Przewodnik po pomiarach

OCHRONA PRZECIWPORAŻENIOWA W INSTALACJACH NISKIEGO NAPIĘCIA - SAMOCZYNNE WYŁĄCZANIE ZASILANIA

prof. dr hab. inż. Stanisław Czapp

Mierzymy globalnie

Sonel S.A. 2024
Wszelkie prawa zastrzeżone

Ochrona przeciwporażeniowa w instalacjach niskiego napięcia - samoczynne wyłączanie zasilania

prof. dr hab. inż. Stanisław Czapp

Spis treści

1 Wstęp 5
2 Układy sieci niskiego napięcia 6
3 Istota samoczynnego wyłączania zasilania 9
4 Samoczynne wyłączanie zasilania w układzie TN 10
5 Samoczynne wyłączanie zasilania w układzie TT 15
6 Samoczynne wyłączanie zasilania w układzie IT 18
7 Samoczynne wyłączanie zasilania a napięcia dotykowe 21
8 Sprawdzanie skuteczności samoczynnego wyłączania zasilania 24
8.1 Wprowadzenie 24
8.2 Pomiar impedancji pętli zwarciowej 25
8.3 Pomiar rezystancji uziemienia 35
9 Pomiar napięcia dotykowego 38
10 Podsumowanie 39
11 Bibliografia 39

Opracowanie omawia samoczynne wyłączanie zasilania, które jest najpowszechniej stosowanym środkiem ochrony przeciwporażeniowej przy uszkodzeniu w instalacjach niskiego napięcia. Przedstawiono wymagania norm odnoszące się do stosowania tego środka ochrony w układach sieci TN, TT oraz IT. Omówiono zasady obliczeniowej i pomiarowej jego weryfikacji, której dokonuje się w ramach sprawdzania odbiorczego lub okresowego instalacji elektrycznych. Zwrócono też uwagę na problemy interpretacyjne związane z samoczynnym wyłączaniem zasilania.

1 Wstęp

Ogólne zasady ochrony przeciwporażeniowej, zarówno w odniesieniu do systemów niskiego napięcia, jak i wysokiego napięcia, są zawarte w normie PN-EN 61140 [16]. Norma ta określa m.in. podstawową zasadę ochrony przed porażeniem elektrycznym, która brzmi następująco:
części czynne niebezpieczne nie powinny być dostępne, a części przewodzące dostępne nie powinny być niebezpieczne:

- w warunkach normalnych (przy braku uszkodzenia),
- w przypadku pojedynczego uszkodzenia.

Aby części czynne nie były niebezpieczne, należy stosować ochronę przeciwporażeniową podstawową (ochronę przed dotykiem bezpośrednim), natomiast w przypadku pojedynczego uszkodzenia, części przewodzące dostępne nie będą wprowadzać zagrożenia, gdy zastosuje się ochronę przy uszkodzeniu (ochronę przy dotyku pośrednim, ochronę dodatkową).
W odniesieniu do instalacji niskiego napięcia środki ochrony przeciwporażeniowej są określone w normie PN-HD 60364-4-41 [13]. Norma ta wymienia następujące środki ochrony podstawowej:

- izolacja podstawowa,
- przegrody lub obudowy,
- przeszkody,
- umieszczenie poza zasięgiem ręki.

Jako ochronę przy uszkodzeniu należy stosować następujące środki:

- samoczynne wyłączanie zasilania,
- izolacja podwójna lub wzmocniona,
- separacja elektryczna,
- izolowanie stanowiska,
- bardzo niskie napięcie SELV lub PELV,
- nieuziemione połączenia wyrównawcze miejscowe.

W ramach ochrony przeciwporażeniowej w instalacjach niskiego napięcia wyróżnia się jeszcze jedną grupę środków ochrony – ochronę przeciwporażeniową uzupełniającą. Są to niżej wymienione dwa środki techniczne, które mają chronić, gdy ochrona podstawowa zawodzi lub zostaje ominięta (np. dotknięcie gołego przewodu liniowego), a ochrona przy uszkodzeniu nie zapobiega rażeniu:

- zabezpieczenia różnicowoprądowe wysokoczułe ($I_{\Delta n} \leq 30$ mA),
- połączenia wyrównawcze.

Niniejsze opracowanie poświęcono środkowi ochrony samoczynne wyłączanie zasilania, który jest najpowszechniej stosowany, ale też z nim jest związanych najwięcej problemów i nieporozumień interpretacyjnych, zarówno podczas projektowania instalacji, jak i w trakcie jej sprawdzania. Przedstawiono ideę tego środka ochrony, wymagania norm w zakresie jego projektowania, a także omówiono zasady weryfikacji skuteczności samoczynnego wyłączania zasilania, dokonywanej podczas sprawdzania odbiorczego lub okresowego instalacji elektrycznych.

2 Układy sieci niskiego napięcia

Ochrona przeciwporażeniowa w instalacjach niskiego napięcia, a w szczególności warunki skuteczności samoczynnego wyłączania zasilania, są powiązane z rodzajem układu sieci. Zgodnie z normą PN-HD 60364-1 [12] stosuje się niżej podane literowe oznaczanie układu sieci.
Pierwsza litera oznacza powiązanie źródła zasilania z ziemią. Mogą to być litery:

T - występuje bezpośrednie połączenie z ziemią jednego punktu, zwykle punktu neutralnego, a jeżeli jest on niedostępny, to przewodu liniowego,

I - informuje, że części czynne są izolowane od ziemi lub jeden punkt jest połączony z ziemią przez dużą impedancję.

Druga litera oznacza powiązanie części przewodzących dostępnych instalacji, czyli zwykle u odbiorców, z ziemią. Wyróżnia się następujące litery:

T - występuje bezpośrednie połączenie części przewodzących dostępnych z ziemią (uziomem); ma to być uziom niezależny od uziomu źródła zasilania,

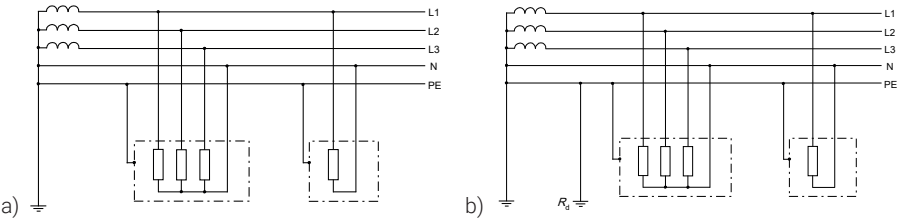
N - występuje bezpośrednie połączenie części przewodzących dostępnych z uziemionym punktem źródła zasilania sieci.

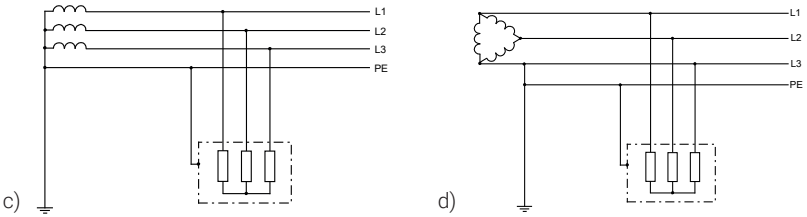
W układzie TN podaje się jeszcze jedną lub dwie litery, określające powiązanie przewodu ochronnego z przewodem neutralnym. Są one następujące:

S - funkcję ochronną pełni przewód PE oddzielony od przewodu neutralnego N (gdy punkt neutralny nie jest dostępny, oddzielony od uziemionego przewodu liniowego),

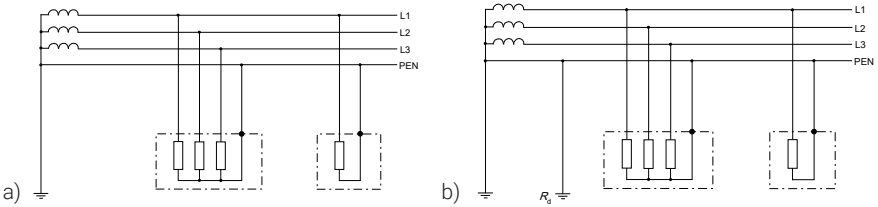
C - zastosowano wspólny przewód (ochronno-neutralny PEN) zapewniający funkcję zarówno ochronną, jak i przewodu neutralnego.

Wykorzystując powyższe oznaczenia literowe wyróżnia się następujące układy sieci: TN-C, TN-S, TN-C-S, TT oraz IT. Rysunki od 1 do 5 przedstawiają przykładowe schematy układów sieci na podstawie normy PN-HD 60364-1 [12].

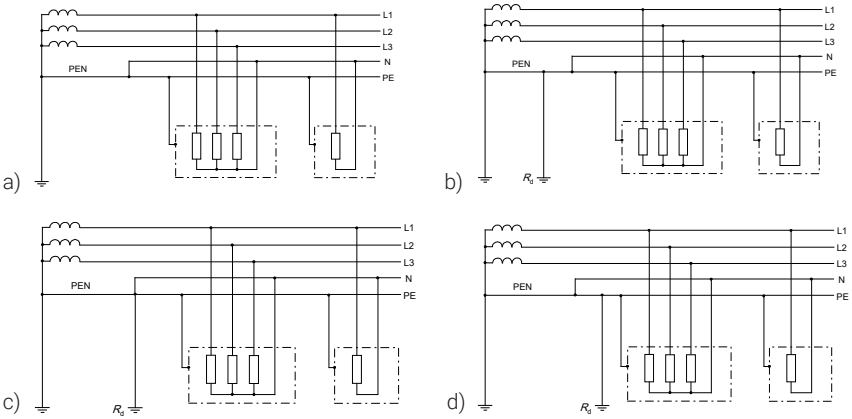




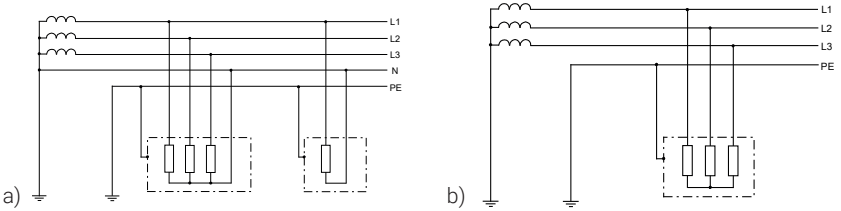
Rys. 1. Układ sieci TN-S: a) z uziemieniem tylko przy źródle, z przewodem N, b) z dodatkowym uziemieniem R_d, z przewodem N, c) z uziemieniem tylko przy źródle, bez przewodu N, d) z uziemieniem przewodu liniowego (niedostępny punkt neutralny)



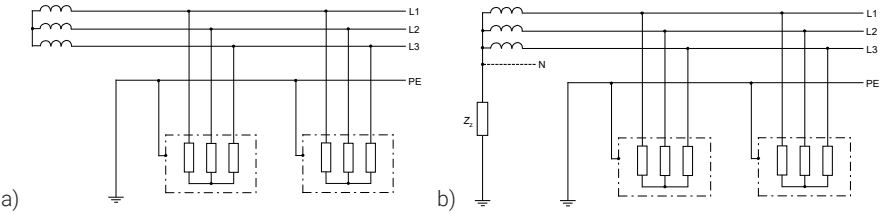
Rys. 2. Układ sieci TN-C: a) z uziemieniem tylko przy źródle, b) z dodatkowym uziemieniem R_d



Rys. 3. Układ sieci TN-C-S: a) z uziemieniem tylko przy źródle, b) z dodatkowym uziemieniem R_d przewodu PEN przed miejscem jego rozdzielenia na przewody N i PE, c) z dodatkowym uziemieniem R_d w miejscu rozdzielenia przewodu PEN na przewody N i PE, d) z dodatkowym uziemieniem R_d za miejscem rozdzielenia przewodu PEN na przewody N i PE



Rys. 4. Układ sieci TT: a) z przewodem N, b) bez przewodu N



Rys. 5. Układ sieci IT: a) z izolowanym punktem neutralnym, b) z punktem neutralnym uziemionym przez dużą impedancję Z_z; przewód neutralny N jest opcjonalny

Rys. 1 prezentują układy sieci TN-S zawierające, oprócz trzech przewodów liniowych (L1, L2, L3), przewód neutralny N i przewód ochronny PE. Układ z Rys. 1b ma dodatkowe uziemienie R_d przewodu PE, ale nie zawsze jest ono stosowane. Warunki występowania dodatkowych uziemień w sieci mogą regulować przepisy krajowe. W Polsce dodatkowe wymagania stawia norma N SEP-E-001 [21], która swoim zakresem obejmuje sieci rozdzielcze. Celem dodatkowego uziemienia (może być więcej niż jedno dodatkowe uziemienie) jest utrzymanie korzystnego potencjału przewodu PEN/przewodu PE (w tym również obudów odbiorników) względem ziemi. Rys. 1 przedstawiają układ TN-S bez przewodu neutralnego. Takie rozwiązane może być stosowane, gdy do sieci są przyłączone odbiorniki trójfazowe, które nie wymagają przewodu neutralnego. Mimo że nie ma przewodu neutralnego N, nadal jest to układ TN-S – funkcja odrębnego przewodu ochronnego PE jest zachowana. Dość nietypowy jest schemat z Rys. 1d – tak wygląda układ TN-S, gdy nie jest dostępny punkt neutralny w źródle. Uziemia się wtedy jeden z przewodów liniowych.

Cechą charakterystyczną układu TN-C jest obecność przewodu ochronno-neutralnego PEN (Rys. 2). Przewód ten może być dodatkowo uziemiony na trasie linii (uziemienie R_d). Zgodnie z wymaganiami rozporządzenia [22], w Polsce układ sieci TN-C jest wykluczony w instalacjach elektrycznych budynków. Stosuje się go w sieciach rozdzielczych.

Najbardziej rozpowszechniony jest układ sieci TN-C-S (Rys. 3). Na odcinku sieci rozdzielczej jest przewód ochronno-neutralny PEN, który na potrzeby instalacji w budynkach jest następnie rozdzielany (np. w złączu) na przewody N i PE. Przedmiotem częstych dyskusji jest kwestia uziemiania punktu, w którym następuje to rozdzielnie. Ustawy, rozporządzenia ani normy krajowe nie wymagają uziemiania tego punktu. Kierując się zasadami tworzenia układów sieci dopuszczalne jest każde rozwiązanie z Rys. 3. Jeżeli rozpatrywać dodatkowe uziemienie R_d, to może ono być zlokalizowane przed punktem rozdzielenia przewodu PEN na przewody N i PE (Rys. 3b), w punkcie rozdzielenia (Rys. 3c) lub za tym punktem, czyli w praktyce jest to uziemienie przyłączone do przewodu PE (Rys. 3d). Które z tych rozwiązań jest najlepsze biorąc pod uwagę napięcia dotykowe przy odbiornikach? Im bliżej odbiorników jest uziemienie, tym lepiej, zatem w kontekście napięć dotykowych najlepsze rozwiązanie przedstawia Rys. 3d. Kwestię ograniczania napięć dotykowych omówiono rozdziale 7. Układ TT (Rys. 4), podobnie jak układ TN-S, zawiera przewód ochronny PE. W układzie TT przewód neutralny N nie jest wymagany (zasilanie wyłącznie trójfazowych odbiorników, które nie wykorzystują przewodu neutralnego), co przedstawiono na Rys. 4b.

