

OCENA STANU INSTALACJI UZIEMIĄCEJ W STACJACH ELEKTROENERGETYCZNYCH WYSOKIEGO NAPIĘCIA

Streszczenie

W artykule przedstawiono wymagania stawiane instalacji uziemiającej w stacjach elektroenergetycznych przez normy i przepisy aktualne, a także przez przepisy, które obowiązywały w latach poprzednich i mogą nadal dotyczyć istniejących, niemodernizowanych stacji. Zwrócono również uwagę na dwie normy dotyczące projektowania oraz sprawdzania stanu instalacji uziemiających w urządzeniach wysokiego napięcia, które pojawiły się w zbiorze Polskich Norm w kwietniu 2011 roku. Zaprezentowano zasady oceny instalacji uziemiającej w stacjach z punktu widzenia ochrony przeciwporażeniowej, odgromowej i przeciwprzepięciowej. Omówiono pomiary rezystancji uziemienia oraz pomiary napięć dotykowych.

1. WSTĘP

Instalacja uziemiająca w stacjach wysokiego napięcia ma za zadanie odprowadzać do ziemi prądy zwarciove i prądy piorunowe oraz eliminować niedopuszczalne zakłócenia elektromagnetyczne. Instalacja uziemiająca:

- powinna charakteryzować się odpowiednią wytrzymałością mechaniczną i odpornością na korozję,
- powinna charakteryzować się odpowiednią wytrzymałością termiczną na spodziewany prąd doziemny,
- nie powinna wpływać negatywnie na inne urządzenia,
- powinna ograniczać napięcia dotykowe podczas zwarć doziemnych.

Oceny stanu instalacji uziemiającej dokonuje się podczas sprawdzania odbiorczego i sprawdzania okresowego (eksploatacyjnego). Podczas sprawdzania odbiorczego, przy oddaniu obiektu do użytku oraz po każdorazowej modernizacji czy rozbudowie instalacji uziemiającej należy:

- dokonać oględzin przewodów uziemiających, połączeń przewodów uziemiających oraz w miarę możliwości uziomów (odbior częściowy),
- sprawdzić przekroje uziomów i przewodów uziemiających,
- sprawdzić ciągłość połączeń uziemiających,
- wykonać pomiar rezystancji uziemienia,
- wykonać pomiar napięć dotykowych spodziewanych i/lub napięć dotykowych rażeniowych.

Sprawdzanie okresowe, zgodnie z aktualnymi przepisami [25], powinno odbywać się nie rzadziej niż co 5 lat¹ i w praktyce obejmuje:

- oględziny, w tym głównie sprawdzenie stanu i stopnia skorodowania przewodów uziemiających,
- sprawdzenie ciągłości połączeń uziemiających,
- pomiar rezystancji uziemienia,
- pomiar napięć dotykowych.

¹ Zgodnie z art. 62.1 Prawa budowlanego:

„Obiekty budowlane powinny być w czasie ich użytkowania poddawane przez właściciela lub zarządcę kontroli:

1. okresowej, co najmniej raz w roku, polegającej na sprawdzeniu stanu technicznego:
 - 1) elementów budynku, budowli i instalacji narażonych na szkodliwe wpływy atmosferyczne i niszczące działania czynników występujących podczas użytkowania obiektu, (...)
 - 2) okresowej kontroli, co najmniej raz na 5 lat, polegającej na sprawdzeniu stanu technicznego i przydatności do użytkowania obiektu budowlanego, estetyki obiektu budowlanego oraz jego otoczenia; kontrolą tą powinno być objęte również badanie instalacji elektrycznej i piorunochronnej w zakresie stanu sprawności połączeń, osprzętu, zabezpieczeń i środków ochrony od porażeń, oporności izolacji przewodów oraz uziemień instalacji i aparatów,
 - 3) okresowej w zakresie, o którym mowa w pkt. 1, co najmniej dwa razy w roku, w terminach do 31 maja oraz do 30 listopada, w przypadku budynków o powierzchni zabudowy przekraczającej 2000 m² oraz innych obiektów budowlanych o powierzchni dachu przekraczającej 1000 m², (...)

Zaleca się odkopanie i oględziny miejsc wprowadzenia przewodu uziemiającego do ziemi i połączenia z uziomem [4]. Przy sprawdzaniu eksploatacyjnym bardzo ważne jest porównanie wyników z wynikami, które otrzymano przy poprzedniej kontroli. Różnice w wynikach mogą sugerować postępującą degradację instalacji uziemiającej.

Przystępując do sprawdzania instalacji uziemiającej należy się kierować wymaganiami przepisów obowiązujących w latach jej budowy, stosuje się tzw. zasadę ochrony zastanej [11]. Wymagania stawiane instalacji uziemiającej zmieniały się w kolejnych aktach normatywnych. Inne wymagania stawia się obiektom budowanym w latach 70. czy 80. [29], inne obiektom budowanym w latach 90. [22], natomiast instalacje budowane od roku 2002 powinny spełniać wymagania normy [13]². W niniejszym artykule przedstawiono zasady sprawdzania instalacji uziemiającej i wymagania jej stawiane przez przepisy i normy, które obowiązywały w latach minionych oraz wymagania aktualne. Zwrócono też uwagę na nowe normy: PN-EN 61936-1:2011 [17, 18] oraz PN-EN 50522:2011 [16] zastępujące normę PN-E-05115:2002 [13].

2. OCENA STANU PRZEWODÓW UZIEMIAJĄCYCH I UZIOMÓW

W nowo budowanych lub modernizowanych stacjach elektroenergetycznych należy sprawdzić poprawność zaprojektowania i wykonania przewodów uziemiających i uziomów. Z uwagi na to, że problem ten dotyczy nowych instalacji, podane zostaną wymagania stawiane przez normę [13].

Tabl. 1. Najmniejsze dopuszczalne wymiary uziomu ze względu na wytrzymałość mechaniczną i korozję [13]

Materiał		Typ uziomu	Minimalny wymiar				
			Wyrób			Pokrycie/powłoka	
			Średnica mm	Przekrój mm ²	Grubość mm	Grubość min. μm	Grubość średnia μm
Stal	O cynkowana ogniowo	Taśma ²⁾		90	3	63	70
		Profil (w tym płyta)		90	3	63	70
		Rura	25		2	47	55
		Pręt okrągły na uziom pionowy	16			63	70
		Pręt okrągły na uziom poziomy	10				50
	Z powłoką ołowianą ¹⁾	Drut okrągły na uziom poziomy	8			1000	
	Z powłoką miedzianą	Drut okrągły na uziom pionowy	15			2000	
Miedź	Goła	Drut okrągły na uziom pionowy	14,2			90	100
		Taśma		50	2		
		Drut okrągły na uziom poziomy		25 ³⁾			
		Linka	1,8 ⁴⁾	25			
	O cynkowana	Rura	20		2		
		Linka	1,8 ⁴⁾	25		1	5
	O cynkowana	Taśma ²⁾		50	2	20	40
	Z powłoką ołowianą ¹⁾	Linka	1,8 ⁴⁾	25		1000	
		Drut okrągły		25		1000	

1) Nieodpowiednie do bezpośredniego zatapiań w betonie
2) Taśma walcowana lub wycinana z zaokrąglonymi krawędziami
3) W warunkach szczególnych, gdy ryzyko korozji jest wyjątkowo niskie, może być zastosowany przekrój 16 mm²
4) Średnica pojedynczego drutu

Uziomy i przewody uziemiające powinny być odporne na korozję i uszkodzenia mechaniczne. Najmniejsze dopuszczalne przekroje przewodów uziemiających z tych względów są następujące:

- przewody miedziane 16 mm²,

² Do grudnia 1990 r. obowiązywały przepisy PBUE [29].

Od grudnia 1990 r. do końca 1994 r. obowiązywało Rozporządzenie Ministra Przemysłu [22].

Z dniem 01.01.1995, ze względu na wprowadzenie nowego prawa budowlanego, utraciło moc Rozporządzenie Ministra Przemysłu [22]. Nie wprowadzono w zamian żadnych przepisów. W praktyce kierowano się nadal tym rozporządzeniem, traktując podane tam wymagania jako zasady wiedzy technicznej. W 1997 Instytut Energetyki opublikował opracowanie [10], które również traktowane było jako zasady wiedzy technicznej.

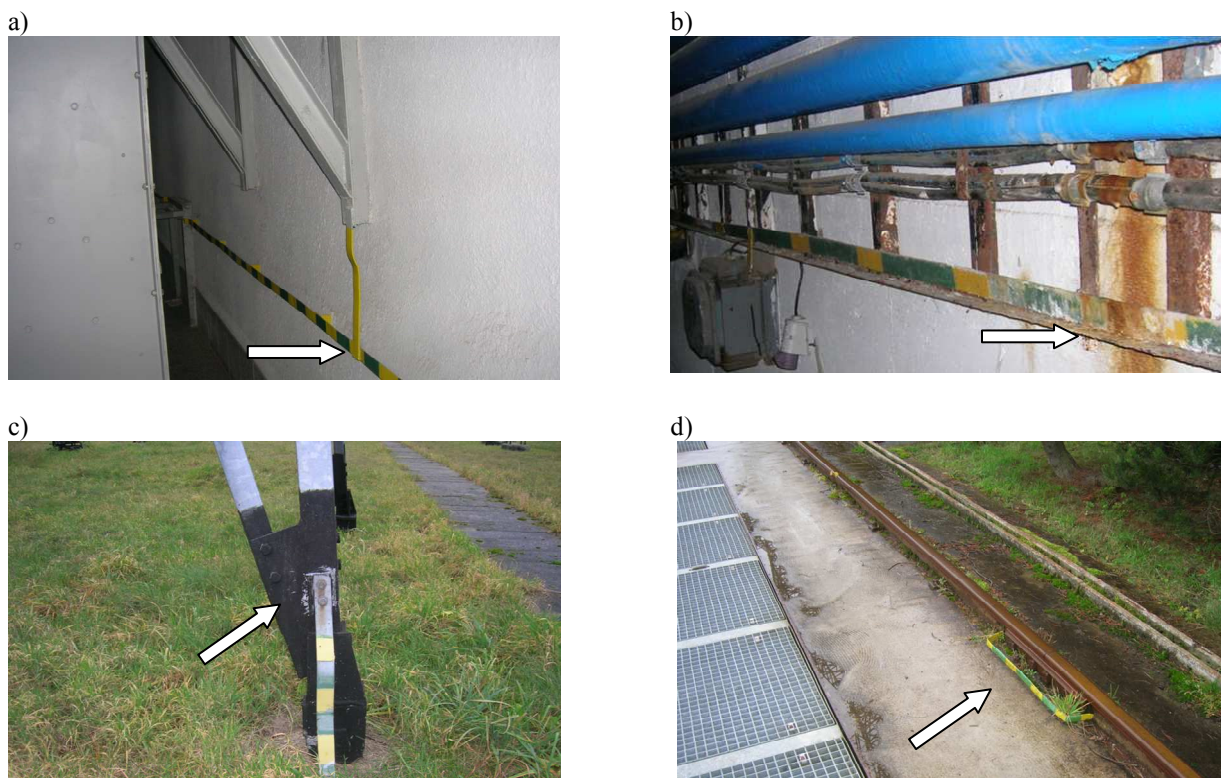
W sierpniu 2002 roku wprowadzono normę PN-E-05115:2002 [13], która jest przywołana w Rozporządzeniu Ministra Infrastruktury [21]. Należy spodziewać się, że w miejsce tej normy zostaną przywołane normy [16, 17], po opublikowaniu ich treści w języku polskim.

- przewody aluminiowe 35 mm² (raczej niestosowane),
- przewody stalowe 50 mm².

Dopuszcza się wykorzystywanie jako elementy instalacji uziemiającej stali zbrojeniowej umieszczonej w betonie, metalowych rurociągów oraz innych uziomów naturalnych. W tablicy 1 podano najmniejsze dopuszczalne wymiary uziomu ze względu na wytrzymałość mechaniczną i korozję.

Każde urządzenie elektroenergetyczne powinno być połączone z uziomem lub z głównym przewodem uziemiającym za pomocą oddzielnego przewodu. Podobnie, jak i dawniej, nie dopuszcza się szeregowego łączenia uziemianych urządzeń.

W ramach kontroli odbiorczych i okresowych sprawdzeniu podlegają połączenia przewodów uziemiających z urządzeniem wysokiego napięcia. Należy zweryfikować stan połączeń nierozłącznych oraz śrubowych, czy śruby nie są obluzowane i czy są odpowiednio zabezpieczone przed korozją, szczególnie w stacjach napowietrznych i innych miejscach, które niekorzystnie oddziałują na przewody uziemiające (rys. 1).



Rys. 1. Przykłady przewodów uziemiających i wyrównawczych: a) połączenie spawane w miejscu, które nie jest narażone na korozję, b) przewód uziemiający we wnętrzu w miejscu szczególnie narażonym na korozję, c) połączenie śrubowe konstrukcji wsporczej, d) przewód wyrównawczy w stacji napowietrznej – miejsca narażone na korozję

3. REZYSTANCJA UZIEMIENIA, NAPIĘCIA DOTYKOWE I NAPIĘCIA KROKOWE

3.1. Wymagania zawarte w PBUE [29]

Jednym z kryteriów oceny instalacji uziemiającej w obiektach wysokiego napięcia jest wartość rezystancji uziemienia. Celem sprawdzenia, czy rezystancja uziemienia nie przekracza wartości dopuszczalnej, wykonuje się pomiar rezystancji uziemienia. Pomiary rezystancji uziemienia opisano w punkcie 5 niniejszego artykułu.

Według przepisów PBUE [29] uziemienie powinno być tak wykonane, aby w miejscach, w których często mogą przebywać ludzie i występuje szczególne zagrożenie porażeniowe, nie były przekroczone dopuszczalne napięcia dotykowe rażeniowe i napięcia krokowe rażeniowe. Największa dopuszczalna wartość napięcia dotykowego rażeniowego U_T wynosi:

$$U_T = \frac{65}{\sqrt{t}} \text{ [V]} \quad \text{dla } t < 1 \text{ s} \quad (1)$$

$$U_T = 65 \text{ [V]} \quad \text{dla } t \geq 1 \text{ s} \quad (2)$$

gdzie

t – czas trwania napięcia rażeniowego.

Największa dopuszczalna wartość napięcia krokowego rażeniowego U_S wynosi:

$$U_S = \frac{125}{\sqrt{t}} \text{ [V]} \quad \text{dla } t < 1 \text{ s} \quad (3)$$

$$U_S = 125 \text{ [V]} \quad \text{dla } t \geq 1 \text{ s} \quad (4)$$

Do miejsc, w których często mogą przebywać ludzie należą:

- a) stanowiska, z których są wykonywane czynności łączeniowe,
- b) miejsca, w których przewiduje się wykonywanie czynności remontowych,
- c) przejścia na terenie stacji i rozdzielni,
- d) obszary ogólnie dostępne w pasie o szerokości 1,5 m na zewnątrz ogrodzeń,
- e) obszary dostępne w pobliżu torów kolejowych, rurociągów, kabli, instalacji elektrycznych i telekomunikacyjnych oraz innych przewodzących urządzeń, łączących się z terenem obiektów elektroenergetycznych,
- f) miejsca w pobliżu uziemień punktów neutralnych, transformatorów, generatorów, dławików gaszących,
- g) obszar na skraju uziomu.

Większe napięcia rażeniowe, ale nie przekraczające trzykrotnej wartości napięć podanych zależnościami (1), (2), (3) i (4) dopuszcza się w następujących miejscach:

- tereny stacji wewnątrz wydzielonych ogrodzonych obszarów,
- na całym terenie ogrodzonych stacji bez stałej obsługi, jeżeli poza terenem stacji nie są przekroczone napięcia rażeniowe podane zależnościami (1), (2), (3) i (4).

Oprócz spełnienia warunków dotyczących napięć rażeniowych, największa dopuszczalna wartość rezystancji uziemienia w stacji wysokiego napięcia jest uzależniona od tego, czy jest to układ o dużym³ czy małym prądzie zwarcia doziemnego. W układach o dużym prądzie zwarcia doziemnego rezystancja uziemienia w żadnej porze roku nie powinna przekraczać wartości:

- 4 Ω , jeżeli prąd uziomowy zawiera się w granicach 500÷2000 A,
- 2 Ω , jeżeli prąd uziomowy przekracza 2000 A.

Ponadto rezystancja uziemienia uziomów sztucznych, gdy prąd uziomowy przekracza 500 A, nie powinna być większa niż 5 Ω , niezależnie od rezystancji uziemienia wykorzystanych uziomów naturalnych. W układach o małym prądzie zwarcia doziemnego wartość rezystancji uziemienia w każdej porze roku nie powinna przekraczać 10 Ω .

Dodatkowo napięcie uziomowe:

- nie powinno przekraczać 80% napięcia probierczego izolacji urządzeń elektroenergetycznych, znajdujących się na terenie objętym przez uziom, których jedne części są połączone z uziomem, a inne części mają połączenia z urządzeniami znajdującymi się poza konturem uziomu,
- nie powinno spowodować zapłonu odgromników chroniących izolację urządzeń.

