

STANDARDOWA SPECYFIKACJA FUNKCJONALNA

Numer kodowy

PSE-SF.Badanie
uziemień.PL/2023

TYTUŁ:

**BADANIE UZIEMIĘŃ ODGROMOWYCH SŁUPÓW ORAZ
SKUTECZNOŚCI OCHRONY PRZECIWPORAŻENIOWEJ
W NAPOWIETRZNYCH LINIACH
ELEKTROENERGETYCZNYCH NN**

OPRACOWANO:
DEPARTAMENT STANDARDÓW TECHNICZNYCH

**ZATWIERDZONO
DO STOSOWANIA**

Data

Konstancin-Jeziorna, kwiecień 2023 r.

Spis treści:

1.	Przedmiot i zakres specyfikacji	3
2.	Normy i dokumenty powołane w specyfikacji	3
3.	Definicje i symbole.....	4
4.	Badanie uziemień odgromowych słupów	6
5.	Badanie skuteczności ochrony przeciwporażeniowej.....	16
6.	Lista załączników.....	27

1. Przedmiot i zakres specyfikacji

Niniejsza specyfikacja zawiera wymagania dotyczące przeprowadzania badań uziemień odgromowych słupów oraz sprawdzenia skuteczności ochrony przeciwporażeniowej, w nowobudowanych i istniejących napowietrznych liniach elektroenergetycznych NN.

Specyfikację można również stosować do linii napowietrznych 110 kV.

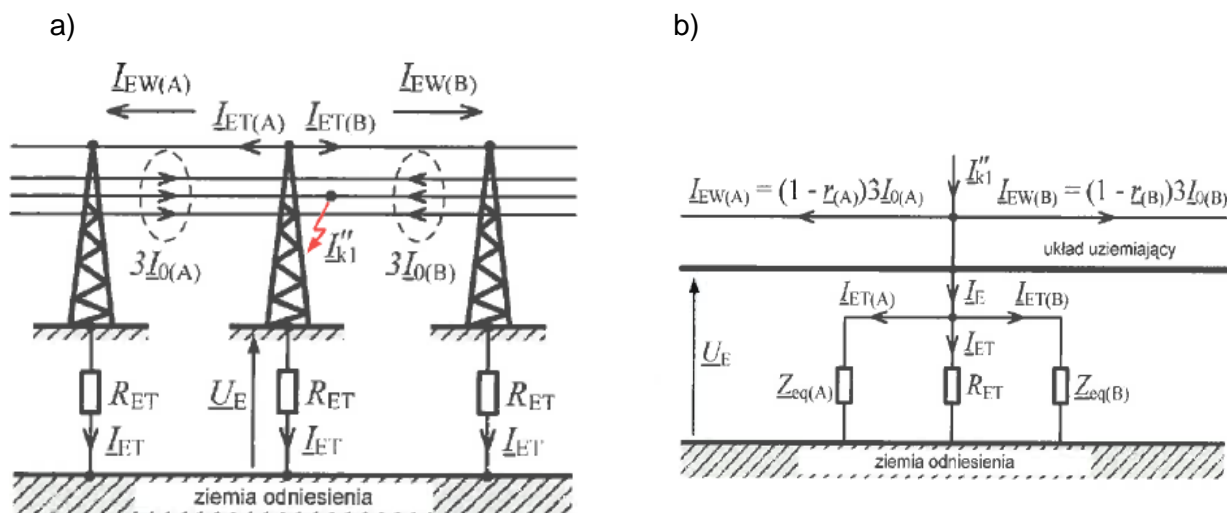
2. Normy i dokumenty powołane w specyfikacji

L.p.	Numer normy/nazwa dokumentu	Tytuł
1	PN-EN 50341-1:2013-03	Elektroenergetyczne linie napowietrzne prądu przemiennego powyżej 1 kV. Część 1: Wymagania ogólne. Specyfikacje wspólne.
2	PN-EN 50341-2-22:2022-06	Elektroenergetyczne linie napowietrzne prądu przemiennego powyżej 1 kV. Część 2-22: Krajowe Warunki Normatywne (NNA) dla Polski (oparte na EN-50341-1:2012).
3	Opracowanie PTPiREE	Zasady ochrony przed porażeniem w stacjach i liniach WN i NN. Gliwice, 2020.
4	Specyfikacja Techniczna PSE S.A.	Uziemienia linii napowietrznych
5	Specyfikacja Techniczna PSE S.A.	Linie kablowe 220 kV i 400 kV
6	Instrukcja organizacji i wykonywania prac eksploatacyjnych na liniach i stacjach NN (dokument wewnętrzny PSE S.A.)	II. 10. Instrukcja szczegółowa: Linie napowietrzne NN

W przypadku powołań datowanych ma zastosowanie wydanie cytowane. W przypadku powołań niedatowanych należy stosować aktualne normy i specyfikacje techniczne.

3. Definicje i symbole

1. napięcie dotykowe rażeniowe (U_T) – część napięcia uziomowego występująca na ciele człowieka na drodze ręka – stopy (przyjmuje się poziomą odległość od części dotykanej równą 1 m).
2. największe dopuszczalne napięcie dotykowe rażeniowe ($U_{Tp} = U_{D1}$) – największy dopuszczalny spadek napięcia na rezystancji (impedancji) ciała człowieka, przy którym nie występują skutki patofizjologiczne uznane za niedopuszczalne; wartość największego dopuszczalnego napięcia dotykowego rażeniowego zależy od czasu trwania rażenia (czasu trwania doziemienia t_z).
3. największe dopuszczalne napięcie dotykowe spodziewane (U_D) – napięcie, które jest napięciem źródłowym w obwodzie dotykowym rażeniowym, gwarantujące, że nie wystąpi zagrożenie porażeniowe ludzi przy znanych rezystancjach dodatkowych (np. obuwia lub izolującego materiału powierzchni).
4. napięcie uziomowe (U_E) – napięcie między układem uziemiającym a ziemią odniesienia.
5. prąd doziemienia – prąd, który płynie z obwodu głównego do ziemi lub do części uziemionych, jeżeli w miejscu zwarcia (miejscu doziemienia) jest tylko jeden punkt doziemienia.
Uwaga: W sieciach wysokiego napięcia z punktem neutralnym uziemionym bezpośrednio największy spodziewany prąd doziemienia to prąd zwarcia jednofazowego z ziemią I''_{K1} .
6. prąd uziomowy (I_E) – prąd płynący do ziemi przez impedancję uziemienia.
Uwaga: W liniach wysokiego napięcia należących do sieci z punktem neutralnym uziemionym bezpośrednio, prąd uziomowy jest częścią prądu doziemienia (patrz definicja współczynnika redukcyjnego).
7. impedancja uziemienia – impedancja pomiędzy układem uziemiającym a ziemią odniesienia.
8. układ uziemiający – w niniejszej specyfikacji należy rozumieć zgodnie ze schematem zastępczym przedstawionym na Rys.1.



Rys. 1. Przykładowy rozptyw prądu zwarcia jednofazowego przy zwarciu na słupie linii oraz zastosowane oznaczenia na podstawie opracowania PTPIREE pt.: „Zasady ochrony przed porażeniem w stacjach i liniach WN i NN”, Gliwice, 2020:

- a) szkic sytuacyjny dla linii napowietrznej,
- b) schemat zastępczy.

9. rezystancja uziemienia R_E – rezystancja ziemi pomiędzy uziemieniem słupa a ziemią odniesienia.
10. uziemienie słupa – układ uziomów (poziomych i/lub pionowych) na danym stanowisku słupa.
11. współczynnik redukcyjny linii trójfazowej (r) – stosunek prądu uziomowego (I_E) do sumy prądów składowej kolejności zerowej ($3I_0$) płynących w przewodach fazowych obwodu głównego.

W przypadku zwarcia jednofazowego z ziemią prąd I''_{k1} jest równy sumie prądów składowej kolejności zerowej $3I_0$.

$$r = \frac{I_E}{3I_0} \quad (1)$$

12. przewód uziemiający – w przypadku linii napowietrznych jest to przewód łączący konstrukcję słupa z uziomem.
13. ziemia odniesienia – część ziemi rozpatrywanej jako ośrodek przewodzący, której potencjał elektryczny jest przyjmowany jako równy zero i znajdujący się poza strefą oddziaływania uziemienia słupa lub układu uziemiającego.

4. Badanie uziemień odgromowych słupów

4.1. Wymagania ogólne

Badanie uziemień odgromowych słupów polega na wykonaniu kolejno następujących czynności:

1. Pozyskanie informacji o typach badanych uziemień słupów z dokumentacji projektowej lub powykonawczej.
2. Oględziny elementów nadziemnych uziemienia słupa, tj. złącz kontrolnych i przewodów uziemiających.
3. Sprawdzenie ciągłości przewodów uziemiających, przy czym nie dotyczy to uziemień słupów bez uziomu poziomego (otoku).
4. Pomiar rezystancji uziemienia słupa R_E jedną z poniższych metod:
 - a) metoda spadku napięcia 3p (4p) – jedyna metoda dopuszczona do badań odbiorczych uziemień nowobudowanych słupów oraz metoda właściwa do potwierdzenia w przypadku negatywnego wyniku pomiaru wykonanego metodami od punktu 4b) do punktu 4d),
 - b) metoda spadku napięcia 3p w opcji z cęgami,
 - c) metoda dwu cęgowa,
 - d) metoda udarowa - pomiar impedancji udarowej Z_E ,
 - e) metoda spadku napięcia 3p (4p) dla pomiaru rezystancji uziemienia słupów bez uziomu poziomego (otoku) łączącego uziomy pionowe,
5. Pomiar rezystywności gruntu, jeżeli dotyczy.
6. Sporządzenie protokołu z wykonanych prac.

