Politechnika Śląska

Wydział Elektryczny

PTPiREE

ipc

"Wybrane pomiary skuteczności ochrony przed porażeniem w sieciach i obiektach elektroenergetycznych w ujęciu praktycznym"

dr inż Mirosław Kiełboń

Wisła, 29 listopada2023

Sprawdzanie skuteczności ochrony przed porażeniem:

- oględziny,
- pomiary.

W praktyce obie metodologie są wykorzystywanie jednocześnie.

Jeśli pomiary, to jakie?

- pomiary rezystancji lub impedancji (w zakresie od mΩ przy pomiarach ciągłości przewodów w instalacjach el., do MΩ przy pomiarach rezystancji izolacji),
- pomiary napięć (w zakresie od mV do setek V),
- pomiary rezystywności gruntu.

Jeśli pomiary, to czym?

- metody techniczne przy wykorzystaniu uniwersalnych przyrządów (woltomierze, amperomierze),
- przyrządy uniwersalne do pomiaru wybranych wielkości,
- przyrządy dedykowane do wykonania określonego pomiaru w określonych warunkach (np.. napięć dotykowych przy słupach linii WN).

Klasyfikacja metod pomiarowych:

1. Pomiar rezystancji lub impedancji uziemienia (instalacji uziemiającej: metoda trzypunktowa „3p” (mało- i wielkoprądowa, techniczna i kompensacyjna), metoda „4p”, metody pomiaru rezystywności gruntu; przydatne przy każdym obiekcie elektroenerg.;

2. Pomiar rezystancji lub impedancji uziemienia metodami „3p” z dodatkowym użyciem cewek Rogowskiego lub cęgów Dietza („metody cęgowe”); przydatne przy wybranych obiektach elektroenergetycznych lub wybranych pomiarach;

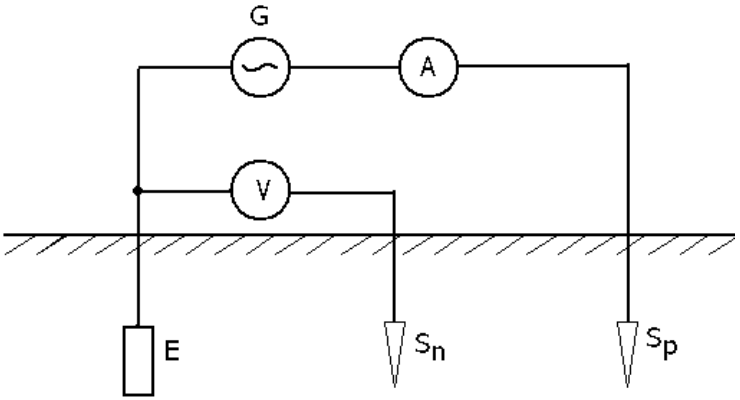
3. Pomiar napięć dotykowych (spodziewanych i rażeniowych); przydatne przy wybrabych obiektach;

4. Sprawdzanie ciągłości przewodów uziemiających; przydatne przy każdym obiekcie elektroenergetycznym z uziemieniem;

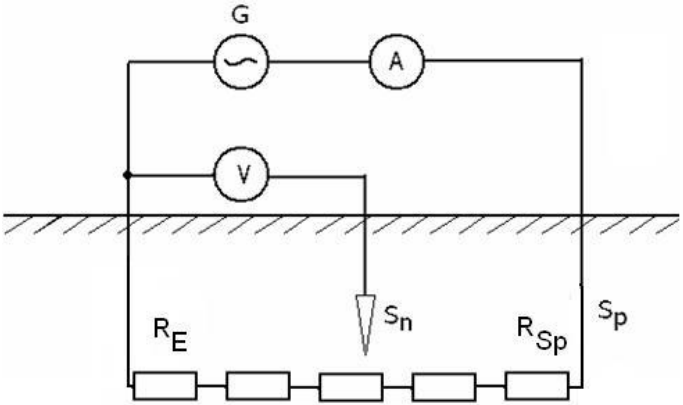
5. Pomiar impedancji pętli zwarcia; w wybranych sytuacjach i obiektach;

6. Pomiar rezystancji izolacji w instalacjach potrzeb własnych; w wybranych sytuacjach.

Pomiar rezystancji lub impedancji układu uziemiającego met. techniczną

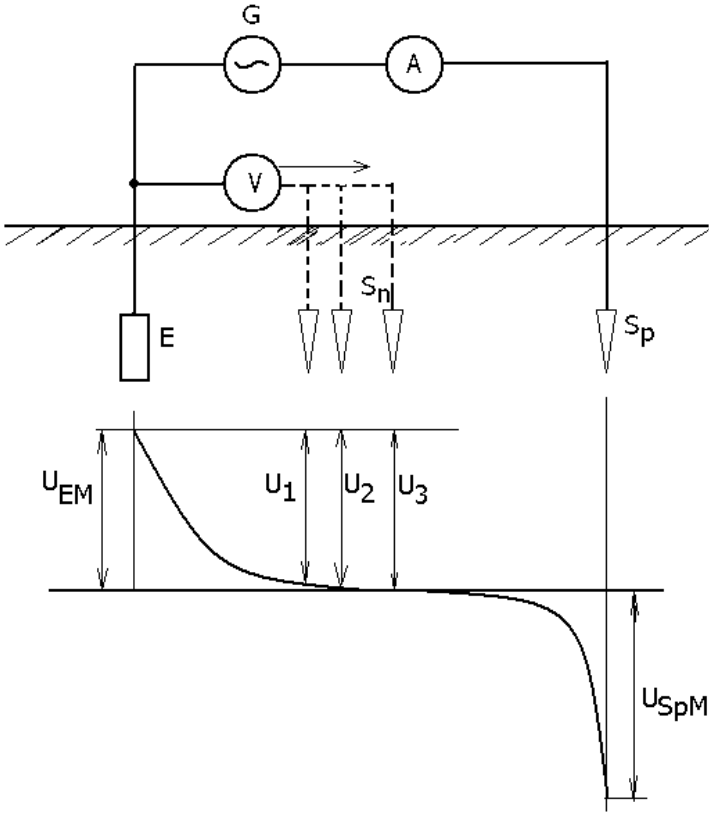


Metoda techniczna



Zobrazowanie konieczności poszukiwania strefy potencjału zerowego

Strefa potencjału zerowego i obwód napięciowy



Wymagania stawiane elementom obwodu napięciowego:

a) sonda napięciowa powinna być umieszczona w gruncie w strefie zerowego potencjału,

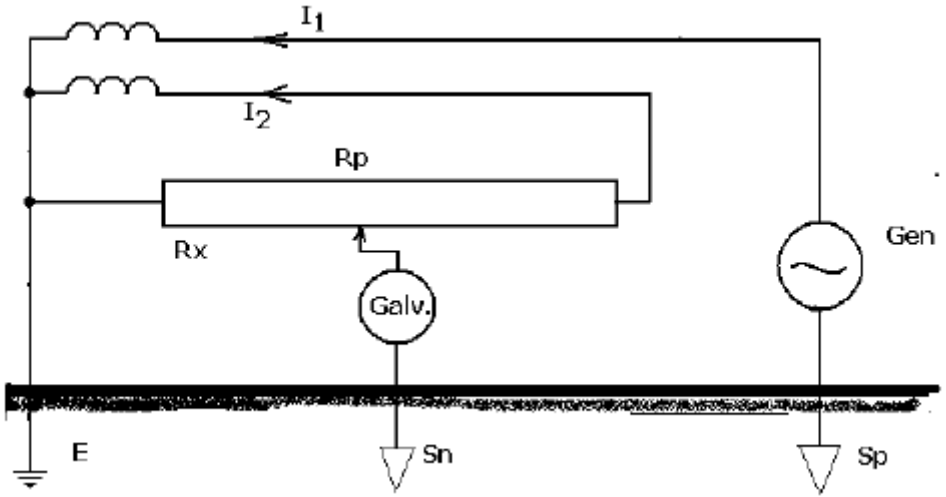
b) stosunek wewnętrznej rezystancji woltomierza do rezystancji uziemienia elektrody napięciowej powinien być na tyle duży, aby błąd pomiaru U_{EM} był niewielki (dopuszczalny),

c) zakres pomiarowy woltomierza powinien być dostosowany do spodziewanych wartości napięcia U_{EM},

d) przewody obwodu napięciowego powinny być izolowane.

Odległości sond od uziomu powinny być 'optymalizowane' - zmniejszenie błędu pomiarowego i realna moc źródła wymuszającego

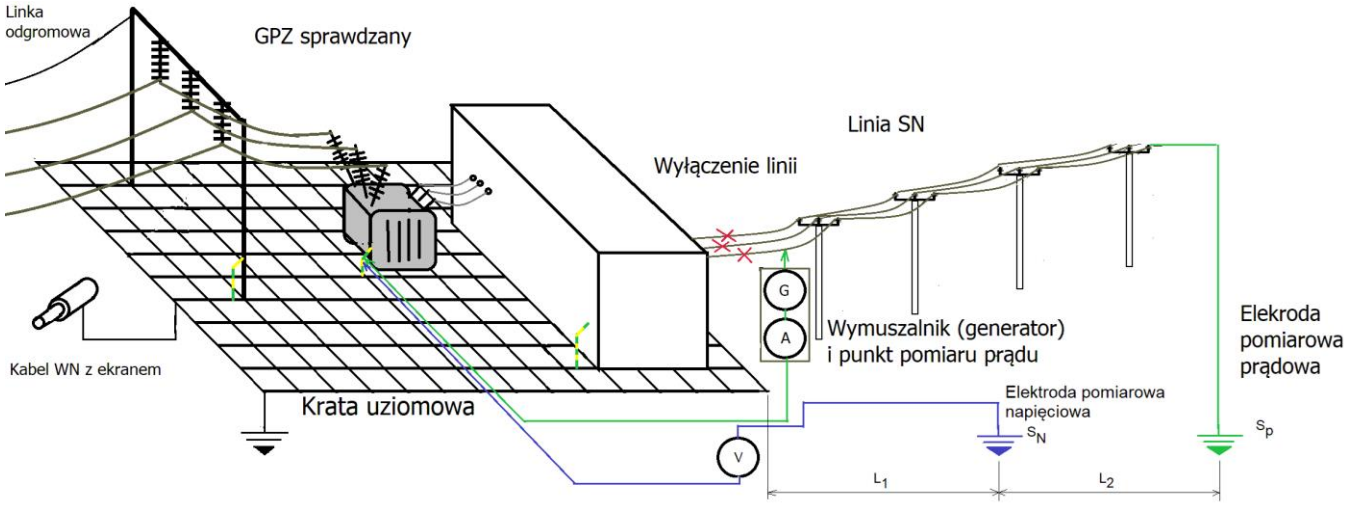
Metoda kompensacyjna pomiaru rezystancji uziemienia



Warunek kompensacji:

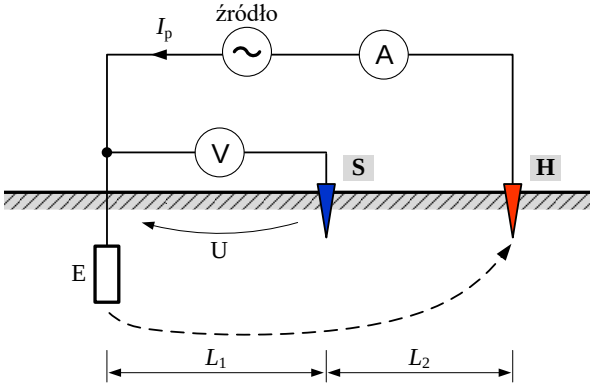
$$I_1 R_{EM} = I_2 R_x \Rightarrow R_x = \frac{I_1}{I_2} R_{EM}$$

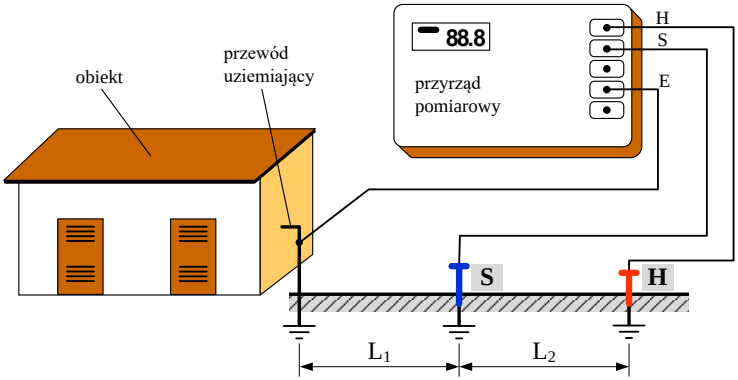
Metoda „wielkoprądowa” pomiaru rezystancji uziemienia („3p”)



Na rys. jako przewody linii do elektrody prądowej wykorzystano wyłączoną linię SN. Możliwe jest (i realizowane w praktyce) wykorzystanie wyłączonej linii WN w tym celu. Jest to ogólna idea metody, metoda jest bardziej przydatna w obiektach WN.

Praktyczna realizacja pomiaru rezystancji uziemienia (metoda „3p”), obiekt SN/nn





Metoda trójpunktowa „3p”:

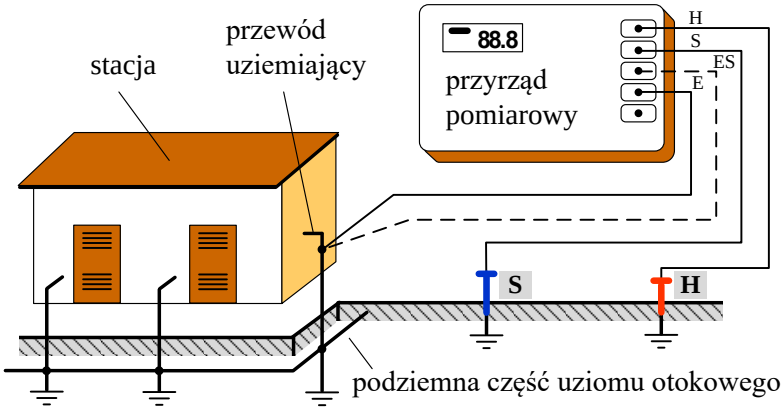
wariant 1 – metoda techniczna,

wariant 2 – dedykowany miernik oparty o metodę techniczną,

wariant 3 – dedykowany miernik oparty o metodę kompensacyjną (obecnie rzadko stosowany)

UWAGA. Istotne dla pomiaru są odległości L1 i L2 – szerzej omówione w sekcji „techniki pomiarowe”

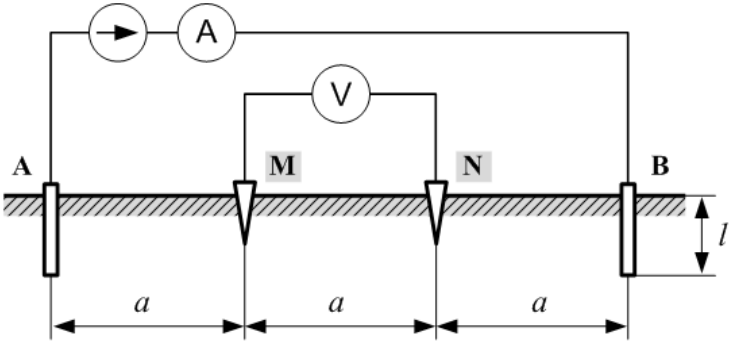
Praktyczna realizacja pomiaru rezystancji uziemienia (metoda „4p”), obiekt SN/nn

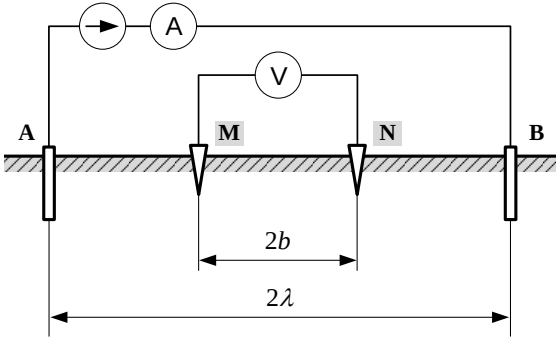


Metoda czteropunktowa „4p”:

Używa się dodatkowego przewodu (ES) sprowadzającego potencjał instalacji uziemiającej do miernika, w ten sposób koryguje się spadek napięcia na głównym przewodzie pomiarowym prądowym. Przydatne jeśli mierzona rezystancja uziemienia ma małą wartość. W praktyce rzadko wykorzystywana metoda.

Pomiar rezystywności gruntu – „specjalna” metoda „4p”





Metoda Wennera (a- możliwie duże)

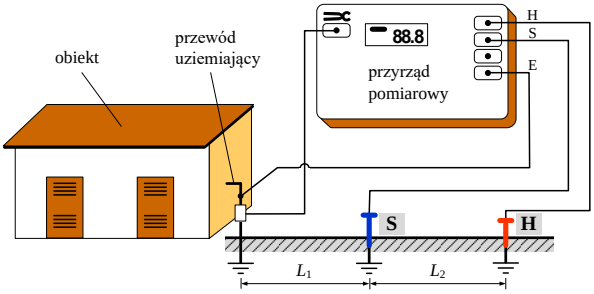
Metoda Schlumbergera ($2\lambda >> 2b$)

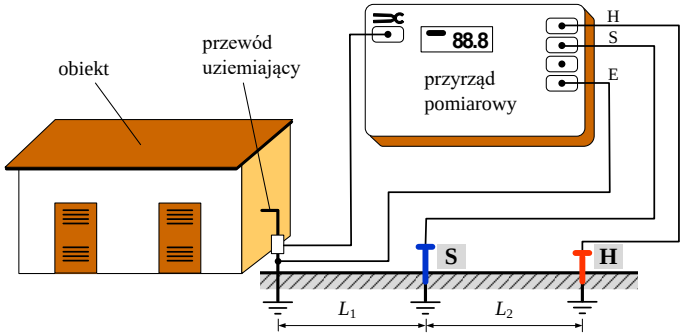
$$\rho = 2\pi \cdot a \frac{U_{MN}}{I}$$

$$\rho = \pi \frac{U_{MN}}{I} \left(\frac{(\lambda - b)(\lambda + b)}{2b} \right)$$

Mierniki dedykowane wykorzystują metodę Wennera

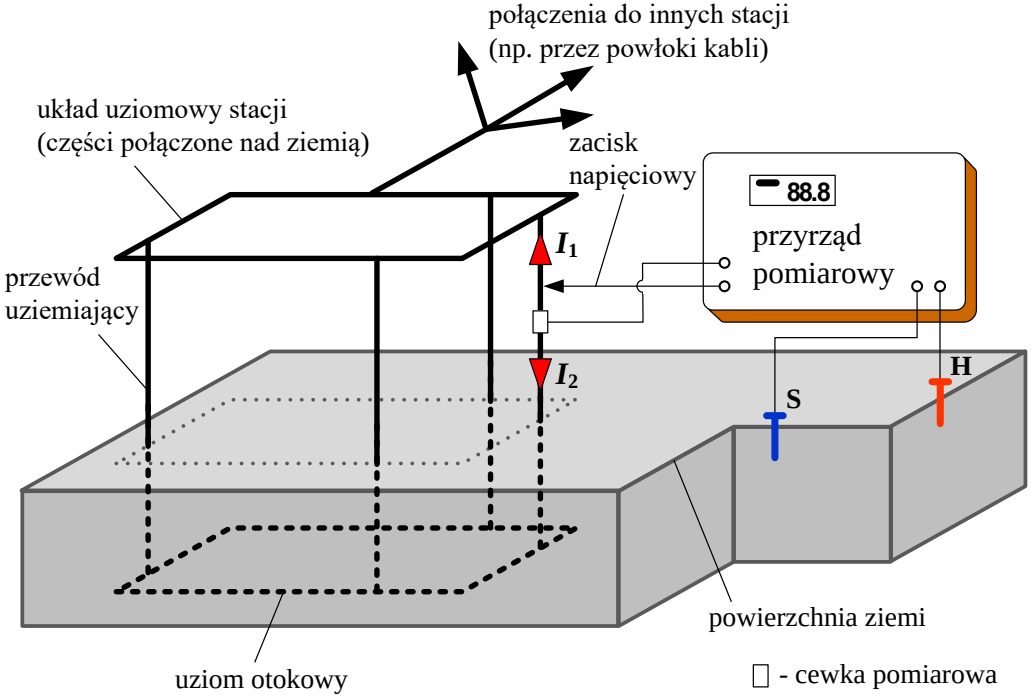
Metody pomiaru rezystancji uziemienia z wykorzystaniem cęgów i/lub cewek Rogowskiego





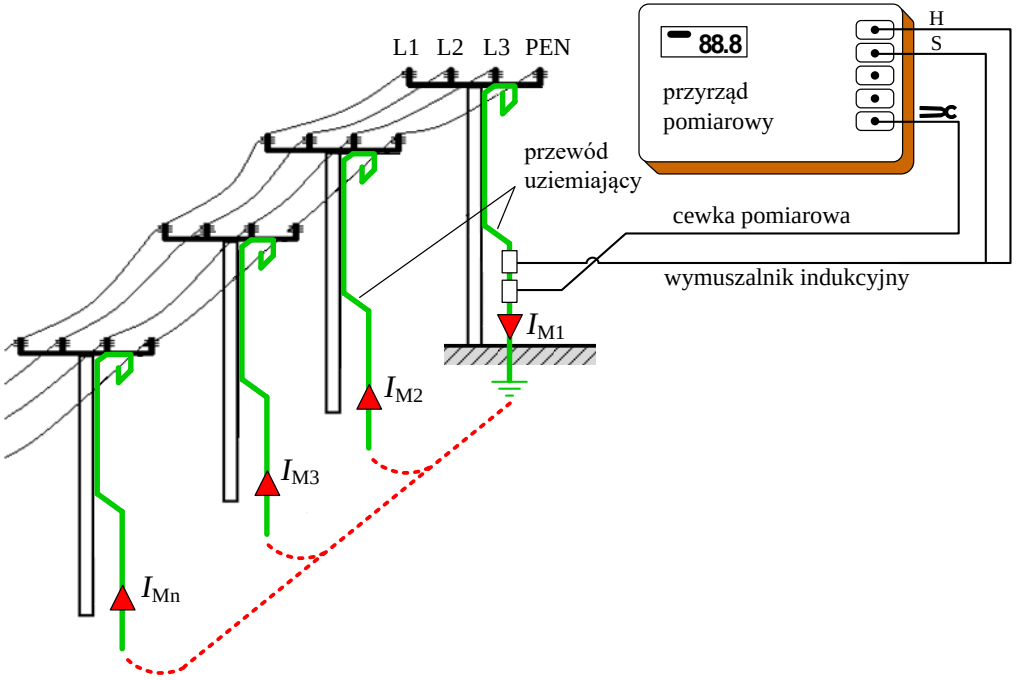
Metoda „jednocęgowa”. W większości przypadków (są wyjątki) nie nadaje się do pomiaru rezystancji uziemienia, natomiast jest bardzo przydatna do kontroli ciągłości przewodów uziemiających

Metody pomiaru rezystancji uziemienia z wykorzystaniem cęgów



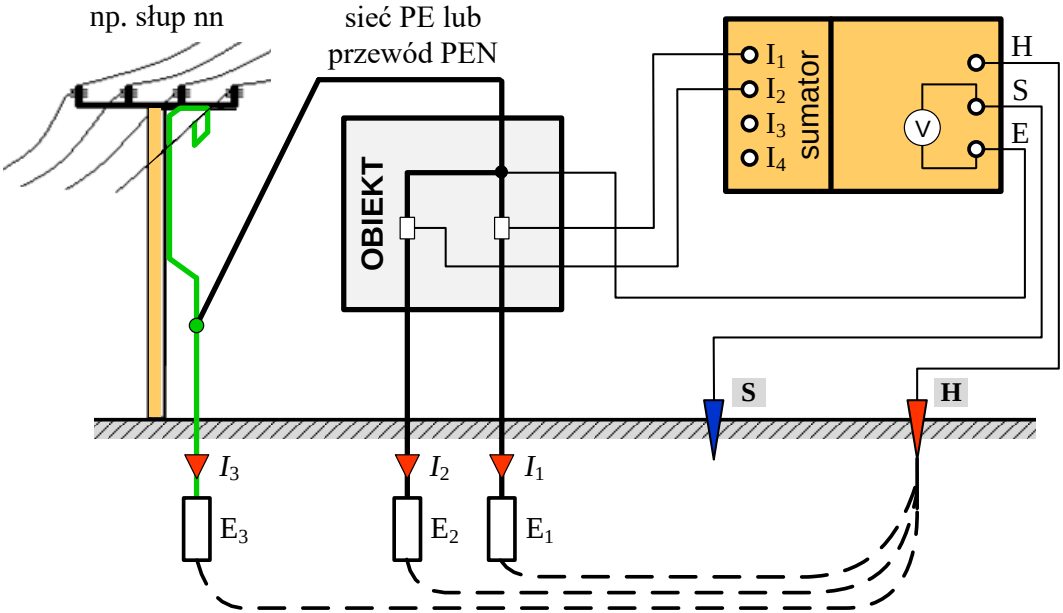
Metoda „jednocęgowa”. Ilustracja możliwych do popełnienia błędów interpretacyjnych wyniku pomiarowego.

