

HENRYK MARKIEWICZ



Instalacje elektryczne



wydanie 9 zmienione

Wydawnictwo WNT



Instalacje elektryczne

HENRYK MARKIEWICZ

Instalacje elektryczne

Wydanie dziewiąte zmienione

Wydawnictwo WNT



Projekt okładki i stron tytułowych: **GRAFOS**
Fotografia na okładce: **@ sumkinn/shutterstock**
Wydawca: **Adam Filutowski**
Koordynator ds. redakcji: **Adam Kowalski**
Redaktorzy: **mgr inż. Barbara Chojnowska-Ślisz (1. wydanie)**
Redakcja 9. wydania (2018): **Agnieszka Jaworska**
Produkcja: **Mariola Grzywacka**
Dział reklamy: **Małgorzata Pasenik (Małgorzata.Pasenik@pwn.pl)**
Skład i łamanie: **Grafini, Brwinów**

Książka, którą nabyłeś, jest dziełem twórcy i wydawcy. Prosimy, abyś przestrzegał praw, jakie im przysługują. Jej zawartość możesz udostępnić nieodpłatnie osobom bliskim lub osobiście znanym. Ale nie publikuj jej w internecie. Jeśli cytujesz jej fragmenty, nie zmieniaj ich treści i koniecznie zaznacz, czyje to dzieło. A kopiując jej część, rób to jedynie na użytek osobisty.

Szanujmy cudzą własność i prawo
Więcej na www.legalnakultura.pl
Polska Izba Książki

Copyright © by Wydawnictwo WNT
Warszawa 1996 – 2008

Copyright © by Wydawnictwo Naukowe PWN SA
Warszawa 2018

ISBN: 978-83-01-20018-3

Wydanie IX (zmienione) – I wydanie WN PWN
Warszawa 2018

Wydawnictwo Naukowe PWN SA
02-460 Warszawa, ul. Gottlieba Daimlera 2
tel. 22 69 54 321; faks 22 69 54 288
infolinia 801 33 33 88
e-mail: pwn@pwn.com.pl; reklama@pwn.pl
www.pwn.pl

Druk i oprawa: OSDW Azymut Sp z o.o



Spis treści



Przedmowa do wydania dziewiątego	11
1. Klasyfikacja instalacji, urządzeń elektrycznych i środowiska oraz niektóre wymagania ogólne	13
1.1. Podział instalacji elektrycznych	13
1.2. Definicje pojęć dotyczących instalacji elektrycznych i ochrony przeciwporażeniowej	15
1.3. Zakresy napięciowe sieci rozdzielczych i instalacji elektrycznych	21
1.4. Układy sieci i instalacji elektrycznych niskiego napięcia	23
1.5. Sposoby wykonania urządzeń ze względu na wymagania dotyczące ochrony przeciwporażeniowej i ochrony przed szkodliwymi oddziaływaniami środowiska	26
1.6. Rodzaje pracy urządzeń elektrycznych	29
1.7. Klasyfikacja wpływów środowiska i zasady doboru niektórych parametrów urządzeń uwzględniające oddziaływanie środowiska	31
2. Zasady obliczania prądów zwarciovych	37
2.1. Definicje oraz podstawowe zależności	37
2.2. Przykład obliczeniowy	45
3. Warunki techniczne, jakim powinny odpowiadać instalacje elektryczne	49
3.1. Wymagania ogólne	49
3.2. Jakość energii elektrycznej	52
3.3. Układy zasilania odbiorców	57
3.4. Praca odbiorników przy obniżonej jakości energii elektrycznej	68
3.4.1. Wiadomości ogólne	68
3.4.2. Wpływ zmian napięcia	68
3.4.3. Wpływ szybkich zmian napięcia	69

3.4.4.	Wpływ asymetrii układu zasilania	71
3.4.5.	Wpływ odkształcenia napięcia	72
3.4.6.	Wpływ zmian częstotliwości	73
3.4.7.	Wpływ odchyłeń parametrów napięcia na pracę przekształtników energoelektronicznych	73
3.5.	Złącza i rozdzielnice główne	74
3.6.	Wewnętrzne linie zasilające	77
3.7.	Instalacje elektryczne odbiorcze	80
3.8.	Moce obliczeniowe i prądy szczytowe	84
3.9.	Uziomy fundamentowe	93
3.10.	Rozliczeniowe pomiary energii elektrycznej	95

4. Łączniki elektroenergetyczne niskiego napięcia 97

4.1.	Wiadomości ogólne	97
4.2.	Łączniki ręczne	102
4.3.	Wyłączniki	107
4.3.1.	Zasada budowy i niektóre właściwości	107
4.3.2.	Wyłączniki instalacyjne	110
4.3.3.	Wyłączniki silnikowe	112
4.3.4.	Wyłączniki sieciowe i stacyjne	114
4.3.5.	Wyłączniki ograniczające	115
4.3.6.	Wyłączniki różnicowoprądowe	118
4.3.7.	Gniazda wtyczkowe z wyłącznikami różnicowoprądowymi	125
4.3.8.	Niektóre inne konstrukcje łączników	126
4.4.	Łączniki stycznikowe	131
4.5.	Bezpieczniki	134

5. Przewody i kable elektroenergetyczne 143

5.1.	Przewody elektroenergetyczne	143
5.2.	Kable elektroenergetyczne i sygnalizacyjne	149
5.3.	Przewody szynowe	151
5.4.	Obciążalność prądowa długotrwała przewodów i kabli elektroenergetycznych	154
5.5.	Zasady doboru przewodów i kabli elektroenergetycznych	163
5.5.1.	Wiadomości ogólne	163
5.5.2.	Wyznaczanie przekroju przewodów ze względu na obciążalność prądową długotrwałą	164
5.5.3.	Wyznaczanie przekroju przewodów obciążonych prądem odkształconym o dużej zawartości trzeciej harmonicznej	166
5.5.4.	Wyznaczanie przekroju przewodów ze względu na dopuszczalny spadek napięcia ..	168
5.5.5.	Wyznaczanie przekroju żył przewodów ochronnych, uziemiających i wyrównawczych	171
5.6.	Zabezpieczenia przewodów i kabli elektroenergetycznych	173
5.6.1.	Wprowadzenie	173
5.6.2.	Zabezpieczenia przed skutkami przeciążeń	175
5.6.3.	Zabezpieczenia przed skutkami zwarć	179
5.6.4.	Zabezpieczenia linii połączonych równolegle	183

6. Odbiorniki elektryczne 185

6.1.	Wyjaśnienia ogólne	185
6.2.	Elektryczne źródła światła	185

6.2.1.	Klasyfikacja źródeł światła	185
6.2.2.	Żarówki	186
6.2.3.	Lampy fluorescencyjne	187
6.2.4.	Lampy rtęciowe wysokoprężne	190
6.2.5.	Lampy sodowe wysokoprężne	191
6.2.6.	Lampy sodowe niskoprężne	192
6.2.7.	Lampy typu LED	193
6.3.	Silniki elektryczne	193
6.4.	Urządzenia elektrotermiczne	196
6.4.1.	Wiadomości ogólne	196
6.4.2.	Urządzenia elektrotermiczne nieprzemysłowe	197
6.4.3.	Urządzenia elektrotermiczne przemysłowe	202
7.	Zabezpieczenia i sterowanie odbiorników elektrycznych	211
7.1.	Wiadomości ogólne	211
7.2.	Zasady doboru zabezpieczeń odbiorników	214
7.3.	Warunki selektywnego działania zabezpieczeń przetężeniowych	222
7.4.	Sterowanie odbiorników	230
8.	Zasilanie odbiorców komunalnych i przemysłowych	245
8.1.	Układy zasilania	245
8.2.	Prefabrykowane stacje elektroenergetyczne średniego napięcia	249
8.3.	Rozdzielnice	254
8.3.1.	Klasyfikacja	254
8.3.2.	Rozdzielnice średniego napięcia	255
8.3.3.	Rozdzielnice niskiego napięcia	264
8.4.	Ograniczanie poboru mocy biernej	276
9.	Zagrożenie porażeniem prądem elektrycznym i ochrona przeciwporażeniowa	282
9.1.	Wiadomości ogólne	282
9.2.	Graniczne dopuszczalne prądy i napięcia rażeniowe	286
9.3.	Ochrona przed dotykiem bezpośrednim	289
9.4.	Ochrona przy dotyku pośrednim	291
9.4.1.	Ochrona przez zastosowanie samoczynnego wyłączenia zasilania	291
9.4.2.	Ochrona przez zastosowanie urządzeń II klasy ochronności	304
9.4.3.	Ochrona przez zastosowanie izolowania stanowiska	304
9.4.4.	Ochrona przez zastosowanie nieuziemionych połączeń wyrównawczych miejscowych	305
9.4.5.	Ochrona przez zastosowanie separacji elektrycznej	306
9.5.	Ochrona przed dotykiem bezpośrednim i przy dotyku pośrednim	308
9.5.1.	Wprowadzenie	308
9.5.2.	Ochrona przez zastosowanie bardzo niskiego napięcia SELV	308
9.5.3.	Ochrona przez zastosowanie bardzo niskiego napięcia PELV	310
9.5.4.	Zastosowanie bardzo niskiego napięcia funkcjonalnego FELV	310
9.6.	Ochrona przeciwporażeniowa według norm PN-EN 61140 oraz PN-HD 60364-4-41	312

