę systemu. Wynik pomiaru ustalany jest na podstawie wartości tylko tej części prądu, która przepływa przez badany przewód uziemiający.

W przypadku pomiarów cęgowych rezystancji uziemienia pracującego w dużym systemie uziemień może dojść do wyraźnego wzrostu błędów pomiarowych, gdyż prąd płynący przez badane uziemienie do gruntu będzie w tym przypadku wielokrotnie mniejszy od prądu generowanego w mierniku i może nawet osiągać wartości pojedynczych miliamperów [5].

Metoda dwucegowa nie wymaga rozłączania zacisków kontrolnych uziemienia ani stosowania sond pomocniczych umieszczanych w gruncie. Nieumiejętne wykorzystanie tej metody może jednak powodować poważne błędy interpretacyjne. Jest ona wykorzystywana w testerach pętli uziemienia traktowanych często

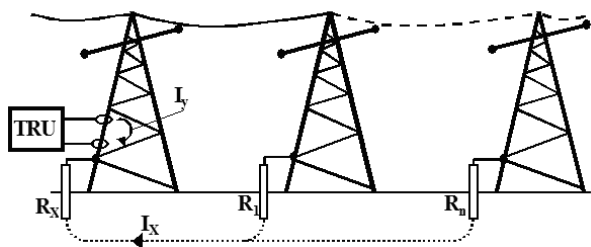
(mylnie) jako mierniki rezystancji uziemienia. Przykładem takiego testera jest przyrząd firmy Kyoritsu – KEW4200.

Tester wyposażony jest w dwa izolowane od siebie magnetycznie przetworniki cęgowe (umieszczone we wspólnym mechanizmie). Pierwszy z nich służy jako nadawczy i powoduje zaindukowanie w obwodzie siły elektromotorycznej o częstotliwości ok. 2,5 kHz. Pod wpływem tej siły przez uziemienie badane płynie prąd wyznaczany drugim przetwornikiem. Wartość tego prądu zależy od sumy rezystancji badanej i rezystancji zastępczej reszty systemu uziemień zamykającej obwód prądu.

Jeżeli rezystancja wypadkowa systemu jest znacznie mniejsza od rezystancji uziemienia badanego to wówczas wynik wyznaczony zgodnie z prawem Ohma jest bliski rzeczywistości.

Im większa jest rezystancja zastępcza systemu w stosunku do rezystancji badanej tym większym błędem obarczony jest wynik. Jest to jednakże błąd „bezpieczny” gdyż rezystancja wyznaczana jest zawyżona.

Znacznie gorsza sytuacja wystąpi przy wyznaczaniu rezystancji uziemienia obiektu zawierającego zamknięte pętle przewodzące jak np. stalowego słupa linii przesyłowej WN pokazanego na rys. 1. W takim przypadku przetwornik prądowy wyznaczy prąd I_p płynący nie przez badane uziemienie lecz w zamkniętej pętli przewodzącej. Wynik takiego pomiaru będzie zawsze bardzo niski - nawet przy całkowicie niesprawnym uziemieniu.



Rys. 1. Błędny pomiar rezystancji uziemienia testerem dwurdzeniowym w obiekcie o zamkniętej pętli przewodzącej

Fig. 1. Wrong measurement of earthing resistance using bicom test equipment in object with closed conducting loop

Metoda rezonansowa realizowana w mierniku HIOKI 3143 nie wymaga stosowania uziemień pomocniczych gdyż rolę sondy prądowej spełnia tu przewód powrotny o długości ok. 20 m układany bezpośrednio na gruncie w miejscu pomiaru. Indukcyjność przewodu L oraz jego pojemność do gruntu C wykorzystywane są do uzyskania rezonansu szeregowego.

Generator o rezystancji wewnętrznej R_0 i napięciu źródła U_C przesłaja się w zakresie 100 kHz ...15 MHz poszukując rezonansu szeregowego, kontrolując jednocześnie napięcie na zaciskach wyjściowych miernika U_m . W stanie rezonansu rezystancję mierzoną określa wzór:

$$R_x = \frac{U_m}{(U_c - U_m) / R_0} \quad (2)$$

Wskazania miernika realizującego metodę rezonansową należy traktować z pewną dozą ostrożności (o czym lojalnie uprzedza wytwórca) gdyż wynik pomiaru uzyskiwany jest przy częstotliwości bardzo różniącej się od częstotliwości pracy obiektu badanego.