W układzie IT występuje izolowany punkt neutralny (Rys. 5a) lub jest on uziemiony przez dużą impedancję (Rys. 5b). W układzie tym przewód neutralny N jest opcjonalny.

3 Istota samoczynnego wyłączania zasilania

Zgodnie z podstawową zasadą ochrony przed porażeniem elektrycznym [16], w razie pojedynczego uszkodzenia, części przewodzące dostępne nie powinny być niebezpieczne. Zatem w przypadku zastosowania samoczynnego wyłączania zasilania ochrona przeciwporażeniowa będzie skuteczna, jeżeli podczas zwarcia o pomijalnej impedancji pomiędzy przewodem liniowym a częścią przewodzącą dostępną lub przewodem ochronnym:

- nastąpi wyłączenie zasilania w wymaganym przez normę czasie lub
- nie będą przekroczone napięcia dotykowe dopuszczalne długotrwale.

Z tego wynika bardzo ważny wniosek, że wyłączenie zasilania w wymaganym przez normę czasie nie zawsze jest konieczne. Dla zapewnienia skutecznej ochrony przeciwporażeniowej nie jest ono konieczne, gdy pomiędzy częściami przewodzącymi jednocześnie dostępnymi napięcia dotykowe nie przekraczają wartości dopuszczalnej długotrwale. Można to wykazać obliczeniowo podczas projektowania instalacji oraz pomiarowo podczas sprawdzania odbiorczego lub okresowego. Wymagania odnoszące się do największego dopuszczalnego czasu wyłączania zasilania zawiera norma PN-HD 60364-4-41 [13]. W Tab. 1 podano czasy wymagane w obwodach:

- gniazd wtyczkowych o prądzie znamionowym nie większym niż 63 A,
- odbiorników o prądzie znamionowym nie większym niż 32 A zainstalowanych na stałe.

Tab. 1. Największy dopuszczalny czas wyłączania zasilania (w sekundach) według [13]

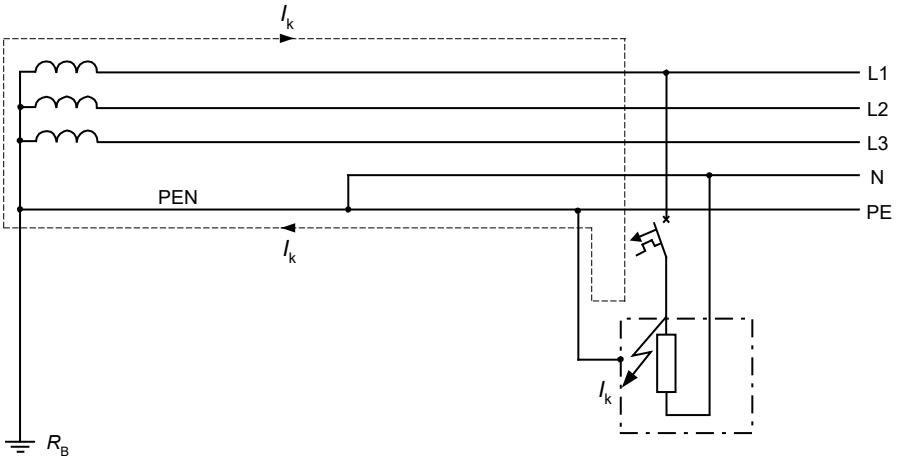
Układ sieci	50 V < U_o ≤ 120 V		120 V < U_o ≤ 230 V		230 V< U_o ≤ 400 V		U_o > 400 V	
	AC	DC	AC	DC	AC	DC	AC	DC
TN	0,8	x)	0,4	1	0,2	0,4	0,1	0,1
TT	0,3	x)	0,2	0,4	0,07	0,2	0,04	0,1
x) Wyłączenie może być wymagane z innych powodów niż zagrożenie porażeniem, U_o - napięcie nominalne sieci względem ziemi.								

Dla innych obwodów odbiorczych oraz dla obwodów rozdzielczych można przyjmować czasy wyłączania nie większe niż [13]:

- 5 s - w układzie TN,
- 1 s - w układzie TT.

4 Samoczynne wyłączanie zasilania w układzie TN

Zwarcie przewodu liniowego z przewodem ochronnym w układzie TN sprawia, że prąd ziemnozwarciowy płynie w pętli metalicznej, jak na Rys. 6.



Rys. 6. Przepływ prądu ziemnozwarciowego I_k przy doziemieniu w układzie TN

Warunek skuteczności ochrony przeciwporażeniowej wyraża się następującą zależnością:

(1)
$$Z_s \leq \frac{U_o}{I_a}$$

gdzie:

I_a - prąd wyłączający zabezpieczenia, A,

U_o - napięcie nominalne instalacji względem ziemi, V,

Z_s - impedancja pętli zwarciowej obejmująca źródło zasilania, przewód liniowy i przewód ochronny, Ω.

Jako urządzenia wyłączające w układzie TN można na równych zasadach stosować:

- zabezpieczenia nadprądowe,
- zabezpieczenia różnicowoprądowe.

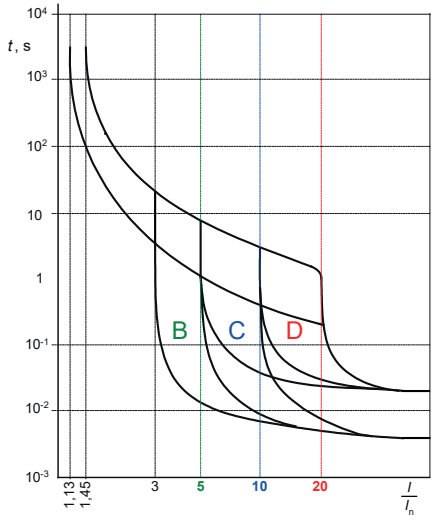
Ze względu na stosunkowo dużą wartość prądu ziemnozwarciowego (pętla metaliczna), wyłączenie zasilania w czasie wymaganym przez normę zwykle łatwo uzyskuje się przy zastosowaniu zabezpieczeń nadprądowych (wyłączników instalacyjnych, bezpieczników z wkładkami topikowymi). Prąd wyłączający I_a dla powszechnie stosowanych wyłączników nadprądowych instalacyjnych podano w Tab. 2. Przy wyznaczaniu prądu wyłączającego tych zabezpieczeń należy kierować się charak-

terystyką działania wyzwalacza elektromagnetycznego. Wyzwalacz ten działa bezzwłocznie po przekroczeniu określonej wartości progowej prądu. Aby mieć pewność, że wyłącznik zadziała, prąd zwarciowy powinien osiągnąć największą skrajną wartość z dopuszczalnego pasma rozrzutu, tzn.:

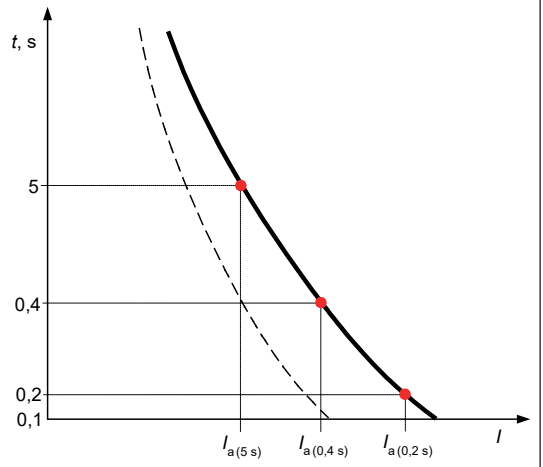
- $5xI_n$ dla wyłączników typu B,
- $10xI_n$ dla wyłączników typu C,
- $20xI_n$ dla wyłączników typu D.

Podane wyżej krotności należy przyjmować niezależnie od tego, czy wymaga się wyłączania zasilania w czasie do 0,4 s, czy 5 s.
Zasadę wyznaczania prądu wyłączającego la bezpieczników z wkładkami topikowymi zawiera tab. 3, natomiast wyłączników różnicowoprądowych Tab. 4.

Tab. 2. Wyjaśnienie prądu wyłączającego I_a wyłączników nadprądowych instalacyjnych

 Charakterystyki czasowo-prądowe wyłączników instalacyjnych nadprądowych typu B, C i D	Prąd wyłączający I_a wyłączników: B ⇨ $I_a = 5xI_n$ C ⇨ $I_a = 10xI_n$ D ⇨ $I_a = 20xI_n$ I_n - prąd znamionowy wyłącznika	Warunek skuteczności $Z_s \leq \frac{U_o}{I_a}$ przykładowe obliczenia wyłącznik B16, $I_a = 80$ A $Z_s \leq 230$ V/80 A $Z_s \leq 2{,}88\ \Omega$ wyłącznik C16, $I_a = 160$ A $Z_s \leq 230$ V/160 A $Z_s \leq 1{,}44\ \Omega$ wyłącznik D16, $I_a = 320$ A $Z_s \leq 230$ V/320 A $Z_s \leq 0{,}72\ \Omega$
Podane prądy wyłączające obowiązują m.in. dla obwodów instalacji 230/400 V zarówno o wymaganym czasie wyłączania 0,4 s, jak i 5 s.		

Tab. 3. Wyjaśnienie prądu wyłączającego I_a bezpieczników z wkładkami topikowymi



Charakterystyka czasowo-prądowa wkładki topikowej

Prąd znamionowy wkładki topikowej (instalacyjnej, typu gG) I_{nb}, A	Prąd wyłączający I_a, A (na podstawie [9])		
	wymagany czas t ≤ 0,2 s	wymagany czas t ≤ 0,4 s	wymagany czas t ≤ 5 s
16	192	149	84
20	226	195	105
25	315	255	131

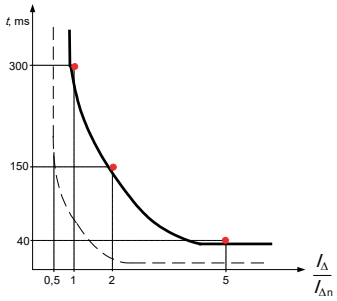
Warunek skuteczności

$$Z_s \leq \frac{U_o}{I_a}$$

przykładowe obliczenia:
Wkładka topikowa o I_{nb} = 25 A
- zainstalowana w obwodzie odbiorczym (układ TN, t ≤ 0,4 s) ⇨ I_a = 255 A:
Z_s ≤ 230 V/255 A
Z_s ≤ 0,90 Ω

- zainstalowana w obwodzie rozdzielczym (układ TN, t ≤ 5 s) ⇨ I_a = 131 A:
Z_s ≤ 230 V/131 A
Z_s ≤ 1,73 Ω

Tab. 4. Wyjaśnienie prądu wyłączającego I_a wyłączników różnicowoprądowych



Charakterystyka czasowo-prądowa wyłącznika różnicowoprądowego bezzwłocznego

Wymagany czas wyłączania, s (*t* ≤...)	Prąd wyłączający I_a wyłączników różnicowoprądowych					
	bezzwłocznych i krótkozwłocznych typu			selektywnych typu		
	AC	A ($I_{\Delta n}$ ≥ 30 mA)	B	AC	A	B
0,2	$2I_{\Delta n}$	$2{,}8I_{\Delta n}$	$4I_{\Delta n}$	$2I_{\Delta n}$	$2{,}8I_{\Delta n}$	$4I_{\Delta n}$
0,4	$I_{\Delta n}$	$1{,}4I_{\Delta n}$	$2I_{\Delta n}$	$2I_{\Delta n}$	$2{,}8I_{\Delta n}$	$4I_{\Delta n}$
1	$I_{\Delta n}$	$1{,}4I_{\Delta n}$	$2I_{\Delta n}$	$I_{\Delta n}$	$1{,}4I_{\Delta n}$	$2I_{\Delta n}$
5	$I_{\Delta n}$	$1{,}4I_{\Delta n}$	$2I_{\Delta n}$	$I_{\Delta n}$	$1{,}4I_{\Delta n}$	$2I_{\Delta n}$

Podane krotności dotyczą prądu różnicowego:
- przemiennego przy wyzwalaniu AC,
- pulsującego stałego przy wyzwalaniu A,
- stałego o pomijalnym tętnieniu przy wyzwalaniu B

Warunek skuteczności

$$Z_s \leq \frac{U_o}{I_a}$$

przykładowe obliczenia:
Wyłącznik różnicowoprądowy bezzwłoczny typu AC o $I_{\Delta n}$ = 30 mA
- zainstalowany w obwodzie odbiorczym (układ TN, $t \leq 0{,}4$ s) ⇨ I_a = 0,03 A:

$Z_s \leq 230\ V/0{,}03\ A$

$Z_s \leq 7887\ \Omega$

- zainstalowany w obwodzie rozdzielczym (układ TN, $t \leq 5$ s) ⇨ I_a = 0,03 A:

$Z_s \leq 230\ V/0{,}03\ A$

$Z_s \leq 7887\ \Omega$

Wyłącznik różnicowoprądowy bezzwłoczny typu A o $I_\Delta n$ = 30 mA
- zainstalowany w obwodzie odbiorczym (układ TN, $t \leq 0{,}4$ s) ⇨ $I_a = 1{,}4 \cdot 0{,}03\ A = 0{,}042\ A$:

$Z_s \leq 230\ V/0{,}042\ A$

$Z_s \leq 5476\ \Omega$

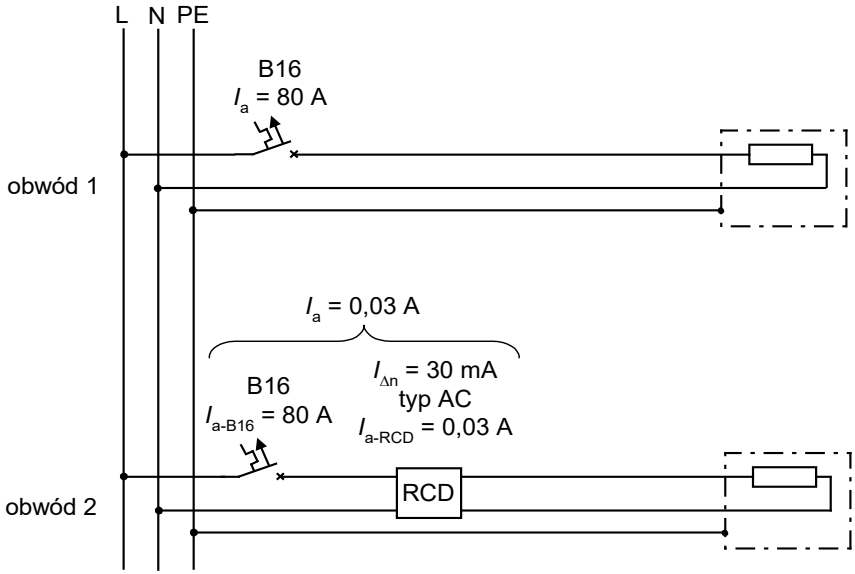
Wyłącznik różnicowoprądowy bezzwłoczny typu A o $I_\Delta n$ = 300 mA
- zainstalowany w obwodzie rozdzielczym (układ TN, $t \leq 5$ s) ⇨ $I_a = 1{,}4 \cdot 0{,}3\ A = 0{,}42\ A$:

$Z_s \leq 230\ V/0{,}42\ A$

$Z_s \leq 547{,}6\ \Omega$

W przypadku, gdy nie jest spełniony warunek skuteczności wyrażony zależnością (1), nie należy zbyt pochopnie oceniać ochrony jako nieskutecznej. Ochrona będzie skuteczna, mimo braku wyłączenia zasilania w wymaganym czasie, o ile nie będą przekroczone napięcia dotykowe dopuszczalne długotrwale. Oceny skuteczności ochrony na podstawie wartości napięć dotykowych można dokonać obliczeniowo (rozdz. 7) lub pomiarowo (rozdz. 9).

