Przewodnik po pomiarach

POMIARY REZYSTANCJI UZIEMIENIA

Roman Domański



Mierzymy globalnie

Sonel S.A. 2025
Wszelkie prawa zastrzeżone

Pomiary rezystancji uziemienia

Roman Domański

Spis treści

1 Wstęp 5
2 Rezystywność gruntu 5
2.1 Czynniki wpływające na rezystywność gruntu 6
2.2 Sezonowe współczynniki zmian rezystywności gruntu 10
3 Metody pomiaru rezystywności gruntu 14
3.1 Zasada wykonywania pomiarów 14
3.1.1 Układ pomiarowy dla metody Schlumbergera 16
3.1.2 Układ pomiarowy dla metody Wennera 18
3.1.3 Porównanie obliczeń metodami Wennera i Schlumbergera 20
3.2 Pomiary rezystywności gruntu w przykładach praktycznych 22
3.2.1 Przykład. Uziom prosty pionowy. Uziemienie GSU 22
3.2.2 Średnie rezystywności gruntu. Trudności szacunkowe 26
4 Rezystancja uziemienia 27
4.1 Pomiar rezystancji uziemienia. Metoda techniczna spadku potencjału 29
4.2 Podstawy teoretyczne metody spadku potencjału 31
4.3 Odmiany metody technicznej stosowane w praktyce 36
4.3.1 Metoda R_E3P i R_E4P 36
4.3.2 Pomiary metodą pętli zwarcia 37
4.3.3 Pomiary metodą R_E3P i R_E4P. Przykłady 38
4.3.4 Pomiary metodą R_E3P i R_E4P. Możliwe problemy 40
4.3.5 Pomiary metodą R_E3P i R_E4P. Wymagania sprzętowe 40
4.3.6 Pomiary uziemień złożonych. Rozwinięcie metod pomiarowych 41
4.3.7 Pomiary uziemień złożonych. Cęgi pojedyncze 43
4.3.8 Pomiary uziemień złożonych. Metoda dwucęgowa 49
4.3.9 Postępowanie podczas badania uziemień metodą spadku potencjału . . 51
4.4 Uziemienia rozległe 53
4.4.1 Metoda narastania zbocza. Postępowanie 58
4.4.2 Metoda narastania zbocza. Przykłady praktyczne 58
4.5 Udarowa metoda pomiaru uziemienia 62

1 Wstęp

Poprawne wykonanie pomiarów rezystancji uziemienia jest procesem złożonym i wymaga wiedzy zarówno o budowie układu uziemiającego, jak i o właściwościach gruntu, w którym to uziemienie jest wykonane. Pomimo wielu opracowań na ten temat z obserwacji wynika, że niestety zasady niezbędne do właściwego wykonywania badań są ignorowane lub nieświadomie pomijane. Utarło się też wiele nieprawdziwych stereotypów co do sposobów postępowania podczas prac pomiarowych. Pracochłonność związana z badaniami często powoduje pokusę poruszania się na skróty, co kończy się czasami frustracją ze względu na brak uzyskania powtarzalnych wyników lub po prostu otrzymanie błędnych wyników. Niezbędne jest zatem rozpatrywanie każdego przypadku poprzez wnikliwą analizę wszystkich czynników mogących mieć wpływ na to, gdzie i w jakiej odległości umieścić sondy pomiarowe, jak rezystywność gruntu będzie wpływać na prąd mogący być przez ten grunt przewodzony, czy otrzymane wyniki są wiarygodne oraz jak poprawnie je zweryfikować. Prezentacja tego zagadnienia będzie wymagała omówienia poszczególnych elementów procesu pomiarowego w sposób systematyczny, poczynając od właściwości gruntu, przez jego zdolności do przewodzenia prądu elektrycznego, wpływu czynników zewnętrznych na zmiany zachodzące w gruncie ze względu na właściwości przewodnictwa jonowego, aż do istoty związanej z możliwościami metody technicznej (spadku potencjału), wykorzystywanej bezpośrednio do pomiaru rezystancji uziemienia.

Każdy pomiar rezystancji uziemienia to inna sytuacja. Zmienia się nie tylko geologia miejsca, ale i warunki, w których są prowadzone badania, co determinuje sposób budowy układu pomiarowego, kierunek i odległości do sond pomocniczych.

Roman Domański
Główny Inżynier Wsparcia Technicznego
SONEL S.A.

2 Rezystywność gruntu

Miarą oporu, jaki stawia grunt na drodze prądu elektrycznego, jest jego rezystywność. W wielu przypadkach właściwe określenie tego parametru jest kluczowe. Wykonując pomiary przy użyciu odpowiednich mierników, otrzymamy w wyniku rezystywność zastępczą. Rezultaty tych badań będą miały zastosowanie w trzech głównych obszarach.

- Po pierwsze: takie dane są wykorzystywane do wykonywania podpowierzchniowych badań geofizycznych, które są pomocą w identyfikowaniu lokalizacji rud, głębokości do podłoża skalnego i innych zjawisk geologicznych. Do tego celu używa się zaawansowanych metod elektrooporowej tomografii gruntu.
- Po drugie: rezystywność ma bezpośredni wpływ na stopień korozji rurociągów prowadzonych pod powierzchnią gruntu. Spadek rezystywności w tych przypadkach wiąże się ze wzrostem korozji i tym samym dyktuje, jaki zabieg ochronny należy zastosować. Problemy z tego wynikające znane są przy np. ochronie katodowej.
- Po trzecie: rezystywność gruntu jest czynnikiem decydującym o rezystancji uziemienia. Na etapie projektowania układu uziemiającego niezbędne są wcześniejsze pomiary rezystywności zastępczej gruntu, gdyż tylko tak można rozpocząć prace obliczeniowo-projektowe. Niestety nader często przy projektowaniu uziemień wykorzystuje się wartości średnie rezystywności gruntu, które mogą znacznie się różnić od tych występujących w rzeczywistej lokalizacji.

Problem może również wystąpić, jeśli nieprawidłowo przeprowadzimy niezbędne pomiary. Konsekwencją tego jest wiele nieporozumień pomiędzy wykonawcą a projektantem czy inspektorem nadzoru, a także mogące zaskoczyć wszystkie strony koszty, które należy ponieść, aby osiągnąć zakładane parametry rezystancji uziemienia. W przypadku drugim i trzecim pomiary wykonuje się metodą Wennera lub Schlumbergera. Przed zaprezentowaniem metod pomiarowych oraz metodyki prowadzenia badań rezystywności gruntu trzeba zastanowić się najpierw nad rodzajami i właściwościami gruntu. Niezbędne jest rozpoznanie czynników, które wywołują zmiany rezystywności w czasie.

2.1 Czynniki wpływające na rezystywność gruntu

Rezystywność gleby zależy od różnych czynników, takich jak jej skład, struktura, wilgotność, temperatura, pH itp. Zasadniczo gleba nie jest jednorodna, a jej rezystywność zmienia się wraz z głębokością (warstwy gleby mają różną wilgotność, przeważnie tym niższą, im głębiej leżą, jednak nie jest to oczywiste i nie stanowi reguły). Grunt o niskiej rezystywności jest korzystny do zaprojektowania i budowy systemu uziemiającego. Grunty jednorodne występują bardzo rzadko i można je rozpatrywać w zasadzie tylko teoretycznie, jednak to wystarczy do opisania zachodzących w nich zjawisk. Różnice w rezystywności występują zarówno w kierunku poprzecznym, jak i na głębokości. Czynniki, które wpływają na rezystywność gruntu, to przede wszystkim:

- typ gleby (np. bielicowe, brunatne, płowe, czarnoziemy, czarne ziemie, bagienne, mady, piaszczysto-gliniaste, rędziny, górskie),
- mieszanka materiałów, skład mineralogiczny,
- zawartość wilgoci (zależna również od opadów deszczu, a więc czynnika bardzo zmiennego),
- stężenie soli, stopień nasycenia,
- pH gleby,
- temperatura,
- porowatość i zagęszczenie (zwarte, półzwarte, twardoplastyczne, plastyczne, miękkoplastyczne i płynne).

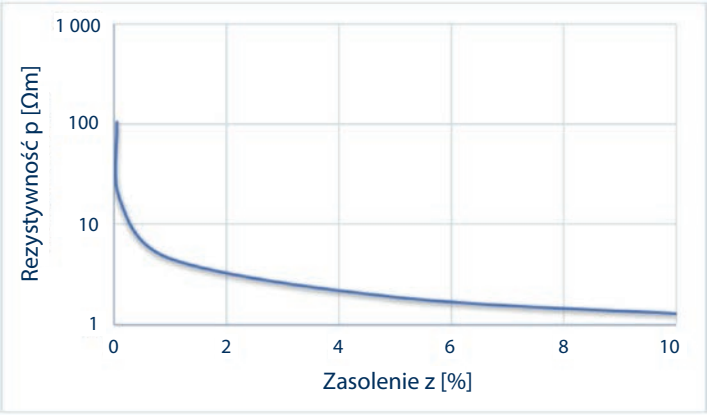
Niektóre z tych czynników zależą od geologii miejsca, a ich zmienność jest bardzo długoterminowa. Dlatego są one uważane za stałe przy projektowaniu systemu uziemienia. Natomiast inne czynniki, takie jak zawartość wilgoci i soli, temperatura i zagęszczenie, są zmienne i wpływają na działanie systemów uziemiających przez cały okres ich eksploatacji.
Sama wilgoć, powszechnie uważana za czynnik najbardziej istotny, nie wystarczy do osiągnięcia niskiej rezystywności. Gleba musi zawierać sole mineralne, które będą mogły wytworzyć elektrolit przewodzący prąd. Stężenie rozpuszczonych soli może zmieniać się naturalnie ze względu na wpływ opadów atmosferycznych i pierwiastków chemicznych znajdujących się w górnych warstwach gleby. Gdy woda deszczowa wnika w glebę, wciąga nowe pierwiastki chemiczne lub rozrzedza stężenie pierwiastków już w gruncie występujących. Sole mineralne mogą być wprowadzone do gleby naturalnie lub sztucznie (np. nawozy sztuczne stosowane w rolnictwie). Rozpuszczone sole mineralne mają największy wpływ na wartość rezystywności gruntu. W związku z tym w pewnym zakresie będzie wpływać na nią wilgotność gleby. Czynnik ten można prezentować jako procent masy gleby w stanie suchym.
W tabeli 1 pokazano, że rezystywność gwałtownie spada, gdy sucha gleba staje się wilgotna. Jednak w momencie jej nasycenia dodatkowy wzrost wilgotności nie powoduje już znaczącego spadku rezystywności. Wartość graniczna wynosi w przybliżeniu pomiędzy 20% a 30%.

Powyżej niej nie występowałyby już znaczne spadki rezystywności gruntu.

Tab. 1. Wpływ zawartości wilgoci na rezystywność gruntu
Źródło: An Introduction to Soil Resistivity – August 28, 2020 by Lorenzo Mari

Zawartość wilgoci. (% wagi do suchej gleby)	Górna warstwa gleby (Ωm)	Gleba gliniasto piaszczysta (Ωm)
0	$>10^9$	$>10^9$
0,25	2500	2500
5	1650	430
10	530	185
15	190	105
20	120	63
30	64	42

Naturalnie, jeśli będziemy rozpatrywać inne rodzaje gleby, niż podane w tabeli 1, i specyficzne warunki terenowe, dane będą się różnić, jednak można przyjąć powyższe wartości jako pewien punkt odniesienia.
Przykładem różniącym się od tego przedstawionego w tabeli mogą być piaski kwarcowe w warstwach powierzchniowych, np. w okolicach lasów czy plaż. Struktury te są luźne i mają słabą zdolność do utrzymywania wilgoci. Polewanie ich obficie wodą – czy to celowo, czy jako efekt opadów deszczu – nie spowoduje oczekiwanego zmniejszenia rezystywności w stopniu znaczącym. Ma to bezpośredni związek z mechanizmem powodującym przepływ prądu w gruntach. Przyzwyczailiśmy się do przyjmowania, że to swobodne elektrony powodują przepływ prądu elektrycznego. W glebach czynnikiem wspierającym przepływ prądu są jony. Jest to czynnik krytyczny związany z przewodnością gruntu. To właśnie wspomniane sole w gruncie dostarczają jonów koniecznych do wspierania przepływu prądu, co koreluje poniekąd ze stopniem nasycenia wilgocią. Zatem wymienione przykładowo piaski nie mają zdolności utrzymania w stopniu znaczącym jonów i opady deszczu mogą w rzeczywistości wypłukać jony i zmniejszyć przewodność gruntu. Nie zawsze więc dostarczenie wody do gleby poprawi jej rezystywność! Na rysunku 1 przedstawiona jest zależność rezystywności od stopnia zasolenia.



Rys. 1. Wpływ zawartości soli na rezystywność gruntu piaszczysto gliniastego
Źródło: Modelowanie i symulacje w obliczeniach uziomów dr inż. Konrad Sobolewski

Kolejny czynnik mający wpływ na właściwości przewodzące gruntu, nader często ignorowany, to temperatura. Analizując wpływ temperatury na rezystywność gruntu można zauważyć, że współczynnik temperaturowy dla gleby jest ujemny, tzn. im niższa jest temperatura, tym większy jest opór właściwy. Tabela 2 pokazuje, że w temperaturach powyżej zera zmiany rezystywności są niewielkie na ºC. W punkcie zamarzania (0ºC) występuje nieciągłość. Rezystywność znacznie wzrasta przy zmianie stanu skupienia wody z fazy ciekłej do fazy stałej. Jest to bezpośrednio związane ze zjawiskiem spowalniania przepływu jonów i w efekcie zmniejszania się przewodności.

Tab. 2. Wpływ temperatury na rezystywność gruntu piaszczysto-gliniastego o zawartości wilgoci ok. 15%
Źródło: An Introduction to Soil Resistivity August 28, 2020 by Lorenzo Mari

Temperatura (ºC)	Rezystywność (Ωm)
20	72
10	99
0 (woda)	138
0 (lód)	300
-5	790
-15	1300

Właściwość ta musi być brana pod uwagę podczas planowania pomiarów. Niestety zarówno pomiary rezystancji uziemienia, jak i rezystywności gruntu nader często są zlecane bez uwzględnienia panującej temperatury, pomimo iż nie mają one żadnego sensu poniżej 0°C.

Zatem naturalne jest, że rezystancja uziemienia zależy przede wszystkim od rezystywności gruntu. Dlatego rozsądne przybliżenie rezystywności – np. poprzez pomiar i wyznaczenie rezystywności zastępczej – pozwoli na wykonanie właściwego projektu i uniknięcie niechcianych niespodzianek w fazie wykonawczej. Wartości zastępczej rezystywności gruntu rzutują na określenie głębokości pogrążania uziomu w celu uzyskania akceptowalnej rezystancji uziemienia i efektywnego zużycia materiałów. Podczas badań rezystancji uziemienia pozwala to również na oszacowanie warunków, w jakich prowadzimy pomiary, oraz do określenia, jak powinien wyglądać układ pomiarowy i czy np. nie trzeba zastosować sond pomocniczych o długości ponadstandardowej.

Rezystywność gruntu zmienia się wraz z porami roku, a na jej wartość wpływa wiele elementów. Na szczególną uwagę zasługuje temperatura, wilgotność oraz obecność minerałów i rozpuszczonych soli. Gleba pozbawiona elektrolitu może stać się doskonałym izolatorem. Ponieważ temperatura i wilgotność są stabilniejsze w głębszych partiach gleby, uzasadnione jest, aby w tych strefach umieszczać elementy uziemienia. Wysoka rezystywność gruntu będzie determinowała wykonanie bardziej złożonego systemu uziemiającego, aby uzyskać wymagane wartości rezystancji uziemienia.

Tab. 3. Rezystywności odpowiadające różnym rodzajom gruntu
Źródło: https://rst.pl/projektowanie-ukladu-uziemiajacego-obliczenia-teoretyczne-w-praktyce/

Rodzaj gruntu	Rezystywność [Ωm]
Grunt bagnisty Grunt aluwialny Humus Torf wilgotny	Od kilku do 30 20 do 100 10 do 150 5 do 100
Glina plastyczna Margiel i zwarta glina Jurajski margiel	50 100 do 200 30 do 40
Piasek gliniasty Piasek krzemionkowy Grunt kamienisty nagi Grunt kamienisty pokryty trawnikiem	50 do 500 200 do 3000 1500 do 3000 300 do 500
Wapień miękki Wapień zwarty Wapień spękany Łupek Łupek mikowy	100 do 300 1000 do 5000 500 do 1000 50 do 300 800
Granit i piaskowiec w zależności od warunków Granit i zmielony piaskowiec	1500 do 10000 100 do 600

Podane w tabeli wartości z klasyfikacją gruntów są powszechnie znane i wykorzystywane w wielu publikacjach oraz opracowaniach. Inne przykłady z rozmaitymi rodzajami gruntu i jego rezystywności można łatwo znaleźć, korzystając z możliwości wyszukiwarek internetowych. Poniżej pokazany jest jeszcze jeden przykład klasyfikacji pod kątem spotykanych rezystywności w różnych środowiskach geologicznych.

Tab. 4. Wartości rezystywności w różnych rodzajach gruntu i cieczy
Na podstawie: An Introduction to Soil Resistivity by Lorenzo Mari (August 28, 2020)

Rodzaj gruntu	Minimalnie [Ωcm]	Średnio [Ωcm]	Maksymalnie [Ωcm]
Grunty pyliste, solankowe i mokre	590	2,370	7,000
Grunt gliniasty	340	4,060	16,300
Obie pozycje powyżej z różnymi proporcjami piasku i żwiru	1,020	15,800	135,000
Skała żwirowa, piasek, kamienie z niewielką ilością gliny	59,000	94,000	458,000
Granity i bazalty	1,000,000		
Łupek	1,000		10,000
Wapienie	500		400,000
Margiel	100		5,000
Piaskowiec	2,000		200,000
Łupki ilaste	500		10,000
Gleby kredowe	10,000		1,000,000
Woda morska	20		200
Woda kranowa	1,000		5,000
Żyzne wzgórza	Ok. 3000		
Teren przybrzeżny, suchy, płaski, piaszczysty	30,000	50,000	500,000

Te dwie tabele są najlepszym dowodem na to, że szczególnie przy projektowaniu uziemień warto jest przeprowadzić pomiary rezystywności gruntu. Rozrzut danych rezystywności jest, jak widać, bardzo duży, więc bez wizji lokalnej i pomiarów można zbyt optymistycznie przyjąć wartości do obliczeń.

Tylko pomiary rezystywności gruntu będą poprawnym źródłem danych do wykonania projektu układu uziemiającego. Dane tabelaryczne mogą pomóc w szacowaniu ogólnym problemu projektowego.

2.2 Sezonowe współczynniki zmian rezystywności gruntu

Faktem jest, że wraz ze zmianami pór roku (a co za tym idzie, również warunków meteorologicznych) grunty zmieniają swoją rezystywność w zależności od intensywności czynników zewnętrznych, właściwości geologicznych i głębokości, na której się znajdują. Aby zrozumieć i przewidywać, co będzie działo się z uziemieniem podczas eksploatacji w takcie zmian geofizycznych i meteorologicznych, opisana powyżej wiedza staje się niezbędna. Samo bezkrytyczne stosowanie współczynników sezonowych zmian rezystywności gruntu nie wydaje się być właściwym rozwiązaniem. Zestawienie tychże zostało opublikowane w książce prof. K. Wołkowińskiego i są one obecnie przedmiotem zarówno dyskusji, jak i sporów.

Tab. 5. Współczynniki sezonowych zmian rezystywności gruntu wg Wołkowiński Konstanty - Uziemienia urządzeń elektroenergetycznych – Wydawnictwa Naukowo-Techniczne 1967

Rodzaj uziomu	Rozmiar uziomu	Zmierzona rezystywność gruntu w Ωm	Wartość k_p		
			Grunt w czasie pomiarów		
			Suchy [1]	Wilgotny [2]	Mokry [3]
Pojedynczy uziom poziomy [4]	L < 30 m	Dowolna	1,4	2,2	3,0
Uziom kratowy [5]	SE < 900 m [2]	ρ ≤ 200	1,3	1,8	2,4
		ρ > 200	1,4	2,2	3,0
	SE ≥ 900 m [2]	ρ ≤ 200	1,1	1,3	1,4
		ρ > 200	1,2	1,6	2,0
Uziom pionowy	L=2,5 m + 5 m	Dowolna	1,2	1,6	2,0
	L > 5 m	Dowolna	1,1	1,2	1,3

[1] W okresie od czerwca do września (włącznie), z wyjątkiem trzydniowych okresów po długotrwałych opadach.
[2] Poza okresem zaliczonym do 1), z wyjątkiem trzydniowych okresów po długotrwałych opadach lub stopieniu się śniegu.
[3] W okresie trzech dni po długotrwałych opadach lub stopieniu się śniegu.
[4] Głębokość ułożenia uziomu od 0,6 do 1 m.

Po pierwsze, nie istnieje żaden wymóg prawny ani normatywny wymagający zastosowania tych współczynników. Jednak „należyta staranność" w Prawie Budowlanym wymaga rozważenia opisanych zjawisk.

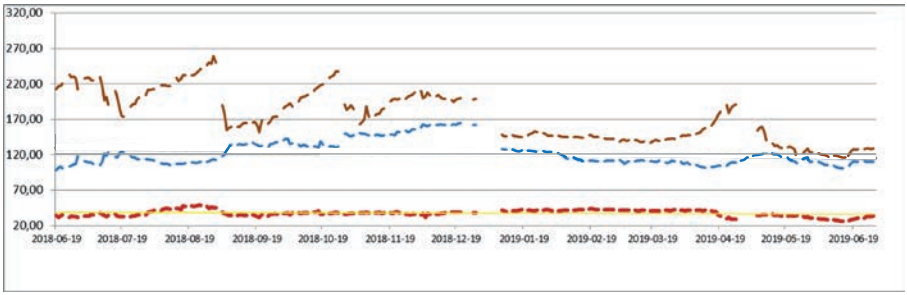
Po drugie, badania nie były prowadzone przez prof. K. Wołkowińskiego, a zaczerpnięte z prac radzieckiego badacza Michajłowa, który wykonywał je w warunkach nieprzystających do naszego regionu. Po przeczytaniu odpowiednich akapitów można również odnieść wrażenie, że całość rozważań odnosić się może do procesu projektowania uziemień i ewentualnych pomiarów rezystywności, a niekoniecznie do kontroli rezystancji uziemienia w trakcie eksploatacji.

Po trzecie, powiązanie wartości rezystywności z poszczególnymi miesiącami straciło całkowicie swoją aktualność ze względu chociażby na zmiany klimatu, co z pewnością jest zauważalne dla każdego człowieka, nie tylko dla specjalistów od pomiarów rezystywności i uziemień (badania były prowadzone z pewnością przed 1957 r.).

Powyższe wątpliwości co do zasadności stosowania współczynników z tabeli 5 zostały wyrażone również w książce dr. inż. Witolda Hoppela i mgr. Roberta Marciniaka „Uziemienia w sieciach elektroenergetycznych" (Wydawnictwo Naukowe PWN S.A., Warszawa 2020).

Jednoznaczne i arbitralne ustalenie współczynników opisujących zmiany rezystywności w poszczególnych sezonach klimatycznych, ze względu na mnogość zmiennych wpływających na rezystywność gruntu, nie jest prosta i każde zaproponowane rozwiązanie może budzić pewien niedosyt i nie być do końca satysfakcjonujące.

W latach 2018-2019, w ramach realizacji projektu dofinansowywanego z Funduszy Europejskich „System pomiaru napięć rażeniowych z obrazowaniem bezpieczeństwa instalacji uziemiających i funkcją inteligentnej predykcji", przeprowadzono w firmie SONEL S.A. roczne badania rezystywności gruntu z pomiarami wykonywanymi codziennie o godz. 8:00 za wyjątkiem sobót i niedziel. Wyniki zaprezentowano na rysunku 2.



Rys. 2. Zmiany rezystywności gruntu w okresie od 2018-06 do 2019-06. Badania własne SONEL S.A., Roman Domański

Pomiary prowadzone były w gruncie trzywarstwowym (wg badań geologicznych wykonanych na potrzeby budowlane). Wierzchnia warstwa do ok. 1 m to humus z zawartością piasków. Poniżej do ok. 6-7 m to grunt pylisty zwarty i dalej piaszczysto-gliniasty, a więc typowy, przywoływany w rozważaniach. To, co można zaobserwować na wykresie, to fakt występowania znacznych zmian rezystywności w wierzchniej warstwie gruntu na głębokości ok. 80 cm, a więc również w strefie przemarzania (kolor brązowy). Głębiej, czyli na ok. 4-5 m, widoczne zmiany są zdecydowanie mniejsze (kolor niebieski), a poniżej 10 m (kolor czerwony) w zasadzie nie występują.

Wniosek pierwszy, który nasuwa się po obserwacji zmian, to niestety niewystarczający okres badań. Trend opadający, który występował w ciągu roku pomiarów, z pewnością uległby zmianom w kolejnych latach. Na podstawie subiektywnych rozważań wydaje się, że konieczne byłoby prowadzenie pomiarów w okresie pięcioletnim lub nawet dekady.

Wniosek drugi - stosowanie współczynników sezonowych zmian rezystywności gruntu z tabeli 5 jest nieuzasadnione i może nieść za sobą niepotrzebne modernizowanie istniejących uziemień, a co za tym idzie – generowanie znacznych kosztów.

