

## 70 LAT PRAKTYKI POMIAROWEJ W OCENIE WŁAŚCIWOŚCI UZIEMIENI METODĄ UDAROWĄ

Stanisław WOJTAS<sup>1</sup>, Marek WOŁOSZYK<sup>2</sup>, Marek OLESZ<sup>3</sup>

1. Stowarzyszenie Elektryków Polskich Oddział Gdańsk  
tel.: +48601328687 e-mail: swojtas@sep.gda.pl
2. Politechnika Gdańska, Katedra Metrologii i Systemów Informatycznych  
tel.: +48601687853 e-mail: marek.woloszyk@pg.edu.pl
3. Politechnika Gdańska, Katedra Mechatroniki i Inżynierii Wysokich Napięć  
tel.: +48883317958 e-mail: marek.olesz@pg.edu.pl

**Streszczenie:** Przedstawiono liczącą ok. 70 lat historię prac związanych z rozwojem sposobów oceny uziemień wykorzystujących metodę udarową. Pierwsze prace związane z tym zagadnieniem zostały rozpoczęte w połowie ubiegłego wieku na Politechnice Gdańskiej z inicjatywy profesora Stanisława Szpora. Omówiono metodę pomiaru, stosowane kolejne generacje mierników, możliwości oceny uziemień i różne definicje normalizacyjne opisujące właściwości uziemienia mierzone przy prądach udarowych o czasie czoła zbliżonym do czasu rzeczywistego wyładowania piorunowego.

**Słowa kluczowe:** pomiar uziemienia, mierniki uziemień.

### 1. WSTĘP

Poprawne wykonanie prac kontrolno – pomiarowych uziemień wiąże się zwykle z rozłączeniem zacisków kontrolnych układu uziemiającego. W przypadku uziemień słupów linii WN pomiary są utrudnione ze względu na połączenie równoległe uziemień przewodami odgromowymi. W przypadku zastosowania pomiarów wykorzystujących przebiegi o czasach rzędu  $\mu\text{s}$  w obwodzie pomiarowym pojawia się impedancja falowa przewodów odgromowych łącząca równoległe uziemienia poszczególnych słupów. Impedancja falowa w układzie przewod - ziemia wynosi  $500 \Omega$  i wobec tego wpływ bocznikowania mierzonego uziemienia przez uziemienia innych słupów można pominąć.

Prawidłowo działające uziemienie zapewnia utrzymanie niskiej wartości spadku napięcia na jego rezystancji (impedancji) w trakcie odprowadzania prądów do ziemi, co sprowadza się do warunku małej rezystancji tego uziemienia. Uziemienia mogą odprowadzać prądy stałe, przemienne lub udarowe wywołane wyładowaniami atmosferycznymi. Ponieważ czasy zjawisk występujących przy przepływie prądów o częstotliwościach sieciowych mierzone są w milisekundach, natomiast przy prądach udarowych - w mikrosekundach, należy więc stosować zróżnicowane metody pomiarowe do oceny jakości uziemień przeznaczonych do pracy w tak różnych warunkach.

Celem pracy jest przedstawienie historii prowadzonych w Politechnice Gdańskiej badań dotyczących praktyki pomiarowej, zmierzającej do oceny właściwości udarowych uziemień odgromowych oraz prezentacja kolejnych generacji przyrządów pomiarowych umożliwiających takie pomiary.

### 2. DEFINICJE I PRZEPISY DOTYCZĄCE POMIARÓW UDAROWYCH UZIEMIENI

Problematyka pomiarów uziemień przez wiele lat była regulowana przez normę PN-89/E-05003. Według trzeciej części tej normy (PN-89/E-05003/03) kryterium przydatności uziemienia w obiektach podlegających ochronie obostrzonej i specjalnej stanowi „*rezystancja udarowa*” określana jako: „*rezystancja między uziomem a ziemią odniesienia mierzona przy prądzie udarowym o kształcie odwzorowującym prąd pioruna*”. Norma ta wprowadza jednocześnie obowiązek stosowania metody udarowej w tych strefach i 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.