Przepisy [29] nie stawiają żadnych wymagań odnośnie do wartości prądu pomiarowego przy pomiarach rezystancji uziemienia. Nie jest również określana częstotliwość prądu pomiarowego.

Pomiar napięć rażeniowych zaleca się mierzyć w miejscach wymienionych powyżej w podpunktach od a) do g). Nie wymaga się pomiaru napięć rażeniowych w układach o małym prądzie zwarcia doziemnego, jeżeli jest spełniony jeden z następujących warunków:

- 1) rezystancja uziemienia nie przekracza wartości

³ Zgodnie z podziałem przyjętym w [29] duży prąd zwarcia doziemnego, to wartość równa 500 A lub większa, natomiast mały prąd zwarcia doziemnego, to wartość mniejsza niż 500 A.

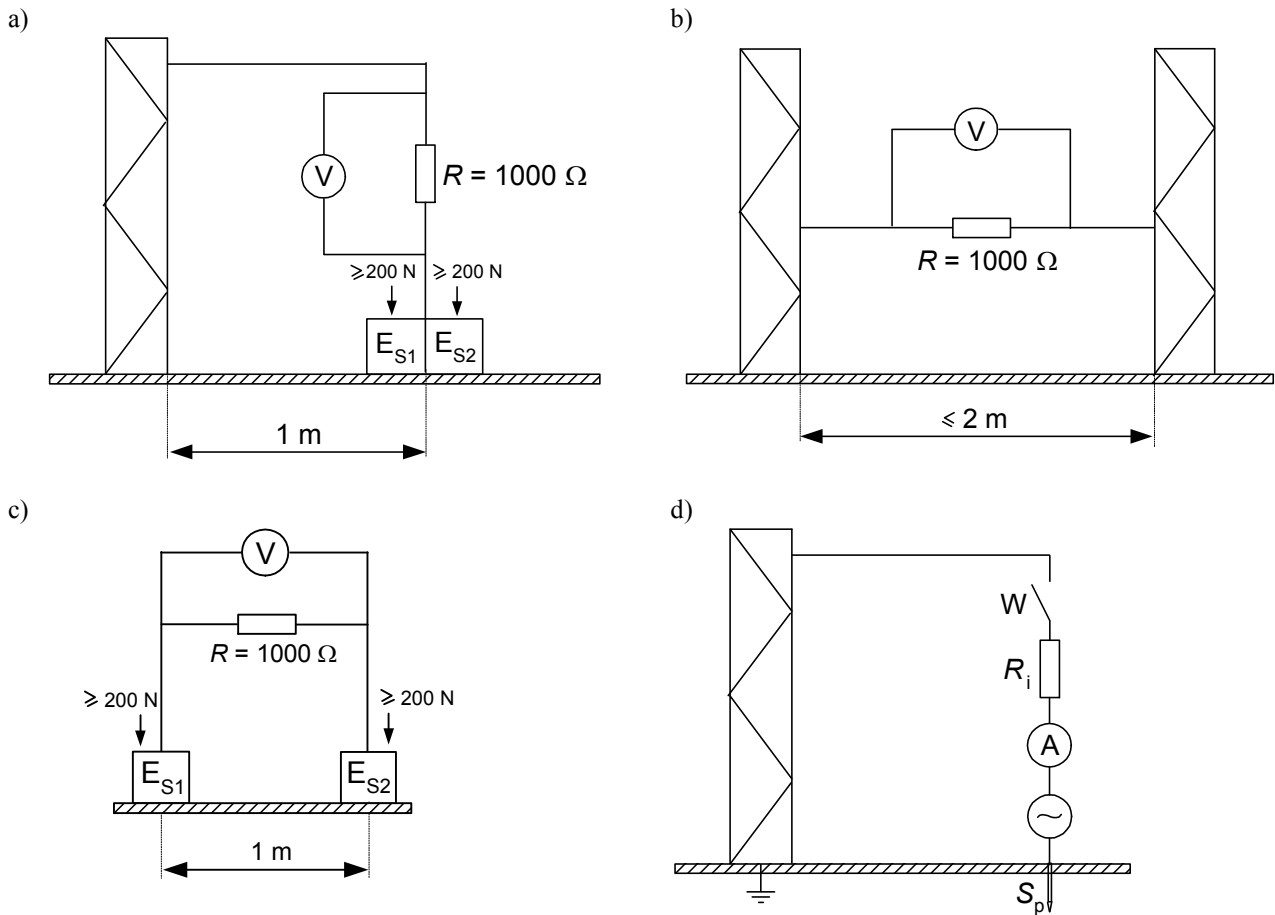
$$R_z = \frac{125}{I_E} \quad (5)$$

gdzie

I_E – prąd uziomowy

- 2) rezystancja uziemienia nie przekracza dwukrotnej wartości rezystancji wyliczonej według punktu 1), gdy z terenu zajętego przez kontur uziomu nie są wyprowadzone elementy połączone z uziom stacji, np. rurociągi, tory kolejowe, kable elektroenergetyczne.

Napięcia rażeniowe powinny być mierzone w warunkach, które oddają najmniej korzystną sytuację w danym miejscu. Na przykład w miejscach, w których podłoże może być wilgotne, należy podczas pomiarów zmoczyć grunt lub stanowisko. Pomiar powinien być wykonany zgodnie ze schematem podanym na rysunku 2.



Rys. 2. Schemat układu do: a) pomiaru napięcia dotykowego rażeniowego między urządzeniem i stanowiskiem, b) pomiaru napięcia dotykowego rażeniowego między dwoma urządzeniami, c) pomiaru napięcia krokowego rażeniowego, d) wymuszania prądu pomiarowego. R_i – rezystor ograniczający prąd pomiarowy, S_p – sonda prądowa

Podczas pomiaru napięcia dotykowego rażeniowego obwód pomiarowy z jednej strony powinien być przyłączony do urządzenia, a z drugiej strony poprzez rezystor o rezystancji $R = 1000 \Omega$ do dwóch elektrod modelujących stopy E_{S1} , E_{S2} (rys. 2a). Woltomierz o rezystancji wewnętrznej nie mniejszej niż $100 \text{ k}\Omega$ mierzy spadek napięcia na rezystorze R , modelującym rezystancję ciała człowieka. Wartość napięcia dotykowego rażeniowego, która może się pojawić podczas rzeczywistego zwarcia wyznacza się z następującej zależności:

$$U_T = U_{TM} \cdot \frac{I_E}{I_{EM}} \quad (6)$$

gdzie:

U_T – napięcie dotykowe rażeniowe,

U_{TM} – wartość napięcia uzyskana podczas pomiarów,

I_E – wartość prądu uziomowego podczas rzeczywistego zwarcia,
 I_{EM} – wartość prądu uziomowego wymuszona na czas pomiarów.

Napięcie krokowe rażeniowe należy mierzyć według schematu z rysunku 2c. Elektrody powinny być rozstawione w odległości 1 m. W przypadku pokazanym na rysunku 2a i 2c każda elektroda powinna być dociskana siłą co najmniej 200 N i mieć powierzchnię około 200 cm².

Zaleca się, żeby przy pomiarach napięć rażeniowych prąd pomiarowy płynął tylko przez badane uziemienie. Wartość prądu nie powinna być mniejsza niż 10 A. Jeżeli nie jest trudno to uzyskać, zaleca się, aby prąd pomiarowy stanowił co najmniej 0,5% rzeczywistego prądu uziomowego. Prąd pomiarowy należy wymuszać zgodnie ze schematem podanym na rysunku 2d. Źródłem prądu pomiarowego może być np. transformator potrzeb własnych lub zespół spalinowo-elektryczny.

Dopuszcza się stosowanie innych metod pomiaru napięć rażeniowych pod warunkiem zapewnienia nie mniejszej dokładności pomiarów.

3.2. Wymagania zawarte w Rozporządzeniu Ministra Przemysłu [22]

W Rozporządzeniu Ministra Przemysłu określone są największe dopuszczalne napięcia dotykowe rażeniowe w zależności od wymaganego stopnia ochrony przeciwporażeniowej dodatkowej. Rozróżnia się dwa stopnie ochrony przeciwporażeniowej dodatkowej. Największe dopuszczalne napięcia dotykowe rażeniowe dla tych stopni przedstawiono w tablicy 2.

Tabl. 2. Największe dopuszczalne napięcia dotykowe rażeniowe w zależności od wymaganego stopnia ochrony przeciwporażeniowej dodatkowej

Czas trwania rażenia [s]	1. stopień ochrony przeciwporażeniowej	2. stopień ochrony przeciwporażeniowej
0,1	390	780
0,2	330	660
0,3	275	550
0,4	235	470
0,5	205	410
0,6	180	360
0,7	160	320
0,8	145	290
0,9	135	270
1,0	125	250
1,2	112	224
1,4	102	204
1,6	94	188
1,8	88	176
2,0	84	168
2,5	76	152
3,0	71	142
3,5	68	136
4,0	66	132
≥ 5,0	65	130

Przyjęcie danego stopnia ochrony przeciwporażeniowej dodatkowej, czyli określonego poziomu największego dopuszczalnego napięcia dotykowego rażeniowego, zależy od miejsca na terenie stacji elektroenergetycznej. W tablicy 3 przedstawiono sposób kwalifikowania miejsc na terenie stacji. Nie stawia się żadnych wymagań odnośnie do wartości napięć krokowych.

Podobnie jak w poprzednich przepisach PBUE, rezystancja uziemienia powinna być na tyle mała, aby napięcie uziomowe nie przekraczało 80% napięcia probierczego urządzeń elektroenergetycznych mających połączenia z uziomem i urządzeniami poza stacją oraz nie powodowało zapłonu odgromników chroniących izolację urządzeń.

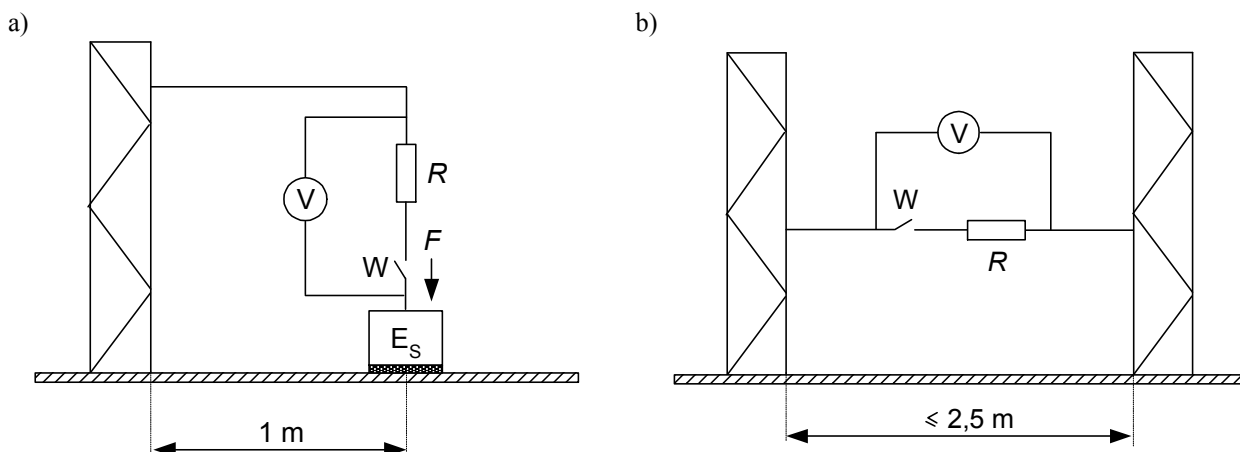
Tabl. 3. Wymagany stopień ochrony przeciwporażeniowej dodatkowej w zależności od miejsca na terenie stacji

Miejsce na terenie stacji elektroenergetycznej	Wymagany stopień ochrony przeciwporażeniowej dodatkowej
1) Pomieszczenia, w których występują: a) czynniki wpływające na zmniejszenie odporności organizmu ludzkiego na działanie napięcia (duża wilgotność, wysoka temperatura, skrzępowanie swobody ruchów i pozycji podczas pracy) lub b) uziemione podłogi wykonane z materiałów przewodzących, niepołączone metalicznie z częściami urządzeń i konstrukcji, na których mogą występować napięcia dotykowe.	1
2) Stanowiska, na których są wykonywane czynności łączeniowe, remontowo-montażowe i inne. 3) Drogi ruchu wewnętrznego i przejścia. 4) Pomieszczenia rozdzielni i nastawni. 5) Pasy o szerokości 3 m przylegające do ogrodzenia zewnętrznego wydzielonego terenu. 6) Pomieszczenia i tereny nie wymienione w pkt. 1÷5.	2*
* W przypadkach technicznie uzasadnionych dopuszcza się przyjęcie dopuszczalnych napięć dotykowych rażeniowych trzykrotnie wyższych od napięć określonych dla 1. stopnia ochrony przeciwporażeniowej pod warunkiem używania przez personel eksploatacyjny elektroizolacyjnego sprzętu ochrony osobistej i umieszczenia przy wejściach na te tereny odpowiednich tablic ostrzegawczych	

Podczas badań skuteczności ochrony przeciwporażeniowej dodatkowej można ją uznać za skuteczną, jeżeli:

- 1) napięcia dotykowe rażeniowe w miejscach określonych w tablicy 3 nie przekroczą wartości dopuszczalnych,
- 2) napięcia dotykowe spodziewane pomiędzy dwoma dostępnymi przedmiotami, nie pokrytymi warstwami izolacyjnymi, nie przekroczą dopuszczalnych napięć dotykowych rażeniowych,
- 3) napięcie uziomowe nie przekroczy:
 - a) trzykrotnej wartości dopuszczalnego napięcia dotykowego rażeniowego, ustalonego dla najostrzejszego stopnia ochrony przeciwporażeniowej na danym terenie, jeżeli do uziomu są przyłączone urządzenia wchodzące w skład sieci elektroenergetycznej z bezpośrednio uziemionym punktem neutralnym,
 - b) półtorakrotnej wartości dopuszczalnego napięcia dotykowego rażeniowego, ustalonego dla najostrzejszego stopnia ochrony przeciwporażeniowej na danym terenie, jeżeli do uziomu są przyłączone urządzenia wchodzące w skład sieci elektroenergetycznej z kompensacją prądu ziemnozwarciowego bądź punktem neutralnym izolowanym lub uziemionym przez rezystor.

Pomiar napięć dotykowych spodziewanych i napięć dotykowych rażeniowych powinien być przeprowadzony zgodnie ze schematami przedstawionymi na rysunku 3.



Rys. 3. Układ do pomiaru:

- a) napięcia dotykowego spodziewanego i napięcia dotykowego rażeniowego między urządzeniem a stanowiskiem,
- b) napięcia dotykowego spodziewanego i napięcia dotykowego rażeniowego między dwoma urządzeniami

Po wymuszeniu prądu pomiarowego (według schematu na rysunku 2d) mierzy się napięcie dotykowe przy otwartym łączniku W. Przy zamkniętym łączniku W mierzy się spadek napięcia na rezystorze R modelującym rezystancję ciała człowieka, czyli napięcie dotykowe rażeniowe.

Wymagania stawiane modelowemu rezystorowi R oraz sondzie E_s podane są w tabelicy 4. Stanowiska na terenie stacji, które mogą być wilgotne okresowo lub stale, należy przed pomiarami zmoczyć wodą.

Tabl. 4. Wymagania stawiane elementom obwodu do pomiaru napięcia dotykowego

Wielkość	Wartości wielkości wymienionych w kolumnie 1 przy pomiarze:	
	napięcia dotykowego spodziewanego	napięcia dotykowego rażeniowego
Czynna powierzchnia sond pomiarowych	jedna sonda o powierzchni 400 cm ² lub dwie sondy o powierzchni 200 cm ² każda, ustawione obok siebie	
Docisk F jednej sondy pomiarowej: 1) metalowej o czynnej powierzchni: • 400 cm ² • 200 cm ² 2) elastycznej o czynnej powierzchni 400 cm ²	–	co najmniej 400 N co najmniej 200 N co najmniej 200 N
Rezystancja rezystora odwzorowującego rezystancję ciała człowieka: 1) dla czasu trwania rażenia $t \leq 1$ s 2) dla czasu trwania rażenia $t > 1$ s	–	1000 Ω 1500 Ω
Rezystancja wewnętrzna woltomierza do pomiaru napięcia	co najmniej 100 k Ω	

Pomiary rezystancji uziemienia i napięć dotykowych powinny być wykonane przy wymuszeniu prądu uziomowego nie mniejszego niż 20% największej wartości spodziewanego prądu jednofazowego zwarcia z ziemią i nie mniejszej niż 30 A.