Metody pomiaru rezystancji uziemienia z wykorzystaniem cęgów



Metoda „dwucęgowa”. Nadaje się do sprawdzania ciągłości przewodów uziemiających (nie we wszystkich przypadkach) lub rezystancji uziemienia (w szczególnych przypadkach)

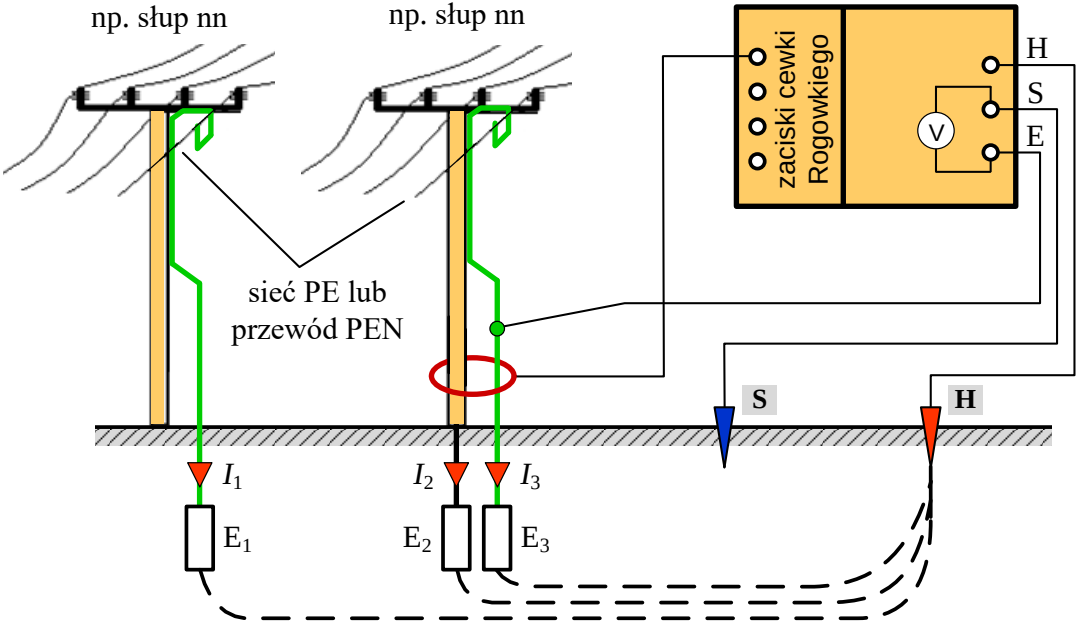
Metody pomiaru rezystancji uziemienia z wykorzystaniem cęgów i/lub cewek Rogowskiego



□- cewki pomiarowe

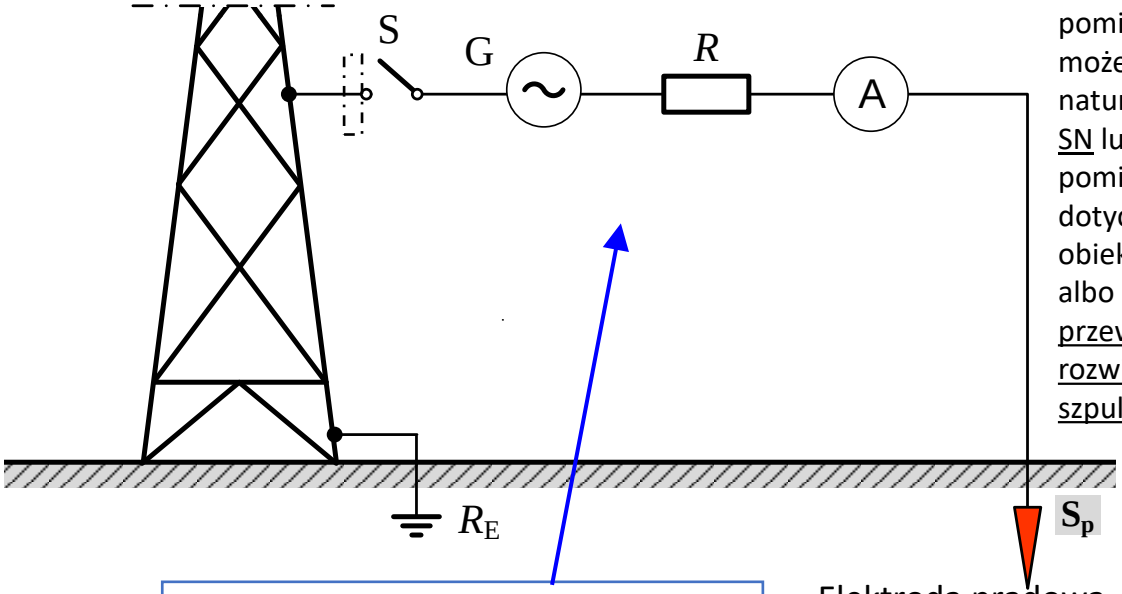
Metoda „wielocęgowa”. Nadaje się do sprawdzania rezystancji uziemienia (w szczególnych przypadkach)

Metody pomiaru rezystancji uziemienia z wykorzystaniem cęgów i/lub cewek Rogowskiego



Metoda wykorzystująca cewkę Rogowskiego („miękkie cęgi”). Nadaje się do sprawdzania rezystancji uziemienia (w szczególnych przypadkach).

Pomary napięć dotykowych spodziewanych i rażeniowych – obwody „wymuszenia”



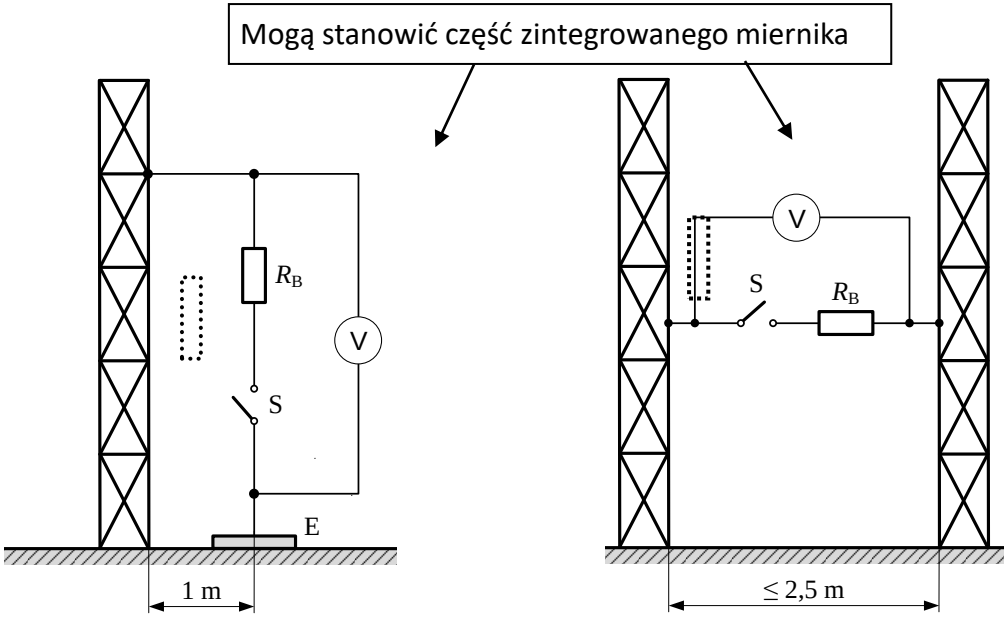
Linia pomiarowa może być naturalną linią SN lub WN (gdy pomiary dotyczą obiektu WN), albo przewodem rozwijanym ze szpuli

Elementy mogą być zintegrowane w dedykowanym mierniku do badania napięć dotykowych

Elektroda prądowa

-można wykorzystać uziom naturalny (w niektórych przypadkach)

Pomiary napięć dotykowych spodziewanych i rażeniowych – obwody pomiarowe



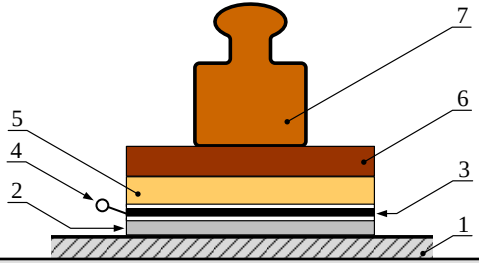
obwód stosowany w przypadku odosobnionej, uziemionej części przewodzącej dostępnej;

obwód dodatkowy, stosowany gdy w pobliżu badanej części przewodzącej dostępnej znajduje się część przewodząca obca, na którą może wydostać się potencjał

Łącznik S zamknięty- pomiar U_{TM} (nap. rażeniowego)

Łącznik S otwarty- pomiar U_{STM} (nap. spodziewanego)

Pomiary napięć dotykowych spodziewanych i rażeniowych – elektroda symulująca zestyk stopy człowieka z ziemią



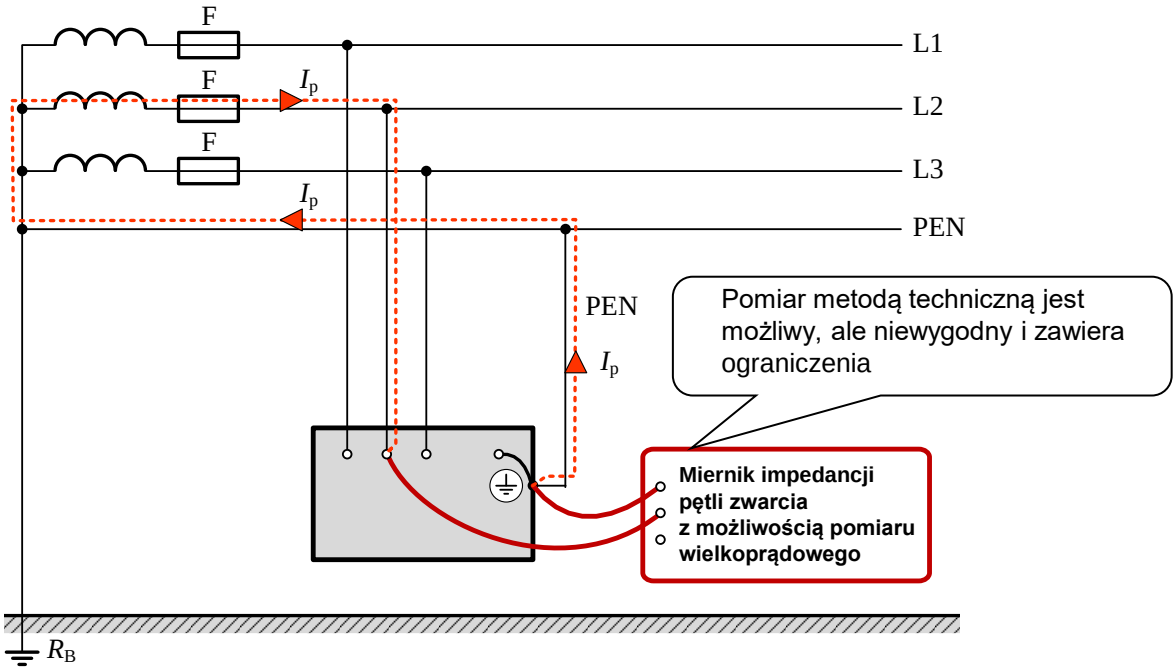
1– stanowisko, 2 – guma przewodząca, 3 – folia metalowa, 4 – zacisk elektrody, 5 – filc, 6 – płyta izolacyjna, 7 – obciążenie.

W praktyce, w zależności od stanowiska używa się elektrod uproszczonych, na ogół zwiększających błąd pomiarowy w sposób powodujący zaostrzenie wymagań co do wyniku pomiaru.

Element obwodu	Wymagane wartości parametrów obwodu pomiarowego
Opór wewnętrzny woltomierza V (R_V)	Duży; nie mniejszy niż 10-krotna wartość rezystancji uziemienia elektrody E
Powierzchnia elektrody E[1)]	400 cm^2
Siła docisku elektrod	500 N
Rezystor R_B	1000 Ω
Odległość elektrod od części stwarzającej zagrożenie przy rażeniu na drodze ręka-stopy	1m
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 wodą

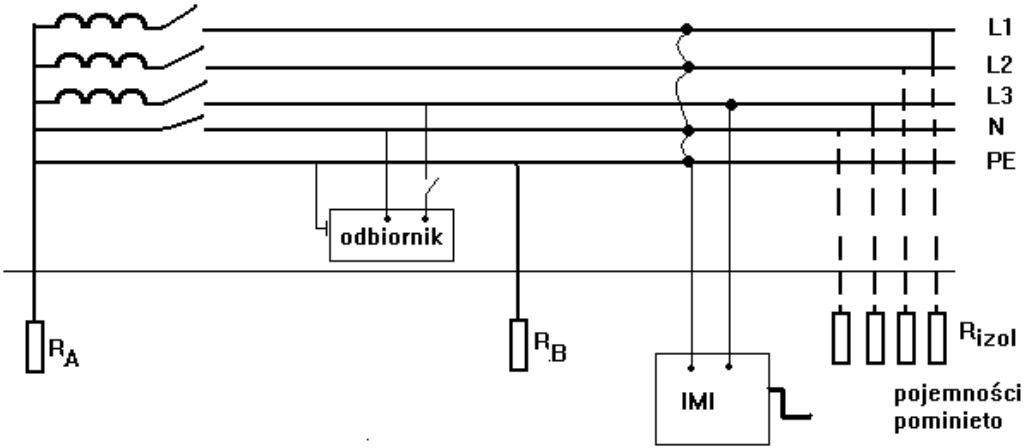
Pomiary impedancji pętli zwarcia



Pomiar metodą małoprądową – w instalacjach el. potrzeb własnych stacji, w tym także wyposażonych w wył. RCD

Pomiar metodą wielkoprądową (impuls) - w obwodach rozdzielczych nn

Pomiary rezystancji izolacji instalacji nn



Norma PN-HD 60364-6:2008 podaje, że rezystancję izolacji należy mierzyć pomiędzy przewodami czynnymi i ziemią, ale w pomieszczeniach w których występuje zagrożenie pożarowe również między przewodami czynnymi. Przewody ochronne PE i ochronno-neutralne PEN traktować należy jako ziemię, a przewód neutralny N jako przewód czynny.

Napięcie znamionowe badanego obwodu [V]	Napięcie probiercze prądu stałego [V]	Minimalna wartość rezystancji izolacji [MΩ]
do 50 SELV i PELV	250	≥0,5
50 < U ≤500	500	≥1,0
>500	1000	≥1,0

Podział technik pomiarowych do sprawdzania skuteczności ochrony przed porażeniem przy uszkodzeniu w zależności od rodzaju obiektu elektroenergetycznego

OBIEKTY ELEKTROENERGETYCZNE

WN/NN

Stacje WN :

- pomiary napięć dotykowych
- pomiary imped. pętli zwarcia w obw. potrzeb wł.
- wyjątkowo pomiary R uziemienia
- sprawdzanie ciągłości przewodów uziem.

Linie WN (słupy) :

- pomiary napięć dotykowych
- wyjątkowo pomiary R uziemienia
- sprawdzanie ciągłości przewodów uziem.

SN/nn

Stacje SN/nn:

- pomiary imped. pętli zwarcia w obw. potrzeb wł.
- pomiary R uziemienia (na ZIU niemożliwe)
- sprawdzanie ciągłości przewodów uziem.
- sprawdzanie możliwości wynoszenia potencjału do sieci nn (na ZIU niemożliwe)
- sprawdzanie występowania ZIU
- pomiar napięć dotykowych

Linie SN (słupy) :

- pomiary R uziemienia
- sprawdzanie ciągłości przewodów uziem.
- pomiar napięć dotykowych

nn

Linie nn (słupy) :

- pomiary R uziemienia w różnych konfiguracjach
- sprawdzanie ciągłości przewodów uziem.
- pomiary imp. pętli zwarcia

Techniki pomiarowe i sprawdzające przydatne przy sprawdzaniu ochrony przed porażeniem w stacjach SN/nn, rozdzielniach RS, stacjach redukcyjnych SN/SN i wokół nich

Obiekty położone poza obszarem ZIU

Jakie rodzaje badań są konieczne do sprawdzenia stanu ochrony przed porażeniem w obiektach stacyjnych SN i nn (ogólnie i w obszarach nie uznanych za ZIU)?

-badanie środków ochrony podstawowej: oględziny, ew. pomiar rezystancji izolacji;

-badanie środków ochrony przy uszkodzeniu: oględziny, pomiar rezystancji uziemienia (układu uziemiającego i/lub wypadkowej rezystancji kilku układów uziemiających połączonych ze sobą – trudny lub niemożliwy w ZIU), sprawdzenie ciągłości przewodów uziemiających, sprawdzenie możliwości wyniesienia potencjału poza obiekt poprzez różnego rodzaju części przewodzące, sprawdzenie ew. położenia obiektu na terenie nie objętym ZIU, pomiar napięć dotykowych (nie zawsze);

-sprawdzenie stanu ochrony przed porażeniem w instalacji potrzeb własnych obiektu stacyjnego.

Badanie środków ochrony podstawowej:

Oględziny – to sprawdzenie ogólne stanu ochrony przed porażeniem bez użycia przyrządów, a jedynie za pomocą zmysłów – sprawdza się czy nie ma widocznych lub wyczuwalnych (np. swąd spalenizny) śladów uszkodzeń podstawowej ochrony przed porażeniem.

Pomiar rezystancji izolacji – omówiono przy okazji metod pomiarowych ogólnych.

Badanie środków ochrony przy uszkodzeniu:

Oględziny – sprawdzenie jak wyżej, lecz ze szczególnym zwróceniem uwagi na części i elementy biorące udział w ochronie przed porażeniem przy uszkodzeniu (np. przewody uziemiające, ale też np. bezpieczniki).

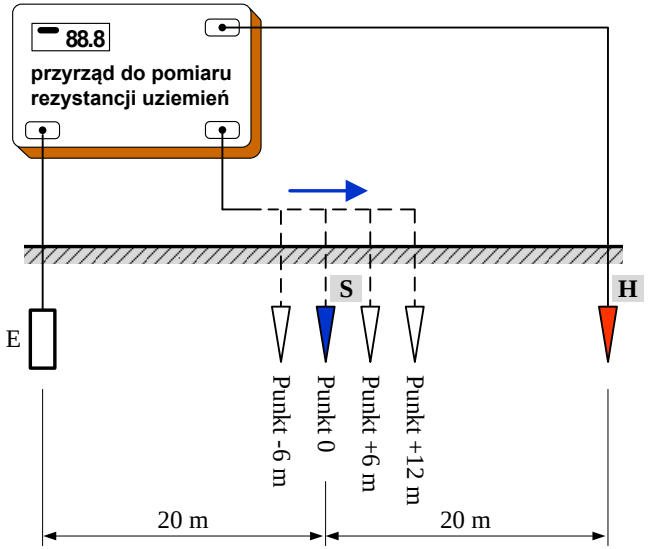
Sprawdzenie stanu ochrony przed porażeniem w instalacji potrzeb własnych obiektu stacyjnego (jak badanie instalacji nn)-> pomiary sprowadzają się głównie do sprawdzenia impedancji pętli zwarcia. Uwaga! Używa się miernika dedykowanego umożliwiającego pomiar metodą małoprądową, tzn. taką, która nie spowoduje zadziałania zabezpieczeń instalacji (w tym wyłącznika RCD).

Pomiar rezystancji uziemienia (układu uziemiającego i/lub wypadkowej rezystancji kilku układów uziemiających połączonych ze sobą) oraz – jeśli to konieczne – pomiar rezystywności gruntu:

Pomiary rezystancji układów uziemiających stacji (założenie – stacja pracuje na sieć nn w układzie TN):

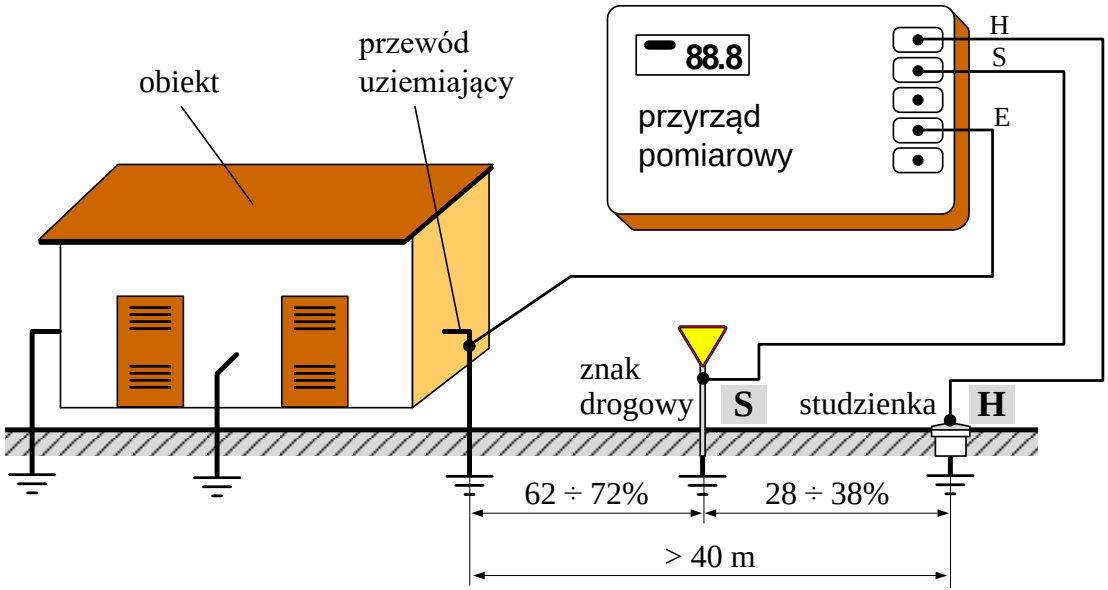
Przygotowanie – wyznaczenie strefy potencjału zerowego oraz pomiar rezystancji metodą „3p”.