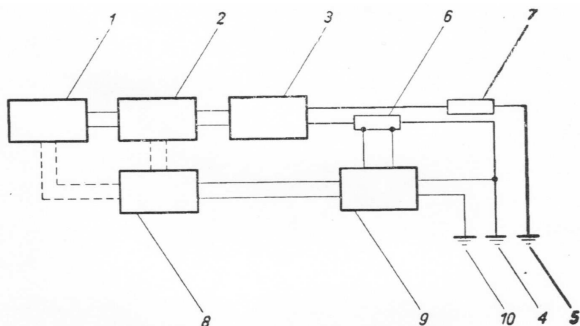
Od 2011 roku w rozporządzeniu do Prawa Budowlanego przywołano normę europejską PN-EN 62305 dotyczącą ochrony odgromowej, która wprowadza pojęcie „*umownej impedancji uziemienia*” jako „*stosunek wartości szczytowej napięcia na uziomie do wartości przepływającego w nim prądu, które na ogół nie występują jednocześnie*”.

### 3. HISTORIA MIERNIKÓW UDAROWYCH UZIEMIENI

#### 3.1. Pomiary w II połowie XX wieku

W połowie dwudziestego wieku Galeazzi, Marensi i Paloucci z uniwersytetu w Padwie zaproponowali pomiary rezystancji uziemień słupów linii przesyłowych bez odłączania przewodów odgromowych z zastosowaniem przenośnego generatora udarów oraz oscyloskopu katodowego [1]. Jednak właściwości, a zwłaszcza rozmiary ówczesnych oscyloskopów w znacznym stopniu ograniczały zastosowanie praktyczne takiej metody. Kilka lat później zespół prof. Stanisława Szpora zaproponował zastąpienie niewygodnego oscyloskopu elektronicznym woltmierzem wartości szczytowej, który byłby wykorzystany kolejno do

pomiaru dwóch napięć: jednego na rezystancji uziemienia słupa, a drugiego na rezystorze wzorcowym znajdującym się w mierniku i włączonym szeregowo z uziomem badanym. Grupa pracowników PG w składzie S. Szpor, R. Kosztaluk, J. Ossowicki i J. Suchocki otrzymała w 1969 roku patent na zaproponowane rozwiązanie, którego schemat przedstawia rysunek 1 [2]. Patent ten był zatytułowany "Miernik oporności uziemień", a wniesione zastrzeżenie patentowe ma następującą treść: "znamienny tym, że zawiera woltomierz szczytowy (8), który jest załączany kolejno na uziemienie badane (4) i na opornik porównawczy (6)" [2].



Rys. 1. Skan schematu blokowego miernika z opisu patentowego [2]; 1- źródło napięcia stałego, 2-przetwornica o napięciu kilkuset woltów, 3-generator udarów powtarzalnych, 4-uziemienie badane, 5-sonda prądowa, 6-rezystor porównawczy, 7-elementy kształtujące udar prądowy, 8-woltomierz wartości szczytowej, 9-przełącznik umożliwiający łączenie woltomierza z rezystorem porównawczym lub uziemieniem badanym przez sondę napięciową 10

W mierniku zbudowanym według opisu patentowego pokazanego na rysunku 1 generator udarów emitował ok. 200 razy na sekundę udary prądowe o amplitudzie 1 A i czasach czoła 1 lub 3  $\mu$ s. Tak duża częstość powtarzania udarów wynikała z wymagań woltomierza wartości szczytowej, którego wskazania byłyby obciążone znacznym błędem przy mniejszej liczbie udarów. Realizowany dwuetapowo pomiar uziemienia trudno było wykonać w czasie poniżej 15 s, co wymagało wyemitowania ponad 3000 udarów. Procedura pomiarowa obok wielokrotnego ładowania kondensatora generatora wymagała też podtrzymywania żarzenia tyratronu, który służył do załączania generatora. W związku z tym jako źródło zasilające stosowano akumulator w oddzielnej obudowie.

Rysunek 2 przedstawia fotografię zachowanego egzemplarza miernika udarowego wyprodukowanego w roku 1969 w Zakładzie Wysokich Napięć PG. Do wykonania miernika wykorzystano obudowę o wymiarach 370x280x130 mm zapożyczoną z dostępnego wtedy na rynku gramofonu, a miernik ważył 4,7 kg, nie licząc akumulatora, np. ołowiowego koniecznego do jego zasilania. Wykonano wtedy kilka egzemplarzy miernika dla energetyki, które służyły do pomiarów uziemień słupów linii wysokich napięć z przewodami odgromowymi.

W latach osiemdziesiątych ubiegłego wieku grupa pracowników Politechniki Gdańskiej podjęła inicjatywę opracowania nowej generacji mierników udarowych, wychodząc naprzeciw zapotrzebowaniu zwłaszcza ówczesnych zakładów energetycznych. Dostępne wtedy wysokonapięciowe elementy elektroniczne jak tyrystory i tranzystory pozwoliły w nowym mierniku na wyeliminowanie tyratronu oraz rezygnację z akumulatora ołowiowego, co uczyniło miernik znacznie bardziej przyjaznym dla użytkowników.