Metoda wysokoczęstotliwościowa zastosowana we francuskich miernikach AES 1002 służy do wyznaczania zarówno rezystancji jak i impedancji uziemień odgromowych. Zakłada się w niej model uziemienia o parametrach $RLCG$ i o impedancji opisanej zależnością [6, 7]:

$$Z_x = \frac{\sqrt{R_x + j\omega L_x}}{\sqrt{G_x + j\omega C_x}} \quad (3)$$

W miernikach realizujących tą metodę wyznacza się szereg wartości impedancji badanego uziemienia dla 20-tu różnych war-

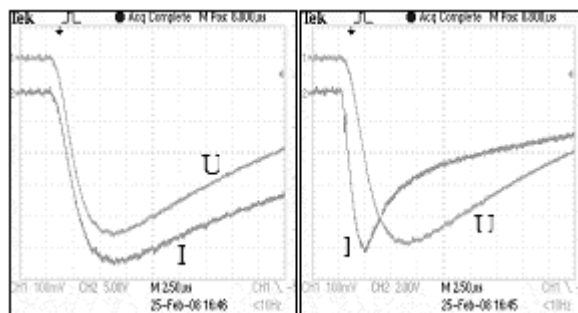
tości częstotliwości z zakresu 100 Hz ... 1 MHz. Uzyskana w ten sposób charakterystyka umożliwia ocenę przydatności uziemień stosowanych głównie w telekomunikacji i w stacjach radarowych.

Metoda udarowa przeznaczona jest do wyznaczania rezystancji udarowej charakteryzującej uziemienia odgromowe i nie należy stosować jej do kontroli uziemień ochronnych i roboczych.

Wartość rezystancji udarowej określa zależność:

$$R_{ud} = \frac{U_{x\max}}{I_{g\max}}, \quad (4)$$

gdzie $U_{x\max}$ oraz $I_{g\max}$ oznaczają wartości maksymalne prądu i spadku napięcia na uziemieniu badanym, przy czym te wartości maksymalne nie muszą występować jednocześnie [2, 4, 8]. Przykładowe oscylogramy obrazujące ten problem pokazano na rys. 2.

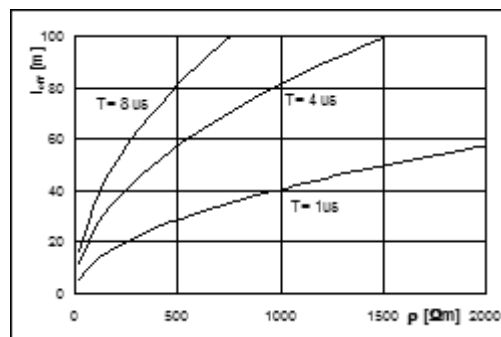


Rys. 2. Przykładowe oscylogramy prądów i napięć udarowych uzyskanych na: uziemiu skupionym (a) oraz uziemiu rozległym (b)

Fig. 2. Exemplary oscillograms of impulse currents and voltage drops across the earthing recorded for concentrated (a) and wide (b) earthing

Wartość przesunięcia między szczytami prądu i napięcia wynika przede wszystkim z prędkości narastania czoła udaru oraz z konstrukcji uziemienia. W uziemieniach o konstrukcji skupionej dominującą rolę odgrywa rezystancja. Przesunięcie między prądem i napięciem jest znikome, a cały uziom prawie równomiernie odprowadza prąd do gruntu. W uziemieniach dłuższych i średnich otkach istotny staje się wpływ indukcyjności - napięcie zaczyna wyraźnie wyprzedzać prąd, a odleglejsze części uziomu odprowadzają znacznie mniej prądu do ziemi niż część znajdująca się bliżej miejsca wyładowania. Problemy te pogłębiają jeszcze zjawiska falowe, które zaczynają występować w uziemieniach długich i bardzo rozległych [7, 8].