Założenia podstawowe do wszystkich wyżej wymienionych metod:

- a) Pomiar rezystancji należy wykonać w okresie od 1 kwietnia do 31 października.
- b) Dopuszcza się wykonanie pomiarów w innym terminie. Jednak w takim przypadku wymagane jest wykonanie pomiarów weryfikacyjnych w najbliższym okresie, o którym mowa w pkt. a), jedną z metod wg. pkt. 4
- c) Nie należy wykonywać pomiarów rezystancji słupów przy gruncie silnie nasyconym wodą (po roztopach śniegu oraz przez trzy dni po długotrwałych lub intensywnych opadach deszczu) oraz w przypadku występowania zmarzliny w gruncie.
- d) Sondy pomiarowe należy dobrać i rozmieścić według instrukcji danego przyrządu pomiarowego.

- e) Wynik pomiaru powyżej wartości dopuszczalnej uzyskany metodami wykorzystującymi cęgi lub metodą udarową należy potwierdzić pomiarem rezystancji uziemienia R_E metodą spadku napięcia 3p (4p).

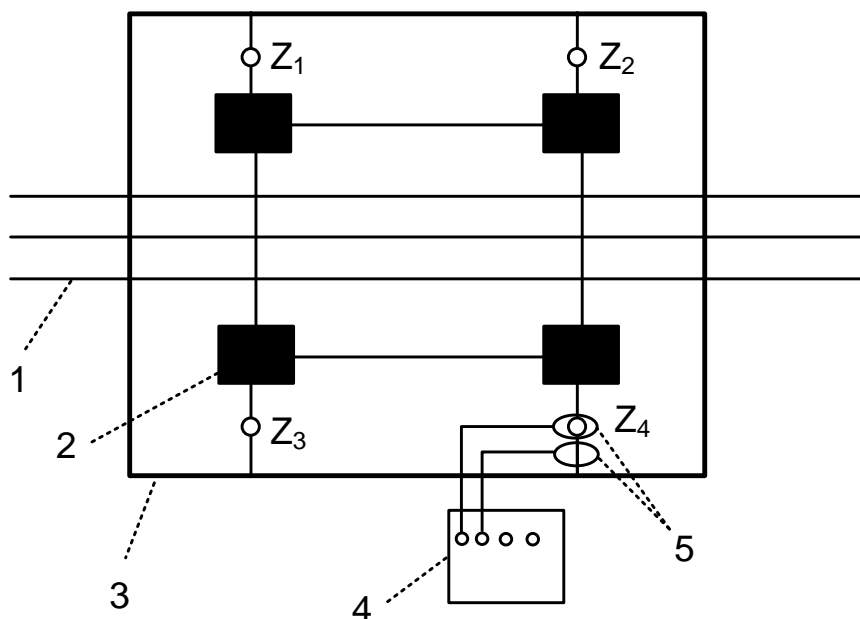
4.2. Sprawdzenie ciągłości przewodów uziemiających

W celu sprawdzenia ciągłości przewodów uziemiających, należy zastosować układ przedstawiony na Rys. 2. oraz wykorzystać przyrząd zbudowany w oparciu o metodę pomiaru z wykorzystaniem cęgów pomiarowych. Pomiar należy wykonać na każdym przewodzie uziemiającym zapinając cęgi nadawcze i odbiorcze na dany przewód.

Uwaga: pomiar ciągłości jest możliwy w przypadku występowania zamkniętej pętli prądowej, zatem jest możliwy na uziemieniach powierzchniowych złożonych z co najmniej jednego uziomu poziomego (otoku) łączącego przewody uziemiające pod ziemią.

Jako wartość kryterialną dla metody z wykorzystaniem cęgów, należy przyjąć wartość 0,5 Ω . Gdy wynik jest mniejszy od tej wartości, przyjmuje się, że przewód uziemiający jest ciągły. Gdy wynik jest większy może wskazywać zarówno na słabe połączenie przewodu uziemiającego z konstrukcją lub uziomem jak i brak ciągłości samego przewodu uziemiającego. Po wskazaniu usterki konieczny jest pomiar metodą dwuprzewodową (metoda 2p).

Celem potwierdzenia miejsca usterki należy odkręcić wytypowany przewód uziemiający od konstrukcji i dokonać pomiaru rezystancji metodą dwuprzewodową. Pomiar wykonuje się pomiędzy odkręconym badanym przewodem uziemiającym a konstrukcją słupa poprawnie połączoną pozostałymi przewodami uziemiającymi z uziomem. Jako wartość kryterialną dla metody 2p, należy przyjąć 0,2 Ω . Wyższa wartość rezystancji, w wyniku pomiaru metodą 2p, świadczy o uszkodzeniu przewodu uziemiającego (utrata ciągłości przewodu lub połączenia z uziomem). Uzyskanie wartości poniżej 0,2 Ω metodą 2p w powyższym układzie wskazuje, że przyczyną jest podwyższona rezystancja złącza kontrolnego na konstrukcji. W tym przypadku należy oczyścić powierzchnię styku w miarę możliwości nie uszkadzając ochronnej powłoki cynkowej (jeżeli występuje), przyłączyć przewód uziemiający do konstrukcji i wykonać ponowny pomiar metodą cęgową.

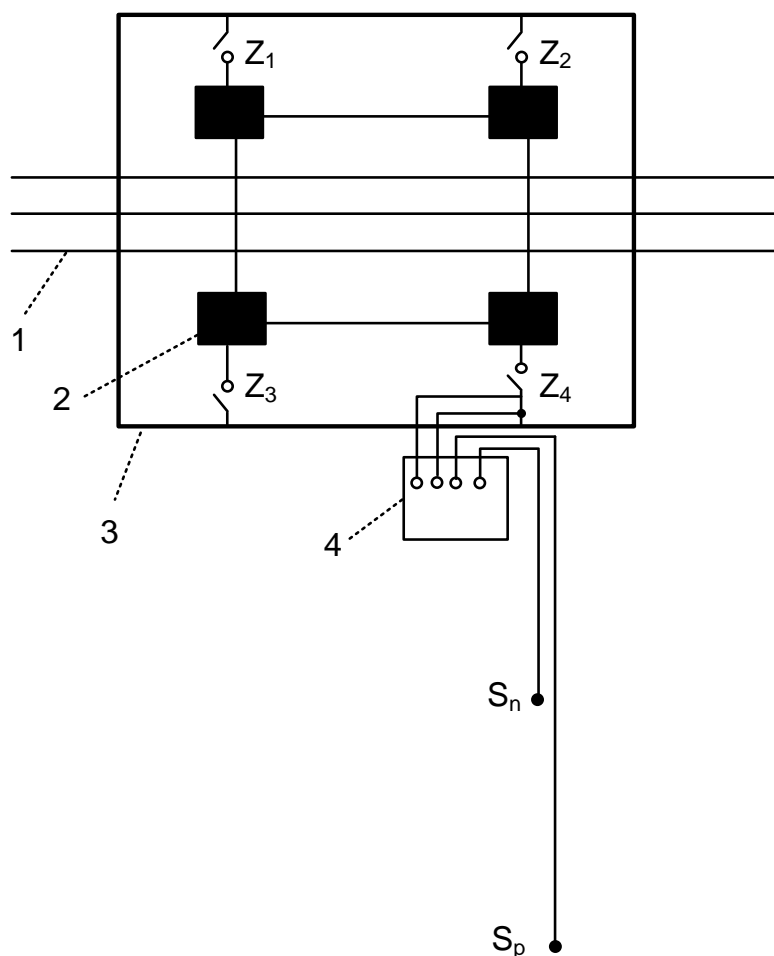


Rys. 2. Poglądowy schemat układu (rzut z góry) do sprawdzenia ciągłości przewodów uziemiających przyrządem wykorzystującym metodę dwucęgową. Oznaczenia: 1 - linia napowietrzna, 2 - stopa (uziom fundamentowy) słupa, 3 - uziom poziomy (otokowy), 4 – miernik, 5 - cęgi pomiarowe, Z₁-Z₄ - zaciski probiercze.

4.3. Pomiar rezystancji uziemienia R_E – metoda 3p (4p)

Przy stosowaniu tej metody wszystkie przewody uziemiające powinny być odłączone od konstrukcji słupa. W przypadku wykonywania pomiarów w linii istniejącej, ze względów bezpieczeństwa konieczne jest wyłączenie spod napięcia wszystkich torów linii zawieszonych na danej konstrukcji oraz zastosowanie środków technicznych w postaci sprzętu ochrony indywidualnej, w tym elektroizolacyjnego, dobranego do występujących zagrożeń. Dopuszcza się wykonanie pomiarów bez wyłączania linii przy opracowaniu instrukcji bezpiecznego wykonywania prac określającej środki techniczne i organizacyjne eliminujące ryzyko porażenia.