Wniosek trzeci - zmiany istotnie występują i z pewnością mają wpływ na wartość rezystancji uziemienia. Warto pochylić się nad tym zjawiskiem, ale tylko poprzez analizę wszystkich opisanych wcześniej czynników, tzn.:

- W jakim okresie prowadzone są pomiary?
- Jaki jest rodzaj gruntu?
- Jaka jest zdolność gruntu do utrzymania elektrolitu?
- Jak jest zbudowany system uziemiający (pionowy, poziomy, mieszany, kratowy itd.), w jakim obszarze, na jakiej głębokości?

W celu ustalenia stopnia ewentualnych zmian rezystywności gruntu na skutek zmian sezonowych i ich wpływu na zmiany rezystancji uziemienia, każdy przypadek powinien być rozpatrywany indywidualnie ze szczególną starannością.

Jeśli wnioski będą wskazywały na możliwość pogorszenia się paramentów uziemienia, to tylko w oparciu o powyższą wiedzę i analizę zależności można podjąć próbę oszacowania stopnia możliwych zmian. Oczywiście musi się to opierać o zebrane dane o gruncie, pomiar rezystywności, wiedzę o rodzaju uziemienia i w pewnym stopniu intuicję wynikającą z doświadczenia zawodowego.

Próbą pogodzenia wiedzy na temat zjawisk i praktyki może być tabela 6 zaproponowana przez autorów wspomnianej już książki „Uziemienia w sieciach elektroenergetycznych". Przedstawione w niej współczynniki w zdecydowanej większości zawierają się w zakresie pomiędzy 1 do 2. Największy wynosi 2,4 i dotyczy uziomów w warstwach powierzchniowych, co potwierdzają zobrazowane na rysunku 2 obserwacje dla głębokości 80 cm.

Tab. 6. Proponowane współczynniki sezonowych zmian rezystywności gruntu - Uziemienia w sieciach elektroenergetycznych – Witold Hoppel, Robert Marciniak

Lp.	Opis uziomu	Współczynniki k_E dla pomiarów rezystancji uziemienia, jeśli grunt jest:			
		Bardzo suchy	Suchy	Wilgotny	Mokry
1.	Uziemienia betonowych słupów linii o napięciu powyżej 1 kV, jeśli nie ma na nich elementów ochrony przepięciowej. Uziom strony SN stacji SN/nn z rozdzielonymi uziemieniami	1,0	1,0	1,0	1,0
2.	Uziemienia betonowych słupów linii o napięciu powyżej 1 kV, jeśli są na nich elementy ochrony przeciwprzepięciowej (także w systemie PAS) a) Poziome, w tym otokowe b) Pionowe o długości do 5 m c) Pionowe powyżej 5 m d) Złożone z elementów poziomych i pionowych e) O nieznanej konfiguracji (stosować wyjątkowo)	 1,0 1,0 1,0 1,0	 1,1 1,1 1,1 1,1	 1,8 1,5 1,2 1,3	 2,4 1,9 1,3 1,5
3.	Uziomu przy stacji SN/nn: a) Poziomy (w tym otokowy) b) Pionowy o długości do 5 m c) Pionowy o długości powyżej 5 m d) Złożony z elementów poziomych i pionowych	 1,0 1,0 1,0	 1,1 1,1 1,1	 1,6 1,3 1,2	 2,0 1,6 1,3
4.	Uziom stacji SN/nn przy pomiarze rezystancji R_S	1,0	1,05	1,1	1,2
5.	Uziom przy stacji napowietrznej SN i uziemienia przewodów PE/PEN w sieci nn: a) Poziome, w tym otokowe b) Pionowe o długości do 5 m c) Pionowe powyżej 5 m d) Złożony z elementów poziomych i pionowych	 1,0 1,0 1,0	 1,1 1,1 1,1	 1,8 1,5 1,2	 2,4 1,9 1,3
6.	Uziomy słupów linii o napięciu 110 kV i wyższym	1,0	1,1	1,2	1,3
7.	Uziomy kratowe bez innych elementów a) O powierzchni do 900 m^2 b) O powierzchni powyżej 900 m^2	 1,0 1,0	 1,3 1,1	 1,8 1,3	 2,4 1,4
8.	Uziomy stacji o napięciu 110 kV i więcej, łącznie z uziomem kratowym	1,0	1,0	1,0	1,0

Objaśnienia dla stanu gruntu:
Bardzo suchy – podczas okresów dużej suszy, brak opadów lub bardzo małe, ok. 4 razy mniejsze od przeciętnych w okresie przynajmniej 3 tygodni poprzedzających pomiar,
Suchy – przeważnie od czerwca do września, ale jeśli nie ma dużych opadów,
Wilgotny – przeważnie od października do maja przy przeciętnych opadach, od czerwca do września przy opadach przeciętnych,
Mokry – tylko wyjątkowo, jeśli występowały silne opady w okresie 2 lub więcej tygodni przed pomiarami, przeważnie stojąca woda od kilku dni w zagłębieniach oraz na łąkach i polach.

O ile współczynniki mogą zostać uznane ostrożnie jako punkt odniesienia do pozostałych, innych rodzajów uziomów w różnych obszarach elektroenergetyki i ochrony odgromowej, to opis dotyczący stanu gruntu niestety nie oddaje istoty rzeczy. Powiązanie stanu gruntu z porami roku, czyli miesiącami występowania opadów, nie może być przyjęte jako wzorzec. Wspomniane wcześniej zmiany klimatyczne pozbawiają poszczególne miesiące cech przyjmowanych jako charakterystyczne w poprzednich dekadach. Uzależnienie współczynników od wilgotności też można uznać za statystycznie bardziej prawdopodobne, jednak nie oczywiste. Zatem określenie współczynnika powinno opierać się na analizie czynników mogących powodować zmienność rezystywności i być rozpatrywane indywidualnie, a nie w oparciu o statystykę i uogólnienia.

Nie jest właściwym również dążenie do osiągnięcia nie wiadomo jak dokładnych wyników pomiaru i określania współczynników z dokładnościami rzędu poszczególnych procentów. Mija się to z celem, który chcemy osiągnąć. 10% różnic, które mogą wpływać na wnioski z określania rezystywności czy rezystancji uziemienia, to wynik, który można uznać za zdecydowanie wystarczający. Oczywiście jest to kwestia skali i subiektywności oceny na podstawie obserwacji i doświadczenia.

3 Metody pomiaru rezystywności gruntu

Istnieją różne metody pomiaru rezystywności gruntu, a każda z nich ma swoje unikalne cechy, wady i zalety. Problematyka z tym związana znana jest już od początku XX wieku. Do najbardziej rozpowszechnionych zalicza się metody Wennera i Schlumbergera. Teoria pomiarów opracowana przez Franka Wennera została przedstawiona w artykule Biura Norm nr 258 z 11 października 1915 r.; publikacja nosiła tytuł „A Method of Measuring Earth Resistivity". Metodę Schlumbergera datuje się mniej więcej na ten sam okres. Była opublikowana w 1916 r.

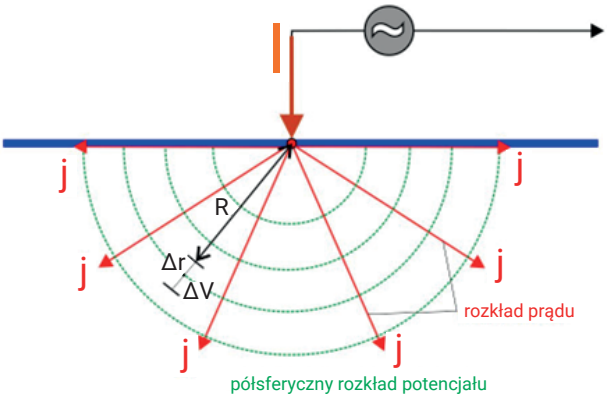
Elektrooporowe metody badania rezystywności gruntu opierają się o takie same zjawiska fizyczne. Zatem porównywanie ich na tym polu nie prowadzi do jakichś fundamentalnych odkryć, ponieważ obie polegają na wymuszeniu prądu elektrycznego w badanym gruncie i mierzeniu rozkładu potencjałów woltomierzem. Można wykorzystywać do pomiarów prąd stały lub przemienny o niewielkiej częstotliwości. Na podstawie gęstości prądu i wartości zmierzonego potencjału określana jest rezystywność gruntu na określonej głębokości. Prowadząc serię pomiarów przy różnych rozstawach sond pomocniczych, penetrujemy grunt na różnych głębokościach, co daje możliwość ustalenia rozkładu rezystywności w przekroju pionowym gruntu, na którym były prowadzone badania. Dlatego można stwierdzić, że oba sposoby wykonywania pomiarów prowadzą do tego samego celu. Ocena, która miałaby wskazać przewagę jednej metody nad drugą, może się opierać jedynie o subiektywne odczucia. Obie metody wymagają przestawiania sond pomocniczych, a różnice polegają jedynie na geometrycznych zasadach ich umiejscawiania podczas pomiarów. W metodzie Wennera rozstaw sond pomocniczych odbywa się w linii prostej, w takich samych odległościach pomiędzy nimi. W metodzie Schlumbergera sondy również rozmieszcza się w linii prostej, jednak przestawia się jedynie elektrody zewnętrzne.

3.1 Zasada wykonywania pomiarów

Analizując metody pomiaru rezystywności gruntu, trzeba zacząć od tego, w jaki sposób generowany prąd rozkłada się w gruncie. Dla elektrody punktowej umieszczonej na powierzchni badanego gruntu prąd przez nią płynący charakteryzuje się radialnym rozpływem we wszystkich kierunkach, przy czym gęstość prądu maleje wraz ze wzrostem odległości. Oczywiście dotyczy to warunków idealnych w gruncie jednorodnym. Opisuje to wzór:

$$j = \frac{I}{2\pi r^2}$$

j – gęstość prądu w punkcie r oddalonym od elektrody



Rys. 3. Pojedyncze źródło prądu na powierzchni (elektroda punktowa) jednorodnego ośrodka

Na rysunku 3 pokazany jest rozkład gęstości prądu, który układa się symetrycznie względem elektrody punktowej. Na odcinku Δr przyrostu odległości od elektrody prąd j wywołuje spadek napięcia:

$$\Delta V = j \times \rho \times \Delta r = \frac{\rho I}{2\pi r^2} \Delta r$$

ρ – rezystywność gruntu

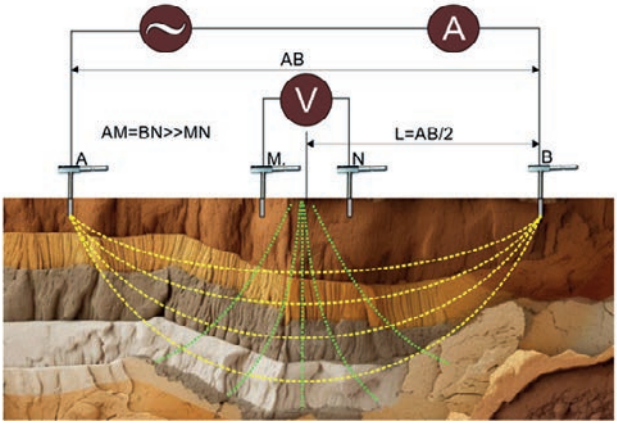
Im głębiej i dalej od elektrod, tym mniejsza jest gęstość prądu. Sumaryczny prąd przepływający przez płaszczyznę pionową, znajdującą się w połowie odległości między elektrodami, wyrażony jest wzorem:

$$\frac{I(h)}{I} = \frac{2}{\pi} \operatorname{arctg}\left(\frac{2h}{d}\right)$$

h – głębokość
d – odległość między sondami

Rozkład prądów i potencjałów jest podstawą obliczeń, które wykonujemy przy pomiarach rezystywności gruntu i rezystancji uziemienia. Zasady w wersji skróconej przedstawione zostaną poniżej.

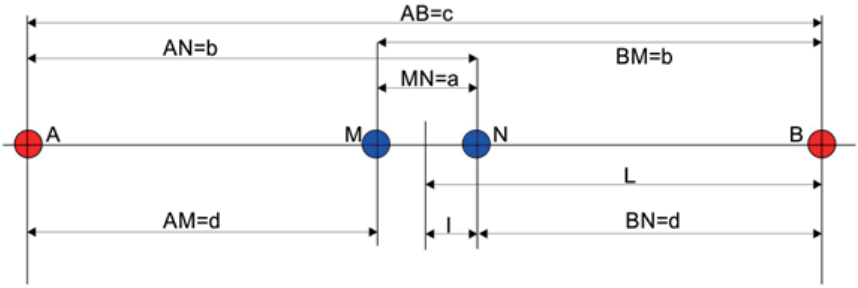
3.1.1 Układ pomiarowy dla metody Schlumbergera



Rys. 4. Metoda Schlumbergera. Układ sond pomiarowych

W układzie Schlumbergera (rysunek 4) elektrody zasilające (skrajne A i B – wymuszające przepływ prądu w gruncie) są oddalone od elektrod pomiarowych (obwód woltomierza MN pomiędzy elektrodami zasilającymi) tak, aby maksymalny rozstaw między elektrodami prądowymi przewyższał zakładaną głębokość penetracji przynajmniej 6-krotnie. Odległości między sondami nie są równe, ale są symetryczne.

Zakres głębokości badania określa się w przybliżeniu na ⅓ szerokości rozstawu elektrod AB. Budowa układu wymaga użycia 4 elektrod: 2 skrajnych prądowych A i B (wymuszających) oraz 2 środkowych napięciowych M i N (pomiarowych). W przypadku układu Schlumbergera podczas każdego pomiaru elektrody prądowe A i B są przesuwane na zewnątrz podczas badania, natomiast elektrody potencjału M i N pozostają w tej samej pozycji, dopóki obserwowane napięcie nie stanie się zbyt małe, aby je zmierzyć. W tym momencie elektrody potencjału M i N są przesuwane na zewnątrz tak, by zwiększyć odległość między nimi. Z reguły rozsądna odległość między M a N powinna być równa lub mniejsza niż jedna piąta odległości między A i B na początku. Na podstawie natężenia prądu i napięcia między elektrodami pomiarowymi wyznacza się oporność pozorną gleby w obrębie wytworzonego pola elektrycznego.



Rys. 5. Metoda Schlumbergera. Rozstaw sond

Zatem:

$$\frac{1}{K} = \left(\frac{2}{d} - \frac{2}{b}\right)$$

$$d = \frac{c}{2} - \frac{a}{2} = \left(\frac{c-a}{2}\right)$$

$$b = \frac{c}{2} + \frac{a}{2} = \left(\frac{c+a}{2}\right)$$

$$\frac{1}{K} = \frac{4}{c-a} - \frac{4}{c+a}$$

$$K = \frac{(c-a)(c+a)}{4a}$$

$$\rho = 2\pi \frac{\Delta U}{I} K$$

Jeśli $a \Rightarrow 0$, to możemy stwierdzić, że $c+a \approx c$, więc $E = \frac{\Delta U}{a}$, a zatem:

$$\rho = \frac{\pi E}{I}(c/2)^2$$

W rzeczywistości oczywiście ***a*** nie będzie miało nigdy wartości 0, co jest zrozumiałe. W wielu opracowaniach można znaleźć nieco inne prezentacje wzoru na rezystywność dla metody Schlumbergera:

$$\rho = \pi \frac{c(a+c)}{a} \frac{U}{I}$$

c – odległość AM=BN
a – odległość MN

Źródło: Soil Resistivity Information and Field Testing
https://www.easypower.com/resources/article/soil-resistivity-information-and-field-testing

Alternatywnie:

$$\rho = \frac{\pi L^2 R}{2l}$$

L – odległość od środka układu do elektrody zewnętrznej A lub B
l – odległość od środka układu do elektrody wewnętrznej M lub N

Źródło: 08/02/2023 BY IAN Soil Resistivity Testing Method -The Schlumberger Array
https://greymattersglobal.com/soil-resistivity-testing-methods-schlumberger-array/

Niezależnie od sposobu prezentacji wzoru, wyniki są takie same lub co najmniej zbliżone.

Zalety metody:

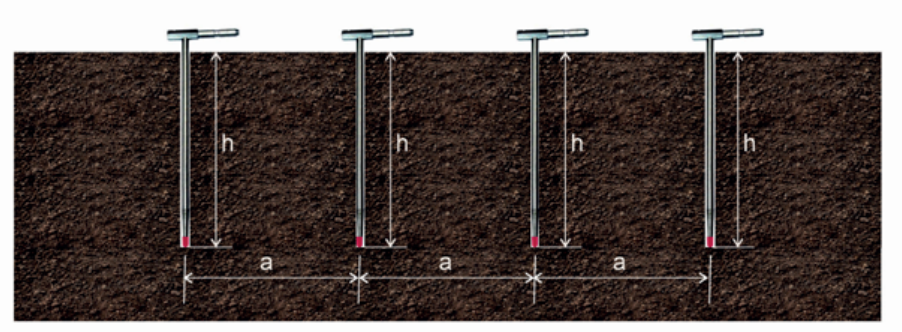
- W trakcie badań należy przesuwać tylko dwie elektrody prądowe w przypadku większości odczytów. Może to odrobinę skrócić czas potrzebny do uzyskania sondowania.
- Ponieważ elektrody potencjałowe pozostają w stałych miejscach, skutki bocznych zmian rezystywności i wpływ innych czynników przy powierzchni są zmniejszone.

Wady metody:

- Ponieważ potencjalny odstęp między elektrodami napięciowymi jest mały w porównaniu z odstępem między elektrodami prądowymi, w przypadku dużych odstępów między elektrodami prądowymi wymagane są bardzo czułe woltomierze.
- Ogólnie interpretacje oparte na sondowaniach będą ograniczone do prostych, poziomo ułożonych struktur

3.1.2 Układ pomiarowy dla metody Wennera

Pomiar rezystywności gruntu również odbywa się przy użyciu czterech elektrod, rozmieszczonych liniowo w równych odległościach ***a*** i pogrążonych na głębokość ***h***. Cechą szczególną tej metody jest proporcjonalna zależność pomiędzy odległością ***a***, na jaką rozstawione są sondy, a głębokością, na którą wnika płynący prąd. Zmierzona wartość rezystywności gruntu jest wartością średnią w obszarze półkuli o średnicy równej 3***a***.



Rys. 6. Metoda Wennera. Rozstaw sond

Wartość rezystywności gruntu wyznaczamy ze wzoru:

$$\rho = \frac{4\pi aR}{1+\frac{2a}{\sqrt{a^2+4h^2}}-\frac{2a}{\sqrt{4a^2+4h^2}}}$$

Jako że powyższy układ jest symetryczny, w przypadku, gdy ***a***>***h***, można uprościć wzór do postaci:

$$\rho = 2\,\pi \cdot a \cdot Rx$$

Podobnie w przypadku $a<h$:

$$\rho = 4\pi \cdot a \cdot Rx$$

gdzie:
ρ – rezystywność gruntu, w Ωm
Rx – wartość rezystancji, w Ω (U/I)
a – odległość pomiędzy elektrodami, w m
h – głębokość pogrążenia sond, w m

W ten sposób możemy określić przedział głębokości, do której występuje wskazana rezystywność. Głębokość ta wynosi od około **0,7*a*** do ***a*** w zależności od sposobu obliczeń. Przy metodzie pełnej, tzn. nie uproszczonej, z izolowanymi sondami z kontaktem tylko na końcu elektrody, obszar ten jest bliżej głębokości wynoszącej ***a***. Powszechnie stosowana metoda uproszczona jest interpretowana różnie w różnych źródłach, np.:

- "IEEE Std 81 IEEE Guide for Measuring Earth Resistivity", zakłada, że głębokość h, do jakiej wykonywany jest pomiar, odpowiada w przybliżeniu rozstawowi sond:

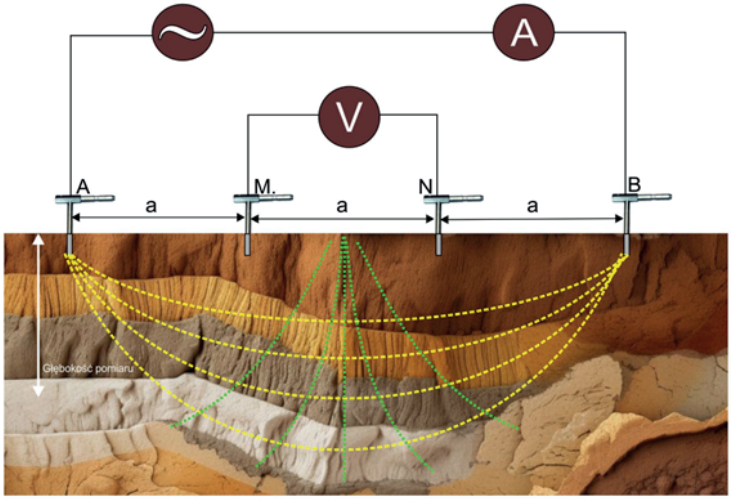
$$h = a$$

- W książce G.F. Tagg "Earth Resistances" dla metody uproszczonej:

$$h = 0{,}75a$$

- W instrukcjach obsługi niektórych przyrządów pomiarowych można znaleźć zależność:

$$h \approx 0{,}7a$$



Rys. 7. Metoda Wennera. Układ sond pomiarowych

Zalety metody:

- Potencjalny odstęp między elektrodami napięciowymi zwiększa się wraz ze wzrostem aktualnego odstępu między elektrodami prądowymi. Wymagane są mniej czułe woltomierze.

Wady metody:

- W trakcie badań wszystkie cztery elektrody muszą być przestawiane.
- Metoda ta może być bardziej podatna na przypowierzchniowe, boczne zmiany rezystywności.

Pomiary wykonuje się w serii, zmieniając odległość między sondami – w ten sposób jesteśmy w stanie określić głębokość, na jakiej występuje najmniejsza rezystywność (m.in. pozwala to wybrać najbardziej ekonomiczny sposób budowy uziomu).
Metody Wennera i Schlumbergera są powszechnie wykorzystywane do badań rezystywności gruntu na całym świecie. Istnieje oczywiście jeszcze wiele innych metod bardziej lub mniej zaawansowanych i w zależności od potrzeb stosowanych w praktyce. Przeprowadzone badania dla różnych głębokości sondowania oraz porównanie obliczonych na ich podstawie wartości rezystancji dają zbliżone rezultaty, możemy zatem przyjąć, że obie metody są w równym stopniu skuteczne. Należy jednak pamiętać, że bez względu na zastosowaną metodę doboru ***a***, mierzymy rezystywność gruntu do określonej głębokości, a nie na określonej głębokości.

Każde zadanie staje się prostsze, jeśli mamy pod ręką przykład liczbowy.

3.1.3 Porównanie obliczeń metodami Wennera i Schlumbergera

Założenia:

I = 20 mA
$R = (\frac{U}{I}) = 5\Omega$

Głębokość pogrążenia sond ***h*** = 0,3 m
Odstęp między sondami ***a*** = 6 m

Metoda Wennera (pełna):

$$\rho = \frac{4\pi aR}{1 + \frac{2a}{\sqrt{a^2 + 4h^2}} - \frac{2a}{\sqrt{4a^2 + 4h^2}}} = \frac{376{,}8}{1{,}99} = \mathbf{189{,}3\ \Omega m}$$

Metoda Wennera (uproszczona):

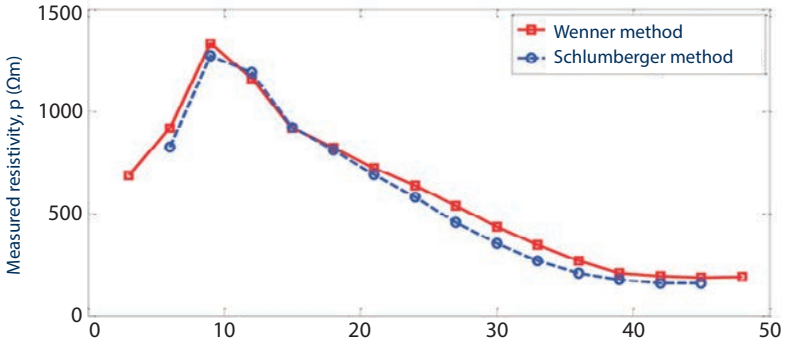
$$\rho = 2\pi aR = \mathbf{188{,}4\ \Omega m}$$

Metoda Schlumbergera:

$$\rho = k\frac{U}{I} = k \times 5\,\Omega = \frac{2\pi}{\frac{1}{a}-\frac{1}{b}-\frac{1}{c}+\frac{1}{d}} 5\,\Omega = 36{,}9\,m \times 5\,\Omega = \mathbf{184{,}7\,\Omega m}$$

Zaprezentowane obliczenia wskazują na równoważność metod. Jednocześnie najpowszechniej stosowana, uproszczona metoda Wennera jest w zupełności wystarczająca do zastosowań praktycznych. Zwolennicy uwzględniania głębokości pogrążania sond pomocniczych oczywiście mają rację, że różnice występują, jednak ma to znaczenie wyłącznie w rozważaniach naukowych.

Wyniki rzeczywistych pomiarów porównano na rysunku 8.



Rys. 8. Praktyczne pomiary rezystywności gruntu w tej samej lokalizacji metodami Wennera i Schlumbergera. Źródło: IET Science Measure & Tech, Volume: 15, Issue: 2, Pages: 120-129, First published: 05 January 2021, DOI: (10.1049/smt2.12009)

3.2 Pomiary rezystywności gruntu w przykładach praktycznych

Opisywanie zjawisk i sposobów wykonywania badań dla określenia rezystywności zastępczej gruntu to nie tylko teoretyczne rozważania czy intelektualna rozrywka, ale również podstawa dla praktycznego zastosowania ich w codziennej pracy elektryka zajmującego się wykonawstwem instalacji elektrycznych i uziemiających. Nawet przy najprostszych, zdawać by się mogło, drobnych realizacjach uziemień opisywane pomiary będą nieocenioną pomocą.