Rys 2. Widok miernika udarowego wykonanego w Politechnice Gdańskiej; przewód po lewej stronie służył do połączenia z akumulatorem

Pomiar odbywał się w dalszym ciągu na przy zastosowaniu woltomierza wartości szczytowej, podobnie jak w mierniku wyprodukowanym na Politechnice Gdańskiej. Produkcji opracowanego miernika podjęła się Spółdzielnia Pracy ATEMOR w Gdyni i miernik oznaczony jako WG-108 był zasilany z 8 baterii R20, miał masę 1,8 kg i wymiary 180x220x80 mm, a jego widok przedstawia rysunek 3.



Rys. 3. Widok miernika udarowego uziemień WG-108 wyprodukowanego przez firmę ATEMOR z Gdyni

W latach 90-tych stan techniki cyfrowej pozwalał już na realizację pomiarów w czasie rzeczywistym poprzez cyfrowe dzielenie wartości maksymalnych napięcia i prądu, mimo że występowały w różnych czasach. Zrealizowane w tej technice kolejne wersje mierników nie wymagały przełączalnego woltomierza wartości szczytowej, jak to było przedstawione w opisie mierników z rysunków 2 i 3.



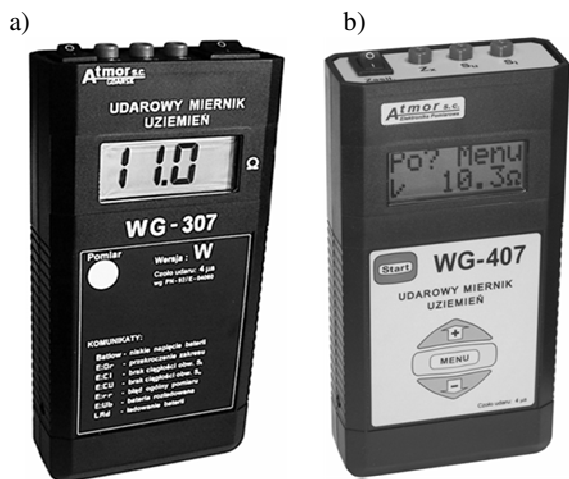
Rys. 4. Udarowy miernik uziemień z serii WG-207

Rysunek 4 przedstawia fotografię pierwszej wersji miernika zrealizowanego w technice cyfrowej i wyprodukowanego przez firmę ATEMOR w 1995 roku. Pomiar odbywał się całkowicie automatycznie po wciśnięciu przycisku „Pomiar”. Do zasilania miernika wykorzystano 8 akumulatorów Ni-Cd wielkości AA o napięciu całkowitym 9,6 V, które mogły być ładowane bez wyjmowania z obudowy miernika. Masa przyrządu wynosiła 1,1 kg, a jego wymiary - 175x210x50 mm.

### 3.2. Mierniki dostępne w ostatnim 20-leciu

W drugiej połowie lat dziewięćdziesiątych pojawiła się na rynku szeroka oferta układów scalonych, które umożliwiły dalszą miniaturyzację omawianych mierników. Wtedy został opracowany miernik WG-307, który zapoczątkował serię mierników udarowych o wadze 0,4 kg mieszczących się w obudowach o wymiarach zbliżonych do wartości 195x100x40 mm. Ze względu na likwidację firmy ATEMOR, do produkcji mierników utworzono spółkę cywilną o nazwie ATMOR z siedzibą w Gdańsku. Na rysunku 5a przedstawiono pierwszy z tej serii mierników oznaczony jako WG-307.

Pomiar za pomocą tego miernika odbywa się całkowicie automatycznie po wciśnięciu przycisku „Pomiar”. W pierwszym etapie jest wykonywane sprawdzenie ciągłości obwodu pomiarowego. Jeżeli rezystancja zewnętrznego obwodu pomiarowego sondy prądowej lub napięciowej jest większa niż 1000 Ω, pojawia się komunikat oznaczający brak ciągłości obwodu i miernik jest blokowany. Wprowadzona procedura mierza do zapewnienia możliwie wysokiej amplitudy prądu pomiarowego, aby zapewnić deklarowaną dokładność pomiaru. W drugim etapie jest realizowany właściwy pomiar określany na podstawie emisji 8 udarów, po których jest zatrzymywany generator. Miernik ma 2 zakresy pomiarowe: 0-19,9 Ω oraz 20-199 Ω, które są wybierane automatycznie. Jeżeli wartość mierzonego uziemienia przekracza pierwszy zakres, miernik generuje kolejną serię 8 udarów na wyższym zakresie.