W wielu obwodach, jak np. w obwodach gniazd wtyczkowych ogólnego przeznaczenia, zainstalowane są dwa urządzenia wyłączające - zabezpieczenie nadprądowe i zabezpieczenie różnicowoprądowe. Brak wyłączenia zasilania w wymaganym czasie przez zabezpieczenie nadprądowe nie jest podstawą do negatywnego wyniku oceny skuteczności ochrony. W obwodzie z dwoma urządzeniami wyłączającymi wystarczy, że jedno z nich wyłączy zasilanie (to o mniejszej wartości prądu wyłączającego) i ochronę traktuje się jako skuteczną. W przypadku, gdy w danym obwodzie jest tylko zabezpieczenie nadprądowe i są problemy z wyłączeniem zasilania w wymaganym czasie, warto rozważyć zainstalowanie dodatkowo zabezpieczenia różnicowoprądowego. Z uwagi na jego małą wartość prądu wyłączającego I_a warunek skuteczności dość łatwo spełnić. Takie rozwiązanie wskazuje norma [14]. Na Rys. 7 przedstawiono zasadę określania prądu wyłączającego w obwodzie z dwoma urządzeniami wyłączającymi.



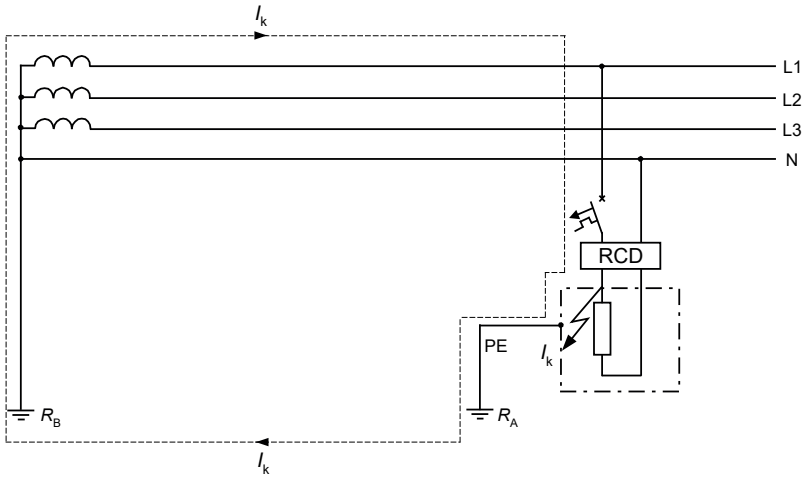
Rys. 7. Prąd wyłączający I_a w obwodzie z jednym urządzeniem wyłączającym (obwód 1: wyłącznik nadprądowy B16) i w obwodzie z dwoma urządzeniami wyłączającymi (obwód 2: wyłącznik nadprądowy B16 + włącznik różnicowoprądowy RCD). Układ TN, wymagany czas wyłączania zasilania $t \leq 0{,}4$ s

5 Samoczynne wyłączanie zasilania w układzie TT

Doziemienie w układzie TT wywołuje przepływ prądu przez ziemię (Rys. 8). Prąd ten zwykle ma wartość znacznie mniejszą niż w układzie TN, ponieważ jest ograniczony rezystancją R_B, której wartość jest na poziomie co najwyżej kilku omów, oraz rezystancją R_A, która może osiągać poziom nawet kilkuset omów. Jeżeli przyjąć, że rezystancja uziemienia roboczego (funkcjonalnego) w stacji wynosi $R_B = 5\ \Omega$, a rezystancja uziemienia ochronnego $R_A = 18\ \Omega$, to prąd ziemnozwarciowy osiągnie wartość:

(2)
$$I_k = \frac{U_o}{(R_B + R_A)} = \frac{230\ V}{(5\ \Omega + 18\ \Omega)} = 10\ A$$

W obwodach gniazd wtyczkowych zwykle stosuje się wyłączniki nadprądowe B16, zatem wyliczony wyżej prąd ziemnozwarciowy ma wartość mniejszą niż prąd znamionowy tego wyłącznika. Nie ma zatem możliwości wyłączenia zasilania przez ten wyłącznik, gdy nastąpi doziemienie w takim obwodzie. Niezbędnym jest wtedy stosowanie zabezpieczeń różnicowoprądowych.



Rys. 8. Przepływ prądu ziemnozwarciowego I_k przy doziemieniu w układzie TT. RCD – zabezpieczenie różnicowoprądowe

W przypadku stosowania zabezpieczeń różnicowoprądowych, warunek skuteczności ochrony jest związany z rezystancją uziemienia R_A i wyraża się następującą zależnością:

(3)
$$R_A \leq \frac{U_L}{I_a}$$

gdzie:

I_a - prąd wyłączający zabezpieczenia, A,
U_L - napięcie dotykowe dopuszczalne długotrwale; w większości instalacji AC wynosi 50 V,
R_A - rezystancja uziemienia przewodu ochronnego, Ω.

Jeżeli urządzeniem wyłączającym jest zabezpieczenie nadprądowe, to warunek skuteczności ochrony jest taki sam jak dla układu TN, czyli:

(4) $$Z_{\text{s-TT}} \leq \frac{U_{\text{o}}}{I_{\text{a}}}$$

gdzie:

I_a - prąd wyłączający zabezpieczenia, A,

U_o - napięcie nominalne instalacji względem ziemi, V,

Z_s-TT - impedancja (rezystancja) pętli zwarciowej w układzie TT obejmująca źródło zasilania, przewód liniowy, przewód ochronny, uziemienie przewodu ochronnego odbiornika (odbiorników) i uziemienie w stacji zasilającej, Ω.

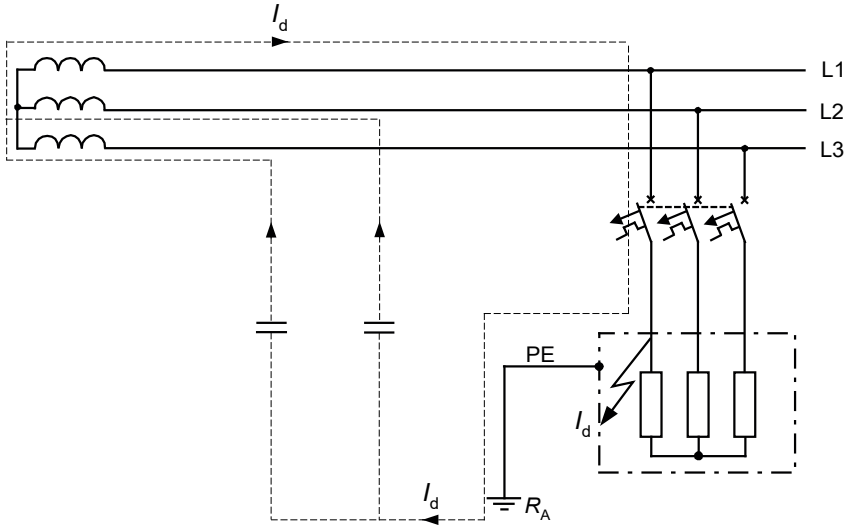
Prąd wyłączający zabezpieczenia I_a zawarty w warunkach (3) i (4) wyznacza się na zasadach opisanych w rozdziale 4. niniejszego opracowania. Należy jednak pamiętać, że w układzie TT największe dopuszczalne czasy wyłączania zasilania są inne niż w układzie TN. W zależności od typu obwodu są to wartości 0,2 s lub 1 s. Może się więc zdarzyć, że dla danego zabezpieczenia wartość prądu wyłączającego będzie inna w układzie TT niż w układzie TN. Przykładowe porównanie podano w Tab. 5.

Tab. 5. Porównanie prądu wyłączającego I_a w układach sieci TN i TT

Urządzenie wyłączające	Układ TN	Układ TT
Wyłącznik nadprądowy B16 w obwodzie odbiorczym (charakterystyka czasowo-prądowa w tab. 2)	Wymagany czas wyłączania zasilania: $t \le 0{,}4$ s Prąd wyłączający: $I_a = 80$ A Warunek skuteczności ochrony: $Z_s \le \frac{U_o}{I_a}$ $Z_s \le 230$ V/80 A $Z_s \le 2{,}88$ Ω	Wymagany czas wyłączania zasilania: $t \le 0{,}2$ s Prąd wyłączający: $I_a = 80$ A Warunek skuteczności ochrony: $Z_{s\text{-}TT} \le \frac{U_o}{I_a}$ Z_s-TT ≤ 230 V/80 A Z_s-TT ≤ 2,88 Ω (uwaga: Z_s-TT ≈ RA + RB) lub $R_A \le \frac{U_L}{I_a}$ $R_A \le 50$ V/80 A $R_A \le 0{,}625$ Ω
Bezpiecznik z wkładką topikową gG16 w obwodzie odbiorczym (charakterystyka czasowo-prądowa w tab. 3)	Wymagany czas wyłączania zasilania: $t \le 0{,}4$ s Prąd wyłączający: $I_a = 149$ A Warunek skuteczności ochrony: $Z_s \le \frac{U_o}{I_a}$ $Z_s \le 230$ V/149 A $Z_s \le 1{,}54$ Ω	Wymagany czas wyłączania zasilania: $t \le 0{,}2$ s Prąd wyłączający: $I_a = 192$ A Warunek skuteczności ochrony: $Z_{s\text{-}TT} \le \frac{U_o}{I_a}$ Z_s-TT ≤ 230 V/192 A Z_s-TT ≤ 1,2 Ω (uwaga: $Z_s \approx R_A + R_B$) lub $R_A \le \frac{U_L}{I_a}$ $R_A \le 50$ V/192 A $R_A \le 0{,}26$ Ω
Wyłącznik różnicowoprądowy bezzwłoczny typu AC o $I_{\Delta n} = 30$ mA w obwodzie odbiorczym (charakterystyka czasowo-prądowa w tab. 4)	Wymagany czas wyłączania zasilania: $t \le 0{,}4$ s Prąd wyłączający: $I_a = 0{,}03$ A Warunek skuteczności ochrony: $Z_s \le \frac{U_o}{I_a}$ $Z_s \le 230$ V/0,03 A $Z_s \le 7887$ Ω	Wymagany czas wyłączania zasilania: $t \le 0{,}2$ s Prąd wyłączający: $I_a = 2 \cdot 0{,}03 = 0{,}06$ A Warunek skuteczności ochrony: $R_A \le \frac{U_L}{I_a}$ $R_A \le 50$ V/0,06 A $R_A \le 833$ Ω

6 Samoczynne wyłączanie zasilania w układzie IT

W układzie IT pierwsze zwarcie z ziemią wywołuje przepływ prądu I_d, który w przypadku sieci prądu przemiennego zamyka się w szczególności przez pojemności faz nieuszkodzonych względem ziemi, w obszarze całej sieci. Przepływ tego prądu pokazano na Rys. 9.



Rys. 9. Przepływ prądu zwarciowego I_d przy pierwszym zwarciu z ziemią w układzie IT

Niewielka wartość prądu I_d pozwala na pracę sieci z pierwszym doziemieniem. Z tego względu stosuje się ją głównie tam, gdzie pierwszorzędne znaczenie ma niezawodność zasilania. Aby praca sieci po pierwszym doziemieniu była możliwa, powinien być spełniony następujący warunek skuteczności ochrony przeciwporażeniowej:

(5) $$R_A \leq \frac{U_L}{I_d}$$

gdzie:

I_d - prąd pierwszego zwarcia z ziemią, A,

U_L - napięcie dotykowe dopuszczalne długotrwale, V; w większości instalacji wynosi AC 50 V lub DC 120 V,

R_A - rezystancja uziemienia przewodu ochronnego, Ω.

Należy zainstalować urządzenie do kontroli stanu izolacji, które w razie pierwszego zwarcia z ziemią to zdarzenie zasygnalizuje optycznie i akustycznie. Obowiązkiem służb eksploatacji w obiekcie z taką instalacją jest zlokalizowanie i usunięcie tego uszkodzenia. Dopuszczalne jest wyłączenie sygnału akustycznego, natomiast sygnał optyczny powinien utrzymywać tak długo, jak uszkodzenie występuje.

Drugie zwarcie z ziemią wywołuje przepływ prądu o znacznie większej wartości. Wartość prądu przy zwarciu dwumiejscowym zależy od sposobu uziemienia części przewodzących dostępnych. Jeżeli jest to uziemienie zbiorowe, to części te są przyłączone do wspólnego przewodu ochronnego (Rys. 10).

Dla układu IT z uziemieniem zbiorowym warunki skuteczności ochrony przy zwarciu dwumiejscowym są następujące:

(6) $$Z_s \leq \frac{U}{2 \cdot I_a}$$

w sieci AC bez przewodu neutralnego lub w sieci DC bez przewodu środkowego oraz:

(7) $$Z'_s \leq \frac{U_o}{2 \cdot I_a}$$

w sieci AC z przewodem neutralnym lub w sieci DC z przewodem środkowym, przy czym:

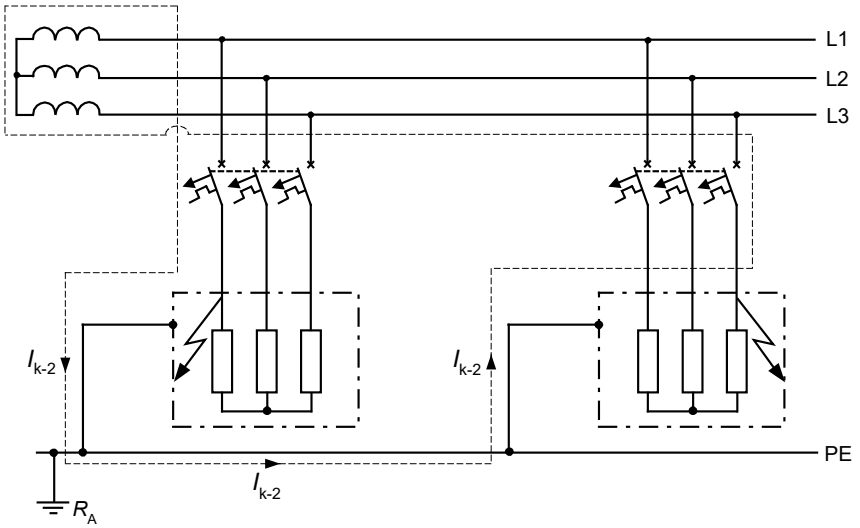
I_a - prąd wyłączający zabezpieczenia, A,

U - napięcie nominalne pomiędzy przewodami liniowymi, V,

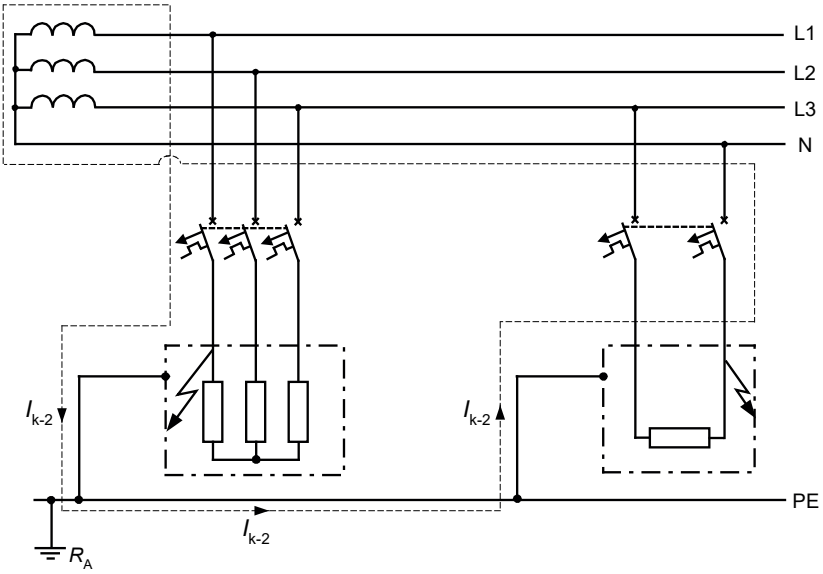
U_o - napięcie nominalne pomiędzy: przewodem liniowym a przewodem neutralnymw sieci AC; przewodem liniowym a przewodem środkowym w sieci DC, V,

Z_s - impedancja pętli zwarciowej obejmująca przewód liniowy i przewód ochronny rozpatrywanego obwodu, Ω,

Z'_s - impedancja pętli zwarciowej obejmująca przewód neutralny i przewód ochronny rozpatrywanego obwodu, Ω.