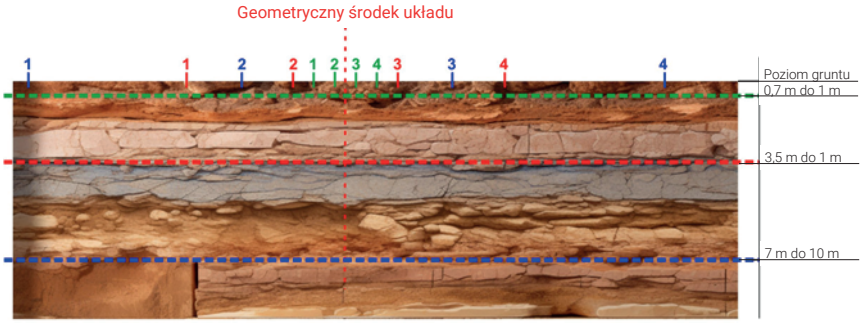
3.2.1 Przykład. Uziom prosty pionowy. Uziemienie GSU

Podczas budowy domu (rysunek 9), w którym nie przewidziano układu uziemiającego, należało uziemić główną szynę uziemiającą. Pracę powierzono wykonawcy prac elektrycznych, poprzedzając to kardynalnym pytaniem: "Ile to będzie kosztowało?" (Pomijając pozostałe pytania: "Po co to?", "A czy to trzeba?" itp.)



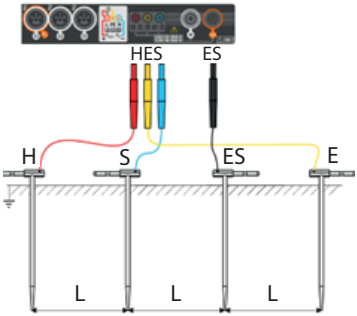
Rys. 9. Układ sond przy pomiarach rezystywności gruntu

Oszacowanie rezystywności zastępczej gruntu za pomocą pokazanej na rysunku metody Wenera jest proste i wystarczające do obliczenia parametrów uziemienia i oszacowania kosztów, jeśli zachowane zostaną podstawowe zasady wyznaczania kierunku, odległości pomiędzy sondami oraz samego miejsca badania. Miejsce pogrążenia uziomu pionowego przewidziano blisko miejsca, w którym wszystkie media są wprowadzone do budynku poprzez wspólny przepust (środek linii, na której wykonano pomiary – czerwona przerywana linia). Sondowanie rezystywności odbyło się z odstępem miedzy sondami 1 m, 5 m i 10 m. Otrzymano w ten sposób trzy wartości rezystywności zastępczej gruntu (rysunek 10).



Rys. 10. Przekrój pionowy gruntu wzdłuż linii pomiaru, na której rozstawiono sondy pomiarowe

Numery na rysunku 10 oznaczają położenie sond pomiarowych. Kolor zielony to rozstaw co 1 m, czerwony – co 5 m, niebieski – co 10 m. Pomiary wykonano miernikiem Sonel MPI-540. Przyłączenie przewodów do miernika pokazane jest na rysunku 11 i analogicznie odpowiada to numerom dla sond z rysunku 10: 1 – gniazdo **H**, 2 – gniazdo **E**, 3 – gniazdo **S**, 4 – gniazdo **ES**.



Rys. 11. Podłączenie przewodów do miernika.

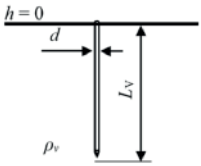
Otrzymane podczas pomiarów wyniki rezystywności zastępczej gruntu przyjęły następujące wartości:

- Dla rozstawu sond co 1 m ρ ≈ 470 Ωm na głębokości od ok. 70 cm do 1 m.
- Dla rozstawu sond co 5 m ρ ≈ 120 Ωm na głębokości od ok. 3,5 m do 5 m.
- Dla rozstawu sond co 10 m ρ ≈ 37 Ωm na głębokości od ok. 7 m do 10 m.

Rezystywność zastępcza, którą wyznaczyliśmy w pomiarach, będzie występować oczywiście w najbliższej okolicy geometrycznego środka układu. Pozostaje wykonać obliczenia rezystancji uziemienia dla planowanego pręta. Jak można zaobserwować, wraz ze wzrostem głębokości rezystywność się zmniejsza. Dostępne elementy, czyli pręty pionowe, miały 2 m długości, postanowiono więc zastosować trzy sztuki. Uziom pionowy zostanie wybity na głębokość blisko 7 m (licząc od dna wykopu głębokiego na ok. 80 cm).

Obliczenie rezystancji takiego uziemienia jest niezwykle proste, chociaż istnieje kilka metod uważanych za równoważne. W tabeli 7 podano wzory na obliczenie rezystancji uziemienia pojedynczego uziomu pionowego.

Tab. 7. Zestawienie porównawcze wzorów na rezystancję pojedynczego uziomu pionowego
Źródło: https://rst.pl/uklady-uziomow-pionowych/

Źródło	Wzór	Założenia (wartości R_V, ρ_V zmierzone na poletku doświadczalnym CBM-Technology w dniu 24.10.2019 r.)	
PN-HD 60364-5-54 [1]	$R_V = \frac{\rho_v}{L_V} = 4{,}60\ \Omega$	Wynik pomiaru: R_V = 5,37 Ω	R_V – rezystancja uziemienia pojedynczego uziomu pionowego, Założenia: L_V = 9 m – długość uziomu pionowego ρ_V = 41,4 Ωm – rezystywność gruntu d = 14,2 mm – średnica uziomu pionowego r = 8 mm – promień uziomu pionowego 
Wokowiński [2]	$R_V = 0{,}84\frac{\rho_v}{L_V} = 3{,}86\ \Omega$		
PN-EN 50522 [3] PN-EN 50341 [4]	$R_V = \frac{\rho_v}{2\pi L_V} ln\left(\frac{4L_V}{d}\right) = 5{,}74\ \Omega$		
Markiewicz [5]	$R_V = \frac{\rho_v}{4\pi L_V} ln\left(\frac{4L_V{}^2}{r^2}\right) = 5{,}74\ \Omega$		
BS 7430:2015 [6] IEEE-80-2013 [7]	$R_V = \frac{\rho_v}{2\pi L_V}\left[ln\left(\frac{8L_V}{d}\right) - 1\right] = 5{,}51\ \Omega$		
IEEE-142-2007 [8]	$R_V = \frac{\rho_v}{2\pi L_V}\left[ln\left(\frac{4L_V}{r}\right) - 1\right] = 5{,}51\ \Omega$		
MIL-HDBK-419A [9]	$R_V = \frac{\rho_v}{2\pi L_V} ln\left(\frac{3L_V}{d}\right) = 5{,}53\ \Omega$		

Odpowiednio wg:

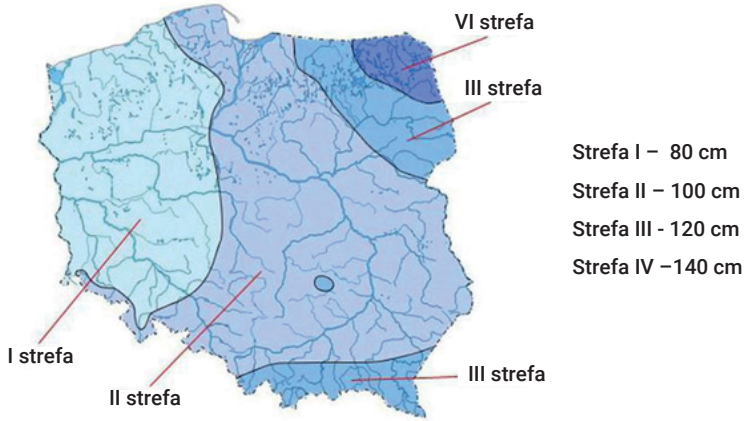
1) PN-HD 60364-5-54: 2011 Instalacje elektryczne niskiego napięcia — Część 5-54: Dobór i montaż wyposażenia elektrycznego — Układy uziemiające i przewody ochronne
2) Wołkowiński K., Uziemienia urządzeń elektroenergetycznych. WNT, Warszawa, 1967 Ω
3) PN-EN 50522: 2011 Uziemienie instalacji elektroenergetycznych prądu przemiennego o napięciu wyższym od 1 kV
4) PN-EN 50341-1:2013-03 Elektroenergetyczne linie napowietrzne prądu przemiennego powyżej 1 kV — Część 1: Wymagania ogólne — Specyfikacje wspólne
5) Markiewicz H., Klajn A., Uziemienia i EMC. Układy uziomowe – Podstawowe zagadnienia konstrukcyjne. Polskie Centrum Promocji Miedzi, Wrocław 2004
6) BS 7430+A1-2015 Code of practice for protective earthing of electrical installations
7) IEEE-80-2013 IEEE Guide for Safety in AC Substation Grounding
8) IEEE-142-2007 IEEE Recommended Practice for Grounding of Industrial and Commercial Power Systems
9) MIL-HDBK-419A Grounding, bonding, and shielding for electronic equipments and facilities volume 1 of 2, 1987

Dużym ułatwieniem jest możliwość skorzystania z kalkulatora uziemień na stronie www.rst.pl. Do obliczeń przyjęto zatem wzór wg BS 7430 oraz IEEE-80 (według tego działa kalkulator na stronie) oraz dane:

- głębokość pogrążenia uziomu: ok. 5 m oraz 7 m (pręt w wykopie 80 cm),
- rezystywność zastępcza gruntu: odpowiednio ρ=120 Ωm i ρ=37 Ωm.

Obliczona rezystancja uziemienia dla pręta kutego St/Cu 16 mm wynosi: dla 5 m około 28,5 Ω, dla 7 m około 6,88 Ω. Poprawnie zdecydowano o trzech prętach po dwa m.b. W efekcie wykonanej pracy wiemy, czego możemy się spodziewać: ile trzeba materiału, ile będzie on kosztował oraz jak długo będziemy zaangażowani przy budowie takiego uziemienia.
Następnie zweryfikowano teorię z praktyką. Po wykonaniu uziemienia przeprowadzone pomiary rezystancji uziemienia potwierdziły poprawność procedury określenia rezystywności gruntu i obliczeń rezystancji uziemienia. Wynik pomiarów: 7,12 Ω. Pozostaje do rozważenia temat sezonowych zmian rezystywności gruntu. Jak już wcześniej wspomniano, każdy przypadek należy potraktować indywidualnie. Co wiemy?

1) Okres budowy i pomiarów uziemienia przypadł na maj 2023 r., który był znacznie bardziej suchy niż przeciętnie. Dodatkowo poprzedzające miesiące też należały do raczej suchych (woj. kujawsko-pomorskie), z opadami znacznie poniżej średnich.
2) Grunt w ocenie geologicznej był piaszczysto-gliniasty i sprasowany pylisty, zatem ze sporą zdolnością do utrzymywania w miarę stabilnych warunków związanych z wilgotnością oraz zdolnością do utrzymania elektrolitu.
3) Uziom pogrążony w gruncie o małej rezystywności na stosunkowo dużej głębokości ok. 7 m.
4) Pogrążenie uziomu znacznie poniżej strefy przemarzania gruntu. Dla tej lokalizacji 80 cm.

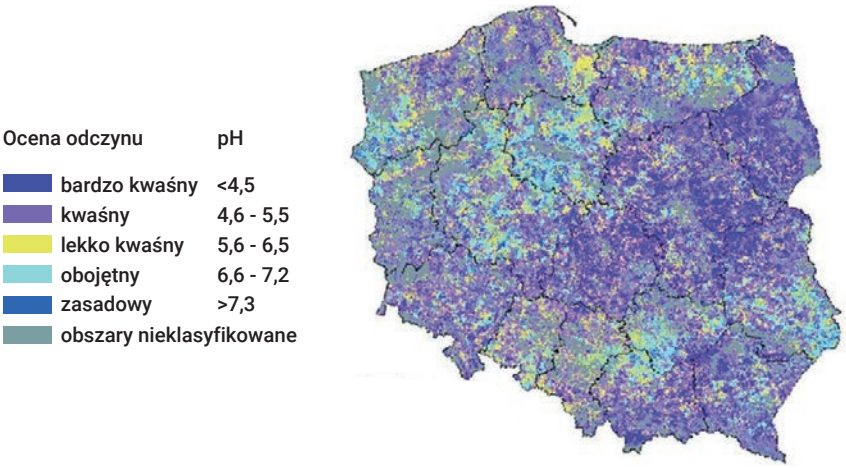


Rys. 12. Strefy przemarzania gruntu w Polsce. Autor: GEOTEST

Podsumowując, używanie dla tego przykładu współczynników sezonowych zmian rezystywności gruntu nie ma sensu – chyba że współczynnik wyniesie 1.

3.2.2 Średnie rezystywności gruntu. Trudności szacunkowe

Kluczem do poprawnego projektu układu uziemiającego jest wykonanie pomiarów rezystywności gruntu. Jak wynika z poprzednio wyjaśnionych kwestii związanych z tymi działaniami, pomiary wymagają czasu. Trzeba udać się na wskazane miejsce, przeprowadzić nie jeden, ale kilka lub więcej pomiarów. Np. przy budowie linii elektroenergetycznej lub modernizacji uziemienia słupów trzeba wykonać kilka pomiarów dla każdego miejsca, gdzie słup będzie lub jest posadowiony. Rodzi to pokusę przyjmowania wartości orientacyjnych na podstawie dostępnych danych średnich, występowania rodzajów gleb i ich charakterystyki. Mapy takie są powszechnie wykorzystywane w różnych celach geologicznych, rolniczych itp. Przykład pokazano na rysunku 13.



Rys. 13. Mapa gruntów na obszarze Polski o różnych odczynach
Źródło: Instytut Uprawy, Nawożenia i Gleboznawstwa, Państwowy Instytut Badawczy, Studia i Raporty nr 7, Puławy 2007, s. 82

Jeśli mapę z rysunku 13 skorelujemy z mapą rodzajów gruntów dla wybranego terenu, to oczywiście można podjąć próbę i oszacować średnią rezystywność na danym obszarze i oszczędzić sobie pracy. Natomiast takie działanie niesie za sobą dwa niebezpieczeństwa. Pierwsze to przyjęcie wartości wyższych niż te występujące w rzeczywistości, a drugie to sytuacja odwrotna, czyli wartości rezystywności będą wyższe niż faktycznie występujące w danym miejscu. Można łatwo sobie wyobrazić pierwszą z wymienionych sytuacji, w której nastąpi przewymiarowanie instalacji uziemiającej. Rozpatrując taki przypadek w kategorii pojedynczego uziemienia oczywiście robi to niewielkie wrażenie – jeden pręt miedziowany więcej czy mniej to mała różnica. Jeśli jednak będzie to obiekt przemysłowy lub linia napowietrzna, straty finansowe z tytułu przewymiarowania uziemienia będą znacznie bardziej bolesne. Częściej zdarza się jednak zbyt optymistyczne szacowanie rezystywności zastępczej gruntu. Jeden z bardziej drastycznych przykładów zakładał rezystywność na poziomie $\rho = 300\ \Omega m$ i dla takiej zaprojektowano układ uziemiający dla obiektu ze stacją Sn/nn. W rzeczywistości zmierzona rezystywność plasowała się w okolicy około $3800\ \Omega m$. Jak teraz – w sytuacji, kiedy inwestycja opiera się o postępowanie przetargowe – zrealizować założone parametry uziemienia i uzasadnić koszty większe o kilkaset procent ze względu na projekt wykonany w oparciu o niepoprawne dane? Przy projektowaniu uziemień grunty rozpatrujemy w większości przypadków jako dwuwarstwowe rzadziej trójwarstwowe. Proste pojedyncze uziemienia liczymy jak byłyby budowane w jednej warstwie, dla jednej wartości zmierzonej ρ.

Tylko rzeczywiste pomiary rezystywności w terenie pozwolą na poprawne zaprojektowanie i budowę uziemienia o oczekiwanych parametrach.

Przedstawione do tej pory podstawowe informacje dotyczące rezystywności gruntu oraz jego innych właściwości chemiczno-geologicznych są wystarczające, aby można było swobodnie poruszać się czy to w temacie projektowania prostych układów uziemień, czy też w obszarze szacowania ich właściwości w czasie eksploatacji.

4 Rezystancja uziemienia

Pomiar rezystancji uziemienia stanowi kluczowy element w dziedzinie szeroko pojętej elektryczności i związanego z nią bezpieczeństwa elektrycznego. Uziemianie, czyli łączenie układów elektrycznych z ziemią, ma długą historię jako podstawowy sposób zapewniający bezpieczeństwo funkcjonowania systemów elektrycznych. Począwszy od systemów odgromowych, powszechnie kojarzonych z uziemieniem jako takim, aż po bardziej złożone uziemienia w przemyśle czy budownictwie, właściwie przeprowadzona kontrola i pomiar rezystancji uziemienia stanowią niezbędne narzędzia w zachowaniu bezpieczeństwa oraz prawidłowej pracy urządzeń i instalacji.

Historia uziemień odgromowych sięga czasów, gdy ludzie zaczęli zdawać sobie sprawę z destrukcyjnej mocy piorunów i konieczności ich kontrolowania. Początkowo kierowano się prostą zasadą: ładunek elektryczny należy odprowadzić do ziemi, aby uniknąć szkód. Niewątpliwie za ojca systemów odgromowych uznaje się Benjamina Franklina. Jednak w tym samym czasie (w latach 1750-1754) czeski teolog i wynalazca Václav Prokop Diviš odkrył tę samą zasadę działania piorunochronu całkowicie niezależnie od Benjamina Franklina. Na terenach polskich w formie pisanej w roku 1784 ksiądz Józef Herman Osiński wydał pierwszy polski podręcznik elektrotechniki pt. "Sposób ubezpieczający życie i majątki od piorunów", opisując w nim montaż piorunochronu i poradnik ratowania osób poszkodowanych w wyniku porażenia piorunem.

Współczesne systemy odgromowe to efekt wieloletnich badań i innowacji, a ich podstawą jest efektywne uziemienie, które zapobiega uszkodzeniom budynków oraz chroni ludzi przed skutkami wyładowań atmosferycznych.

Uziemienie to nie tylko kwestia bezpieczeństwa związanego z ochroną przed burzami i piorunami. W czasach współczesnych, gdy niemal każdy obszar życia zależy od energii elektrycznej, istnieje wiele rodzajów uziemienia, z których każde ma swoje specyficzne zadania do spełnienia. Systemy elektryczne, telekomunikacyjne, przemysłowe czy nawet pojazdów elektrycznych – wszystkie wymagają właściwego uziemienia w celu zapewnienia stabilnej i bezpiecznej pracy. Ważne jest, aby każde uziemienie spełniało kilka kluczowych zadań. Po pierwsze, ma ono redukować potencjał elektryczny elementów systemu względem ziemi, minimalizując ryzyko porażenia prądem elektrycznym. Po drugie, uziemienie pomaga w stabilizacji napięcia oraz równomiernym rozkładzie ładunków elektrycznych, co chroni urządzenia przed uszkodzeniami i awariami. Po trzecie, prawidłowe uziemienie jest kluczowe w zapewnieniu efektywnego działania układów ochrony przeciwporażeniowej, które wykrywają i neutralizują zagrożenia związane z przepływem prądu przez ciało ludzkie. Dzięki wiedzy na temat uziemienia, opisanych wyżej właściwości gruntu oraz umiejętności poprawnego pomiaru jego rezystancji będziemy mogli przyczynić się do zapewnienia nie tylko bezpieczeństwa, ale również niezawodności naszych systemów elektrycznych.

Uziemienia możemy podzielić na trzy główne grupy.

- Uziemienie robocze – uziemienie np. punktu neutralnego transformatora, wykonane w celu zapewnienia prawidłowej pracy urządzeń elektroenergetycznych w warunkach zwykłych i zakłóceniowych.
- Uziemienie ochronne – uziemienie jednego lub wielu punktów sieci, instalacji lub urządzenia dla celów bezpieczeństwa.
- Uziemienie funkcjonalne – uziemienie jednego lub wielu punktów sieci, instalacji lub urządzenia dla celów innych niż bezpieczeństwo elektryczne.

Podchodząc do tematu nieco żartobliwie, można te wszystkie rodzaje uziemień zdefiniować jako sporą ilość metalowych elementów zakopanych w ziemi. I to stanowi klucz do rozważań na temat pomiarów rezystancji uziemienia.

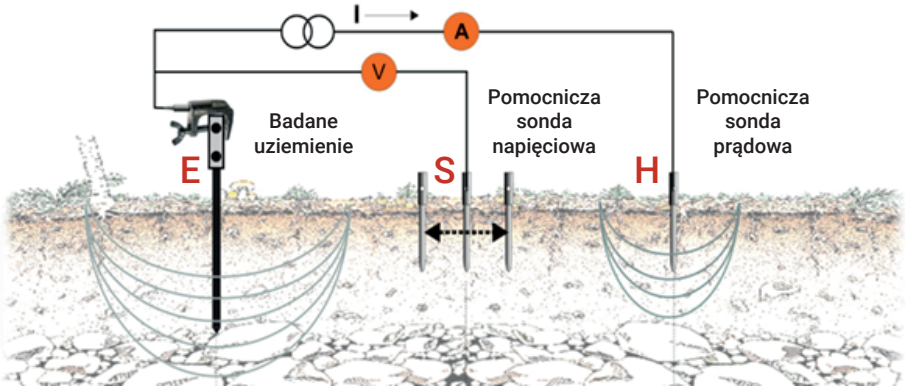


Rys. 14. Przykładowe elementy do budowy uziemienia

4.1 Pomiar rezystancji uziemienia. Metoda techniczna spadku potencjału

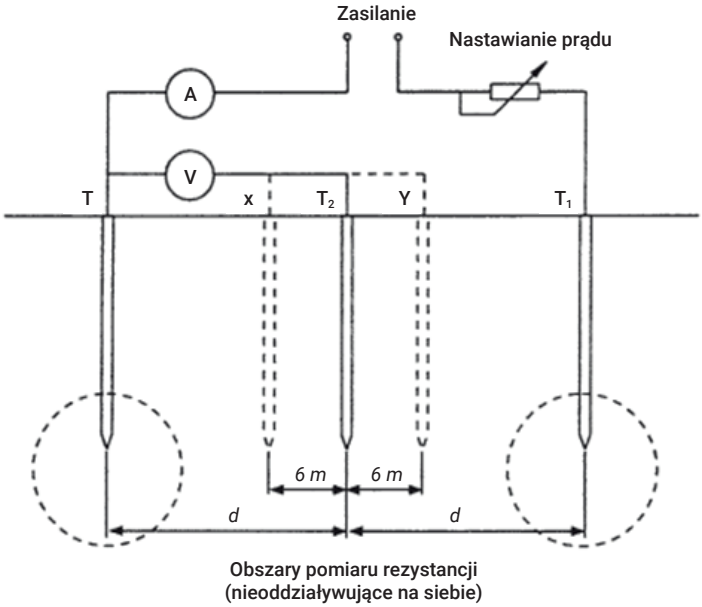
Sprawdzenie rezystancji uziemienia będzie polegało na zmierzeniu prądu przepływającego przez uziemienie (i oczywiście grunt, w którym jest ono zakopane) i zmierzeniu na nim spadku napięcia, co pozwoli, wykorzystując prawo Ohma, wyliczyć jego rezystancję. Jak wynika z tego założenia, rodzaj uziemienia dla samego pomiaru jest elementem drugorzędnym. Ta informacja potrzebna jest dopiero po badaniu: w celu oceny skuteczności uziemienia porównujemy wartość zmierzoną z wymaganą, zależną od roli spełnianej przez kontrolowany obiekt.

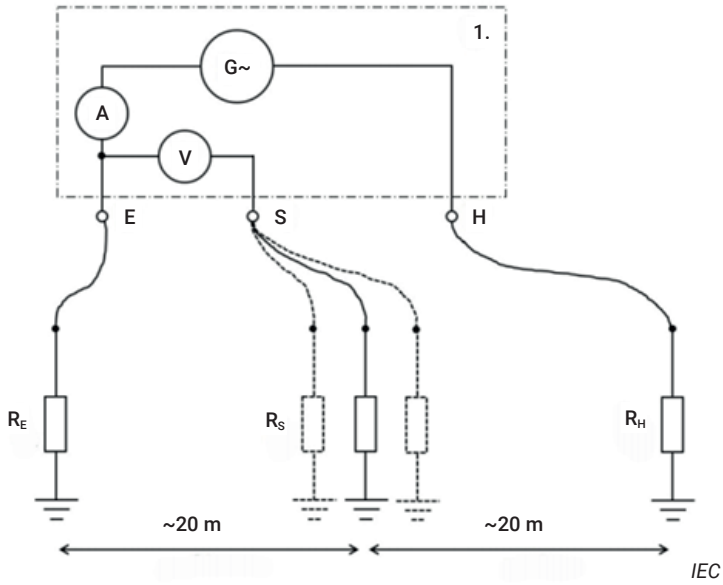
Elementem kluczowym będzie zatem spowodowanie, aby w badanym uziemieniu pojawił się mierzalny prąd pomiarowy. Realizowane jest to poprzez zbudowanie obwodu elektrycznego, który składa się z badanego uziemienia, pewnego obszaru gruntu i pomocniczej sondy prądowej wbitej w grunt w pewnej odległości od uziemienia. Druga sonda pomocnicza – napięciowa – z reguły umieszczana jest pomiędzy uziemieniem a sondą prądową. Pozwala na podłączenie układu woltomierza do wykonania pomiaru spadku napięcia na badanym uziemieniu.