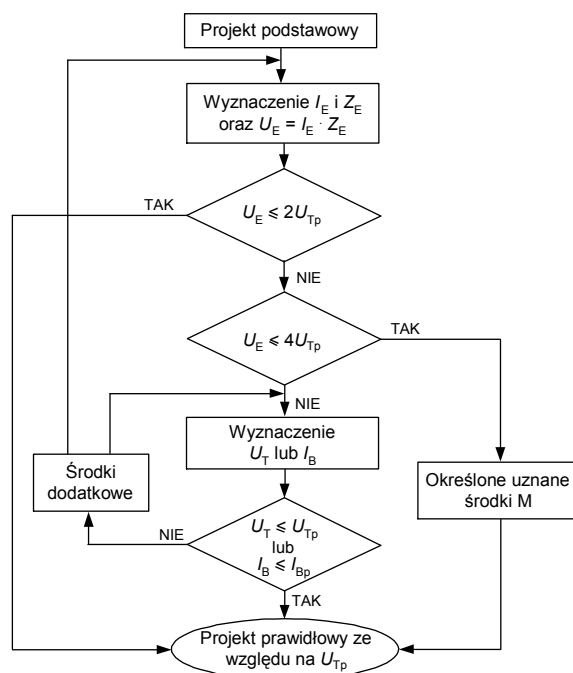
Dopuszcza się inne metody pomiarowe pod warunkiem zapewnienia nie mniejszej dokładności pomiarów. Dopuszcza się także określenie napięć dotykowych spodziewanych i napięć dotykowych rażeniowych na podstawie zmierzonej rezystancji uziemienia, znanej wartości prądu zwarcia jednofazowego i określonego w projekcie największego stosunku napięcia dotykowego spodziewanego (dotykowego rażeniowego) do napięcia uziomowego.

3.3. Wymagania zawarte w normie PN-E-05115:2002 [13]

Ocena instalacji uziemiającej ze względu na dopuszczalne napięcia uziomowe, dotykowe spodziewane, dotykowe rażeniowe powinna być dokonana zgodnie z algorytmem przedstawionym na rysunku 4.

Znając wartość rezystancji (impedancji Z_E) uziemienia, np. z pomiarów i wartość prądu uziomowego I_E można określić wartość napięcia uziomowego $U_E = Z_E \cdot I_E$. Jeżeli napięcie uziomowe nie przekracza dwukrotnej wartości dopuszczalnego napięcia dotykowego rażeniowego $U_E \leq 2U_{Tp}$, to nie ma konieczności wyznaczania napięć dotykowych spodziewanych i napięć dotykowych rażeniowych; można uznać, że instalacja uziemiająca, z tego punktu widzenia, jest wykonana poprawnie. Wartość napięcia uziomowego zawarta w granicach $2U_{Tp} < U_E \leq 4U_{Tp}$ oznacza, że ochronę przeciwporażeniową można uznać za skuteczną pod warunkiem, że są wykonane określone uznane uzupełniające środki ochrony, oznaczane jako M. Uzupełniające środki ochrony M podzielono na cztery zasadnicze grupy M1, M2, M3, M4, w zależności od miejsca, w którym mają być zastosowane. Poniżej przedstawiono opis uznanych środków M [13].

Dopiero po przekroczeniu przez napięcie uziomowe czterokrotnej wartości dopuszczalnego napięcia dotykowego rażeniowego, należy sprawdzać napięcia dotykowe rażeniowe U_T .



Rys. 4. Procedura oceny instalacji uziemiającej ze względu na dopuszczalne napięcia uziomowe i napięcia dotykowe

Zgodnie z postanowieniami normy [13] nie ma konieczności wykonywania pomiaru rezystancji uziemienia i wyznaczania napięcia uziomowego, jeżeli stacja elektroenergetyczna jest częścią tzw. zespolonej instalacji uziemiającej, czyli jest połączona z rozległą siecią uziomów, np. na terenach aglomeracji miejskiej.

M1	Określone uznane środki uzupełniające na zewnątrz budynków instalacji wewnętrznych.
M1.1	Wykonanie zewnętrznych ścian z materiałów nieprzewodzących, np. murowanych lub drewnianych, bez przewodzących elementów.
M1.2	Wyrównanie potencjałów przez zastosowanie uziomu poziomego ułożonego na głębokości nie większej niż 0,5 m, na zewnątrz ściany, w odległości około 1 m, przyłączonego do układu uziomowego.
M1.3	Zastosowanie izolacji stanowiska. Stanowisko powinno mieć takie rozmiary, aby nie było możliwe dotknięcie części przewodzących spoza tego stanowiska. Jeżeli dotknięcie części przewodzących jest możliwe tylko z kierunku bocznego, wystarczającą jest warstwa izolacyjna o szerokości 1,25 m. Izolacja stanowiska jest wystarczająca, jeżeli zastosowano: – warstwę tłucznia o grubości co najmniej 100 mm, – warstwę asfaltu na odpowiednim podłożu np. żwirze, – pokrycie izolacyjne (matę) o minimalnej powierzchni 1000 mm × 1000 mm i grubości nie mniejszej niż 2,5 mm lub środek zapewniający równoważną izolację.

M2	Określone uznane środki uzupełniające przy zewnętrznych ogrodzeniach instalacji napowietrznych.
M2.1	Zastosowanie ogrodzenia z materiału nieprzewodzącego lub siatki drucianej pokrytej tworzywem sztucznym (również z gołymi przewodzącymi słupkami).
M2.2	W przypadku ogrodzenia wykonanego z materiału przewodzącego, zastosowanie sterowania potencjałem za pomocą połączonego z ogrodzeniem uziomu poziomego ułożonego na zewnątrz ogrodzenia w odległości około 1 m i na głębokości nie większej niż 0,5 m. Alternatywnym rozwiązaniem jest połączenie ogrodzenia z uziomem stacji (patrz także środek M2.4).
M2.3	Zastosowanie równocześnie izolacji stanowiska zgodnie z M1.3 i oddzielne uziemienie ogrodzenia lub połączenia z układem uziemiającym.
M2.4	Zastosowanie izolacji stanowiska wg M1.3 lub wyrównywania potencjałów na terenie przylegającym do otwartych bram, jeżeli bramy w zewnętrznym ogrodzeniu są połączone z układem uziemiającym bezpośrednio lub poprzez przewody ochronne lub metalową powłokę instalacji dzwonekowej. Jeżeli bramy w przewodzącym ogrodzeniu mają połączenie z głównym układem uziemiającym, to powinny być one odizolowane od przewodzących części ogrodzenia w sposób zapewniający elektryczną separację na długości co najmniej 2,5 m. Można to zrealizować przez zastosowanie sekcji ogrodzenia wykonanego z materiału nieprzewodzącego lub za pomocą wstawek izolacyjnych na obu końcach przewodzącego ogrodzenia.

M3	Określone uznane środki ochrony w instalacjach wewnętrznych.	
M3.1	Wyrównywanie potencjałów przez wykonanie w fundamentach budynków kratowego układu uziomowego (np. o przekrojach przewodów co najmniej 50 mm ² i oczkach kraty o szerokości nie przekraczającej 10 m lub zastosowanie konstrukcyjnych siatek stalowych) i połączenia go z układem uziemiającym co najmniej w dwóch różnych miejscach. W istniejących budynkach można zastosować uziomy poziome, które powinny być ułożone w gruncie w pobliżu zewnętrznych ścian i połączone z układem uziemiającym.	
M3.2	Wykonanie metalowego stanowiska (np. w postaci metalowej kraty lub płyty), które należy połączyć z wszystkimi częściami przewodzącymi dostępnymi ze stanowiska i z układem uziemiającym.	
M3.3	Wykonanie izolacji stanowiska wg M1.3 i połączeń wyrównawczych pomiędzy częściami przewodzącymi dostępnymi z tego stanowiska.	

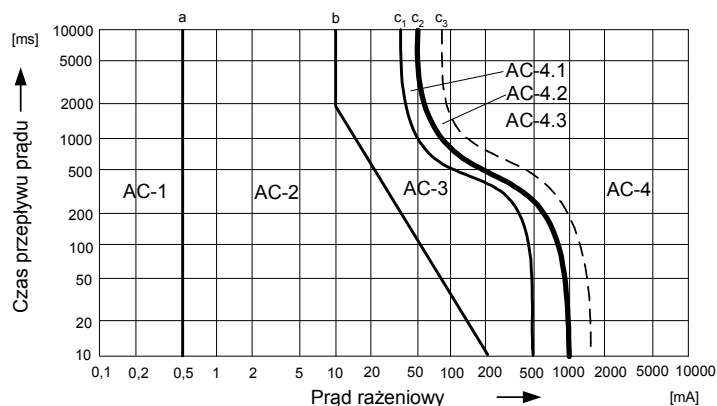
M4	Określone uznane środki w instalacjach napowietrznych.	
M4.1	– Wyrównanie potencjałów za pomocą uziomu poziomego ułożonego na głębokości około 0,2 m w odległości około 1 m od obsługiwanych urządzeń. Uziom ten powinien być połączony ze wszystkimi częściami przewodzącymi dostępnymi ze stanowiska, lub – Wykonanie metalowego stanowiska (np. w postaci metalowej kraty lub płyty), które należy połączyć z wszystkimi częściami przewodzącymi dostępnymi ze stanowiska i z układem uziemiającym, lub – Wykonanie izolacji stanowiska wg M1.3 i połączeń wyrównawczych pomiędzy częściami przewodzącymi dostępnymi z tego stanowiska.	
M4.2	Wykonanie na zewnątrz uziomu kratowego rozdzielni zamkniętego uziomu otokowego. Wewnątrz tego otoku oka kraty nie powinny mieć wymiarów większych niż 10 m × 50 m. Dla pojedynczych urządzeń zlokalizowanych na zewnątrz uziomu otokowego, a które są połączone z uziomem rozdzielni, należy zastosować uziom wyrównawczy w odległości około 1 m od urządzenia i na głębokości około 0,2 m (np. wokół słupów oświetleniowych, które są połączone z uziomem rozdzielni poprzez przewód ochronny).	

W tablicy 5 przedstawiono zakres stosowania uzupełniających środków ochrony M.

Tabl. 5. Zakres stosowania uzupełniających środków ochrony M

Czas trwania zwarcia doziemnego t_F	Napięcie uziomowe U_E	Na zewnętrznych ścianach i ogrodzeniach otaczających instalacje	Na terenie instalacji	
			wewnętrznych	napowietrznych
$t_F > 5 \text{ s}$	$U_E \leq 4 \cdot U_{Tp}$	M1 lub M2	M3	M4.1 lub M4.2
	$U_E > 4 \cdot U_{Tp}$	Sprawdzić czy $U_T \leq U_{Tp}$	M3	M4.2
$t_F \leq 5 \text{ s}$	$U_E \leq 4 \cdot U_{Tp}$	M1 lub M2	M3	M4.2
	$U_E > 4 \cdot U_{Tp}$	Sprawdzić czy $U_T \leq U_{Tp}$		

Wymagania stawiane instalacji uziemiającej odnośnie do napięcia uziomowego i napięć dotykowych zawarte w normie [13], są oparte na pierwotnych kryteriach bezpieczeństwa podanych w raporcie technicznym [20]. Pierwotne kryteria bezpieczeństwa przy urządzeniach prądu przemiennego przedstawiono na rysunku 5, natomiast w tablicy 6 objaśnienia poszczególnych stref z tego rysunku.



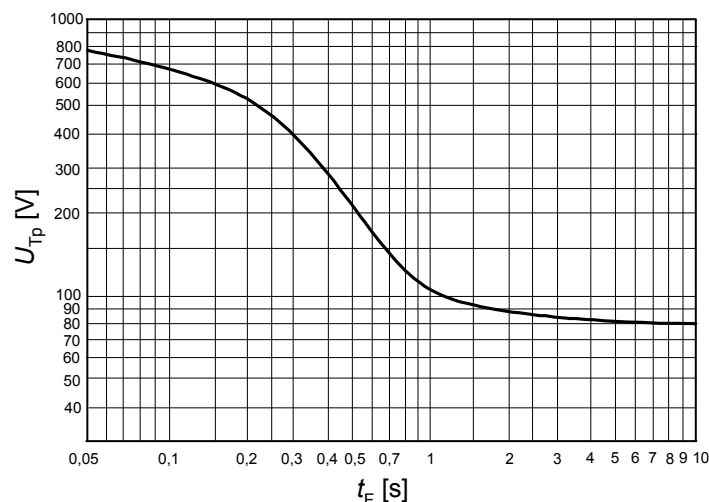
Rys. 5. Pierwotne kryteria bezpieczeństwa przy urządzeniach prądu przemiennego 50 Hz – bezpośrednie skutki rażenia na drodze lewa ręka – stopy

Tabl. 6. Skutki fizjologiczne przepływu prądu przez ciało człowieka

Oznaczenie strefy	Granice strefy	Skutki fizjologiczne
AC-1	do 0,5 mA linia a	Zwykle brak reakcji
AC-2	0,5 mA do linii b*	Zwykle brak szkodliwych skutków fizjologicznych
AC-3	linia b do krzywej c ₁	Zwykle brak uszkodzeń organicznych. Prawdopodobieństwo pojawienia się skurczu mięśni i trudności przy oddychaniu dla czasu przepływu prądu dłuższego niż 2 s. Odwracalne zakłócenia w powstawaniu i pobudzaniu bodźców w sercu włącznie z migotaniem przedsionków i przejściowym zatrzymaniem pracy serca, a wzrastające wraz ze zwiększeniem wartości prądu i czasu jego przepływu
AC-4	powyżej krzywej c ₁	Wzrastające wraz ze zwiększeniem wartości prądu i czasu jego przepływu niebezpieczeństwo skutków patofizjologicznych, takie jak zatrzymanie pracy serca, zatrzymanie oddychania, poważne oparzenia, mogące rozszerzać skutki strefy 3
AC-4.1	c ₁ – c ₂	Prawdopodobieństwo migotania komór serca wzrastające do około 5 %
AC-4.2	c ₂ – c ₃	Prawdopodobieństwo migotania komór serca do około 50 %
AC-4.3	powyżej krzywej c ₃	Prawdopodobieństwo migotania komór serca powyżej 50 %.

* dla czasów przepływu prądu poniżej 10 ms linia graniczna przepływu prądu przez ciało pozostaje stała o wartości 200 mA

Podstawą do określenia, przydatnych w praktyce, wtórnych kryteriów bezpieczeństwa czyli dopuszczalnych napięć dotykowych, jest krzywa c₂ z rysunku 5. Na jej podstawie został utworzony wykres zamieszczony na rysunku 6.



Rys. 6. Największe dopuszczalne napięcia dotykowe rażeniowe U_{Tp} w zależności od czasu t_F przepływu prądu rażeniowego [13]

Krzywa na rysunku 6 określa największe dopuszczalne napięcia dotykowe rażeniowe bez uwzględniania dodatkowych rezystancji w obwodzie rażeniowym. Procedura jej tworzenia jest następująca:

- 1) Według krzywej c₂ z rysunku 5 określa się dopuszczalne prądy rażeniowe w funkcji czasu trwania rażenia. Dane te zawiera również tablica 7.

Tabl. 7. Największe dopuszczalne prądy rażeniowe w zależności od czasu rażenia (doziemienia)

Czas trwania rażenia t_F s	Największy dopuszczalny prąd rażeniowy I_B mA
0,05	900
0,1	750
0,2	600
0,5	200
1	80
2	60
5	51
10	50

- 2) Wyznacza się impedancję ciała człowieka dla drogi przepływu prądu ręka – ręka lub ręka – stopa dla kwantylu 50% (50% populacji ma impedancję mniejszą). Wartości tej impedancji w zależności od napięcia podano w tablicy 8.

Tabl. 8. Impedancja ciała człowieka na drodze ręka – ręka lub ręka – stopa w zależności od napięcia

Napięcie dotykowe rażeniowe U_T V	Impedancja ciała człowieka Z_B Ω
25	3250
50	2625
75	2200
100	1875
125	1625
220	1350
700	1100
1000	1050

- 3) Impedancję tę mnoży się przez współczynnik 0,75 (rażenie na drodze ręka – stopy).
- 4) Na podstawie iloczynu największego dopuszczalnego prądu rażeniowego I_B , impedancji ciała człowieka Z_B i współczynnika 0,75 otrzymuje się krzywą $U_{Tp} = f(t_F)$, która opisuje największe dopuszczalne napięcie dotykowe rażeniowe w zależności od czasu przepływu prądu rażeniowego (czasu doziemienia), (rys. 6, tabl. 9).

Tabl. 9. Największe dopuszczalne napięcia dotykowe rażeniowe dla różnych czasów przepływu prądu rażeniowego

Czas trwania rażenia t_F s	Największe dopuszczalne napięcie dotykowe rażeniowe U_T V
0,04	800
0,08	700
0,14	600
0,20	500
0,29	400
0,39	300
0,49	220
0,64	150
0,72	125
1,1	100
10	80

Według postanowień normy [13] w praktyce można uwzględnić dodatkowe rezystancje w obwodzie rażeniowym, jak np. stanowiska lub obuwia, co przyczynia się do istotnego zwiększenia dopuszczalnych napięć dotykowych.