W większości przypadków do obiektów SN/nn wystarczająca jest małoprądowa metoda pomiaru z wykorzystaniem dedykowanych mierników.



Trudność: teren nie pozwala na wbicie elektrod – co robić?

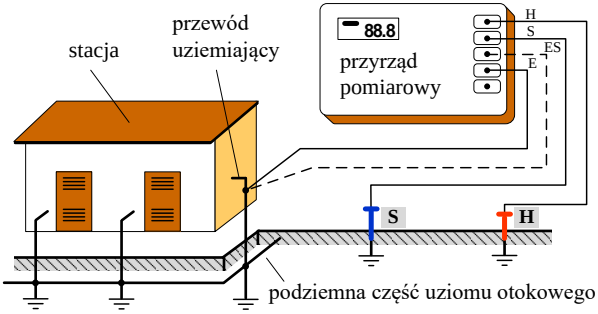
W przypadku gdy strefy zerowego potencjału nie można wyznaczyć ze względu na np. uwarunkowania terenowe, można zastępczo wykorzystać naturalne, na stałe umieszczone w ziemi uziomy, np.:



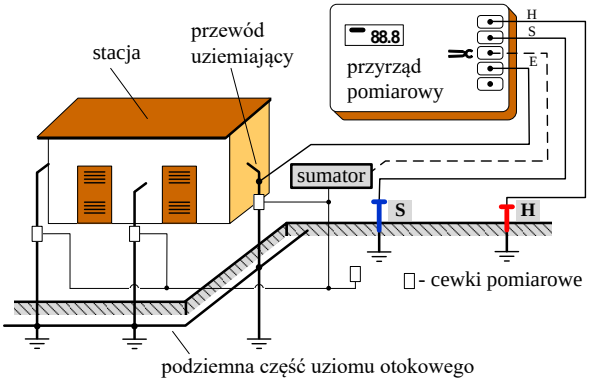
Odległości między „sondami" muszą być jednak co najmniej takie jak na rys. i fakt, że strefa potencjału zerowego jest niemożliwa do wyznaczenia musi być odnotowany w protokole.

Trudność: należy mierzyć R_S, R_B, R_E – jak to zrobić?

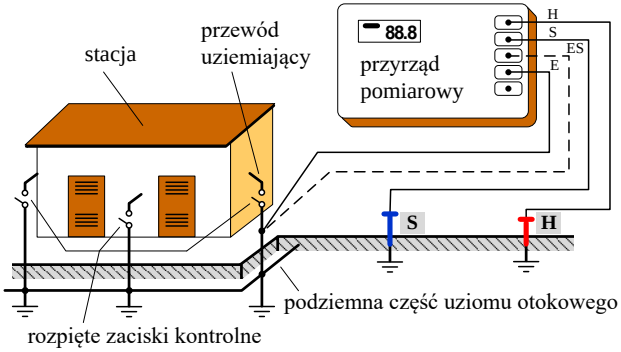
Właściwy pomiar rezystancji układu uziemiającego obiektu (R_S lub R_E) lub wypadkowej rezystancji układów uziemiających kilku obiektów R_B



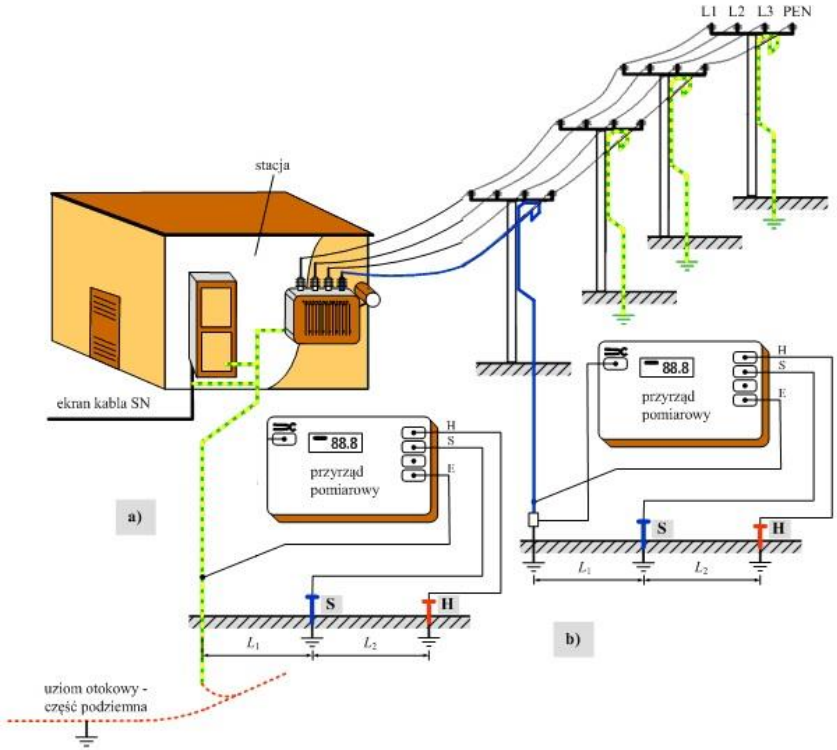
Metoda „3p” – pomiar R_B



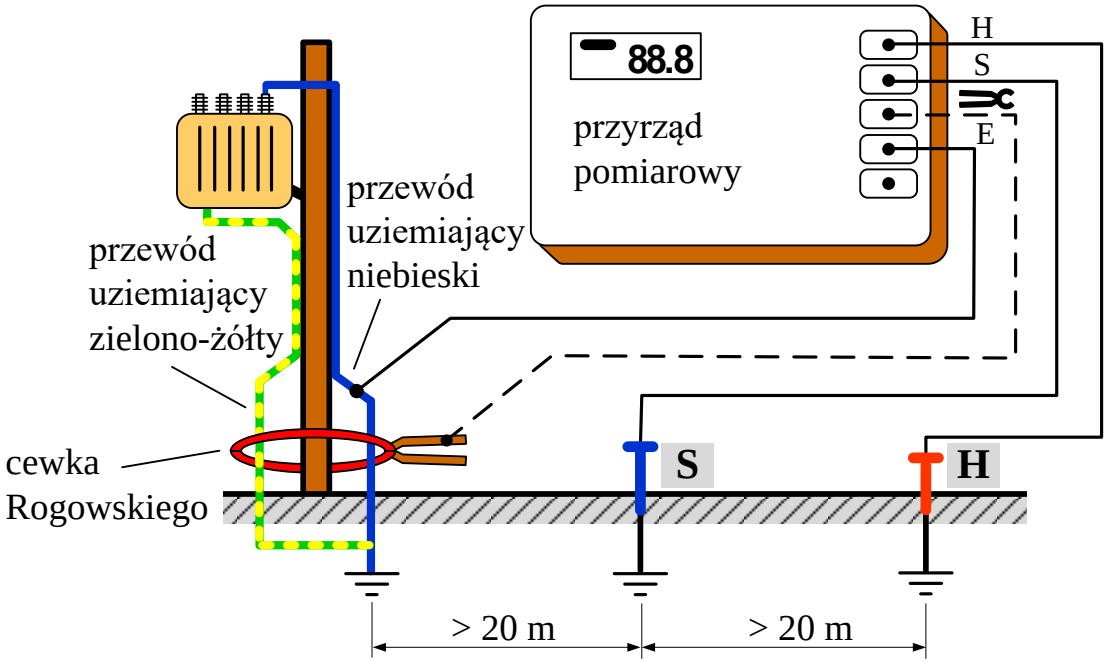
Metoda „wielocęgowa” – pomiar R_S



Metoda „3p” z rozłączaniem złącz kontrolnych – pomiar R_S podczas badań odbiorczych



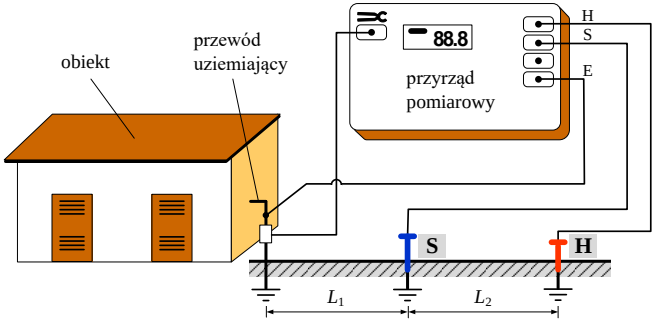
Pomiar rezystancji uziemienia R_E oraz rezystancji R_S dla stacji o rozdzielonych uziemieniach części SN i nn

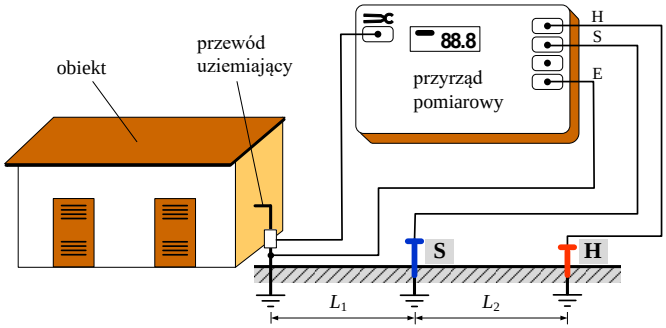


Pomiar rezystancji uziemienia R_S dla stacji słupowej z wykorzystaniem cewki Rogowskiego („miękkie cęgi”)

Pomiar ciągłości przewodów uziemiających

Do pomiaru ciągłości przewodów uziemiających, niezależnie od tego, czy obiekt stacyjny współpracuje z siecią nn w układzie TN czy TT (lub nie współpracuje z siecią nn w przypadku rozdzielni sieciowej SN lub stacji SN/SN), nadają się metody pomiaru rezystancji (niekoniecznie rezystancji uziemienia!) z użyciem cewek pomiarowych (metody cęgowe: jedno- i dwucęgowa).

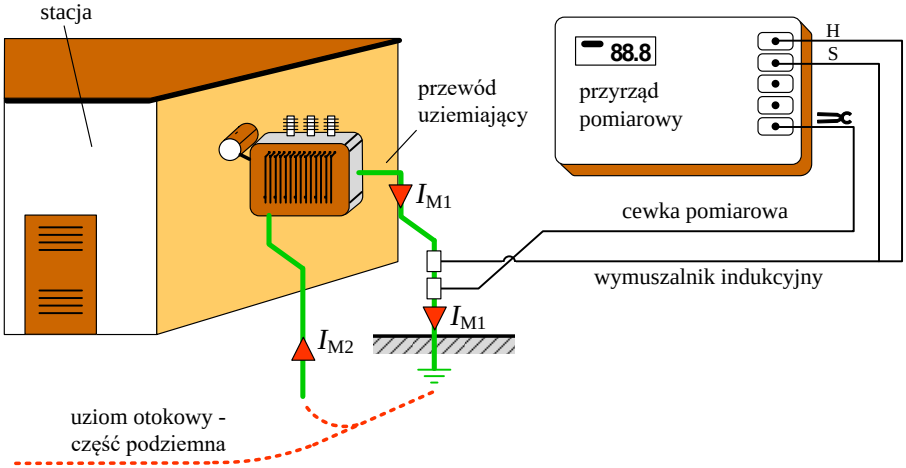




W przypadku użycia metody jednocęgowej ciągłość przewodu uziemiającego może być stwierdzana zarówno „w stronę ziemi” jak i „w stronę uziemianego elementu”, zależnie od umieszczenia cewki pomiarowej względem przewodu wymuszającego prąd pomiarowy. Zatem metoda ta dostarcza więcej danych, niż metoda dwucęgowa (por. nastepny slajd), ale jest trudniejsza w realizacji.

Pomiar ciągłości przewodów uziemiających c.d.

Metoda „dwucęgowa”, pierwotnie służąca do pomiaru rezystancji uziemień obiektów liniowych nn (słupów) może służyć do sprawdzenia ciągłości przewodów uziemiających obiektu stacyjnego pod warunkiem, że istnieją metaliczne pętle, których częściami są przewody uziemiające. Zatem w nielicznych przypadkach, szczególnie w stacjach słupowych SN/nn, pracujących na sieci nn w układzie TT, albo w stacjach o rozdzielonych uziemieniach części SN i nn, metoda może wykazywać fałszywie nieciągłość przewodów uziemiających.

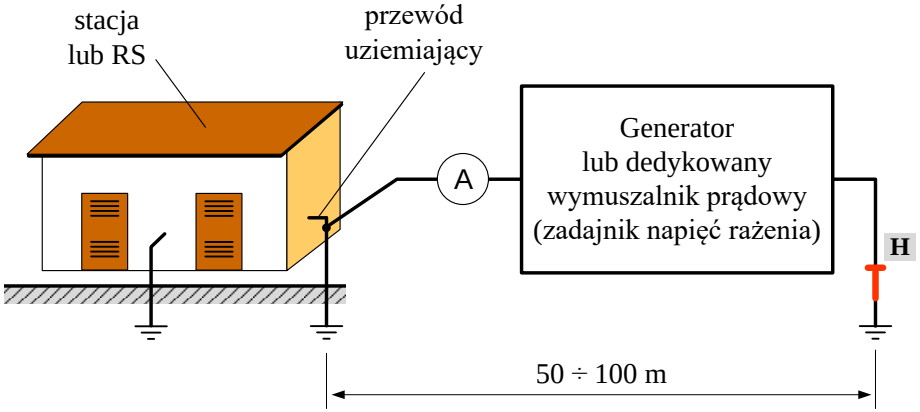


Zaletą metody jest brak elektrod wbijanych w ziemię, metoda szczególnie dobrze nadaje się do sprawdzania ciągłości przewodów uziemiających w stacjach znajdujących się na obszarze zakwalifikowanym do ZIU (Zespolonej Instalacji Uziemiającej).

Pomiar napięć dotykowych – nie zawsze uzasadniony

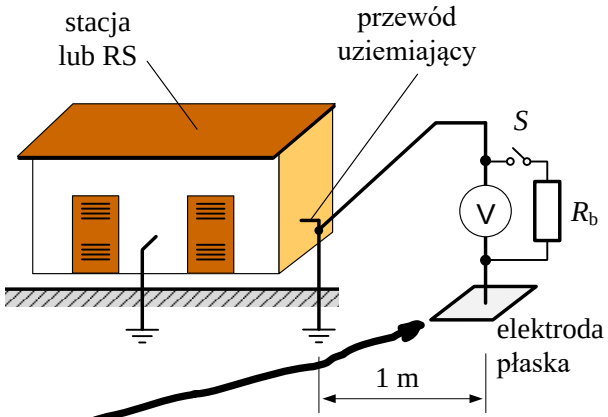
Pomiar napięć dotykowych może być wykonywany w obiektach stacyjnych, w których nie występuje wspólne uziemienie części SN i nn obiektu (stacje pracujące na sieci nn o układzie TT, rozdzielnie SN bez transformacji, stacje SN/SN, inne obiekty o rozdzielonych uziemieniach części SN i nn). Jeśli uziemienie jest wspólne pomiar nie jest sensowny, ponieważ warunek skuteczności ochrony, polegający na ograniczaniu lub blokadzie wynoszenia potencjału do sieci nn w chwili zakłócenia w sieci SN, bazuje na pełnej wartości napięcia uziomowego. Nawet wtedy gdy napięcia dotykowe w obiekcie stacyjnym nie przekroczą dopuszczalnych wartości, potencjał wynoszony poprzez np. przewód PEN może być niebezpieczny poza obiektem.

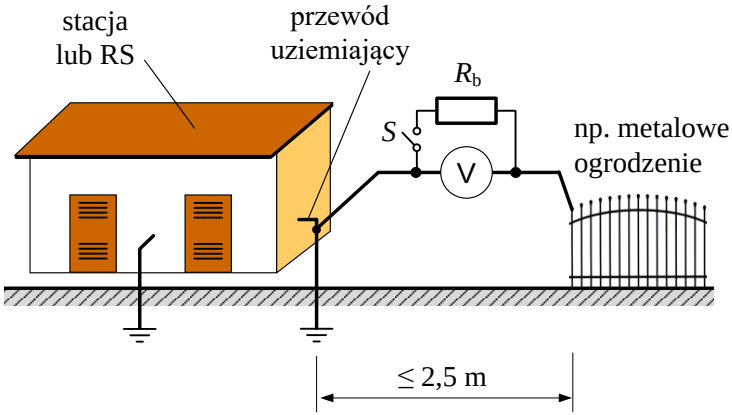
Jeżeli pomiar napięć dotykowych w obiekcie jest zasadny, należy stworzyć obwód wymuszenia (najczęściej w obiektach SN/nn jest to generator/wymuszalnik i linia pomiarowa rozwijana ze szpuli, połączone ze sztucznym uziomem odległym (sondą prądową).



Obwód wymuszenia przy pomiarze napięć dotykowych

Pomiar napięć dotykowych cd.

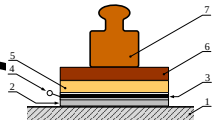




Obwody pomiarowe do pomiarów napięć dotykowych w obiektach stacyjnych SN/nn.

Pamiętać należy, że pomiarów należy dokonać na kilku stanowiskach oraz w przypadku kiedy w niewielkiej odległości od badanego obiektu znajduje się część przewodząca obca, która może być dotknięta jednocześnie z częścią przewodzącą badanego obiektu podczas zwarcia.

W wielu przypadkach wystarczającą (bezpieczną) dokładność może zapewnić użycie uproszczonej elektrody symulującej zestyk stopy człowieka z ziemią.



Czy zawsze?

Zbiór surowych wyników pomiarowych otrzymanych po dokonaniu pomiarów sprawdzających i oględzin (przed przeliczeniem na warunki rzeczywiste):

Rezystancja izolacji obwodów potrzeb własnych stacji R_{iso}; wystarczy porównać z war. kryterialnym wg tabeli,

Impedancja pętli zwarcia obwodu potrzeb własnych Z_{pf}; należy sprawdzić warunek skuteczności ochrony przed porażeniem wg PN-EN 60364

Rezystancja układu uziemiającego lub pojedynczego uziemienia R_E, R_S, R_B – przed sprawdzeniem warunków kryterialnych należy przeliczyć na warunki środowiskowe (pogoda, okres w roku) w których występuje najbardziej niekorzystna wartość rezystancji

Napięcia dotykowe U_{ST}, U_T – przed sprawdzeniem warunków kryterialnych należy przeliczyć jak rezystancję, na najbardziej niekorzystne warunki środowiskowe.

Pomiar ciągłości przewodów uziemiających – należy uzyskany wynik porównać z umowna wartością rezystancji, przy której przewód uziemiający można uznać za ciągły (wartości umowne podane w wytycznych)

Przeliczanie surowych wyników pomiarów na warunki rzeczywiste

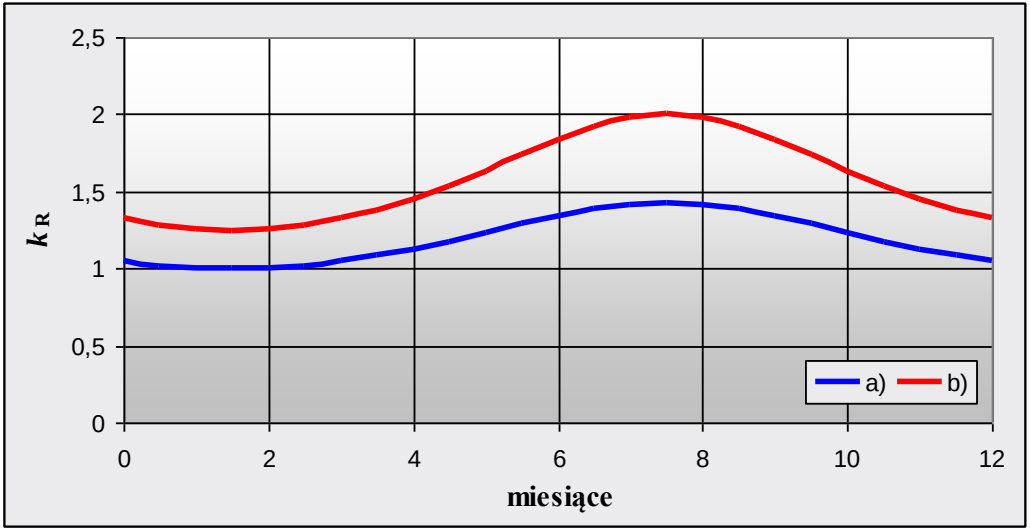
Uwzględnienie konfiguracji uziomu, pogody w dniu pomiaru i wilgotności gruntu

$$R_B = k_R \cdot R_{BM} \quad (R_E = k_R \cdot R_{EM},\ R_S = k_R \cdot R_{SM},\ \rho = k_R \cdot \rho_M)$$

Rodzaj uziomu	Rozmiar uziomu	Rezystywność gruntu (Ω·m)	Współczynnik k_R grunt w czasie pomiarów		
			suchy [1]	wilgotny [2]	mokry [3]
Uziom poziomy 0,6 ÷ 1 m [4]	$l < 30$ m	dowolna	1,4	2,2	3,0
Uziom poziomy > 1 m [5]	$l < 30$ m	dowolna	rys. Z1.17 i Z1.18		
Uziom kratowy	$S_E < 900$ m^2	$\rho \leq 200$	1,3	1,8	2,4
		$\rho > 200$	1,4	2,2	3,0
	$S_E \geq 900$ m^2	$\rho \leq 200$	1,1	1,3	1,4
		$\rho > 200$	1,2	1,6	2,0
Uziom pionowy	$l = 2,5 \div 5$ 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 zaliczanym 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.
[5] Głębokość ułożenia uziomu głębiej niż 1 m.

Uwzględnienie konfiguracji uziomu, pogody w dniu pomiaru i wilgotności gruntu dla uziomów poziomych o głębokości >1m



a) dla okresów długotrwałej suszy lub dla uziomu umieszczonego w obszarze wód gruntowych;

b) dla okresów po opadach deszczu

Uwzględnienie rzeczywistych prądów uziomowych w stosunku do prądów pomiarowych (probierczych) w miejscu pomiaru – dotyczy napięć dotykowych oraz napięć uziomowych

$$U_T = k_R \cdot U_{TM} \cdot I_E / I_{EM}, \text{ albo } U_{ST} = k_R \cdot U_{STM} \cdot I_E / I_{EM}$$

gdzie:

k_R – współczynnik uwzględniający wilgotność gruntu (tabela Z1.3),

U_{TM} – zmierzone napięcie dotykowe rażeniowe,

U_{STM} – zmierzone napięcie dotykowe spodziewane,

I_E – rzeczywisty (czyli płynący przy rzeczywistym doziemieniu) prąd uziomowy,

I_{EM} – probierczy (czyli płynący podczas pomiaru) prąd uziomowy (w razie wykorzystania jako przewodu pomiarowego łączącego sondę prądową z układem pomiarowym linii nn (z przewodem PEN) należy uwzględnić jej współczynnik redukcyjny przy wyznaczaniu prądu I_{EM}).

UWAGA! W przypadku obiektów SN oraz nn przy przeliczaniu napięć dotykowych na wartości rzeczywiste należy uwzględnić współczynnik k_R ze względu m.in. na to, że dominującą składową impedancji uziemienia w tych obiektach jest rezystancja (składowa czynna).