W metodzie mierzony jest spadek napięcia na uziemieniu oraz przepływający prąd pomiarowy, a następnie wyliczana jest rezystancja. Pomiar powinien być wykonywany przyrządem pomiarowym wykorzystującym trzy (3p) lub cztery (4p) zaciski. Dla zwiększenia dokładności pomiaru zaleca się wykorzystanie czterech zacisków. Nie należy stosować przyrządów wykorzystujących cęgi.



Rys. 3. Poglądowy schemat układu pomiarowego (rzut z góry) do pomiaru rezystancji uziemienia słupa metodą 4p (3p). Oznaczenia: 1 - linia napowietrzna, 2 - stopa (uziom fundamentowy) słupa, 3 - uziom poziomy (otokowy), 4 - miernik uziemienia, Z_1 - Z_4 - zaciski probiercze, S_n , S_p - sonda napięciowa i prądowa

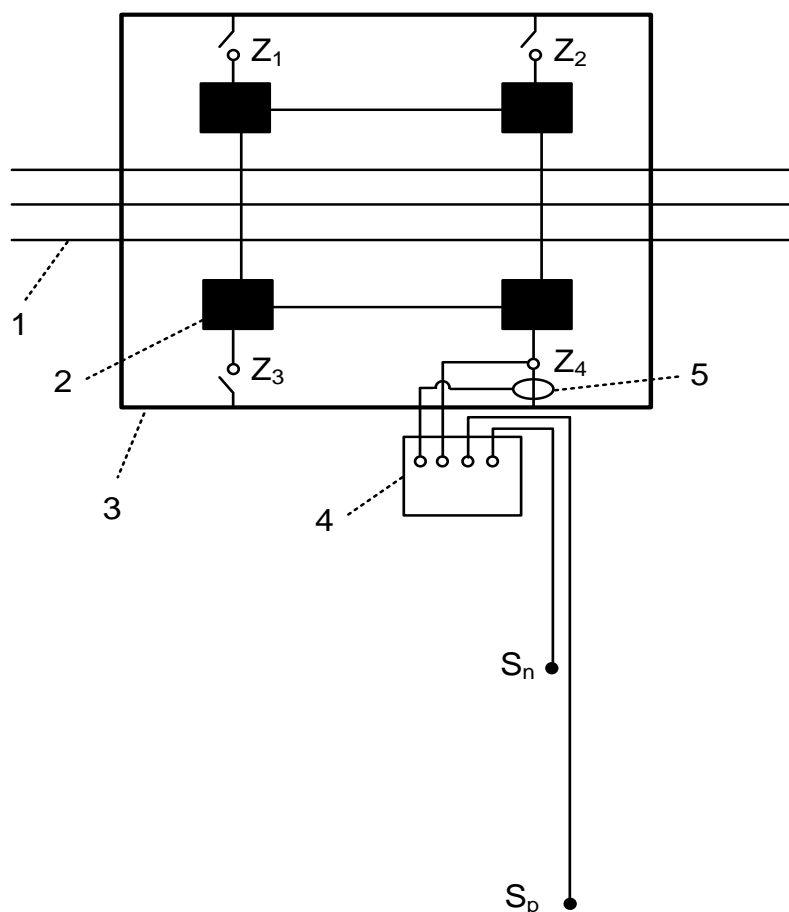
Przed wykonaniem pomiaru wartości rezystancji uziemienia, konieczne jest wyznaczenie strefy zerowego potencjału. W celu sprawdzenia, że sonda napięciowa znajduje się w strefie zerowego potencjału można np. wykonać dwa dodatkowe odczyty z sondą napięciową S_n przesuniętą o około 10% odległości liniowej między przewodem uziemiającym i sondą S_p prądową w stosunku do pierwotnej lokalizacji. Jeżeli rezultaty tych trzech pomiarów są w przybliżeniu zgodne, średnią z tych trzech odczytów przyjmuje się jako rezystancję uziemienia R_E . Jeżeli nie ma takiej zgodności, próby należy powtórzyć, zwiększając odległość sondy S_p prądowej od przewodu uziemiającego oraz zmienić położenie sondy napięciowej S_n . Dopuszcza się również inne sposoby sprawdzenia lokalizacji sondy napięciowej w strefie zerowego potencjału.

4.4. Pomiar rezystancji uziemienia R_E – metoda 3p w opcji z cęgami

Przy stosowaniu tej metody nie jest konieczne wyłączenie linii spod napięcia. Należy odpiąć od konstrukcji słupa przewody uziemiające z wyjątkiem jednego. Pozostawienie jednego przewodu uziemiającego połączonego ze słupem uzasadnione jest względami bezpieczeństwa.

W metodzie mierzony jest spadek napięcia na uziemieniu oraz przepływający prąd pomiarowy, a następnie wyliczana jest rezystancja. Pomiar powinien być wykonywany przyrządem pomiarowym wykorzystującym trzy zaciski (3p) oraz dodatkowo cęgi pomiarowe.

W celu prawidłowego pomiaru wartości rezystancji uziemienia, konieczne jest wyznaczenie strefy zerowego potencjału. Strefę potencjału zerowego wyznacza się zgodnie z pkt.4.3.

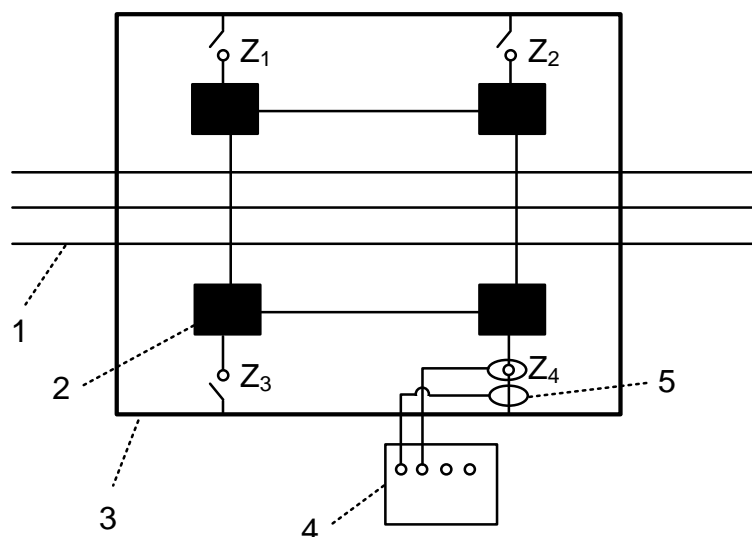


Rys. 4. Poglądowy schemat układu pomiarowego (rzut z góry) do pomiaru rezystancji uziemienia słupa metodą 3p w opcji z cęgami, z częściowo rozpiętymi zaciskami probierczymi; Oznaczenia: 1 - linia napowietrzna, 2 - stopa (uziom fundamentowy) słupa, 3 – uziom poziomy (otokowy), 4 - miernik rezystancji uziemienia, 5 - cęgi pomiarowe, Z_1 - Z_4 - zaciski probiercze, S_n , S_p - sonda napięciowa i prądowa

4.5. Pomiar rezystancji uziemienia R_E – metoda dwucęgowa

Przy stosowaniu tej metody nie jest konieczne wyłączenie linii spod napięcia. Należy odpiąć od konstrukcji słupa przewody uziemiające z wyjątkiem jednego. Pozostawienie jednego przewodu uziemiającego połączonego ze słupem uzasadnione jest względami bezpieczeństwa.

W metodzie tej wykorzystuje się cęgi nadawcze (służące do wygenerowania napięcia w obwodzie) i cęgi odbiorcze (mierzące płynący w obwodzie prąd). Cęgi te należy zapiąć na nieodpięty przewód uziemiający badanego słupa. Odległość między cęgami powinna być zgodna z zaleceniami producenta miernika.



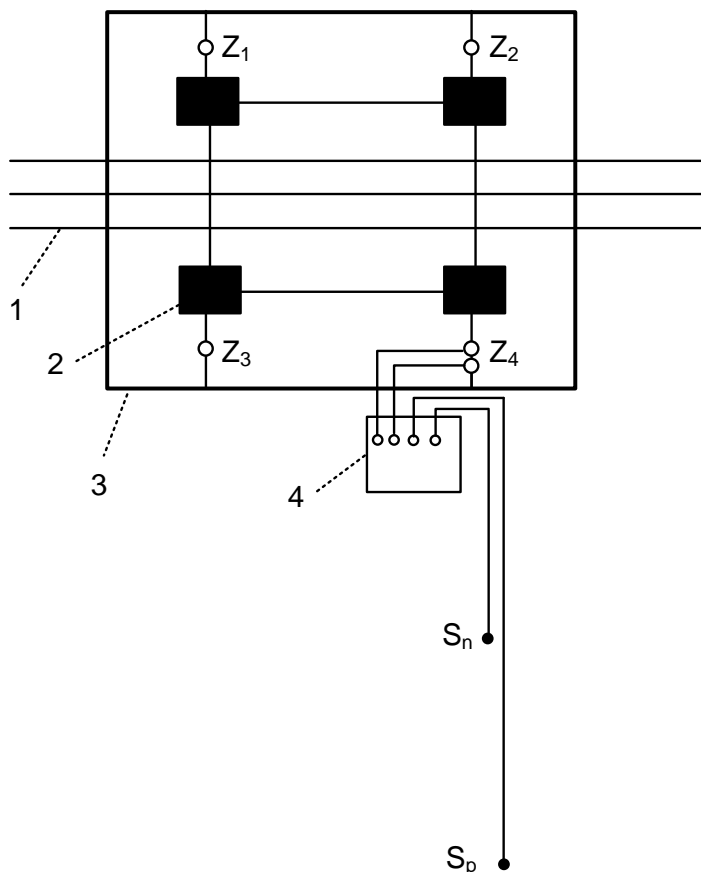
Rys. 5. Poglądowy schemat układu (rzut z góry) do pomiaru rezystancji uziemienia słupa metodą dwucęgową. Oznaczenia: 1 - linia napowietrzna, 2 - stopa (uziom fundamentowy) słupa, 3 - uziom poziomy (otokowy), 4 – miernik, 5 - cęgi pomiarowe, Z1-Z4 - zaciski probiercze

4.6. Pomiar impedancji udarowej Z_E – metoda udarowa

Metoda udarowa umożliwia pomiar impedancji udarowej uziemienia pojedynczego słupa, bez konieczności wyłączenia linii spod napięcia oraz odłączania przewodów uziemiających od konstrukcji słupa. Przy stosowaniu tej metody należy mieć na uwadze, że w zależności od rozległości uziomów oraz rezystywności gruntu impedancja może być istotnie większa od rezystancji uziemienia.