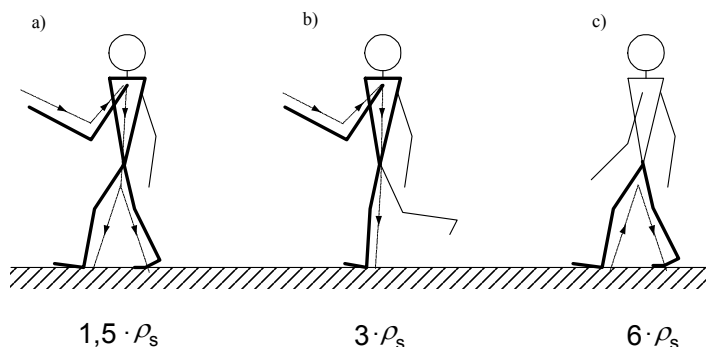
Dodatkowa rezystancja R_{a1} reprezentuje rezystancję obuwia i przyjmuje się dla niej wartość równą 1000 Ω . Rezystancja R_{a2} jest rezystancją stanowiska (rezystancją przejścia) i uzależnia się ją od rezystywności gruntu ρ_s .

Rezystancję przejścia jednej stopy można obliczyć zastępując stopę krążkiem o średnicy $d = 16$ cm. Krążek ten położony na powierzchni gruntu ma rezystancję przejścia:

$$R_{a2} \approx \frac{\rho_s}{2 \cdot d} = \frac{\rho_s}{2 \cdot 0,16} \approx 3\rho_s \quad (7)$$

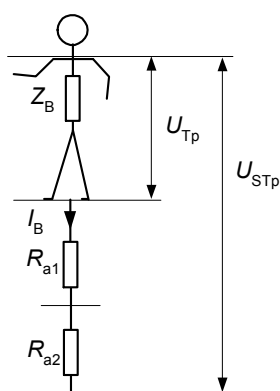
co odpowiada sytuacji przedstawionej na rysunku 7b (rażenie na drodze ręka – stopa).

Jeżeli prąd płynie na drodze ręka – obie stopy (rys. 7a), to w wyniku równoległego połączenia rezystancja przejścia wynosi $1,5\rho_s$. Przy rażeniu napięciem krokowym (przepływ prądu na drodze stopa – stopa) pojedyncze rezystancje przejścia są połączone szeregowo, co daje wypadkową rezystancję przejścia równą $6\rho_s$ (rys. 7c).



Rys. 7. Rezystancja przejścia do ziemi przy rażeniu na drodze: a) ręka – obie stopy, b) ręka – stopa, c) stopa – stopa

Duża rezystancja podłoża może występować w stacji wewnętrznej. Jeżeli w obwodzie rażeniowym pojawiają się dodatkowe rezystancje R_a (rys. 8), to procedura wyznaczania zależności opisującej największe dopuszczalne napięcie dotykowe od czasu przepływu prądu rażeniowego przedstawia się, jak w tablicach 10 i 11.



Rys. 8. Schemat obwodu rażeniowego z dodatkowymi rezystancjami:
 U_{Tp} – największe dopuszczalne napięcie dotykowe rażeniowe,
 U_{STp} – największe dopuszczalne napięcie dotykowe spodziewane

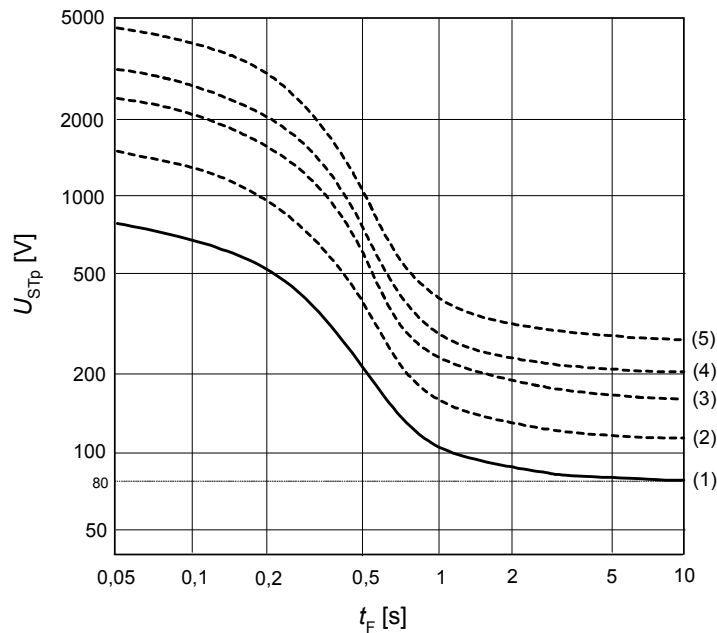
Tabl. 10. Założenia do obliczeń największego dopuszczalnego napięcia dotykowego z uwzględnieniem dodatkowych rezystancji

Droga prądu rażeniowego	Lewa ręka – obie stopy
Impedancja ciała człowieka Z_B	Kwantyl 50%
Prąd rażeniowy $I_B = f(t_F)$	Krzywa c_2 (rys. 4)
Impedancja obwodu rażeniowego	$Z_B (50\%) + R_a$
Dodatkowe rezystancje	$R_a = R_{a1} + R_{a2} = R_{a1} + 1,5\rho_s$

Tabl. 11. Algorytm do wyznaczania największego dopuszczalnego napięcia dotykowego z uwzględnieniem dodatkowych rezystancji

1)	t_F	– czas trwania doziemienia
2)	$U_{Tp} = f(t_F)$	– zależność z rysunku 5
3)	$Z_B = f(U_{Tp})$	– zgodnie z tablicą 8
4)	$I_B = \frac{U_{Tp}}{Z_B}$	– prąd rażeniowy
5)	$U_{STp}(t_F) = U_{Tp}(t_F) + (R_{a1} + R_{a2}) \cdot I_B =$ $= U_{Tp}(t_F) \cdot (1 + \frac{R_a}{Z_B})$	– największe dopuszczalne napięcie dotykowe z uwzględnieniem dodatkowych rezystancji
Oznaczenia:		
U_{STp} – największe dopuszczalne napięcie dotykowe z uwzględnieniem dodatkowych rezystancji (obuwia, izolacyjnego stanowiska). Jeżeli nie ma dodatkowych rezystancji napięcie U_{STp} jest równe U_{Tp} [V]		
Z_B – impedancja ciała człowieka dla określonej wartości napięcia dotykowego rażeniowego [Ω]		
I_B – prąd rażeniowy [A]		
U_{Tp} – największe dopuszczalne napięcie dotykowe rażeniowe [V]		
R_a – dodatkowe rezystancje ($R_a = R_{a1} + R_{a2}$) [Ω], np. R_{a1} – rezystancja obuwia, R_{a2} – rezystancja stanowiska		
ρ_s – rezystywność gruntu [Ωm]		
t_F – czas trwania doziemienia [s]		

Na podstawie tej procedury otrzymuje się dodatkowe krzywe opisujące największe dopuszczalne napięcia dotykowe (spodziewane). Przykładowe krzywe są przedstawione na rysunku 9.

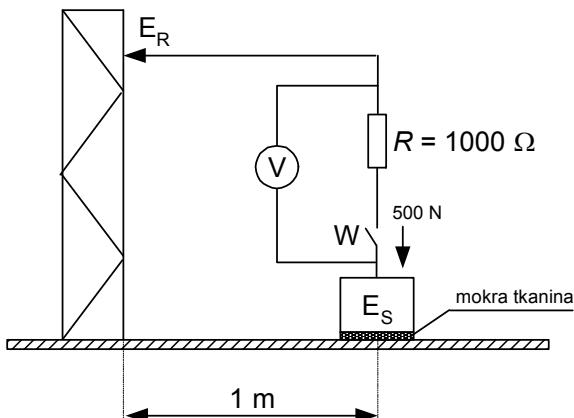


Rys. 9. Największe dopuszczalne napięcia dotykowe spodziewane U_{STp} z uwzględnieniem dodatkowych rezystancji R_a np. obuwia, izolacyjnego stanowiska [13]

- krzywa (1) – bez dodatkowych rezystancji
- krzywa (2) – $R_a = 750 \Omega$ ($R_{a1} = 0 \Omega$ $\rho_s = 500 \Omega m$)
- krzywa (3) – $R_a = 1750 \Omega$ ($R_{a1} = 1000 \Omega$ $\rho_s = 500 \Omega m$)
- krzywa (4) – $R_a = 2500 \Omega$ ($R_{a1} = 1000 \Omega$ $\rho_s = 1000 \Omega m$)
- krzywa (5) – $R_a = 4000 \Omega$ ($R_{a1} = 1000 \Omega$ $\rho_s = 2000 \Omega m$)

Zgodnie z postanowieniami normy [13] podczas pomiaru rezystancji uziemienia (pomiar rezystancji uziemienia szerzej omówiono w punkcie 5) częstotliwość zastosowanego napięcia przemiennego nie powinna przekraczać 150 Hz. Badany uziom oraz sondy napięciowa i prądowa powinny być rozmieszczone w linii prostej. Zaleca się, aby odległość sondy napięciowej od uziomu badanego była co najmniej 2,5 razy większa od największego wymiaru terenu zajętego przez uziom (odniesionego do kierunku pomiaru), ale nie mniejsza niż 20 m, a odległość sondy prądowej co najmniej 4-krotna, ale nie mniejsza niż 40 m. Do pomiaru uziemień rozległych, np. uziomów stacji najwyższych napięć należy stosować metodę, która w normie [13] nosi nazwę metody wielkoprądowej i została opisana w punkcie 5.5.

Jeżeli napięcie uziomowe U_E przekracza $4U_{Tp}$ (lub $4U_{STp}$), to należy sprawdzać napięcia dotykowe rażeniowe (lub dotykowe spodziewane). Pomiar napięć dotykowych powinny być wykonane zgodnie ze schematem przedstawionym na rysunku 10.



Rys. 10. Układ do pomiaru napięcia dotykowego spodziewanego i napięcia dotykowego rażeniowego

Elektroda E_S odwzorowująca styczność stóp z podłożem powinna mieć powierzchnię 400 cm^2 i być dociśnięta siłą co najmniej 500 N . Umieszczona powinna być w odległości 1 m od części przewodzącej dostępnej. Pod elektrodą pomiarową umieszczoną na betonie lub na wyschniętym gruncie należy podłożyć mokłą tkaninę lub zmoczyć podłoże wodą. Rezystor R modelujący rezystancję ciała człowieka powinien mieć rezystancję $1000\ \Omega$. Elektroda E_R odwzorowująca styczność ręki z częścią przewodzącą, powinna umożliwiać skuteczne przebicie farby pokrywającej tę część. Jeżeli część przewodząca jest pokryta izolacją, to nie przebija się jej. Woltomierz do pomiaru omawianych napięć powinien charakteryzować się wysoką rezystancją wewnętrzną tzn. nie mniejszą niż $100\text{ k}\Omega$. W szereg z rezystorem modelującym rezystancję ciała człowieka jest połączony łącznik W . Jeżeli jest on otwarty, to mierzy się napięcie dotykowe spodziewane, natomiast po jego zamknięciu napięcie dotykowe rażeniowe. Nie wymaga się sprawdzania napięć krokowych.

Dla uzyskania rzeczywistych wartości napięć dotykowych otrzymane wyniki pomiarów należy pomnożyć przez wartość równą ilorazowi rzeczywistego prądu uziomowego i prądu uziomowego wymuszanego podczas pomiarów, według zależności (6).

Jeżeli nie uwzględnia się dodatkowych rezystancji, to zamiast elektrody pomiarowej można zastosować sondę prętową wbitą na głębokość co najmniej 20 cm .

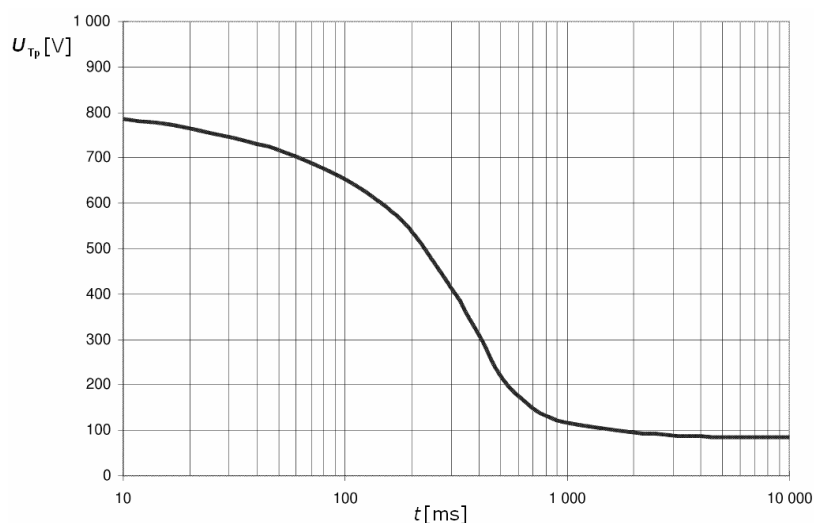
Dla szacunkowej oceny, czy nie została przekroczona wartość napięcia dotykowego spodziewanego U_{STp} , można wykonać pomiar woltomierzem o dużej rezystancji wewnętrznej, wbijając sondę prętową na głębokości 10 cm . Jeżeli pomiar ten wykaże przekroczenie napięcia U_{STp} , to należy wykonać pomiar dokładny przy zastosowaniu układu omówionego wcześniej.

Dla każdej instalacji uziemiającej powinien być sporządzony, przechowywany i uaktualniany plan przedstawiający rozmieszczenie uziomów (z podaniem materiału, głębokości pograżenia itp.), punktów ich przyłączenia i rozgałęzienia oraz rozmieszczenie i opis zastosowanych uzupełniających środków ochrony M.

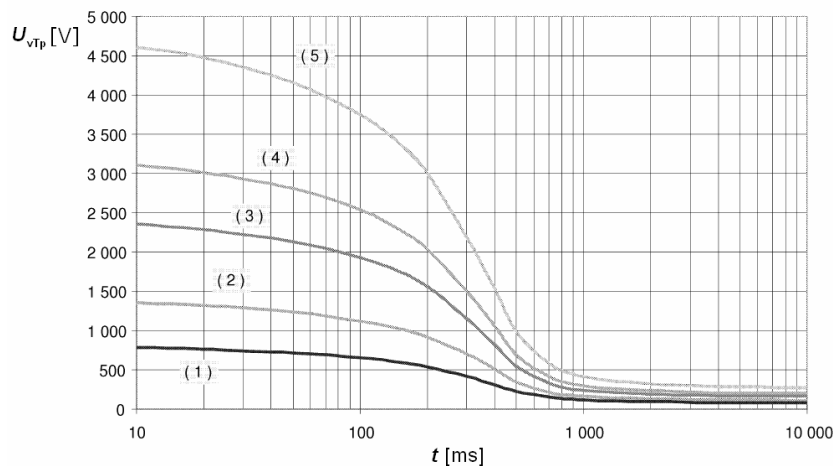
3.4. Wymagania zawarte w normach PN-EN 61936-1:2011 [17] oraz PN-EN 50522:2011 [16]

W kwietniu 2011 roku pojawiły się w zbiorze Polskich Norm dwie normy: PN-EN 61936-1:2011 *Instalacje elektroenergetyczne prądu przemiennego o napięciu wyższym od 1 kV – Część 1: Postanowienia ogólne (oryg.)* [17] i PN-EN 50522:2011 *Uziemienie instalacji elektroenergetycznych prądu przemiennego o napięciu wyższym od 1 kV (oryg.)* [16], które dotyczą projektowania oraz sprawdzania stanu instalacji uziemiających w urządzeniach wysokiego napięcia. Normy te zastępują normę PN-E-05115:2002, która nadal jest przywołana w aktualnym rozporządzeniu [21]. Ostatecznym terminem wycofania norm sprzecznych z normami nowo wprowadzonymi jest data 01.11.2013. Nowe normy nie wprowadzają znaczących zmian w zakresie sprawdzania instalacji uziemiającej w porównaniu z normą PN-E-05115:2002.

Z punktu widzenia sprawdzania instalacji uziemiającej i oceny skuteczności ochrony przeciwporażeniowej należy zwrócić uwagę na niewielką zmianę wartości największych dopuszczalnych napięć dotykowych rażeniowych (rys. 11) i napięć dotykowych spodziewanych (rys. 12).



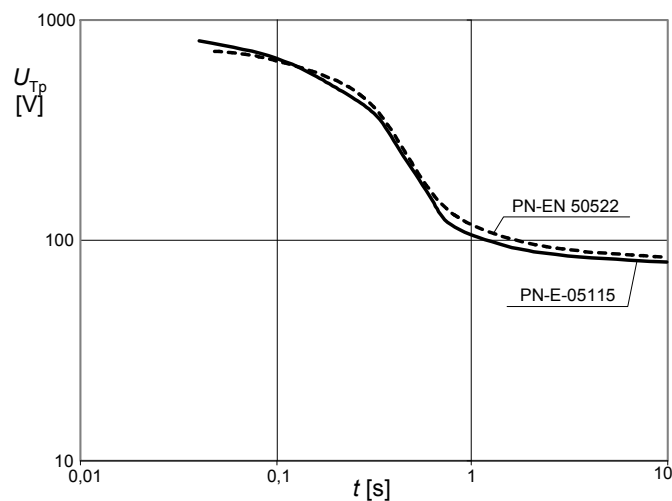
Rys. 11. Największe dopuszczalne napięcia dotykowe rażeniowe U_{Tp} w zależności od czasu przepływu prądu rażeniowego [16]



Rys. 12. Największe dopuszczalne napięcia dotykowe spodziewane U_{vTp} z uwzględnieniem dodatkowych rezystancji R_F np. obuwia, izolacyjnego stanowiska [16]

- krzywa (1) – bez dodatkowych rezystancji
- krzywa (2) – $R_F = 750 \Omega$ ($R_{F1} = 0 \Omega$ $\rho_s = 500 \Omega m$)
- krzywa (3) – $R_F = 1750 \Omega$ ($R_{F1} = 1000 \Omega$ $\rho_s = 500 \Omega m$)
- krzywa (4) – $R_F = 2500 \Omega$ ($R_{F1} = 1000 \Omega$ $\rho_s = 1000 \Omega m$)
- krzywa (5) – $R_F = 4000 \Omega$ ($R_{F1} = 1000 \Omega$ $\rho_s = 2000 \Omega m$)

Wykreślne porównanie nowych i poprzednich wartości największych dopuszczalnych napięć dotykowych rażeniowych przedstawiono na rysunku 13. Według nowej normy [16] w zakresie czasów rażenia powyżej 0,15 s napięcia te są raczej większe.