Sprawdzenie warunków kryterialnych wg wytycznych (kryteria przykładowe):

Instalacja potrzeb własnych parametr	Warunek	Kryterium
R_{izol}	$R_{izol} \geq R_{izoldop}$	$R_{izoldop}$ wg tabeli
Z_{pf}	$Z_{pfM} \leq Z_{pfdop}$	$Z_{pfdop}=U_0/I_a$
Instalacja uziemiająca parametr	**Warunek**	**Kryterium**
U_E	$U_E=R_E I_E$ lub $U_E=R_B I_E$	$U_E \leq 2U_{Tp}$
U_E	j.w. lecz są środki M	$U_E \leq 4U_{Tp}$
U_T	$U_T \leq U_{Tp}$	U_{Tp} zależne od t_f (tabele)
Oddziaływanie na sieć nn	**Warunek**	**Kryterium**
U_E	$U_E \leq U_F$	U_F zależne od t_f (tabele)
R_B	$R_B \leq R_F \cdot 50/(U_0-50)$	$R_F=10\ \Omega$
Ciągłość przewodów uziemiających	Wynik pomiaru R lub wynik oględzin pozytywny	Wynik pomiaru $R \leq 30\Omega$

R_{izol} – rezystancja izolacji, Z_{pf} – impedancja pętli zwarcia, U_E – napięcie uziomowe, U_{Tp} – dopuszczalne napięcie dotykowe rażeniowe, U_F – dop. napięcie uszkodzeniowe w sieci nn, R_B - rezystancja wypadkowa połączonych układów uziemiających stacji i sieci nn

Uwaga! Nie zapominamy o **oględzinach!**

Obiekty SN/nn położone w obszarach ZIU

Jakie rodzaje badań są konieczne do sprawdzenia stanu ochrony przed porażeniem w obiektach stacyjnych SN i nn na obszarach ZIU?

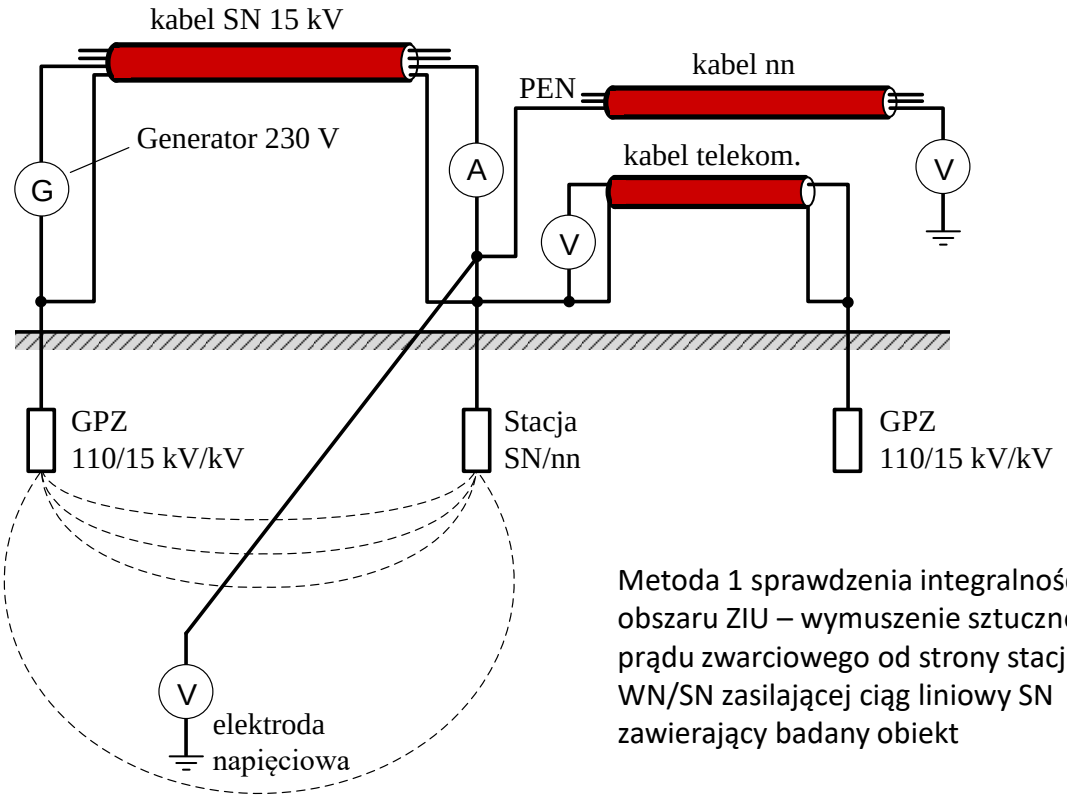
-badanie środków ochrony podstawowej: oględziny, ew. pomiar rezystancji izolacji – jak poza ZIU;

-badanie środków ochrony przy uszkodzeniu: oględziny (jak poza ZIU), sprawdzenie ciągłości przewodów uziemiających (ważne; jedyna możliwość stwierdzenia istnienia połączenia części przewodzących dostępnych obiektu z ZIU), sprawdzenie ew. położenia obiektu na terenie zespolonej instalacji uziemiającej;

-sprawdzenie stanu ochrony przed porażeniem w instalacji potrzeb własnych obiektu stacyjnego – jak poza ZIU;

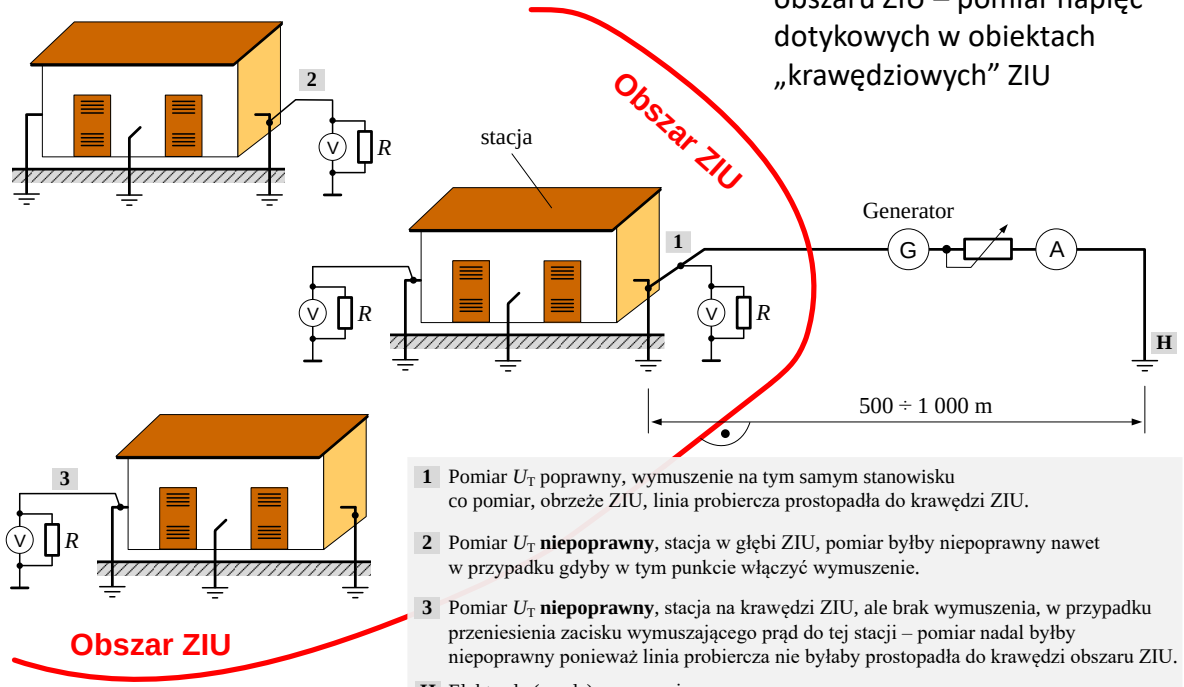
-badania specjalne, np. sprawdzenie, czy obszar zespolonej instalacji uziemiającej nie uległ dezintegracji.

UWAGA – nie przeprowadza się tutaj pomiarów rezystancji uziemienia!



Metoda 1 sprawdzenia integralności obszaru ZIU – wymuszenie sztucznego prądu zwarciowego od strony stacji WN/SN zasilającej ciąg liniowy SN zawierający badany obiekt

Metoda 2 sprawdzenia integralności obszaru ZIU – pomiar napięć dotykowych w obiektach „krawędziowych” ZIU



1 Pomiar U_T poprawny, wymuszenie na tym samym stanowisku co pomiar, obrzeże ZIU, linia probiercza prostopadła do krawędzi ZIU.

2 Pomiar U_T **niepoprawny**, stacja w głębi ZIU, pomiar byłby niepoprawny nawet w przypadku gdyby w tym punkcie włączyć wymuszenie.

3 Pomiar U_T **niepoprawny**, stacja na krawędzi ZIU, ale brak wymuszenia, w przypadku przeniesienia zacisku wymuszającego prąd do tej stacji – pomiar nadal byłby niepoprawny ponieważ linia probiercza nie byłaby prostopadła do krawędzi obszaru ZIU.

H Elektroda (sonda) wymuszająca.

Wybrane zagadnienia dotyczące pomiarów skuteczności ochrony przed porażeniem w obiektach liniowych nn

Klasyfikacja i omówienie metod pomiarowych przydatnych przy sprawdzaniu ochrony przed porażeniem w liniach nn

Jakie rodzaje badań są konieczne do sprawdzenia stanu ochrony przed porażeniem w obiektach liniowych nn?

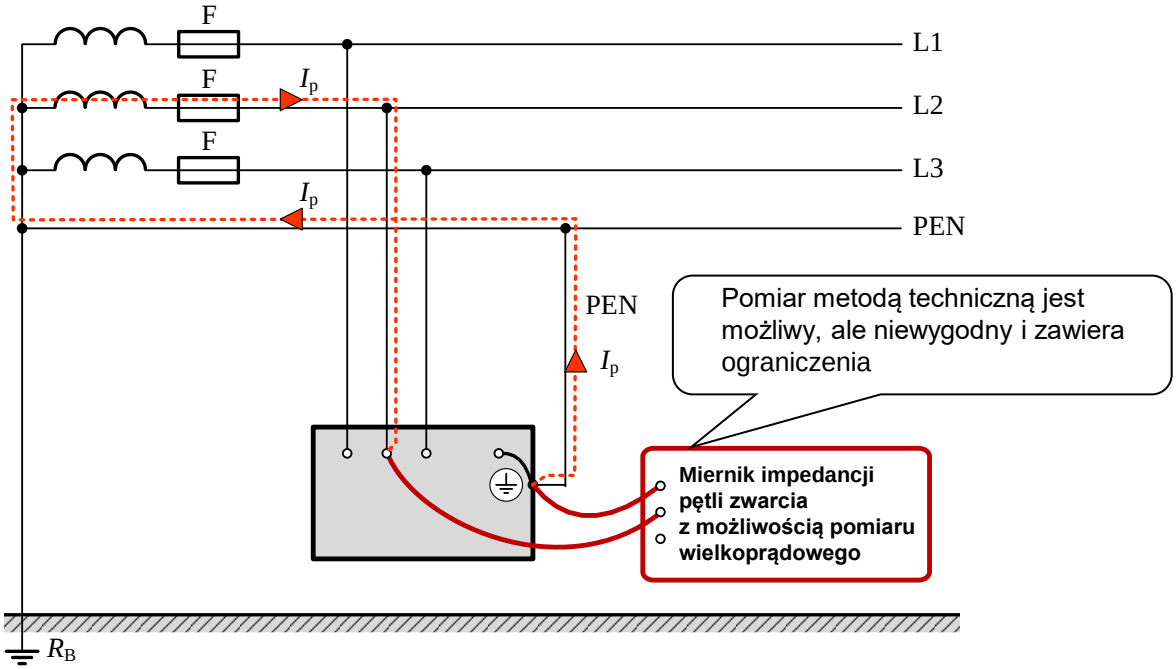
-badanie środków ochrony podstawowej: oględziny;

-badanie środków ochrony przy uszkodzeniu: oględziny, pomiar rezystancji uziemienia konstrukcji wsporczej, złącza kablowego (układu uziemiającego i/lub wypadkowej rezystancji kilku układów uziemiających połączonych ze sobą – szczególną uwagę należy zwrócić na użyą technikę pomiarową), sprawdzenie ciągłości przewodów uziemiających, sprawdzenie możliwości przywleczenia potencjału z obiektów stacyjnych poprzez różnego rodzaju części przewodzące, sprawdzenie warunku utrzymania potencjału przewodu PEN zbliżonego do potencjału ziemi przy zwarciu z pominięciem przewodu PEN;

-sprawdzenie rezystancji specjalnych (rezystancja układu uziemiającego „końca" linii) oraz rezystancji uziemień konstrukcji wsporczych wzdłuż linii wymagane np. normą N-SEP -001);

-pomiar impedancji pętli zwarcia obwodu rozdzielczego.

Pomiar impedancji pętli zwarcia dla każdego obwodu dedykowanym miernikiem metodą wielkoprądową (impuls prądowy);



Pomiar metodą wielkoprądową (impuls) - w obwodach rozdzielczych nn jest konieczny, ze względu na obecność dużej ilości „przeszkód" dla prądu pomiarowego w postaci np. skręcanych połączeń lub zacisków przebijających izolację, wystawienie obwodu (często przewody są nieizolowane) na działanie warunkow atmosferycznych itp.

Użycie zwykłej, małoprądowej metody pomiaru może dać wynik fałszywie negatywny, tzn. stwierdzenie zbyt dużej impedancji pętli zwarcia w obwodzie

Pomiary rezystancji uziemień – szczególne wymagania dotyczące użycia wybranych metod i technik pomiaru:

- metoda „3p" pomiaru rezystancji uziemienia (małoprądowa, czyli dedykowanym miernikiem):

cel – uzyskanie informacji o wartości rezystancji wypadkowej R_B układu uziemiającego (sieć TN po stronie nn),

ALBO

uzyskanie informacji o wartości rezystancji układu uziemiającego tylko danego obiektu liniowego R_E (np. uziemienie słupa z ogranicznikiem przepięć lub łącznikiem – sieć TT po stronie nn)

- metody „cęgowe" (różne rodzaje tych metod) pomiaru rezystancji uziemienia:

cel – uzyskanie informacji o wartościach R_{Bi} obiektów liniowych (słupów, złącz kablowych),

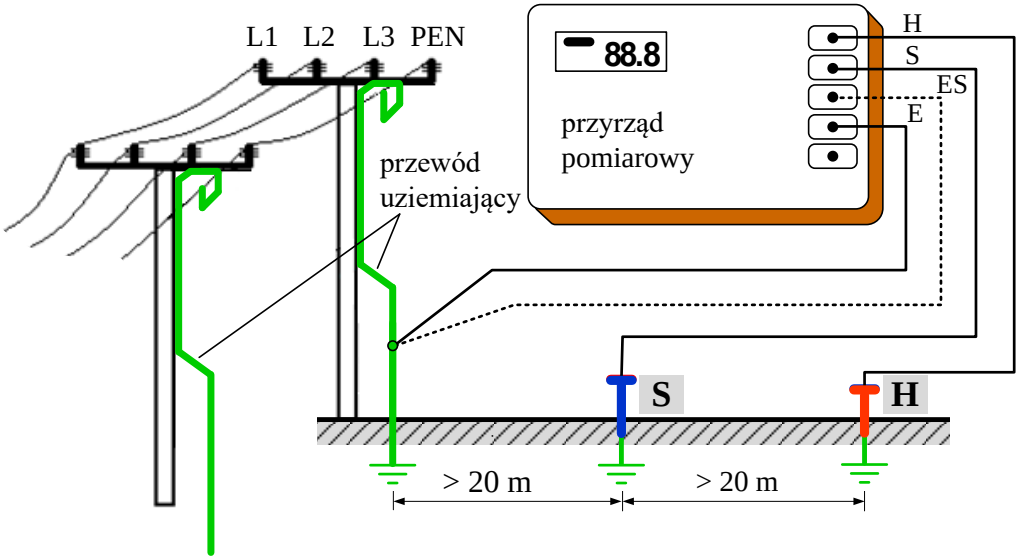
ALBO

uzyskanie informacji o ciągłości przewodów uziemiających

ALBO

zastosowania specjalne (np. uzyskanie informacji o R_{Bk})

Obiekty liniowe nn. Pomiary rezystancji – metody pomiarowe; możliwe do uzyskania wyniki i ich interpretacja



Pomiar rezystancji wypadkowej układów uziemiających w linii nn (UKŁAD TN) metodą „3p” lub „4p”.

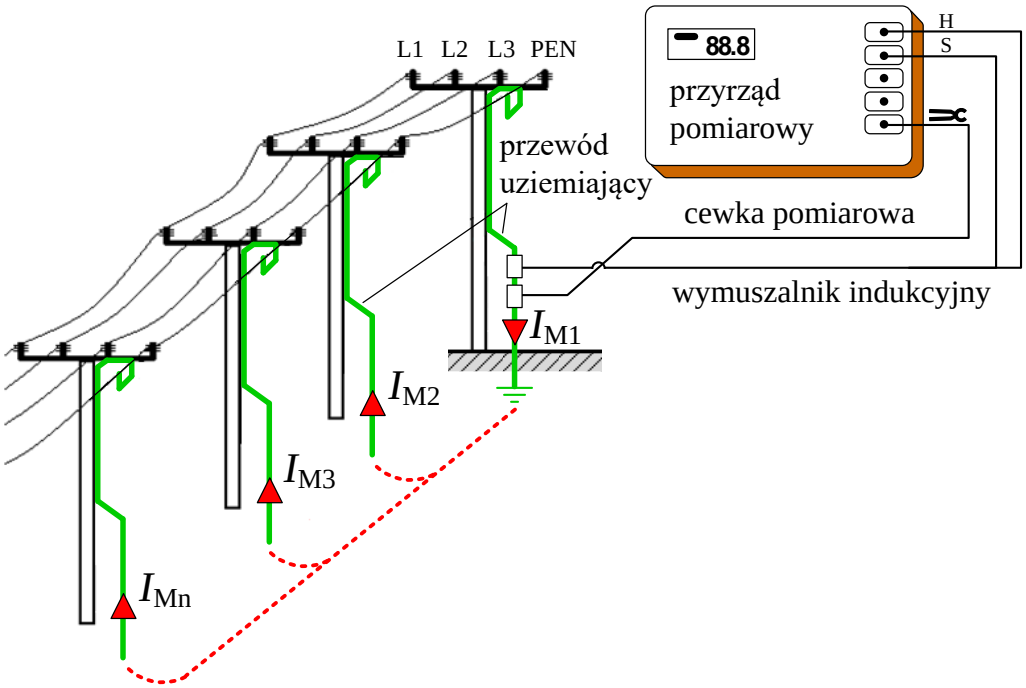
Wyznaczanie strefy potencjału zerowego jest konieczne.

Oczekiwany wynik – surowa wartość rezystancji R_B, wartości bardzo zależą od rezystywności gruntu i rozległości sieci nn

Jeśli pomiar odbywa się w sieci o układzie TT (brak PEN), to oczekiwanym wynikiem jest wartość rezystancji uziemienia słupa, a raczej obiektu umieszczonego na słupie i wymagającego uziemienia (z rożnych względów, w tym także ochrony przed porażeniem)

Metoda nie nadaje się do kontroli ciągłości przewodu uziemiającego (chyba że złącze kontrolne zostanie rozpięte – dodatkowe procedury i ograniczenia)

Obiekty liniowe nn – metody pomiarowe; możliwe do uzyskania wyniki i ich interpretacja

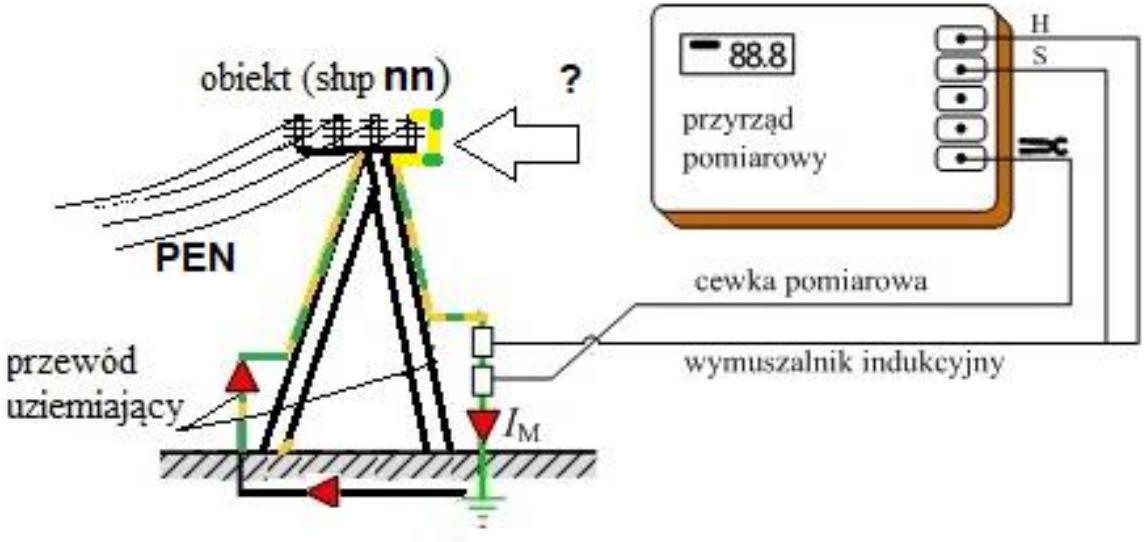


Wykorzystanie metody „dwucęgowej” do pomiaru rezystancji uziemienia pojedynczego słupa w sieci nn pracującej w układzie TN. Metoda nie nadaje się dla sieci TT

Oczekiwany rezultat: Surowa wartość rezystancji R_{Bi}

Paradoksalnie w rozległych sieciach nn metoda ta jest dokładniejsza od metody „jednocęgowej” (dokładność porównywalna do pomiaru metodą „3p” przy rozpiętym złączu kontrolnym uziemienia); dokładność maleje, gdy liczba uziemień R_{Bi} się zmniejsza (rosnie wtedy dokładność metody jednocęgowej)

Obiekty liniowe nn – metody pomiarowe; możliwe do uzyskania wyniki i ich interpretacja

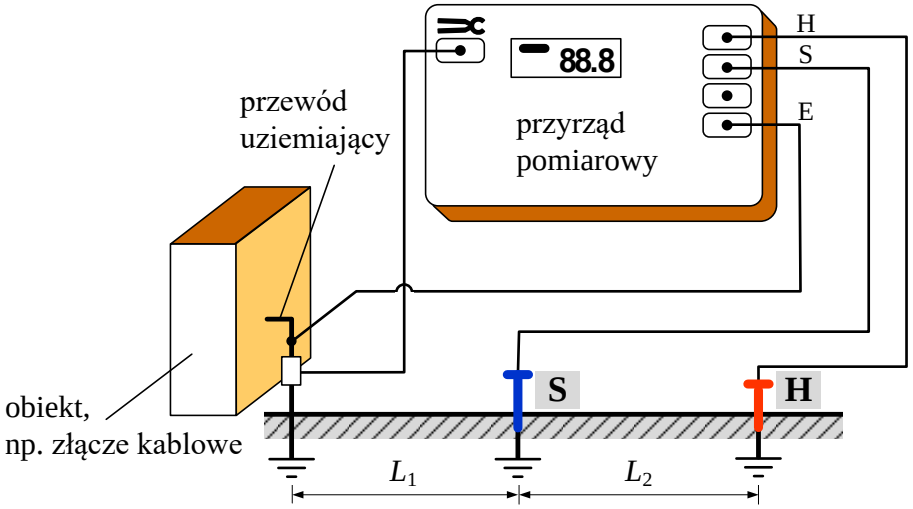


Ograniczenia metody „dwucęgowej" i możliwość uzyskania fałszywych wyników:

Pomiar rezystancji „uziemienia" za pomocą metody „dwucęgowej" w obiektach zawierających metaliczną pętlę przewodów uziemiających, np. słupach wielokrotnych lub złączach kablowych połączonych bednarka pod ziemią nie daje informacji o rezystancji uziemienia, tylko o ciągłości tej pętli. Sygnałem ostrzegawczym są wyniki pomiarowe o wartościach bardzo niskich, np. w miliomach zamiast w Ω.