9.7.	Badanie skuteczności działania urządzeń ochrony przeciwporażeniowej przy dotyku pośrednim	318
9.7.1.	Wymagania ogólne	318
9.7.2.	Zakresy i metody badania	321
9.7.3.	Pomiary impedancji pętli zwarciovych	326
9.7.4.	Badania urządzeń (wyłączników) różnicowoprądowych	329
9.7.5.	Badania wyłączników ochronnych napięciowych	333
9.7.6.	Badania połączeń wyrównawczych	335
9.7.7.	Metody badania i ocena stanu technicznego odbiorników elektrycznych po naprawach w gospodarstwach domowych	336
9.7.8.	Przyrządy do badania stanu technicznego instalacji elektrycznych	338
9.7.9.	Dokumentowanie wykonanych badań	340
10.	Niektóre inne zagrożenia pochodzące od urządzeń elektrycznych i sposoby ochrony	342
10.1.	Zagrożenia cieplne	342
10.1.1.	Wiadomości ogólne	342
10.1.2.	Zagrożenia pożarowe i działania ograniczające	343
10.1.3.	Ochrona przed oparzeniami	350
10.1.4.	Ochrona przed przegrzaniem w urządzeniach do wymuszonego ogrzewania powietrzem i wytwarzania gorącej wody lub pary	350
10.2.	Przebiegi i ochrona przeciwprzebiegowa	351
10.2.1.	Wiadomości ogólne	351
10.2.2.	Środki i sposoby ochrony przed skutkami przebieg	353
11.	Instalacje elektryczne w obiektach specjalnego przeznaczenia	367
11.1.	Wiadomości ogólne	367
11.2.	Gospodarstwa rolne i ogrodnicze	367
11.3.	Place budowy i robót rozbiórkowych	370
11.4.	Pomieszczenia o przewodzących ścianach i podłożu	373
11.5.	Kempingi i pojazdy wypoczynkowe	374
11.6.	Pomieszczenia wyposażone w wannę lub basen natryskowy	376
12.	Stan techniczny instalacji elektrycznych w budynkach o przeznaczeniu nieprzemysłowym	380
12.1.	Wiadomości ogólne	380
12.2.	Aktualny stan techniczny instalacji elektrycznych	381
12.3.	Niektóre podstawowe wymagania dotyczące instalacji elektrycznych	385
12.4.	Pożądane zakresy przebudowy instalacji elektrycznych	387
13.	Nowoczesne instalacje elektryczne	395
13.1.	Wiadomości ogólne	395
13.2.	Instalacje wykonane w systemie SI	397
13.3.	Europejska magistrala instalacyjna – Instabus EIB –KNX/EIB	405

13.3.1.	Ogólna charakterystyka systemu	405
13.3.2.	Przykłady wykonania instalacji w systemie Instabus EIB	412
13.4.	Sieci kontrolno-sterujące o inteligencji rozproszonej Lon Works	421
13.5.	Local Control Network – LCN	423

14. Wybrane zagadnienia projektowania i wykonywania instalacji elektrycznych 429

14.1.	Wymagania ogólne	429
14.2.	Instalacje elektryczne w pomieszczeniach mieszkalnych	431
14.3.	Instalacje elektryczne w pomieszczeniach przemysłowych	444
14.4.	Instalacje elektryczne w obiektach budownictwa ogólnego	451
14.4.1.	Wyjaśnienia i wymagania ogólne	451
14.4.2.	Urządzenia i układy zasilania	454
14.4.3.	Instalacje i obwody elektryczne odbiorcze	458
14.5.	Projektowanie instalacji elektrycznych wspomagane komputerowo	460
14.5.1.	Wiadomości ogólne	460
14.5.2.	Właściwości techniczne i zastosowanie niektórych programów CAD/CAE	462
14.5.3.	Projektowanie oświetlenia elektrycznego z wykorzystaniem programów komputerowych	472

Literatura 474

Skorowidz 481



Przedmowa do wydania dziewiątego



Instalacje elektryczne powinny pozostawać w takim stanie technicznym, aby użytkownicy mogli korzystać bez ograniczeń ze wszystkich posiadanych przez siebie elektrycznych urządzeń gospodarstwa domowego, sprzętu radiowo-telewizyjnego, teletechnicznego i innego w sposób niezawodny, nieuciążliwy i bezpieczny. Jakość energii elektrycznej dostarczanej instalacjami do odbiorników, określona głównie wartością skuteczną napięcia, jej zmiennością w czasie i odchyleniami od wartości znamionowej, symetrią napięć w układzie trójfazowym oraz zawartością wyższych harmonicznych w napięciu zasilającym, powinna być odpowiednio wysoka, aby zapewnić poprawną i długotrwałą pracę wszystkich urządzeń elektrycznych.

Te w zasadzie podstawowe wymagania są spełnione w Polsce praktycznie jedynie w budynkach oddanych do użytku po 1995 r. oraz w tych budynkach, w których instalacje elektryczne zostały w ostatnim okresie poprawnie zmodernizowane. W większości pozostałych mieszkań stan techniczny instalacji jest przeważnie niezadowalający. W budynkach z lat 1960–1990 instalacje elektryczne wykonywano w sposób bardzo oszczędny, z zastosowaniem m.in. przewodów z żyłami aluminiowymi o zbyt małych, w stosunku do aktualnych potrzeb przekrojach, jak i najprostszych urządzeń zabezpieczających w postaci bezpieczników i przez to nie spełniają one warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać współczesne instalacje elektryczne. Instalacje takie stwarzają obecnie wiele ograniczeń w zainstalowaniu odbiorników o większych mocach znamionowych, np. kuchni elektrycznych czy elektrycznych podgrzewaczy wody, oraz uniemożliwiają jednoczesne korzystanie z kilku odbiorników, nawet o niewielkich mocach znamionowych. Utrudniają także prostą modernizację mieszkania, polegającą np. na wymianie wyeksploatowanych już urządzeń gazowych na bardziej estetyczne i bezpieczne urządzenia elektryczne.

Instalacje takie, poza uciążliwością w użytkowaniu urządzeń elektrycznych, są przede wszystkim niebezpieczne pod względem porażeniowym i pożarowym,

m.in. wskutek zastosowania urządzeń zabezpieczających o niewielkiej skuteczności działania jak na współczesne możliwości techniczne.

Książka ta to kolejne, już dziewiąte, zaktualizowane wydanie „Instalacji elektrycznych”. Autor i Wydawnictwa Naukowo-Techniczne mają nadzieję, że zostanie ona przyjęta przez Czytelników równie przychylnie, jak jej wcześniejsze wydania.

Wrocław, maj 2018 r.

HENRYK MARKIEWICZ

1



Klasyfikacja instalacji, urządzeń elektrycznych i środowiska oraz niektóre wymagania ogólne



1.1. Podział instalacji elektrycznych

Instalacja elektryczna jest zespołem urządzeń elektrycznych o skoordynowanych parametrach technicznych, napięciu znamionowym do 1000 V prądu przemiennego i 1500 V prądu stałego, przeznaczonych do doprowadzenia energii elektrycznej z sieci rozdzielczej do odbiorników. Instalacja taka obejmuje nie tylko przewody i kable elektroenergetyczne, urządzenia i przyrządy łączeniowe, zabezpieczające, ochronne, sterujące i pomiarowe wraz z ich obudowami i konstrukcjami wsporczymi, lecz także rezerwowe źródła energii elektrycznej, takie jak: baterie akumulatorowe, urządzenia bezprzerwowego zasilania (UPS) oraz zespoły prądotwórcze, wraz z instalacjami przynależnymi do tych urządzeń.

Podział instalacji elektrycznych może być oparty na różnych kryteriach. Do bardziej rozpowszechnionych należy podział ze względu na rodzaj zasilanych odbiorników. Wówczas rozróżnia się:

- *instalacje oświetleniowe* – zasilające zarówno elektryczne źródła światła, jak i inne urządzenia o niewielkiej mocy, takie jak: przenośne urządzenia grzejne w mieszkaniach, zbiornikowe podgrzewacze wody o małej objętości i mocy;
- *instalacje siłowe* – zasilające silniki elektryczne oraz przemysłowe urządzenia grzejne; do tych instalacji można też zaliczyć instalacje zasilające kuchnie elektryczne i urządzenia grzejne jako jedyne lub dominujące w pomieszczeniach oraz podgrzewacze wody o dużych mocach znamionowych.

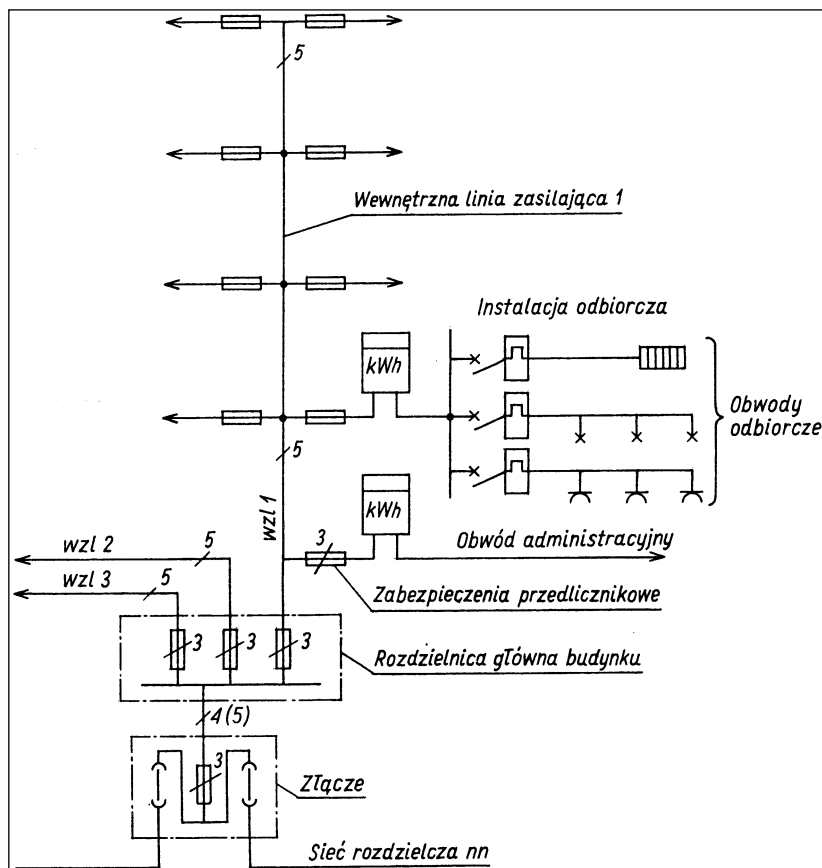
W zależności od miejsca występowania instalacje dzieli się na:

- *nieprzemysłowe* – zasilające odbiorniki elektryczne w budynkach mieszkalnych, biurowych, szkolnych itp.;
- *przemysłowe* – wykonane w zakładach i pomieszczeniach o przeznaczeniu przemysłowym;
- *inne* – np. w obiektach rolniczych, hodowlanych, górnictwie.