Jak wynika z powyższych rozważań poprawa skuteczności uziemienia odgromowego poprzez jego rozbudowę jest skuteczna tylko w ograniczonym zakresie. Wykres zmian długości efektywnej uziomu [2] dla różnych czasów czoła udaru pokazano na rys. 3.



Rys. 3. Długość efektywna uziomu w funkcji rezystywności gruntu dla różnych czasów czoła narastania udaru prądowego

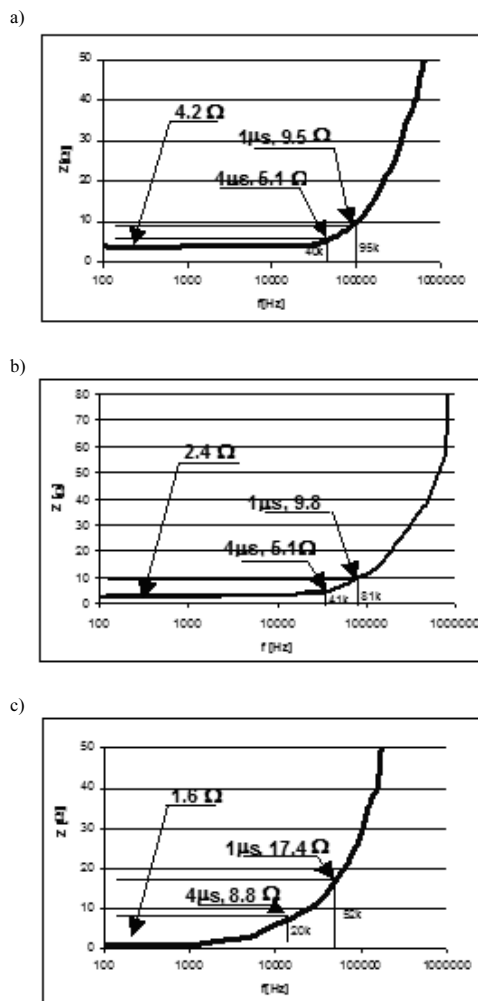
Fig. 3. Effective length of earthing vs soil resistivity for different front time of the current impulse

Rzeczywisty stan uziemień odgromowych można kontrolować za pomocą miernika typu WG-407 firmy ATMOR [3, 7] realizującego pomiar metodą udarową z udarem o czasie czoła 4 μ s.

3. Badania porównawcze

W celu porównania właściwości użytkowych różnych metod przeprowadzono szereg badań porównawczych na rzeczywistych obiektach z wykorzystaniem miernika rezystancji statycznej MRU-101, miernika wysokoczęstotliwościowego AES1002 oraz mierników udarowych WG-307S i WG-407.

Pomiarom poddano typowe obiekty: uziom pionowy pograżony na głębokość ok. 10m, uziom poziomy o długości ok. 70 m oraz uziom otokowy na budynku o wymiarach ok. 60 \times 20 m. Wyniki pomiarów zobrazowano na rys. 4.



Rys. 4. Wartość impedancji uziemia pionowego (a), poziomego (b) i otokowego (c) w funkcji częstotliwości z zaznaczonymi wynikami pomiarów rezystancji statycznej oraz rezystancji udarowej dla impulsów o czasie czoła 1 i 4 μ s

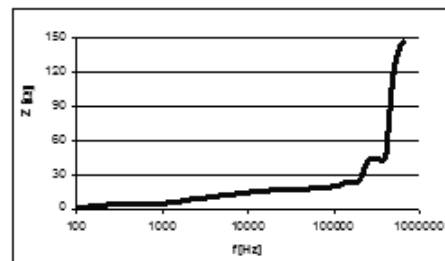
Fig. 4. Vertical (a), horizontal (b) and rectangular type (c) earthing impedance value vs frequency; results of measuring static and impulse resistances for impulse front time equal to 1 and 4 μ s marked

Analizując uzyskane wyniki można stwierdzić, że impedancji uziemia wyznaczana przy niższych częstotliwościach jest tożsama z rezystancją statyczną. Im bardziej rozległe uziemieństwo tym niższa jest częstotliwość przy której następuje wyraźny wzrost wartości impedancji. Podważa to dodatkowo wiarygodność testerów dwurdzeniowych z sygnałem o częstotliwości ok. 2,5 kHz stosowanych w bardzo rozległych systemach uziemień.