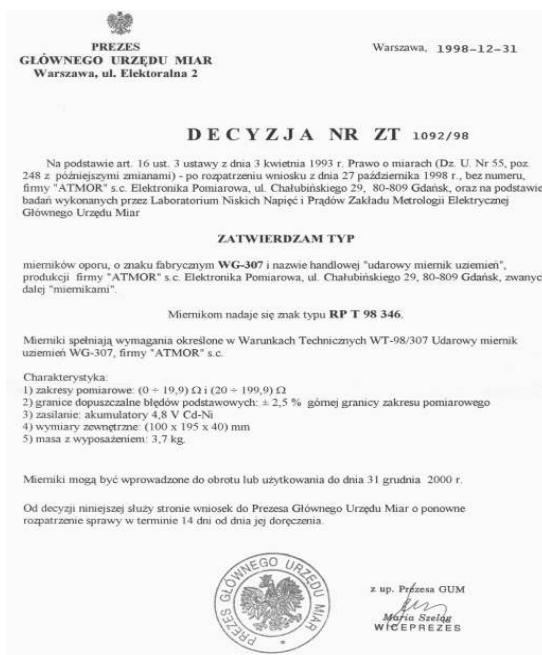


Rys. 5. Mierniki udarowe produkowane przez firmę ATMOR WG-307 (a) oraz WG-407 (b)

Miernik WG-307 decyzją Prezesa Głównego Urzędu Miar uzyskał w 1998 roku zatwierdzenie typu (rys. 6) i otrzymał znak RP T 98 346. W wyniku badań i analizy przeprowadzonej przez Instytut Energetyki w Warszawie miernik ten uzyskał poświadczenie nr 042/1999 potwierdzające jego deklarowane przez producenta

właściwości oraz stwierdzenie, że ten „miernik jest przydatny do stosowania w krajowych przedsiębiorstwach energetycznych do pomiaru rezystancji udarowej uziemień”.

W ciągu ostatnich kilkunastu lat miernik WG-307 ulegał modyfikacjom i kolejne wersje zostały oznaczone jako WG-407 (rys. 5b) oraz WG-507, który wraz z wyposażeniem został pokazany na rysunku 7. Przycisk "Menu" służy do wyboru jednego z trybów pracy miernika: pomiar oraz obsługa pamięci z możliwością zapisywania, odczytu i kasowania, a także do wybrania czasu czoła udaru pomiarowego. W tej wersji miernika są do wyboru 2 czasy czoła: 4 i 10 μs. Zasilanie miernika odbywa się z 4 akumulatorów Cd-Ni wielkości AA o całkowitym napięciu 4,8 V i pojemności 1 Ah, które wystarczają do wykonania ponad 1000 pomiarów.



Rys. 6. Kopia decyzji Prezesa GUM o zatwierdzeniu typu miernika WG-307



Rys. 7. Fotografia miernika WG-507 wraz ze standardowym wyposażeniem aktualnie produkowanego przez ATMOR sc

W roku 2009 na polskim rynku pojawił się wyprodukowany przez firmę SONEL miernik MRU-200, którego widok jest przedstawiony na rysunku 8. Masa miernika wynosi 2 kg, a jego wymiary – 288x223x75 mm. Miernik ten umożliwia pomiary uziemień przy wymuszeniach prądem udarowym o różnych czasach czoła i prądem wolnozmiennym.

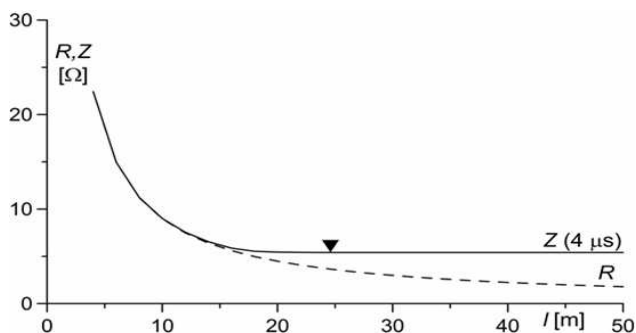


Rys. 8. Miernik MRU-200 produkowany przez SONEL SA [3]

Wraz ze wzrostem oferty rynkowej mierniki udarowe są stosowane nie tylko do pomiarów uziemień słupów, ale również do oceny przydatności innych uziemień do celów ochrony odgromowej. Rozważania teoretyczne wskazują, że w odprowadzaniu prądu piorunowego do gruntu bierze udział część uziomu oddalona od miejsca uderzenia poniżej długości efektywnej wyrażonej następującym wzorem:

$$l_e = \frac{\pi}{2} \sqrt{\frac{T}{GL}}, \quad (1)$$

gdzie  $L$  oznacza indukcyjność jednostkową,  $G$  - konduktancję jednostkową uziomu,  $T$  - czas czoła udaru.