Podobnie metoda dwucęgowa, użyta do kontroli ciągłości przewodu uziemiającego słupa wielokrotnego linii nn pracującej w układzie TN nie daje pewności, czy układ uziemiający słupa jest skutecznie połączony z przewodem PEN. W złaczach kablowych może wystąpić podobna sytuacja.

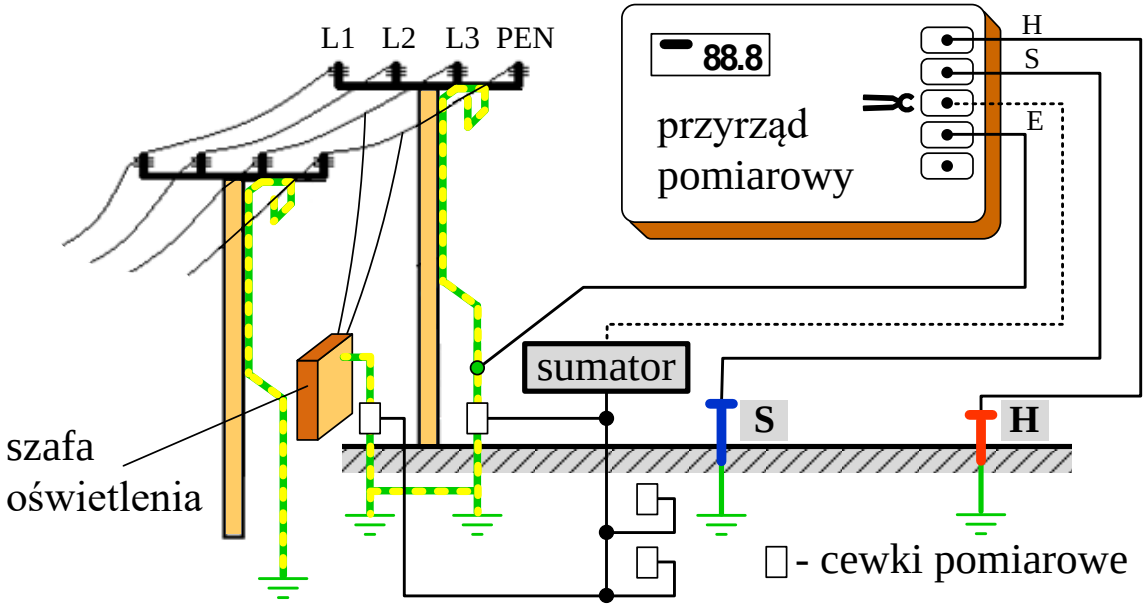
Obiekty liniowe nn – metody pomiarowe; możliwe do uzyskania wyniki i ich interpretacja; ograniczenia technik pomiarowych



Wykorzystanie metody „jednocęgowej” do pomiaru rezystancji uziemienia pojedynczego obiektu liniowego, np. złącza kablowego w sieci nn pracującej w układzie TN lub TT i jednoczesnej kontroli ciągłości przewodu uziemiającego w stronę ziemi. Warunek poprawnego pomiaru R_{Bi}: obiekt posiada tylko jeden przewód uziemiający i brak jest pętli metalicznej pomiędzy uziomem a przewodem PEN (np. bednarka łącząca wszystkie uziomy złącz kablowych), podobna sytuacja występuje przy wielokrotnych słupach linii napowietrznych nn.

Aby uniknąć tych sytuacji konieczna jest dokładna kontrola dokumentacji projektowej lub powykonawczej, może być pomocny pomiar z wykorzystaniem jednocęgowej metody z miękkimi cęgami lub metody wielocęgowej, nie zawsze jest on jednak technicznie wykonalny. Przykład na nast. slajdzie:

Obiekty liniowe nn – metody pomiarowe; możliwe do uzyskania wyniki i ich interpretacja; ograniczenia technik pomiarowych



Wykorzystanie metody „wielocęgowej” do pomiaru rezystancji uziemienia pojedynczego słupa w sieci nn pracującej w układzie TN gdy zachodzi obawa istnienia pętli metalicznej pomiędzy uziomem a przewodem PEN (np. bednarka łącząca wszystkie uziom szafy oświetleniowej i słupa). Istnienie pętli można wykryć, stosując metodę „dwucęgową” pomiaru rezystancji uziemienia. Jeśli nie dysponuje się miernikiem realizującym metodę „wielocęgową”, a pętla istnieje, jedyną możliwością uzyskania poprawnych wyników jest wyłączenie napięcia i rozpięcie złącz kontrolnych uziemienia, a następnie pomiar metodą „3p”.

Obiekty liniowe nn – metody pomiarowe; możliwe do uzyskania wyniki i ich interpretacja; ograniczenia technik pomiarowych

Wnioski dotyczące interpretacji wyników:

1. **Czy uzyskanie wyniku pomiarowego w postaci bardzo małej surowej wartości rezystancji badanego uziemienia świadczy o idealnym stanie uziemienia?**

   NIE! Należy się jeszcze upewnić, czy pomiar przeprowadzono przy użyciu właściwej metody i techniki pomiarowej i czy obiekt nie posiada dodatkowych pętli metalicznych mających wpływ na wynik pomiaru i jego zafałszowanie.

2. **Czy uzyskanie wyniku pomiarowego w postaci bardzo wysokiej wartości rezystancji uziemienia świadczy o tym, że uziemienie nadaje się od razu do kapitalnego remontu?**

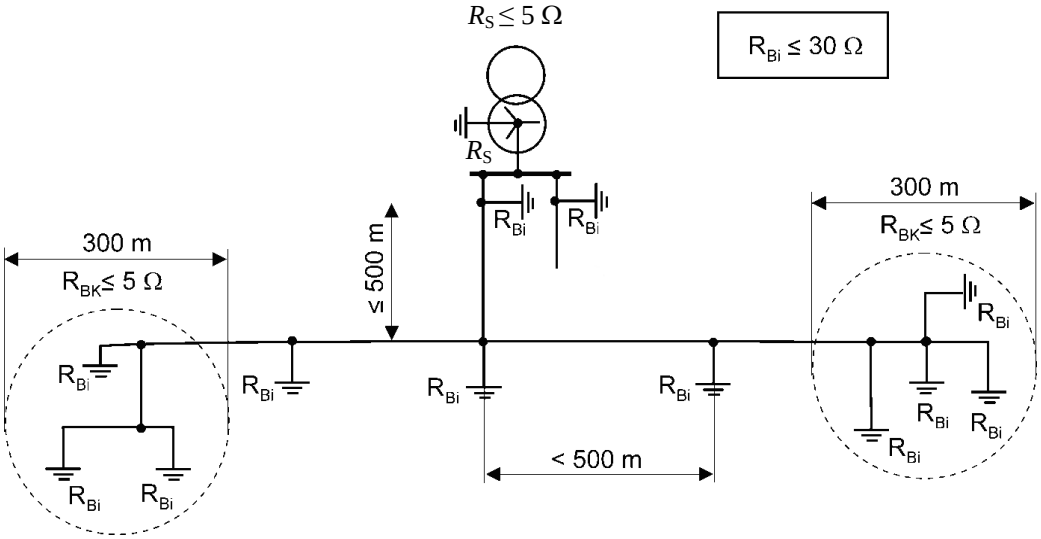
   NIE! Należy zweryfikować pomiar i wyeliminować ewentualne błędy metod i technik pomiarowych; przykładowo: użycie metody „jednocęgowej" przy pomiarach R_{Bi} w rozległych sieciach nn z reguły daje zawyżone wyniki, ponieważ prąd pomiarowy płynący przez cęgi jest tym mniejszy, im więcej innych uziemień R_{Bi} znajduje się w sieci, w końcu prąd ten jest mniejszy niż błąd pomiarowy przyrządu i w efekcie odczyt wyniku następuje z błędem kilkuset %

Podobnych przykładów jest znacznie więcej; nie sposób przytoczyć tutaj wszystkich; należy zawsze w przypadku uzyskania wątpliwego wyniku dążyć do jego weryfikacji przy użyciu np. innej metody pomiarowej

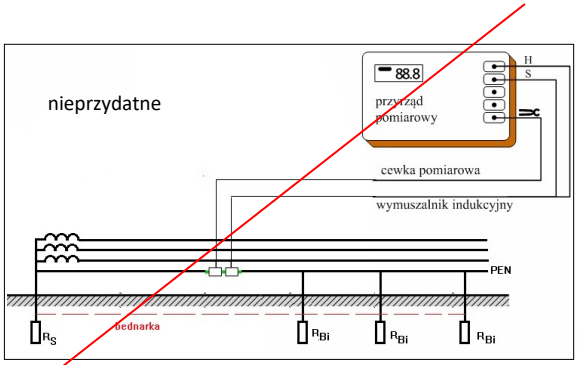
Pomiar impedancji pętli zwarcia powinien być przeprowadzany na końcu każdego obwodu nn, odgałęzienia oraz w miejscach zainstalowania zabezpieczeń wzdłużnych.

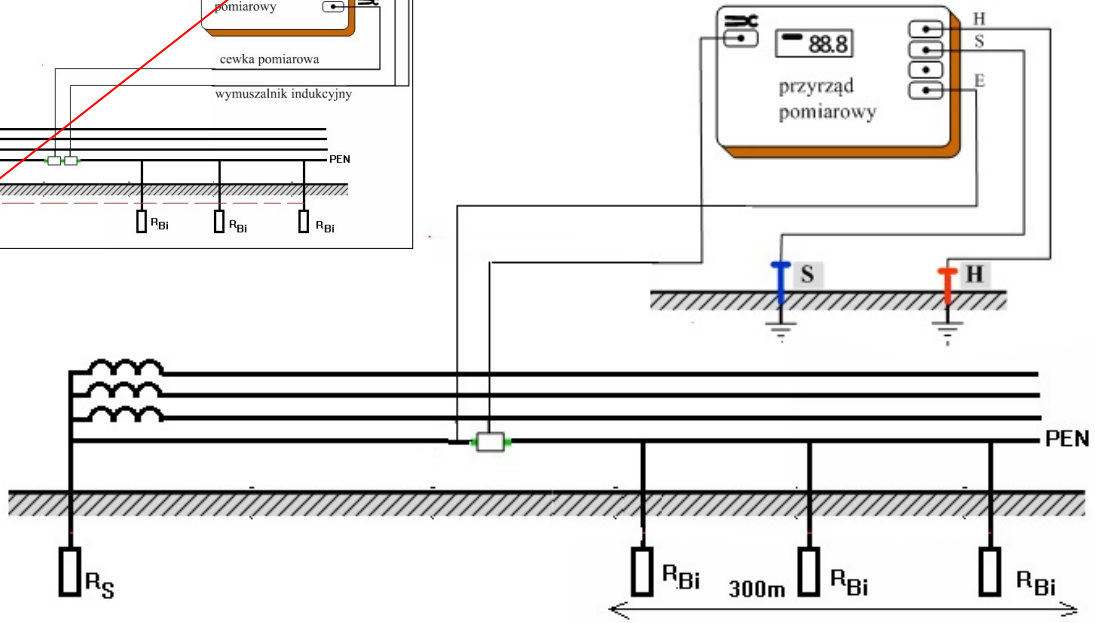
Pomiar rezystancji wypadkowej uziemienia „początku" linii przeprowadzany jest jak dla pomiarów w obiektach stacyjnych (pomiar R_S) – można zamiast przeprowadzać ten pomiar uzyskać informacje o wartości R_S na podstawie protokołu z pomiarów skuteczności ochrony przed porażeniem w obiekcie stacyjnym (o ile R_S było mierzone). Techniczna realizacja tego pomiaru jest trudna bez wyłączania obiektu spod napięcia (ale możliwa do przeprowadzenia np. metodą wielocęgową).

Rezystancję układu uziemiającego „końca" linii nn można oszacować, przy założeniu, że uziomy słupów (złącz) umieszczonych w kole o średnicy 300m, zawierającym koniec linii, są niezależne.



Rezystancję układu uziemiającego „końca” linii nn można oszacować, przy założeniu, że uziomy słupów (złącz) umieszczonych w kole o średnicy 300m, zawierającym koniec linii, są niezależne. Jeżeli nie ma takiej pewności, można przeprowadzić specjalny pomiar pomocniczy metodą jednocęgową pomiaru rezystancji uziemienia, jednak należy go przeprowadzać z rozwagą i świadomością możliwości wystąpienia fałszywych wyników, podobnie jak to ma miejsce przy metodzie dwucęgowej.





Sprawdzenie warunków kryterialnych wg wytycznych (kryteria przykładowe):

Instalacja uziemiająca wypadkowa - parametr	Warunek	Kryterium
R_B	$R_B \leq U_F/I_E$	U_F, I_E – z danych pomiarowych na stacji zasil.
R_B	$R_B \leq R_F \cdot 50/(U_0-50)$	R_F=10 Ω
Instalacja uziemiająca obiektu - parametr	**Warunek**	**Kryterium**
R_{Bi}	$R_{Bi} \leq R_{Bidop}$	R_{Bidop}= 30 Ω
Instalacja uziemiająca „końca" linii - parametr	**Warunek**	**Kryterium**
R_{BK}	$R_{BK} \leq R_{BKdop}$	$R_{BKdop} \leq$5 Ω
Impedancja pętli zwarcia - parametr	**Warunek**	**Kryterium**
Z_{pf}	$Z_{pfM} \leq Z_{pfdop}$	Prąd zwarcia$\geq 2I_{BN}$ (2x prąd wkładki bezp.)
Ciągłość przewodów uziemiających	**Wynik pomiaru R lub wynik oględzin pozytywny**	**Wynik pomiaru R≤30Ω**

Uwaga! Nie zapominamy o **oględzinach!** Wartości R przed porównaniem z kryterium przelicza się przez współczynniki k_R (z wyjątkiem sprawdzeń ciągłości przewodów uziem.)

Metody pomiarowe „małoprądowe" przydatne do pomiarów ochrony przed porażeniem w obiektach stacyjnych WN i ograniczenia ich stosowania

Zagadnienie związane jest ściśle z problemem, jakich pomiarów należy dokonać w obiektach WN/NN, aby można było stwierdzić skuteczność (lub nieskuteczność) działania ochrony przed porażeniem?

Odpowiedź na to pytanie nie jest oczywista, ponieważ zależy od tego, która część obiektu jest sprawdzana. Jeśli pomiary wykonywane są np. w **instalacji elektrycznej pomieszczeń sterowni, to pomocne mogą być:**

- pomiary rezystancji lub impedancji (w zakresie od mΩ przy pomiarach ciągłości przewodów w instalacjach el. niskiego napięcia , do MΩ przy pomiarach rezystancji izolacji),

- pomiary wybranych napięć (w zakresie od mV do setek V – w tym także sprawdzenie możliwości przywleczenia potencjału –por. szkolenie z ochrony przed porażeniem w obiektach nn).

Jeżeli pomiary dotyczą **terenu w obiekcie w sąsiedztwie urządzeń WN/NN (w obrębie kraty uziomowej)**, to przydatne są:

- pomiary napięć dotykowych spodziewanych i rażeniowych

czy to da się zrealizować metodą małoprądową?

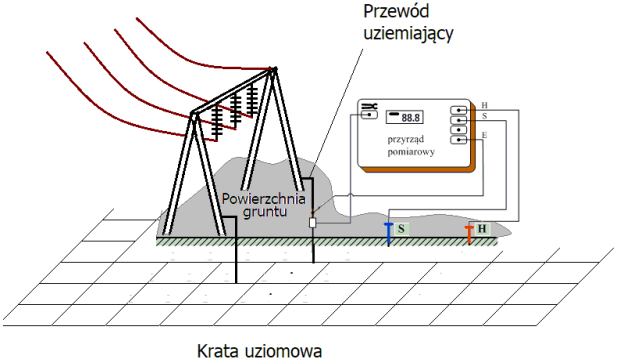
- pomiary małych rezystancji (w celu np. stwierdzenia spójności kraty uziomowej, ciągłości przewodów uziemiających itp.)

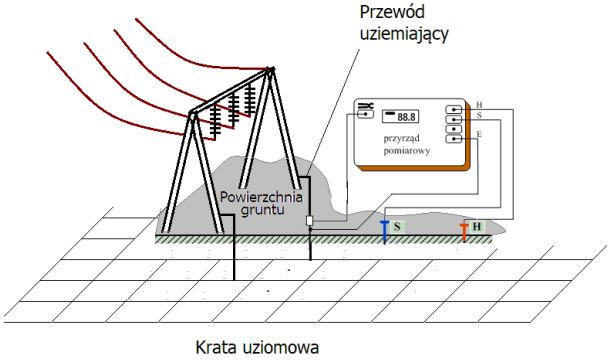
Metoda małoprądowa wykorzystuje prąd pomiarowy o niewielkich wartościach (od mA do kilkunastu A)

Modyfikacje metod pomiarowych „małoprądowych” w odniesieniu do pomiarów na obiektach WN/NN:

1. Pomiar rezystancji lub impedancji uziemienia (instalacji uziemiającej): „czysta” metoda trzypunktowa, metody pomiaru rezystywności gruntu; przydatne przy projektowaniu układów uziemiających obiektów WN/NN, bardzo trudne w realizacji w wersji małoprądowej (z wyjątkiem pomiaru rezystywności gruntu) w obiektach stacyjnych WN/NN, możliwe do realizacji przy pomiarach w obiektach liniowych WN/NN;

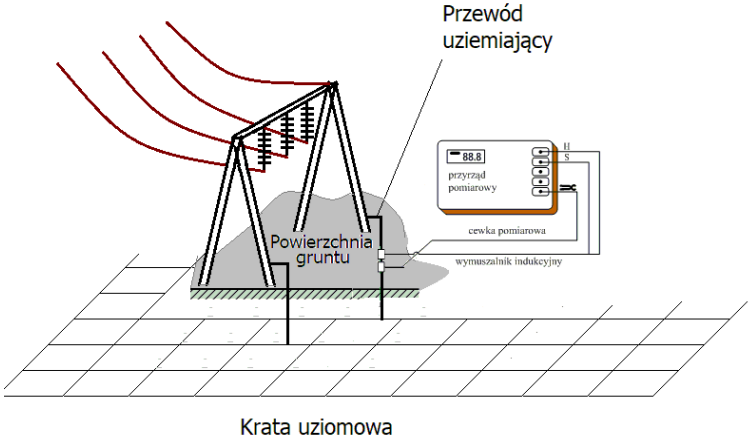
2. Pomiar „rezystancji lub impedancji” uziemienia metodami „3p” z dodatkowym użyciem cewek Rogowskiego lub cęgów Dietza („metody cęgowe”) – łatwiejsza realizacja, jeżeli tylko celem pomiaru jest **zbadanie ciągłości przewodów uziemiających**





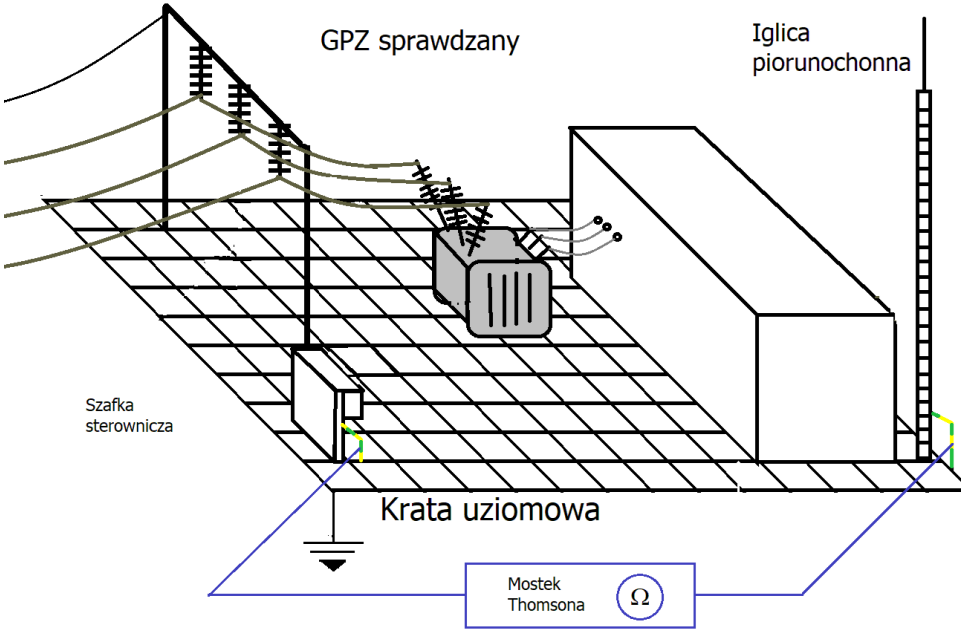
Przykład modyfikacji: metoda „3p+cęgi” małoprądowa sprawdza się przy kontroli ciągłości przewodów uziemiających, nie jest konieczne wyznaczanie strefy zerowego potencjału.

Modyfikacje metod pomiarowych „małoprądowych” w odniesieniu do pomiarów na obiektach WN/NN (c.d):



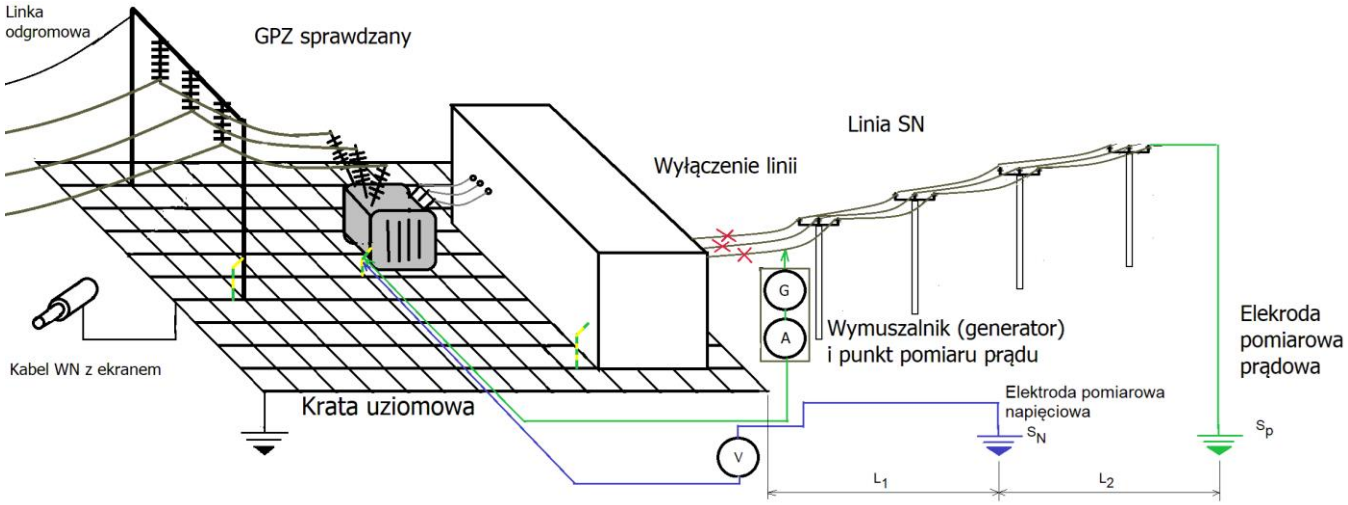
Metoda dwucęgowa do pomiaru ciągłości przewodów uziemiających na stacjach WN/NN; może dawać fałszywy wynik, jeśli badany fragment obiektu stacyjnego ma tylko jedno połączenie z kratą uziomową poprzez jeden przewód uziemiający. Nie wymaga poszukiwania strefy potencjału zerowego. Trudno nazwać ja metodą „3p”, ponieważ nie wymaga wbijania elektrod w grunt.