Daje się również zauważyć, iż rezystancji udarowej wyznaczonej przy udarze o czasie czoła 4 μ s odpowiada impedancja dla

częstotliwości 20 ... 40 kHz, zaś dla udaru 1 μ s – 50 ... 100 kHz. Rozległość uziemieństwa nie ma tutaj bardzo istotnego znaczenia.

W trakcie badań ujawniła się również dość istotna wada miernika wysokoczęstotliwościowego: jego wrażliwość na zakłócenia zewnętrzne, szczególnie w zakresie wyższych częstotliwości. Wyniki pomiaru impedancji przedstawione na rys. 4 – powtarzalne i o przewidywalnym charakterze – były wykonywane w środowisku wolnym od zakłóceń. Na rys. 5 przedstawiono przykładowe wyniki pomiarów impedancji uziemia słupa linii 110 kV.



Rys. 5. Wartość impedancji uziemia słupa linii przesyłowej wysokiego napięcia w funkcji częstotliwości wyznaczona miernikiem AES 1002
Fig. 5. Earthing impedance of transmission line tower vs frequency, tests performed with use of AES 1002 meter

Wyniki pomiarów wykonywanych pod pracującą linią nie były już zbyt powtarzalne, a na uwidocznionym przykładzie dla częstotliwości powyżej 100 kHz następowały wyraźne sprzężenia.

Podatność na zakłócenia w dużym stopniu wynika zapewne z poziomu napięcia sygnału pomiarowego - zaledwie 3 V_{p-p}.

4. Wnioski

Podsumowując omawiane powyżej zagadnienia należy podkreślić, iż nie ma jedynej, uniwersalnej metody pomiaru każdego typu uziemieństwa. Nasuwa się jednak kilka spostrzeżeń:

- kontrolując stan uziemień należy dobierać metody pomiarowe odpowiednie do warunków w jakich pracują te uziemieństwa,
- pomiary rezystancji pętli uziemieństwa należy traktować jako orientacyjne,
- stan uziemień ochronnych i roboczych w pełni charakteryzuje ich rezystancja statyczna,
- metoda wysokoczęstotliwościowa pozwala na określenie właściwości uziemieństwa w szerokim paśmie częstotliwości jednakże jest ona wrażliwa na zakłócenia zewnętrzne,
- uziemieństwa odgromowe najlepiej charakteryzuje impedancja udarowa uwzględniająca składowe indukcyjne uziemieństwa.

5. Literatura

- [1] PN – IEC 061024-1. Ochrona odgromowa obiektów budowlanych.
- [2] S. Szpor, J. Samuła: Ochrona Odgromowa. WNT, Warszawa, 1983.
- [3] M. Wołoszyk: Pomiary rezystancji statycznej i udarowej uziemień odgromowych. Rozdział w publikacji: Z. Gryżewski: „Prace pomiarowo-kontrolne przy urządzeniach elektroenergetycznych o napięciu do 1kV”, COSiW SEP, Warszawa, 2006.
- [4] S. Wojtas, M. Galewski, M. Wołoszyk: Influence of test procedure on surge impedance of lightning earthings. Proc.14-th EMD, Vilnius, 2004
- [5] M. Wołoszyk: Wpływ zewnętrznych czynników zakłócających na dokładność pomiarów rezystancji statycznej i udarowej uziemień. Pomiary Automatyka Kontrola, nr 12/2007.
- [6] S. Wojtas, A. Rousseau: Impulse and high frequency tests of lightning earthing, Proceedings of 27-th ICLP, Avignon, France, 13 Sept. 2004.
- [7] S. Wojtas: Ocena uziemień odgromowych metodami: udarową i wysokoczęstotliwościową. Pomiary Automatyka Kontrola, nr 4/2007.
- [8] M. I. Lorenzou, N. D. Hatzigiorgiou: Effective dimensioning of extended grounding systems for lightning protection, Proceedings of 25-th LCLP, Rhodos, Greece, 18-22 Sept. 2000.