Stosowanie metody udarowej do pomiaru impedancji uziemienia dopuszcza się wyłącznie w procesie eksploatacji przy następujących założeniach:

- Impuls udarowy powinien mieć kształt 4/10 μ s.
- Zmierzona wartość impedancji powinna spełniać wymagania jak dla rezystancji uziemienia.



Rys. 6. Poglądowy schemat układu pomiarowego (rzut z góry) do pomiaru impedancji uziemienia słupa przyrządem zbudowanym w oparciu o metodę udarową. Oznaczenia: 1 - linia napowietrzna, 2 - stopa (uziom fundamentowy) słupa, 3 – uziom poziomy (otokowy), 4 - miernik udarowy uziemienia, Z_1 - Z_4 - zaciski probiercze, S_n , S_p - sonda napięciowa i prądowa.

4.7. Metoda spadku napięcia 3p (4p) dla pomiaru rezystancji uziemienia słupów bez uziomu poziomego (otoku) łączącego uziomy pionowe

W celu wykonania pomiaru rezystancji uziemienia słupów bez uziomu poziomego (otoku), należy wykonać pomiar każdego kolejno odłączanego od słupa uziomu pionowego metodą 3p lub 4p i następnie obliczyć rezystancję zastępczą uziemienia słupa ze wzoru:

$$R_E = \frac{1}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} + \frac{1}{R_4}} \quad (2)$$

gdzie:

R_E – rezystancję zastępczą uziemienia słupa

R_1, R_2, R_3, R_4 – rezystancja pomierzona na poszczególnych uziomach pionowych.

Podobne wyniki pomiarów będą uzyskiwane przy uziemieniu poziomym w postaci otoku z brakiem ciągłości na wszystkich przewodach uziemiających (co jest ewidentną usterką), dlatego metoda ta może być stosowana wyłącznie do uziemień szpilkowych słupów bez otoku, którego brak został potwierdzony w dokumentacji linii.

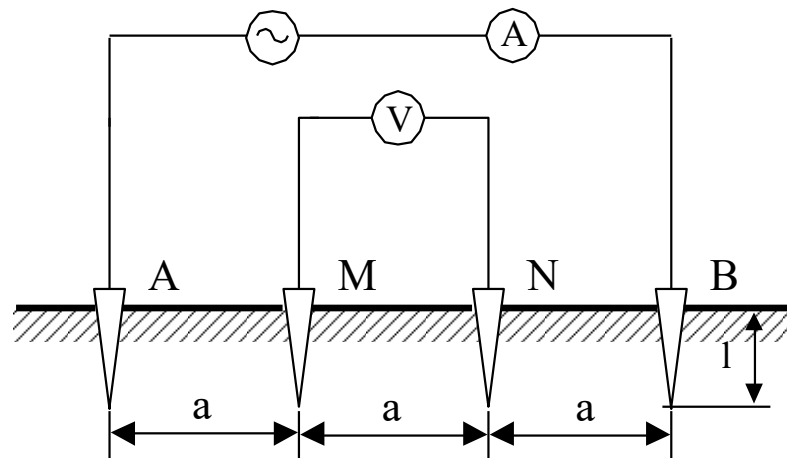
4.8. Pomiary rezystywności gruntu (stanowiska) ρ

Wartość rezystywności gruntu ρ wyznaczana jest w celu określenia progu kryterialnego przy pomiarze rezystancji uziemienia R_E . W praktyce pomiary rezystywności ρ wykonuje się miernikami rezystancji uziemienia przystosowanymi do pomiaru rezystywności gruntu (zgodnie z instrukcją obsługi miernika) lub metodami technicznymi (metodą Wennera, metodą Schlumbergera).

Do celów ochrony odgromowej pomiary rezystywności ρ należy wykonać w takim rozstawie sond, który będzie odpowiadać wartości uśrednionej rezystywności w obszarze oddziaływania uziomu w gruncie.

4.8.1. Metoda Wennera

Wartość rezystywności gruntu jednorodnego ρ metodą Wennera należy mierzyć w układzie czteroelektrodowym przedstawionym na Rys. 7. Układ charakteryzuje się jednakowymi odległościami (a) między sąsiednimi elektrodami pomiarowymi (A, M, N, B).



Rys. 7. Poglądowy schemat zasady pomiaru rezystywności gruntu w układzie czteroelektrodowym Wennera. Oznaczenia: A,M,N,B – elektrody, l – głębokość, a – odległość między elektrodami

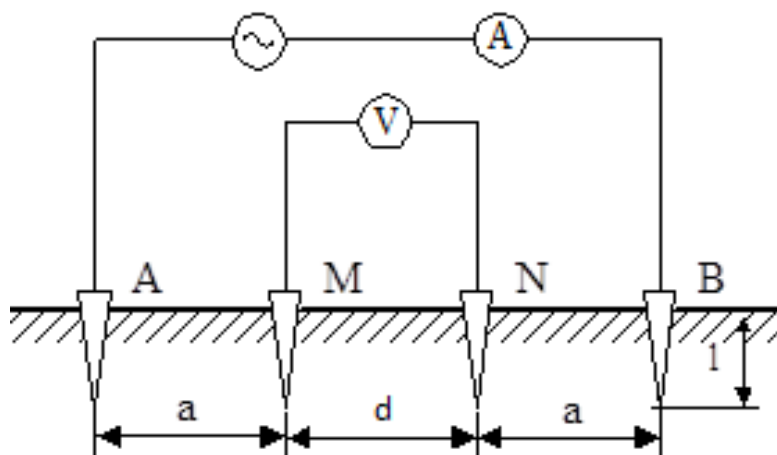
Rezystywność gruntu jednorodnego można wyznaczyć na podstawie zmierzonych wartości napięcia U_{MN} i prądu I_{AB} z zależności:

$$\rho = 2\pi a \frac{U_{MN}}{I_{AB}} \quad (3)$$

Przy czym należy przyjąć $a=3$ m i powinien być spełniony warunek $a > l$.

4.8.2. Metoda Schlumbergera

Wartość rezystywności gruntu jednorodnego ρ metodą Schlumbergera należy wykonać w układzie czteroelektrodowym przedstawionym na Rys. 8. W układzie Schlumbergera przy zmianie położenia elektrod pomiarowych (A,B) nie zachodzi konieczność zmiany położenia elektrod pomiarowych (N,M). Należy zachować jednakowe odległości par elektrod napięciowych i prądowych od środka układu pomiarowego. Pomiar wykonuje się poprzez zmianę lokalizacji elektrod prądowych bez zmiany rozstawu elektrod napięciowych.



Rys. 8. Poglądowy schemat zasady pomiaru rezystywności gruntu w układzie czteroelektrodowym Schlumbergera. Oznaczenia: A,M,N,B – elektrody, l – głębokość, a, d – odległości między elektrodami

Rezystywność gruntu jednorodnego można wyznaczyć na podstawie zmierzonych wartości napięcia U_{MN} i prądu I_{AB} z zależności:

$$\rho = \frac{\pi a(a+d) \frac{U_{MN}}{I_{AB}}}{d} \quad (4)$$

pod warunkiem, że zachowane będą warunki $a > 2 \cdot d$ oraz $l < a \cdot d$.

4.9. Wymagania (kryteria)

Dopuszczalne wartości rezystancji uziemień słupów napowietrznych linii elektroenergetycznych zostały określone w specyfikacji „Uziemienia linii napowietrznych” i specyfikacji „Linie kablowe 220 kV i 400 kV”.

Uzyskanie wyników pomiarów, wykonanych w dowolnym terminie w czasie roku (patrz pkt. 4), wartości rezystancji uziemień słupów spełniających wymagania ww. specyfikacji, stanowi podstawę do ich odbioru.

4.10. Dokumentacja wyników badań

Wzór protokołu z pomiaru rezystancji uziemień odgromowych słupów zawarty jest w załączniku nr 1 *Protokół z pomiarów rezystancji uziemienia odgromowego słupa*.