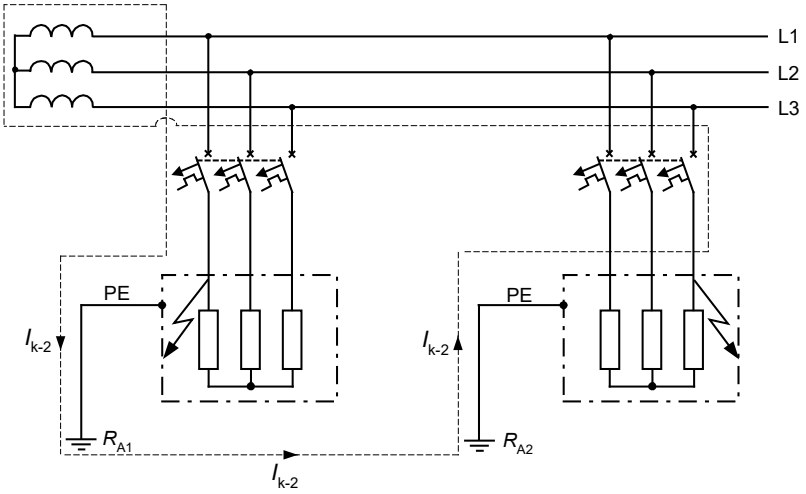
a)



b)

Rys. 10. Układ IT z uziemieniem zbiorowym i przepływ prądu zwarciowego I_{k-2} przy zwarciu dwumiejscowym. Układ IT: a) bez przewodu neutralnego, b) z przewodem neutralnym (doziemienie przewodu neutralnego)

Przy tym sposobie uziemienia części przewodzących dostępnych prąd zwarcia dwumiejscowego płynie w pętli metalicznej. Wartość tego prądu jest zbliżona do wartości prądu w układzie TN przy doziemieniu. Największe dopuszczalne czasy wyłączania zasilania przyjmuje się takie jak dla układu TN.
Inny rozwiązaniem jest zastosowanie w układzie IT uziemień indywidualnych (Rys. 11).



Rys. 11. Układ IT z uziemieniami indywidualnymi (R_{A1}, R_{A2}) i przepływ prądu zwarciowego I_{k-2} przy zwarciu dwumiejscowym

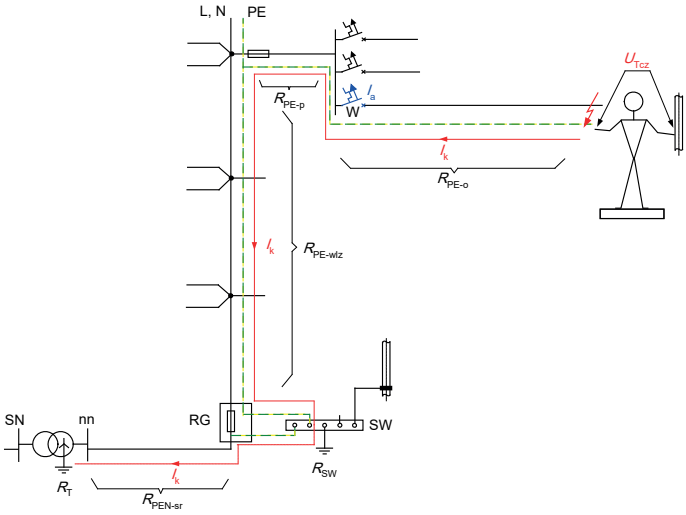
Poszczególne odbiorniki są przyłączone do niezależnych od siebie uziemień i prąd zwarcia dwumiejscowego płynie przez te uziemienia i przez ziemię. Jego wartość jest mniejsza niż w układzie z uziemieniem zbiorowym, ponieważ pętla nie jest metaliczna. Prąd jest ograniczany głównie rezystancjami R_{A1} i R_{A2} z Rys. 11. Z punktu widzenia danego odbiornika zjawiska ziemnozwarciowe są podobne do tych z układu TT. Prąd zwarcia dwumiejscowego wywołuje spadek napięcia na rezystancji uziemienia przewodu ochronnego danego odbiornika (np. R_{A1}). W związku z tym warunek skuteczności jest taki sam jak dla układu TT.

7 Samoczynne wyłączanie zasilania a napięcia dotykowe

Bardzo istotnym elementem w ocenie skuteczności ochrony przez samoczynne wyłączanie zasilania jest określenie napięć dotykowych, które występują przy doziemieniu. W sieciach i instalacjach niskiego napięcia zwykle operuje się terminem:

- napięcie dotykowe spodziewane (*ang. prospective touch voltage*), czyli napięciem między częściami przewodzącymi jednocześnie dostępnymi, gdy tych części nie dotyka człowiek, a nie terminem:
- napięcie dotykowe rażeniowe (*ang. touch voltage*), które występuje w trakcie rażenia i jest iloczynem prądu rażeniowego i impedancji (rezystancji) ciała człowieka.

Do dalszych rozważań przyjmuje się termin ogólny napięcie dotykowe, który w tym przypadku należy utożsamiać z napięciem dotykowym spodziewanym.
Jeżeli nastąpi zwarcie L-PE w punkcie wskazanym na Rys. 12, to dla spełnienia warunku skuteczności ochrony przeciwporażeniowej wyrażonego zależnością (1), prąd zwarcia jednofazowego Ik powinien osiągnąć wartość nie mniejszą niż prąd wyłączający I_a zabezpieczenia W ($I_k \geq I_a$). W przypadku, gdy prąd I_k jest mniejszy niż prąd wyłączający I_a ($I_k < I_a$), w praktyce dość powszechnie ocenia się ochronę przez samoczynne wyłączanie zasilania jako nieskuteczną.



Rys. 12. Układ TN do analizy napięć dotykowych. Oznaczenia:

R_T - rezystancja uziemienia punktu neutralnego; uziom wykonany w stacji zasilającej,

R_{SW} - rezystancja uziemienia szyny wyrównawczej w budynku,

$R_{PEN\text{-}sr}$ - rezystancja żyły PEN linii w sieci rozdzielczej,

$R_{PE\text{-}wlz}$ - rezystancja żyły PE wewnętrznej linii zasilającej,

$R_{PE\text{-}p}$ - rezystancja żyły PE odgałęzienia (np. do mieszkania w budynku wielorodzinnym),

$R_{PE\text{-}o}$ - rezystancja żyły PE obwodu odbiorczego,

I_k - prąd ziemnozwarciowy przy zwarciu w rozpatrywanym obwodzie odbiorczym,

I_a - prąd wyłączający zabezpieczenia (wyłącznika W) w rozpatrywanym obwodzie,

U_{Tcz} - napięcie dotykowe (napięcie dotykowe spodziewane), na które narażony jest człowiek na rys.,

RG - rozdzielnica główna,

SW - szyna wyrównawcza

Dokładna analiza postanowień normy PN-HD 60364-4-41 [13] wskazuje jednak, że dla osiągnięcia skuteczności ochrony wyłączenie zasilania w określonym przez tę normę czasie nie zawsze jest konieczne. Zgodnie z zasadą podaną w rozdziale „3. Istota samoczynnego wyłączania zasilania", w przypadku braku wyłączenia zasilania w wymaganym czasie należy wykazać, że nie będą przekroczone napięcia dotykowe dopuszczalne długotrwale. W instalacji przedstawionej na Rys. 12 napięcie dotykowe, na które narażony jest człowiek w miejscu zwarcia, można obliczyć z zależności (symbole wyjaśniono w podpisie Rys. 12):

(8) $$U_{Tcz} = I_k \cdot (R_{PE\text{-}wlz} + R_{PE\text{-}p} + R_{PE\text{-}o})$$

Przy obliczaniu napięć dotykowych uwzględnia się rezystancję przewodu ochronnego od miejsca zwarcia do najbliższych połączeń wyrównawczych lub najbliższego uziemienia. Z uwagi na to, że obiekcie są wykonane połączenia wyrównawcze (szyna SW), uwzględnia się rezystancje odcinków: $R_{PE\text{-}wlz} + R_{PE\text{-}p} + R_{PE\text{-}o}$. Gdyby połączeń wyrównawczych ani uziemienia R_{SW} nie było, przy obliczaniu napięcia dotykowego należałoby jeszcze uwzględnić rezystancję żyły PEN sieci rozdzielczej ($R_{PEN\text{-}sr}$). W takim przypadku napięcie dotykowe UTcz mogłoby być znacznie wyższe niż w układzie z szyną wyrównawczą. Korzystne jest więc stosowanie połączeń wyrównawczych oraz dodatkowych uziemień przewodu PEN(PE) jak najbliżej urządzeń odbiorczych.
Napięcie dotykowe podane wzorem (8) zależy też od wartości prądu zwarciowego I_k, zatem może ono wzrosnąć, gdy wzrośnie wartość tego prądu, np. w wyniku modernizacji sieci rozdzielczej. Aby w instalacji z Rys. 12 ochrona przeciwporażeniowa była skuteczna niezależnie od zmian wprowadzonych w sieci/instalacji poprzedzającej, przy ocenie tej skuteczności na podstawie napięć dotykowych należy brać pod uwagę prąd wyłączający zabezpieczenia I_a, a nie aktualny prąd zwarciowy I_k. Powinien być więc spełniony warunek:

(9) $$I_a \cdot (R_{PE\text{-}wlz} + R_{PE\text{-}p} + R_{PE\text{-}o}) \le U_L$$

gdzie:

$R_{PE\text{-}wlz}$ - rezystancja żyły PE wewnętrznej linii zasilającej,

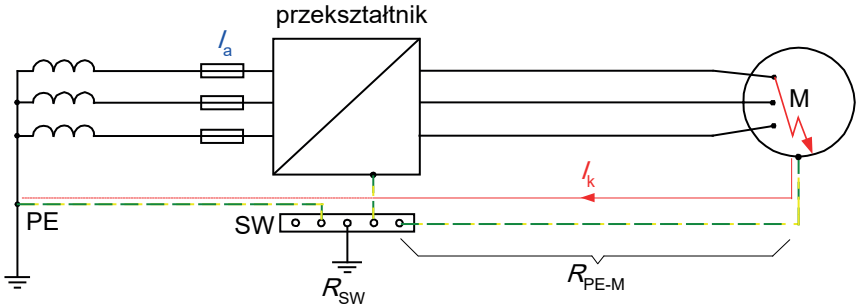
$R_{PE\text{-}p}$ - rezystancja żyły PE odgałęzienia (np. do mieszkania w budynku wielorodzinnym),

$R_{PE\text{-}o}$ - rezystancja żyły PE obwodu odbiorczego,

I_a - prąd wyłączający zabezpieczenia (wyłącznika W) w rozpatrywanym obwodzie,

U_L - napięcie dotykowe dopuszczalne długotrwale; np. AC 50 V.

Ocena skuteczności ochrony przeciwporażeniowej na podstawie wartości napięć dotykowych ma zastosowanie w szczególności w obwodach z przekształtnikami energoelektronicznymi (Rys. 13).



Rys. 13. Schemat do wyznaczania napięć dotykowych w układzie z przekształtnikiem energoelektronicznym (bez transformatora).

Oznaczenia:

R_{SW} - rezystancja uziemienia szyny wyrównawczej,

R_{PE-M} - rezystancja żyły PE na odcinku szyna wyrównawcza – silnik,

I_k - prąd ziemnozwarciowy przy zwarciu na zaciskach silnika zasilanego z przekształtnika,

I_a - prąd wyłączający zabezpieczenia w rozpatrywanym obwodzie,

SW - szyna wyrównawcza

Doziemienie w obwodzie wyjściowym przekształtnika charakteryzuje się ograniczoną wartością prądu zwarciowego. Prąd ten jest na poziomie (2–5)xI_{np}, gdzie I_{np} to prąd znamionowy przekształtnika [6]. Poza tym przekształtnik ogranicza też czas przepływu prądu (np. do około 1–4 ms) [6], co nie pozwala na pobudzenie zabezpieczeń nadprądowych zainstalowanych przed przekształtnikiem. Wprawdzie w obwodach z przekształtnikami energoelektronicznymi norma [13] dopuszcza przyjęcie jako skuteczną ochronę przeciwporażeniową ograniczenie napięcia wyjściowego w wymaganym czasie do poziomu nie wyższego niż AC 50 V, ale brak przerwy galwanicznej w obwodzie zasilającym może być ryzykowny. Bezpieczniej jest na ogólnych zasadach zapewnić napięcia dotykowe na poziomie nie wyższym niż dopuszczalny długotrwale. W takim przypadku należy spełnić następujący warunek:

(10) $$I_a \cdot R_{PE-M} \leq U_L$$

gdzie:

R_{PE-M} - rezystancja żyły PE na odcinku szyna wyrównawcza – silnik (w ogólnym przypadku rezystancja przewodu ochronnego między silnikiem a miejscem, gdzie są wykonane połączenia wyrównawcze),

I_a - prąd wyłączający zabezpieczenia w rozpatrywanym obwodzie,

U_L - napięcie dotykowe dopuszczalne długotrwale; np. AC 50 V.

Spełnienie tego warunku oznacza, że prądy ziemnozwarciowe o wartości mniejszej niż prąd I_a wprawdzie nie spowodują zadziałania zabezpieczenia w wymaganym czasie, ale nie będzie przekroczone napięcie dotykowe dopuszczalne długotrwale U_L. W przypadku prądu ziemnozwarciowego równego lub większego niż I_a napięcia dotykowe wzrosną, ale będą utrzymywać się tylko przez dopuszczalny czas (np. do 0,4 s lub 5 s w układzie TN), ponieważ zadziała zabezpieczenie.

8 Sprawdzanie skuteczności samoczynnego wyłączania zasilania

8.1 Wprowadzenie

Każda instalacja elektryczna podlega sprawdzaniu odbiorczemu po jej wykonaniu oraz sprawdzaniu okresowemu w trakcie eksploatacji. Instalacje elektryczne niskiego napięcia należy sprawdzać w szczególności zgodnie z postanowieniami normy PN-HD 60364-6 [15]. W Tab. 6 zawarto pojęcia i definicje związane ze sprawdzaniem stanu instalacji.