Zależnie od przewidywanego czasu użytkowania instalacje dzieli się na stałe oraz prowizoryczne (tymczasowe), co do których zakłada się, że będą one eksploatowane w ograniczonym czasie, krótszym niż 3 lata. Instalacje prowizoryczne muszą zapewniać takie samo bezpieczeństwo pod względem porażeniowym, pożarowym i in. jak instalacje stałe.

Instalacje elektryczne zasilające odbiorniki o umiarkowanym poborze mocy – do 100 kVA, a niekiedy i większym – są zasilane z sieci rozdzielczych niskiego napięcia. Urządzenie, w którym następuje połączenie sieci rozdzielczej z instalacją elektryczną odbiorcy, nazywa się *złączem*. Jeżeli w zasilanym budynku jest wiele mieszkań lub urządzeń elektrycznych o znacznych mocach znamionowych, to zasilanie poszczególnych instalacji odbiorczych oraz odbiorników realizuje się przez *wewnętrzne linie zasilające* (wiz) oraz rozdzielnice odbiorcze (rys. 1.1).

W budynkach mieszkalnych wielorodzinnych o niewielkiej liczbie mieszkań na ogół jest jedna linia zasilająca do zasilania wszystkich mieszkań w danej klatce schodowej. W budynkach wysokich, o dużej liczbie mieszkań, jak również tam, gdzie liczba mieszkań jest niewielka, ale jest znaczny pobór mocy, może być konieczne zastosowanie za złączem rozdzielnicy głównej i większej liczby wewnętrznych linii



Rys. 1.1. Charakterystyczne elementy instalacji elektrycznej w budynku mieszkalnym

zasilających w jednej klatce schodowej. W ten sposób można zapewnić odpowiednią jakość dostarczanej energii, zmniejszyć przekroje przewodów, zwiększyć niezawodność zasilania odbiorców oraz obniżyć koszty wykonania instalacji.

W budynkach o podwyższonym standardzie zasilanie poszczególnych mieszkań dokonuje się niekiedy osobnymi liniami prowadzonymi od rozdzielnic zainstalowanej przy złączu.

1.2. Definicje pojęć dotyczących instalacji elektrycznych i ochrony przeciwporażeniowej

Obecnie w Polsce występuje duża dowolność definicji pojęć z dziedziny elektroenergetyki. Spowodowane to jest wprowadzeniem w ostatnim okresie wielu nowych norm będących z założenia wiernym tłumaczeniem z języków obcych (przeważnie z angielskiego) odpowiednich norm międzynarodowych lub raportów Międzynarodowej Komisji Elektrotechnicznej (IEC). Nowe definicje nie zawsze są bardziej precyzyjne niż wcześniej stosowane, a nierzadko jest nawet odwrotnie.

Określenia podane niżej i używane w książce zaczerpnięto z normy [130], przepisów „Warunki techniczne, jakim powinny odpowiadać urządzenia elektroenergetyczne...” [180] oraz innych przepisów obowiązujących w latach 1969÷1995 [179], opartych w przypadku definicji pojęć na normie PN-66/E-05009 z 1966 r.

Bariera (przeszkoda) – element chroniący przed niezamierzonym dotykiem bezpośrednim części czynnych, lecz niechroniący przed dotykiem bezpośrednim spowodowanym działaniem rozmyślnym.

Części jednocześnie dostępne – przewody lub części przewodzące, które mogą być dotknięte jednocześnie przez człowieka lub zwierzę; mogą nimi być części czynne, części przewodzące dostępne i obce, przewody ochronne i uziomy.

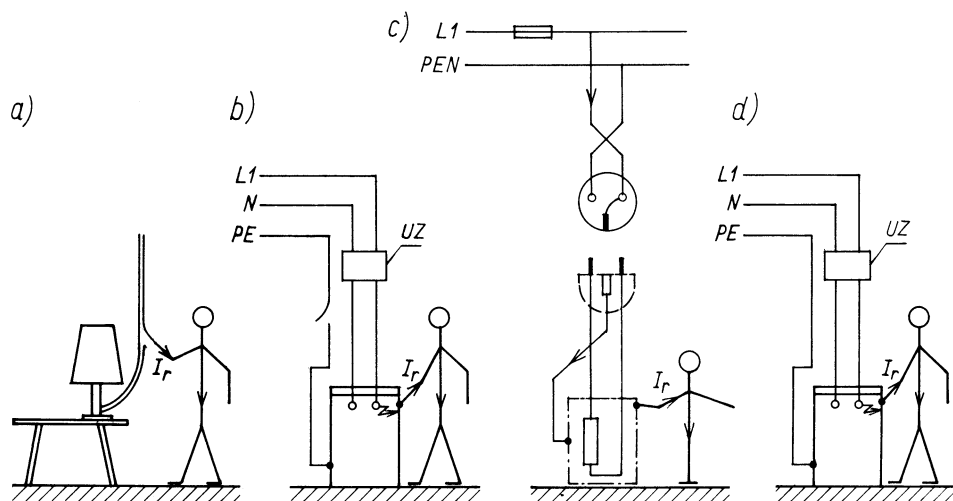
Część czynna – przewód lub część przewodząca urządzenia lub instalacji elektrycznej, która może się znaleźć pod napięciem w warunkach normalnej pracy instalacji elektrycznej, lecz nie pełni funkcji przewodu ochronnego; częścią czynną jest przewód neutralny N, lecz nie jest nim przewód ochronny PE ani ochronno-neutralny PEN.

Część przewodząca dostępna – część przewodząca instalacji elektrycznej dostępna dla dotyku palcem probiernym wg PN/E-08507, która może być dotknięta i która w warunkach normalnej pracy instalacji nie znajduje się pod napięciem, lecz w wyniku uszkodzenia może się znaleźć pod napięciem.

Część przewodząca obca – część przewodząca niebędąca częścią urządzenia ani instalacji elektrycznej, która może się znaleźć pod określonym potencjałem, zwykle pod potencjałem ziemi; zalicza się do nich metalowe konstrukcje, rurociągi, przewodzące podłogi i ściany.

Dotyk bezpośredni – dotknięcie przez człowieka lub zwierzę części czynnych (rys. 1.2a, b, c).

Dotyk pośredni – dotknięcie przez człowieka lub zwierzę części przewodzących dostępnych, które znalazły się pod napięciem w wyniku uszkodzenia izolacji (rys. 1.2d).



Rys. 1.2. Przypadki rażeń: a, b) bezpośredniego przy przerwaniu przewodów; c) bezpośredniego przy zamianie przewodu fazowego L z ochronno-neutralnym PEN w gnieździe wtyczkowym lub we wtyczce w instalacji o układzie TN-C; d) rażenia pośredniego

UZ – urządzenie zabezpieczające, LI – przewód fazowy, N – przewód neutralny, PEN – przewód ochronno-neutralny, I_r – prąd rażeniowy

Izolacja ochronna – środek ochrony przeciwporażeniowej dodatkowej polegający na zastosowaniu izolacji podwójnej lub izolacji wzmocnionej, lub osłony izolacyjnej ochronnej.

Izolowanie stanowiska – środek ochrony przeciwporażeniowej dodatkowej polegający na pokryciu stanowiska materiałem izolacyjnym oraz na izolowaniu od ziemi znajdujących się w zasięgu ręki przewodzących części urządzeń i części obcych połączonych ze sobą nieuziemiałymi przewodami wyrównawczymi.

Klasa ochronności – umowne oznaczenie cech budowy urządzenia elektrycznego wg PN/E-05 031, określające możliwości objęcia go ochroną przeciwporażeniową dodatkową.

Napięcie bardzo niskie (ELV) – napięcie przemienne sinusoidalne o wartości skutecznej nieprzekraczającej 50 V lub napięcie stałe – o pomijalnym tętnieniu – o wartości średniej nieprzekraczającej 120 V.

Napięcie dotykowe (U_T) – napięcie występujące w razie uszkodzenia izolacji między dwoma punktami, z którymi mogą się zetknąć jednocześnie obie ręce lub jedna ręka i stopa człowieka; napięciem dotykowym – dla oceny zagrożenia porażeniem zwierząt w gospodarstwach hodowlanych i lecznicach – jest napięcie występujące w razie uszkodzenia izolacji między punktami, z którymi mogą się zetknąć jednocześnie głowa i nogi zwierzęcia.

Napięcie w miejscu uszkodzenia (U_F) – napięcie między częścią przewodzącą a ziemią odniesienia występujące podczas zwarcia doziemnego.

Napięcie względem ziemi – najwyższe z napięć występujących długotrwale między częścią czynną urządzenia a ziemią:

– w sieci lub instalacji elektrycznej o bezpośrednim uziemieniu roboczym,

– w sieci lub instalacji elektrycznej bez bezpośredniego uziemienia robocze-go, dotkniętej zwarcie doziemnym.

Obciążalność prądowa długotrwała przewodu – maksymalna wartość skuteczna prądu, który może płynąć długotrwale przez przewód w określonych warunkach bez przekroczenia dopuszczalnej temperatury przewodu.

Obudowa (osłona) – element konstrukcyjny zapewniający ochronę przed niektórymi wpływami otoczenia i przed dotykiem bezpośrednim części czynnych z dowolnej strony. Obudowa o stopniu ochrony co najmniej IP2X lub IPXXB może pełnić funkcję osłony.