5. Badanie skuteczności ochrony przeciwporażeniowej

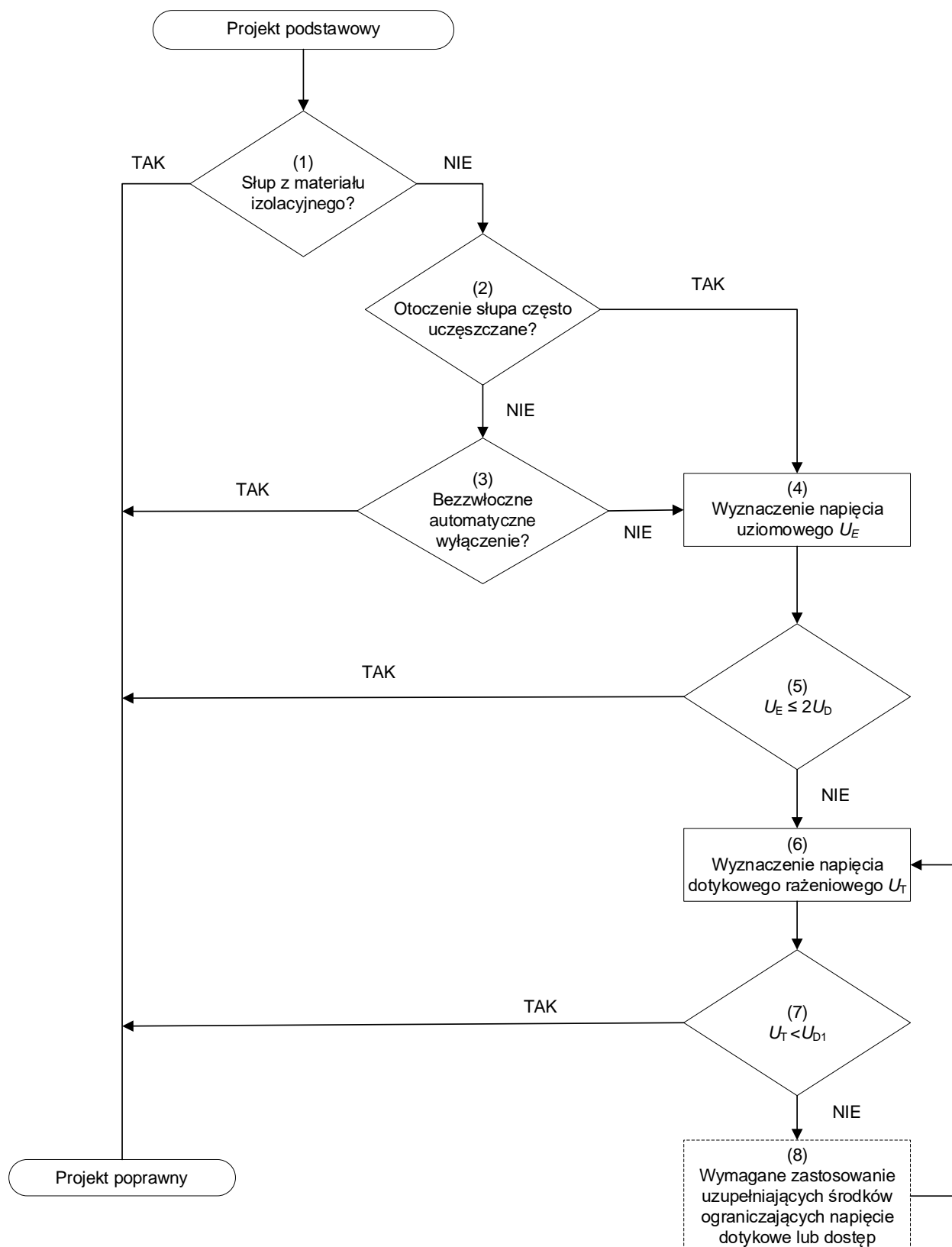
5.1. Wymagania ogólne

Sprawdzenie skuteczności ochrony przeciwporażeniowej na danym stanowisku polega na prowadzeniu czynności w oparciu o algorytm przedstawiony na Rys. 9 i opisanych poniżej:

1. Pozyskanie informacji o typach słupów i badanych uziemieniach słupów z dokumentacji projektowej lub powykonawczej.
2. Pozyskanie informacji o działaniu automatyki zabezpieczeniowej i czasie trwania zwarcia.
3. Pozyskanie informacji o wartości prądu uziomowego I_E lub prądu zwarcia jednofazowego z ziemią I'_{K1} .
4. Pozyskanie informacji o wartości współczynnika redukcyjnego r (w przypadku braku danych o prądzie uziomowym).
5. Oględziny elementów nadziemnych instalacji uziemiającej.
6. Sprawdzenie ciągłości przewodów uziemiających.
7. Pomiar rezystancji uziemienia zespolonego R_W metodą spadku napięcia 3p (4p).
8. Wyznaczenie napięcia uziomowego U_E .
9. Ocena skuteczności ochrony przeciwporażeniowej na podstawie U_E , w tym pomiar rezystywności stanowiska.
10. Wyznaczenie napięcia dotykowego rażeniowego U_T (o ile jest to konieczne).
11. Ocena skuteczności ochrony przeciwporażeniowej na podstawie napięcia dotykowego rażeniowego U_T .
12. Sporządzenie protokołu z wykonanych prac.

Założenia podstawowe do pomiarów:

- a) Pomiaru skuteczności ochrony przeciwporażeniowej należy wykonać w okresie od 1 kwietnia do 31 października.
- b) Dopuszcza się wykonanie pomiarów w innym terminie. Jednak w takim przypadku wymagane jest wykonanie pomiarów weryfikacyjnych w najbliższym okresie, o którym mowa w pkt. a).
- c) Nie należy wykonywać pomiarów skuteczności ochrony przeciwporażeniowej słupów w przypadku występowania zmarzliny w gruncie.



Rys. 9. Sprawdzenie skuteczności ochrony przeciwporażeniowej na podstawie normy PN-EN 50341-1:2013-03.

Dopuszczalne parametry rażeniowe w zależności od czasu trwania doziemienia przedstawiono w Tabela 1.

Tabela 1. Dopuszczalne parametry rażeniowe w zależności od czasu trwania doziemienia na podstawie opracowania PTPiREE pt.: „Zasady ochrony przed porażeniem w stacjach i liniach WN i NN”, Gliwice, 2020.

Czas doziemienia*) t_z	Największy dopuszczalny prąd rażeniowy $I_{B5\%}$	Największe dopuszczalne napięcie dotykowe rażeniowe $U_{Tp} = U_{D1}^{**})$	Efektywna impedancja ciała człowieka obliczona jako: $Z_{B50\%} = U_{Tp} / I_{B5\%}$
s	mA	V	Ω
0,05	900	716	796
0,10	750	654	872
0,15	675	595	881
0,20	600	537	895
0,25	533	484	908
0,30	466	431	925
0,35	400	378	945
0,40	333	325	976
0,45	266	272	1022
0,50	200	220	1100
0,60	176	199	1130
0,70	152	178	1171
0,80	128	158	1234
0,90	104	137	1317
1,00	80	117	1463
2,00	60	96	1600
3,00	57	92	1614
4,00	54	89	1648
5,00	51	86	1686
10,00	50	85	1700

*) czas doziemienia jest równoznaczny z czasem przepływu prądu rażeniowego
 **) U_{D1} – oznaczenie wartości największego dopuszczalnego napięcia dotykowego rażeniowego na podstawie norm PN-EN 50341-1:2013-03 i PN-EN 50341-2-22:2022-06

5.2. Pozyskanie informacji o działaniu automatyki zabezpieczeniowej i czasie trwania doziemienia

Do oceny skuteczności ochrony przeciwporażeniowej istotne jest określenie sposobu działania automatyki zabezpieczeniowej czyli określenie czy zastosowane jest zabezpieczenie odcinkowe i/lub występuje praca współbieżna zabezpieczeń odległościowych.

W przypadku linii wyposażonych w zabezpieczenia odcinkowe i/lub zabezpieczenia odległościowe pracujące współbieżnie do oceny skuteczności ochrony przeciwporażeniowej należy przyjąć czas trwania doziemienia $t_z=0,3$ s (dla linii bez SPZ $t_z=0,15$ s). Dla pozostałych linii czas ten określi indywidualnie Zamawiający.

W procesie eksploatacji pozyskiwanie danych o sposobie działania automatyki zabezpieczeniowej uregulowane jest w instrukcji organizacji i wykonywania prac eksploatacyjnych na liniach i stacjach NN, część II. 10. „Instrukcja szczegółowa: Linie

napowietrzne NN” (dokument wewnętrzny PSE S.A.). W przypadku realizacji zadań inwestycyjnych lub przebudowy linii informacje te przekaze Zamawiający odpowiednio w Umowie lub w warunkach przebudowy.