Rys. 15. Układ rozmieszczenia sond pomocniczych. Pomiar metodą techniczną spadku potencjału

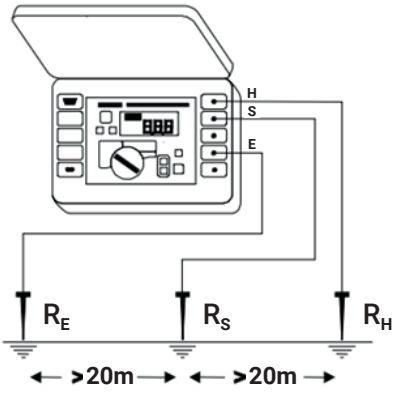
Pomiędzy punktami E i H musi pojawić się prąd pomiarowy wygenerowany przez źródło (np. przetwornicę w mierniku), a pomiędzy E i S wykonamy pomiar napięcia woltomierzem. Schemat budowy układu pomiarowego można znaleźć w normie PN-HD 60364-6 z 2008 r. i wydania z 2016 r.





Rys. 16. Schemat układu pomiarowego. Wyżej norma z 2008 r. Niżej norma z 2016 r.

W instrukcja obsługi przyrządów pomiarowych prezentowane jest to w podobny sposób. Przykład pokazany jest na rysunku 17.

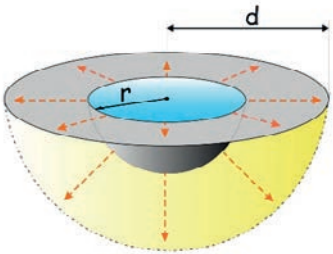


Rys. 17. Podłączenie miernika Sonel MRU-101 – pomiar rezystancji uziemienia

Mimo, wydawać by się mogło, niezwykłej prostoty takiego układu pomiarowego, pojawia się tu trudność polegająca na wyznaczeniu odległości do sond pomocniczych od badanego uziemienia. Jak pokazuje praktyka, ten problem stanowi najczęstszy powód popełniania błędów w pomiarach i frustracji ze względu na brak powtarzalności wyników. Wrażenie, które można by odnieść po analizie rysunków 16 i 17, spowoduje zapewne przyjęcie 20 m jako tej odległości, która będzie właściwa i to bez względu na rozległość i geometrię uziemienia. Jeśli dodamy do tego wyposażenie standardowe przyrządów do pomiarów uziemień, gdzie przewody pomiarowe mają długość przykładowo 50 m dla sondy prądowej i 25 m dla sondy napięciowej, to wrażenie magicznych „20 m" zostanie tym bardziej ugruntowane. Niestety jest to błędne wrażenie. Odległości te są jedynie poglądowe i stanowią raczej niezbędne minimum, a nie złoty standard.
W celu wyjaśnienia znaczenia odległości pomiędzy uziemieniem a sondami pomocniczymi niezbędne jest wsparcie się odrobiną teorii i obliczeń, aby przykład był bardziej obrazowy.

4.2 Podstawy teoretyczne metody spadku potencjału

Ze względu na radialny rozkład prądu w trakcie jego przepływu w badanym uziemieniu oraz łatwość obliczeń, przykładem uziemienia będzie półsfera o promieniu *r*, pogrążona w ziemi o rezystywności **ρ**.



Rys. 18. Uziemienie w kształcie półsfery

Obliczenie teoretycznej rezystancji dla takiego uziemienia nie jest trudne i opisuje to wzór:

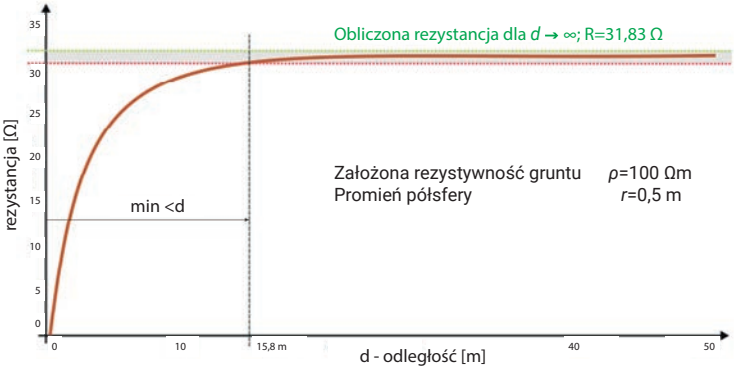
$$R_{\infty} = \frac{\rho}{2\pi r}$$

gdzie:
ρ – rezystywność gruntu
r – promień półsfery

R_{∞} to jednak rezystancja wyliczona dla punktu znajdującego się w nieskończoności w stosunku do uziemienia. Nieskończoność to dość kłopotliwa wartość. Przyjmijmy zatem, że odległość od przykładowego uziemienia z rysunku 18 wynosić będzie jakąś mierzalną wartość ***d***. Zakładać należy jednocześnie, że otrzymane wyniki obliczeń w odległości ***d*** powinny być takie same lub bardzo zbliżone jak dla nieskończoności. Wzór na rezystancję uziemienia wzbogaci się o zmienną ***d*** i przyjmie postać:

$$R = \frac{\rho}{2\pi}\left(\frac{1}{r} - \frac{1}{d}\right)$$

Prezentacja obliczonej rezystancji uziemienia w funkcji odległości d pokazuje wykres na rysunku 19.

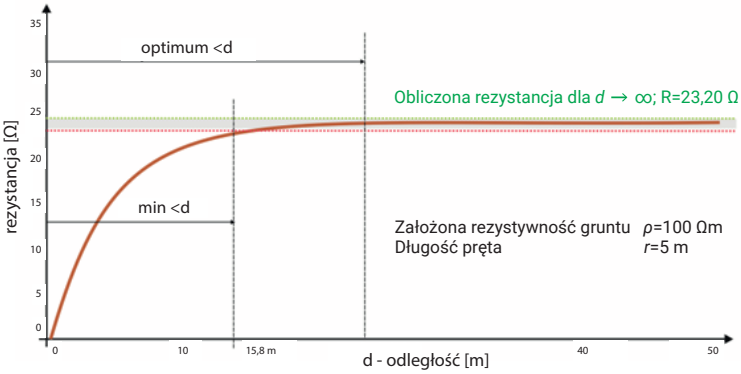


Rys. 19. Rozkład rezystancji w funkcji odległości

Dla założonych parametrów rezystywności ρ = 100 Ωm i promienia półsfery r = 0,5 m obliczona rezystancja uziemienia to R = 31,83 Ω, zaznaczona na wykresie zieloną przerywaną linią. Linia przerywana w kolorze czerwonym to arbitralnie przyjęty błąd o wartości ok. 5%. Linia brązowa to wartość rezystancji dla zmiennej odległości ***d***. Dla tego przykładu otrzymane wyniki rezystancji wyliczane dla nieskończoności są zbieżne z obliczanymi dla odległości od 15,8 m. Odległości poniżej tej wartości spowodują powstanie niebezpiecznego błędu. Otrzymane wartości rezystancji będą mniejsze niż te, które występują rzeczywiście dla prezentowanego układu. Zawsze istnieje jakaś minimalna odległość od uziemienia do punktu obliczeniowego, poniżej której otrzymane wyniki będą zaniżone. Wyznaczenie tej odległości jest zależne od rozległości i geometrii uziemienia i trudno tu znaleźć jakąś żelazną zasadę. Dla każdego przypadku będzie to kwestia indywidualna z założeniem, że im dalej, tym lepiej.

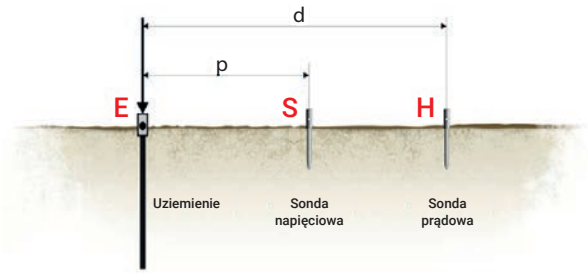
Każde uziemienie wymaga indywidualnego podejścia do pomiaru jego rezystancji ze względu na wiele zmiennych czynników decydujących o tej wartości w danym miejscu.

Każde uziemienie, niezależnie od kształtu i rozległości, będzie podlegało tym samym zasadom. Dla uziemienia w postaci pręta pionowego, pogrążonego na 5 m w gruncie, rozkład rezystancji w funkcji odległości będzie bardzo zbliżony do prezentowanego wcześniej przykładu uziemienia półsferycznego. Różnice pojawią się w obliczonej wartości rezystancji i ewentualnych odległościach krytycznych od przykładowego uziemienia. Dla przykładu z rysunku 20 interesujące jest, iż optymalna odległość do wykonania pomiaru będzie znajdować się w okolicy ok. 30 m od badanego uziemienia. Nie można zapomnieć, że pręt wbity w ziemię na głębokość 5 m to najprostszy rodzaj uziemienia, jaki można sobie wyobrazić, a odległość do punktu obliczeniowego, która powinna być zachowana (do sondy prądowej w warunkach rzeczywistych) to ok. 30 m!



Rys. 20. Rozkład rezystancji w funkcji odległości dla pręta o długości 5 m

Należy przyjąć, że nawet dla najprostszych i nierozległych uziemień trzeba zwracać uwagę na kryteria konieczne do ustalenia właściwych odległości pomiędzy poszczególnymi punktami układu pomiarowego. Rozwijając ten układ, analogicznie do sytuacji rzeczywistej, w której do realizacji pomiaru konieczny będzie jeszcze obwód napięciowy, należy przyjąć kolejną zmienną. Zmienna ta to odległość ***p*** do pomocniczej sondy napięciowej, dzięki której możliwy będzie pomiar spadku napięcia na badanym uziemieniu.



Rys. 21. Schemat rozmieszczenia sond pomocniczych. Metoda spadku potencjału

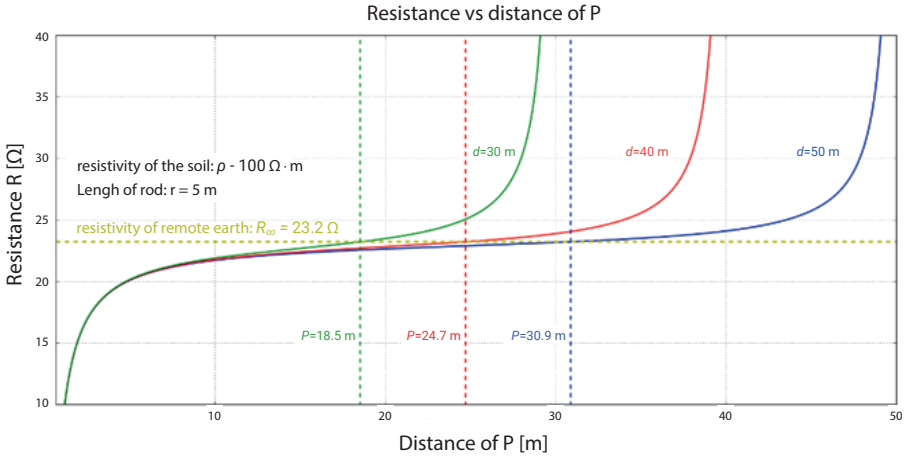
Wzór na rezystancję przyjmie następującą postać:

$$R = \frac{\rho}{2\pi}\left(\frac{1}{r} - \frac{1}{d} - \frac{1}{p} + \frac{1}{d-p}\right)$$

Jeśli pomiędzy E i H pojawi się prąd pomiarowy, to wystąpi również różnica potencjałów i z pewnością pomiędzy nimi znajdzie się miejsce o potencjale równym 0 V. I to właśnie jest idealny punkt położenia dla pomocniczej sondy napięciowej. To idealne położenie w odległości ***p*** od uziemienia można ustalić ze wzoru:

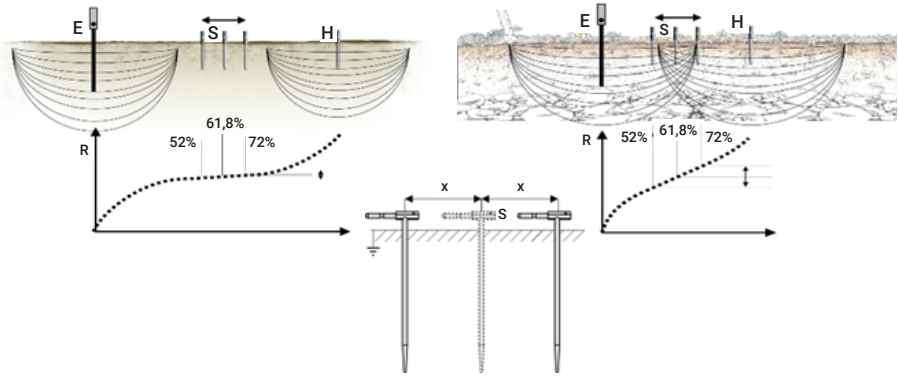
$$p = d\frac{\sqrt{5}-1}{2} \cong 0{,}628d$$

Idąc dalej w rozważaniach teoretycznych dla takiego układu, można przyjąć tezę, że dla gruntu jednorodnego umieszczenie pomocniczej sondy napięciowej w odległości ***p*** od uziemienia (gdzie ***p*** stanowi 61,8% odległości ***d*** do pomocniczej sondy prądowej) wynik będzie prawdziwy niezależnie od tego, jaka będzie faktyczna odległość ***d***. Tak wygląda najpowszechniej stosowana na świecie metoda 61,8% opisana przez dr. Tagga. Na rysunku 22 pokazane są trzy przykłady rozkładu rezystancji dla uziemienia zbudowanego jak dla układu z rysunku 20.



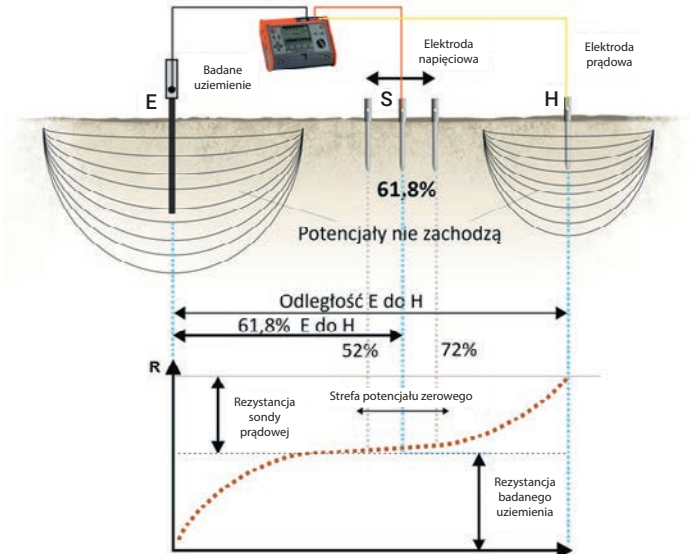
Rys. 22. Rozkład rezystancji uziemienia pręta pogrążonego 5 m w gruncie dla trzech odległości **d**

Naturalnie w warunkach rzeczywistych grunt całkowicie jednorodny nie występuje i w praktyce pomiar uziemienia należy zweryfikować poprzez wykonanie badań dla zmienionego położenia pomocniczej sondy napięciowej. Warto nadmienić, że miejsce potencjału zerowego nie jest punktem, jak mogłoby się wydawać po analizie wykresu z rysunku 22. W warunkach rzeczywistych, im dalej odstawimy pomocniczą sondę prądową, tym szerszy wystąpi obszar potencjału zerowego.



Rys. 23. Weryfikacja pomiaru rezystancji uziemienia poprzez przestawienie pomocniczej sondy napięciowej. Po lewej właściwa odległość do H. Po prawej zbyt blisko do H

W przypadku, kiedy zbyt blisko badanego uziemienia zostanie umieszczona pomocnicza sonda prądowa, obszar potencjału zerowego będzie nie do znalezienia, a kolejne pomiary z przestawianiem sondy napięciowej S dadzą diametralnie różne wyniki rezystancji uziemienia. Kiedy natomiast sonda napięciowa będzie przemieszczana w obszarze potencjału zerowego, wyniki będą bardzo zbliżone lub wręcz takie same. Na rysunku 24 pokazane są zależności, którymi można opisywać metodę techniczną spadku potencjału.



Rys. 24. Pomiar rezystancji uziemienia metodą spadku potencjału, 61,8%

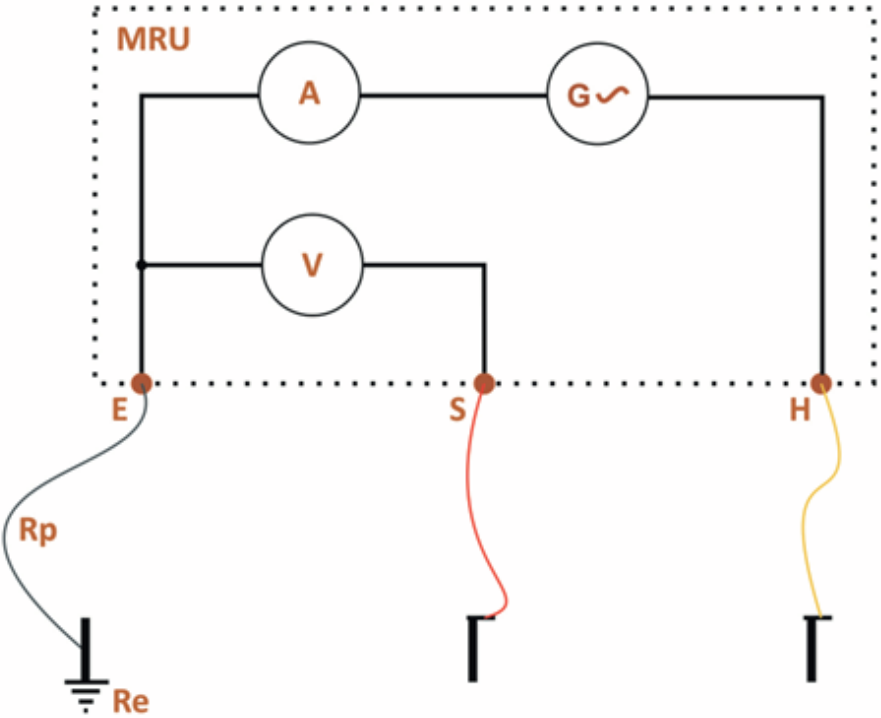
Metoda ta jest szeroko stosowana, jednak często zapomina się o weryfikacji pomiaru oraz znaczeniu odległości do pomocniczej sondy prądowej.

4.3 Odmiany metody technicznej stosowane w praktyce

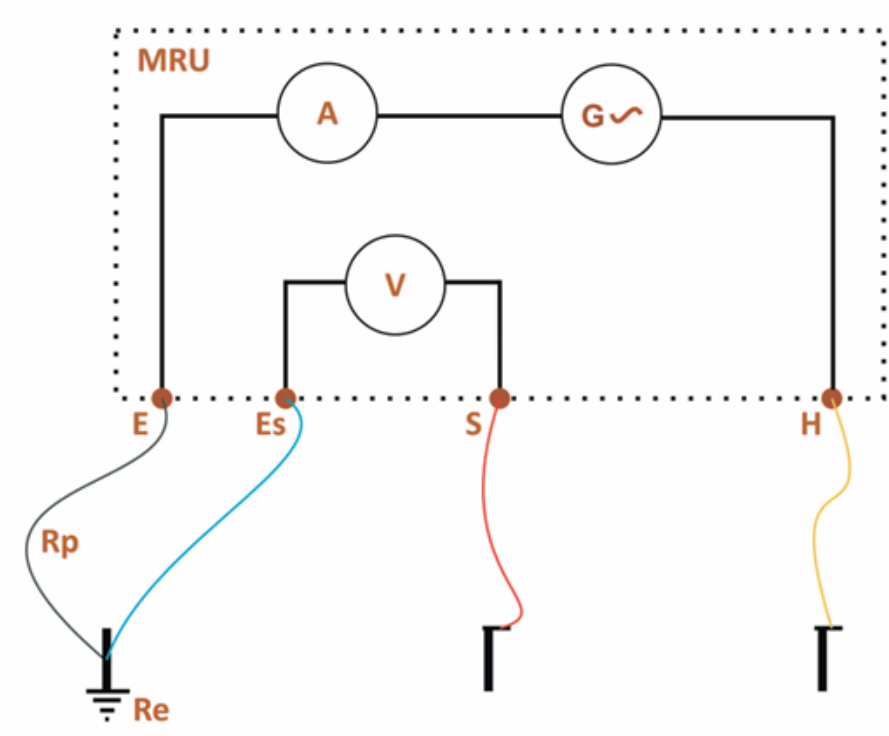
Konstrukcja mierników do pomiaru rezystancji uziemienia może się różnić w zależności od producenta, typu miernika czy planowanego zakresu zastosowania.

4.3.1 Metoda R_E3P i R_E4P

Przedstawiona metoda spadku potencjału implementowana w miernikach występuje powszechnie jako R_E3P (trójbiegunowa) i R_E4P (czteroprzewodowa).
W zasadzie to ta sama metoda – z wyjątkiem budowy obwodu do pomiaru napięcia, czyli spadku potencjału na rezystancji badanego uziemienia. W metodzie trójbiegunowej jeden zacisk miernika jest wspólny dla pomiaru napięcia i prądu. Powoduje to, że spadek napięcia mierzony jest właśnie na tym zacisku, a więc razem z rezystancją przewodu, którym łączymy miernik z badanym uziemieniem. Zwiększa to wskazywaną wartość rezystancji uziemienia o ułamek oma rezystancji przewodu pomiarowego. Prezentuje to schemat na rysunku 25.



Rys. 25. Metoda trójbiegunowa

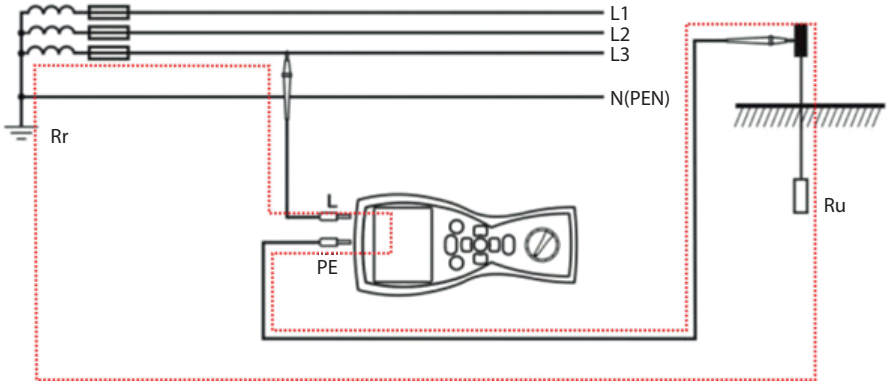


Rys. 26. Metoda czteroprzewodowa

Na rysunku 26 pokazany jest schemat dla metody czteroprzewodowej. Obwód pomiaru napięcia posiada własne zaciski napięciowe. Zakładając, że rezystancja wewnętrzna woltomierza jest bardzo duża, prąd w tym obwodzie nie występuje, a spadek napięcia w związku z tym jest badany na uziemieniu, a więc bez rezystancji przewodu pomiarowego. Zastosowanie metody R_E3P czy R_E4P jest dlatego właściwie równoważne za wyjątkiem pomiarów uziemień o wartości poniżej 1 Ω. Dla tak małych wartości rezystancji uziemienia metoda R_E4P ma uzasadnienie.

4.3.2 Pomiary metodą pętli zwarcia

Jak można zauważyć, cała metodyka pomiaru rezystancji uziemienia w zasadzie opiera się o prąd, który wymuszamy w obwodzie uziemienia i pomiarze spadku napięcia na rezystancji badanego obiektu. Nie sposób więc nie wspomnieć o możliwości przeprowadzenia pomiaru rezystancji uziemienia metodą pomiaru pętli zwarcia, wykorzystując do tego celu jakikolwiek przyrząd adresowany dla tego pomiaru. Z oferty SONEL S.A to będzie praktycznie każdy miernik z serii MZC lub MPI. Na rysunku 27 zaprezentowano, jak można wykonać taki pomiar.