„Małoprądowa” metoda „2p” do sprawdzania spójności kraty uziomowej na obiektach WN/NN:



Istnieje jeszcze metoda wielocęgowa pomiaru impedancji uziemienia, omówiona zostanie przy zagadnieniach dotyczących obiektów liniowych (słupów) WN, gdyż to dla nich ma największe zastosowanie.

Metoda „wielkoprądowa” pomiaru rezystancji/impedancji uziemienia („3p”)



Na rys. jako przewody linii do elektrody prądowej wykorzystano wyłączoną linię SN. Możliwe jest (i realizowane w praktyce) wykorzystanie wyłączonej linii WN w tym celu. Jest to ogólna idea metody, metoda jest przydatna w obiektach WN, w zasadzie tylko przy pomiarach odbiorczych (sprawdzenie poprawności zaprojektowania kraty uziomowej, ale jest wyjątek). Trudności praktyczne i tak występują, np. przy poszukiwaniu ziemi odniesienia. Natomiast obwód wymuszenia jest przydatny do pomiarów napięć dotykowych.

Trudności realizacji metody:

- rezystancja przewodów pomiarowych – powinna być pomijalnie mała w stosunku do rezystancji badanego uziomu - przy impedancjach uziomu rzędu 0,5Ω i koniecznych do realizacji długościach przewodów, jest to trudne do realizacji i praktycznie wyklucza używanie przewodów rozwijanych ze szpuli. Dodatkowo sytuację utrudnia wymóg uzyskania dużego (50A lub więcej) prądu pomiarowego

- odległości elektrod od badanego uziomu. Norma PN-EN 50522 wymaga, aby obie elektrody były umieszczone w odpowiednich odległościach L1 i L2 względem badanego uziemienia oraz względem siebie. W przypadku pomiarów przy obiektach WN odległość sondy prądowej od badanego uziomu powinna wynosić co najmniej 1km, przy jednocześnie odpowiedniej odległości sondy napięciowej (np. wg reguły 62%).

- wyznaczanie strefy potencjału zerowego wymaga przemieszczania sondy napięciowej proporcjonalnie w stosunku do długości linii wymuszającej (przykładowo- dla obiektów SN było to sondowanie co 6m, dla obiektów WN może to być 60m i więcej, stąd częściej wykorzystuje się regułę 62%).

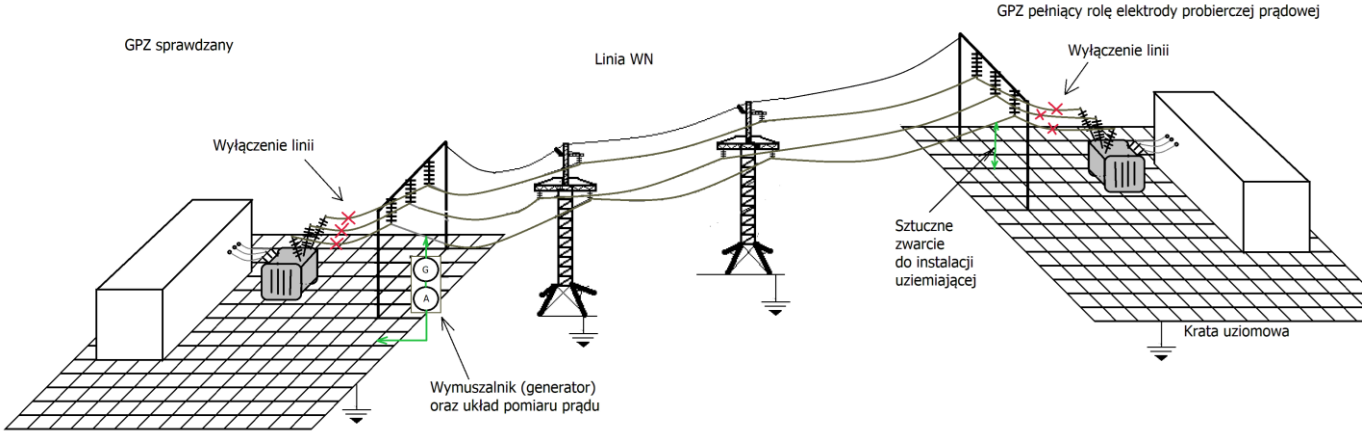
Uzyskany wynik w przypadku próby porównania go bezpośrednio z warunkami kryterialnymi skuteczności ochrony przed porażeniem praktycznie nigdy nie umożliwi spełnienia kryteriów skuteczności, co spowoduje konieczność pomiaru napięć dotykowych.

Wniosek. Metoda wielkoprądowa „3p" pomiaru rezystancji/impedancji uziemienia nie jest standardem działania w przypadku pomiarów skuteczności ochrony przed porażeniem. Może być wykorzystywana przy badaniach odbiorczych w celu potwierdzenia poprawności wykonania projektu kraty uziomowej, lub pomocniczo do szacowania odległości $d_{accept.}$

Natomiast jej elementy (głównie konstrukcja obwodu wymuszającego prąd) stanowią podstawę do innych pomiarów (pomiar napięć dotykowych)

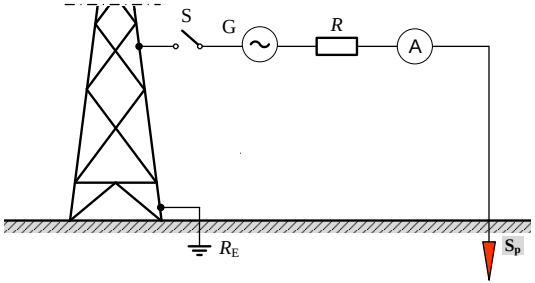
Metoda „wielkoprądowa” w przypadku pomiaru napięć dotykowych

Obwody wymuszenia:



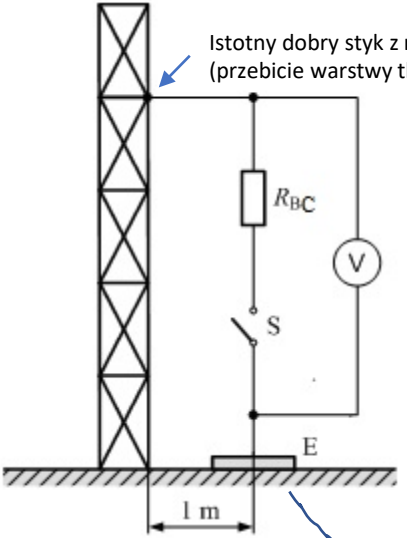
Obwód wymuszenia prądu z linią WN

Obwód wymuszenia prądu
Z przewodem rozwijanym ze szpuli
(mało przydatny przy stacjach,
bardziej przydatny przy słupach WN)

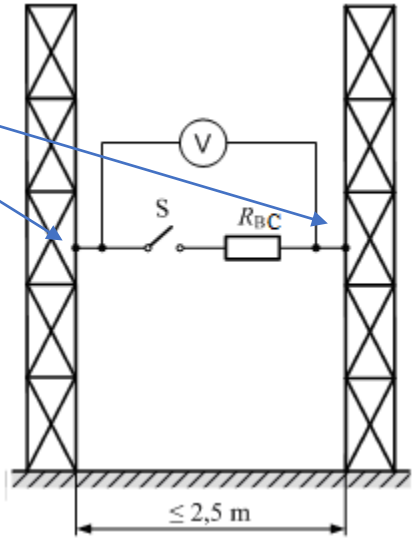


Metoda „wielkoprądowa” w przypadku pomiaru napięć dotykowych

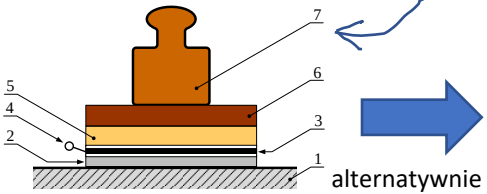
Obwody pomiaru napięć dotykowych:



podstawowy



uzupełniający (występuje część przewodząca obca mogąca sprowadzić niebezpieczny potencjał)

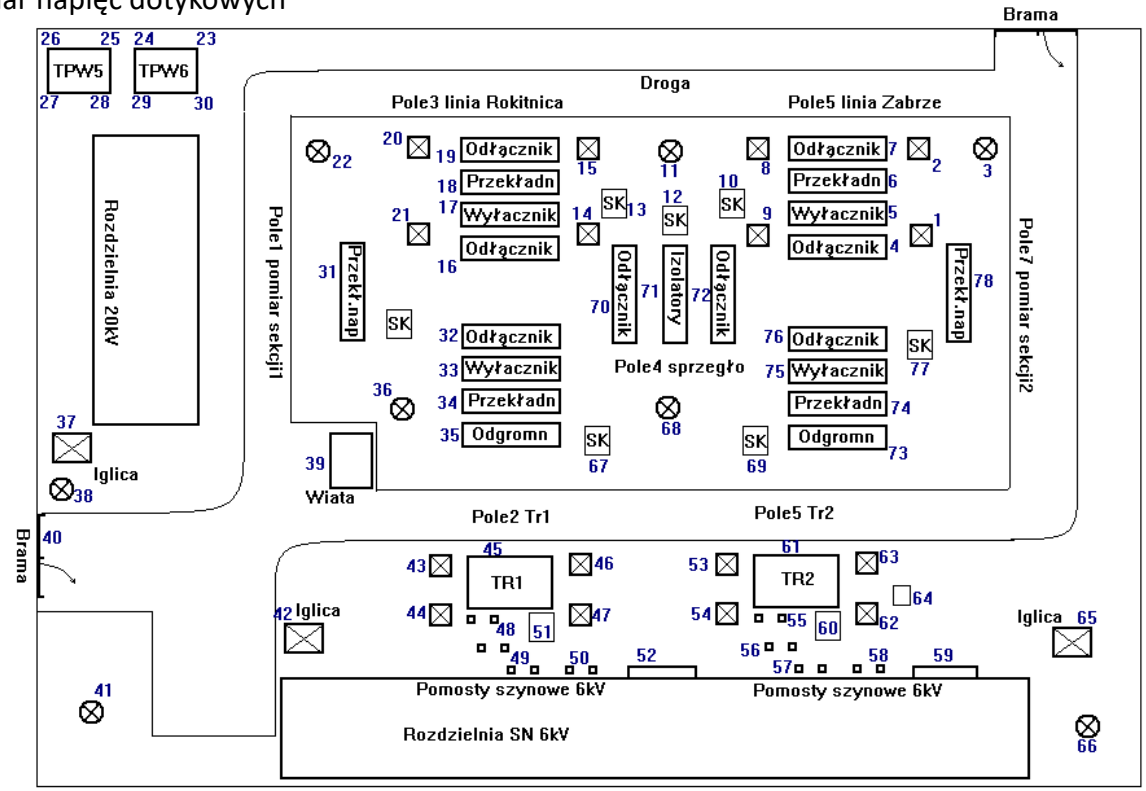


alternatywnie

Płytka z naciskiem,
„obciążnik”,
elektroda prętowa?

Praktyczna realizacja pomiarów – zasady lokalizacji stanowisk pomiarowych

1. Pomiar napięć dotykowych



Lokalizacja stanowisk, na których dokonuje się rzeczywistego pomiaru, jest oczywista. Natomiast pewien problem stanowi wybór miejsc, do których podłączać się będzie wymuszenie.

Lokalizacja stanowisk, na których dokonuje się rzeczywistego pomiaru, jest oczywista. Wybiera się wszystkie miejsca w których występują części przewodzące dostępne, których w czasie normalnej eksploatacji stacji WN/SN może dotknąć człowiek, np. podczas obchodu stacji lub prac konserwacyjnych. Przenoszenie układu pomiarowego do pomiaru napięć dotykowych nie jest zbyt trudne, dlatego nie należy ograniczać liczby punktów pomiaru tylko z tego powodu.

Problem stanowi punkt wprowadzenia prądu pomiarowego do uziomu stacyjnego.

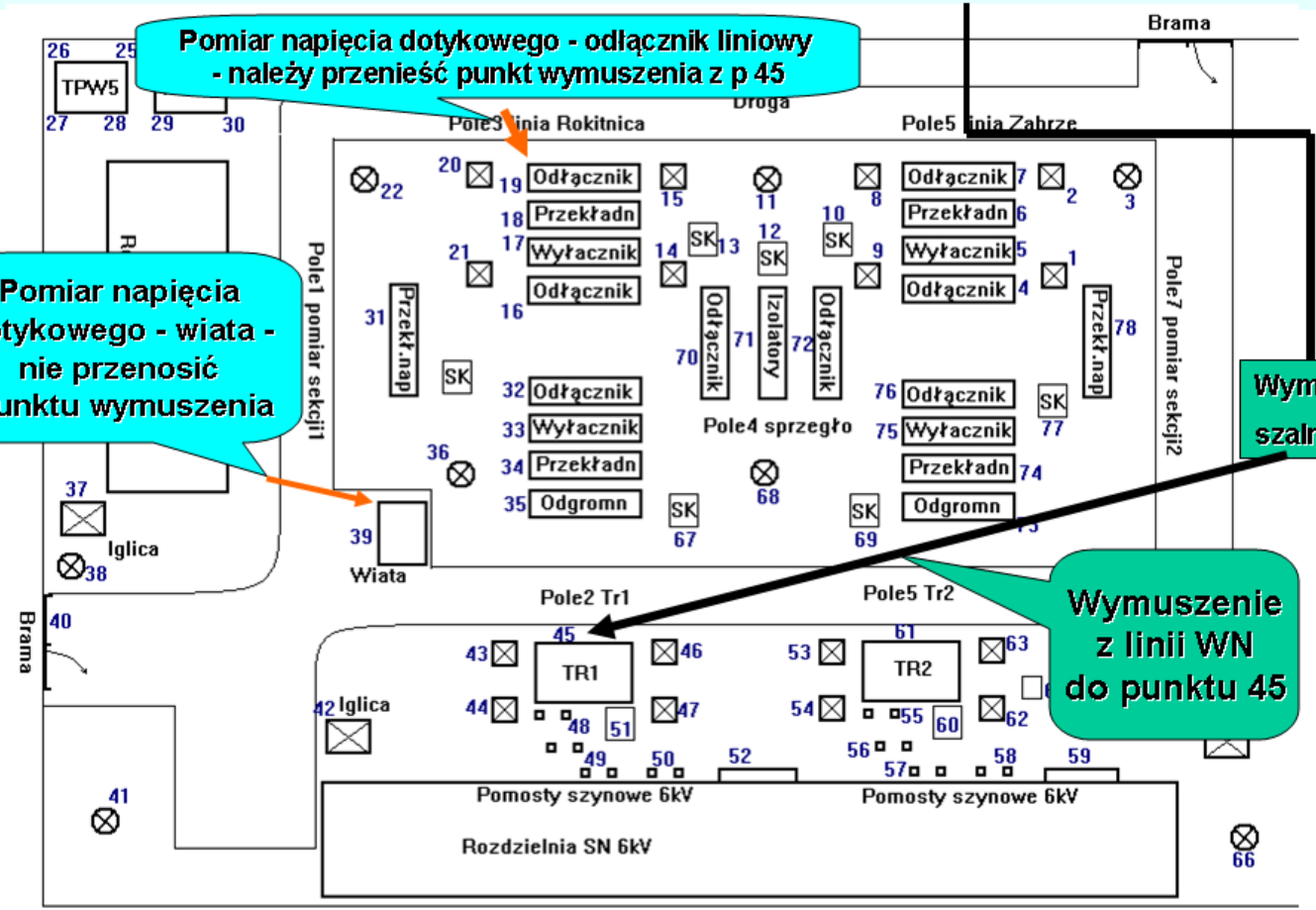
Nie może to być punkt stały (np. jednorazowe wymuszenie prądu pomiarowego do centralnej studzienki uziemiającej i wykonanie pomiarów napięć we wszystkich punktach przy tym jednym wymuszeniu).

Nie ma również potrzeby przenoszenia punktu wymuszenia **do każdego punktu pomiarowego**, ponieważ prawdopodobieństwo wystąpienia doziemienia w niektórych punktach, w których mierzy się napięcia dotykowe, jest zerowe.

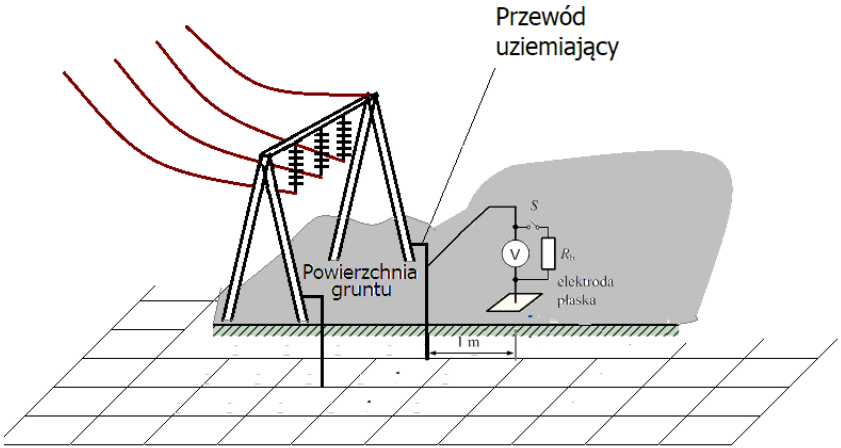
Zatem ogólne zasady dotycząca wyboru punktów wprowadzenia prądu pomiarowego do układu uziemiającego są następujące:

a) Należy ocenić prawdopodobieństwo wystąpienia rzeczywistego doziemienia w danym punkcie układu uziemiającego.
b) Należy sprawdzić, czy dany punkt wymuszenia nie „dubluje się".
c) Zmianę punktu wymuszenia należy przeprowadzić, kiedy wszystkie napięcia dotykowe w obrębie „strefy oddziaływania" danego punktu wymuszenia zostaną pomierzone.
d) W przypadku pomiaru napięć dotykowych poza stacją, punkt wymuszenia pozostaje na stacji i jest to punkt położony najbliżej obiektu, w którym mierzy się napięcia dotykowe.

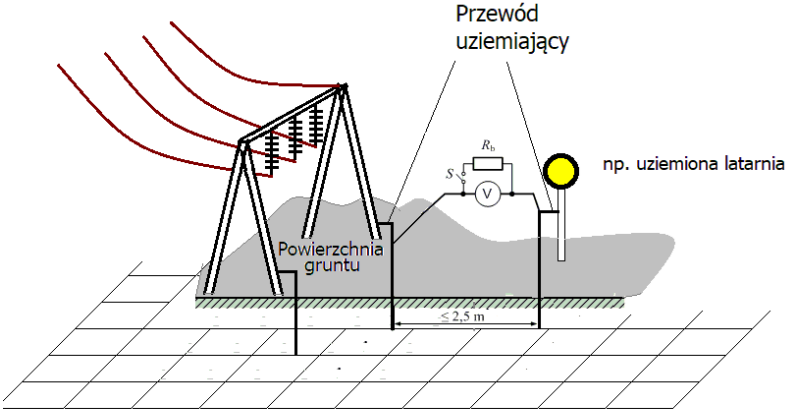
Przykładowe przemieszczanie punktu wymuszenia pokazano na rysunku:


Pomiar napięcia dotykowego - odłącznik liniowy - należy przenieść punkt wymuszenia z p 45
Pomiar napięcia dotykowego - wiata - nie przenosić punktu wymuszenia
Wymuszenie z linii WN do punktu 45
Wymu szalnik
Brama
Droga
Pole3 linia Rokitnica
Pole5 linia Zabrze
Pole1 pomiar sekcji1
Pole7 pomiar sekcji2
Pole4 sprzęgło
Pole2 Tr1
Pole5 Tr2
TPW5
Odłącznik
Przekładn
Wyłacznik
Przekł.nap
Izolatory
SK
Iglica
Wiata
TR1
TR2
Pomosty szynowe 6kV
Pomosty szynowe 6kV
Rozdzielnia SN 6kV

Obwody pomiarów napięć dotykowych w praktyce



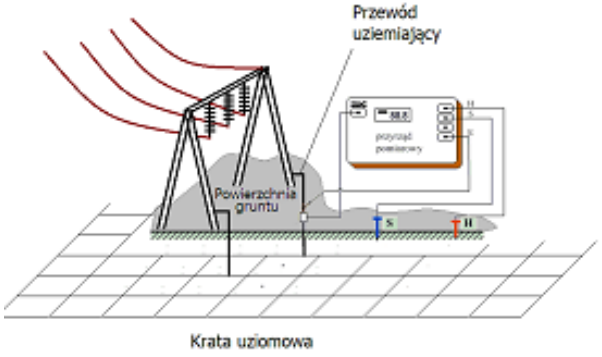
Krata uziomowa

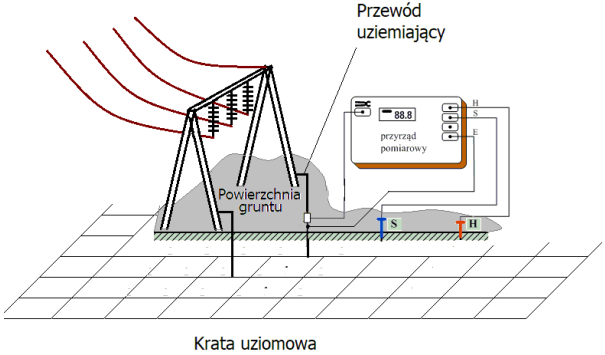


Krata uziomowa

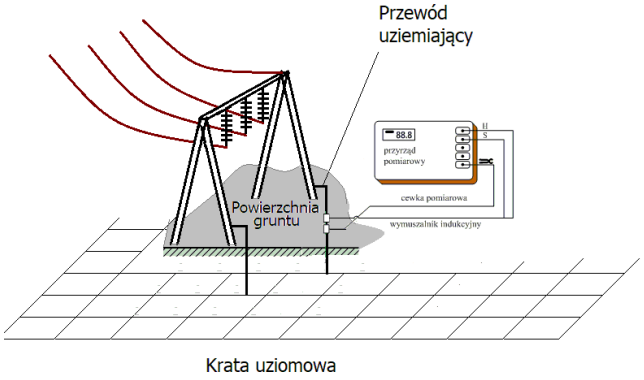
2. Pomiar impedancji układu uziemiającego – stanowisko lokalizuje się w centralnej studzience uziemiającego, w tym miejscu przykładając również punkt wymuszenia prądu.
3. Pomiar ciągłości przewodów uziemiających – lokalizacja stanowisk jest oczywista, natomiast istotne jest użycie odpowiedniej metody pomiarowej. Protokół pomiarowy oraz wytyczne zawarte w dokumencie „Zasady ochrony przed porażeniem w stacjach i liniach WN i NN" zalecają użycie metod małoprądowych (dedykowanych przyrządów) do tego pomiaru. Przewidywane są metody:

- Pomiar rezystancji z wykorzystaniem indukcyjnego pomiaru prądu (metoda „jednocęgowa")
- Pomiar rezystancji z wykorzystaniem indukcyjnego wymuszenia i indukcyjnego pomiaru prądu (metoda „dwucęgowa")
- Odkopanie przewodu uziemiającego i oględziny
- Inne metody pomiarowe (np. pomiar rezystancji pomiędzy przewodem uziemiającym, a innym przewodem uziemiającym metodą „2p" po uwzględnieniu warunków braku metalicznych pętli)

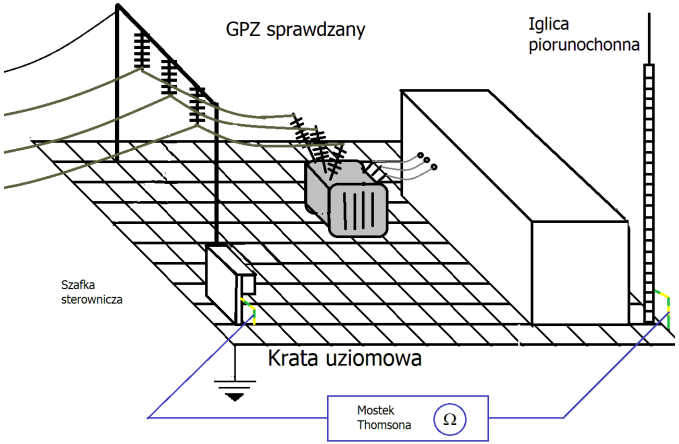




Metoda jednocęgowa, pomiar ciągłości „w dół" i „w górę"



Metoda „dwucęgowa”, jednoczesny pomiar ciągłości „w gorę i w dół”. Pomiar daje fałszywy wynik, jeśli nie istnieje pętla metaliczna łącząca dwa przewody uziemiające



Metoda „2p”, używana przy sprawdzaniu ciągłości kraty uziomowej, może być użyta do sprawdzania ciągłości przewodów uziemiających pod pewnymi warunkami (np. brak metalicznej pętli przewodów uziemiających na sprawdzanym elemencie)

4. Sprawdzanie spójności kraty uziomowej – lokalizacja stanowiska zależy od rozmiarów, kształtu kraty i rozmieszczenia głównych elementow

Praktyczna realizacja pomiarów – uzyskane wyniki pomiarowe i ich interpretacja

1. Pomiar napięć dotykowych

Możliwe są dwie metody pomiaru napięcia dotykowego rażeniowego:

- Pomiar bezpośredni; wymaga włączenia opornika symulującego rezystancję ciała człowieka równolegle z woltomierzem oraz użycia elektrody płaskiej, modelującej zestyk stopy człowieka z ziemią. Surowy wynik pomiaru przelicza się wg wzoru:

$$U_T = k_Z \cdot U_{TM} \cdot I_E / I_{EM},$$

k_Z – współczynnik, uwzględniający sezonowe zmiany rezystywności gruntu, współczynnik ten stosuje się w przypadku przeprowadzania pomiarów bez rozłączania złącz kontrolnych uziemień (pomiary eksploatacyjne).

U_{TM} – zmierzone napięcie dotykowe rażeniowe

I_E – rzeczywisty (czyli płynący przy rzeczywistym doziemieniu) prąd uziomowy,

I_{EM} – probierczy (czyli płynący podczas pomiaru) prąd uziomowy (w razie wykorzystania jako przewodu pomiarowego łączącego sondę prądową z układem pomiarowym linii WN należy uwzględnić jej współczynnik redukcyjny przy wyznaczaniu prądu I_{EM}).

Tak wyliczone napięcie porównuje się z napięciem kryterialnym U_{Tp}

- Pomiar pośredni; mierzy się napięcie dotykowe spodziewane U_{STM}. Surowy wynik pomiaru przelicza się wg wzoru:

$$U_{TM} = U_{STM}/(1 + R_a/Z_{B50\%}) = U_{STM}/(1+\frac{R_a}{U_{Tp}/I_{B5\%}}),$$

Przy czym:
U_{STM} –zmierzone napięcie dotykowe spodziewane, U_{TM} –obliczone napięcie dotykowe rażeniowe, Wartość $U_{Tp}/I_{B5\%}$ można odczytać z tabeli w opracowaniu, natomiast R_a zależy od stanowiska, na którym dokonuje się pomiaru i przyjmuje wartości od 0 (stanowisko gdzie mogą znaleźć się ludzie bez obuwia) do 7000ohm (stanowisko pokryte asfaltem przy słupie WN)

Uwaga. Metoda pośrednia odnosi się do pomiarów przy obiektach liniowych.

Dopiero tak uzyskany wynik U_{TM} przelicza się na wartości rzeczywiste wg wzoru:

$$U_T = k_Z \cdot U_{TM} \cdot I_E / I_{EM},$$

i porównuje się z wielkością kryterialną.
Istotne jest uwzględnienie współczynnika k_R lub k_Z

Współczynniki przeliczeniowe k_R

Rodzaj uziomu	Rozmiar uziomu	Rezystywność gruntu ($\Omega \cdot m$)	Współczynnik k_R grunt w czasie pomiarów		
			suchy [1]	wilgotny [2]	mokry [3]
Uziom poziomy 0,6 ÷ 1 m [4]	$l < 30$ m	dowolna	1,4	2,2	3,0
Uziom poziomy > 1 m [5]	$l < 30$ m	dowolna	rys. Z1.17 i Z1.18		
Uziom kratowy	$S_E < 900$ m^2	$\rho \leq 200$	1,3	1,8	2,4
		$\rho > 200$	1,4	2,2	3,0
	$S_E \geq 900$ m^2	$\rho \leq 200$	1,1	1,3	1,4
		$\rho > 200$	1,2	1,6	2,0
Uziom pionowy	$l = 2,5 \div 5$ 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 zaliczanym 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.
[5] Głębokość ułożenia uziomu głębiej niż 1 m.

Współczynniki przeliczeniowe k_z

Rodzaj uziomu	Rozmiar uziomu	Rezystywność gruntu (Ω·m)	Współczynnik k_Z grunt w czasie pomiarów		
			suchy [1]	wilgotny [2]	mokry [3]
Uziom poziomy 0,6 ÷ 1 m [4]	$l < 30$ m	dowolna	1,15	1,40	1,60
Uziom kratowy	$S_E < 900$ m^2	$\rho \leq 200$	1,10	1,25	1,45
		$\rho > 200$	1,15	1,40	1,60
	$S_E \geq 900$ m^2	$\rho \leq 200$	1,00	1,10	1,15
		$\rho > 200$	1,05	1,20	1,35
Uziom pionowy	$l = 2{,}5 \div 5$ m	dowolna	1,05	1,20	1,35
	$l > 5$ m	dowolna	1,00	1,05	1,10

[1] W okresie od czerwca do września włącznie, z wyjątkiem trzydniowych okresów po długotrwałych opadach. Dotyczy to również sytuacji w każdym miesiącu, jeśli wilgotność podłoża wokół uziomu jest stała w ciągu całego roku i niezależna od pogody, np. dla uziomów w sąsiedztwie cieków wodnych o trwałym przepływie (nie wysychających), na bagnach itp.

[2] Poza okresem zaliczanym 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.

Napięcia dotykowe należy również zmierzyć poza obiektem stacyjnym (np. na ogrodzeniach innych obiektów w sąsiedztwie stacji), jeżeli istnieje ryzyko wynoszenia potencjału poza ten obiekt. Ocenę takiego ryzyka można oszacować, obliczając wg wzoru odległość „bezpieczną” od obiektu:

$$d_{\text{accept}} = \sqrt{\frac{S_E}{\pi}}\left(\frac{1}{\sin(\pi U_{\text{accept}} / 2U_E)} - 1\right)$$

Przy czym U_{accept} - dopuszczalne napięcie dotykowe w urządzeniach narażonych na wynoszenie potencjału (np. U_{Tp} lub U_F),

Niestety, do szacowania tej odległości potrzebna jest znajomość napięcia uziomowego w warunkach eksploatacyjnych, więc wymagany jest dodatkowy pomiar.

2. Pomiar impedancji uziemienia

Pomiar wykonuje się wielkoprądową metodą „3p" a uzyskany wynik częściej jest w postaci napięcia uziomowego pomiarowego U_{EM}, niż w postaci impedancji lub rezystancji. Napięcie to należy przeliczyć na warunki rzeczywiste, lub korzystając z tego napięcia, obliczyć R lub Z, przy czym obliczanie napięć jest bardziej praktyczne ze względu na warunki kryterialne.
Uzyskany wynik należy przeliczyć wg wzoru:

$$U_E = k_R U_{EM} \frac{I_E}{I_{EM}}$$

-jeśli wykonywane są badania odbiorcze (rozpięte złącza kontrolne, uziom „odizolowany" od innych układów uziemiających w sieci

$$U_E = k_Z U_{EM} \frac{I_E}{I_{EM}}$$

-jeśli wykonywane są badania eksploatacyjne (uziom połączony z innymi układami uziemiającymi w sieci poprzez np. linki odgromowe)

k_R – współczynnik korekcyjny przy badaniach z wydzielaniem uziomu na czas badania
k_Z – współczynnik korekcyjny przy badaniach eksploatacyjnych bez rozpinania układu uziemiającego
I_E – rzeczywisty prąd uziomowy,
I_{EM} – pomiarowy prąd uziomowy,
U_{EM} – napięcie uziomowe odczytane podczas pomiaru

3. Pomiar ciągłości przewodów uziemiających

Pomiar wykonuje się metodami małoprądowymi (pomiar rezystancji) lub poprzez oględziny.

Wyników pomiarów rezystancji nie przelicza się przez żadne współczynniki, ale pamiętać należy, że:

- W przypadku użycia metody jednocęgowej warunkiem uznania, że przewód uziemiający jest ciągły, jest uzyskanie wartości rezystancji poniżej 10 Ω (umownie)
- W przypadku użycia metody dwucęgowej wykorzystującej metaliczne pętle tworzone przez przewody uziemiające, ciągłość potwierdza się, jeśli wartość uzyskanej rezystancji jest mniejsza od ułamków Ω; w tym przypadku brak metalicznej pętli powoduje fałszywe stwierdzenie nieciągłości
- W przypadku użycia metody „2p” ciągłość zostaje potwierdzona przy uzyskanych wartościach rezystancji podobnie jak w metodzie dwucegowej, jednak w tym przypadku metaliczna pętla, zwłaszcza tworzona przez części przewodzące nie pogrążone w ziemi (bocznikująca miernik) może dawać wynik pomiaru fałszywie pozytywny.

4. Sprawdzenie spójności kraty uziomowej wykonuje się metodą „2p” z zastrzeżeniami jak do sprawdzenia ciągłości przewodów uziemiających metodą „2p”.

5. Dodatkowym, praktycznym pomiarem w stacjach WN/SN jest sprawdzenie skuteczności ochrony przed porażeniem w instalacji potrzeb własnych. Pomiar ten był omawiany na szkoleniu związanym z tematyką pomiarów na stacjach SN/nn i nie jest przedmiotem obecnego szkolenia.

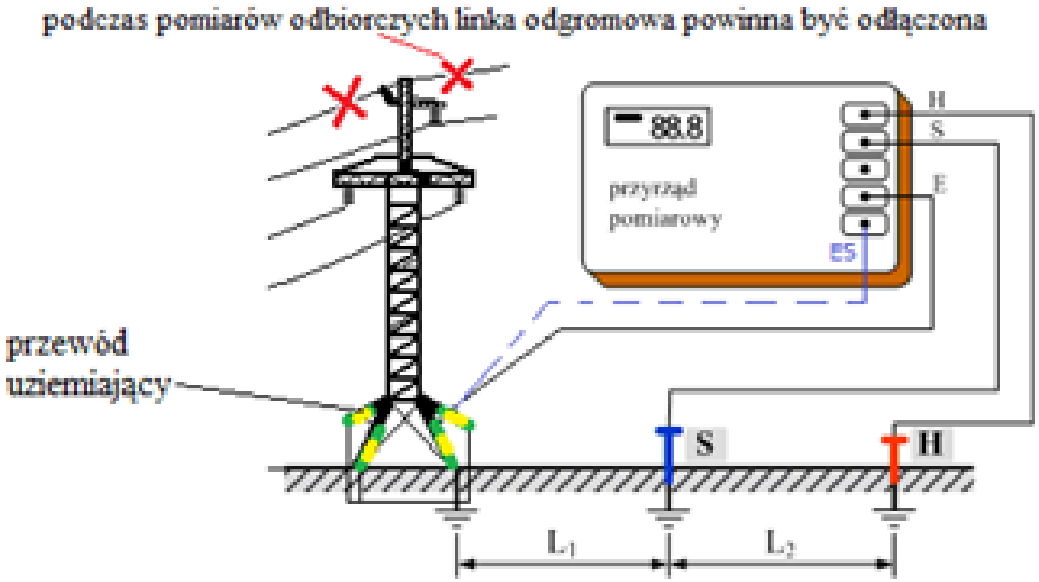
Wybrane zagadnienia pomiarów ochrony przed porażeniem w obiektach liniowych wysokiego napięcia (słupy WN i NN)

„Małoprądowe” i „wielkoprądowe” metody pomiarowe przydatne przy badaniach ochrony przed porażeniem przy słupach WN i NN:

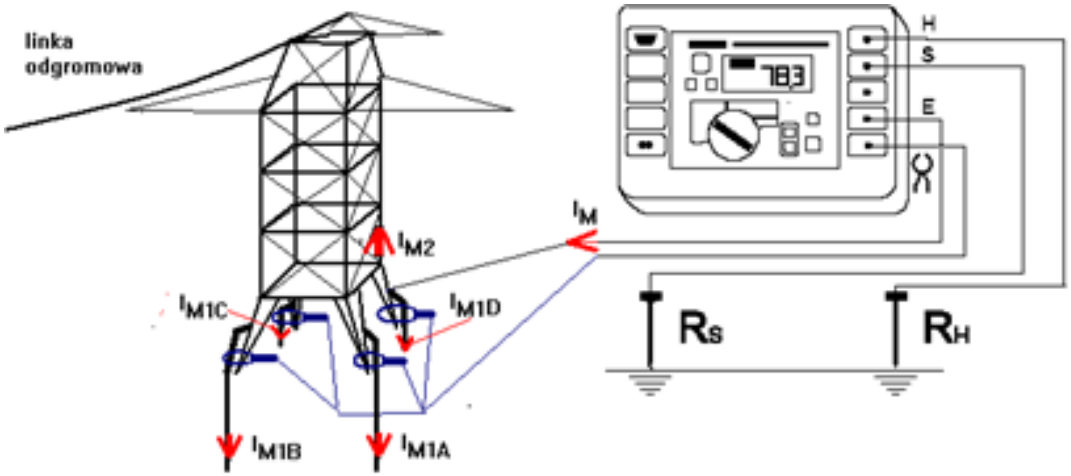
Większość metod została omówiona przy okazji omawiania badań ochrony przed porażeniem w obiektach stacyjnych. W tym miejscu zostaną omówione praktyczne różnice w zastosowaniu metod i niektóre dodatkowe metody, które nie miały zastosowania w obiektach stacyjnych WN i NN.

Podstawową różnicą w badanych obiektach w stosunku do stacji WN/NN jest wielkość uziomu sprawdzanego obiektu. W odróżnieniu od stacji przy słupach uziomy są kilkunastokrotnie mniejsze, co rozszerza możliwości wykorzystania metod małoprądowych przy badaniach.
Jednakże wciąż podstawowym wykorzystaniem metod małoprądowych pomiaru rezystancji jest kontrola ciągłości przewodów uziemiających, zaś metod wielkoprądowych – sprawdzenie wypadkowej impedancji uziemienia (rzadko) lub pomiar napięć dotykowych (często).
Wyjątkiem są pomiary odbiorcze, w których rezystancja pojedynczego uziomu słupa może być sprawdzona zarówno metodą wielkoprądową, jak i małoprądową.

„Małoprądowe” metody pomiaru rezystancji uziemienia przy słupach WN i NN:
1. Metoda „3p” pomiaru rezystancji – w wersji małoprądowej przydatna jedynie do pomiaru odbiorczego potwierdzającego zgodność parametrów uziomu słupa z projektem:

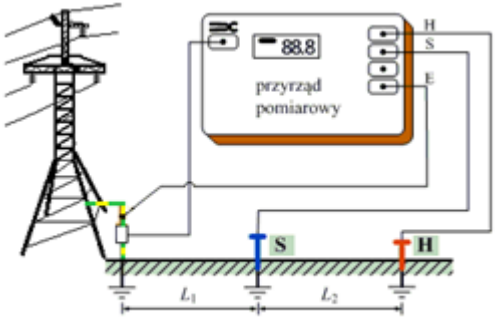


Alternatywną metodą pomiaru rezystancji uziomu słupa jest metoda „wielocęgowa” z sumatorem prądów. Nie wymaga ona odłączania linek odgromowych od konstrukcji wsporczej:

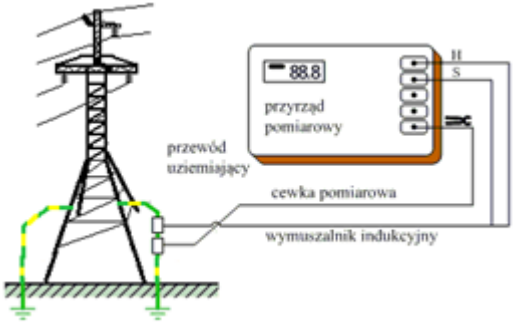


2. Pozostałe metody „małoprądowe” pomiaru rezystancji („jednocęgowa” i „dwucęgowa” mają identyczne zastosowanie jak w przypadku stacji WN/SN.

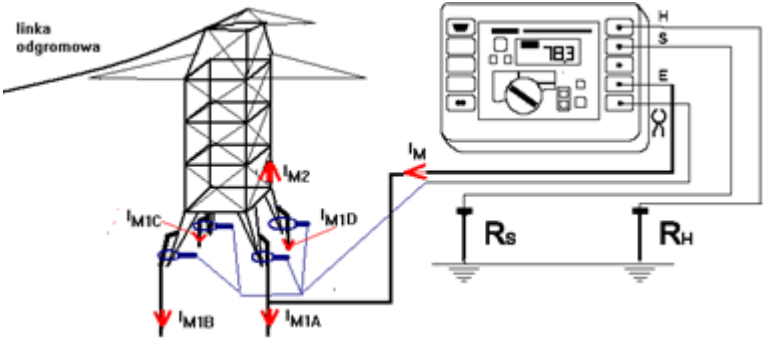
Przykłady użycia metod „małoprądowych” do kontroli ciągłości przewodów uziemiających i kontroli pewności połączenia linki odgromowej z konstrukcją słupa



Metoda jednocęgowa

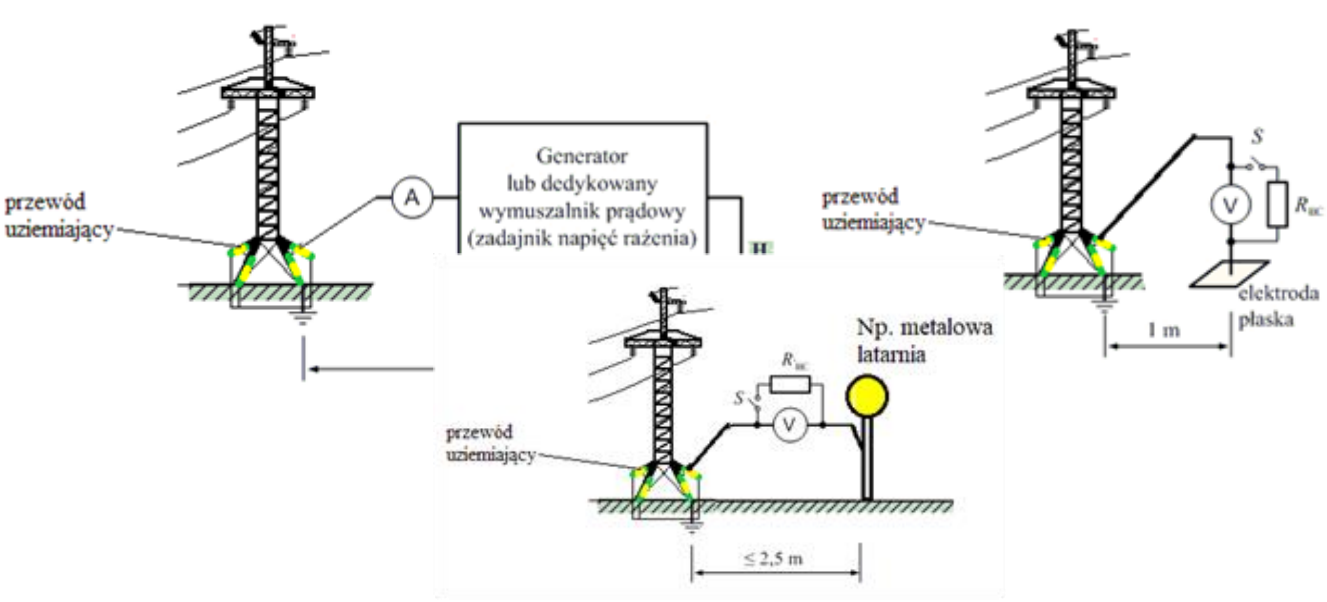


Metoda dwucęgowa



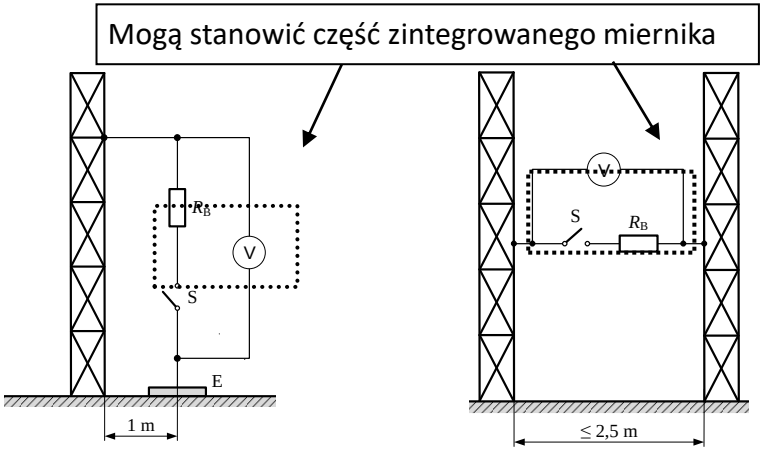
Metoda wielocęgowa – kontrola połączenia słupa z linką odgromową

3. Metoda „wielkoprądowa” pomiaru rezystancji uziemienia („3p”) ma zastosowanie do pomiaru wypadkowej impedancji uziemienia lub napięcia uziomowego (małe znaczenie praktyczne ze względu na przewidywalny wynik – kryterium skuteczności ochrony przed porażeniem na podstawie znajomości wartości impedancji uziemienia lub napięcia uziomowego przy słupach WN rzadko kiedy jest spełnione). Obwód wymuszenia może być ponadto użyty przy pomiarze napięć dotykowych przy słupie (duże znaczenie – napięcia dotykowe mierzy się praktycznie zawsze).
Przy pomiarze napięć dotykowych często wykorzystywany jest wymuszalnik w postaci agregatu prądotwórczego oraz przewód pomiarowy prądowy rozwijany ze szpuli (małe wymiary uziomu – niewielkie odległości, moc wymuszalnika relatywnie mniejsza niż przy stacjach WN/NN)



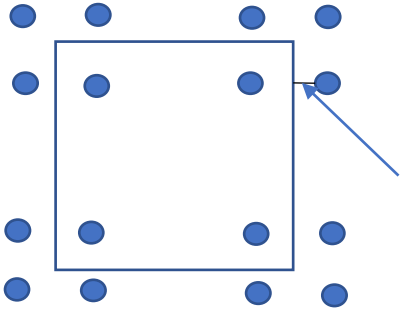
Praktyczna realizacja pomiarów – zasady lokalizacji stanowisk pomiarowych

1. Pomiar napięć dotykowych



obwód stosowany w przypadku odosobnionej, uziemionej części przewodzącej dostępnej;

obwód dodatkowy, stosowany gdy w pobliżu badanej części przewodzącej dostępnej znajduje się część przewodząca obca, na którą może wydostać się potencjał



Przykładowa lokalizacja stanowisk pomiaru napięć dotykowych przy słupie W/n (widok z góry)

Praktyczna realizacja pomiarów – zasady lokalizacji stanowisk pomiarowych

2. Pomiar ciągłości przewodów uziemiających – stanowiskiem pomiarowym jest każdy przewód uziemiający. Ze względu na konfigurację uziomu (przeważnie otok z dodatkowymi elementami pionowymi) słupa WN i istnienie metalicznych pętli, najszybciej wynik pomiaru ciągłości uzyska się stosując metodę dwucęgową
3. Pomiar kontrolny połączenia słupa z linką odgromową może być przeprowadzony tylko metodą wielocęgową lub za pośrednictwem oględzin.
4. Pomiar impedancji uziemienia słupa (jeśli konieczny) może być dokonany przy przyłączeniu wymuszenia prądowego i miernika napięcia (ew. dedykowanego przyrządu) do dowolnego przewodu uziemiającego słupa.