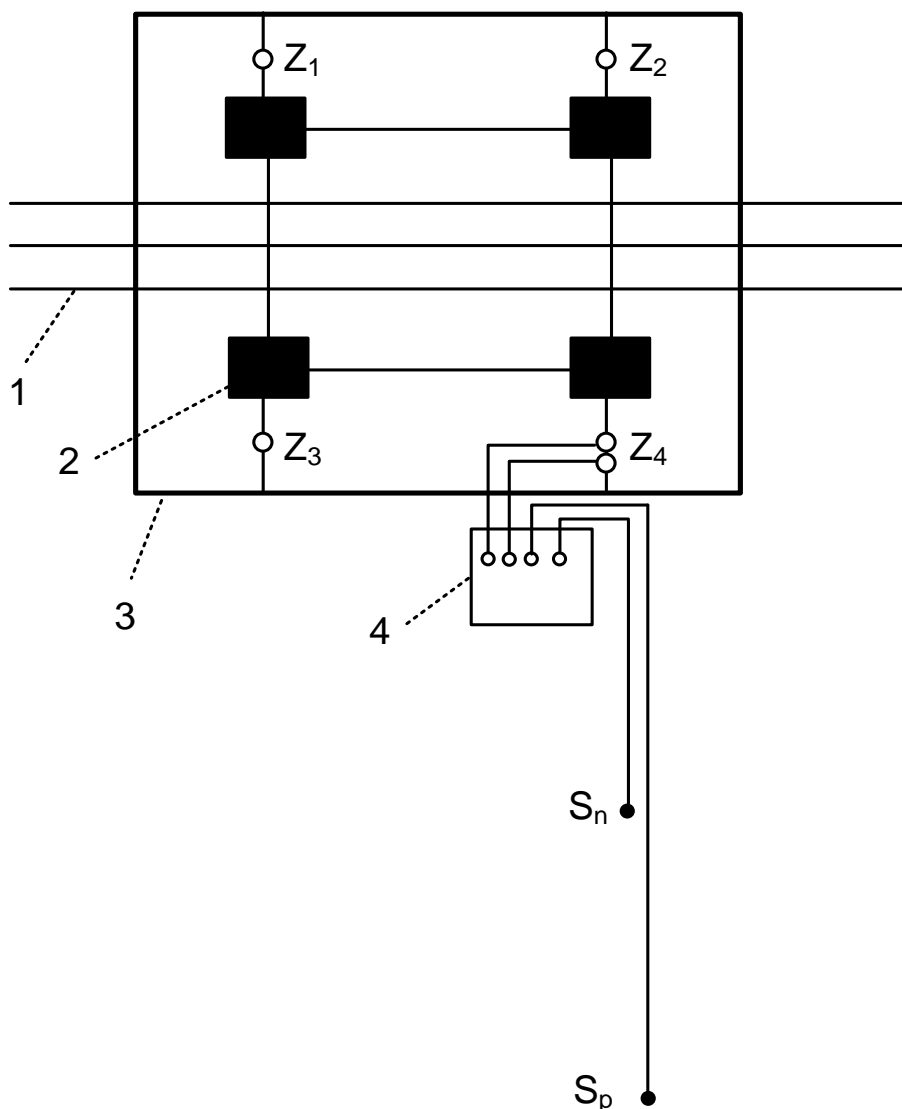
5.3. Sprawdzenie ciągłości przewodów uziemiających

Należy wykonać zgodnie z 4.2.

5.4. Pomiar rezystancji uziemienia zespolonego R_w metodą spadku napięcia 3p (4p)

W celu wykonania pomiaru rezystancji wypadkowej uziemienia, należy zastosować układ przedstawiony na Rys. 10.

W metodzie tej mierzony jest spadek napięcia na uziemieniu oraz przepływający prąd pomiarowy, a następnie wyliczana jest rezystancja wypadkowa zespolonego uziemienia tj. rozpatrywanego słupa oraz połączonych z nim równolegle uziemień innych słupów linii za pomocą przewodów odgromowych. Pomiar należy wykonać przyrządem pomiarowym wykorzystującym metodę spadku napięcia 3p (4p). Dla zwiększenia dokładności pomiaru zaleca się wykorzystanie czterech zacisków.



Rys. 10. Poglądowy schemat układu pomiarowego (rzut z góry) do pomiaru rezystancji uziemienia zespolonego R_W . Oznaczenia: 1 - linia NN, 2 - stopa (uziom fundamentowy) słupa, 3 - uziom poziomy (otokowy), 4 - miernik rezystancji uziemienia, Z_1 - Z_4 - zaciski probiercze S_n , S_p - sonda napięciowa i prądowa.

5.5. Obliczanie napięcia uziomowego U_E na podstawie rezystancji R_W

Największe spodziewane napięcie uziomowe U_E jest obliczane jako iloczyn zmierzonej rezystancji uziemienia R_W i prądu uziomowego I_E :

$$U_E = R_W \cdot I_E = R_W \cdot I_{k1}'' \cdot r \quad (5)$$

gdzie:

I''_{k1} – obliczeniowy prąd zwarcia jednofazowego z ziemią, mogący wystąpić na analizowanym stanowisku słupowym, określany metodą proporcjonalną polegającą na proporcjonalnym wyznaczeniu parametrów elektrycznych linii (stacja – słup) jako funkcji odległości słupa od stacji A i B ($I''_{k1_A} + I''_{k1_B}$),

I_E – prąd uziomowy (prąd płynący do ziemi przez układ uziemiający, część prądu I''_{k1}),

r – współczynnik redukcyjny linii,

R_W – rezystancja zespolonego uziemienia (rezystancja układu wzajemnie połączonych uziemień słupów).

Uwagi:

1. *Wartość prądu I''_{k1} dla sprawdzeń wykonywanych w procesie eksploatacji i przy przebudowach linii, należy zastąpić prądem $I_{K1max,n}$ zgodnie z instrukcją organizacji i wykonywania prac eksploatacyjnych na liniach i stacjach NN, część II. 10. „Instrukcja szczegółowa: Linie napowietrzne NN” (dokument wewnętrzny PSE S.A.).*
2. *Wartość prądu I_E dla nowoprojektowanych i modernizowanych linii należy wyznaczyć obliczeniowo dla danego stanowiska na etapie projektu.*
3. *Współczynnik redukcyjny linii r ma zastosowanie dla linii, dla których nie wyznaczono prądu I_E obliczeniowo. Wartość współczynnika określi Zamawiający. W przypadku braku informacji o wartości współczynnika redukcyjnego należy przyjąć wartość 0,7. Wartości współczynnika redukcyjnego zależą od wzajemnego położenia przewodów odgromowych w stosunku do przewodów fazowych i ziemią oraz od parametrów i materiału przewodów odgromowych.*

5.6. Ocena skuteczności ochrony przeciwporażeniowej na podstawie U_E

Na podstawie wyznaczonego napięcia uziomowego U_E , należy sprawdzić czy napięcie U_E nie przekracza dwukrotnej wartości największego dopuszczalnego napięcia dotykowego spodziewanego U_D

$$U_E \leq 2U_D \quad (6)$$

w którym: U_D - największe dopuszczalne napięcie dotykowe spodziewane.

Jeżeli warunek nie jest spełniony, należy zmierzyć napięcie dotykowe rażeniowe U_T .

Największe dopuszczalne napięcie dotykowe spodziewane U_D , w zależności od czasu doziemienia t_z i rezystancji dodatkowej R_a jest obliczane na podstawie normy PN-EN 50341-1:2013-03 według poniższego wzoru:

$$U_D = U_{Tp} + (R_{a1} + R_{a2}) \cdot I_B = U_{Tp} + R_a \cdot \frac{U_{Tp}}{Z_B} = U_{Tp} \cdot \left(1 + \frac{R_a}{Z_B}\right) \quad (7)$$

gdzie:

U_{Tp} – największe dopuszczalne napięcie dotykowe rażeniowe

R_a – rezystancja dodatkowa,

Z_B – impedancja ciała człowieka

I_B – prąd rażeniowy

Rezystancja dodatkowa jest obliczana na podstawie normy PN-EN 50341-1:2013-03 według poniższego wzoru:

$$R_a = R_{a1} + R_{a2} = R_{a1} + 1,5\rho_E, \quad (8)$$

gdzie:

R_{a1} – rezystancja obuwia,

R_{a2} – rezystancja stanowiska,

ρ_E - rezystywność warstwy przypowierzchniowej stanowiska w Ωm .

Do wyznaczania dopuszczalnego napięcia dotykowego spodziewanego U_D można przyjąć poniższe charakterystyczne przypadki na podstawie normy PN-EN 50341-1:2013-03 i opracowania PTPIREE pt.: „Zasady ochrony przed porażeniem w stacjach i liniach WN i NN”, Gliwice, 2020 :

$$R_a = 0 \Omega$$

Miejsca takie, jak place zabaw, baseny, place kempingowe, tereny rekreacyjne i tym podobne, gdzie mogą przebywać ludzie mający gołe stopy. Nie jest uwzględniana żadna dodatkowa rezystancja oprócz rezystancji ciała ludzkiego.

$$R_a = 1750 \Omega \quad (R_{a1} = 1000 \Omega, \quad \rho_E = 500 \Omega\text{m}),$$

Miejsca, co do których można założyć, że znajdujący się w nich ludzie mają na stopach buty, a na stanowisku występuje naturalna warstwa powierzchniowa gruntu.

$$R_a = 4000 \Omega \quad (R_{a1} = 1000 \Omega, \quad \rho_E = 2000 \Omega\text{m}),$$

Miejsca, co do których można założyć, że znajdujący się w nich ludzie mają na stopach buty, a na stanowisku na powierzchni gruntu ułożona jest warstwa z betonu, kamienia, żwiru itp., np. kostka brukowa, płyty chodnikowe.

$$R_a = 7000 \Omega \quad (R_{a1} = 1000 \Omega, \quad \rho_E = 4000 \Omega\text{m}).$$

Miejsca, co do których można założyć, że znajdujący się w nich ludzie mają na stopach buty, a na stanowisku na powierzchni gruntu ułożona jest warstwa asfaltu.