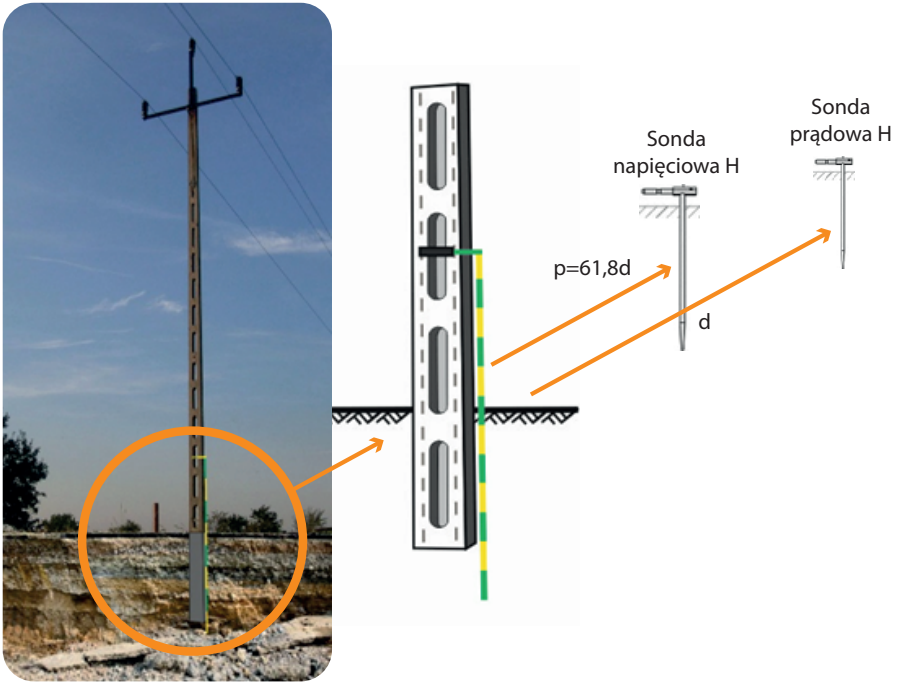
Rys. 27. Pomiar rezystancji uziemienia metodą pętli zwarcia

W tej metodzie prąd w obwodzie jest wymuszony przez zwarcie wykonane rezystorem zwarciowym miernika po przyłączeniu do niego badanego uziemienia i przewodu fazowego z dostępnej instalacji elektrycznej. Rezystancja tego obwodu (czerwona kropkowana linia) będzie składała się z rezystancji badanego uziemienia, rezystancji ziemi, przez którą zamyka się obwód, oraz rezystancji uziemienia transformatora i rezystancji przewodów w instalacji. Wynik pomiaru będzie sumą tych czynników. Co oczywiste, wskazanie miernika podczas tego pomiaru musi być wyższe niż faktyczna rezystancja uziemienia naszego badanego obiektu. Nie jest to jednak czynnik, który byłby uciążliwy. Jak pokazuje praktyka, pętle zwarcia w normalnych instalacjach nn są z reguły mniejsze niż 1 Ω i o tyle będzie większe wskazanie miernika dla pomiaru uziemienia poprzez pomiar pętli zwarcia. Pomiar tą metodą ma pewne konsekwencje i ograniczenia. Pierwsza sprawa to wartość prądu w obwodzie podczas pomiaru. Teoretycznie, skoro rezystor zwarciowy w większości przyrządów ma wartość 10 Ω, a napięcie względem ziemi wynosi 230 V, to podczas zwarcia prąd w obwodzie (chociaż tylko przez połowę okresu) może osiągnąć 23 A. Jeśli w układzie instalacji, do której się podłączymy, jest zainstalowany **wyłącznik różnicowoprądowy** (RCD), to sprawą oczywistą jest, że zadziała i pomiar nie zostanie wykonany. Aby można było pomiar w takim układzie wykonać bez przeszkód, należy przyłączyć się do instalacji przed wyłącznikiem RCD. Jest to odrobinę uciążliwe, niemniej wykonalne. Można też na czas pomiaru zbocznikować RCD. Kolejne wymaganie to, jak można się domyślać na podstawie rysunku 27, brak połączenia badanego uziemienia z przewodem PEN czy PE. Jeśli uziemienie będzie połączone z instalacją, do której przyłączamy się do przewodu fazowego, prąd zamknie się w metalicznej pętli zwarcia i nie błędzie miał nic wspólnego z rezystancją badanego uziemienia. Przykładem wygodnego zastosowania tej metody może być pomiar uziemienia podczas jego budowy np. przy złączu kablowym przed jego podłączeniem do zacisku PEN. Poprawnie zastosowana, jest to pełnoprawna metoda pomiaru rezystancji uziemienia opisana w załączniku C normy PN-HD 60364-6:2016.

4.3.3 Pomiary metodą R_E3P i R_E4P. Przykłady

O ile zasada działania metody spadku potencjału została wcześniej opisana, to zastosowanie jej w praktyce wymaga jeszcze sprecyzowania. Szczególnie istotne jest postępowanie podczas budowy układu pomiarowego oraz dobór właściwego miernika, co nie jest aż takie oczywiste, a wpływa na możliwości wykonania pomiarów. Do tej pory w charakterze przykładów przedstawiano proste uziemienia i na razie takie będą prezentowane w dalszym omawianiu metodyki pomiarów rezystancji uziemienia. Niech tym razem za przykład posłuży uziemienie słupa SN. Akurat ten przypadek będzie

najprostszym odzwierciedleniem uziemienia pojedynczego skupionego. Ze względu na rozległą budowę linii napowietrznej SN, uziemienia poszczególnych słupów nie są ze sobą nigdzie połączone, zatem można traktować każde jak pręt wbity w ziemię, co często jest faktycznie realizowane w ten sposób. Głębokość pogrążenia takiego uziomu będzie determinowana rezystywnością gruntu i wymaganą do osiągnięcia rezystancją uziemienia. W większości przypadków będzie to proste: ot, nierozległe uziemienie, niewymagające stosowania ponadstandardowych przewodów pomiarowych. Na rysunku 28 pokazany jest omawiany przykład uziemienia.



Rys. 28. Słup SN. Układ sond pomiarowych

Aby wykonać pomiar rezystancji uziemienia takiego słupa, musimy rozpocząć od wyznaczenia kierunku dla sond pomocniczych. Nie jest wskazane, aby umieszczać je pod linią lub blisko niej i równolegle. Korzystnie jest, aby kierunek był w miarę możliwości prostopadły do linii SN. Następnie rozmieszczamy sondy pomocnicze: H w odległości ok. 40 m od słupa, S w odległości ok. 27 m od słupa. Dla większości uziomów przy podobnych słupach odległości takie powinny być wystarczające. Podłączamy miernik do badanego uziemienia za pomocą specjalnego imadełka lub krokodyla, zapewniając jak najlepsze połączenie elektryczne. Po wybraniu odpowiedniej funkcji (R_E3P lub R_E4P) wykonujemy pomiar. Następnie kolejne dwa pomiary wykonujemy dla położenia sondy S w pozycji odległej odpowiednio na 30 m i 25 m. Jeśli pomiary dadzą te same wyniki, rezultaty możemy uznać za poprawne. Tylko w ten sposób można wykonać pomiar rezystancji uziemienia dla prezentowanego słupa SN (ewentualnie jeszcze pętla zwarcia, jeśli w szczerym polu znajdziemy miejsce do przyłączenia się do przewodu fazowego nn). Nie jest możliwe stosowanie w takim przypadku innych metod i ewentualnych udogodnień, np. cęgów!

4.3.4 Pomiary metodą R_E3P i R_E4P. Możliwe problemy

Zgodnie z prawami Murphy'ego, które sprowadzają się do obserwacji, że jeśli coś może pójść źle, to źle pójdzie na pewno, to i w tym przypadku warto zastanowić się, co może pójść niezgodnie z oczekiwaniami. Podstawą tych rozważań musi być oczywiście założenie, że mamy sprawny sprzęt pomiarowy z naładowanymi akumulatorami, nieuszkodzone przewody i złącza, a żaden z kolegów nie robi nam psikusów.

Przypadek, w którym trzy kolejne pomiary są różne

Możliwym powodem może być występowanie elementów przewodzących w gruncie pod linią wyznaczającą kierunek rozmieszczenia sond pomocniczych. Mogą to być rury wodociągowe, gazowe, uziemione instalacje telekomunikacyjne, bednarki uziemiające itp. Rozwiązaniem będzie przestawienie sond w innym kierunku i powtórzenie pomiaru. Możliwe jest również (chociaż dla omawianego przykładu bardzo mało prawdopodobne), że uziemienie z różnych powodów jest fizycznie dużo większe niż spodziewany kilkumetrowy pręt uziemiający. W takim przypadku konieczne będzie odstawienia sondy prądowej na odległość powyżej 50 m.

Przypadek, w którym kolejne pomiary różnią się przy tym samym położeniu sond

Często powodem jest zbyt duża rezystancja sond pomocniczych (wartości te są również pokazywane przez miernik) ze względu na dużą rezystywność gruntu. Trzeba spowodować zmniejszenie rezystancji sond przez zastosowanie elektrod dłuższych niż standardowe, np. 80-centymetrowych. Jeśli to nie przyniesie pożądanego rezultatu, można obniżać rezystancję sond pomocniczych przez podlanie ich wodą na czas pomiaru. Można też, jeśli jest taka możliwość, wykorzystać obiekty w terenie, takie jak inne uziemienia, ogrodzenia czy niekiedy znaki drogowe lub latarnie. Mały prąd w obwodzie to również problem mogący bezpośrednio wynikać z konstrukcji miernika. W połączeniu z wysoką rezystywnością mała moc przyrządu to prosty przepis na kłopoty. Profesjonalistom należy rekomendować mierniki z prądem pomiarowym co najmniej 200 mA.

Powyższe zasady można stosować poprzez analogię również w innych przypadkach, dla różnych rodzajów uziemień.

4.3.5 Pomiary metodą R_E3P i R_E4P. Wymagania sprzętowe

Metoda spadku potencjału z powodzeniem wykorzystywana jest właściwie we wszystkich modelach mierników do uziemień. Jak już można było się zorientować, jest kilka istotnych cech przyrządu decydujących o zakresie jego zastosowania.

1) Metody pomiaru (najprostsze mierniki mają tylko metodę R_E3P)
2) Napięcie pomiarowe (w standardzie 25 V lub wybieralne: 25 V lub 50 V)
3) Prąd pomiarowy (min. 20 mA, zalecane 200 mA)
4) Odporność na zakłócenia o napięciu ok. 24 V

Ważne jest również wyposażenie się w odpowiednie akcesoria.

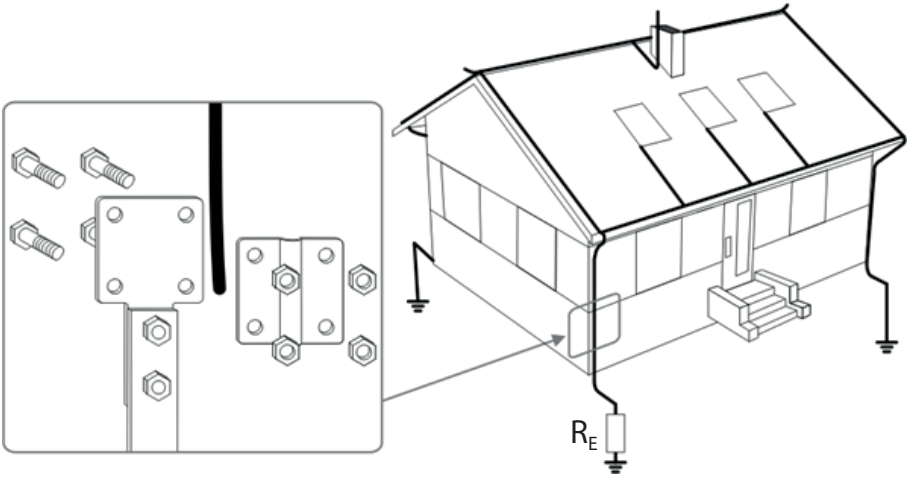


Rys. 29. Przydatne akcesoria. Imadełko, dodatkowy przewód na szpuli, sonda 80 cm

Właściwe wyposażenie umożliwi pomiary w bardziej złożonych układach uziemiających niż tylko pionowe, pojedyncze i nierozległe.

4.3.6 Pomiary uziemień złożonych. Rozwinięcie metod pomiarowych

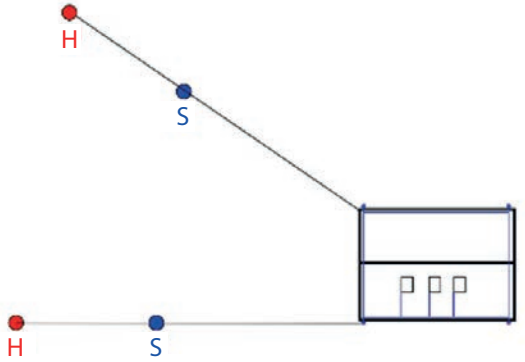
Uziemienia pojedyncze, układy złożone uziemień lub systemy uziemiające podlegają podczas pomiarów rezystancji uziemienia tym samym zasadom co opisane do tej pory. Modyfikacji ulec może jedynie sam proces fizycznego przeprowadzenia badań i ewentualne przygotowanie układu uziemiającego do pomiarów. Zatem po poprzednich przykładach uziomów pojedynczych (w istocie najprostszych prętów pogrążonych na odpowiednią głębokość w gruncie) można przyjrzeć się układom złożonym z wielu takich prostych uziomów, połączonych razem w większy układ.



Rys. 30. Przykład uziemienia złożonego

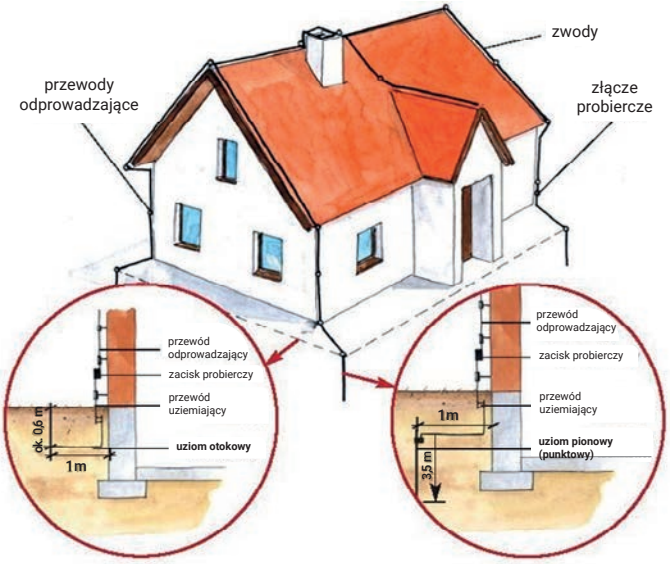
Na rysunku 30 przedstawiony jest dom uziemiony w czterech rogach, z połączonymi do tych rogów zwodami na dachu, ale bez otoku i połączenia z fundamentem. Wykorzystując do pomiaru metodę R_E3P lub R_E4P w celu zmierzenia rezystancji poszczególnych uziemień, musimy rozpiąć złącza

kontrolne i – po ustawieniu sond pomocniczych w odpowiednich miejscach – po kolei wykonać pomiary.



Rys. 31. Położenie sond pomocniczych przy pomiarach rezystancji uziemienia

Optymalne rozmieszczenie sond pokazano na rysunku 31. Pokazane ustawienie może być modyfikowane, natomiast należy starać się odchodzić z sondami w przeciwnym kierunku od badanego obiektu. Naturalnie, pomiary należy wykonać dla uziemienia na każdym z czterech rogów. Jeśli nie rozłączymy złącz kontrolnych, wynikiem pomiaru wskazanym przez miernik będzie rezystancja wypadkowa całego układu uziemiającego. Oczywiście położenie sondy prądowej i napięciowej – czasem jedyne możliwe! – będzie uzależnione od otoczenia. Bywa, że możliwości poruszania się w terenie, gdzie wykonujemy badania, jest bardzo ograniczone i trzeba umieścić sondy tam, gdzie jest to wykonalne lub, jeśli to ostatnie nie będzie poprawne, wynieść sondy na znacznie większe odległości poza teren z ograniczeniami.



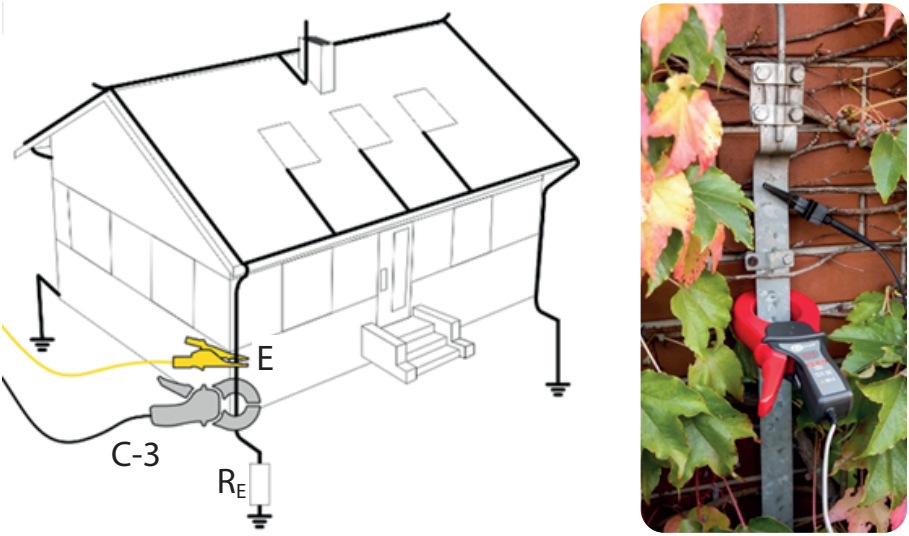
Rys. 32. Uziemienie budynku otokowe lub fundamentowe

W przypadku uziemienia otokowego lub fundamentowego postępowanie jest podobne jak w układzie z rysunku 30 i 31. Po umieszczeniu sond pomocniczych, zgodnie z poprzednio opisanymi zasadami, rozłączamy wszystkie złącza probiercze. Pomiar rezystancji uziemienia wykonujemy dla jednego wybranego zwodu i to będzie rezystancja charakterystyczna dla tego układu uziemiającego. Pozostałe zwody trzeba sprawdzić pod kątem zachowania ciągłości pomiędzy sobą. Potwierdzi to sprawność połączeń zwodów z otokiem lub zbrojeniem fundamentu.

Naturalnym dążeniem każdego człowieka jest chęć upraszczania sobie życia, ułatwiania pracy, a co za tym idzie – oszczędzania czasu potrzebnego do realizacji wykonywanych czynności. Pomiary rezystancji uziemienia należą do tych raczej bardziej czasochłonnych. Uziemienia złożone wymagają, aby układ został porozłączany. Sam pomiar musi być weryfikowany, czyli dla każdego punktu, który badamy, wykonać trzeba minimum trzy pomiary. Każde ułatwienie w tej sytuacji jest bardzo pożądane. Dla uziemień wielokrotnych (kilku lub kilkunastu połączonych razem) – **ale bez otoku(!)** – można zrezygnować z rozkręcania złącz kontrolnych i do pomiaru prądu w obwodzie uziemienia wykorzystać cęgi pomiarowe.

4.3.7 Pomiary uziemień złożonych. Cęgi pojedyncze

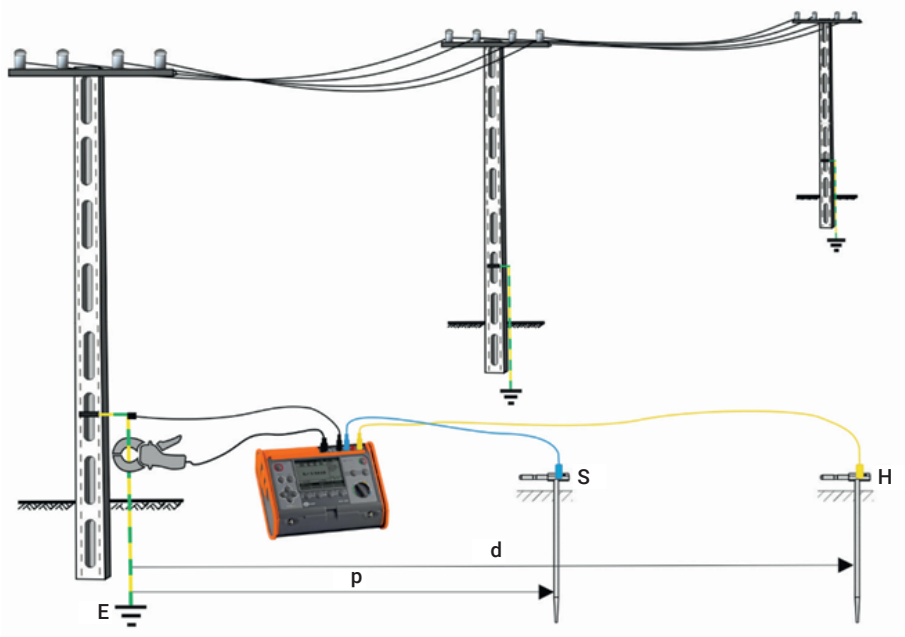
Pomiary uziemień pokazanych na rysunku 30 można wykonać selektywnie dla każdego pojedynczego uziemienia bez rozłączania złącz kontrolnych przy wykorzystaniu cęgów.



Rys. 33. Pomiar rezystancji uziemienia z użyciem cęgów

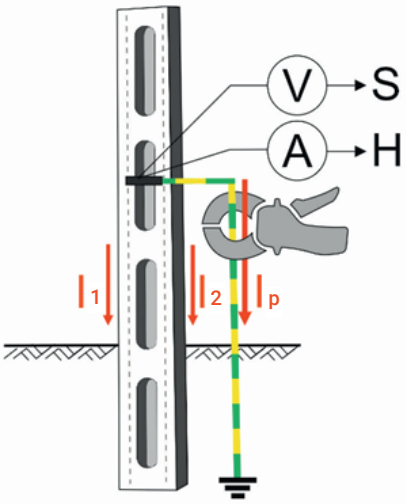
Pomiar polega na wymuszeniu prądu pomiarowego od sondy prądowej H, umieszczonej w odpowiedniej odległości od obiektu, przez układ uziemiający aż do miejsca przyłączenia miernika E. Oczywiście prąd pojawi się w całym układzie uziemienia, w każdej jego gałęzi, jednak cęgi zmierzą prąd tylko dla uziemienia R_E. Spadek napięcia, badany w punkcie E, spowodowany jest prądem mierzonym przez cęgi na rezystancji R_E, zatem wynik pomiaru to właśnie wartość rezystancji R_E. Przyłączając miernik do uziemienia (punkt E), cęgi zawsze zakładamy poniżej tego miejsca, co pokazano na rysunku 33. To bardzo wygodny sposób, jednak do zastosowania tylko dla uzie-

mień zbudowanych z wielu pojedynczych elementów bez otoku, koniecznie połączonych ze sobą w górnej części układu. Złożoność układu uziemiającego korzystnie wpływa na wypadkową wartość rezystancji uziemienia, jednak im więcej uziemień w układzie, tym mniejszą wartość prądu będziemy mierzyli w uziemieniu, na którym założone są cęgi. Dlatego dla układów złożonych i rozległych (np. uziemienia słupów niskiego napięcia) wymagane jest, aby używać mierników z większym prądem pomiarowym (200 mA) i zadbać o jak najniższą rezystancję sondy prądowej. W terenie można wykorzystać jako sondę pomocniczą np. słup wysokiego napięcia. Jej rezystancja będzie wtedy znacznie niższa niż możliwa do uzyskania nawet przez sondę o długości 80 cm – zwłaszcza tam, gdzie występuje duża rezystywność gruntu.
Skoro wspomniano już linię napowietrzną niskiego napięcia, to można się posłużyć tym przykładem, ponieważ on się aż prosi o to, aby badanie uziemień wykonywać cęgami. Jednocześnie przedstawimy potencjalne trudności w zastosowaniu zwykłych cęgów. Na rysunku 34 pokazano system uziemiający, który jest zbudowany jako wielokrotność pojedynczych uziomów słupowych, złączona razem w cały układ przewodem PEN.



Rys. 34. Układ uziemienia linii nn

Rozpięcie uziemienia na słupie czynnej linii nn jest zabronione ze względów bezpieczeństwa. Zastosowanie cęgów jak na rysunku 34 nie tylko jest wygodne, ale w zasadzie tylko tak ten pomiar można przeprowadzić. Niestety można tu wpaść w pułapkę. Otóż mamy do czynienia z obwodem, gdzie elementem przewodzącym na takim słupie jest nie tylko uziemienie sztuczne wykonane dla danego punktu, ale również sam słup i jego zbrojenie. Beton nasiąknięty elektrolitem jest całkiem dobrym przewodnikiem, o zbrojeniu nie wspominając. Jak zatem rzeczywiście wygląda obwód pomiarowy i co w związku z tym mierzymy? Na rysunku 35 jest pokazany pojedynczy słup oraz rozkład prądów w jego elementach przewodzących i zastosowanym uziemieniu.



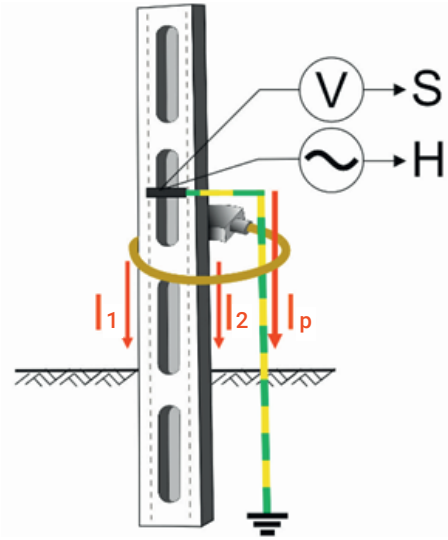
Rys. 35. Rozkład prądów w układzie uziemienia słupa nn

Pomiar wymusza pojawienie się prądu w całym układzie. Jak można się domyślać, pojawi się on również w obwodzie stworzonym przez beton słupa i zbrojenie tegoż. Ze schematu wynika, że cęgi mierzą prąd tylko w obwodzie uziemienia sztucznego tego słupa, ale spadek napięcia jest powodowany sumą prądów I_1, I_2 oraz mierzonego przez cęgi prądu I_p. Miernik wskaże w tej sytuacji zawyżoną wartość rezystancji uziemienia. Patrząc na to zjawisko z punktu widzenia ochrony przed porażeniem prądem elektrycznym, nie jest to problemem, ponieważ w rzeczywistości rezystancja uziemienia jest mniejsza niż wskazana przez miernik. Jednak jak na tej podstawie zdecydować, czy modernizacja uziemienia jest konieczna, czy nie, skoro wskazania miernika są wyższe niż oczekiwane lub wymagane? Podobny problem może wystąpić, jeżeli uziemienie ochronne jest zbudowane na całkiem przewodzącym obiekcie – np. metalowy kontener lub słup WN czy wieża kratowa. Prowadzenie pomiarów w takich miejscach przy użyciu cęgów z twardym rdzeniem (np. Sonel C-3) będzie kłopotliwe i właściwie wyniki będą niemożliwe do interpretacji. Rozwiązaniem zaproponowanym do pomiarów w tych miejscach są cęgi elastyczne (cewka Rogowskiego) i przystawka do miernika o nazwie Sonel ERP-1 (rysunek 36).