Tab. 6. Pojęcia i definicje związane ze sprawdzaniem stanu instalacji niskiego napięcia

Pojęcie	Definicja
sprawdzanie	Wszystkie czynności, za pomocą których kontroluje się zgodność instalacji elektrycznej z odpowiednimi wymaganiami normy HD 60364. Sprawdzanie obejmuje oględziny, próby i protokołowanie.
oględziny	Kontrola za pomocą wszelkich zmysłów (wzrok, słuch, powonienie, dotyk). Przy oględzinach nie wykorzystuje się próbników ani mierników.
próba	Użycie środków (próbników, mierników), za pomocą których można zweryfikować stan instalacji w celu określenia stanów i wartości niewykrywalnych za pomocą oględzin. Uwaga: Pod pojęciem „próba" należy rozumieć zarówno próby funkcjonalne, jak i pomiary.
protokołowanie	Zapisywanie wyników oględzin i prób.
konserwacja	Powiązanie wszystkich technicznych i administracyjnych czynności, łącznie z czynnościami nadzoru, mających na celu utrzymanie instalacji w stanie, w którym spełnia ona wymagane funkcje lub przywrócenie jej do tego stanu.

W ramach sprawdzania samoczynnego wyłączania zasilania należy wykonać pomiary, w tym m.in. pomiar impedancji pętli zwarciowej lub pomiar rezystancji uziemienia, i na podstawie wyników pomiarów obliczeniowo zweryfikować skuteczności ochrony. W niniejszym rozdziale opisano:

- pomiar impedancji pętli zwarciowej,
- pomiar rezystancji uziemienia,
- pomiar napięć dotykowych w układzie TN

oraz omówiono ich wykorzystanie w ocenie skuteczności ochrony przez samoczynne wyłączania zasilania.

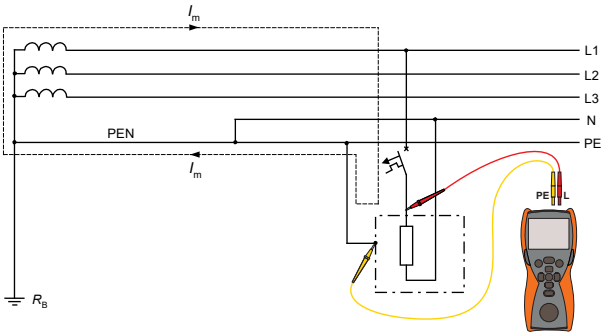
Przyrządy pomiarowe powinny być dobierane zgodnie z postanowieniami wieloarkuszowej normy PN-EN 61557 Bezpieczeństwo elektryczne w niskonapięciowych sieciach elektroenergetycznych o napięciach przemiennych do 1000 V i stałych do 1500 V – Urządzenia przeznaczone do spraw-

dzania, pomiarów lub monitorowania środków ochronnych. Dopuszcza się wykorzystanie innych przyrządów, pod warunkiem, że zapewniają nie gorsze własności użytkowe i nie gorszy stopień bezpieczeństwa.

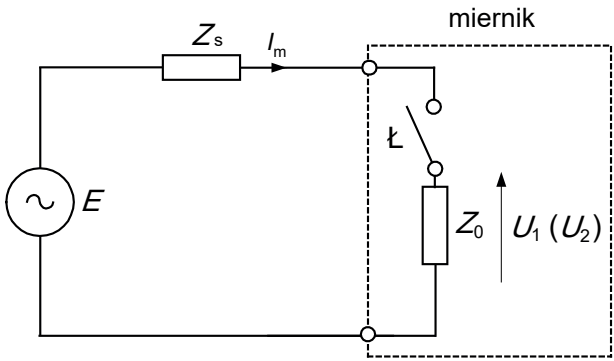
8.2 Pomiar impedancji pętli zwarciowej

Wartość impedancji pętli zwarciowej Z_s służy do oceny skuteczności ochrony przeciwporażeniowej w układzie TN, układzie IT (samoczynne wyłączanie zasilania przy zwarciu dwumiejscowym, jeżeli powstanie pętla metaliczna – uziemienie zbiorowe urządzeń) oraz w układzie TT, w którym jako urządzenia wyłączające zastosowano zabezpieczenia nadprądowe.
Opisana w normie [15] metoda pomiaru impedancji pętli zwarciowej jest powszechnie stosowaną metodą wykorzystującą tzw. „sztuczne zwarcie". Zasadę pomiaru w układzie TN przedstawiono na Rys. 14.

a)



b)



Rys. 14. Zasada pomiaru impedancji pętli zwarciowej: a) przyłączenie miernika i droga przepływu prądu pomiarowego I_m, b) schemat zastępczy układu. E – siła elektromotoryczna źródła zasilania, U_1 – napięcie przed załączeniem obciążenia pomiarowego, U_2 – napięcie po załączeniu obciążenia pomiarowego, Z_0 – obciążenie pomiarowe (w mierniku), I_m – prąd pomiarowy, MZC-304F – miernik impedancji pętli zwarciowej, Ł – łącznik wewnątrz miernika

Mierzone są kolejno dwa napięcia: przed załączeniem obciążenia pomiarowego (U_1) i po jego załączeniu (U_2). Obciążenie pomiarowe powinno zapewniać prąd pomiarowy wystarczająco duży, aby znaczna różnica mierzonych napięć gwarantowała wiarygodny wynik pomiaru. Impedancję pętli zwarciowej Z_s w miejscu pomiaru określa zależność:

(11) $$\underline{Z}_s = \underline{Z}_0 \frac{\underline{U}_1 - \underline{U}_2}{\underline{U}_2} = \underline{Z}_0 \left(\frac{\underline{U}_1}{\underline{U}_2} - 1 \right)$$

gdzie:

Z_s - impedancja pętli zwarciowej w miejscu pomiaru,
Z_0 - impedancja obciążenia pomiarowego,
U_1 - napięcie przed załączeniem obciążenia pomiarowego (przed zamknięciem łącznika Ł),
U_2 - napięcie po załączeniu obciążenia pomiarowego (po zamknięciu łącznika Ł).

Zależność (11) operuje wartościami zespolonymi napięć, ale w praktyce mierniki mogą wykorzystywać pomiar ich wartości szczytowej. Niektóre mierniki mierzą tylko rezystancję pętli, a bywają wykorzystywane w punktach instalacji, w których reaktancja ma stosunkowo dużą wartość. Rezygnacja z pomiaru napięć zespolonych oraz wykorzystywanie miernika mierzącego tylko rezystancję może prowadzić do znacznych błędów pomiaru wynikających z różnicy argumentu impedancji badanej pętli i argumentu obciążenia miernika. Błąd ten można wyliczyć z następującej zależności [2]:

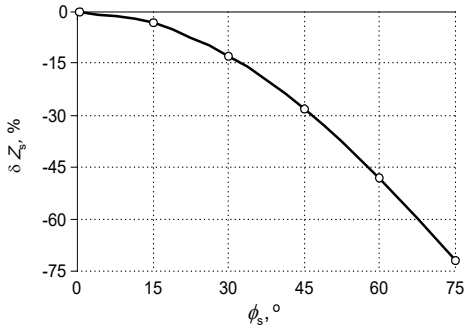
(12) $$\delta Z_s = \frac{Z_{sm} - Z_s}{Z_s} = \frac{\sqrt{1 + \left(\frac{Z_s}{Z_0} \right)^2 + 2 \frac{Z_s}{Z_0} \cos(\phi_s - \phi_0)} - 1}{\frac{Z_s}{Z_0}} - 1$$

gdzie:

δZ_s - błąd pomiaru impedancja pętli zwarciowej,
Z_s - impedancja pętli zwarciowej w miejscu pomiaru,
Z_{sm} - zmierzona impedancja pętli zwarciowej,
Z_0 - impedancja obciążenia pomiarowego,
ϕ_s - argument impedancji pętli zwarciowej,
ϕ_0 - argument impedancji obciążenia pomiarowego,
U_1 - napięcie przed załączeniem obciążenia pomiarowego (przed zamknięciem łącznika Ł),
U_2 - napięcie po załączeniu obciążenia pomiarowego (po zamknięciu łącznika Ł).

Przykładowy wykres błędu pomiaru impedancji pętli zwarciowej δZ_s w funkcji jej argumentu ϕ_s przedstawia Rys. 15. Wykres ten sporządzono przy założeniu, że wykorzystuje się miernik rezystancji pętli zwarciowej ($\phi_0 = 0°$). Im większa różnica pomiędzy argumentem ϕ_s a argumentem ϕ_0, tym większy błąd pomiaru. Błąd ten przyjmuje wartość zero, gdy miernik rezystancji pętli wykonuje pomiar w miejscu instalacji, w którym pętla zwarciowa to praktycznie sama rezystancja – zachodzi więc równość argumentów $\phi_s = \phi_0$. W przypadku pomiaru w punkcie charakteryzującym się argumentem $\phi_s = 45°$ (stosunek parametrów badanej sieci $R_s/X_s = 1$), błąd pomiaru jest na poziomie niemal 30%. Należy przy tym zaznaczyć, że wartość 30% to największy dopuszczalny błąd roboczy (błąd całkowity w znamionowych warunkach pracy miernika) określony normą [19]. Błąd pomiaru ma wartość ujemną (Rys. 15), a więc jest to błąd w kierunku niebezpiecznym – zmierzona wartość jest mniejsza niż rzeczywista. W przypadku doziemienia prąd będzie miał wartość mniejszą niż wynikająca z pomiaru impedancji pętli zwarciowej, a więc zabezpieczenie w danym obwodzie

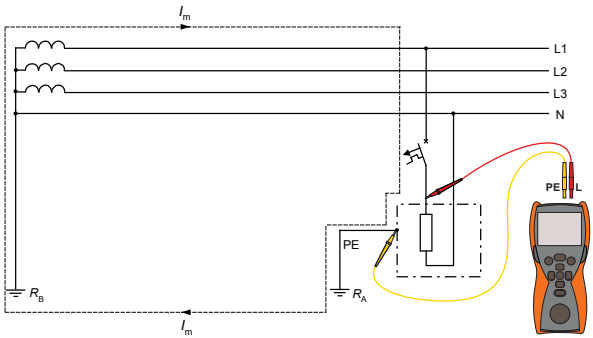
może nie zadziałać w wymaganym czasie. Ważne jest więc, aby właściwie dopasować miernik do miejsca pomiaru. W punktach instalacji charakteryzujących się znaczną reaktancją pętli należy wykorzystywać mierniki impedancji pętli zwarciowej, a nie rezystancji pętli zwarciowej. Możliwości pomiarowe danego miernika oraz jego ograniczenia należy sprawdzić w karcie katalogowej/danych technicznych miernika.



Rys. 15. Błąd cząstkowy pomiaru błędu pomiaru impedancji pętli zwarciowej δZ_s w funkcji argumentu impedancji pętli zwarciowej $\varnothing_s$, dla miernika rezystancji pętli zwarciowej ($\varnothing_0 = 0^\circ$). Pozostałe dane: $Z_s = 1\ \Omega$, $Z_0 = 20\ \Omega$

Zgodnie z normą PN-HD 60364-6 [15], w układzie TN pomiar impedancji zwarciowej powinien być wykonany tam, gdzie to możliwe, a dopiero w przypadku braku tej możliwości wystarczające jest sprawdzenie ciągłości przewodów ochronnych oraz wykonanie obliczeń impedancji pętli zwarciowej lub rezystancji przewodów ochronnych.

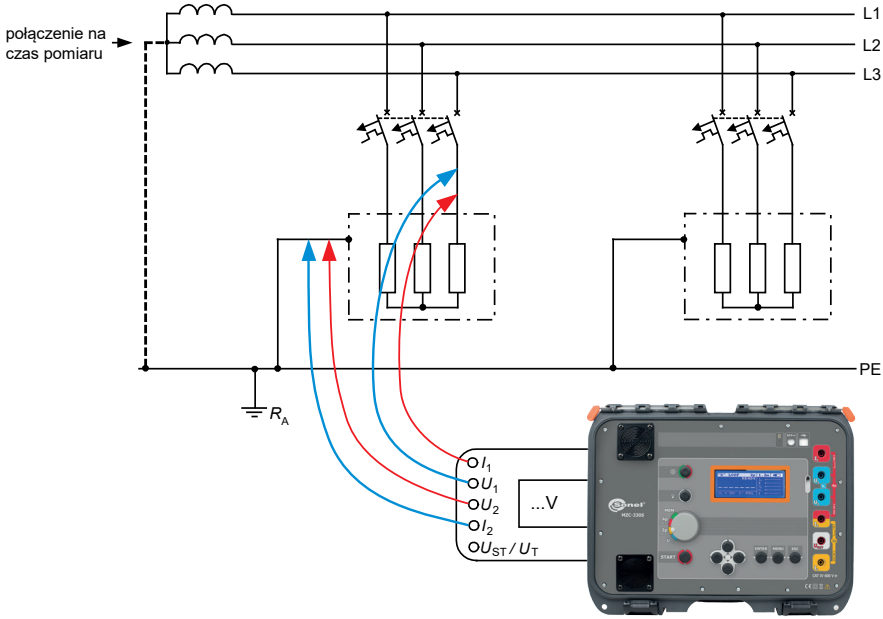
Dla celów oceny skuteczności ochrony przeciwporażeniowej pomiar impedancji pętli wykonuje się w pewnych przypadkach w układzie TT. Chodzi o obwody, w których jako urządzenie wyłączające zasilanie stosuje się zabezpieczenia nadprądowe, a nie różnicowoprądowe (sprawdzenie warunku (4)). W takim przypadku miernik impedancji pętli zwarciowej mierzy praktycznie sumę rezystancji $Z_s \approx R_A + R_B$, a prąd pomiarowy płynie przez ziemię (Rys. 16). Ze względu na to, że wartość mierzona to w zasadzie suma rezystancji, do pomiaru nadają się prostsze i tańsze mierniki – mierniki rezystancji pętli zwarciowej.