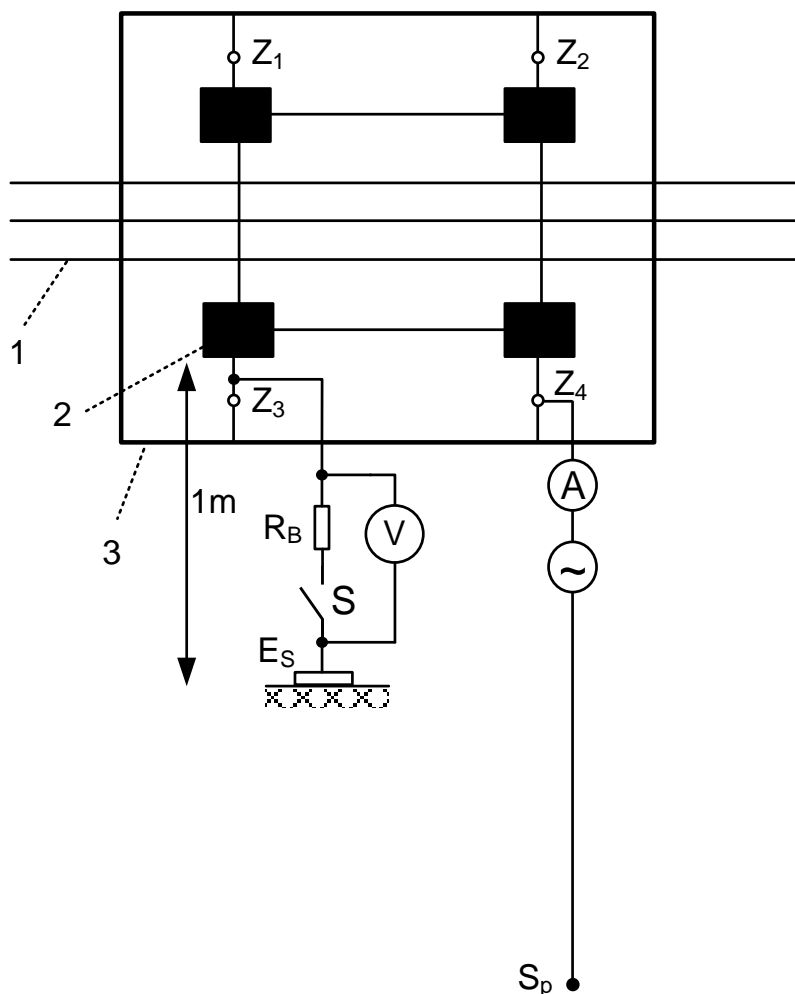
Pomiary rezystywności stanowiska należy wykonać w rozstawie sond właściwym dla warstwy powierzchniowej, czyli rozstaw sond powinien wynosić 1 m (pomiar na głębokości 0,7 m). Sposób wyznaczania rezystywności stanowiska ρ_E podano w pkt. 4.8.

5.7. Pomiar napięcia dotykowego rażeniowego U_{TM} lub napięcia dotykowego spodziewanego U_{DM} oraz ocena skuteczności ochrony przeciwporażeniowej na podstawie napięcia dotykowego rażeniowego U_T .

Do pomiaru napięć dotykowych rażeniowych lub napięć dotykowych spodziewanych należy stosować metodę wymuszenia prądem.

Aby wykonać pomiar niezbędne jest wykonanie dwóch obwodów:

1. Obwodu wymuszania prądu pomiarowego I_{EM} jak na Rys. 11.
2. Obwodu pomiaru napięcia dotykowego rażeniowego U_{TM} lub napięcia dotykowego spodziewanego U_{DM} przedstawiono na Rys. 11. Pomiaru napięcia dotykowego rażeniowego U_{TM} , należy dokonać przy załączonym łączniku S, podczas pomiaru napięcia dotykowego spodziewanego U_{DM} łącznik S powinien być otwarty.



Rys. 11. Poglądowy schemat układu pomiarowego (rzut z góry) do pomiaru napięć dotykowych rażeniowych oraz spodziewanych w otoczeniu słupa linii elektroenergetycznej NN.

Oznaczenia: 1 – linia NN, 2 – stopa (uziom fundamentowy) słupa, 3 – uziom poziomy (otokowy), Z_1 - Z_4 – zaciski probiercze, E_S – elektroda odwzorowująca styczność stóp ze stanowiskiem, R_B – rezystor modelujący opór ciała człowieka, S_p – sonda prądowa, A – amperomierz, V – woltomierz, S – łącznik.

Wymagania stawiane elementom obwodów pomiarów napięć dotykowych spodziewanych i rażeniowych według [PN-EN 50341-1:2013-03] zestawiono w Tabeli 2.

Tabela 2. Wymagania stawiane elementom obwodów.

Element obwodu	Wymagane wartości parametrów obwody pomiarowego
Opór wewnętrzny woltomierza V (R_V)	Co najmniej 10-krotna wartość rezystancji uziemienia elektrody E_s (np. 1 M Ω)
Powierzchnia elektrody E_s ¹⁾	400 cm ²
Siła docisku elektrody	500 N
Rezystor R_B	1000 Ω
Odległość elektrod od części stwarzającej zagrożenie przy rażeniu na drodze ręka-stopy	1 m
Elektroda stykająca się z częścią dotykaną ręką	Powinna umożliwiać pewne przebicie farby pokrywającej ww. część
¹⁾ Pod elektrodą pomiarową umieszczoną na betonie lub wyschniętym gruncie należy umieścić mokre sukno lub stanowisko pomiarowe należy zmoczyć wodną	

Najczęściej w obwodzie prądowym wymuszany jest prąd pomiarowy rzędu kilku, amperów. Zaleca się, aby prąd pomiarowy miał wartość powyżej 1 A dla wymuszenia 50 Hz (z eliminacją zakłóceń metodą Erbachera) lub wartość powyżej 0,5 A dla wymuszałników pracujących na innych częstotliwościach (z eliminacją zakłóceń przez filtry zaporowe). Celem zwiększenia prądu pomiarowego dopuszczalne jest wykorzystywanie innych uziomów sztucznych występujących w otoczeniu słupa (np. uziemiania linii niskiego i średniego napięcia). Pomiar prądu i napięcia przeprowadza się przyrządami o dużej rezystancji wewnętrznej.

Niezależnie od wartości wymuszanego prądu pomiarowego i zastosowanych przyrządów pomiarowych, przy pomiarach napięć dotykowych rażeniowych ważną rolę odgrywa elektroda odwzorowująca styczność stóp człowieka z powierzchnią stanowiska. Elektrody pomiarowe E_s mogą mieć różne konstrukcje. Elektroda lub elektrody pomiarowe powinny mieć całkowitą powierzchnię 400 cm² i powinny być przyciskane do ziemi z minimalną całkowitą siłą 500 N. Zamiast elektrody pomiarowej można użyć sondy ostrzowej zagłębionej w gruncie na co najmniej 20 cm. W celu zmierzenia napięcia dotykowego rażeniowego U_{TM} na konstrukcji słupa należy elektrodę umieścić 1 m od dostępnej części przewodzącej. Podczas pomiarów na betonie i suchym gruncie należy zwiększyć jego wilgotność poprzez podlanie sondy wodą. Elektroda końcówkowa odwzorowująca styczność ręki powinna umożliwić niezawodne przebicie farby (nie działającej jako izolacja). Napięcia dotykowe rażeniowe należy zmierzyć przy każdym krawężniku (nodze) słupa. W raporcie z pomiarów umieszczamy najwyższą ze zmierzonych wartości.

Wyznaczanie napięcia U_T na analizowanym stanowisku słupowym linii, która jest wyposażona w zabezpieczenie odcinkowe i/lub zabezpieczenie odległościowe pracujące współbieżnie, należy przeprowadzić zgodnie z poniższym wzorem:

$$U_T = U_{TM} \cdot \frac{I_E}{I_{EM}} = U_{TM} \cdot \frac{I''_{k1} \cdot r}{I_{EM}} \quad (9)$$

gdzie:

U_T – napięcie dotykowe rażeniowe przeliczone na warunki rzeczywistego zwarcia na analizowanym stanowisku,

U_{TM} – napięcie dotykowe rażeniowe pomiarowe lub wyznaczone ze wzoru (11),

I_E – prąd uziomowy (prąd płynący do ziemi przez uziemienie, część prądu I''_{k1}),

I_{EM} – prąd pomiarowy,

I''_{k1} – obliczeniowy prąd zwarcia jednofazowego z ziemią mogący wystąpić na analizowanym stanowisku słupowym określany metodą proporcjonalną, polegającą na proporcjonalnym wyznaczeniu parametrów elektrycznych linii (stacja – słup) jako funkcji odległości słupa od stacji A i B ($I''_{k1_A} + I''_{k1_B}$),

r – współczynnik redukcyjny linii.