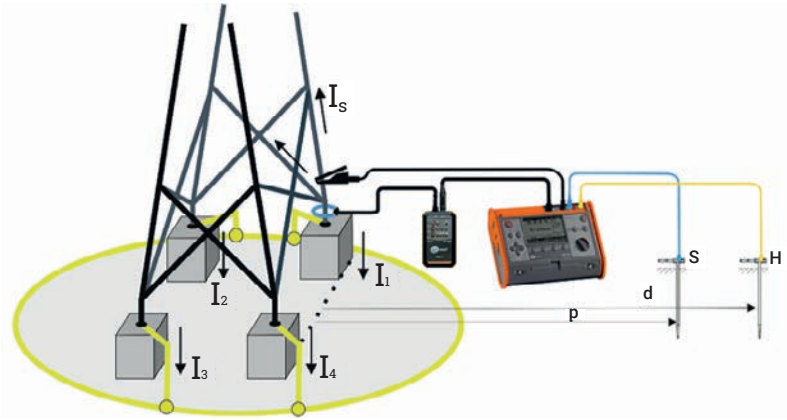
Rys. 36. Przystawka Sonel ERP-1 z cęgami typu FS

Zasady i metody pomiaru nie zmieniają się, inne są jedynie właściwości mechaniczne i geometryczne zastosowanych cęgów. Pierwszą ich cechą jest elastyczność, a drugą – znacznie większa średnica. Pozwala to na objęcie całego słupa, a zatem zmierzenia sumy prądów i wyeliminowania opisanego wcześniej błędu, co pokazane jest na rysunku 37.



Rys. 37. Cęgi FS na słupie nn

Korzystając z możliwości, jakie dają elastyczne cęgi, w przystawce Sonel ERP-1 zaszyto algorytm pozwalający na pomiary uziemienia słupów kratowych pomimo, że uziemienia są tam łączone otokiem w gruncie. Jest to możliwe dla słupów kratowych z uziemieniami w liczbie czterech, trzech, dwóch lub jednego, ale w układzie wielokrotnym. Podobnie można potraktować słupy nn typu A, czyli z dwoma zwodami uziemienia, lub trójnożne (np. ze stacją nasłupową SN/nn). Na rysunku 38 pokazany jest schemat podłączenia miernika do słupa kratowego i budowa układu pomiarowego.



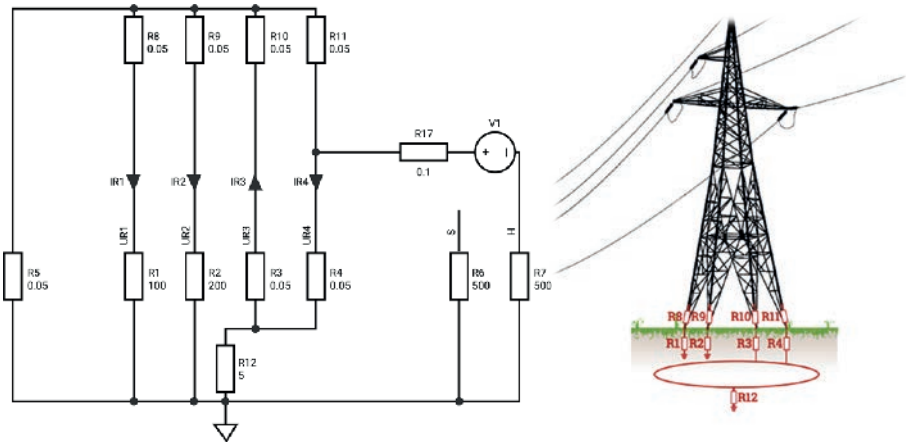
Rys. 38. Słup kratowy. Podłączenie miernika do pomiaru rezystancji uziemienia

Procedura pomiaru jest następująca. Z reguły, w zdecydowanej większości przypadków, sonda prądowa umieszczona do 50 m od słupa, prostopadle do linii WN, będzie we właściwej pozycji. Naturalnie sonda napięciowa powinna się znaleźć w pozycji 61,8% odległości do sondy prądowej. Następnie zakładamy cęgi elastyczne na nogę słupa, obejmując nimi jednocześnie uziemienie dla danej nogi, co pokazuje zdjęcie na rysunku 39.



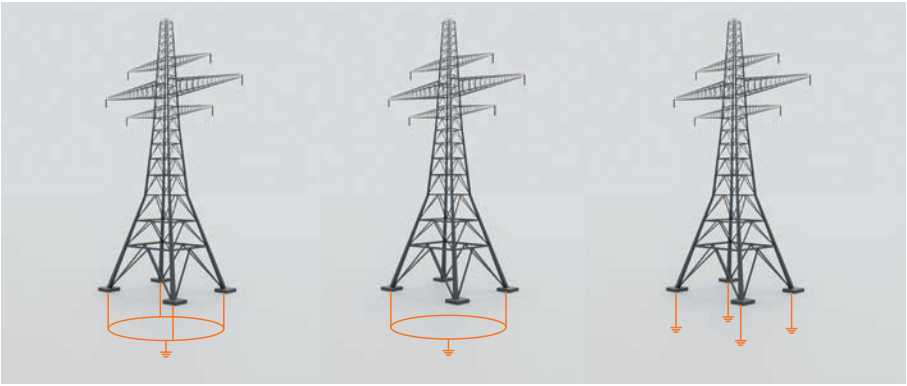
Rys. 39. Założenie cęgów elastycznych na badany słup

Cęgi Sonel FS można zawinąć wokół nogi słupa pojedynczo lub wielokrotnie (do czterech zwojów). Ilość zwojów należy potwierdzić na przystawce ERP-1 przez naciśnięcie przycisku – będzie to sygnalizowane odpowiednią diodą LED. Po wybraniu w mierniku odpowiedniej procedury możemy wykonać badanie. Po pierwszym pomiarze wyświetlony na mierniku wynik nie jest wartością prawdziwą, a jedynie cząstkową. Cęgi przekładamy na drugą nogę słupa w taki sam sposób, jak były założone na pierwszej nodze. To bardzo istotne, ponieważ podczas pomiaru miernik sprawdza również fazę prądu pomiarowego, zatem cęgi muszą być założone na każdej z nóg w tym samym kierunku. Pomiary powtarzamy dla nogi trzeciej i czwartej. Miejsce przyłączenia miernika do słupa E, czyli miejsce pomiaru spadku napięcia, w całej procedurze nie ulega zmianie. Otrzymaliśmy w ten sposób cztery pomiary prądu dla każdej nogi z osobna i na podstawie ich sumy oraz spadku napięcia otrzymamy wartość rezystancji stanowiska – i to pomimo że jest w tym miejscu zbudowany otok. Na rysunku 40 pokazany jest schemat zastępczy układu uziemienia słupa kratowego i miernika. Uziemienie jest uszkodzone. Dwa zwody są oderwane od otoku – na schemacie są reprezentowane przez R1 i R2. W trakcie wykonywania procedury pomiarowej miernik wykryje prąd odwrócony w fazie (IR3), co spowoduje z kolei odjęcie go od sumy prądów. Konsekwencją tego będzie wynik o bardzo wysokiej wartości, oznaczający wykrycie uszkodzenia. Prezentowany przykład rzeczywiście był badany w terenie. Miało to miejsce w okolicach Wrocławia. Obiekt charakteryzował się rezystancją ponad 55 Ω.



Rys. 40. Schemat układu prądów w uziemieniu i słup kratowy z uszkodzonym uziemieniem

Konieczna była naprawa uziemienia, co nie jest proste, ponieważ wymaga wyłączenia linii, zatem nie zostało to wykonane od ręki. Po odkopaniu uziemienia i jego ponownym połączeniu ze zwodami (a właściwie ułożeniu nowej bednarki, ponieważ ze starej niewiele zostało) otrzymany wynik badania rezystancji uziemienia z ERP-1 wyniósł 3,6 Ω dla tego stanowiska. Potwierdza to skuteczność opisywanej metody również przy identyfikowaniu uszkodzeń w tego typu układach wykonanych z otokiem. Analogicznie metoda może być zastosowana do małych stacji i innych uziemionych obiektów elektrycznych pod warunkiem, że w układzie nie występują więcej niż 4 zwody pionowe połączone otokiem.
W bardzo szczególnych przypadkach, w zależności od sposobu budowy uziemienia przy słupie kratowym (nie tylko energetycznym) oraz od rezystywności gruntu, mogą wystąpić pewne trudności w wykonaniu pomiaru przy użyciu przystawki ERP-1.



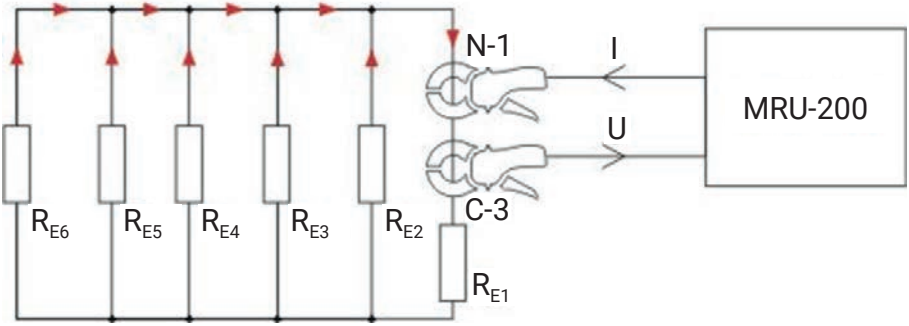
Rys. 41. Sposoby uziemienia słupa karatowego

Na rysunku 41 pokazano możliwe sposoby uziemienia słupa kratowego. Najczęściej spotyka się otok, do którego podłączane są wszystkie cztery nogi słupa. Pod kątem pomiarów układ ten moż-

na potraktować tak samo jak słup, którego nogi są uziemione indywidualnie lub nie są uziemione w ogóle, a rolę uziemienia pełnią stopy słupa. Układ taki jak pośrodku, w którym jest ułożony otok, ale podłączone są do niego tylko dwie nogi słupa, może w szczególnych przypadkach, przy dużej rezystywności gruntu, wykazywać duże wartości uziemienia (zmiana fazy prądu), co mogłoby wskazywać na uszkodzenie uziemienia tego obiektu. Aby uniknąć błędnej interpretacji wyniku, należy przeprowadzić pomiar tylko dla dwóch uziemionych nóg słupa. Jeśli otrzymamy wynik poprawny, to będzie on miarodajny. W rzeczywistości będzie on odrobinę wyższy niż faktyczna wartość uziemienia dla tego stanowiska, ale nie stanowi to problemu, ponieważ są to w najgorszym przypadku wartości
w okolicach 1 Ω. Jeśli jednak wynik w dalszym ciągu jest niepoprawny (wysoki, wyższy niż wymagany), wskazuje to na zły stan uziemienia.

4.3.8 Pomiary uziemień złożonych. Metoda dwucęgowa

Najczęściej spotykanym błędem ze wszystkich, mogących wystąpić przy pomiarach rezystancji uziemienia, jest stosowanie metody z dwoma cęgami w układach, gdzie nie można tego robić. Prowadzi to często do konfliktów pomiędzy zleceniodawcą a wykonawcą uziemienia, jeśli nieumiejętnie prowadzi się kontrolę po zbudowaniu lub zmodernizowaniu uziemienia. Wygoda stosowania metody jest okupiona pewnymi ograniczeniami. Nie wykorzystujemy sond pomocniczych, zatem prąd w obwodzie musi być wymuszany w inny sposób. Jest on indukowany w układzie przez cęgi nadawcze Sonel N-1. Wyidukowanie prądu będzie możliwe tylko w obwodzie zamkniętym, dlatego nie jest możliwe wykonanie pomiaru rezystancji uziemienia mającego postać pojedynczej szpilki. Konieczność ta powoduje, że w wyniku pomiaru otrzymamy wartość powiększoną o wypadkową rezystancję całego układu uziemiającego. Najbardziej korzystne jest, jeśli wypadkowa rezystancja jest mała, a wartość mierzona rozsądnie większa. Przykład jest zaprezentowany na schemacie na rysunku 42.



Rys. 42. Schemat zastępczy układu uziemienia i pomiaru cęgami Sonel C-3 oraz Sonel N-1

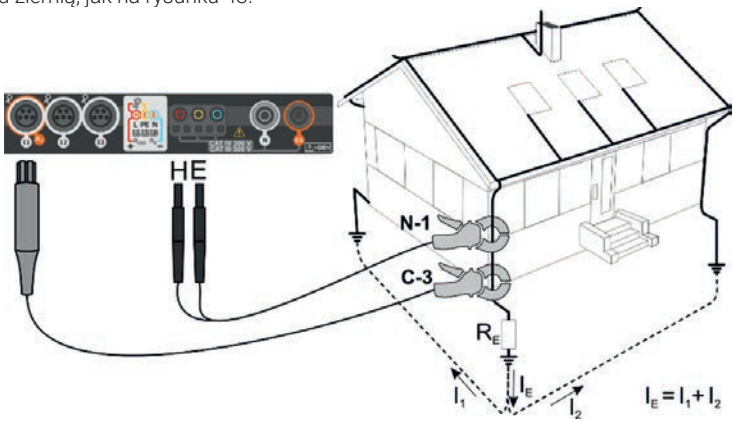
Wynik pomiaru będzie zgodny ze wzorem:

$$R_E = R_{E1} + \frac{1}{\frac{1}{R_{E2}} + \frac{1}{R_{E3}} + \frac{1}{\frac{1}{R_{E4}} + \frac{1}{R_{E5}} + \frac{1}{R_{E6}}}}$$

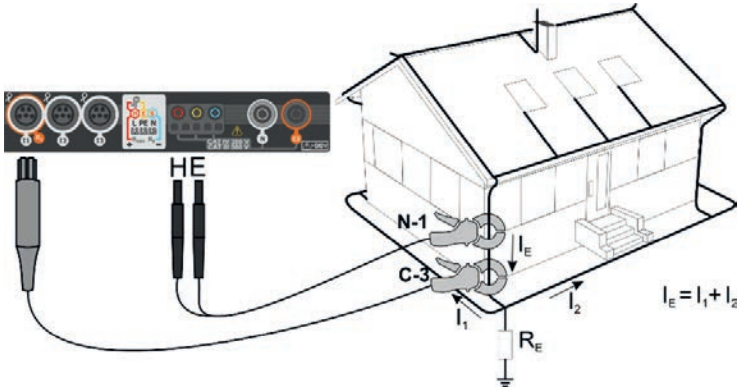
Dla przykładu, jeśli założymy, że mierzony uziom E_1 ma rezystancję R = 10 Ω, a uziemienia od E_2 do E_6 będą miały taką samą rezystancję R = 20 Ω, to wskazanie miernika wyniesie:

$$R_E = 10 + \frac{1}{\frac{1}{20} + \frac{1}{20} + \frac{1}{20} + \frac{1}{20} + \frac{1}{20}} = 14\ \Omega$$

Jest to o tyle istotne, że powiększenie wyniku o wypadkową, która jest duża, może wprowadzić użytkownika w błąd. Słup SN z rysunku 28 może tu stanowić doskonały przykład. Otóż badane uziemienie niech będzie równe R_u = 6 Ω. „Wypadkową rezystancją" pozostałej części układu będzie sam słup wykonany z żelbetu. Jak można się domyślać, wynik będzie wysoki. Kilka badanych słupów osiągnęło rezystancję R_S od ok. 120 Ω do 250 Ω. Jaki będzie wynik pomiaru w takim przypadku? Oczywiście będzie to suma obu wartości R_U i R_S, co w najlepszym przypadku wyniesie ok. 126 Ω. Naturalnie wartość ta nie ma nic wspólnego z zamierzonym pomiarem uziemienia dla tego obiektu. Dlatego metoda dwucęgowa może być skutecznie wykorzystana tylko wówczas, gdy znana jest budowa układu pomiarowego i jest to układ złożony z wielu uziemień połączonych razem górą bez otoku pod ziemią, jak na rysunku 43.



Rys. 43. Poprawne wykorzystanie metody dwucęgowej

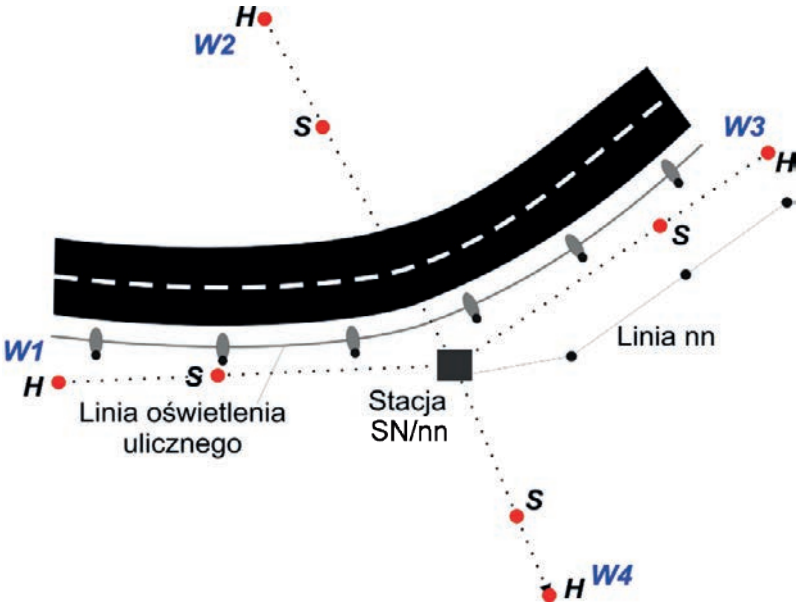


Rys. 44. Układ uziemienia z otokiem

W przypadku uziomów otokowych lub fundamentowych pomiar dwucęgowy nie jest możliwy. Wygenerowany prąd pomiarowy zamknie się w metalicznej pętli zwarcia. Nie będzie to miało nic wspólnego z rezystancją uziemienia, ale można na tej podstawie określić ciągłość połączonych ze sobą elementów metalowych, z których jest zbudowane uziemienie.

4.3.9 Postępowanie podczas badania uziemień metodą spadku potencjału

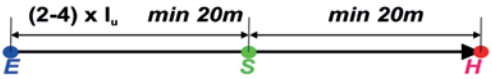
Opisane wyżej metody pomiarów rezystancji uziemienia mają wspólną cechę: bazują na pomiarze prądu i napięcia. Niezależnie więc, czy to metoda R_E3P, R_E4P czy metoda z pojedynczymi cęgami R_E3P+C, kluczowe wspólne zasady będą istotne i konieczne do zastosowania, aby otrzymane wyniki były poprawne. Kilka podstawowych kroków postępowania ilustruje przykład z rysunku 45.



Rys. 45. Kierunki rozmieszczenia sond pomocniczych

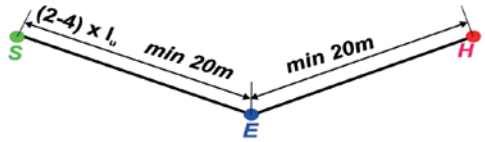
Cel: Pomiar rezystancji uziemienia stacji nasłupowej SN/nn jak z rysunku 45.
Postępowanie:
Pierwszym krokiem jest wyznaczenie kierunku rozmieszczenia sond pomocniczych, co będzie determinowane otoczeniem miejsca pomiaru. Na rysunku widać drogę, oświetlenie uliczne i proponowane kierunki rozmieszczenia sond. Oświetlenie uliczne jest zasilane podziemnym kablem z równolegle ułożoną bednarką. Powoduje to, że trzeba wykluczyć linie rozmieszczenia sond W1 i W3. Jest to oczywiste, ponieważ prąd pomiarowy wymuszony przez miernik zamknie się w większości w obwodzie o mniejszej rezystancji, czyli przez wspomnianą bednarkę. Sonda napięciowa byłaby również nad tą bednarką. Jeśli gdyby jednak wykonać badanie w ten sposób, otrzymane wyniki będą bardzo małe, przeważnie znacznie poniżej 1 Ω, a rezystancja sond pomocniczych mogłaby nie zostać wskazana. Przypadek taki można porównać do wykonania zwarcia pomiędzy uziemieniem,

sondą prądową i sondą napięciową. Trzeba zatem rozpatrzyć kierunki W2 i W4. Ze względu na drogę najbardziej korzystnie byłoby wybrać kierunek W4. Uziom tej stacji nie jest uziomem rozległym, ale jak opisano wcześniej, uzasadnione będzie umieszczenie sondy prądowej w odległości optymalnie ok. 50 m od miejsca pomiaru uziemienia. Niestety w kierunku W4 znajdują się zabudowania z niezbyt przyjaźnie nastawionym właścicielem i jego inwentarzem, wykluczając tę możliwość. Możliwy został kierunek W2, chociaż przebiega przez drogę. W tym konkretnym przypadku droga nie była ruchliwa, więc nie stanowiło to problemu; w innej sytuacji po przygotowaniu wszystkiego na ok. 1 min pracownicy stanęliby na drodze, zatrzymując ruch na czas pomiaru. Naturalnie to dość ekstremalny przypadek. Właściwie zawsze da się znaleźć rozwiązanie pośrednie, mogące w rezultacie spełnić wymagania, chociaż proces pomiaru może być pracochłonny i długotrwały ze względu na konieczność wykonania serii pomiarów porównawczych i kontrolnych. Określenie kierunku i rozmieszczenia sond pomocniczych, jak dotychczas zakładano, polega m.in. na umieszczeniu sondy napięciowej pomiędzy badanym uziemieniem a sondą prądową (rysunek 46).



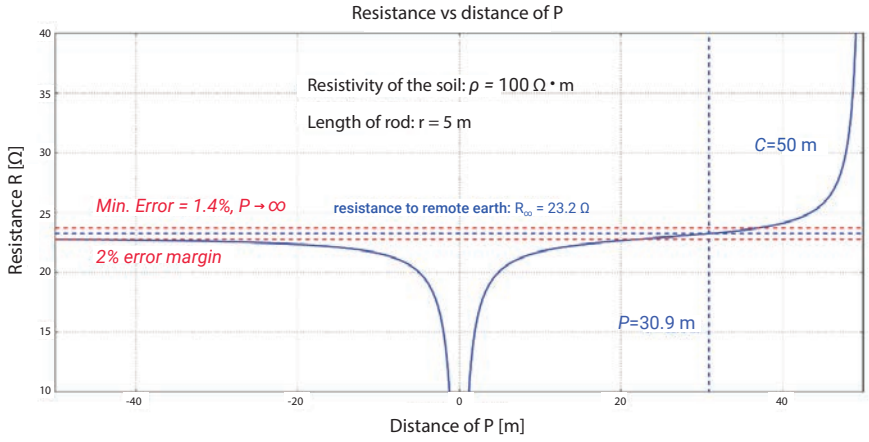
Rys. 46. Klasyczne rozmieszczenie sond, gdzie E to badane uziemienie, S to sonda napięciowa, a H to sonda prądowa

Krokiem, który można jeszcze tu rozważyć, będzie możliwość umieszczenia sond pomocniczych po przeciwnych stronach uziemienia, co czasami może być jedyną możliwością ze względu na uwarunkowania powodowane otoczeniem miejsca pomiaru (rysunek 47).



Rys. 47. Rozmieszczenie sond pomocniczych po przeciwnych stronach uziemienia

Różnica, która naturalnie musi tu występować, pokazana jest na rysunku 48.



Rys. 48. Rozkład rezystancji dla pręta pionowego

Przykładowy rezultat obu układów sond pomocniczych pokazany jest w oparciu o pręt pionowy wbity na 5 m w grunt o rezystywności ρ = 100 Ω (rysunek 48). Punkt 0 na osi poziomej to położenie uziemienia. Pionowa przerywana linia (61,8%) to położenie sondy napięciowej. Koniec wykresu po prawej stronie to miejsce położenia sondy prądowej. Rozkład rezystancji, zgodnie z opisem metody, przechodzi przez oś rezystancji w miejscu położenia sondy napięciowej, co było spodziewane. Jeśli jednak sondę napięciową S przesuniemy na stronę przeciwną, tzn. na lewo od uziemienia, wykres rezystancji nigdy nie przetnie osi ustalonej przez mierzoną rezystancję (miejsce potencjału zerowego). Jednak jeśli odległość do sondy napięciowej będzie odpowiednio duża, to ewentualny błąd (w przykładzie ok. 2%) będzie do zaakceptowania, zwłaszcza jeśli nie będzie innej możliwości rozmieszczenia sond pomocniczych. Pamiętać trzeba jednak, że jest to uziemienie w postaci prostego pęta ok. 5 m w gruncie, a sondy są oddalone od niego po 50 m z każdej strony.

Podsumowując, pomiary uziemienia w oczywisty sposób wymagają uwagi i przemyślenia sposobu oraz czynności koniecznych do wykonania poprawnego badania. Opisane metody zdadzą doskonale egzamin dla uziomów geometrycznie nierozległych. Przez analogię, z pewnością w którymś z wymienionych sposobów będzie to możliwe. Uziemienia rozległe wymagają trochę innego podejścia, chociaż przecież w dalszym ciągu aby wykonać pomiar, będziemy korzystać i z sond pomocniczych, i z prawa Ohma.