Rys. 13. Porównanie największych dopuszczalnych napięć dotykowych rażeniowych U_{Tp} w zależności od czasu przepływu prądu rażeniowego

W nowej normie napięcie dotykowe spodziewane oznaczono U_{vTp} (w poprzedniej U_{STp}), a dodatkowe rezystancje wchodzące w obwód rażeniowy – R_F (poprzednio R_a).

Szersze omówienie wymagań stawianych przez nowe normy [16, 17] wykracza poza zakres niniejszego artykułu.

4. UZIEMIENIA W STACJACH SN/nn

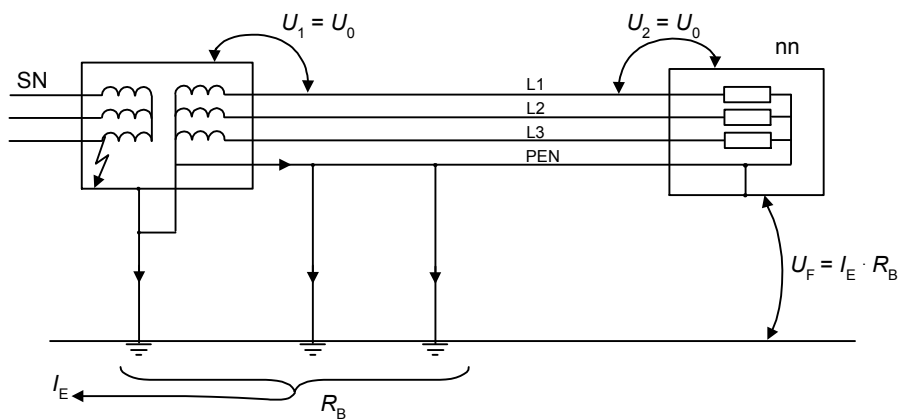
Dość powszechne jest mniemanie, że uziemienie punktu neutralnego transformatora w stacji SN/nn powinno mieć wartość rezystancji uziemienia około $1,25 \Omega$ (nawet $0,7 \Omega$) i w praktyce często są podejmowane próby uzyskania tak małej rezystancji uziemienia w stacji o wymiarach np. 3×4 m. Ile powinna wynosić rezystancja uziemienia punktu neutralnego, jakie uziemienia się na nią składają i jak zmierzyć tę rezystancję? Poniżej przedstawiono trzy kryteria, które zgodnie z wymaganiami aktualnych norm [12, 13, 14] powinny być

rozpatrywane przy ocenie uziemień w stacjach SN/nn i sieciach niskiego napięcia.

Kryterium 1 – zagrożenie porażeniowe w sieci niskiego napięcia spowodowane doziemieniem po stronie wyższego napięcia w stacji

Uziemienia w stacjach zasilających sieci niskiego napięcia mogą być wykonane jako wspólne dla urządzeń wysokiego napięcia i sieci niskiego napięcia lub jako oddzielne. Najczęściej wykonuje się je jako wspólne, gdyż jest to rozwiązanie tańsze i łatwiejsze w realizacji. W takim przypadku należy sprawdzić, czy uziemienie jednocześnie spełnia wymagania stawiane urządzeniom wysokiego napięcia i urządzeniom niskiego napięcia. Przy wykonaniu oddzielnych uziemień funkcję uziemienia ochronnego dla urządzeń wysokiego napięcia pełni jedno uziemienie, a uziemieniem roboczym dla urządzeń niskiego napięcia jest inne uziemienie (uziemienia), wykonywane poza stacją.

Krajowe sieci rozdzielcze niskiego napięcia są w zdecydowanej większości wykonane w układzie TN. Doziemienie w stacji z uziemieniem wspólnym powoduje przeniesienie się napięcia uziomowego do sieci niskiego napięcia stwarzając w niej zagrożenie porażeniowe, gdyż u odbiorców na częściach przewodzących dostępnych urządzeń niskiego napięcia pojawia się napięcie U_F (rys. 14).



Rys. 14. Zastosowanie wspólnego uziemienia dla urządzeń wysokiego i niskiego napięcia. Układ sieci niskiego napięcia TN:

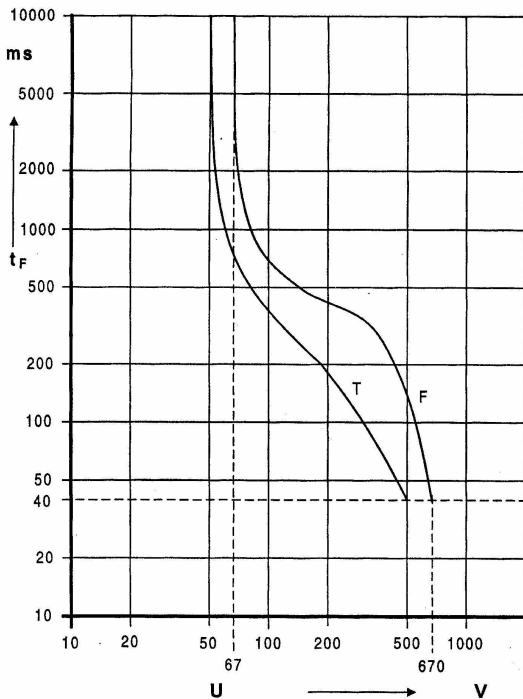
- U_0 – napięcie fazowe sieci niskiego napięcia,
- U_1 – narażenie napięciowe izolacji urządzeń niskiego napięcia w stacji,
- U_2 – narażenie napięciowe izolacji urządzeń niskiego napięcia poza stacją,
- U_F – napięcie obudowy względem ziemi urządzeń niskiego napięcia poza stacją,
- R_B – wspólne uziemienie ochronne dla urządzeń wysokiego napięcia i robocze sieci niskiego napięcia
- I_E – prąd uziomowy przy zwarciu w urządzeniach wysokiego napięcia

Tabl. 12. Największe dopuszczalne napięcia uziomowe (zakłóceniewe) U_F (krzywa F) w zależności od czasu trwania zwarcia doziemnego t_F

Czas trwania zwarcia t_F	Napięcie U_F	Czas trwania zwarcia t_F	Napięcie U_F
s	V	s	V
≥ 10	67	0,6	115
5	68	0,5	135
3	70	0,4	205
2	78	0,3	352
1	92	0,2	450
0,9	94	0,15	490
0,8	98	0,1	570
0,7	105	0,05	650

Aby nie występowało zagrożenie porażeniowe, napięcie uziomowe nie powinno przekraczać wartości określonych krzywą F na rysunku 15 lub podanych w tablicy 12. Należy się kierować postanowieniami określonymi przez normy [12, 14], gdy wymagania w nich podane są ostrzejsze niż dla urządzeń wysokiego

napięcia, których uziomy nie są połączone galwanicznie z uziomami urządzeń niskiego napięcia.



Rys. 15. Największe dopuszczalne napięcia uziomowe (krzywa F) i napięcia dotykowe (krzywa T) w zależności od czasu trwania zwarcia doziemnego t_F [12, 14]

W związku z powyższym wypadkowa rezystancja uziemienia uziomów mających połączenie z punktem neutralnym sieci niskiego napięcia nie powinna przekraczać wartości⁴

$$R_B \leq \frac{U_F}{r_E \cdot I_{k1}''} = \frac{U_F}{I_E} \quad (8)$$

gdzie

- R_B – wypadkowa rezystancja uziemienia uziomów przyłączonych do punktu neutralnego sieci TN,
- U_F – największe dopuszczalne napięcie uziomowe według krzywej F na rysunku 15,
- I_{k1}'' – prąd jednofazowego zwarcia doziemnego w sieci wyższego napięcia,
- r_E – współczynnik redukcji,
- I_E – prąd uziomowy.

Należy podkreślić, że wymagania dotyczą **wypadkowej** rezystancji uziemienia (równolegle połączone uziemienia o wypadkowej rezystancji R_B na rysunku 14) sieci TN, a nie pojedynczego uziemienia wykonanego w stacji. Pojedyncze uziemienie występuje wyjątkowo, np. w stacji abonenckiej.

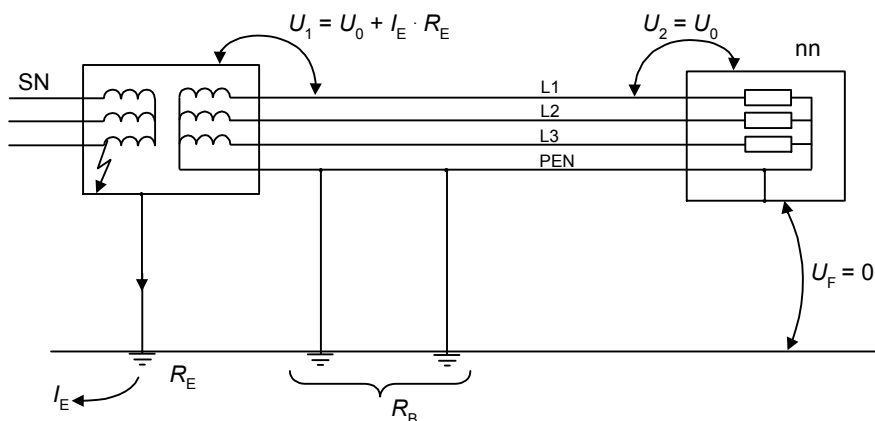
Wykonanie oddzielnego uziemienia ochronnego dla urządzeń wysokiego napięcia w stacji i roboczego dla urządzeń niskiego napięcia powoduje, że ocena zagrożenia porażeniowego w stacji dotyczy tylko uziemienia ochronnego R_E (rys. 16).

⁴ Według przepisów PBUE [29] wartość rezystancji uziemienia roboczego nie powinna przekraczać 5Ω i wartości obliczonej ze wzoru: $R_B \leq \frac{65}{I_Z}$

gdzie:

- R_B – wartość rezystancji uziemienia roboczego w Ω ,
- I_Z – wartość prądu zwarcia doziemnego w urządzeniach wysokiego napięcia.

W Rozporządzeniu Ministra Przemysłu [22] warunek jest podobny, z tą różnicą, że napięcie 65 V jest zastąpione wartością 50 V.



Rys. 16. Zastosowanie oddzielnych uziemień dla urządzeń wysokiego i niskiego napięcia. Układ sieci niskiego napięcia TN:

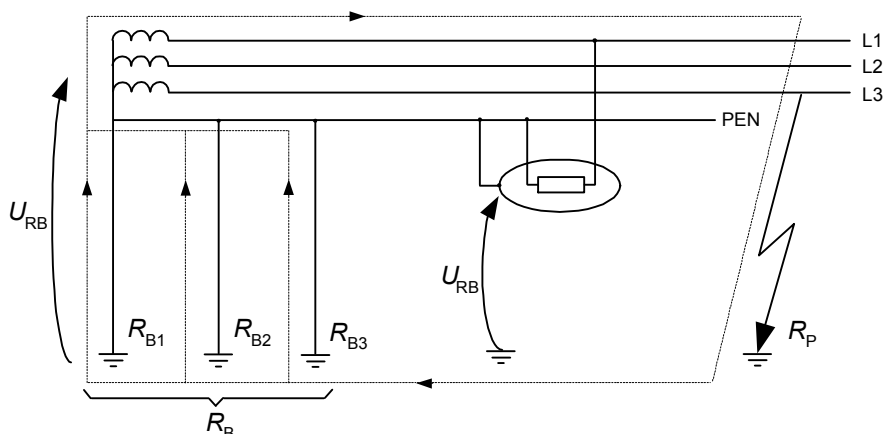
- U_0 – napięcie fazowe sieci niskiego napięcia,
- U_1 – narażenie napięciowe izolacji urządzeń niskiego napięcia w stacji,
- U_2 – narażenie napięciowe izolacji urządzeń niskiego napięcia poza stacją,
- U_F – napięcie obudowy względem ziemi urządzeń niskiego napięcia poza stacją,
- R_B – uziemienie robocze sieci niskiego napięcia
- R_E – uziemienie ochronne sieci wysokiego napięcia,
- I_E – prąd uziomowy przy zwarcie w urządzeniach wysokiego napięcia

W takiej sytuacji rezystancja uziemienia ochronnego R_E powinna być na tyle mała, aby spełniała warunki określone algorytmem przedstawionym na rysunku 4. Przy oddzielnym wykonaniu uziemień nie ma zagrożenia porażeniowego przy urządzeniach niskiego napięcia u odbiorców, nie rozpatruje się warunku podanego wzorem (8), ale występuje zagrożenie dla izolacji urządzeń niskiego napięcia w stacji, co analizuje się na etapie projektowania stacji.

Kryterium 2 – zagrożenie porażeniowe podczas doziemienia z pominięciem przewodu PEN (rozpatrywane w zasadzie wtedy, gdy występuje sieć napowietrzna niskiego napięcia o przewodach gołych)

Jeżeli sieć niskiego napięcia jest napowietrzna o przewodach gołych i układzie TN, to wartość **wypadkowej** rezystancji uziemienia powinna być na tyle mała, aby nie powstało zagrożenie porażeniowe podczas doziemienia przewodu fazowego z pominięciem przewodu PEN (rys. 17).

Tego typu zakłócenie powoduje, że potencjał punktu neutralnego nie jest równy zero, ale wynosi U_{RB} . Potencjał ten jest przenoszony na części przewodzące dostępne urządzeń niskiego napięcia sieci.



Rys. 17. Zagrożenie porażeniowe w sieci TN przy zwarcie przewodu fazowego z ziemią z pominięciem przewodu PEN

Aby nie było w takiej sytuacji zagrożenia porażeniowego, potencjał punktu neutralnego nie powinien być wyższy niż napięcie dotykowe dopuszczalne długotrwale. Wobec tego wypadkową rezystancję uziemienia R_B sieci TN wyznacza się z warunku:

$$\frac{R_B}{R_P} \leq \frac{U_L}{U_0 - U_L} = \frac{50}{230 - 50} \Rightarrow R_B \leq R_P \cdot 0,278 = 10 \cdot 0,278 = 2,78 \Omega \quad (9)$$

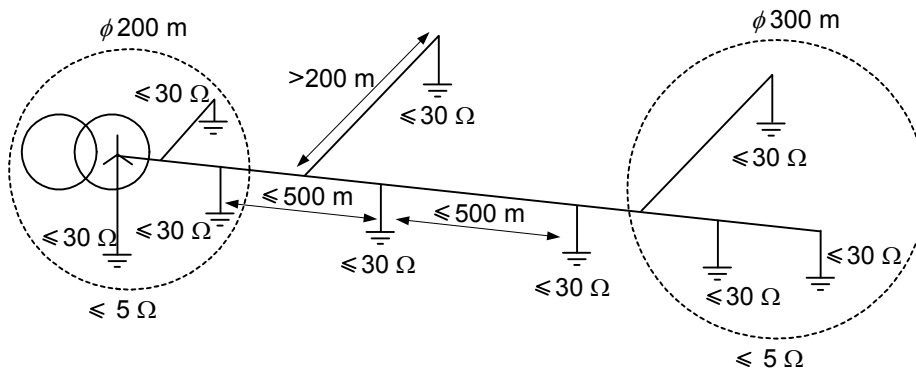
gdzie:

- U_L – napięcie dotykowe dopuszczalne długotrwale,
- U_0 – napięcie sieci względem ziemi,
- R_P – rezystancja przejścia do ziemi przewodu fazowego.

W praktyce trudno jest wyznaczyć rezystancję R_P , więc z braku danych można przyjąć wartość $R_P = 10 \Omega$. Przyjęcie takiego założenia powoduje, że **wypadkowa** rezystancja uziemienia R_B , niezależnie od innych wymagań, nie powinna być większa od wartości $R_B = 2,78 \Omega$.

Kryterium 3 – wypadkowa rezystancja uziemienia uziemień w kole o średnicy 200 m w obrębie stacji

Uziemienia powinny być tak rozmieszczone (rys. 18), aby rezystancja wypadkowa uziemień znajdujących się na obszarze koła o średnicy 200 m, zakreślonego dookoła każdej stacji zasilającej, nie przekraczała 5Ω . Ponadto stawia się wymagania co do rezystancji uziemienia pojedynczych uziemień w sieci i ich rozmieszczenia.