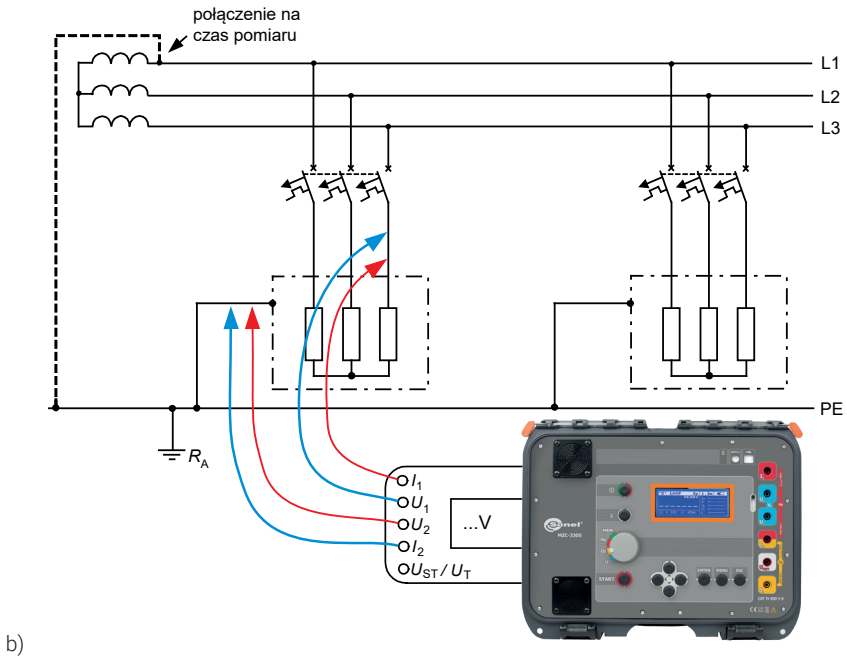
Rys. 16. Pomiar impedancji pętli zwarciowej w układzie TT. I_m – prąd pomiarowy, MZC-304F – miernik impedancji pętli zwarciowej. Miernik mierzy: $Z_s \approx R_A + R_B$

Pomiar impedancji pętli jest też wykonywany w układzie IT, w którym zastosowano uziemienie zbiorowe. Sprawdza się wtedy warunki skuteczności ochrony dla zwarcia dwumiejscowego wyrażone zależnościami (6) i (7). W klasycznym podejściu do tego pomiaru w układzie IT konieczne jest wykonanie tymczasowego połączenia na czas sprawdzania instalacji, aby umożliwić przepływ prądu pomiarowego Im (Rys. 17a). Wykonanie takiego połączenia może być kłopotliwe (konieczny dostęp do punktu neutralnego transformatora), a ponadto tworzy się wtedy w zasadzie układ TN. W zależności od grupy połączeń transformatora, pomiar impedancji pętli zwarciowej może być obarczony nadmiernym błędem [7, 8].
Uproszczenie oceny skuteczności ochrony przeciwporażeniowej przy zwarciu dwumiejscowym w układzie IT z uziemieniem zbiorowym proponuje norma [15]. W normie tej wskazano dwie możliwości:

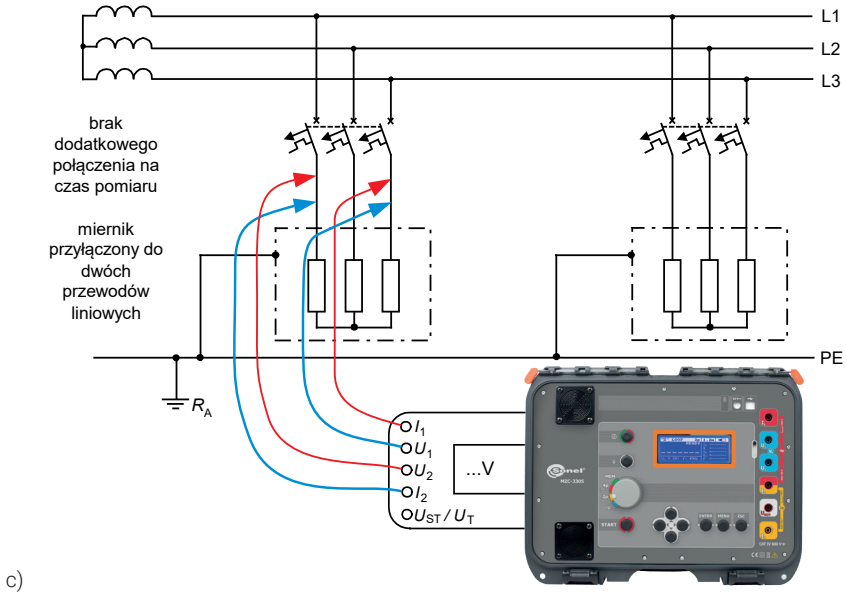
1) Badana instalacja jest zasilana z transformatora należącego do właściciela/operatora tej instalacji (brak ograniczeń w dostępie do tego transformatora) – na czas pomiarów uziemić jeden przewód liniowy na początku instalacji (Rys. 17b), a następnie zmierzyć impedancję pętli przyłączając miernik do innego przewodu liniowego niż uziemiony oraz do ziemi (przewodu PE). Ochronę uznaje się za skuteczną, jeżeli zmierzona impedancja ma wartość nie większą niż 50% wartości dopuszczalnej impedancji pętli obliczonej na podstawie zależności (6).
2) Badana instalacja jest zasilana z sieci publicznej – przed pomiarem impedancji pętli zwarciowej należy sprawdzić ciągłość przewodów ochronnych. Następnie zmierzyć tę impedancję przyłączając miernik do dwóch przewodów liniowych (Rys. 17c). Ochrona jest skuteczna, jeżeli zmierzona impedancja ma wartość nie większą niż 50% wartości dopuszczalnej impedancji pętli obliczonej na podstawie zależności (6).



a)



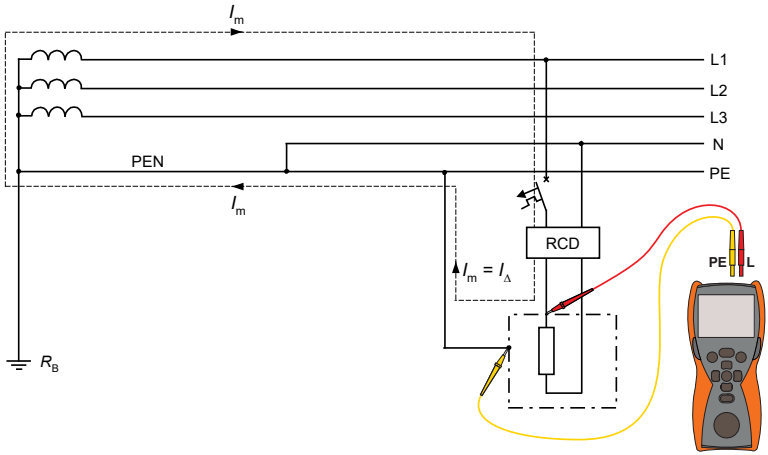
b)



c)

Rys. 17. Pomiar impedancji pętli zwarciowej w układzie IT z uziemieniem zbiorowym. MZC-330S – miernik impedancji pętli zwarciowej. Na czas pomiaru: a) połączenie uziemionego przewodu PE z punktem neutralnym transformatora, b) połączenie uziemionego przewodu PE z przewodem liniowym, c) brak dodatkowego połączenia

Dość kłopotliwy jest pomiar impedancji pętli zwarciowej w obwodach z wyłącznikami różnicowoprądowymi. W instalacjach takich prąd pomiarowy I_m jest dla wyłącznika różnicowoprądowego prądem różnicowym (Rys. 18) i przy odpowiednio dużej jego wartości oraz dużym czasie przepływu może spowodować zbędne zadziałanie tego zabezpieczenia, a to uniemożliwia prawidłowe wykonanie pomiaru. Okazuje się, że pomiar impedancji pętli zwarciowej w obwodach z wyłącznikami różnicowoprądowymi bez ich zbędnego wyzwalania jest w niektórych przypadkach możliwy, o ile rozpozna się wartość i czas przepływu prądu pomiarowego. Ważne jest też to, jaki zainstalowano wyłącznik różnicowoprądowy: typu AC, czy typu A, bezzwłoczny, krótkozwłoczny, czy selektywny.



Rys. 18. Przepływ prądu pomiarowego I_m przy pomiarze impedancji pętli zwarciowej w układzie TN. Prąd pomiarowy jest dla wyłącznika różnicowoprądowego prądem różnicowym I_Δ. MZC-304F – miernik impedancji pętli zwarciowej. RCD – wyłącznik różnicowoprądowy

Z punktu widzenia możliwości zastosowania danego miernika impedancji pętli zwarciowej w obwodach z wyłącznikami różnicowoprądowymi, bardzo istotny jest w szczególności czas przepływu prądu pomiarowego. W Tab. 7 podano przykładowe wartości prądu pomiarowego oraz czasu jego przepływu.

Tab. 7. Przykładowe wartości prądu pomiarowego oraz czasu jego przepływu

Miernik nr:	Parametry
1	prąd pomiarowy (10 ms): 20 A – zmierzona wartość szczytowa
2	prąd pomiarowy (30 ms): 30 A – zmierzona wartość szczytowa
3	maksymalny prąd pomiarowy [10]: 15,3 A dla 230 V (10 ms) 26,7 A dla 400 V (10 ms)
4	maksymalny prąd pomiarowy [10]: 7,6 A dla 230 V (30 ms)
5	prąd pomiarowy (20 ms): 200 A – zmierzona wartość szczytowa

Analizując czas przepływu prądu pomiarowego nasuwają się następujące wnioski. W przypadku mierników wymuszających prąd półfalowy (mierniki nr 1 i nr 3 z Tab. 7), bez kłopotów można wykonać pomiar impedancji pętli zwarciowej w obwodach chronionych wyłącznikami różnicowoprądowymi krótkozwłocznymi lub selektywnymi. Należy pamiętać, że ze względu na zwłoczność wyróżnia się następujące wyłączniki różnicowoprądowe [2-5, 17, 18]:

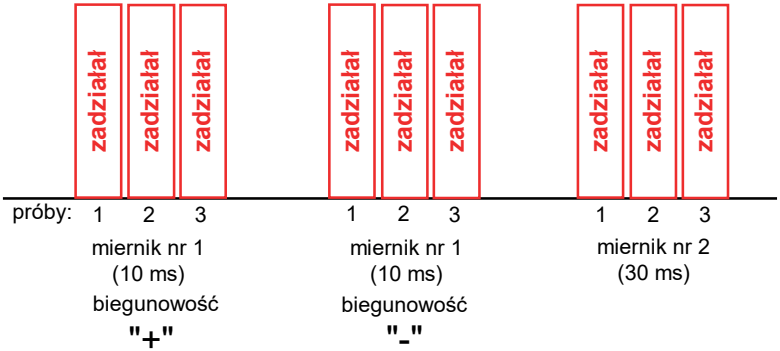
- bezzwłoczne – bez określonego czasu przetrzymywania,
- krótkozwłoczne – o gwarantowanym czasie przetrzymywania co najmniej 10 ms; oznaczane m.in. G ,
- zwłoczne (selektywne) – o gwarantowanym czasie przetrzymywania co najmniej 40 ms; zapewniające wybiorczość działania z wyłącznikami bezzwłocznymi bądź krótkozwłocznymi; oznaczane S .

Skoro gwarantowany czas przetrzymywania wyłączników krótkozwłocznych wynosi 10 ms, a zwłocznych (selektywnych) 40 ms, to prąd pomiarowy półfalowy (10 ms) nie spowoduje ich zbędnego zadziałania. W przypadku wyłączników selektywnych nie powinno nastąpić ich zbędne zadziałanie przy zastosowaniu dowolnego miernika z tab. 7, ponieważ czas przepływu prądu pomiarowego jest krótszy niż czas przetrzymywania tych wyłączników (40 ms).

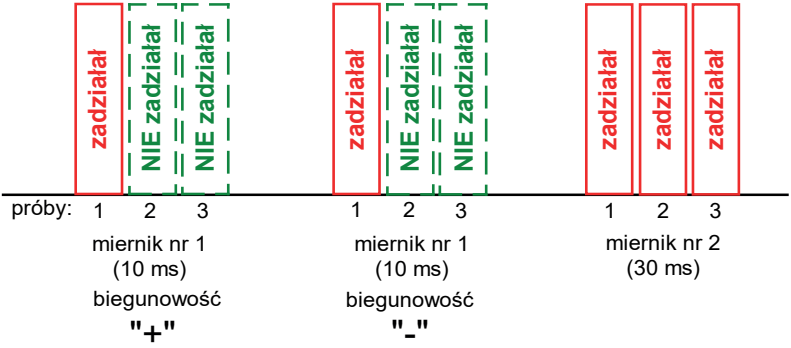
Dla potwierdzenia powyższych spostrzeżeń wykonano badania laboratoryjne, których wyniki przedstawiono na rys. od 19 do 25. W instalacji laboratoryjnej mierzono impedancję pętli zwarciowej L-PE i sprawdzano zachowanie się różnych typów wyłączników różnicowoprądowych. Po zainstalowaniu określonego wyłącznika, pomiar impedancji pętli zwarciowej wybranym miernikiem wykonywano trzykrotnie (pomiar za pomiarem w odstępie kilku, kilkunastu sekund). Pomiary wykonywano wybranymi miernikami o danych z Tab. 7. W przypadku miernika wymuszającego prąd półfalowy (czas przepływu prądu 10 ms – miernik nr 1), pomiar był wykonywany trzykrotnie dla każdej biegunowości prądu (półfalą dodatnią prądu oraz półfalą ujemną prądu).

Wyłącznik RCD1 ($I_{\Delta n}$ = 30 mA, typu A, bezzwłoczny) zadziałał podczas pomiaru impedancji pętli zwarciowej przy każdej z trzech prób (Rys. 19). Należało się tego spodziewać, ponieważ jest to wyłącznik bezzwłoczny, bez gwarantowanego czasu przetrzymywania. Co więcej, to wyłącznik o wyzwalaniu typu A, czyli powinien reagować na prąd stały pulsujący i z tego powodu reagował na pojedynczą półfalę prądu pomiarowego. Pomiar z wykorzystaniem miernika nr 2 (czas przepływu prądu 30 ms) tym bardziej powodował działanie tego wyłącznika.
Wyłącznik RCD2 ($I_{\Delta n}$ = 30 mA, typu AC, bezzwłoczny) przy pomiarze prądem półfalowym wyzwalał tylko przy pierwszej próbie (Rys. 20). Podczas pozostałych dwóch prób nie zareagował i prawidłowy pomiar impedancji pętli zwarciowej był możliwy. Takie zachowanie się wyłącznika różnicowoprądowego jest związane z własnościami rdzenia przekładnika sumującego. Rdzenie przekładników wyłączników typu AC mają z reguły pętlę histerezę zbliżoną do prostokątnej (indukcja magnetyczna remanencyjna ma wartość niewiele mniejszą niż indukcja magnetyczna nasycenia). Po pierwszym pomiarze powodującym zbędne zadziałanie kolejny pomiar w krótkim odstępie czasu prądem o tej samej biegunowości nie powoduje już takiego zadziałania, ponieważ rdzeń uprzednio został wprowadzony niemal w stan nasycenia. Wyniki pomiaru miernikiem nr 2 są z oczywistych względów identyczne jak w przypadku wyłącznika RCD1.

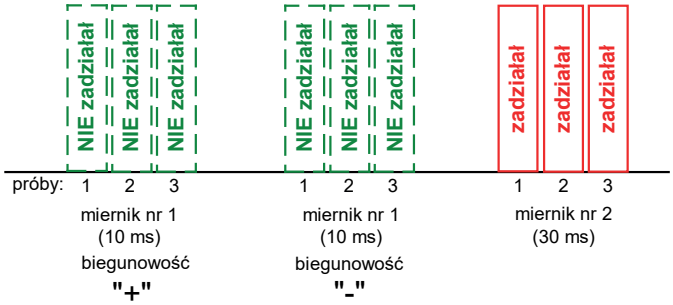
RCD3 i RCD4 to wyłączniki krótkozwłoczne i nie reagowały na prąd półfalowy (Rys. 21 i Rys. 22) – pomiar takim prądem w obwodach z wyłącznikami krótkozwłocznymi nie sprawia kłopotów. W przypadku wykorzystania miernika nr 2 zadziałanie RCD3 i RCD4 nastąpiło, ponieważ prąd płynął 30 ms, czyli wyraźnie dłużej niż gwarantowany czas przetrzymywania (10 ms) tych wyłączników.