Obwód instalacji elektrycznej – zespół elementów instalacji elektrycznej wspólnie zasilanych i chronionych przed przetężeniami wspólnym zabezpieczeniem.

Obwód odbiorczy (obwód końcowy) – obwód, do którego są przyłączone bezpośrednio odbiorniki energii elektrycznej lub gniazda wtyczkowe.

Obwód FELV – obwód napięcia bardzo niskiego, niezapewniający niezawodnego oddzielenia elektrycznego od innych obwodów; obwód może mieć uziemienie robocze; napięcie bardzo niskie jest stosowane ze względów funkcjonalnych, a nie w celu ochrony przeciwporażeniowej.

Obwód PELV – obwód napięcia bardzo niskiego, z uziemieniem roboczym, zasilany ze źródła bezpiecznego, zapewniający niezawodne oddzielenie elektryczne od innych obwodów.

Obwód SELV – obwód napięcia bardzo niskiego, bez uziemienia roboczego, zasilany ze źródła bezpiecznego, zapewniający niezawodne oddzielenie elektryczne od innych obwodów.

Ochrona przeciwporażeniowa – zespół środków technicznych zapobiegających porażeniom prądem elektrycznym ludzi i zwierząt w normalnych i zakłóceńowych warunkach pracy urządzeń elektrycznych; w urządzeniach niskiego napięcia rozróżnia się ochronę przeciwporażeniową przed dotykiem bezpośrednim (ochronę podstawową), przy dotyku pośrednim (ochronę dodatkową) oraz ochronę uzupełniającą.

Ochrona przeciwporażeniowa przed dotykiem bezpośrednim (ochrona podstawowa) – zespół środków technicznych chroniących przed zetknięciem się człowieka lub zwierzęcia z częściami czynnymi oraz przed pojawieniem się napięcia na częściach przewodzących nieznajdujących się pod napięciem w warunkach normalnej pracy instalacji.

Ochrona przeciwporażeniowa przy dotyku pośrednim (ochrona dodatkowa) – zespół środków technicznych chroniących przed, wynikłymi z uszkodzenia ochrony przeciwporażeniowej podstawowej, skutkami zetknięcia się człowieka lub zwierzęcia z częściami przewodzącymi i/lub częściami obcymi.

Odbiornik energii elektrycznej – urządzenie przeznaczone do przetwarzania energii elektrycznej w inną formę energii, np. światło, ciepło, energię mechaniczną.

Osłona – element konstrukcyjny o stopniu ochrony co najmniej IP2X lub IPXXB, chroniący przed umyślnym zetknięciem się z częściami czynnymi, zastosowany w celu zapewnienia ochrony przeciwporażeniowej podstawowej.

Osłona izolacyjna ochronna – osłona z materiału izolacyjnego zapewniająca (razem z izolacją podstawową) ochronę od porażenia w stopniu równoważnym izolacji podwójnej.

Połączenie wyrównawcze – elektryczne połączenie części przewodzących dostępnych i części przewodzących obcych, dokonane w celu wyrównania potencjałów.

Połączenie wyrównawcze dodatkowe (miejscowe) – połączenie wyrównawcze wykonane w innym miejscu niż połączenie wyrównawcze główne.

Połączenie wyrównawcze główne – połączenie wyrównawcze (patrz rys. 3.19) wykonane najczęściej w przyziemnej kondygnacji budynku, w pobliżu miejsca wprowadzenia sieci lub instalacji elektrycznej do budynku, np. w pobliżu złącza.

Porażenie prądem elektrycznym – skutki patofizjologiczne wywołane przepływem prądu elektrycznego przez ciało człowieka lub zwierzęcia.

Prąd przeciążeniowy – prąd przetężeniowy powstały w nieuszkodzonym obwodzie elektrycznym.

Prąd przetężeniowy – dowolna wartość prądu większa od wartości znamionowej; w przypadku przewodów wartością znamionową jest obciążalność prądowa długotrwała.

Prąd rażeniowy – prąd przepływający przez ciało człowieka lub zwierzęcia, który może powodować skutki patofizjologiczne.

Prąd różnicowy – prąd o wartości chwilowej równej sumie algebraicznej wartości chwilowej prądów płynących we wszystkich przewodach czynnych w określonym miejscu sieci lub instalacji elektrycznej; w urządzeniach prądu przemiennego wartość skuteczna prądu różnicowego jest sumą geometryczną (wektorową) wartości skutecznej prądów płynących we wszystkich przewodach czynnych.

Prąd upływowy – prąd, który w urządzeniu niedotkniętym zwarcie płynie od części czynnych do ziemi; w wielofazowym urządzeniu prądu przemiennego wypadkowy prąd upływowy jest geometryczną (wektorową) sumą prądów upływowych poszczególnych faz; zawiera on składową czynną wynikającą z upływności izolacji oraz składową pojemnościową wynikającą z pojemności doziemnych urządzenia i pojemności przyłączonych kondensatorów.

Prąd wyłączający (I_a) – najmniejszy prąd wywołujący w wymaganym czasie zadziałanie urządzenia zabezpieczającego powodującego samoczynne wyłączenie zasilania.

Prąd zadziałania urządzenia zabezpieczającego (umowny) – określona wartość prądu powodującego zadziałanie urządzenia zabezpieczającego w określonym czasie, zwanym czasem umownym zadziałania.

Prąd zwarciov – prąd przetężeniowy powstały w wyniku połączenia ze sobą – bezpośrednio lub przez impedancję o pomijalnie małej wartości – przewodów, które w normalnych warunkach pracy instalacji elektrycznej mają różne potencjały.

Przewód neutralny N – przewód połączony bezpośrednio z punktem neutralnym (zerowym) układu sieci i mogący służyć do przesyłania energii elektrycznej.

Przewód ochronno-neutralny PEN – uziemiony przewód spełniający jednocześnie funkcję przewodu ochronnego PE i przewodu neutralnego N.

Przewód ochronno-powrotny PER – uziemiony przewód pełniący funkcję przewodu ochronnego PE i przewodu powrotnego R sieci lub instalacji prądu stałego.

Przewód ochronny PE – uziemiony przewód stanowiący element zastosowanego środka ochrony przeciwporażeniowej dodatkowej, niepodlegający obciążeniu prądami roboczymi, do którego przyłącza się części przewodzące dostępne, połączony z główną szyną uziemiającą.

Przewód uziemiający – przewód łączący zacisk uziemiający (zacisk probierczy uziomowy, część uziemiana) z uziomem.

Przewód wyrównawczy – przewód zapewniający wyrównanie potencjałów łączonych części.

Rażenie prądem elektrycznym – zdarzenie polegające na przepływie prądu rażeniowego.

Rezystancja stanowiska – rezystancja między ziemią odniesienia a elektrodą odwzorowującą (elektrodami odwzorowującymi) styczność ze stanowiskiem bosych stóp człowieka.

Rezystancja uziemienia – rezystancja między ziemią odniesienia a zaciskiem uziemiającym lub zaciskiem probierczym uziomowym.

Rozdzielnica – urządzenie przeznaczone do włączania w instalację elektryczną, pełniące jedną lub więcej następujących funkcji: rozdział energii elektrycznej, załączanie i odłączanie, zabezpieczenie obwodów i odbiorników.

Separacja elektryczna – środek ochrony przeciwporażeniowej dodatkowej polegający na zasilaniu urządzenia elektrycznego za pomocą transformatora separacyjnego lub przetwornicy separacyjnej, przy czym wszystkie części czynne obwodu separowanego są niezawodnie oddzielone elektrycznie od innych obwodów i ziemi.

Sieć elektryczna rozdzielcza – sieć elektryczna przeznaczona do rozdziału energii elektrycznej.

Stanowisko dostępne – stanowisko, na którym człowiek o przeciętnej sprawności fizycznej może się znaleźć bez korzystania ze środków pomocniczych, takich jak drabina lub słupolazy.

Stopień ochrony obudowy IP – umowna miara ochrony, zapewnianej przez obudowę, przed dotknięciem części czynnych i poruszających się mechanizmów, przedstawianiem się ciał stałych i wnikaniem wody, ustalona zgodnie z PN/E-08106.

Szyna uziemiająca (główna lub miejscowa) – szyna przeznaczona do połączenia z uziomem przewodów ochronnych PE i/lub przewodów wyrównawczych i/lub przewodów uziemień roboczych. Szyna uziemiająca może pełnić funkcję szyny wyrównawczej.

Szyna wyrównawcza (główna lub miejscowa) – szyna przeznaczona do przyłączania przewodów wyrównawczych zapewniających połączenia wyrównawcze (główne lub miejscowe).

Transformator bezpieczeństwa – transformator ochronny o napięciu wtórnym nie wyższym od napięcia bardzo niskiego w normalnych warunkach pracy.

Transformator ochronny – transformator, wykonany zgodnie z PN/E-08105, zapewniający niezawodne oddzielenie elektryczne obwodu wtórnego od obwodu pierwotnego.

Transformator separacyjny – transformator ochronny o napięciu wtórnym wyższym od napięcia bardzo niskiego w normalnych warunkach pracy.

Układ IT – układ sieci elektrycznej rozdzielczej lub instalacji elektrycznej, w którym wszystkie części czynne są izolowane od ziemi albo jedna z nich jest uziemiona przez bezpiecznik iskiernikowy i/lub przez dużą impedancję, a części przewodzące są uziemione (rys. 1.4e, f).

Układ TN – układ sieci elektrycznej rozdzielczej lub instalacji elektrycznej, w którym punkt neutralny (zerowy) jest bezpośrednio uziemiony, a części przewodzące dostępne są z nim połączone przewodami ochronnymi PE i/lub przewodami ochronno-neutralnymi PEN (przewodami ochronno-powrotnymi PER), w wyniku czego pętla zwarcia jest w całości metaliczna. Stosownie do braku lub obecności i zasięgu przewodu ochronno-neutralnego PEN (przewodu ochronno-powrotnego PER) rozróżnia się (rys. 1.4): podukład TN-C, podukład TN-S oraz podukład TN-C-S.