4.4 Uziemienia rozległe

Pomiary uziemień rozległych są trudne z kilku powodów. Przede wszystkim odległość do sondy prądowej jest niełatwa do określenia i aby odnaleźć miejsce potencjału zerowego, musi być ona odstawiona bardzo daleko – setki, a nie dziesiątki metrów. Pomiarowcy nie powinni sugerować się długością przewodów pomiarowych dołączanych do zestawu z miernikiem. Pojedynczy przewód to nie koniec – można połączyć ze sobą kilka, jeśli wymaga tego sytuacja, lub skorzystać ze szpul z przewodami o długości nawet 300 m. Na przykładzie uziomu rozległego, który po modernizacji wymagał pomiarów, będzie można pokazać złożoność i pracochłonność procesu pomiarowego przy standardowym podejściu z poszukiwaniem obszaru o potencjale zerowym i weryfikacją tegoż poprzez przestawianie sondy napięciowej. Mierzone uziemienie znajduje się w obiekcie teletechnicznym, którym jest stacja nadawcza.



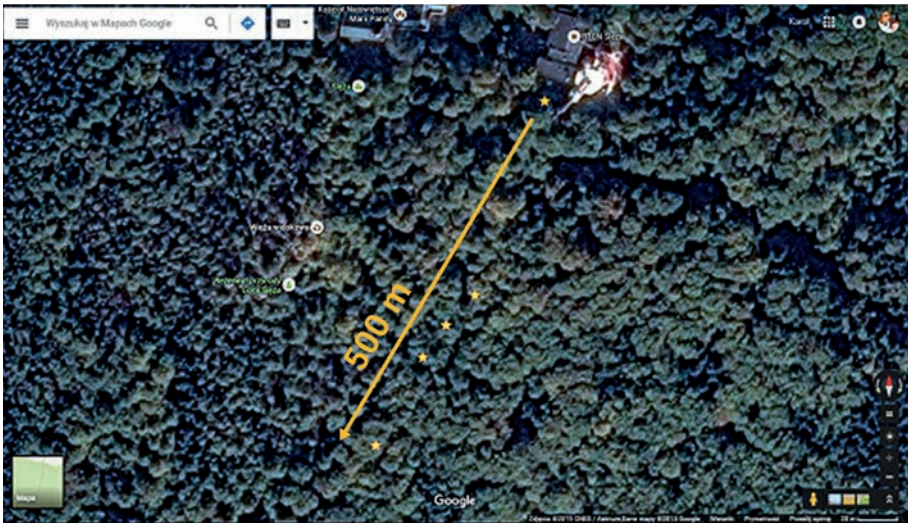
Rys. 49. Miejsce pomiarów. Obiekt teletechniczny i wieża nadawcza

Uziemienie obejmuje stację SN/nn. Uziemienie robocze jest połączone z instalacją odgromową obiektu, wieżą transmisyjną oraz innymi elementami przewodzącymi, takimi jak rynny czy ogrodzenie terenu.



Rys. 50. Miejsca uziemione (przykładowe) na obiekcie

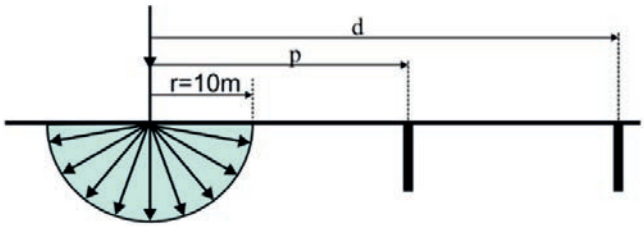
Naturalnie, ze względu na konstrukcję układu uziemiającego, możliwe jest wykonanie wyłącznie pomiaru rezystancji wypadkowej dla całego obiektu. Pomiary kontrolne uziemienia po jego modernizacji wykonano błędnie, ponieważ umieszczono sondę prądową H w obszarze mierzonego uziemienia (przed uziemionym ogrodzeniem). Wynikało to przede wszystkim z zasugerowania się długością przewodu pomiarowego 50 m. Pomiary nie mogły dać poprawnych wyników, ponieważ obie sondy znajdowały się na obszarze instalacji uziemiającej. Dodatkowo, wątpliwość na etapie pomiarów powinny wzbudzić otrzymywane wyniki (ok. 0,12 Ω), a należy dodać, iż rezystywność gruntu dochodziła do 8000 Ωm. Rozległość geometryczna uziemienia i wysoka rezystywność gruntu (jeden ze starszych górotworów w Polsce ze skałami gabroidowymi i diorytoidowymi) już po rozpoznaniu błędu w rozmieszczeniu sond spowodowały niestety, że pomiary i tak nie zostały wykonane. Przewody, którymi dysponowano, były zbyt krótkie. Kolejne podeście zakończyło się sukcesem, jednak dopiero po kilkugodzinnym spacerowaniu po okolicy i próbach wykonania pomiaru. Rozmieszczenie sond pomocniczych zaprezentowano na rysunku 51.



Rys. 51. Widok rozmieszczenia sond pomocniczych (żółte gwiazdki)

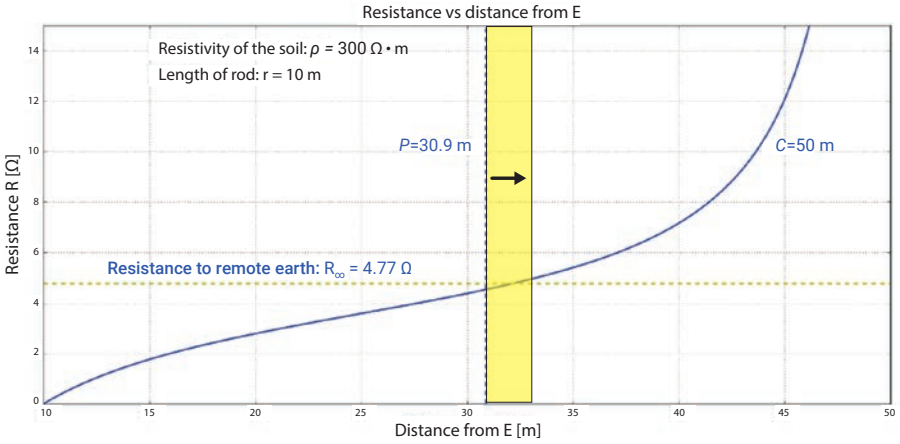
Postępowanie podczas pomiarów polegało na wyznaczeniu miejsca dla sondy prądowej H i wyniesieniu jej na odległość ponad 100 m. Niestety rozległość uziemienia i wysoka rezystywność gruntu przy przestawianiu sondy napięciowej S umieszczonej w odległości ok. 61,8% do H dawały zmienne i bardzo różne wyniki. Dopiero przy odległości do H ok. 500 m uzyskano stabilne i powtarzalne pomiary.

Dlaczego w powyższym przypadku wymagało to takich odległości do sond pomocniczych, opisane zostanie na przykładzie. Przykład zostanie pokazany na rysunku 52.



Rys. 52. Uziemienie półsferyczne o promieniu 10 m

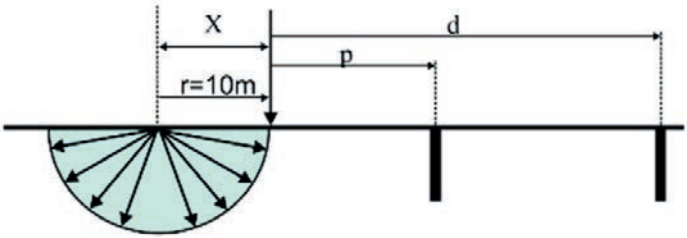
Uziemieniem rozległym, jak poprzednio przy omawianiu metody, będzie półsfera, tyle że promień z 0,5 m zwiększony zostanie do 10 m. Pomiar będzie poprawny, jeśli sonda napięciowa znajdzie się w miejscu potencjału zerowego. I to jest pierwsza trudność. Przyłączenie się do badanego uziemienia można zrealizować w dowolnym punkcie uziemienia. Jeśli założymy, że podłączyliśmy się do uziemienia w jego centrum, rozkład rezystancji przedstawi się zgodnie z rysunkiem 53.



Rys. 53. Rozkład rezystancji dla przykładu z rysunku 48

Żółte pole na rysunku pokazuje, że przecięcie nie następuje w punkcie 61,8%, jak można było się wcześniej spodziewać dla uziomów nierozległych, a nieco dalej, co pokazuje strzałka. Zatem postępując zgodnie z wcześniejszymi zasadami, ryzykujemy powstanie błędu. W zależności od miejsca przyłączenia do badanego uziemienia może to być od 5% do nawet 30%.

Rozwiązaniem może być tu metoda narastania zbocza opisana przez dr. Tagga w książce "Earth resistances" (New York, Pitman Pub. Corp. 1964).



Rys. 54. Rozkład rezystancji dla przykładu z rysunku 48

Dla uziomów nierozległych zakłada się, że pomiar (a zatem również wyznaczenie odległości ***d*** i ***p***) będzie wykonany ze środka półsfery. W praktyce dla układów rozległych taka procedura jest niemożliwa do zastosowania, a pomiary są wykonywane dla dowolnego dogodnego punktu krawędzi półsfery. Wprowadzi to błąd w wyznaczeniu odległości ***p*** i ***d*** i w rzeczywistości ***p*** będzie wynosić (***p+x***) a ***d*** (***d+x***). Uwzględniając błąd wynikający z miejsca przyłączenia, otrzymamy wzór na rezystancję w postaci:

$$R = \frac{\rho}{2\pi}\left(\frac{1}{r} - \frac{1}{d+X} - \frac{1}{p+X} + \frac{1}{d-p}\right)$$

$$R = \frac{\rho}{2\pi r} - \frac{\rho}{2\pi}\left(\frac{1}{d+X} - \frac{1}{p+X} + \frac{1}{d-p}\right)$$

$$\boldsymbol{R = R_{\infty} - K\left(\frac{1}{d+X} - \frac{1}{p+X} + \frac{1}{d-p}\right)}$$

gdzie:
R – zmierzona rezystancja uziemienia
R_{∞} – prawdziwa rezystancja uziemienia
r – promień półsfery
d – odległość od miejsca przyłączenia półsfery do elektrody prądowej
p – jak przypadku d, tylko do elektrody napięciowej
X – błąd w lokalizacji miejsca przyłączenia w stosunku do środka półsfery
ρ – rezystywność gruntu
$K=\rho/2\pi$ – stała dla danego uziemienia

Określenie zmiany rezystancji dla dowolnego punktu jest możliwe, jednak łatwiej można określić szybkość zmiany rezystancji, czyli narost zbocza dla niej. Wyznaczamy to przez wykonanie pomiaru rezystancji dla trzech punktów położenia elektrody napięciowej, trzech różnych odległości ***p***: 0,2***d***; 0,4***d*** i 0,6***d***, otrzymując wartości R_1, R_2 i R_3. Prędkość zmian rezystancji μ jest obliczona wzorem:

$$\boldsymbol{\mu = \frac{R_3 - R_2}{R_2 - R_1}}$$

Rezystancja dla poszczególnych odległości p (0,2d, 0,4d i 0,6d) będzie wynosić odpowiednio:

$$R_1 = R_\infty - K\left(\frac{1}{d+X} - \frac{1}{0{,}2+X} + \frac{1}{0{,}8-p}\right)$$

$$R_2 = R_\infty - K\left(\frac{1}{d+X} - \frac{1}{0{,}4+X} + \frac{1}{0{,}6-p}\right)$$

$$R_3 = R_\infty - K\left(\frac{1}{d+X} - \frac{1}{0{,}6+X} + \frac{1}{0{,}4-p}\right)$$

Zatem z trzech powyższych równań otrzymujemy:

$$\boldsymbol{\alpha^3(250-125\,\mu) + \alpha^2(300-150\,\mu) + \alpha(170-115\,\mu) + (24-42\,\mu) = 0}$$

gdzie $\alpha = \frac{X}{d}$

Powyższe równanie można rozwiązać dla α, dla dowolnej wartości μ. Właściwa odległość do sondy prądowej d wynosić będzie $d \cdot (1+\alpha)$, a odległość do sondy napięciowej p, biorąc pod uwagę ustaloną wcześnie regułę 61,8%, wyniesie $0{,}6180d \cdot (1+\alpha)$.

Odległość od punktu początkowego dla pomiaru rzeczywistej rezystancji uziemienia p_T wynosić będzie:

$$p_T = 0{,}6180d \cdot (1+\alpha) - \alpha \cdot d$$

$$p_T = d \cdot (0{,}6180 - 0{,}3820 \cdot \alpha)$$

dlatego:

$$p_t/_d = 0{,}6180 - 0{,}3820 \cdot \alpha$$

Trzeba wyliczyć i umieścić w tabeli wartości $p_t/_d$ dla dowolnej wartości μ korzystając ze wzoru:

$$\boldsymbol{\alpha^3(250-125\,\mu) + \alpha^2(300-150\,\mu) + \alpha(170-115\,\mu) + (24-42\,\mu) = 0}$$

Tabele z obliczonymi danymi dostępne są w załączniku nr 1.

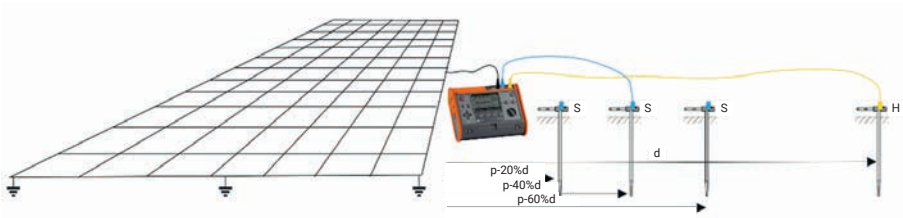
4.4.1 Metoda narastania zbocza. Postępowanie

1) Wybrać dogodne miejsce przyłączenia przyrządu do badanego uziemienia (punkt początkowy) i umieścić elektrodę prądową w odpowiedniej odległości ***d*** od badanego uziemienia.
2) Elektrodę napięciową ustawić i wykonać pomiar w odległościach od badanego uziemienia stanowiącej 0,2***d***; 0,4***d*** i 0,6***d***.
3) Dla każdego z tych trzech położeń otrzymamy wynik rezystancji R_1,R_2 i R_3.
4) Obliczyć współczynnik z zależności $\mu = \frac{R_3 - R_2}{R_2 - R_1}$.
5) Z tabeli (załącznik nr 1) odczytać wartość $p_t/_d$ dla wyliczonego μ.
6) Obliczyć wartość p_T przez pomnożenie odczytanego stosunku $p_t/_d$ i ***d***.
7) Umieścić elektrodę napięciową w wyliczonej odległości p_T.
8) Wykonać pomiar rezystancji. Otrzymany w ten sposób wynik powinien być prawdziwą wartością rezystancji badanego uziemienia R_∞.
9) Przeprowadzić proces weryfikacji poprawności pomiaru dla innych wartości (odległości do sondy prądowej) ***d***.
10) Poprawny pomiar powinien dla różnych ***d*** dać w wyniku zbieżne wartości rezystancji ***R***.

4.4.2 Metoda narastania zbocza. Przykłady praktyczne

Przykład nr. 1 – Pomiar skuteczny bez nieprzewidzianych trudności.

Obiektem, na którym przeprowadzono pomiary, była mała podstacja o wymiarach ok. 30,5 m x 24,5 m, otoczona ogrodzeniem przyłączonym do systemu uziemiającego. Uziemienie składa się z siatki uziemiającej, bednarek itp. Elektrodę prądową umieszczono w odległości ***d*** = 61 m, następnie ***d*** = 91,5 m oraz ostatni pomiar wykonano przy odległości ***d*** = 116 m. Miejsce przyłączania miernika do uziemienia to ok. 30 cm od siatki z dłuższego boku (rysunek 55).



Rys. 55. Schemat rozmieszczenia sond podczas pomiaru

Tab. 8. Tabela z wynikami dla trzech serii pomiaru

Odległość d	Rezystancja zmierzona dla			μ	p_t/d	p_T	R
	p = 0,2d	p = 0,2d	p = 0,6d				
m	Ω	Ω	Ω	-	-	m	Ω
61	0,169	0,197	0,231	1,253	0,4788	29,21	0,209
91,5	0,190	0,204	0,221	1,178	0,4997	45,72	0,210
116	0,186	0,203	0,215	0,757	0,5877	68,17	0,214

Średnia rezystancja z trzech pomiarów wynosi 0,211 Ω, zatem ewentualny błąd względem średniej to ok. 1,4%. Wyniki pomiarów można uznać za poprawne.

Maksymalna możliwa wartość współczynnika μ wynosi 2. Jeśli w wyniku pomiarów rezystancje dają μ większe niż 2, to warunki nie odpowiadają tym, na których opiera się niniejsza metoda – konieczne jest zwiększenie odległości d do elektrody prądowej. Z praktyki wynika jednak, że współczynniki powinny się zawierać w zakresie ograniczonym do wartości μ: $0,4 < \mu < 1,6$.

Metoda nachylenia zbocza jest zatem zadowalająca. Z powodzeniem można ją stosować do sprawdzenia rezystancji uziemienia obiektów o rozległych systemach uziemiających, co wykazano w zaprezentowanym przypadku praktycznym. Wyniki spełniają oczekiwania również wtedy, gdy grunt jest niejednorodny. Sama metoda pozwoli na ustalenie, kiedy odległość d do elektrody prądowej jest wystarczająca.

Biorąc pod uwagę, że przy odległościach do sondy prądowej rzędu kilkuset metrów przestawianie jej w celu sprawdzenia poprawności pomiaru wiąże się ze sporym zaangażowaniem, proponuje się, aby zamiast tego do weryfikacji wykorzystać metodę bazującą na omówionych zależnościach, lecz w wyniku obliczeń dającą od razu wartość rezystancji uziemienia.

Metoda pozwalająca na to jest opracowaniem powstałym w SONEL S.A w ramach poszukiwania metody maksymalnego uproszczenia badań uziemień rozległych. Na podstawie analizy rozkładu rezystancji uziemienia wyliczono współczynniki, które po wykonaniu trzech pomiarów pozwalają na otrzymanie poprawnej wartości rezystancji uziemienia badanego układu.

Procedura jest podobna do proponowanej przez dr. Tagga z tą różnicą, że pomiary należy wykonać, umieszczając sondę napięciową S w odległościach stanowiących odpowiednio **0,4***d* (R_1), **0,6***d* (R_2) i **0,8***d* (R_3), gdzie d to odległość do sondy prądowej H. Otrzymane wyniki podstawiamy do wzoru:

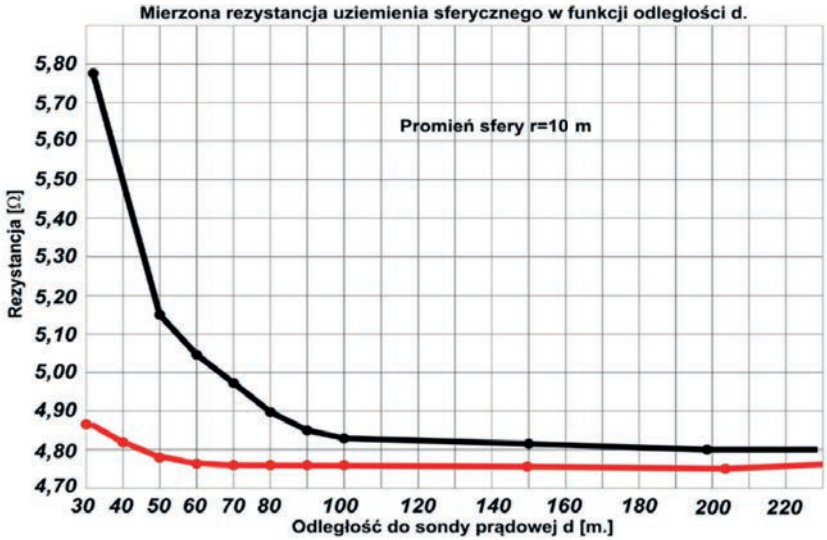
$$R_E = -1,335 \cdot R_1 + 3,041 \cdot R_2 - 0,7057 \cdot R_3$$

Trzeba zaznaczyć, że przy małej odległości d do sondy prądowej pozycje dla sondy napięciowej muszą być wyznaczone niezwykle dokładnie. Zwiększenie jej od razu zmniejsza tę niedogodność. Powyższe równanie jest prawdziwe wyłącznie dla współczynników z podanych proporcji:

40%*d* – R_1 obliczony współczynnik = -1,335

60%*d* – R_2 obliczony współczynnik = 3,041

80%*d* – R_3 obliczony współczynnik = -0,7057



Rys. 56. Otrzymane wyniki w funkcji odległości do sondy prądowej.
Czerwony – metoda ze wzorem, czarny – metoda z poszukiwaniem ziemi odniesienia

Na wykresie prezentowane jest porównanie metody ze wzorem i metody z tradycyjnym poszukiwaniem miejsca potencjału zerowego (kolor czerwony – metoda matematyczna). Przykład dla półsfery o promieniu 20 m w gruncie o rezystywności 100 Ωm. Z obserwacji tego badania wynika, że przy znacznie mniejszych odległościach niż by można oczekiwać pomiar jest możliwy do przeprowadzenia, jeśli wykorzystany będzie podany wzór.

Dla sprawnego przeprowadzenia pomiarów uziemienia rozległego możemy oba opisane sposoby badania połączyć w jeden cykl pomiarowy, otrzymując jednocześnie pomiar i jego sprawdzenie.

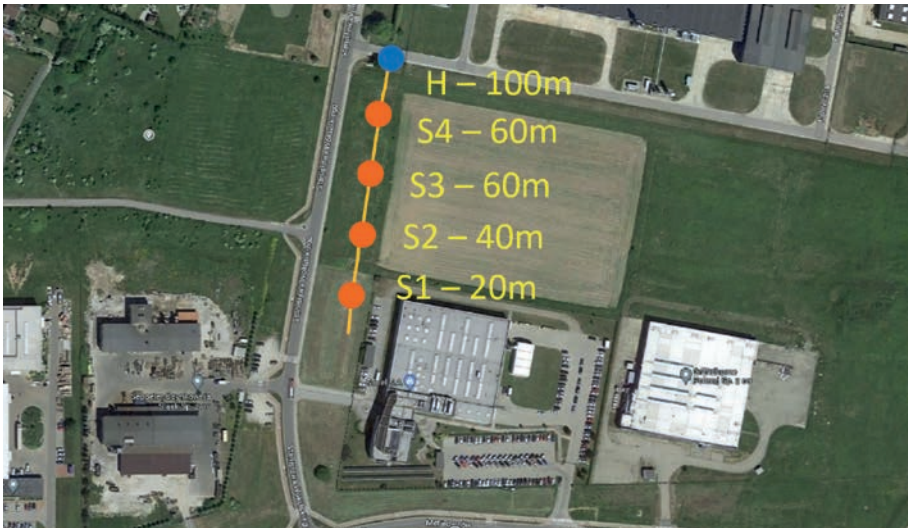
Sposób postępowania powinien być następujący:

1) Na podstawie rozległości uziemienia wyznaczamy pozycję dla sondy prądowej H.
2) Umieszczamy w odpowiednich pozycjach sondy napięciowe S, które wynosić będą odpowiednio 02*d*, 04*d*, 0,6*d* oraz 0,8*d*.
3) Wykonujemy pomiary dla poszczególnych pozycji sondy S.
4) W rezultacie otrzymujemy 4 wyniki: R_1 (dla S w pozycji 0,2), R_2 (dla S w pozycji 0,4), R_3 (dla S w pozycji 0,6) i R_4 (dla S w pozycji 0,8).
5) Wartości R_1, R_2, R_3 wykorzystujemy do wyznaczenie pozycji dla sondy S zgodnie z metodą narastania zbocza i umieszczamy w obliczonej pozycji sondę napięciową, wykonując po tym pomiar. Otrzymujemy w ten sposób wartość rezystancji badanego uziemienia.
6) Następnie druga metoda posłuży do weryfikacji pomiaru. Podstawiamy do wzoru wartości R_2, R_3 i R_4.

$$R_E = -1{,}335 \cdot R_2 + 3{,}041 \cdot R_3 - 0{,}7057 \cdot R_4$$

Jeśli cała procedura została przeprowadzona poprawnie i odległości do sond były wyznaczone właściwie, to wyniki powinny być w zasadzie takie same. Różnice, jeśli wystąpią, są z reguły wynikiem zbyt małej odległości do sondy prądowej H lub wysokiej rezystywności gruntu. W takim przypadku należy przeprowadzić badanie ponownie przy większej odległości do sondy prądowej H i/lub zadbać o zmniejszenie rezystancji sond pomocniczych. Próby badań łączące ze sobą oba sposoby pomiaru były prowadzone w wielu miejscach i w różnych warunkach, potwierdzając skuteczność takiego sposobu postępowania.

Przykład takich pomiarów jest zaprezentowany poniżej. Są to pomiary uziemienia obiektu, w którym mieści się firma SONEL S.A.



Rys. 57. Układ sond pomocniczych podczas pomiarów uziemienia w siedzibie firmy SONEL S.A.