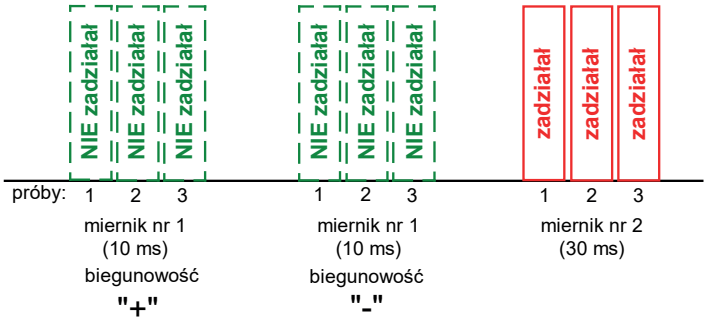
Rys. 19. Reakcja wyłącznika różnicowoprądowego RCD1 ($I_{\Delta n}$ = 30 mA, typ A, bezzwłoczny) na pomiar impedancji/rezystancji pętli zwarciowej wykonany miernikiem nr 1 i miernikiem nr 2



Rys. 20. Reakcja wyłącznika różnicowoprądowego RCD2 ($I_{\Delta n}$ = 30 mA, typ AC, bezzwłoczny) na pomiar impedancji/rezystancji pętli zwarciowej wykonany miernikiem nr 1 i miernikiem nr 2

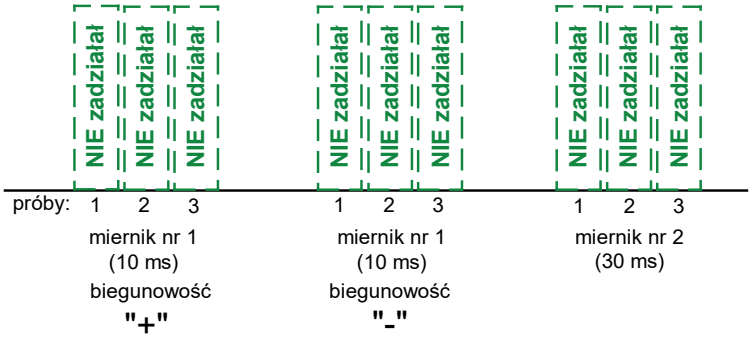


Rys. 21. Reakcja wyłącznika różnicowoprądowego RCD3 ($I_{\Delta n}$ = 30 mA, typ A, krótkozwłoczny) na pomiar impedancji/rezystancji pętli zwarciowej wykonany miernikiem nr 1 i miernikiem nr 2

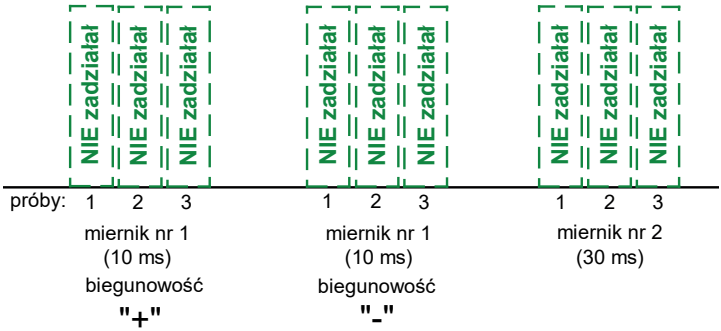


Rys. 22. Reakcja wyłącznika różnicowoprądowego RCD4 ($I_{\Delta n}$ = 30 mA, typ AC, krótkozwłoczny) na pomiar impedancji/rezystancji pętli zwarciowej wykonany miernikiem nr 1 i miernikiem nr 2

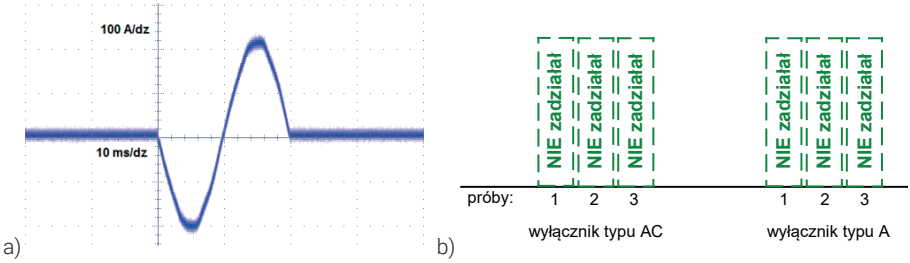
Badania laboratoryjne wyłączników selektywnych wykazały (Rys. 23 i Rys. 24), że nie reagują one ani na prąd połfalowy (10 ms), ani na prąd płynący przez 30 ms. Zbędne wyzwalanie nie następowało nawet przy pomiarze miernikiem nr 5 (Rys. 25), który jest miernikiem wielkoprądowym wymuszającym prąd o wartości szczytowej 200 A. Przed badaniami tego oczekiwano, ponieważ wyłączniki te powinny przetrzymywać prąd pomiarowy płynący do 40 ms.



Rys. 23. Reakcja wyłącznika różnicowoprądowego RCD5 ($I_{\Delta n}$ = 300 mA, typ AC, selektywny) na pomiar impedancji/rezystancji pętli zwarciowej wykonany miernikiem nr 1 i miernikiem nr 2



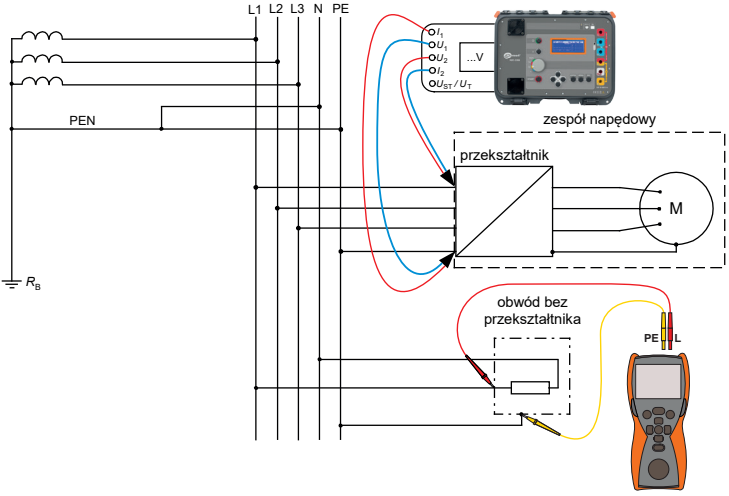
Rys. 24. Reakcja wyłącznika różnicowoprądowego RCD6 ($I_{\Delta n}$ = 300 mA, typ A, selektywny) na pomiar impedancji/rezystancji pętli zwarciowej wykonany miernikiem nr 1 i miernikiem nr 2



Rys. 25. Wyniki badania reakcji dwóch wyłączników różnicowoprądowych selektywnych ($I_{\Delta n}$ = 300 mA, typu AC i typu A) na pomiar impedancji pętli zwarciowej miernikiem nr 5 (wielkoprądowym): a) przebieg prądu pomiarowego (wartość szczytowa 200 A), b) reakcja wyłączników; na podstawie [1]

Niektóre mierniki oferują funkcję „RCD", która umożliwia pomiar w obwodach z wyłącznikami o $I_{\Delta n}$ ≥ 30 mA bez zbędnego ich wyzwalania. Zbędne wyzwalanie nie następuje z tego powodu, że prąd pomiarowy jest na poziomie kilkunastu miliamperów. Stosując tę funkcję pomiarową należy zapoznać się ze szczegółowymi danymi technicznymi miernika, ponieważ wystarczającą dokładność uzyskuje się przy pomiarze impedancji pętli o wartości nie mniejszej niż np. 0,4 Ω.

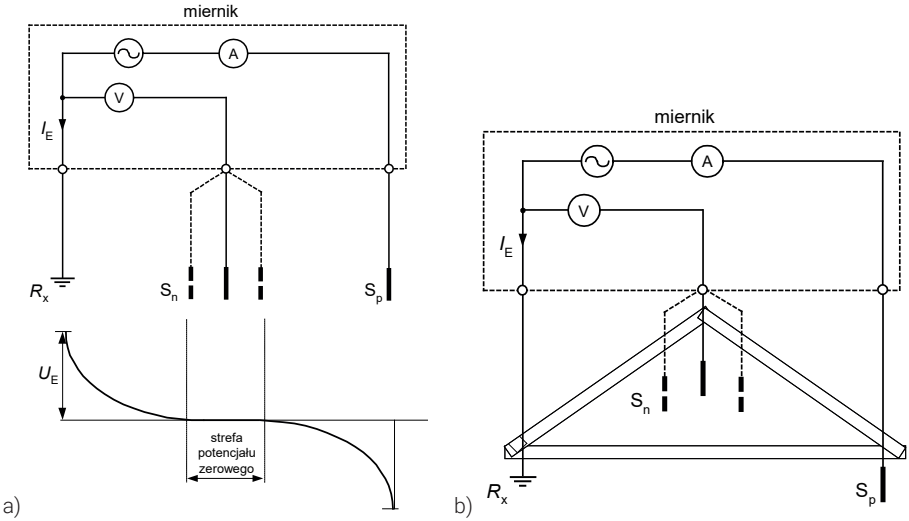
Pomiar impedancji jest kłopotliwy również w obwodach z przekształtnikami energoelektronicznymi. Przyłączenie miernika na zaciskach silnika zasilanego z przekształtnika nie da miarodajnych wyników pomiaru. Kwestię tego pomiaru rozstrzyga norma [20], która wskazuje, że pomiar impedancji pętli zwarciowej zespołu napędowego zawierającego przekształtnik energoelektroniczny i silnik należy wykonać na zaciskach wejściowych przekształtnika (Rys. 26). W dalszej części obwodu skuteczność ochrony przeciwporażeniowej należy ocenić na podstawie sprawdzenia ciągłości i rezystancji przewodu ochronnego pomiędzy silnikiem a najbliższymi połączeniami wyrównawczymi (zależność (10)).



Rys. 26. Punkt przyłączenia miernika impedancji pętli zwarciowej (MZC-320s) w obwodzie z przekształtnikiem energoelektronicznym wykorzystanym do regulacji prędkości obrotowej silnika oraz w obwodzie bez przekształtnika; na podstawie [20]

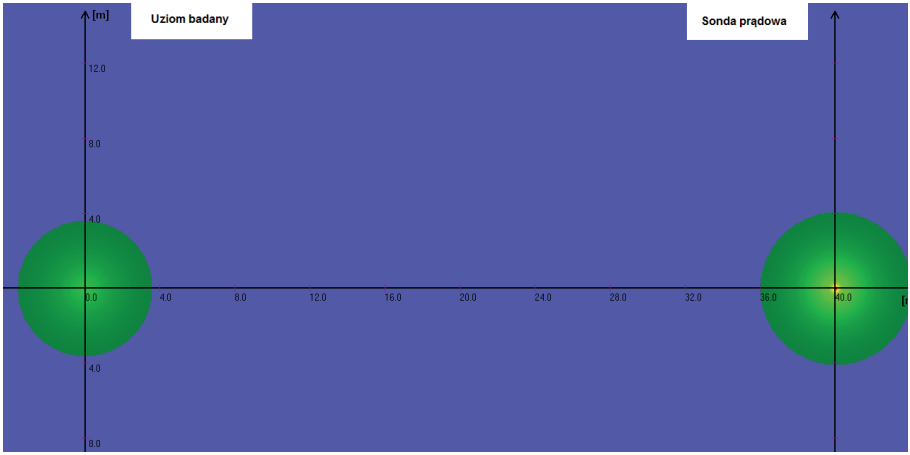
8.3 Pomiar rezystancji uziemienia

Pomiar rezystancji uziemienia jest wykonywany dla oceny skuteczności ochrony przeciwporażeniowej określonej zależnościami (3) i (5). Zasada pomiaru rezystancji uziemienia jest przedstawiona m.in. w normie [15]. Przepływający przez badane uziemienie R_x i uziom pomocniczy S_p prąd I_E wywołuje spadek napięcia U_E na rezystancji uziemienia R_x, który mierzy się woltomierzem wchodzącym w skład obwodu napięciowego. Istotnym elementem obwodu napięciowego jest sonda napięciowa S_n. Od jej prawidłowego umieszczenia w dużym stopniu zależy to, czy wynik pomiaru będzie poprawny. Sonda napięciowa powinna się znajdować w strefie potencjału zerowego, tzw. ziemi odniesienia. Aby upewnić się co do tego, należy wykonać dwa dodatkowe pomiary umieszczając tę sondę raz bliżej, raz dalej od uziomu badanego (linie przerywane łączące się z sondą S_n na Rys. 27). Sondy pomiarowe można umieścić w jednej linii (Rys. 27a) lub w układzie trójkąta (Rys. 27b). Układ trójkąta jest w niektórych przypadkach wymagany, aby uniknąć skutków sprzężeń elektromagnetycznych między przewodami pomiarowymi – np. przy stosowaniu miernika udarowego [3, 11].

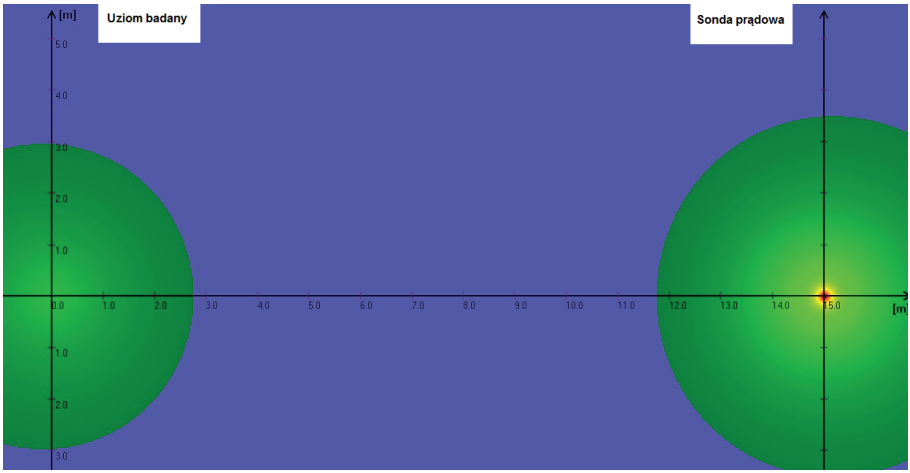


Rys. 27. Zasada pomiaru rezystancji uziemienia. Uziom badany i sondy pomiarowe rozmieszczone: a) w jednej linii, b) w układzie trójkąta. R_x – uziem badany, S_n – sonda napięciowa, S_p – sonda prądowa, I_E – prąd płynący przed badany uziom

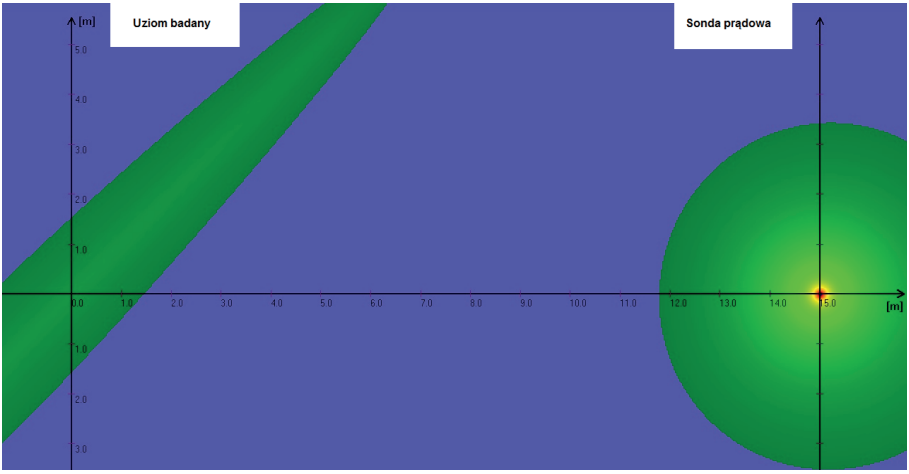
Ukształtowanie strefy potencjały zerowego zależy od wymiarów uziomu badanego i wymiarów sondy prądowej (jako sondę prądową można też wykorzystywać uziomy naturalne) oraz wzajemnej odległości pomiędzy tymi elementami. Rys. od 28 do 30 przedstawiają komputerowe symulacje rozkładu potencjału na powierzchni ziemi pomiędzy uziomem badanym a sondą prądową. Aby strefa potencjału zerowego była szeroka, co pozwala na łatwe jej zidentyfikowanie, odległość pomiędzy uziomem badanym a sondą prądową powinna być możliwie jak największa.