Rys. 18. Rozmieszczenie uziemień w sieci niskiego napięcia o układzie TN

Rezystancja pojedynczych uziemień, nie powinna przekraczać 30Ω . Uziomy o większej rezystancji uziemienia mogą być przyłączane, ale nie powinny być uwzględniane przy obliczaniu rezystancji wypadkowej. Nie wymaga się ich odłączania na czas pomiaru wypadkowej rezystancji uziemienia.

Rozmieszczenie uziemień przewodów PEN (PE) w sieci napowietrznej powinno spełniać następujące dodatkowe wymagania:

- a) na końcu każdej linii i na końcu każdego odgałęzienia o długości większej niż 200 m należy wykonać uziemienie o rezystancji nie większej niż 30Ω ,
- b) wzdłuż trasy linii długość przewodu PEN (PE) między uziemieniami o rezystancji nie większej niż 30Ω (chyba, że z innych powodów wymaga się wartości mniejszych np. dla uziemienia ograniczników przepięć) nie powinna przekraczać 500 m,
- c) na obszarze koła o średnicy 300 m zakreślonego dowolnie dookoła końcowego odcinka każdej linii i jej odgałęzień, tak aby koniec linii lub odgałęzienia znajdował się w tym kole, powinny znajdować się uziemienia o wartości wypadkowej rezystancji nie przekraczającej 5Ω , obliczonej przy uwzględnieniu jedynie tych uziemień, których rezystancja jest nie większa niż 30Ω .

W sieciach kablowych zaleca się spełnienie postanowień a) i c).

Jeżeli rezystywność gruntu jest większa lub równa $500 \Omega\text{m}$, to wartość 30Ω można zastąpić wartością $\rho_{\min}/16$ a wartość 5Ω wartością $\rho_{\min}/100$.

Z przedstawionych trzech kryteriów wynika, pojedyncze uziemienie powinno mieć nie więcej niż 30Ω . Pozostałe wymagania odnoszą się do wypadkowej rezystancji uziemienia punktu neutralnego całej sieci (kryterium 1 i 2), albo wypadkowej rezystancji uziemienia uziemień znajdujących się kole o średnicy 200 m w pobliżu stacji (kryterium 3).

Aby zmierzyć wypadkową rezystancję uziemienia całej sieci, wystarczy wykonać klasyczny pomiar rezystancji uziemienia (punkt 5.1) przyłączając się do wybranego uziemienia sieci i nie odłączając uziemień od przewodów PEN. W przypadku konieczności zweryfikowania rezystancji uziemienia pojedynczego uziomu

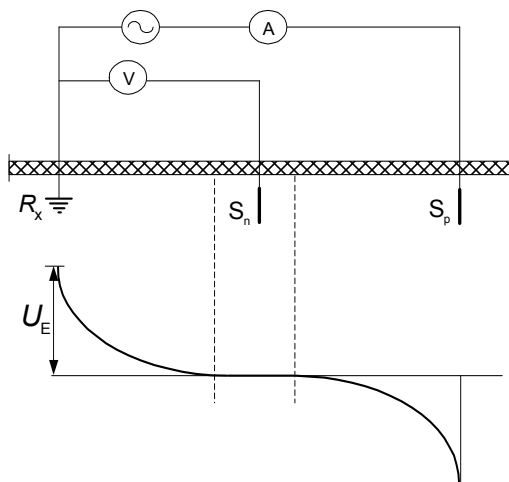
należy wykonać:

- pomiar rezystancji uziemienia metodą klasyczną odłączając uziemienie od przewodu PEN (punkt 5.1) lub
- pomiar rezystancji uziemienia metodą z dodatkowym pomiarem prądu przetwornikiem cęgowym bez odłączania uziemienia od przewodu PEN (punkt 5.2) lub
- pomiar rezystancji pętli metodą cęgową bez odłączania uziemienia od przewodu PEN i bez rozmieszczania sond pomiarowych (punkt 5.3) lub
- pomiar rezystancji uziemienia miernikiem udarowym bez odłączania uziemienia od przewodu PEN (punkt 5.4).

5. POMIARY REZYSTANCJI UZIEMIENIA

5.1. Klasyczne metody pomiarowe

W klasycznym podejściu do pomiaru rezystancji uziemienia [28], wartość mierzonej rezystancji uziemienia jest wyznaczana na podstawie ilorazu zmierzonego napięcia uziomowego U_E i wymuszanego prądu pomiarowego (uziomowego) I_E . Jest to tzw. metoda trzelektrodowa. Dla realizacji zastosowanej metody pomiaru, należy utworzyć obwód prądowy i obwód napięciowy. Zasada pomiaru jest przedstawiona na rysunku 19. Obwód prądowy będzie tworzyć źródło prądu pomiarowego, amperomierz, uziom badany R_x oraz pomocnicza sonda prądowa S_p .



Rys. 19. Zasada pomiaru rezystancji uziemienia

Przepływający przez badane uziemienie prąd wywołuje spadek napięcia na rezystancji uziemienia, który mierzy się woltomierzem wchodzącym w skład obwodu napięciowego. Istotnym elementem obwodu napięciowego jest sonda napięciowa S_n . Od jej prawidłowego umieszczenia zależy to, czy wynik pomiaru będzie poprawny. Sonda napięciowa powinna się znajdować w strefie potencjału zerowego, tzw. ziemi odniesienia. Jeżeli sonda znajduje się w strefie potencjału zerowego, to zostanie zmierzone napięcie uziomowe U_E i przy znanej wartości prądu prawidłowo zostanie oceniona wartość rezystancji uziemienia.

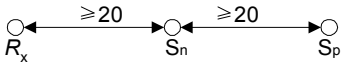
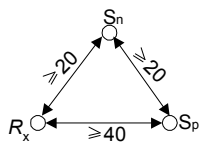
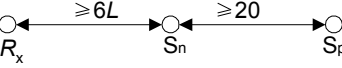
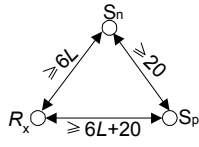
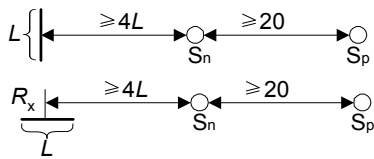
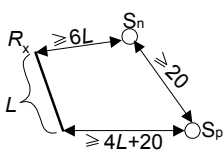
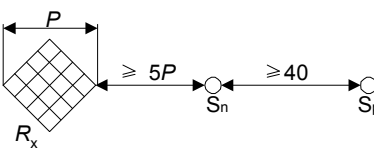
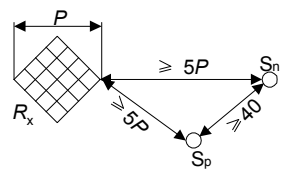
Sonda prądowa powinna być połączona ze źródłem prądu pomiarowego przewodem izolowanym, chyba że wykorzystuje się wyłączoną spod napięcia linię elektroenergetyczną. Przewód izolowany powinien być również stosowany w obwodzie napięciowym. Ponadto, aby uniezależnić się od wpływu ewentualnych prądów zakłóceń, pomiar powinien być wykonany dużym prądem. W przypadku uniwersalnych mierników prądu są niewielkie, np. 10÷200 mA, ale tak jest dobrana częstotliwość pomiarowa, żeby nie była wielokrotnością częstotliwości 50 Hz. Stosuje się częstotliwości 65, 94, 105, 111, 125, 128, 800 Hz [3, 24].

W praktyce najczęściej stosuje się układ pomiarowy, w którym uziom badany, sonda napięciowa i sonda prądowa są w jednej linii. Taki sposób pomiaru jest dopuszczalny przy wykorzystaniu niewielkiej częstotliwości i małej wartości prądu pomiarowego. Przy większych wartościach prądu i dużej częstotliwości wyniki pomiaru mogą być obciążone błędem znacznie przewyższającym dopuszczalną wartość 30% [15]. W wyniku sprzężeń elektromagnetycznych fałszowany jest wynik pomiaru. Każdorazowo należy zapoznać się ze wskazówkami zamieszczonymi w instrukcji obsługi danego miernika odnośnie do konfiguracji układu

pomiarowego. Przykładowo w instrukcji miernika wykorzystującego metodę udarową, pomiędzy obwodem napięciowym i prądowym należy zachować kąt od 60° do 180° (zaleca się kąt od 90° do 180°).

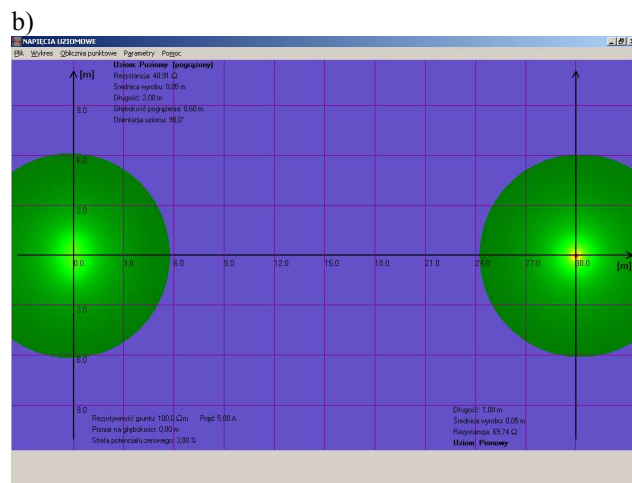
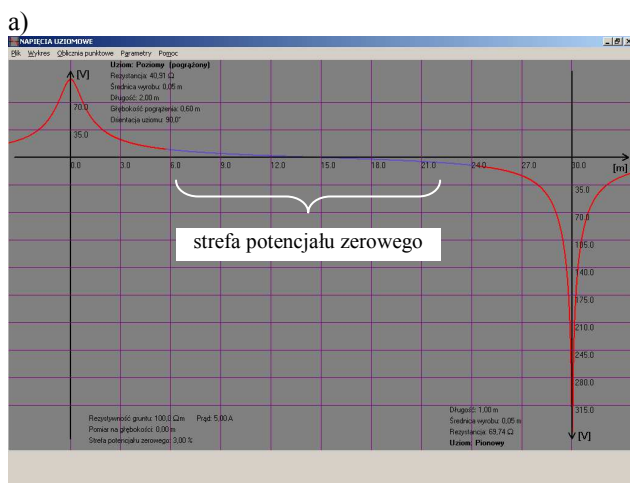
Jeżeli sonda napięciowa będzie umieszczona zbyt blisko badanego uziomu, to uzyskana z pomiarów wartość rezystancji uziemienia będzie miała wartość za małą. Jeżeli sonda napięciowa będzie zbyt oddalona od uziomu badanego, to otrzyma się za dużą wartość rezystancji uziemienia. W literaturze [28] można znaleźć wskazówki dotyczące rozmieszczenia sond pomiarowych w układzie pomiarowym (tabl. 13).

Tabl. 13. Najmniejsze dopuszczalne odległości sond pomiarowych od uziomu badanego przy pomiarze rezystancji uziemienia

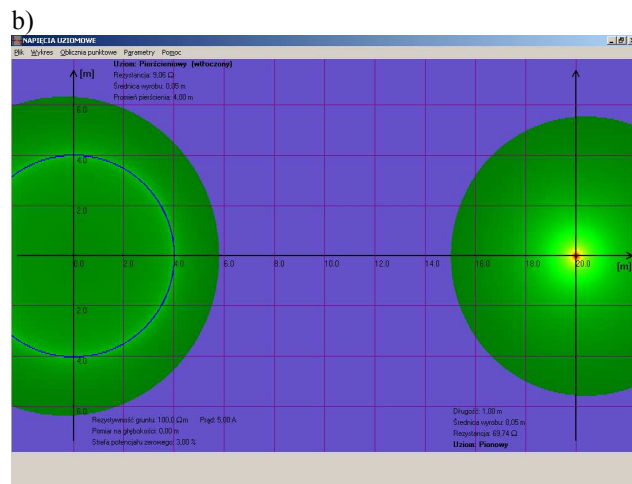
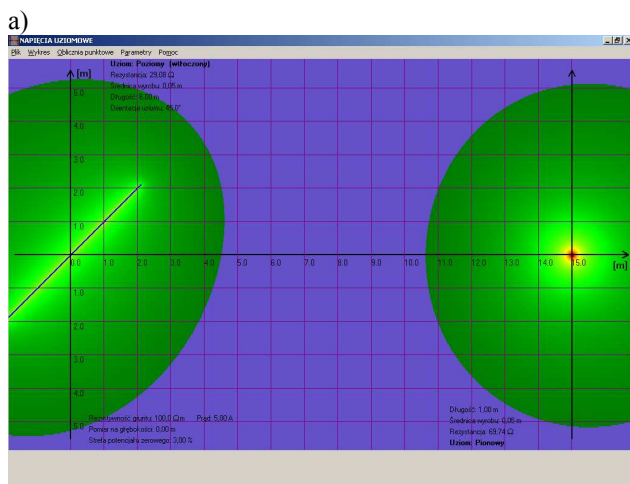
Budowa uziomu badanego R_x	Najmniejsze dopuszczalne odległości uziomu badanego R_x i uziomów pomocniczych S_p i S_n względem siebie m	
	położenie w jednej linii	położenie w wierzchołkach
Uziom pojedynczy pionowy o $L \leq 3$ m		
Uziom pionowy o $L \geq 3$ m		
Uziom poziomy o $L \geq 3$ m		
Układ uziomowy		

Jeżeli wokół obiektu o wymiarach 40×30 m zastosowano uziom otokowy, to dla zachowania zasad podanych w tablicy 13, sonda napięciowa musiałaby się znaleźć w odległości około 250 m od obiektu badanego. Uniemożliwia to pomiar za pomocą dostępnych na rynku typowych przyrządów pomiarowych. Pomiar rezystancji uziemienia może być wykonany poprawnie, nawet gdy nie są zachowane wymiary podane w tablicy 13. Istotą prawidłowego pomiaru jest znalezienie strefy potencjału zerowego, która zawsze istnieje, nawet wtedy, kiedy uziom pomocniczy prądowy znajduje się dość blisko uziomu badanego. Przy niewielkiej odległości między dwoma wspomnianymi uziomami, strefa potencjału zerowego może stanowić tylko punkt. Są narzędzia wspomagające pomiary rezystancji uziemienia w takich przypadkach [1].

Na rysunkach 20 i 21 przedstawiono sposób określania strefy potencjału zerowego za pomocą programu komputerowego opracowanego w Katedrze Elektroenergetyki Politechniki Gdańskiej. Program ten umożliwia lokalizację strefy potencjału zerowego dla różnych typów uziomów prostych. Wykonanie symulacji pomiaru pozwala na prawidłowe umieszczenie sondy napięciowej w utrudnionych warunkach pomiarowych. Na rysunku 20a pokazany jest wykres potencjału pomiędzy uziomem badanym a sondą prądową. W obszarze środkowym widoczna jest strefa potencjału zerowego. Wykresy na rysunkach 20b oraz 21a i 21b przedstawiają powierzchniowy rozkład potencjału. Jednolity kolor pomiędzy elipsoidalnymi obszarami, reprezentującymi lej potencjału każdego uziomu, oznacza strefę potencjału zerowego.



Rys. 20. Symulacja pomiaru rezystancji uziemienia i umiejscowienie strefy potencjału zerowego: a) wykres liniowy, b) wykres powierzchniowy.



Rys. 21. Umiejscowienie strefy potencjału zerowego przy pomiarze rezystancji uziemienia: a) uziemienia pionowego położonego pod kątem 45° do linii pomiaru, b) uziemienia pierścieniowego (otokowego)

Jeżeli warunki terenowe nie pozwalają na dostatecznie odległe rozmieszczenie sond pomiarowych można skorzystać też z innych metod pomiaru rezystancji uziemienia [7, 8].

Tabl. 14. Wartości współczynników k_g sezonowych zmian rezystancji uziemienia [5, 6]

Rodzaj uziomu	Rozmiar uziomu	Zmierzona rezystywność gruntu Ωm	Wartości współczynnika k_g		
			grunt w czasie pomiarów		
			suchy ¹⁾	wilgotny ²⁾	mokry ³⁾
Pojedynczy uziom poziomy ⁴⁾	$L < 30 \text{ m}$	dowolna	1,4	2,2	3,0
Uziom kratowy ⁴⁾	$S_E < 900 \text{ m}^2$	$\rho \leq 200$	1,3	1,8	2,4
		$\rho > 200$	1,4	2,2	3,0
	$S_E \geq 900 \text{ m}^2$	$\rho \leq 200$	1,1	1,3	1,4
		$\rho > 200$	1,2	1,6	2,0
Uziom pionowy	$L = 2,5 \div 5 \text{ m}$	dowolna	1,2	1,6	2,0
	$L > 5 \text{ m}$	dowolna	1,1	1,2	1,3

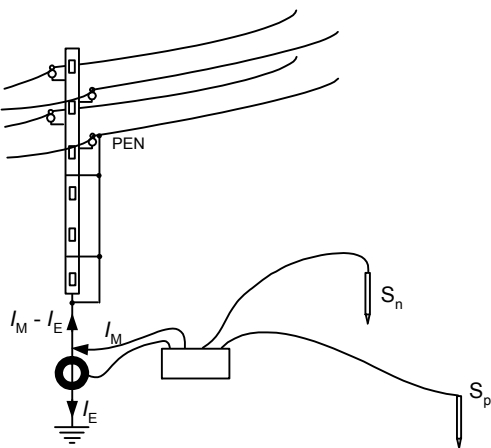
1) W okresie od czerwca do września (włącznie) z wyjątkiem trzech dni po długotrwałych opadach.
2) Poza okresem zaliczanym do ¹⁾, z wyjątkiem trzech dni po długotrwałych opadach lub stopieniu śniegu.
3) W ciągu trzech dni po długotrwałych opadach lub stopieniu śniegu.
4) Głębokość ułożenia uziomu od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

Niezależnie od zastosowanej metody pomiarowej zaleca się uwzględnić wpływ wilgotności gruntu na wynik pomiaru. W tablicy 14 podano, dla różnych uziomów, współczynniki korekcyjne uwzględniające wilgotność gruntu w czasie pomiarów. Zmierzoną wartość rezystancji uziemienia mnoży się przez współczynnik korekcyjny. Pozwala to uzyskać wartość rezystancji uziemienia w najmniej korzystnej porze roku, np. po długotrwałej suszy.