Układ TT – układ sieci elektrycznej rozdzielczej lub instalacji elektrycznej, w którym punkt neutralny (zerowy) lub przewód czynny jest bezpośrednio uziemiony, a części przewodzące są połączone z uziomami niepołączonymi z uziemieniem roboczym (rys. 1.4d), w wyniku czego pętla zwarcia z częścią przewodzącą zamyka się przez ziemię.

Urządzenia elektryczne – wszystkie urządzenia i elementy instalacji elektrycznej przeznaczone do wytwarzania, przekształcania, przesyłania, rozdziału lub wykorzystania energii elektrycznej; urządzeniami elektrycznymi są np. maszyny elektryczne, transformatory, aparaty, przyrządy pomiarowe, urządzenia zabezpieczające, oprzewodowanie, odbiorniki.

Urządzenie nieprzenośne (stacjonarne) – urządzenie nieruchome, którego przemieszczanie podczas normalnego użytkowania jest trudne, bo ma dużą masę (co najmniej 18 kg w przypadku urządzeń powszechnego użytku) i jest pozbawione uchwytów do ręcznego przenoszenia.

Urządzenie przenośne (przemieszczalne) – urządzenie, które podczas użytkowania może być z łatwością przemieszczane lub przyłączone do innego źródła zasilania, w innym miejscu użytkowania.

Urządzenie ręczne – urządzenie przenośne przeznaczone do trzymania w ręce podczas jego użytkowania, przy czym silnik (jeżeli jest) stanowi integralną część tego urządzenia.

Urządzenie stałe – urządzenie nieruchome przymocowane do podłoża lub dowolnej innej konstrukcji stałej.

Uziemienie – połączenie elektryczne z ziemią; uziemieniem nazywa się też urządzenie uziemiające obejmujące uziom, przewód uziemiający oraz – jeśli występują – zacisk probierczy uziomowy i szynę uziemiającą.

Uziemienie ochronne – środek ochrony przeciwporażeniowej dodatkowej w układzie TT oraz IT, polegający na połączeniu części przewodzących urządzenia elektrycznego z uziomem o rezystancji uziemienia skoordynowanej z charakterystyką zabezpieczenia zwarciovego tego urządzenia; pojęcie obecnie eliminowane z użycia w odniesieniu do instalacji niskiego napięcia.

Uziemienie otwarte – połączenie części uziemiaanej z uziomem za pomocą bezpiecznika iskiernikowego.

Uziemienie pomocnicze – uziemienie części czynnej albo części przewodzącej wykonane w celu ochrony przeciwporażeniowej, ochrony przeciwzakłóceń lub z innych powodów; nie jest ono uziemieniem roboczym ani uziemieniem będącym elementem systemu ochrony przeciwporażeniowej, polegającym na samoczynnym wyłączeniu zasilania w sieci TT lub IT.

Uziemienie robocze – uziemienie określonego punktu obwodu elektrycznego (części czynnej i/lub przewodu PEN) w celu zapewnienia prawidłowej pracy urządzeń elektrycznych. Uziemienie robocze może być bezpośrednie, pośrednie lub otwarte.

Uziom – przedmiot lub zespół przedmiotów metalowych umieszczonych bezpośrednio w gruncie (ziemi) lub w betonie i ziemi, tworzący elektryczne połączenie przewodzące z ziemią.

Uziom fundamentowy – uziom w postaci taśmy albo pręta stalowego zatopiony w betonowym fundamencie do celów uziemienia (uziomek fundamentowy sztuczny) lub uziom w postaci stalowego zbrojenia betonowego fundamentu (uziomek fundamentowy naturalny).

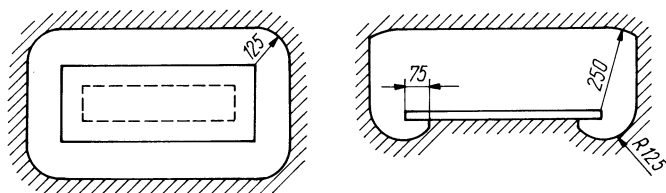
Uziomek naturalny – uziomek wykonany w innym celu niż uziemienie, wykorzystywany do celów uziemienia.

Uziomek sztuczny – uziomek wykonany do celów uziemienia.

Wewnętrzna linia zasilająca (wiz), obwód rozdzielczy – obwód elektryczny zasilający tablice rozdzielcze (rozdzielnice), z których są zasilane obwody odbiorcze.

Wyłącznik przeciwporażeniowy różnicowoprądowy – łącznik samoczynny wyposażony w człony: pomiarowy i wyzwalający, wywołujące działanie (wyłączenie) w przypadku wystąpienia prądów różnicowych większych od znamionowego prądu wyzwalającego. *Wyłącznik różnicowoprądowy wysokoczuły* jest wyłącznikiem o znamionowym różnicowym prądzie wyzwalającym nie większym niż 30 mA.

Zasięg ręki – przestrzeń (obszar) zawarta między dowolnym punktem powierzchni stanowiska, na którym człowiek zwykle stoi lub się porusza, a powierzchnią, którą może dosięgnąć ręką w dowolnym kierunku bez użycia środków pomocniczych (rys. 1.3).



Rys. 1.3. Zasięg ręki (wymiary w centymetrach)

Ziemia odniesienia – dowolny punkt na powierzchni albo w głębi ziemi, którego potencjał nie zmienia się pod wpływem prądu przepływającego przez rozpatrywany uziomek lub uziomy.

Złącze instalacji elektrycznej – urządzenie elektryczne, w którym następuje połączenie wspólnej sieci elektrycznej rozdzielczej z instalacją elektryczną odbiorcy.

1.3. Zakresy napięciowe sieci rozdzielczych i instalacji elektrycznych

Odbiorniki elektryczne ze względu na przeznaczenie, moc znamionową, środowisko, w jakim są zainstalowane, oraz inne uwarunkowania buduje się na różne napięcia

1. Klasyfikacja instalacji, urządzeń elektrycznych i środowiska oraz niektóre wymagania ogólne

znamionowe. W normie PN-91/E-05010 [93] zgodnej z raportem IEC 441 ustalono dwa zakresy napięciowe: I i II (tabl. 1.1 i 1.2). W zależności od zakresu napięciowego bardzo różne są wymagania dotyczące sposobu wykonania ochrony przeciwporażeniowej.

TABLICA 1.1. Zakresy napięciowe prądu przemiennego, wg PN-91/E-05010 [93]

Zakres napięciowy	Napięcie znamionowe U_N		
	układy instalacji uziemione		układy instalacji izolowane lub uziemione pośrednio
	faza–ziemia	faza–faza	faza–faza
I	$U_N \leq 50 \text{ V}$	$U_N \leq 50 \text{ V}$	$U_N \leq 50 \text{ V}$
II	$50 \text{ V} < U_N \leq 600 \text{ V}$	$50 \text{ V} < U_N \leq 1000 \text{ V}$	$50 \text{ V} < U_N \leq 1000 \text{ V}$

TABLICA 1.2. Zakresy napięciowe prądu stałego, wg PN-91/E-05010 [93]

Zakres napięciowy	Napięcie znamionowe U_N		
	układy instalacji uziemione		układy instalacji izolowane lub uziemione pośrednio
	biegun–ziemia	biegun–biegun	
I	$U_N \leq 120 \text{ V}$	$U_N \leq 120 \text{ V}$	$U_N \leq 120 \text{ V}$
II	$120 \text{ V} < U_N \leq 900 \text{ V}$	$120 \text{ V} < U_N \leq 1500 \text{ V}$	$120 \text{ V} < U_N \leq 1500 \text{ V}$

Obecnie na świecie są rozpowszechnione sieci, instalacje oraz urządzenia elektryczne o bardzo różnych wartościach napięć znamionowych. Utrudnia to swobodną wymianę tych urządzeń, wymuszając specjalne wykonania i zwiększając ich różnorodność, zbędną w tym przypadku. Z tych względów Komitet IEC 38 ustalił w 1983 r. nowe wartości napięć znamionowych sieci i urządzeń (tabl. 1.3), które powinny obowiązywać od 2003 r. Napięcie 230/400 V zastąpiło napięcie 220/380 V rozpowszechnione wcześniej w Europie oraz 240/415 V – w wielu innych, choć nie