Na zdjęciu zaznaczono położenie sond pomocniczych przy wykonywaniu badania rezystancji uziemienia fundamentowego z otokiem obiektu produkcyjnego SONEL S.A. Przeprowadzone pomiary i obliczenia (nie są zamieszczone) wykazały dla metody narastania zbocza 0,374 Ω, a dla obliczeń ze wzorem 0,382 Ω. Biorąc pod uwagę różnice na trzecim miejscu po przecinku, wartość 0,3 można uznać za wiarygodną i w zupełności wystarczającą do oceny badanego uziemienia, co w ciągu jednej procedury zostało zweryfikowane i zmierzone.
Podsumowując, nie można nie wspomnieć, iż ekipa wykonująca pomiary chciała je ponowić kilka dni później dla takiego samego ustawienia sond pomocniczych. Jakież było zaskoczenie, kiedy okazało się, że współczynnik μ obliczany do metody narastania zbocza dr. Tagga jest poza tabelą z wyliczonymi danymi! Po kilkukrotnym sprawdzeniu połączeń i położenia sond pomocniczych pozostała do rozważenia tylko jeszcze jedna przyczyna. Nie bez powodu początek rozważań dotyczył właściwości gruntu. Okazuje się, że stabilna ciepła i lekko wietrzna pogoda wpłynęła na zwiększenie się rezystywności gruntu w jego wierzchniej warstwie, mniej więcej na głębokości pogrążania sond pomocniczych. Przy stosunkowo niewielkiej odległości do sondy prądowej H w stosunku do rozmiarów uziemienia był to element wystarczający, aby uniemożliwić przeprowadzenie pomiaru. Ponowiono jednak procedurę, przemieszczając sondę prądową na 120 m, co pozwoliło na uzyskanie współczynnika z końcowych linii tabeli. Pomiary potwierdziły, a w zasadzie

pokryły się z poprzednio otrzymanymi wynikami, co dało pewność poprawności badania. Należy zatem pamiętać o zmienności warunków, jakiej ciągle podlega grunt. Można sobie przy tego rodzaju pomiarach radzić, zwiększając odległość do sondy prądowej lub w niektórych przypadkach obniżając rezystancję sond pomocniczych (stosując np. dłuższe sondy 80 cm). Co interesujące, wartość rezystancji wyliczona ze wzoru była jedynie o kilka procent większa od wyliczonych za pierwszym razem. Można zatem przypuszczać, że opisany wzór ze współczynnikami dla proporcji 0,4 / 0,6 / 0,8 jest metodą prostszą, jednak bez weryfikacji ciężko będzie orzec o jego poprawności – stąd proponowane połączenie metod.

4.5 Udarowa metoda pomiaru uziemienia

Opisane dotąd metody pomiaru rezystancji uziemienia pozwalają na szacowanie skutków pojawienia się w układzie ewentualnych prądów zwarciowych na skutek awarii/zwarć, są też wykorzystywane do sprawdzenia poprawnej pracy instalacji i sieci elektrycznych. Dotyczy to zjawisk wywołanych prądem o częstotliwości 50 Hz. W połowie XX wieku na uniwersytecie w Padwie zespół w składzie Galeazzi, Marenesi i Paloucci zaproponował metodę pomiaru rezystancji słupów linii przesyłowych bez rozłączania przewodów odgromowych z wykorzystaniem generatora udarów. Jednak rozmiary urządzeń potrzebnych do badań były dosyć spore i przez to niepraktyczne. Ok. 1955 r. na Politechnice Gdańskiej zespół prof. Stanisława Szpora zaproponował inne rozwiązanie, zastępując oscyloskop katodowy woltomierzem wartości szczytowej. Dalszy rozwój elektroniki spowodował, że w kolejnych dekadach można było znacznie poprawić parametry metrologiczne mierników i znacznie zmniejszyć ich rozmiary. Pomiary udarowe słupów w liniach przesyłowych opierają się na zjawiskach wynikających z bardzo krótkich czasów impulsów pomiarowych rzędu µs. Pojawia się wtedy impedancja falowa przewodów odgromowych, która łączy poszczególne słupy w układzie. Ze względu na dużą wartość impedancji falowej w układzie przewód-ziemia, metoda pozwala na w zasadzie selektywne wykonanie pomiaru stanowiska danego słupa przy pominięciu wpływu na pomiar pozostałych słupów w układzie. Przez wiele lat w Polsce norma PN-89/E-05003 opisywała problem kontroli w strefach ochrony obostrzonej. W zasadzie tylko w tej normie znajdziemy wymagania pozwalające na porównanie otrzymanych wyników do tych pożądanych. Kolejna norma PN-EN 62305 wprowadzona rozporządzeniem w 2011 r. nie zawiera wymagań dla metody udarowej, chociaż wspomina o pomiarach impulsami 10/350 i 8/20 do oceny uziemień odgromowych.

Zatem metodę udarową zastosujemy tam, gdzie ochrona jest obostrzona, a także do ochrony odgromowej lub badania rezystancji słupów kratowych. Polega ona na wygenerowaniu impulsu o odpowiednim czasie narastania i opadania zbocza. Bardzo często pojawiają się chęci klasyfikowania metod pomiaru w kategorii lepsza-gorsza. W takim przypadku należałoby raczej skupić się na odpowiedzi, kiedy stosować metodę techniczną, a kiedy udarową, bowiem istotą wyboru metody pomiarowej jest w tym przypadku charakter badanego uziemienia, a nie wyimaginowana jakość metody. Uziemienia robocze czy ochronne mierzymy zatem metodą techniczną, a odgromowe – udarową.

Ze względu na swoje właściwości, metoda udarowa jest czasem wykorzystana wówczas, gdy w rozległym układzie uziemiającym chcemy mierzyć nie rezystancję wypadkową, tylko miejscową (w najbliższym otoczeniu od miejsca przyłączenia miernika), a jednocześnie układ konstrukcyjny uziemienia uniemożliwia nam rozkręcenie złącz kontrolnych lub wykorzystanie metody technicznej z cęgami. Jako przykład może posłużyć wspomniana już linia WN. Chcemy zmierzyć wartość uziemienia słupa, a nie wypadkową całej linii, i to bez rozpinania złącz kontrolnych oraz pod napięciem. Stosując metodę udarową możemy tego dokonać, ponieważ prąd pomiarowy popłynie tylko w obszarze ograniczonym do stanowiska, na którym znajduje się mierzony słup, ponieważ impedancja (jej składowe oraz zjawiska falowe, naskórkowości itd.) powoduje, że pozostała część

linii WN jest jak gdyby „niewidoczna" dla układu pomiarowego. Patrząc na zagadnienie z tego punktu widzenia, można by pokusić się o takie stwierdzenie: **zaletą metody udarowej jest możliwość mierzenia rezystancji uziemienia w układach złożonych bez ich rozłączania.** Niekiedy zdarza się, że zastosowanie metody udarowej jest wymagane przez przepisy wewnętrzne. W Polsce dotyczy to stref EX, stacji tankowania LPG itp.

Różnice pomiędzy statycznymi i udarowymi własnościami uziomów wynikają w zasadzie z dwóch podstawowych cech udarów:

a) bardzo krótkich czasów przepływu prądu,
b) bardzo wielkich natężeń prądów.

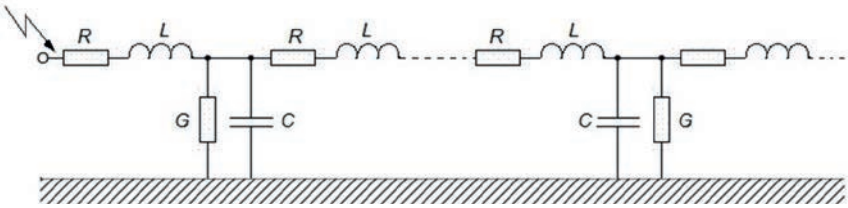
Badając uziom metodą udarową, nie jesteśmy w stanie wygenerować dużych prądów; np. miernik Sonel MRU-200 może wymusić maksymalnie 1 A. Dlatego w badaniach miernikami udarowymi nie uwzględniamy punktu b). Nie jest to jednak błąd krytyczny i jest pomijany. Wyjaśnienie tego zjawiska nie jest proste i bez pewnego przygotowania politechnicznego można je lakonicznie opisać w taki sposób:

Ogromne wartości prądu (o wysokiej częstotliwości), powstające podczas wyładowań atmosferycznych, powodują zmniejszenie się rezystywności gruntu.

Warto jednak sprawie przyjrzeć się dokładniej. Jeśli będziemy rozpatrywać określony obszar gruntu jako obwód elektryczny, do którego przyłożymy napięcie o znacznie wyższej częstotliwości niż 50 Hz czy 150 Hz, siła spowodowana efektem relaksacji, a hamująca ruch jonów, zmniejsza się. Przewodność roztworu przy wielkich częstotliwościach jest więc większa niż przy małych częstotliwościach. Zjawisko to nazywa się dyspersją przewodnictwa lub efektem Debye'a-Falkenhagena.

Udarowa charakterystyka dla różnych rodzajów gruntu (wyznaczana w chwili występowania szczytu prądowego) zależy przede wszystkim od długości czoła prądu i rezystywności gruntu wyznaczonego metodą statyczną. Wydłużenie czoła fali udarowej powoduje znaczną zmianę (różnice w przebiegu) dla gruntów mokrych. Dla gruntów suchych wydłużenie czoła fali ma niewielki wpływ na zmiany rezystywności udarowej. Trzeba również dodać, że przy tak dużych prądach natężenie pola elektrycznego osiąga wartości graniczne, przy których powstają miejscowe wyładowania (mikrozwarcia) obniżające rezystywność gruntu, a w konsekwencji rezystancję uziemienia. W gruntach dobrze przewodzących zjawisko to ma mniejsze znaczenie. Zatem niezależnie od tego, jak nazwiemy te zjawiska, w konsekwencji punkt b) powoduje zmniejszenie się wartości rezystancji uziemienia. Bardzo krótkie czasy przepływu prądu (duża częstotliwość) powodują zwiększenie się rezystancji udarowej w porównaniu z metodą techniczną.

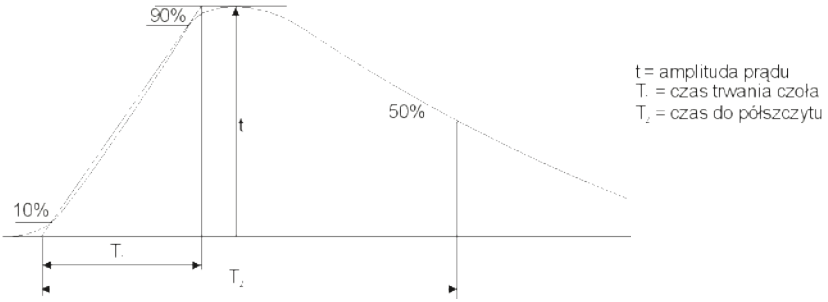
Wynika to z faktu, iż zmiany natężenia prądu przy udarach są wielokrotnie szybsze niż te, które następują przy metodzie statycznej. Indukcyjność uziemienia nie ma większego znaczenia dla przepływu prądu o częstotliwości sieciowej czy też pomiarowej (125 Hz, 128 Hz) jednak dla prądów udarowych jest jednym z kluczowych elementów wpływających na wartość rezystancji (właściwe to już impedancji) udarowej uziemienia. Spadki napięcia na rezystancji mierzonego uziomu, przez który płynie prąd udarowy, na skutek występującej indukcyjności mogą być bardzo duże. Dlatego dalsze elementy układu uziemiającego mają mniejszy lub – jeśli są bardzo daleko – żaden wpływ na wypadkową rezystancję uziemienia. Dzieje się tak, ponieważ na tych oddalonych elementach układu uziemiającego występuje niewielki potencjał i nie biorą one udziału w procesie rozpływu prądu. A właściwie biorą udział, ale w stopniu minimalnym, wielokrotnie mniejszym niż te elementy uziemienia, które znajdują blisko miejsca przyłączenia miernika (wejścia prądu do układu).



Rys. 58. Model przewodnika w ziemi dla wyładowania

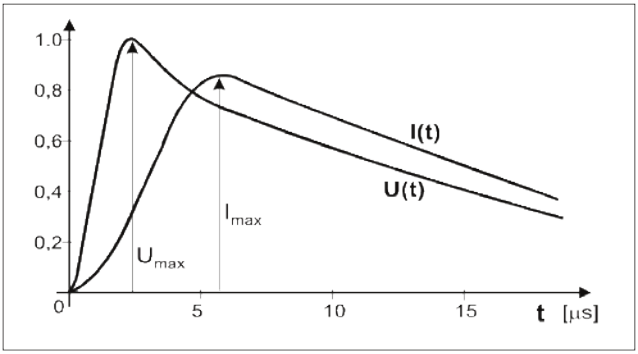
W odprowadzaniu prądu piorunowego do ziemi największy udział bierze początkowa cześć uziomu. Reaktancja indukcyjna przewodu powoduje, że dalsze części uziemienia mają mniejszy wpływ na odprowadzanie prądu pioruna. Podsumowując, zjawiska, które są opisane powyżej, skutkują wzrostem oporu uziemienia. Jak bardzo duży jest ten wzrost, zależy bezpośrednio od:

- szybkości zmian natężenia prądu udarowego (jego kształtu),
- długości lub rozległości układów uziemiających,
- rezystywności gruntu.



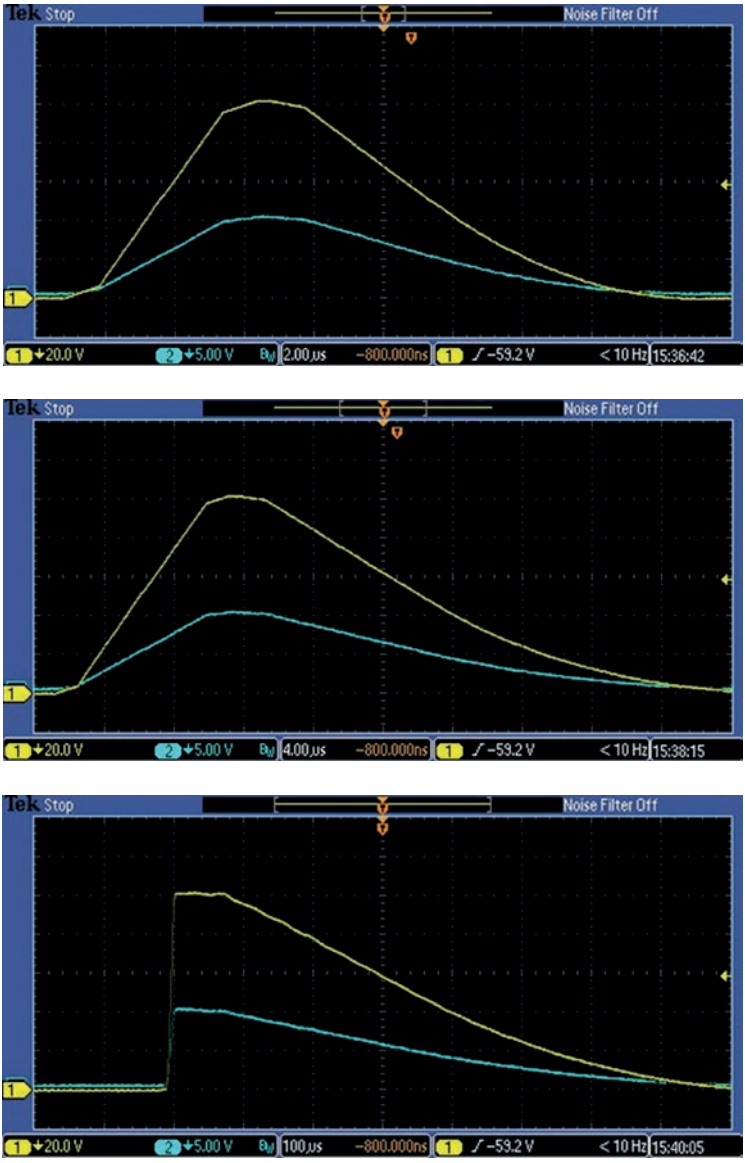
Rys. 59. Kształt impulsu pomiarowego

Impedancja udarowa wyliczana jest jako stosunek jednoczesnych wartości chwilowych prądu i napięcia, chociaż nie występują one jednocześnie.



Rys. 60. Kształt prądu i napięcia podczas pomiaru

Jednakże, choć w większości przypadków rezystancja udarowa jest większa, nie znaczy to, że dzieje się tak zawsze. Dla rozległych układów uziemiających w zasadzie można przyjąć to za standard. Natomiast dla uziomów pojedynczych (kilkumetrowe szpilki) dla udaru 10/350 wyniki dla metody technicznej i udarowej będą zbliżone lub nawet takie same.



Rys. 61. Przebiegi prądu i napięcia przy pomiarze udarami 10/350, 8/20, 4/10

W takich przypadkach jest to oczywiste, ponieważ mamy do czynienia w zasadzie z rezystancją, a impedancja falowa jest pomijalnie mała i nie powoduje przesunięcia prądu względem napięcia, co prezentują oscylogramy wykonane przy pomiarze rezystancji o wartości 10 Ω.

W warunkach nietypowych (krótkie bednarki płytko w ziemi) metoda udarowa może dać wynik niższy niż metoda techniczna. Nie należy się dziwić, że wynik pomiaru metodą udarową może być niższy, wyższy lub taki sam jak przy użyciu metody technicznej. Zależy to od rozległości uziemienia i rezystywności gruntu w jego otoczeniu. Ważne jest natomiast, aby umieć prawidłowo wyciągnąć wnioski i ocenić pomiar. W literaturze można znaleźć odniesienie metody technicznej do udarowej. Otóż w celu uzyskania wartości rezystancji udarowej (nie przeprowadzając pomiaru metodą udarową) należy rezystancję statyczną pomnożyć przez współczynnik udarowy. Wartości tego współczynnika są różne dla różnych okoliczności (własności gruntu, rozległości uziemienia). Jednak ze względu na złożoność tematu korzystniej jest wykonać pomiar niż szacować wartość, zwłaszcza przy takiej zmienności zachodzących zjawisk dla metody udarowej.

O wyborze konkretnego kształtu impulsu pomiarowego decyduje charakter mierzonego uziemienia oraz miejsce pomiaru. Do wyboru mamy trzy kształty impulsu pomiarowego. Każdy z nich odzwierciedla pewne zjawisko występujące w trakcie udarów (dwa z nich to wyładowania atmosferyczne), i tak:

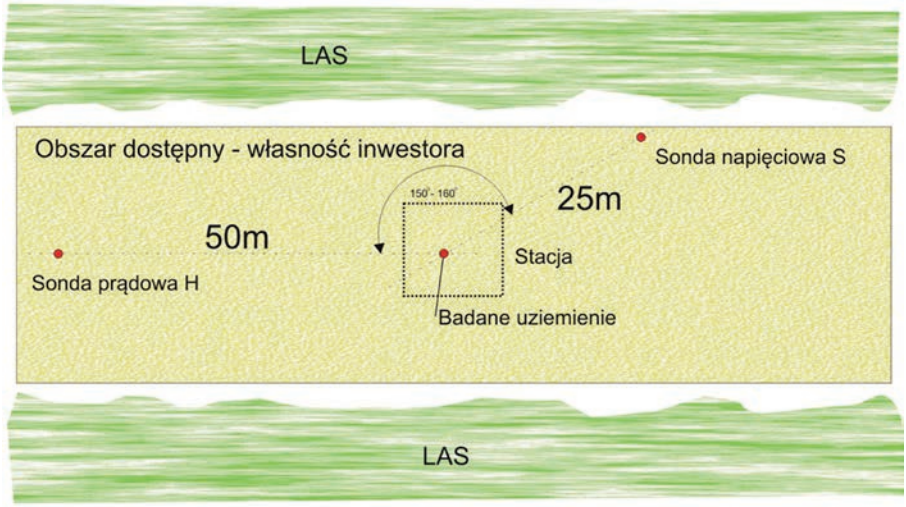
10/350 – taki kształt impulsu udarowego będzie miał prąd płynący na skutek wyładowania atmosferycznego trafiającego bezpośrednio w badaną instalację uziemiającą.

8/20 – ten kształt odpowiada prądowi, który wyindukuje się w instalacji uziemiającej na skutek wyładowania atmosferycznego, które nie trafiło bezpośrednio w instalacje uziemiającą.

4/10 – większa częstotliwość impulsu, powodująca jeszcze wydatniejsze zmniejszenie się obszaru instalacji uziemiającej, która uczestniczy w odprowadzeniu energii impulsu pomiarowego. Stosowany w energetyce przy pomiarze słupów.

Dawniej prowadzono próby z impulsem 1/4. Jednak przy tak ogromnej częstotliwości nie można utrzymać stabilności pomiaru i zaniechano stosowania tego kształtu. Opisane wcześniej zjawiska determinujące cechy udarowej metody pomiarowej wyjaśniają, dlaczego przy wzroście częstotliwości impulsu pomiarowego wyniki są wyższe jak dla niższych częstotliwości. Wykorzystując te zależności można prowadzić badania porównawcze, sprawdzając, jak dla określonych parametrów zmienia się wartość impedancji.

Możliwość wykonania pomiaru metodą udarową wymaga znacznie mniejszych dopuszczalnych rezystancji sond pomocniczych. Chodzi o moc, którą dostarczamy do układu pomiarowego. Napięcie maksymalne udaru to 1,5 kV, a prąd to 1 A. Nie da się wykonać pomiaru przy tych parametrach, jeśli sondy miałyby, jak dla metody technicznej, rezystancję do 40 kΩ czy 50 kΩ, gdzie napięcie to 50 V (25 V), a prąd w obwodzie to miliampery. Ograniczenie wynika zatem bezpośrednio z faktu, że metoda udarowa do pomiaru musi mieć wyższe napięcie oraz większy prąd. Aby to się udało przy takiej konstrukcji miernika, sondy muszą mieć mniejszą rezystancję. W niektórych przypadkach, jak na terenach piaszczystych, może zaistnieć potrzeba pogrążenia sond pomocniczych nawet na kilka metrów. Niekiedy stosuje się rozwiązanie polegające na wbiciu sond na stałe w obszarze, gdzie pomiary wykonywane są regularnie, np. przy rurociągach gazowych. Należy zastosować się do zasady utrzymania kąta pomiędzy przewodami prądowym i napięciowym 60° lub więcej. Przewód prądowy jest na całej długości ekranowany, aby ograniczyć wpływ zjawisk falowych na wynik pomiaru



Rys. 62. Rozmieszczenie sond pomocniczych dla metody udarowej

Rysunek 62 przedstawia przykład budowy układu pomiarowego w obszarze leśnym, gdzie sondy mogły być pogrążone wyłącznie w obszarze udostępnionym (kolor żółty). Aby uzyskać właściwą rezystancję sond pomocniczych, należało wbić elementy uziemienia pionowego na głębokość 7 m i wykorzystać je jako sondy. Pozostały tam na stałe. Kąt pomiędzy sondami wymusił pas gruntu, którego właścicielem jest inwestor.

Wymagania dotyczące maksymalnych wartości uziemień można znaleźć jedynie w normach z serii 5003. W normie PN-89/E-05003/03 czytamy: *punkt* ***2.1.3. Uziemienie.*** *Rezystancja uziemienia obliczona zgodnie z PN-86/E-05003/01 p. 3.6.3b), c) i e) lub zmierzona mostkiem udarowym, nie powinna przekraczać wartości wg tabl. 1.*

Tab. 9. Największe dopuszczalne wartości rezystancji wypadkowej uziemienia obiektu, Ω

Rodzaje uziomów	Rodzaje gruntu		
	podmokłe, bagienne, próchnicze, torfiaste, gliniaste	wszystkie pośrednie rodzaje	kamieniste i skaliste
poziome, pionowe i mieszane oraz stopy fundamentowe	10	20	40
otokowe, ławy fundamentowe	15	30	50

Tab. 10. Wymagane rezystancje dla ochrony obostrzonej i specjalnej wyrażone w Ω

Udarowa rezystancja uziemienia dla ochrony obostrzonej (PN-89/E-05003/03)				
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 mat. wybuch.*	układ uziomów	5		10
	uziom otokowy pojedynczy	15		25
Udarowa rezystancja uziemienia. Ochrona specjalna (PN-92/E-05003/04)				
kominy	poziome, pionowe, mieszane	10	20	40
	otokowe, fundamentowe	15	30	50
linowe urządzenia transportowe	stacje	50		
	podpory	100		
obiekty sportowe		10	20	40
dźwigi		20		50

1) G. F. Tagg , Measurement of the resistance of physically large earth-electrode systems, PROC. IEE, Vol. 117, No. 11, NOVEMBER 1970
2) G. F. Tagg, Earth resistances. New York, Pitman Pub. Corp. [1964]
3) Witold Hoppel, Robert Marciniak – Uziemienia w sieciach elektroenergetycznych – Wydawnictwo WNT
4) Roman Domański, Jacek Osiecki – Metoda techniczna pomiaru rezystancji uziemienia. Elektro Info nr. 11/2019 (179)
5) Materiały własne SONEL S.A
6) Modelowanie i symulacje w obliczeniach uziomów dr inż. Konrad Sobolewski
7) Strona internetowa RST – https://rst.pl/projektowanie-ukladu-uziemiajacego-obliczenia-teoretyczne-w-praktyce/
8) An Introduction to Soil Resistivity – August 28, 2020 by Lorenzo Mari – https://eepower.com/technical-articles/an-introduction-to-soil-resistivity/#
9) ROZWÓJ METOD POMIARU REZYSTANCJI UDAROWEJ UZIEMIEŃ NA PODSTAWIE PRAC PROWADZONYCH W POLITECHNICE GDAŃSKIEJ Stanisław WOJTAS, Miron GALEWSKI, Marek WOŁOSZYK – Seminarium Postępy w Technice Wysokich Napięć 100. Rocznica Urodzin Profesora Stanisława Szpora16 maj 2008
10) Norma PN-86/E-05003/01 Ochrona odgromowa obiektów budowlanych – Wymagania ogólne
11) Norma PN-89/E-05003/02 Ochrona odgromowa obiektów budowlanych – Ochrona podstawowa
12) Norma PN-89/E-05003/03 Ochrona odgromowa obiektów budowlanych – Ochrona obostrzona
13) Norma PN-92/E-05003/04 Ochrona odgromowa obiektów budowlanych – Ochrona specjalna

SONEL S.A.
Biuro Obsługi Klienta
tel. +48 74 884 10 53

Odwiedź nas na
www.sonel.pl

v.1 | 03.2025