5.2. Metoda z dodatkowym pomiarem prądu przetwornikiem cęgowym

Metodę z dodatkowym pomiarem prądu przetwornikiem cęgowym można zastosować do badania pojedynczych uziemień, np. stacji SN/nn lub słupów w sieci niskiego napięcia (rys. 22). Uziemienia tej sieci są połączone za pomocą przewodu PEN i dzięki przetwornikowi cęgowemu nie trzeba ich odłączać od przewodu PEN. Jeżeli w gruncie znajduje się dodatkowo płaskownik łączący ze sobą wiele uziemień, to metoda ta jest nieprzydatna.

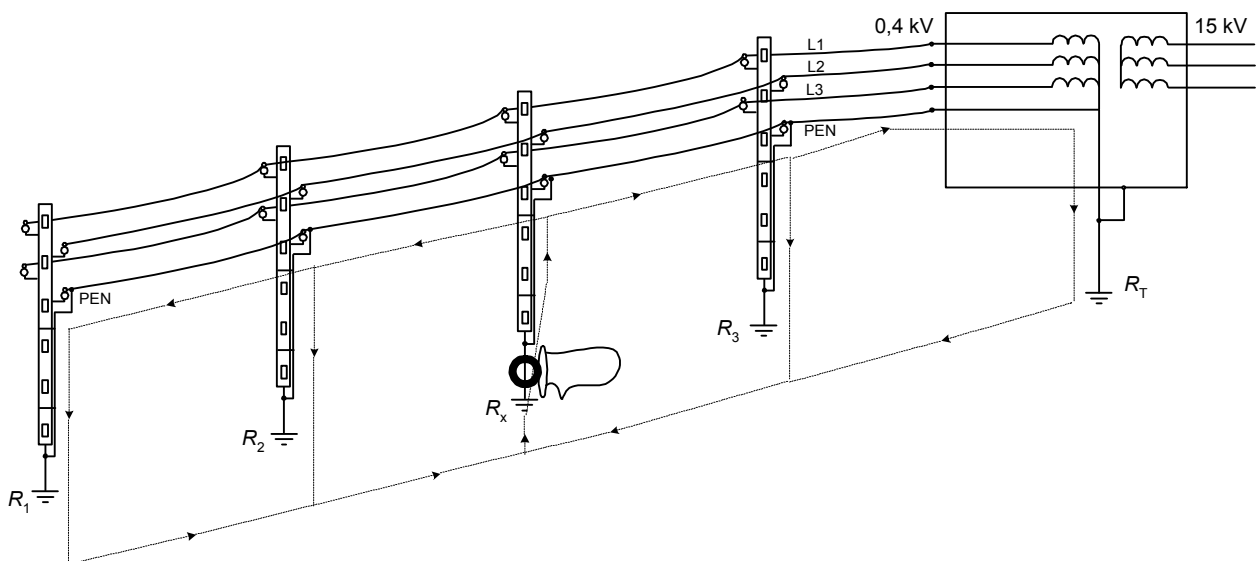
Należy pamiętać, że przetwornik cęgowy powinien znajdować się poniżej punktu przyłączenia miernika do przewodu uziemiającego. W przeciwnym przypadku zmierzony zostałby prąd, który płynie do pozostałych uziemień systemu i wynik pomiaru nie będzie poprawny.



Rys. 22. Pomiar rezystancji uziemienia metodą trzelektrową z dodatkowym przetwornikiem cęgowym; I_M – prąd wymuszany przez miernik; I_E – prąd płynący pomiarowy płynący przez badane uziemienie

5.3. Metoda cęgowa bez rozmieszczania sond pomiarowych

Stosując tę metodę [19] – (rys. 23) – można zmierzyć rezystancję pętli będącą sumą rezystancji R_x i rezystancji R_Σ (w układzie TN R_Σ to wypadkowa wynikająca z połączenia równoległego rezystancji R_1 , R_2 , R_3 i R_T). Nie ma konieczności rozmieszczania sond pomiarowych, ani odłączania uziemień od przewodu PEN. Należy jednak pamiętać, że wynik pomiaru jest zawyżony (błąd w kierunku bezpiecznym).



Rys. 23. Pomiar impedancji/rezystancji pętli zwarciowej metodą cęgową w układzie TN

5.4. Metoda udarowa pomiaru rezystancji (impedancji) uziemienia

Pomiar rezystancji uziemienia można wykonać metodą udarową. Jeżeli uziom jest przeznaczony do odprowadzania prądów piorunowych (maszty ze zwodami pionowymi na terenie stacji) zaleca się, a w niektórych przypadkach nawet wymaga wykonywać pomiar metodami udarowymi. Prądy piorunowe charakteryzują się bardzo dużą stromością narastania wynoszącą np. 100 kA/μs [26]. Przy tego typu przebiegach prądu należy uwzględniać indukcyjne spadki napięcia wzdłuż uziomów. W warunkach udarowych zwiększanie długości uziomu powoduje zmniejszanie rezystancji uziemienia tylko do pewnej granicy. Efektywną długość l_u uziomu prostego można wyznaczyć [26] z następującego wzoru:

$$l_u \leq \frac{\pi}{2} \cdot \sqrt{\frac{T_{cz} \cdot \rho}{L_j}} \quad (10)$$

gdzie

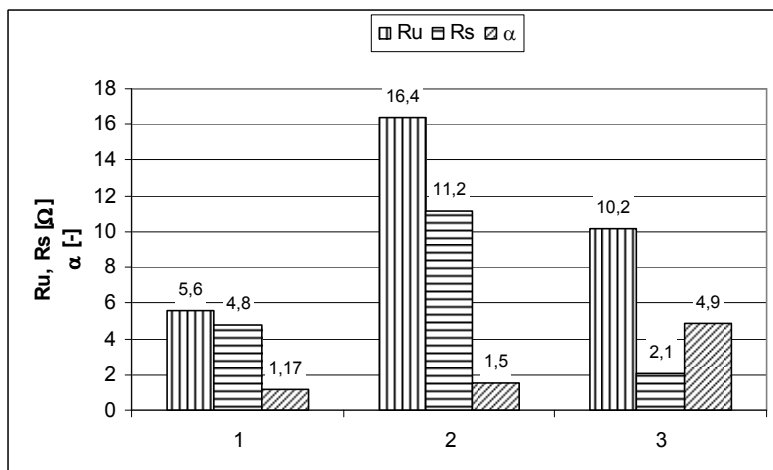
T_{cz} – czas trwania czoła udaru,

ρ – rezystywność gruntu,

L_j – indukcyjność jednostkowa uziomu (1÷2 μH/m).

Zakładając, że czas trwania czoła udaru wynosi 4 μs, indukcyjność jednostkowa 2 μH/m, a rezystywność gruntu 100 Ωm, efektywna długość uziomu będzie równa 22 m. Przy rezystywności gruntu równej 500 Ωm efektywna długość uziomu wzrośnie do 50 m. Oznacza to, że w pozostała część uziomu w zasadzie nie bierze udziału w odprowadzaniu prądu do ziemi. Dzięki temu nie ma konieczności rozłączania złączy kontrolnych na czas pomiaru. Sąsiednie uziomy połączone galwanicznie np. poprzez linkę odgromową lub przewód PEN nie biorą znaczącego udziału w odprowadzaniu prądu do ziemi i nie wpływają na wynik pomiaru.

Rysunek 24 przedstawia przykładowe wyniki pomiaru rezystancji uziemienia różnych uziomów metodą statyczną i udarową. Widać wyraźną różnicę pomiędzy rezystancją uziemienia zmierzoną metodą statyczną a metodą udarową. W większości przypadków wartość rezystancji uziemienia uzyskana miernikiem udarowym jest większa od rezystancji statycznej. Stosunek tych dwóch rezystancji określa się jako współczynnik udarowy rezystancji uziemienia α .

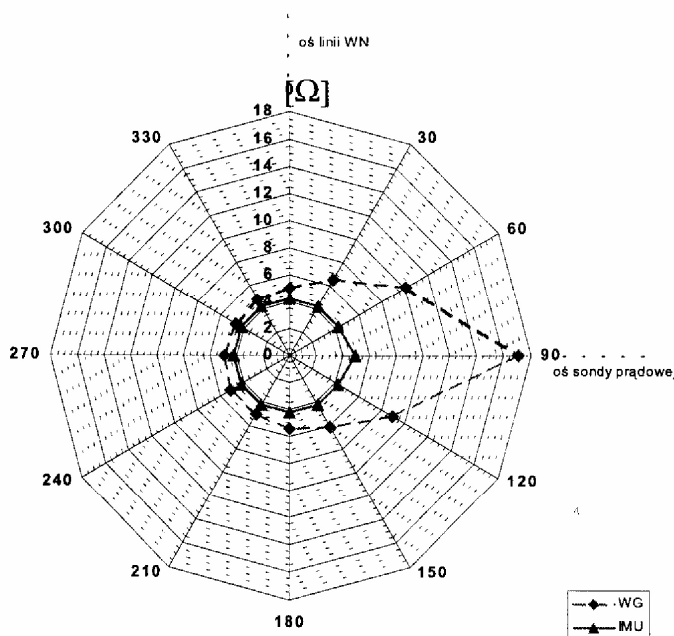


Rys. 24. Porównanie wyników pomiaru rezystancji uziemienia metodą udarową R_u i metodą statyczną R_s ; α – współczynnik udarowy rezystancji uziemienia. 1 – uziomy skupione, 2 – uziomy otokowe słupów kratowych, 3 – rozległe uziomy linii 15 kV [27]

Stosując metodę udarową należy zwrócić szczególną uwagę na wzajemne ułożenie przewodów obwodów napięciowego i prądowego. Rysunek 25 przedstawia wpływ wzajemnego ułożenia tych przewodów dla metody udarowej (pomiar miernikiem WG-307) i metody statycznej z wykorzystaniem popularnego miernika IMU. Przy pomiarze miernikiem IMU wyniki niewiele różnią się przy ułożeniu obwodu napięciowego i prądowego w jednej linii od wyników uzyskanych przy wzajemnym ułożeniu obwodów pod kątem 90° czy 180°.

Inaczej jest przy pomiarze miernikiem WG-307. W tym przypadku uzyskany wynik pomiaru dla ułożenia obwodu napięciowego i prądowego w jednej linii może mieć wartość kilkukrotnie większą od wyniku uzyskanego przy wzajemnym ułożeniu tych obwodów pod kątem 90° czy 180°. Przy metodzie udarowej należy koniecznie przestrzegać zasad pomiaru podanych w instrukcji miernika odnośnie do wzajemnego ułożenia

wspomnianych obwodów. W przypadku miernika WG-307 pomiędzy obwodem napięciowym i prądowym należy zachować kąt od 60° do 180° (zaleca się kąt od 90° do 180°).



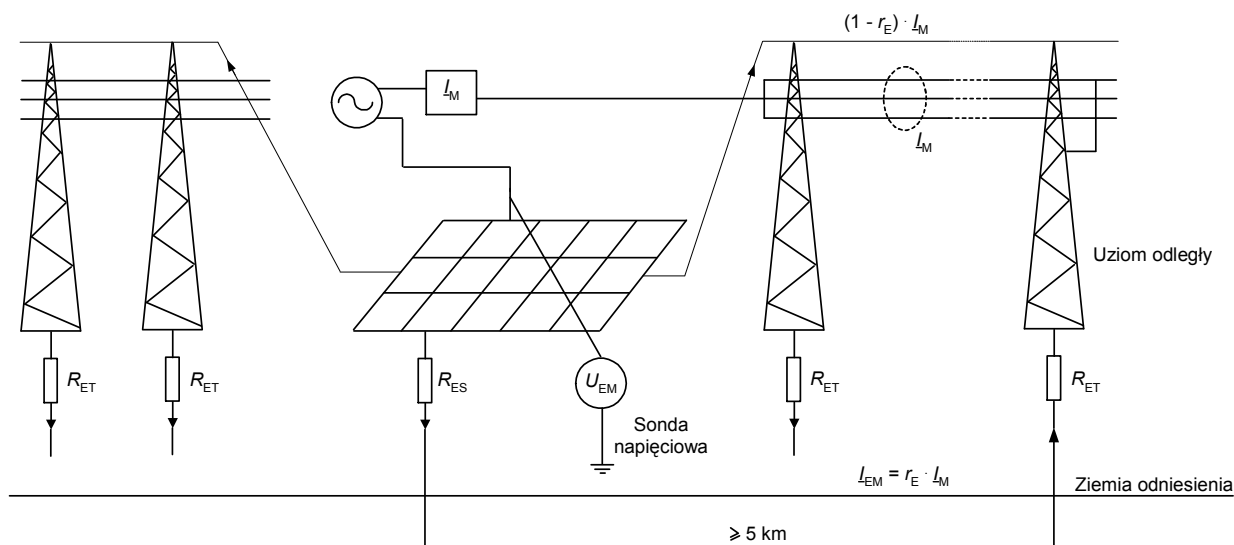
Rys. 25. Wpływ wzajemnego ułożenia przewodów obwodu napięciowego i prądowego dla pomiaru wykonywanego metodą statyczną – miernik IMU i metodą udarową – miernik WG-307 [27]

5.5. Pomiary rezystancji uziemienia uziomów rozległych

Rozległe układy uziomowe, jak np. w stacjach elektroenergetycznych najwyższych napięć, wymagają stosowania specjalnych metod pomiarowych [9, 23, 28]. Ze względu na znaczny obszar zajmowany przez uziemienie, nierzadko kilka hektarów, należy zachować znaczne odległości sondy prądowej i sondy napięciowej od uziomu badanego. Potrzebne prądy pomiarowe znacznie przekraczają wartości, które pozwalają uzyskać uniwersalne mierniki.

Do pomiaru rezystancji uziemienia uziomów rozległych, np. uziomów stacji najwyższych napięć należy stosować metodę, która w normie [13] nosi nazwę metody wielkoprądowej. Schemat pomiarowy z użyciem tej metody jest przedstawiony na rysunku 26.

W czasie pomiarów przewody odgromowe oraz przewodzące powłoki kabli normalnie połączone z uziomem badanym nie powinny być od niego odłączone. Odległość sondy prądowej od uziomu badanego powinna być możliwie duża, nie mniejsza niż 5 km. Przy pomiarze rezystancji uziemienia mniejszych obiektów można zastosować mniejsze odległości. Prąd pomiarowy powinien być na tyle duży, aby mierzone napięcie uziomowe było wyraźnie większe niż spodziewane napięcia zakłócające o częstotliwości sieciowej. Jeżeli wartość skuteczna prądu wynosi co najmniej 50 A, to warunek ten można uznać za spełniony.



Rys. 26. Przykładowy schemat układu do pomiaru rezystancji (impedancji) uziemienia metodą wielkoprądową [13]:

- I_M – prąd pomiarowy,
- I_{EM} – prąd uziomowy występujący podczas pomiarów (nie jest mierzony),
- r_E – współczynnik redukcyjny,
- R_{ES} – rezystancja uziemienia uziomu kratowego,
- R_{ET} – rezystancja uziemienia uziomu słupa,
- U_{EM} – napięcie uziomowe wywołane prądem pomiarowym

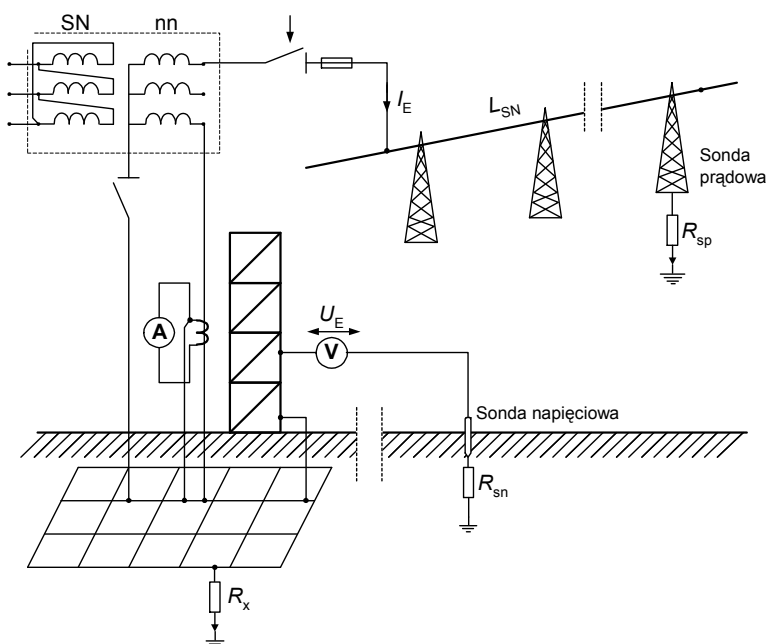
Szukaną impedancję (rezystancję) uziemienia można obliczyć następująco:

$$Z_E = \frac{U_{EM}}{I_M \cdot r_E} \quad (11)$$

gdzie:

- U_{EM} – zmierzone napięcie uziomowe,
- I_M – prąd pomiarowy,
- r_E – współczynnik redukcyjny (kablowej, napowietrznej); dla linii napowietrznej bez przewodów ogromnych i kabli bez przewodzących powłok i osłon $r_E = 1$.