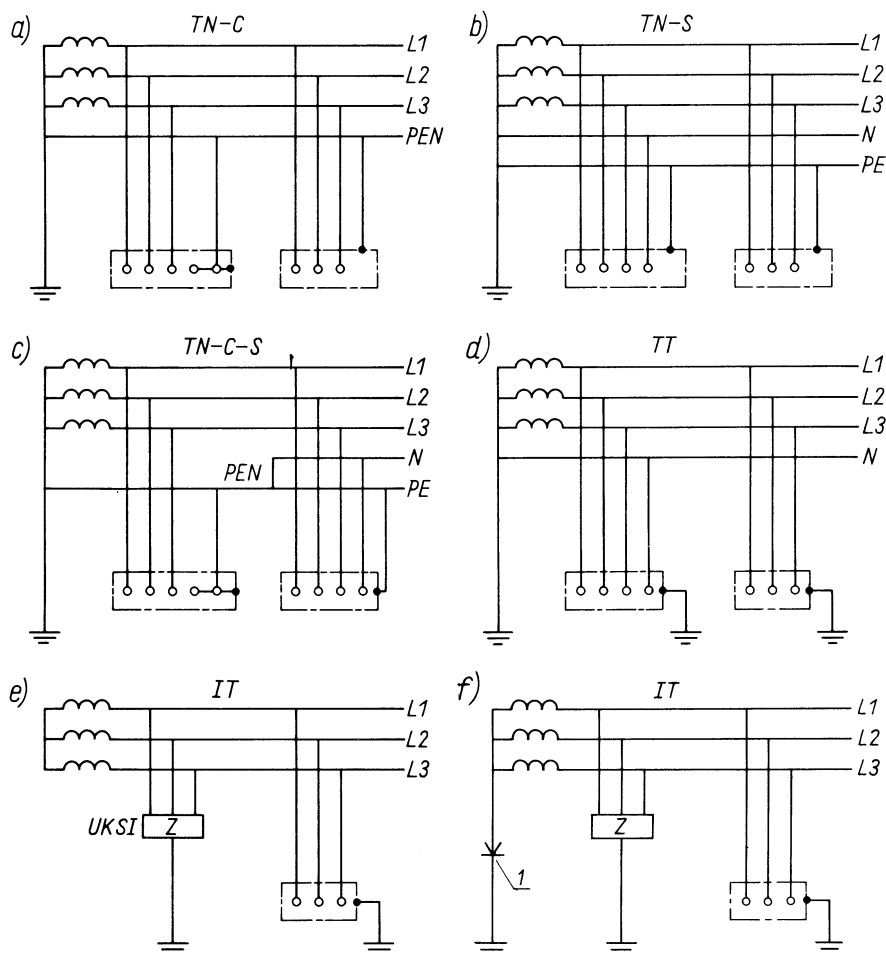
TABLICA 1.3. Napięcie znamionowe sieci oraz urządzeń elektroenergetycznych prądu stałego i przemiennego niskiego napięcia, wg IEC 38

Rodzaj prądu	Napięcie znamionowe, V	
	bardzo niskie	niskie
Prąd stały	6, 12, 24, 36, 48, 60, 72, 96, 110	220, 440, 750, 1500
Prąd przemienny	6, 12, 24, 48	120/240 ¹⁾ , 230/400 ²⁾ , 277/480 ²⁾ , 400/690 ²⁾ , 1000 ²⁾
¹⁾ Układ jednofazowy trójprzewodowy. ²⁾ Układy trójfazowe trój- i czteroprzewodowe.		

we wszystkich krajach. Dotychczasowe sieci i instalacje o napięciu 500 i 660 V powinny być przebudowane, a nowe projektowane na napięcie 400/690 V, czego niestety nie dokonano w większości krajów.

1.4. Układy sieci i instalacji elektrycznych niskiego napięcia

Sieci elektroenergetyczne niskiego napięcia mogą być wykonane jako uziemione lub izolowane względem ziemi (rys. 1.4). Różna też może być liczba przewodów przewodzących prąd i różne systemy ochrony przeciwporażeniowej, w tym różne sposoby uziemienia obudów chronionych urządzeń. Jeżeli sieć jest uziemiona (TN, TT), to



Rys. 1.4. Różne sposoby uziemienia punktów neutralnych sieci niskiego napięcia:

a) sieć typu TN-C; b) sieć typu TN-S; c) sieć typu TN-C-S; d) sieć typu TT; e), f) sieć typu IT
UKSI – urządzenie do kontroli stanu izolacji; I – bezpiecznik iskiernikowy

uziemiać powinno być wykonane blisko źródła zasilania. Uziemia się przeważnie punkt neutralny uzwojenia transformatora bezpośrednio w stacji transformatorowej.

W sieciach izolowanych względem ziemi, zasilanych z sieci średniego napięcia, stosuje się bezpiecznik iskiernikowy włączony między punkt gwiazdowy transformatora a ziemię (rys. 1.4f). Przy znacznym podwyższeniu się napięcia tego punktu względem ziemi, występującym po uszkodzeniu izolacji transformatora, bezpiecznik iskiernikowy ulega przebiciu, co powinno spowodować obniżenie się tego napięcia do wartości uznawanej w danych warunkach za dopuszczalną. W transformatorach o izolacji stałej, żywicznej, w których uszkodzenie izolacji jest bardzo mało prawdopodobne, można zrezygnować ze stosowania takiego bezpiecznika.

Układy sieci podane na rys. 1.4 mają własne kody literowe (tabl. 1.4), przy czym:

- pierwsza litera (T lub I) oznacza związek między układem sieci a ziemią;
- druga litera (N lub T) oznacza sposób połączenia z ziemią części przewodzących urządzeń niepozostających w normalnych warunkach pracy pod napięciem;

TABLICA 1.4. Sposoby uziemiać sieci elektroenergetycznych niskiego napięcia

Pierwsza litera	Druga litera	Trzecia i czwarta litera	Oznaczenie układu sieci
T bezpośrednie połączenie jednego punktu (neutralnego) układu sieci z ziemią	N bezpośrednie połączenie dostępnych części przewodzących z uziemionym punktem neutralnym układu sieci	C funkcje przewodów neutralnych i ochronnych pełni jeden przewód w całym układzie sieci	TN-C (rys. 1.4a)
		S funkcje przewodów neutralnych i ochronnych pełnią oddzielne przewody w całym układzie sieci	TN-S (rys. 1.4b)
		C-S funkcje przewodów neutralnych i ochronnych w części układu pełni jeden przewód, a w części układu oddzielne przewody	TN-C-S (rys. 1.4c)
I wszystkie części będące pod napięciem są izolowane od ziemi lub punkt neutralny układu sieci jest połączony z ziemią przez impedancję o dużej wartości	T bezpośrednie połączenie z ziemią podległych ochronie dostępnych części przewodzących, niezależnie od uziemienia punktu neutralnego sieci	nie występują	TT (rys. 1.4d)
		nie występują	IT (rys. 1.4e, f)

– trzecia i czwarta litera (C lub/oraz S) określają, czy układ ma wspólny przewód ochronno-neutralny PEN (litera C), czy przewody neutralny (N) i ochronny (PE) są rozdzielone (litera S).

Poszczególne litery są skrótami od wyrażień:

- T – *terre* (franc.) – ziemia;
- N – *neutral* (ang.) – neutralny;
- I – *isolate* (ang.) – izolować;
- C – *combine* (ang.) – łączyć, wiązać;
- S – *separate* (ang.) – rozdzielać, oddzielać.

W większości krajów europejskich, również w Polsce, najbardziej rozpowszechnionym układem sieci oraz instalacji komunalnych i przemysłowych jest układ TN o napięciu znamionowym 230/400 V. W sieciach przemysłowych zasilających odbiorniki o znacznej mocy znamionowej, nieprzekraczającej jednak kilkuset kilowatów, powinno być stosowane napięcie 690 V. W Polsce odbiorniki takie są przeważnie jeszcze zasilane napięciem 500 V i jest stosowany układ IT. Jest on stosowany również w instalacjach o niższym napięciu w niektórych obiektach specjalnych, np. w instalacjach w szpitalach, zasilających aparaty i urządzenia elektromedyczne mające bezpośredni kontakt z pacjentem, często podtrzymujących lub ratujących życie.

W sieciach i instalacjach stosuje się przewody o różnym przeznaczeniu. Sposób oznaczania poszczególnych przewodów na schematach i planach elektrycznych (tabl. 1.5) powinien być jednoznaczny i zrozumiały dla projektantów i wykonawców instalacji, a różna barwa izolacji lub numeracja poszczególnych żył przewodów wielożyłowych powinna ułatwiać bezbłędny montaż.

TABLICA 1.5. Oznaczenia alfanumeryczne przewodów oraz zacisków przyłączeniowych odbiorników, wg PN-EN 60445:2002 [111]

Rodzaj zasilania	Rodzaj przewodów	Oznaczenie przewodów	Oznaczenie zacisków przyłączeniowych odbiorników
Prąd przemieniczny	przewody robocze – fazowe (liniowe) – neutralny	L, L1, L2, L3 N	U, V, W N
Prąd stały	przewody robocze: – biegun dodatni – biegun ujemny – przewód środkowy	L + L – M	C D M
Prąd stały lub przemieniczny	przewód ochronny przewód ochronno-neutralny w sieci prądu przemienicznego przewód uziemiający przewód wyrównawczy uziemiający przewód środkowy M lub roboczy L – i przewód ochronny PE w sieci prądu stałego	PE PEN E CC FPE lub PER	PE – E CC

Przewody ochronne PE oraz ochronno-neutralne PEN muszą być dwubarwne, zielono-żółte, przy czym stosunek powierzchni poszczególnych barw nie mniejszy niż 30 : 70. Przewody neutralne N oraz środkowe M (w instalacjach prądu stałego) powinny mieć barwę jasnoniebieską. W przewodach wielożyłowych żadna z żył nie może mieć barwy izolacji żółtej ani zielonej.

Przewody fazowe L i neutralne N w instalacjach wykonanych przewodami jednożyłowymi pod osłoną mogą mieć barwę dowolną, z wyjątkiem żółtej lub zielonej ani też nie mogą być wielobarwne. Przewody fazowe nie powinny mieć barwy jasnoniebieskiej, zarezerwowanej dla przewodu neutralnego N.

1.5. Sposoby wykonania urządzeń ze względu na wymagania dotyczące ochrony przeciwporażeniowej i ochrony przed szkodliwymi oddziaływaniami środowiska

Urządzenia elektryczne (odbiorniki energii elektrycznej) mogą być instalowane i eksploatowane w bardzo różnych warunkach środowiskowych i technicznych, określanych m.in. przez:

- układ sieci zasilającej (TN, TT, IT) oraz wartość napięcia znamionowego;
- warunki środowiska.

Dobre i zainstalowane urządzenia elektryczne powinny być tak wykonane, aby nie ulegały szybkiemu niszczącemu działaniu środowiska oraz aby same nie stanowiły zagrożenia dla ludzi, środowiska i innych urządzeń.