Rys. 9. Rezystancja uziomu poziomego w funkcji jego długości przy wymuszeniu sinusoidalnym wolnozmiennym (R) oraz umowna impedancja (Z) przy udarach o czasie czoła 4  $\mu$ s [5]

Potwierdzeniem tych rozważań są przedstawione na rysunku 9 wyniki symulacji komputerowych impedancji uziomu poziomego pograżonego w gruncie o rezystywności 100  $\Omega$ m w funkcji jego długości. Przy pomiarach statycznych rezystancja (R) maleje wraz z wydłużaniem uziomu bez względu na przedział wzrostu tej długości. Przy wymuszeniu prądem udarowym o czasie czoła 4  $\mu$ s, spadek

impedancji umownej (Z) uziomu jest obserwowany tylko do pewnej długości uziomu zbliżonej do długości efektywnej. Dla analizowanego uziomu jego długość efektywna obliczona za wzoru (1) wynosi 26 m i została zaznaczona trójkątem na rysunku 9 [5]. Przedstawione uwagi zostały potwierdzone pomiarami rzeczywistych uziemień.

#### 4. WNIOSKI KOŃCOWE

Przedstawiony sposób pomiaru rezystancji uziemia przy wymuszeniu udarami prądowymi spełnia wymagania norm i pozwala mierzyć nie tylko uziemia słupów linii WN, ale także uwzględnia, w przeciwieństwie do metody statycznej, tylko długości efektywne uziemia, które decydują o jego skuteczności podczas wyładowań atmosferycznych.

Rozwijana w naszym kraju metoda udarowa pomiaru uziemień była już na przełomie wieków prezentowana na konferencjach międzynarodowych [4, 5] wzbudzając zainteresowanie, którego efektem są pojawiające się później liczne prace zwłaszcza naukowców z krajów o dużej gęstości wyładowań atmosferycznych, do jakich niewątpliwie należy zaliczyć Brazylię i Tajlandię [6, 7].

#### 5. BIBLIOGRAFIA

1. Galeazzi A., Marenesi R., Paloucci A.: Ohmmetre de terre en ondes de choc pour la determination des resistances de terre dans les lignes de transmission avec fil de garde”, Rapport CIGRE No. 329, 1953.
2. Szpor S., Kosztaluk R., Ossowicki J., Suchocki J.: Miernik oporności uziemień, Patent PRL nr 56823, 1969.
3. Sonel. MRU-200, <https://www.sonel.pl/pl/produkt/mru-200/>, data dostępu 28.09.2020.
4. Galewski M., Wojtas S., Wołoszyk M.: Impulse earthing measurement. Proceedings of the XIV IMEKO World Congress, (Tampere, 1-6 June 1997), Tampere, Finland, 1997, v. IV, p. 167-170.
5. Wojtas S.: Lightning impulse efficiency of horizontal earthings, Przegląd Elektrotechniczny, Nr 10b, 2012, s. 332-334.
6. Visacro S., Rosado M.: Response of Grounding Electrodes to Impulsive Currents: An Experimental Evaluation, IEEE Trans. on Electromagnetic Compatibility, Vol. 51, No 1, 2009, s. 161-164.
7. Horchue T., Tangtheer W., Wojtas S., Wołoszyk M.: Impulse Impedance Measurements of Lightning Protection Earthings, Proc. of the 2019 IEEE PES GTD Asia, paper TD01-P018, s. 945-949.

### 70 YEARS OF MEASUREMENT PRACTICE IN THE EVALUATION OF EARTHING PROPERTIES USING IMPULSE METHOD

About 70 years of history of works related to the development of methods of earthing assessment using the impulse method is presented. The first work on this issue was started in the middle of the last century at the Gdańsk University of Technology on the initiative of professor Stanisław Szpor. The measurement method, successive generations of meters used, various standardization definitions describing the properties and possibilities of earthing evaluations at impulse currents with a front time similar to the real lightning discharge time are discussed.

**Keywords:** earthing measurement, earthing meters.