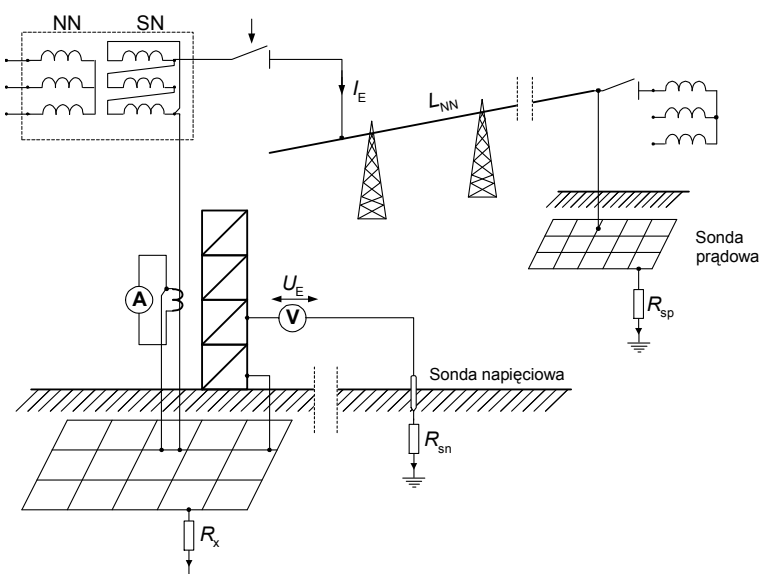
Układ opisany powyżej jest zbliżony do stosowanych w Polsce od lat układów pomiarowych metody małoprądowej i metody średnioprądowej. W metodzie małoprądowej (rys. 27) źródłem prądu jest uzwojenie dolnego napięcia transformatora potrzeb własnych 15/0,4 kV. Sondę prądową stanowi uziemienie słupa linii średniego napięcia np. 15 kV, wyłączonej spod napięcia. Sondę prądową z uziomem badanym R_x łączy przewód fazowy linii. Sonda napięciowa – wykonany specjalnie do tego celu uziom prosty – jest połączona z uziomem badanym za pomocą przewodu izolowanego. Wartość prądu płynącego w obwodzie jest zawarta w granicach od kilkunastu do stu kilkudziesięciu amperów. Pomiary wartości napięcia uziomowego U_E i prądu pomiarowego I_E są dokonywane za pomocą klasycznych mierników. Prądy o takiej wartości mogą płynąć długotrwale.



Rys. 27. Zasada pomiaru metodą małoprądową

Na podobnej zasadzie wykonuje się pomiar metodą średnioprądową (rys. 28). Źródłem prądu jest transformator NN/SN, natomiast jako sondę prądową wykorzystuje się uziom sąsiedniej stacji lub słupa linii NN wyłączonej spod napięcia. Uziom badany z sondą prądową jest połączony za pomocą przewodu fazowego wyłączonej spod napięcia linii NN. Sonda napięciowa i jej połączenie z uziomem badanym w tej metodzie są analogiczne, jak w metodzie małoprądowej. W metodzie średnioprądowej prądy pomiarowe zawierają się w granicach 200÷500A. Można dopuścić dość długi ich przepływ. Zastosowane przyrządy pomiarowe są podobne, jak w metodzie małoprądowej.

W Polsce znana jest jeszcze jedna metoda zwana metodą zwarciovą. Wymuszane prądy osiągają wartości 10 kA, co wiąże się z koniecznością ograniczania czasu jego przepływu i stosowania oscyloskopów. Ze względu na trudności techniczne w realizacji tej metody, nie jest ona szeroko stosowana.



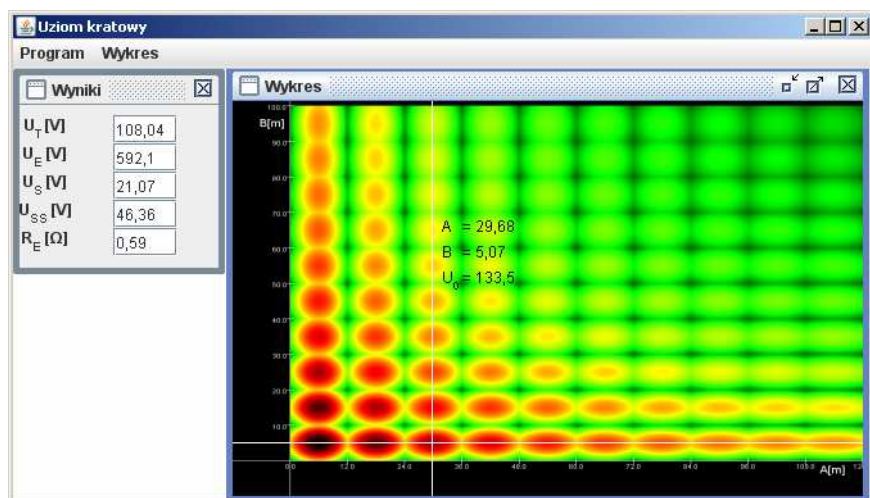
Rys. 28. Zasada pomiaru metodą średnioprądową

Przydatnym narzędziem pozwalającym wstępnie ocenić zagrożenie porażeniowe w stacji elektroenergetycznej z uziomem kratowym, jest kolejny program komputerowy opracowany w Katedrze Elektroenergetyki Politechniki Gdańskiej [2]. Na rysunku 29 przedstawiono rozkład potencjału na powierzchni gruntu w stacji z uziomem kratowym.

Program analizując rozkład potencjałów na powierzchni gruntu wyznacza:

- rozkład potencjałów wzdłuż boku A uziomu (wykres liniowy),

- rozkład potencjałów na powierzchni poziomej – widok z góry układu uziomowego (wykres powierzchniowy – rys. 29),
- napięcie dotykowe rażeniowe U_T , napięcie uziomowe U_E , napięcie krokowe rażeniowe U_S , napięcie krokowe spodziewane U_{SS} oraz rezystancję uziemienia R_E .



Rys. 29. Rozkład potencjału na powierzchni gruntu w stacji z uziomem kratowym. Zwarcie w narożniku kraty

Dla każdego punktu (pixela) wykresu obliczany jest potencjał pochodzący od oczka uziomu; porównywany jest do skali kolorystycznej i nadaje się mu odpowiedni kolor od ciemnej zieleni do ciemnej czerwieni poprzez kolory: jasnozielony, żółty, jasnoczerwony. Barwy oznaczają odpowiednie wysokości potencjałów, kolor czerwony oznacza wysokie potencjały, kolor zielony – niskie. Następnie rysowany jest rozkład potencjałów, co widać na rysunku 29. Dokładnego określenia potencjału w dowolnym punkcie na wykresie można dokonać za pomocą myszki – przesuwając jej wskaźnik w dowolne miejsce ukaże się wyliczona wartość.

6. WYMAGANIA STAWIANE INSTALACJI UZIEMIAJĄCEJ ZE WZGLĘDU NA OCHRONĘ ODGROMOWĄ I PRZECIWPRIĘCIOWĄ

Wymagania stawiane instalacji uziemiającej w stacjach wysokiego napięcia ze względu na ochronę odgromową i przeciwprzebieciową są z reguły łagodniejsze niż ze względu na ochronę przeciwporażeniową. Wartość rezystancji uziemienia w przypadku stacji najwyższych napięć wynosi poniżej jednego oma, a co najwyżej kilka omów w przypadku stacji SN/nn. To wystarcza z punktu widzenia ochrony odgromowej i przeciwprzebieciowej.

Z punktu widzenia ochrony odgromowej ważne jest, aby prąd był rozpraszany do ziemi w wielu kierunkach. Korzystne jest więc przyłączanie przewodów uziemiających instalacji odgromowej do węzła uziomu kratowego, a nie pośrodku boku oka kraty. Dobrze, jeżeli w pobliżu wykonano dodatkowe uziomy pionowe. To rozwiązanie zmniejsza udarową rezystancję uziemienia.

7. WNIOSKI

Sprawdzanie instalacji uziemiającej w stacjach elektroenergetycznych powinno uwzględniać bezpieczeństwo obsługi poruszającej się na terenie stacji oraz osób postronnych, które mogą przebywać w jej pobliżu, a także skuteczność ochrony odgromowej i przeciwprzebieciowej. Ocena instalacji uziemiającej powinna być dokonana na podstawie oględzin przewodów uziemiających, pomiaru rezystancji uziemienia, napięcia uziomowego, ewentualnie napięć dotykowych spodziewanych i napięć dotykowych rażeniowych. Należy zwrócić uwagę na to, że zgodnie z aktualnymi normami z punktu widzenia zagrożenia porażeniowego ważna jest wartość napięcia uziomowego (ew. napięcia dotykowego), a nie rezystancja uziemienia pojedynczego uziomu.

8. BIBLIOGRAFIA

1. Czapp S., Orlikowski J.: Wspomagana komputerowo lokalizacja strefy potencjału zerowego w eksploatacyjnych badaniach uziemień. W: Zastosowanie Komputerów w Nauce i Technice 2006. Zeszyty Naukowe Wydziału Elektrotechniki i Automatyki, Nr 22, Politechnika Gdańska, Gdańsk 2006, s. 25-30.

2. Czapp S., Mościński K.: Wspomagane komputerowo projektowanie uziomów kratowych stacji elektroenergetycznych. Zastosowanie Komputerów w Nauce i Technice 2010. Zeszyty Naukowe Wydziału Elektrotechniki i Automatyki Politechniki Gdańskiej, Nr 28, Politechnika Gdańska, Gdańsk 2010, s. 47-50.
3. Halicki L.: Mierniki rezystancji uziemienia. Elektroinstalator, 1999, nr 3.
4. Jabłoński W.: Uziemienia w sieciach, instalacjach i urządzeniach elektroenergetycznych. Podręcznik INPE dla elektryków. Zeszyt 12, listopad 2006.
5. Jabłoński W.: Ochrona przeciwporażeniowa w urządzeniach elektroenergetycznych niskiego i wysokiego napięcia. WNT, Warszawa 2005.
6. Jabłoński W.: Instalacje uziemiające. Część 6. Rezystancja statyczna i uderzeniowa uziomów. Miesięcznik SEP „Informacje o Normach i Przepisach Elektrycznych”, 2004, nr 59-60, s. 36-46.
7. Koczorowicz T.: Metody pomiaru rezystancji uziemienia (1). Elektroinstalator, 2006, nr 10.
8. Koczorowicz T.: Metody pomiaru rezystancji uziemienia (2). Elektroinstalator, 2006, nr 11.
9. Koszałuk R.: Doświadczenia wielu lat badań uziemień. Biuletyn SEP „Informacje o Normach i Przepisach Elektrycznych”, 2002, nr 47, s. 3-13.
10. Koszałuk R.: Ochrona ludzi od porażenia napięciem dotykowym w instalacjach wysokiego napięcia. Projekt nowelizacji przepisów. W: Przepisy Budowy Urządzeń elektroenergetycznych. Wydawnictwa Przemysłowe WEMA. Warszawa 1997.
11. Musiał E.: Powszechnie uznane reguły techniczne. Biuletyn SEP „Informacje o Normach i Przepisach Elektrycznych”, 2002, nr 46, s. 3-17.
12. N SEP-E-001 Sieci elektroenergetyczne niskiego napięcia. Ochrona przeciwporażeniowa.
13. PN-E-05115:2002 Instalacje elektroenergetyczne prądu przemiennego o napięciu wyższym od 1 kV.
14. PN-IEC 60364-4-442:1999 Instalacje elektryczne w obiektach budowlanych. Ochrona dla zapewnienia bezpieczeństwa. Ochrona przed przepięciami. Ochrona instalacji niskiego napięcia przed przejściowymi przepięciami i uszkodzeniami przy doziemieniach w sieciach wysokiego napięcia.
15. PN-EN 61557-5:2004 Bezpieczeństwo elektryczne w niskonapięciowych sieciach elektroenergetycznych o napięciach przemiennych do 1 kV i stałych do 1,5 kV. Urządzenia przeznaczone do sprawdzania, pomiarów lub monitorowania środków ochronnych. Część 5: Rezystancja uziemień.
16. PN-EN 50522:2011 Uziemienie instalacji elektroenergetycznych prądu przemiennego o napięciu wyższym od 1 kV (oryg.).
17. PN-EN 61936-1:2011 Instalacje elektroenergetyczne prądu przemiennego o napięciu wyższym od 1 kV – Część 1: Postanowienia ogólne (oryg.).
18. PN-EN 61936-1:2011/AC:2011 Instalacje elektroenergetyczne prądu przemiennego o napięciu wyższym od 1 kV – Część 1: Postanowienia ogólne (oryg.).
19. PN-HD 60364-6:2008 Instalacje elektryczne niskiego napięcia. Część 6: Sprawdzanie.
20. Raport techniczny IEC 479-1. Skutki działania prądu na ludzi i zwierzęta domowe.
21. Rozporządzenie Ministra Infrastruktury z dnia 10 grudnia 2010 r. zmieniające rozporządzenie w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać budynki i ich usytuowanie (Dz.U. z 2010, nr 239, poz. 1597).
22. Rozporządzenie Ministra Przemysłu z dnia 8 października 1990 r. w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać urządzenia elektroenergetyczne w zakresie ochrony przeciwporażeniowej. Załącznik 2. (Dz.U. z 1990, Nr 81, poz. 473).
23. Skliński R.: Ochrona przed dotykiem pośrednim w miejskich układach elektroenergetycznych SN z punktem neutralnym uziemionym przez rezystor. Konferencja Bezpieczeństwo Elektryczne ELSAF 2001, Wrocław, wrzesień 2001, s. 229-238.
24. Staciwa K.: Pomiary rezystancji uziemienia i połączeń wyrównawczych miernikami serii MRU-100. W: Zmiany prawne w dziedzinie elektryki związane z przystąpieniem Polski do Unii Europejskiej. Gdańskie Dni Elektryki. Oddział Gdański SEP, Gdańsk 2003, s. 75-80.
25. Ustawa Prawo budowlane z dnia 7 lipca 1994 r. (Dz.U. z 1994, Nr 89, poz. 414 z późn. zm.).
26. Wojtas S., Galewski M., Wołoszyk M.: Badania właściwości uderzeniowych uziemień linii elektroenergetycznych. W: Postęp w dziedzinie ochrony odgromowej i jego znaczenie dla nowoczesnych systemów oraz urządzeń energetycznych. Seminarium poświęcone pamięci Profesora Stanisława Szpora w 90 rocznicę jego urodzin. Politechnika Gdańska, Oddział Gdański SEP, Gdańsk, wrzesień 1999, s. 55-62.
27. Wojtas S., Wołoszyk M., Galewski M.: Możliwości pomiaru właściwości uziemień odgromowych w warunkach uderzeniowych. W: Ochrona przed zakłóceniami w instalacjach i sieciach elektroenergetycznych.

Gdańskie Dni Elektryki. Oddział Gdański SEP, Gdańsk 2002, s. 105-118.

28. Wołkowiński K.: Uziemienia urządzeń elektroenergetycznych. WNT, Warszawa 1967.

29. Zarządzenie Ministra Górnictwa i Energetyki oraz Ministra Budownictwa i Przemysłu Materiałów Budowlanych z dnia 5 października 1966 r. w sprawie warunków technicznych, jakim powinna odpowiadać ochrona przeciwporażeniowa w urządzeniach elektroenergetycznych o napięciu wyższym niż 1 kV. (Dz.B. z 1966 r. nr 17, poz. 70). W: Przepisy Budowy Urządzeń Elektroenergetycznych. Zeszyt 7. Ochrona przeciwporażeniowa w urządzeniach elektroenergetycznych o napięciu wyższym niż 1 kV. Instytut Energetyki.

Dane bibliograficzne:

Czapp S.: Ocena stanu instalacji uziemiającej w stacjach elektroenergetycznych wysokiego napięcia // Informacje o Normach i Przepisach Elektrycznych, Miesięcznik SEP, 2011, R. 17, nr 145 (październik 2011), s. 3-38.