Urządzenia elektryczne prądu przemiennego o napięciu znamionowym nie wyższym niż 440 V i napięciu względem ziemi nie wyższym niż 250 V, w zależności od możliwego do zastosowania sposobu ochrony przeciwporażeniowej, dzieli się na klasy ochronności (tabl. 1.6).

Klasa ochronności 0 – ochronę przed porażeniem elektrycznym stanowi izolacja podstawowa. W przypadku uszkodzenia izolacji ochronę przeciwporażeniową powinny zapewnić odpowiednio korzystne warunki środowiskowe, takie jak: zainstalowanie urządzenia poza zasięgiem ręki, izolowanie stanowiska, brak w zasięgu ręki uziemionych urządzeń, instalacji oraz elementów konstrukcyjnych. W Polsce dopuszcza się stosowanie takich urządzeń przy braku jednoczesnego kontaktu człowieka z urządzeniem i potencjałem ziemi lub gdy kontakt taki jest rzadki [161].

Klasa ochronności I – ochronę przeciwporażeniową przed dotykiem pośrednim w tych urządzeniach wykonuje się, łącząc zacisk ochronny urządzenia z przewodem PE, PEN lub bezpośrednio z uziemieniem. Ma to zapewnić:

- odpowiednio szybkie zadziałanie odpowiednich urządzeń i wyłączenie zasilania albo

- ograniczenie napięć dotykowych do wartości nie przekraczających granicznych dopuszczalności U_L w danych warunkach środowiskowych.

TABLICA 1.6. Klasy ochronności urządzeń elektrycznych

Klasa ochronności	Klasa 0	Klasa I	Klasa II	Klasa III
Symbol	nie ma			
Cechy charakterystyczne wykonania urządzenia	– izolacja jedynie podstawowa – brak zacisku ochronnego	– izolacja jedynie podstawowa – zacisk ochronny do przyłączenia przewodu PE lub PEN	– izolacja podwójna lub wzmocniona – brak zacisku ochronnego	zasilanie napięciem bardzo niskim w układzie SELV lub PELV
Wymagania szczegółowe dotyczące sposobu wykonania ochrony przeciwporażeniowej	– izolowanie stanowiska – uniemożliwienie jednoczesnego dotknięcia dwóch różnych części przewodzących	przyłączenie przewodu ochronnego PE lub ochronno-neutralnego PEN do zacisku ochronnego	nie ma	nie ma
Zakres zastosowania	– w pomieszczeniach o izolowanych ścianach i podłogach, bez konstrukcji i uziomów naturalnych (izolowanie stanowiska) – w obwodzie zasilanym z transformatora separacyjnego, tylko z jednym odbiornikiem	w pomieszczeniach mieszkalnych, przemysłowych i podobnych, o ile wymagania szczegółowe dotyczące określonych miejsc i pomieszczeń nie ograniczają stosowania urządzeń tej klasy ochronności	we wszystkich w zasadzie pomieszczeniach i warunkach, o ile wymagania szczegółowe dotyczące określonych miejsc i pomieszczeń nie ograniczają stosowania urządzeń tej klasy ochronności	we wszystkich warunkach i pomieszczeniach
Przykłady zastosowania	oprawy oświetleniowe (żyrandole)	silniki, rozdzielnice metalowe, pralki, chłodziarki, kuchnie elektryczne, zmywarki	młynki do kawy, suszarki do włosów, golariki, wiertarki i inne elektro-narzędzia ręczne	zabawki, ręczne przenośne lampy oświetleniowe, niektóre elektronarzędzia ręczne

Klasa ochronności II – w urządzeniach tej klasy ochronności bezpieczeństwo pod względem porażeniowym jest zapewnione przez zastosowanie odpowiedniej izolacji – podwójnej lub wzmocnionej – której zniszczenie jest bardzo mało prawdopodobne.

Klasa ochronności III – ochrona przeciwporażeniowa w urządzeniach tej klasy ochronności jest zapewniona przez zasilanie ich napięciem z zakresu napięciowego

I (tabl. 1.1 i 1.2) o wartości nieprzekraczającej w danych warunkach napięcia granicznego dopuszczalnego (U_L).

Odporność aparatów i urządzeń elektrycznych na szkodliwe oddziaływanie środowiska zależy zarówno od sposobu wykonania osłon zewnętrznych, chroniących urządzenie przed możliwością dotknięcia przez człowieka części pod napięciem, jak i od ochrony przed wnikaniem do wnętrza ciał stałych oraz wody. Oznaczenia stopnia ochrony urządzeń zapewnianej przez osłony zewnętrzne składają się z liter IP (ang. *internal protection*) oraz dwóch cyfr określających cechy osłony (tabl. 1.7).

TABLICA 1.7. Klasyfikacja osłon ze względu na ochronę przed dotknięciem i przed dostaniem się ciał stałych oraz przed dostępem wody, wg PN-EN 60529:2003 [112]

Oznaczenie cechy IP	Pierwsza cyfra		Druga cyfra
	ochrona ludzi przed dotknięciem części pod napięciem i ruchomych	ochrona urządzenia przed przedostaniem się ciał stałych	ochrona przed działaniem wody
0	brak	brak	brak
1	ochrona przed przypadkowym dotknięciem wierzchem dłoni	ochrona przed przedostaniem się ciał stałych o średnicy 50 mm i większej	pionowo padające krople
2	ochrona przed dotknięciem palcem	jw., lecz o średnicy 12 mm i większej	pionowo padające krople na urządzenia odchylone o 15° od położenia normalnego
3	ochrona przed dotknięciem za pośrednictwem narzędzi i drutów o średnicy 2,5 mm i większej	jw., lecz o średnicy 2,5 mm i większej	natrysk wody pod kątem do 60° od pionu z każdej strony
4	jw., lecz o średnicy 1 mm i większej	jw., lecz o średnicy 1 mm i większej	rozbryzgowana na obudowę z dowolnego kierunku
5	jw.	ochrona przed przedostaniem się pyłu w ilości utrudniającej działanie aparatu lub zmniejszającej bezpieczeństwo	lana strugą na obudowę z dowolnej strony
6	jw.	całkowita ochrona przed przedostaniem się pyłu	lana silną strugą na obudowę z dowolnej strony
7	–	–	obudowa zanurzona krótkotrwale w znormalizowanych warunkach; brak wnikania wody w ilości wywołującej szkodliwe skutki
8	–	–	obudowa ciągle zanurzona w wodzie w uzgodnionych warunkach, lecz bardziej surowych niż wg cyfry 7

TABLICA 1.8. Stopnie ochrony osłon oznaczone symbolami literowymi¹⁾, wg [112]

Litera		Zakres ochrony przed dostępem do części niebezpiecznych	Wymagania ochrony lub zakres zastosowania
Dodatkowe	A	ochrona przed dostępem wierzchem dłoni	mają być zachowane odpowiednie odstępy do części niebezpiecznych przy wciskaniu próbnika dostępu w postaci kuli o średnicy 50 mm, w każdy otwór osłony
	B	ochrona przed dostępem palcem	jw., lecz przy zastosowaniu próbnika w postaci palca probierczego o średnicy 12 mm i długości 80 mm
	C	ochrona przed dostępem narzędziem	jw., lecz przy zastosowaniu próbnika w postaci pręta o średnicy 2,5 mm i długości 100 mm
	D	ochrona przed dostępem drutem	jw., lecz przy zastosowaniu próbnika o średnicy 1 mm i długości 100 mm
Uzupełniające	H	–	aparat wysokiego napięcia
	M	–	ochrona przed wnikaniem wody, gdy części ruchome urządzenia, np. wirnik maszyny, są w ruchu
	S	–	ochrona przed wnikaniem wody, gdy części ruchome urządzenia są nieruchome
	W	–	urządzenie nadaje się do stosowania w określonych warunkach pogodowych po zapewnieniu dodatkowych środków ochrony lub zabiegów
¹⁾ Podane w tablicy litery mogą być stosowane po symbolach IPXX i zawierają dodatkowe informacje o właściwościach osłon.			

Niekiedy w oznaczeniu po IP, na trzecim i czwartym miejscu mogą występować duże litery (tabl. 1.8) podające bardziej szczegółowo cechy osłony. Oznaczenia literowe nie są obowiązujące. Jeżeli jedna z podstawowych cech osłony nie jest oznaczona, to należy ją zastąpić literą X, a jeżeli żadna z cech nie jest określona – literami XX. Litery mogą być opuszczone bez zastępowania ich innymi symbolami.

1.6. Rodzaje pracy urządzeń elektrycznych

Prąd elektryczny przepływający uzwojeniami różnorodnych urządzeń elektrycznych i przewodami linii zasilających wywołuje pewne straty mocy ($\Delta P = I^2 R$) i energii powodujące podwyższenie się temperatury przewodów, uzwojeń oraz poszczególnych części maszyn i urządzeń nieprzewodzących prądu elektrycznego w normalnych warunkach pracy.

Jeżeli obciążenie urządzeń jest długotrwale większe niż obciążenie znamionowe lub urządzenia są eksploatowane w warunkach technicznych i środowiskowych gor-

szych od ustalonych i oznaczonych na tabliczce znamionowej przez producenta, to mogą być przekroczone dopuszczalne przyrosty temperatury, a urządzenia lub ich poszczególne części nadmiernie nagrzane. To z kolei może powodować uszkodzenie izolacji i zniszczenie urządzeń oraz w najgorszych przypadkach – zagrożenie dla obsługi lub powstanie pożaru.

Ważnym parametrem urządzeń elektrycznych, na który nie zawsze zwraca się uwagę, jest rodzaj ich pracy. Może to powodować błędny dobór lub nieprawidłową eksploatację urządzenia, prowadzącą niekiedy do jego zniszczenia.

W normie PN-E 06830:1996 [99] wyróżniono 8 charakterystycznych rodzajów pracy maszyn elektrycznych (S1÷S8) i odbiorników energii elektrycznej użytkowanych w bardzo różnych warunkach technicznych i środowiskowych, szczególnie narażonych na przeciążenia.