Na podstawie wyznaczonego napięcia dotykowego rażeniowego U_T , należy sprawdzić czy napięcie U_T nie przekracza wartości największego dopuszczalnego napięcia dotykowego rażeniowego U_{D1} .

$$U_T \leq U_{D1} \quad (10)$$

W przypadku pomiaru napięć dotykowych spodziewanych U_{DM} (przy ocenie z uwzględnieniem dodatkowych rezystancji) wartość napięcia U_{TM} należy wyznaczyć z poniższej zależności opracowanej na podstawie opracowania PTPiREE pt.: „Zasady ochrony przed porażeniem w stacjach i liniach WN i NN”, Gliwice, 2020 i podstawić do wzoru (9):

$$U_{TM} = U_{DM} / \left(1 + \frac{R_a}{Z_{B50\%}}\right) = U_{DM} / \left(1 + \frac{R_a}{U_{Tp} / I_{B5\%}}\right) \quad (11)$$

gdzie:

U_{DM} – napięcie dotykowe spodziewane pomiarowe,

R_a – rezystancja dodatkowa wyznaczona na podstawie wzoru (8),

$Z_{B50\%}$ - efektywna impedancja ciała człowieka (patrz Tabela 1),

U_{Tp} – największe dopuszczalne napięcie dotykowe rażeniowe,

$I_{B5\%}$ - dopuszczalny prąd rażeniowy.

Uwagi: patrz uwagi do punktu 5.5.

W pozostałych przypadkach, gdy linia nie jest wyposażona w zabezpieczenie odcinkowe i/lub zabezpieczenie odległościowe pracujące współbieżnie, sposób wyznaczenia napięcia U_T i kryteria oceny skuteczności ochrony przeciwporażeniowej należy uzgodnić z Zamawiającym.

5.8. Dokumentacja oceny skuteczności ochrony przeciwporażeniowej słupów

Wzór protokołu z oceny skuteczności ochrony przeciwporażeniowej słupów zawarty jest w załączniku nr 2 *Protokół z badania skuteczności ochrony przeciwporażeniowej słupa* .

6. Lista załączników

Załącznik nr 1 *Protokół z pomiarów rezystancji uziemienia odgromowego słupa*

Załącznik nr 2 *Protokół z badania skuteczności ochrony przeciwporażeniowej słupa*

PROTOKÓŁ NR
z pomiarów rezystancji uziemienia odgromowego słupa

Zleceniodawca:

Zlecenie nr ¹⁾:

Linia: kV

Relacja:

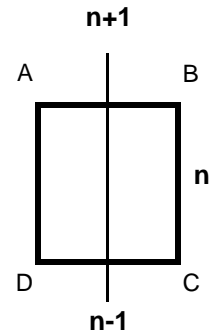
Stanowisko: Słup nr Typ

Data pomiarów:

Przyrząd pomiarowy:

- typ:

- nr fabr.:



Metoda pomiaru stosowana do oceny ²⁾:

- metoda spadku napięcia 3p (4p) ³⁾
- metoda spadku napięcia 3p w opcji z cęgami
- metoda dwu cęgowa
- metoda udarowa
- metoda spadku napięcia 3p (4p) dla pomiaru rezystancji uziemienia słupów bez uziomu poziomego (otoku) łączącego uziomy pionowe

1. Oględziny części nadziemnej uziemienia słupa ⁴⁾:

.....

.....

.....

.....

2. Wyniki pomiarów dla sprawdzenia ciągłości przewodów uziemiających ⁵⁾:

Przewód uziemiający	Wartość zmierzona	Wartość kryterialna	Spełnienie wymagań	Uwagi
-	[Ω]	[Ω]	[TAK/NIE]	-
A				
B				
C				
D				

3. Wyniki pomiarów rezystancji uziemienia i rezystywności gruntu:

Zmierzona wartość rezystancji R_E /impedancji udarowej Z_E uziemienia	Dopuszczalna wartość rezystancji uziemienia	Zmierzona rezystywność gruntu (jeżeli dotyczy) ⁶⁾	Spełnienie wymagań
[Ω]	[Ω]	[Ωm]	[TAK/NIE]

Poniższa tabela dotyczy pomiarów według metody spadku napięcia 3p (4p) dla pomiaru rezystancji uziemienia słupów bez uziomu poziomego (otoku) łączącego uziomy pionowe

Zmierzona wartość rezystancji na poszczególnych uziomach pionowych [Ω]				Obliczona wartość rezystancji uziemienia (zgodnie ze wzorem nr (2) w specyfikacji)	Dopuszczalna wartość rezystancji uziemienia	Zmierzona rezystywność gruntu (jeżeli dotyczy) ⁶⁾	Spełnienie wymagań
1	2	3	4	[Ω]	[Ω]	[Ωm]	[TAK/NIE]

4. Uwagi i zalecenia:

.....

.....

.....

.....

5. Orzeczenie:

Wynik pozytywny/Wynik negatywny ⁷⁾

6. Pomiary wykonali:

Wykonujący pomiar (imię i nazwisko / nr uprawnień)

Interpretujący pomiar (imię i nazwisko / nr uprawnień)

¹⁾ - należy uzupełnić w przypadku pomiarów w ramach prac eksploatacyjnych

²⁾ - zaznaczyć jedną pozycję

³⁾ - jedyna metoda dopuszczona do badań odbiorczych nowych lub rozbudowywanych uziemień słupów oraz metoda właściwa do potwierdzenia negatywnego wyniku pomiaru wykonanego pozostałymi metodami

⁴⁾ - należy sprawdzić czy:

- a) nie ma obluźwanych połączeń i przerw w przewodach uziemiających,
- b) żadna część nie została osłabiona przez korozję zwłaszcza w okolicy wejścia przewodów uziemiających pod ziemię,
- c) wszystkie widoczne połączenia z uziomem są nienaruszone,
- d) śruby łączące przewód uziemiający z konstrukcją słupa są zabezpieczone przed korozją,
- e) wszystkie widoczne przewody i elementy są przytwierdzone do powierzchni montażowych,
- f) elementy, które zapewniają ochronę mechaniczną są nienaruszone oraz znajdują się na właściwym miejscu.

⁵⁾ - nie dotyczy uziemień słupów bez uziomu poziomego (otoku)

⁶⁾ - pomiar należy wykonać, gdy przewidywana rezystywność gruntu jest większa niż 1000 Ωm

⁷⁾ - niepotrzebne skreślić

PROTOKÓŁ NR z badania skuteczności ochrony przeciwporażeniowej słupa

Zleceniodawca:

Zlecenie nr ¹⁾:

Linia: kV

Relacja:

Stanowisko: Słup nr Typ

Data pomiarów:

Przyrząd pomiarowy 1:

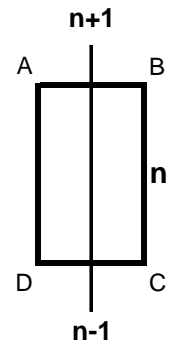
- typ

- nr fabr.

Przyrząd pomiarowy 2:

- typ

- nr fabr.



1. Oględziny części nadziemnej uziemiania słupa ²⁾:

.....

.....

.....

.....

2. Wyniki pomiarów dla sprawdzenia ciągłości przewodów uziemiających ³⁾:

Przewód uziemiający	Wartość zmierzona	Wartość kryterialna	Spełnienie wymagań	Uwagi
[-]	[Ω]	[Ω]	[TAK/NIE]	[-]
A				
B				
C				
D				

3. Badanie skuteczności ochrony przeciwporażeniowej:

Dane:

- prąd zwarcia jednofazowego z ziemią na analizowanym słupie (I''_{k1}):
- współczynnik redukcyjny linii ⁴⁾:
- czas trwania doziemienia (t_z):
- rezystywność stanowiska (ρ_E) ⁵⁾:

gdzie:

I_E - prąd uziomowy

I_{EM} - prąd pomiarowy

U_{DM} - zmierzone napięcie dotykowe spodziewane

U_{TM} - obliczone napięcie dotykowe rażeniowe na podstawie pomiarów napięcia U_{DM}

U_T - napięcie dotykowe rażeniowe przeliczone na warunki rzeczywistego zwarcia

U_{D1} - dopuszczalne napięcie dotykowe rażeniowe

4. Uwagi i zalecenia:

.....
.....
.....
.....

5. Orzeczenie:

Wynik pozytywny/Wynik negatywny ⁷⁾

6. Pomiary wykonali:

Wykonujący pomiar (imię i nazwisko / nr uprawnień)

Interpretujący pomiar (imię i nazwisko / nr uprawnień)

¹⁾ - należy uzupełnić w przypadku pomiarów w ramach prac eksploatacyjnych

²⁾ - należy sprawdzić czy:

- a) nie ma obluzowanych połączeń i przerw w przewodach uziemiających,
- b) żadna część nie została osłabiona przez korozję zwłaszcza w okolicy wejścia przewodów uziemiających pod ziemię,
- c) wszystkie widoczne połączenia z uziomem są nienaruszone,
- d) śruby łączące przewód uziemiający z konstrukcją słupa są zabezpieczone przed korozją,
- e) wszystkie widoczne przewody i elementy są przytwierdzone do powierzchni montażowych,
- f) elementy, które zapewniają ochronę mechaniczną są nienaruszone oraz znajdują się na właściwym miejscu.

³⁾ - nie dotyczy uziemień słupów bez uziomu poziomego (otoku)

⁴⁾ - należy podać dla linii, dla których nie wyznaczono prądu I_E obliczeniowo

⁵⁾ - jeżeli jest możliwość należy wykonać pomiar rezystywności stanowiska i podać wynik, w przeciwnym przypadku należy podać zakładaną wartość

⁶⁾ -metoda obliczania napięcia U_D jest podana w Specyfikacji

⁷⁾ - niepotrzebne skreślić