Rys. 28. Rozkład potencjału pomiędzy uziomem badanym R_x a sondą prądową S_p dla następujących parametrów układu: uziom badany pionowy o długości 3 m; odległość między uziomem badanym a sondą prądową 40 m; prąd pomiarowy 1 A; rezystywność gruntu 100 Ωm

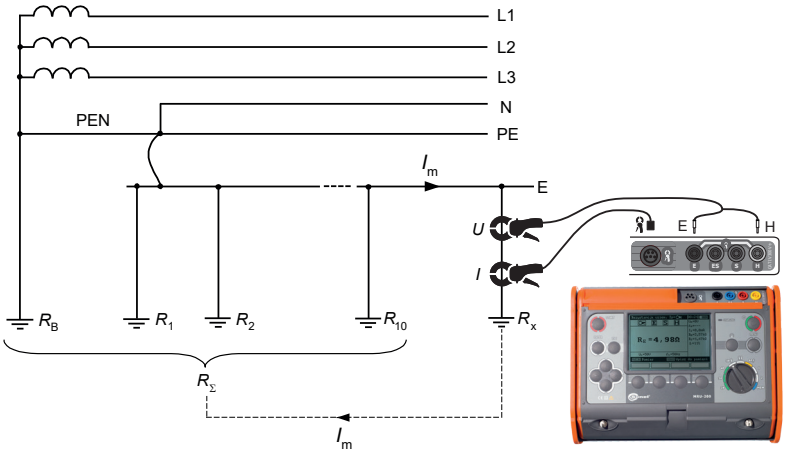


Rys. 29. Rozkład potencjału pomiędzy uziomem badanym R_x a sondą prądową S_p dla następujących parametrów układu: uziom badany pionowy o długości 3 m; odległość między uziomem badanym a sondą prądową 15 m; prąd pomiarowy 1 A; rezystywność gruntu 100 Ωm



Rys. 30. Rozkład potencjału pomiędzy uziomem badanym R_x a sondą prądową S_p dla następujących parametrów układu: uziom badany poziomy o długości 20 m ułożony pod kątem 45° do linii pomiaru; odległość między środkiem uziomu badanego a sondą prądową 15 m; prąd pomiarowy 1 A; rezystywność gruntu 100 Ωm

W normie [15] omawiany jest też pomiar rezystancji uziemienia tzw. metodą cęgową (Rys. 31). Metoda ta jest bardzo wygodna w użyciu, ponieważ nie wymaga stosowania sondy prądowej ani sondy napięciowej. Miernik jest wyposażony w cęgowy transformator napięciowy (*U*), który indukuje napięcie w pętli obejmującej uziom badany R_x oraz pozostałe równolegle połączone uziomy o wypadkowej rezystancji uziemienia R_Σ. Drugi przetwornik cęgowy jest przekładnikiem prądowym indukcyjnym (*I*), który mierzy prąd o częstotliwości pomiarowej (innej niż częstotliwość sieci). Należy pamiętać, że w układzie tym mierzy się sumę rezystancji $R_x + R_\Sigma$, zatem uzyskuje się wartość większą niż poszukiwana, ale jest to błąd w kierunku bezpiecznym. Jeżeli wartość zmierzona nie przekracza dopuszczalnej, to nie ma konieczności wykonywania dokładniejszych pomiarów.

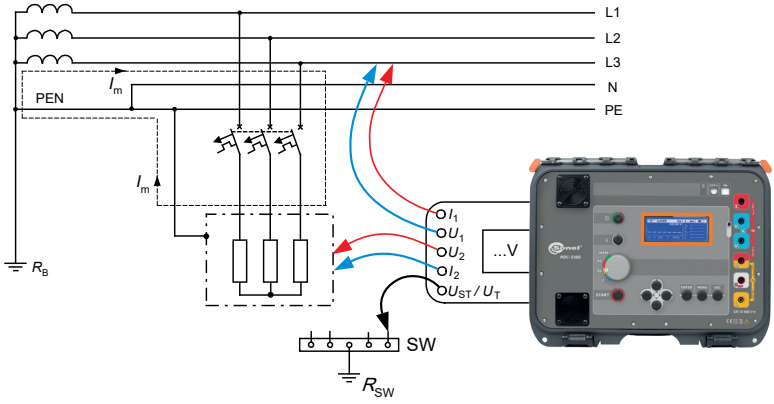


Rys. 31. Pomiar rezystancji uziemienia (rezystancji pętli) metodą cęgową. I_m – prąd pomiarowy, R_B – uziom w stacji zasilającej, R_x – uziom badany, R_1, R_2, R_{10} – dodatkowe uziomy w sieci/instalacji, MRU-200 – cęgowy miernik rezystancji uziemienia

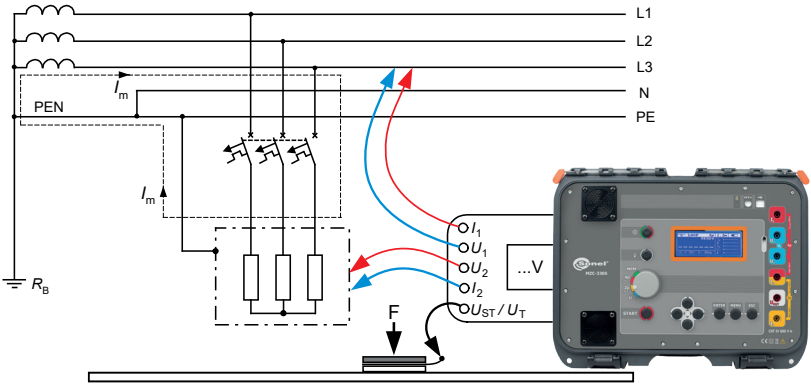
W przypadku terenu silnie uzbrojonego metoda ta jest raczej nieprzydatna, gdyż uziomy na takim terenie mogą być w ziemi połączone ze sobą metalicznie i prąd pomiarowy nie zamyka się przez ziemię. Świadczyć o tym mogą wyniki pomiaru o wartości mniejszej niż 1 Ω.
Inną możliwością pomiaru rezystancji uziemienia wymienioną w normie [15] jest pomiar rezystancji pętli miernikiem impedancji/rezystancji pętli zwarciowej. Pomiar odbywa się tak jak to przedstawiono na Rys. 16. W tej metodzie też nie stosuje się sondy prądowej ani sondy napięciowej. Poszukiwana jest rezystancja R_A, a miernik mierzy sumę $R_A + R_B$. Jeżeli jednak wartość zmierzona nie przekracza dopuszczalnej, to pomiar można uznać za wystarczający.

9 Pomiar napięcia dotykowego

Pomiary napięcia dotykowego w sieciach i instalacjach niskiego napięcia nie są tak powszechne, jak w instalacjach wysokiego napięcia. Pomiary te są wykonywane w zasadzie tylko wtedy, gdy samoczynne wyłączanie zasilania nie następuje w określonym normą czasie. Na Rys. 32 przedstawiono sposób pomiaru napięcia dotykowego w najszerzej stosowanym układzie sieci, czyli układzie TN.



a)



b)

Rys. 32. Pomiar w układzie TN: a) napięcia dotykowego spodziewanego U_{ST}, b) napięcia dotykowego rażeniowego U_T. MZC-330s – miernik napięcia dotykowego, SW – szyna wyrównawcza, I_1, I_2 – zaciski prądowe miernika, U_1, U_2, U_{ST}, U_T – zaciski napięciowe miernika, I_m – prąd pomiarowy płynący w pętli metalicznej

W układzie TN pomiar napięcia dotykowego różni się znacząco od analogicznego pomiaru w urządzeniach wysokiego napięcia, w których to stosuje się uziemienie ochronne jako ochronę przy uszkodzeniu. Napięcie dotykowe spodziewane U_{ST} (Rys. 32a) oraz napięcie dotykowe rażeniowe U_T (Rys. 32b) wyznacza się podczas przepływu prądu pomiarowego I_m w pętli metalicznej, czyli w tej samej pętli, w której popłynie prąd zwarciowy przy zwarciu L-PE. Odpowiednie zaciski miernika łączy się przewodami pomiarowymi z przewodem liniowym (przewód L3 na Rys. 32a), częściami przewodzącymi dostępnymi (obudowa odbiornika na Rys. 32a) oraz częściami przewodzącymi obcymi (szyna wyrównawcza SW na Rys. 32a). Wartość napięcia dotykowego spodziewanego U_{ST} wskazywana przez miernik jest tą wartością, która pojawi się podczas przepływu prądu zwarciowego przy napięciu nominalnym instalacji [10]. Prąd ten jest przez miernik wyliczany z jednocześnie mierzonej impedancji pętli zwarciowej. Pomiar napięcia dotykowego rażeniowego U_T jest wykonywany z wykorzystaniem zawartego w mierniku rezystora o rezystancji 1 kΩ, który odzwierciedla rezystancję ciała człowieka. Pomiar następuje po przyłączeniu miernika do obciążonej (symbol F) elektrody pomiarowej symulującej styczność stóp człowieka z podłożem (Rys. 32b).

10 Podsumowanie

Samoczynne wyłączanie zasilania to środek ochrony przy uszkodzeniu powszechnie stosowany w instalacjach elektrycznych niskiego napięcia. Niestety, w odniesieniu do niego występuje najwięcej wątpliwości i nieporozumień. Należy podkreślić, że ochrona przez samoczynne wyłączanie zasilania jest skuteczna mimo braku wyłączenia zasilania w określonym przez normę czasie, o ile napięcia dotykowe nie przekraczają wartości dopuszczalnej.

11 Bibliografia

Książki, artykuły, referaty, katalogi

1) Borowski K., Czapp S.: Pomiar impedancji pętli zwarciowej w obwodach z wyłącznikami różnicowoprądowymi selektywnymi // Przegląd Elektrotechniczny, 2023, R. 99, nr 2, s. 289-292.
2) Czapp S.: Ochrona przeciwporażeniowa w sieciach i instalacjach niskiego napięcia // Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa, 2023, ISBN 978-83-01-22819-4.
3) Czapp S., Musiał E.: Sprawdzanie instalacji niskiego napięcia – przegląd postanowień normy PN-HD 60364-6:2016 // INPE: Informacje o Normach i Przepisach Elektrycznych, 2017, R. 23, nr 218-219 (listopad-grudzień 2017), s. 3-20.
4) Czapp S., Musiał E.: Wyłączniki ochronne różnicowoprądowe – Część 1 // Monografie INPE, Zeszyt 56, 2016, wyd.: Stowarzyszenie Elektryków Polskich – Centralny Ośrodek Szkolenia i Wydawnictw, Zakład Wydawniczy INPE w Bełchatowie, ISBN 978-83-945411-1-8.
5) Czapp S., Musiał E.: Wyłączniki ochronne różnicowoprądowe – Część 2 // Monografie INPE, Zeszyt 59, 2017, wyd. Stowarzyszenie Elektryków Polskich – Centralny Ośrodek Szkolenia i Wydawnictw, Zakład Wydawniczy INPE w Bełchatowie, ISBN 978-83-945411-4-9.
6) Keller J., Kroposki B.: Understanding Fault Characteristics of Inverter-Based Distributed Energy Resources // Technical Report NREL/TP-550-46698, January 2010.
7) Loska G.: Trzy impedancje pętli zwarcia w niskonapięciowych sieciach IT // XIV Konferencja Naukowo-Techniczna „Bezpieczeństwo Elektryczne" i IV Szkoła Ochrony Przeciwporażeniowej ELSAF 2003, Wrocław, 10-12.09.2003, s. 126-135.
8) Loska G.: Zmiany wartości pomiarowej impedancji pętli zwarcia w rzeczywistych niskonapięciowych sieciach IT // XVI Konferencja Naukowo-Techniczna „Bezpieczeństwo Elektryczne" i VI

Szkoła Ochrony Przeciwporażeniowej ELSAF 2007, Szklarska Poręba, 19-21.09.2007, s. 107-114.

9) Dane o produktach firmy ETI.
10) Dane o produktach firmy SONEL.
11) Udarowy miernik uziemień, typ WG-407. Karta katalogowa.

Normy i przepisy

12) PN-HD 60364-1:2010 Instalacje elektryczne niskiego napięcia – Część 1: Wymagania podstawowe, ustalanie ogólnych charakterystyk, definicje.
13) PN-HD 60364-4-41:2017-09 Instalacje elektryczne niskiego napięcia – Część 4-41: Ochrona dla zapewnienia bezpieczeństwa – Ochrona przed porażeniem elektrycznym.
14) 14. PN-HD 60364-5-53:2016-02 Instalacje elektryczne niskiego napięcia – Część 5-53: Dobór i montaż wyposażenia elektrycznego – Aparatura rozdzielcza i sterownicza.
15) PN-HD 60364-6:2016-07 Instalacje elektryczne niskiego napięcia – Część 6: Sprawdzanie.
16) PN-EN 61140:2016-07 Ochrona przed porażeniem prądem elektrycznym – Wspólne aspekty instalacji i urządzeń.
17) PN-EN 61008-1:2013-05 Wyłączniki różnicowoprądowe bez wbudowanego zabezpieczenia nadprądowego do użytku domowego i podobnego (RCCB) – Część 1: Postanowienia ogólne.
18) IEC 60755:2017 General safety requirements for residual current operated protective devices.
19) PN-EN 61557-3:2022-11 Bezpieczeństwo elektryczne w niskonapięciowych sieciach elektroenergetycznych o napięciach przemiennych do 1 000 V i stałych do 1 500 V – Urządzenia przeznaczone do sprawdzania, pomiarów lub monitorowania środków ochronnych – Część 3: Impedancja pętli zwarcia.
20) PN-EN 60204-1:2018-12 Bezpieczeństwo maszyn – Wyposażenie elektryczne maszyn – Część 1: Wymagania ogólne.
21) N SEP-E-001:2012 Sieci elektroenergetyczne niskiego napięcia. Ochrona przed porażeniem elektrycznym.
22) Obwieszczenie Ministra Rozwoju i Technologii z dnia 15 kwietnia 2022 r. w sprawie ogłoszenia jednolitego tekstu rozporządzenia Ministra Infrastruktury w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać budynki i ich usytuowanie (Dz.U. z 2022, poz. 1225).

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

Odwiedź nas na
www.sonel.pl

v.1.1 | 05.2025