Praktyczna realizacja pomiarów – interpretacja i przeliczenia wyników pomiarowych

1. Pomiar napięć dotykowych. Konieczne są przeliczenia:

$$U_{TM} = U_{STM}/(1 + R_a/Z_{B50\%}) = U_{STM}/(1+\frac{R_a}{U_{Tp}/I_{B5\%}}),$$

Przy czym:
U_{STM} –zmierzone napięcie dotykowe spodziewane, U_{TM} –obliczone napięcie dotykowe rażeniowe,
Wartość $U_{Tp}/I_{B5\%}$ można odczytac z tabeli w dokumencie, natomiast R_a zalezy od stanowiska, na którym dokonuje sie pomiaru i przyjmuje wartosci od 0 (stanowisko gdzie moga znalezc się ludzie bez obuwia) do 7000ohm (stanowisko pokryte asfaltem przy slupie WN)
Można też mierzyć bezpośrednio U_{TM}
Dopiero tak uzyskany wynik U_{TM} przelicza się na wartości rzeczywiste wg wzoru:

$$U_T = k_Z \cdot U_{TM} \cdot I_E / I_{EM},$$

2. Pomiar ciągłości przewodów uziemiających – nie są wymagane żadne przeliczenia, ale należy zwrócić uwagę na dobór metody i obecność metalicznych pętli determinujących warunki kryterialne do oceny ciągłości
3. Pomiar impedancji uziemienia słupa (jeśli konieczny). Wymagane są przeliczenia:

$$U_E = k_R U_{EM} \frac{I_E}{I_{EM}}$$

-jeśli wykonywane są badania odbiorcze (rozpięte złącza kontrolne, uziom „odizolowany” od innych układów uziemiających w sieci i od linki odgromowej)

$$U_E = k_Z U_{EM} \frac{I_E}{I_{EM}}$$

-jeśli wykonywane są badania eksploatacyjne (uziom połączony z innymi układami uziemiającymi w sieci poprzez np. linki odgromowe)

k_R – współczynnik korekcyjny przy badaniach z wydzielaniem uziomu na czas badania
k_Z – współczynnik korekcyjny przy badaniach eksploatacyjnych bez rozpinania układu uziemiającego
I_E – rzeczywisty prąd uziomowy,
I_{EM} – pomiarowy prąd uziomowy,
U_{EM} – napięcie uziomowe odczytane podczas pomiaru

Protokoły pomiarowe sporządzane są dla linii (wszystkie słupy w jednym protokole)

Wybrane zagadnienia dotyczące pomiarów skuteczności ochrony przed porażeniem w obiektach liniowych SN

a) Możliwe do wykorzystania przyrządy pomiarowe i ograniczenia ich stosowania

Jakie wielkości decydują o spełnieniu warunków kryterialnych dotyczących skuteczności ochrony przed porażeniem przy słupach SN?

- Rezystancja uziemienia (brana pod uwagę częściej niż napięcie uziomowe)
- Wielkość opisująca ciągłość bądź utratę ciągłości przewodu uziemiającego (najczęściej również rezystancja)
- Napięcie dotykowe spodziewane lub rażeniowe
- Dodatkowo (szczególnie przy projektowaniu układów uziemiających) – rezystywność gruntu

Jaka jest przy tego typu pomiarach wymagana wielkość prądu pomiarowego?

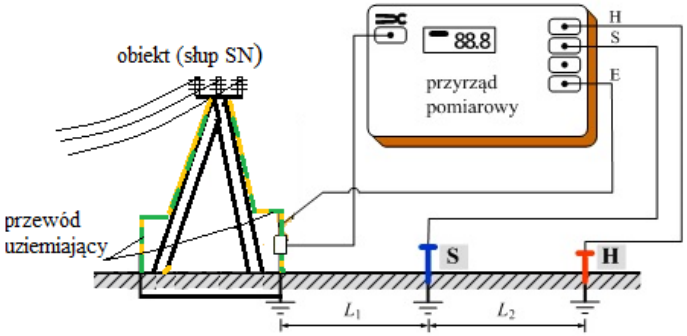
Zależy ona od rozmiarów uziomu i spodziewanych (przewidywalnych) wyników pomiaru:

- Spodziewane rezystancje uziomów są rzędu kilku Ω, do pomiarów takich rezystancji nie potrzeba wielkiego prądu pomiarowego;
- Spodziewane napięcia dotykowe podczas pomiaru, zwłaszcza przy uziomach sterujących potencjałem, nie są duże, zatem im większy prąd pomiarowy tym dokładność pomiaru większa.
- Rezystancje służące do oceny ciągłości przewodu uziemiającego, zależą od metody pomiarowej i mogą przyjmować wartości od kilkunastu mΩ do kilkudziesięciu Ω, przy czym wartości rzędu mΩ dotyczą pomiarów w metalicznych pętlach, zatem wymagane prądy pomiarowe nie są duże.

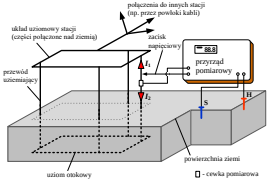
WNIOSEK. Przyrządy wykorzystujące małoprądowe metody pomiarowe w większości przypadków pomiarów przy słupach SN są wystarczające. Wyjątkiem są pomiary napięć dotykowych

Przyrządy wykorzystujące metody małoprądowe:

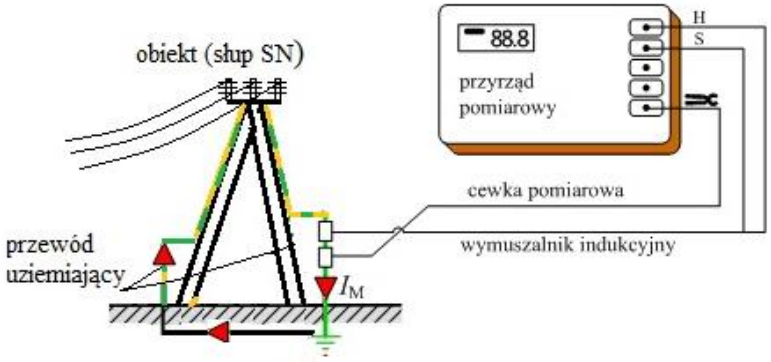
b) Mierniki rezystancji uziemień wykorzystujące metody cęgowe pomiaru rezystancji:



Miernik z wykorzystaniem indukcyjnego pomiaru prądu (wykorzystujący metodę „jednocęgową”)

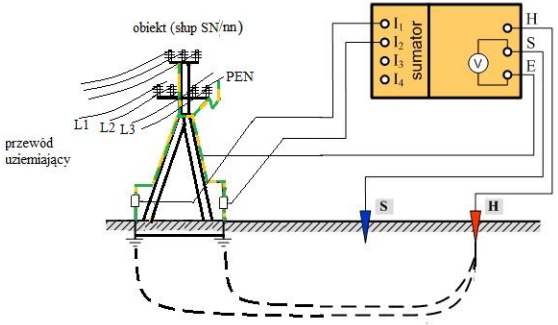


Miernik z wykorzystaniem indukcyjnego pomiaru prądu i indukcyjnym wymuszeniem (metoda „dwucęgowa”)



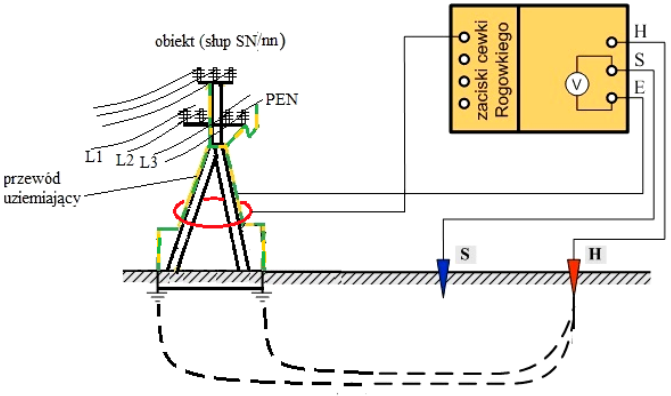
Przyrządy wykorzystujące metody małoprądowe cd:

b) Mierniki rezystancji uziemień wykorzystujące metody cęgowe pomiaru rezystancji cd:



Miernik z wykorzystaniem sumatora geometrycznego prądu (wykorzystujący metodę „wielocęgową”)

Miernik z cewką Rogowskiego



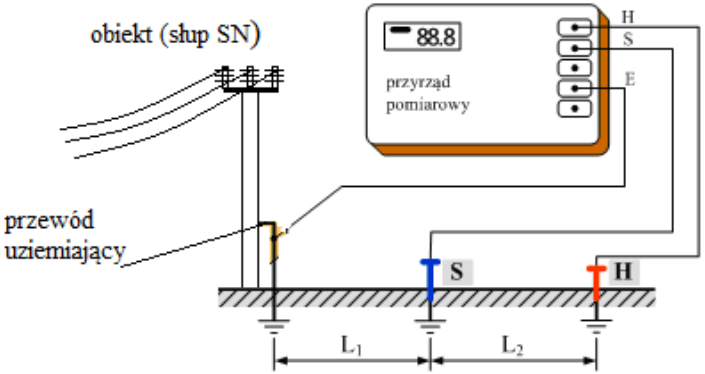
Klasyfikacja i omówienie ogólne **metod pomiarowych** przydatnych przy pomiarach w obiektach liniowych SN, w zależności od typu obiektu (słup zwykły/wielokrotny/dwunapięciowy)

1. Pomiar rezystancji uziemienia metodą „3p” lub „4p” (czysta metoda techniczna, dedykowany przyrząd lub przyrząd wykorzystujący metodę kompensacyjną)

a) kiedy jest potrzebny?

- do oceny skuteczności ochrony przed porażeniem w prostych przypadkach – słup SN pojedynczy, jednonapięciowy lub dwunapięciowy , grunt o korzystnej wartości rezystywności

b) jak wykonać pomiar?



c) jakich utrudnień się spodziewać?

- trudność wyznaczenia strefy zerowego potencjału

- brak miejsca na odpowiednie rozstawienie elektrod pomiarowych

- trudność wymuszenia odpowiedniego prądu pomiarowego

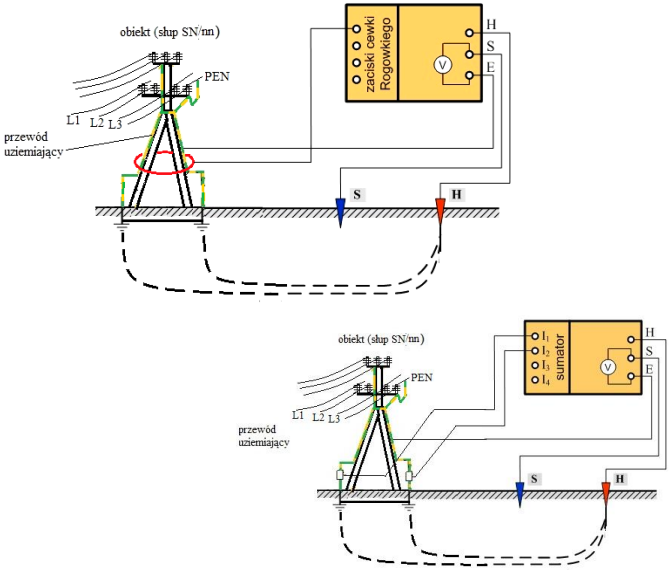
- wynik odbiegający od spodziewanego, kwalifikujący stanowisko do przeprowadzenia dodatkowych pomiarów

2. Pomiar rezystancji uziemienia metodą „wielocęgową” lub z wykorzystaniem cewki Rogowskiego (dedykowany przyrząd lub przyrząd umożliwiający realizację metody)

a) kiedy jest potrzebny?

- do oceny skuteczności ochrony przed porażeniem w przypadkach, kiedy metoda „3p” może nie dawać pożądanego wyniku – słup SN pojedynczy lub wielokrotny z możliwością rozpływu prądu pomiarowego na inne obiekty, np. do stacji SN/nn poprzez ekran kabla rozpoczynającego się na tym słupie, poprzez PEN linii dwunapięciowej itp.

b) jak wykonać pomiar?



c) jakich utrudnień się spodziewać?

- trudność wyznaczenia strefy zerowego potencjału (jak w „3p”)

- brak miejsca na odpowiednie rozstawienie elektrod pomiarowych

- trudność wymuszenia odpowiedniego prądu pomiarowego

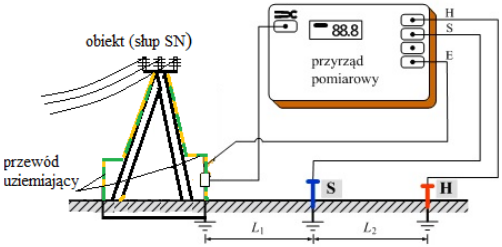
- błąd pomiarowy przekraczający dopuszczalną wartość

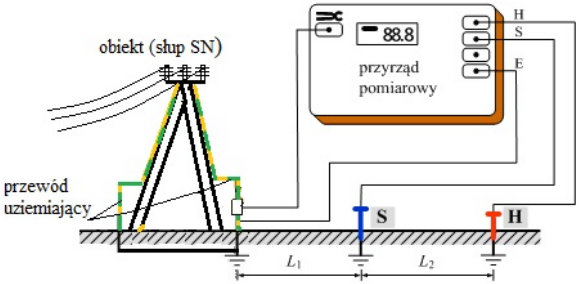
3. Pomiar „rezystancji” części uziomów lub metalicznych pętli z wykorzystaniem różnych metod cęgowych

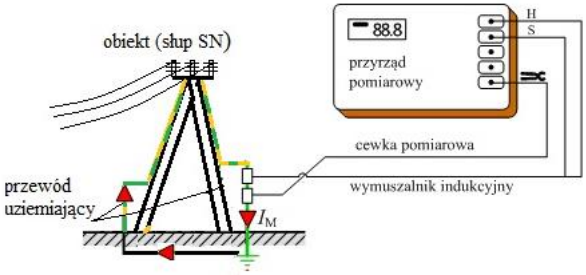
a) kiedy jest potrzebny?

- do oceny ciągłości przewodów uziemiających w różnych konfiguracjach słupów linii jedno- i dwunapięciowych

b) jak wykonać pomiar?







c) jakich utrudnień się spodziewać?

- błędy pomiarowe zwłaszcza przy liniach dwunapięciowych

- brak możliwości pomiaru ciągłości „w górę” przy najprostszych słupach pojedynczych

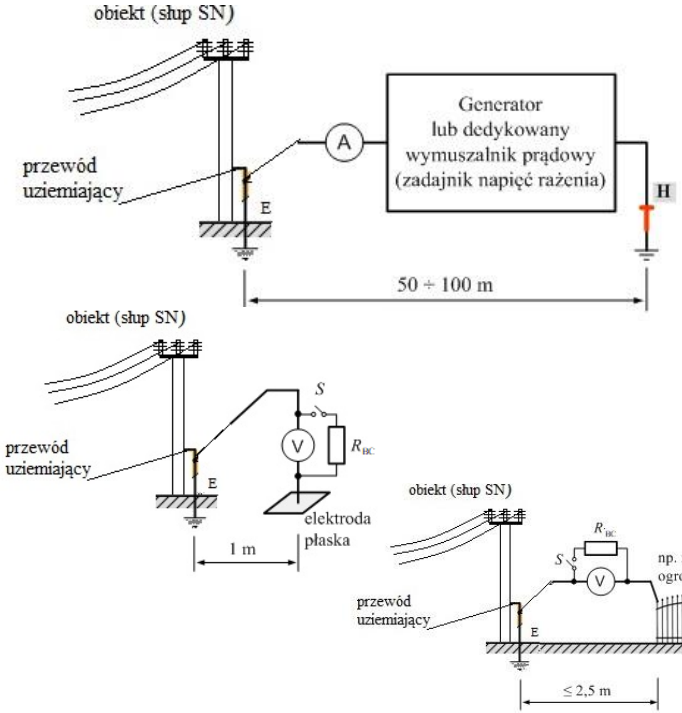
- możliwość fałszywej interpretacji wyniku przy słupach wielokrotnych, posiadających osobne uziomy dla każdej żerdzi

4. Pomiar napięć dotykowych

a) kiedy jest potrzebny?

- do oceny skuteczności ochrony przed porażeniem przy słupach, przy których pomiar rezystancji uziemienia jest niewystarczający

b) jak wykonać pomiar?

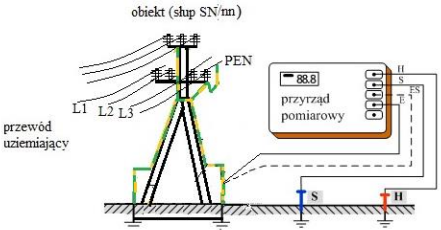


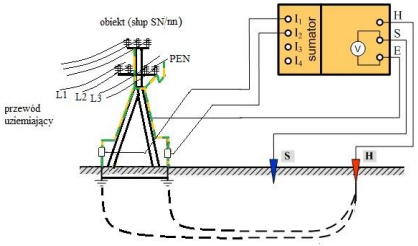
c) jakich utrudnień się spodziewać?

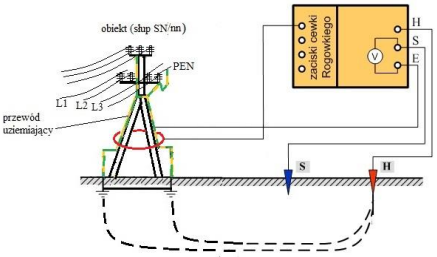
- trudności w wymuszeniu odpowiedniego prądu pomiarowego

- brak możliwości zastosowania metody na niektórych słupach dwunapięciowych SN/nn z uwagi na warunek wynoszenia potencjału

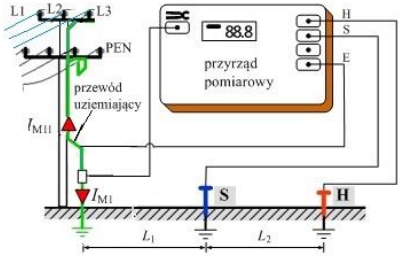
Modyfikacje metod pomiarowych w odniesieniu do słupów dwunapięciowych SN/nn o wspólnym uziemieniu:

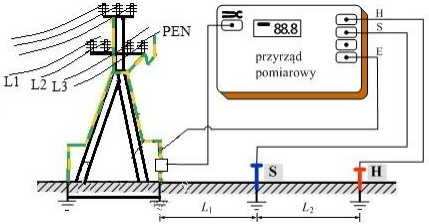


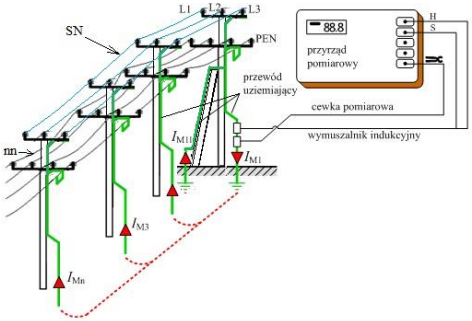




Pomiar rezystancji uziemienia: muszą być wykorzystane 2 różne metody pomiarowe, w tym obowiązkowo „3p”







Pomiar ciągłości przewodów uziemiających: w przypadku słupów dwunapięciowych o wspólnym uziemieniu pomiar ciągłości w stronę ziemi i w stronę przewodu PEN zawsze jest możliwy; trudność występuje tylko przy sprawdzaniu, czy przewód uziemiający jest pewnie zamocowany do części przewodzących dostępnych linii SN (np. do poprzecznika słupa)

Wybrane zagadnienia dotyczące pomiarów skuteczności ochrony przed porażeniem w obiektach liniowych SN

Interpretacja wyników pomiarowych, przeliczenia i ocena skuteczności ochrony przed porażeniem:

Wzory przeliczeniowe i wartości kryterialne:

- rezystancja uziemienia:

$R_E = R_{EM} \cdot k_R$ alternatywnie napięcie uziomowe- rzadko stosowane przy słupach SN $U_E = k_R U_{EM} \frac{I_E}{I_{EM}}$

warunki kryterialne: $U_E \leq 2 \cdot U_D$ w specjalnych warunkach: $U_E \leq 4 \cdot U_{Tp}$

- ciągłość przewodów uziemiających:
uzyskany wynik pomiaru porównywany jest z umownymi wartościami kryterialnymi, zaleca się jako kryterium przyjmować R<=30Ω, przy niektórych sprawdzeniach ciągłość uznaje się na podstawie oględzin
- napięcia dotykowe wymagają przeliczenia (i porównania z wartością kryterialną $U_{D1}(t)$):

$$U_T = k_R \cdot U_{TM} \cdot I_E / I_{EM}$$

- w przypadku linii dwunapięciowych SN/nn sprawdza się dodatkowe warunki (wynoszenie potencjału):

$$R_B \leq \frac{U_F}{r \cdot I_F} = \frac{U_F}{I_E}$$

$$R_B \leq 2{,}78\Omega$$

Dziękuję za uwagę!