Praca ciągła S1 (rys. 1.5a) – praca z obciążeniem o stałej wartości, trwającym co najmniej do osiągnięcia przez maszynę ustalonego przyrostu temperatury, a zatem przez czas dłuższy niż ok. $4T$, przy czym T – cieplna stała czasowa maszyny.

Praca dorywcza S2 (rys. 1.5b) – praca z obciążeniem o ustalonej stałej wartości, trwającym przez określony czas t_p , po którym następuje przerwa w pracy t_o , trwająca na tyle długo, że każda część maszyny osiągnie temperaturę nieróżniącą się od temperatury otoczenia więcej niż o 2°C . Na tabliczce znamionowej maszyny po symbolu S2 podaje się liczbę określającą znormalizowany czas pracy maszyny wynoszący 10, 30, 60 i 90 min, np. S2 10 min.

Praca przerywana S3 (rys. 1.5c) – praca okresowa, przy czym każdy okres obejmuje czas pracy maszyny przy obciążeniu o stałej wartości oraz czas przerwy (postoju) trwający co najmniej do chwili osiągnięcia przez maszynę stanu równowagi cieplnej. Na tabliczce znamionowej po symbolu S3 podaje się tzw. *względny czas pracy* wynoszący 15, 25, 40 lub 60%, np. S3 25%. Względny czas pracy określa się jako iloraz czasu pracy łącznie z rozruchem i hamowaniem elektrycznym oraz czasu trwania całego okresu, który (jeżeli nie uzgodniono inaczej) powinien wynosić 10 min.

Praca przerywana z dużą liczbą łączy i rozruchów S4 – praca okresowa, przy czym każdy okres obejmuje czasy rozruchu, pracy przy stałym obciążeniu, hamowania mechanicznego oraz postoju, trwające co najmniej do czasu osiągnięcia przez maszynę stanu równowagi cieplnej.

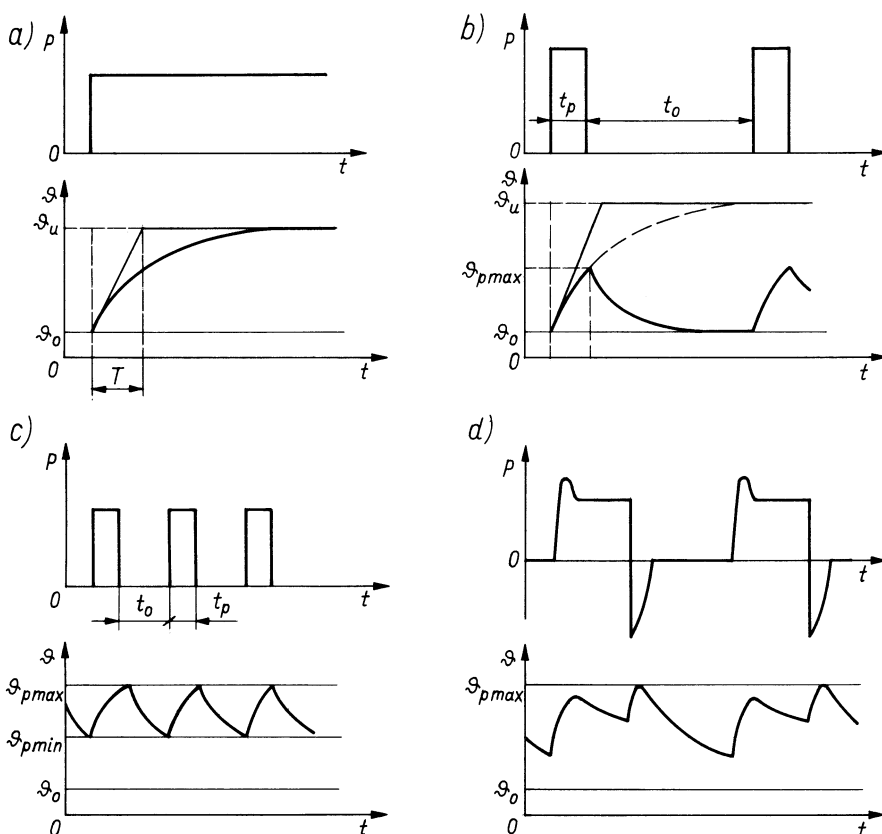
Praca przerywana z dużą liczbą łączy i hamowaniem elektrycznym S5 (rys. 1.5d) – praca okresowa podobna do S4, lecz z zastosowaniem hamowania elektrycznego.

Praca przerywana z przerwami jałowymi S6 – praca podobna do S3, z tym że po czasie pracy maszyny pod obciążeniem nie występuje jej wyłączenie, lecz pracuje ona na biegu jałowym w czasie trwania przerwy.

Praca długotrwała z dużą liczbą połączeń i hamowaniem elektrycznym S7 – praca podobna do S1, z tym że po cyklu pracy maszyny występuje hamowanie elektryczne, a następnie ponowny rozruch, co powoduje zazwyczaj znaczny przyrost temperatury ponad przyrost, jaki wystąpiłby, gdyby nie było cyklicznych hamowań i rozruchów silnika.

Praca długotrwała z okresowymi zmianami obciążenia i prędkości „kątowej” – praca określana symbolem S8.

W przypadku pracy S4 i S5 podaje się względny czas trwania obciążenia, momenty bezwładności silnika I_M i urządzenia obciążającego zredukowanego do wału



Rys. 1.5. Przebiegi obciążeń i nagrzewania się urządzeń: a) praca ciągła (S1); b) praca dorywcza (S2); c) praca przerywana (S3); d) praca przerywana z hamowaniem elektrycznym (S5)
 θ_o – temperatura otoczenia, θ_u – temperatura ustalona, θ_{pmax} – najwyższa temperatura urządzenia w czasie pracy, t_p – czas przerwy (postoju), T – ciepłota stała czasowa

silnika γ_{ext} oraz liczbę łączy na godzinę. Dla rodzaju pracy S7 natomiast podaje się momenty bezwładności I_M i γ_{ext} oraz liczbę łączy na godzinę. Przykłady oznaczeń:

$$S4 \quad 25\% \quad I_M = 0,15 \text{ kg} \cdot \text{m}^2 \quad I_{ext} = 0,7 \text{ kg} \cdot \text{m}^2 \quad 60 \text{ c/h}$$

$$S7 \quad I_M = 0,3 \text{ kg} \cdot \text{m}^2 \quad I_{ext} = 5 \text{ kg} \cdot \text{m}^2 \quad 120 \text{ c/h}$$

1.7. Klasyfikacja wpływów środowiska i zasady doboru niektórych parametrów urządzeń uwzględniające oddziaływanie środowiska

W normie [149] na wielu stronach i w tablicach podano bardzo szczegółową klasyfikację wpływów środowiska oraz szczegółowy kod literowo-cyfrowy ich oznaczania. Poszczególne oddziaływania środowiska oraz ich intensywność są oznaczane dwiema literami i cyfrą charakteryzującą intensywność każdego wpływu zewnętrznego (tabl. 1.9), przy czym:

TABLICA 1.9. Skrócony wykaz wpływów zewnętrznych, wg PN-IEC 60364-3 [149]

Kategoria	Rodzaje wpływów zewnętrznych i ich intensywność			
A – środowisko	AA	Otoczenie	AJ	Inne naprężenia mechaniczne
	AA1	−60°C +5°C		
	AA2	−40°C +5°C	AK	Flora
	AA3	−25°C +5°C	AK1	brak zagrożenia
	AA4	−5°C +40°C	AK2	zagrożenie
	AA5	+5°C +40°C		
	AA6	+5°C +60°C	AL	Fauna
	AA7	−25°C +55°C	AL1	brak zagrożenia
	AA8	−50°C +40°C	AL2	zagrożenie
	AB	Wilgotność	AM	Promieniowanie
			AM1	pomijalne
	AC	Wysokość n.p.m.	AM2	prądy błędzące
	AC1	<2000 m	AM3	elektromagnetyczne
	AC2	≥2000 m	AM4	jonizacyjne
			AM5	elektrostatyczne
	AD	Woda	AM6	indukcyjne
	AD1	pomijalna		
	AD2	krople	AN	Nasłonecznienie
	AD3	rozpylona	AN1	słabe
	AD4	bryzgi	AN2	średnie
	AD5	strumień	AN3	silne
	AD6	fale		
	AD7	zanurzenie	AP	Wstrząsy sejsmiczne
	AD8	zatopienie	AP1	pomijalne
			AP2	słabe
	AE	Ciała stałe	AP3	średnie
	AE1	pomijalne	AP4	silne
	AE2	drobne		
	AE3	bardzo drobne	AQ	Wyładowania atmosferyczne
	AE4	pył nieznaczny	AQ1	pomijalne
	AE5	pył umiarkowany	AQ2	pośrednie
	AE6	pył znaczny	AQ3	bezpośrednie
	AF	Korozja	AR	Ruch powietrza
	AF1	pomijalna	AR1	słaby
	AF2	atmosferyczna	AR2	średni
	AF3	sporadyczna	AR3	silny
	AF4	stała		
			AS	Wiatr
	AG	Uderzenia	AS1	słaby
	AG1	słabe	AS2	średni
	AG2	średnie	AS3	silny
	AG3	mocne		
	AH	Wibracje		
	AH1	słabe		
	AH2	średnie		
	AH3	silne		

TABLICA 1.9 (cd.)

Kategoria	Rodzaje wpływów zewnętrznych i ich intensywność			
B – użytkowanie	BA	Zdolność osób	BD	Ewakuacja
	BA1	przeciętna	BD1	małe zagęszczenie – łatwe wyjście
	BA2	dzieci	BD2	małe zagęszczenie – trudne wyjście
	BA3	upośledzona	BD3	duże zagęszczenie – łatwe wyjście
	BA4	poinstruowana	BD4	duże zagęszczenie – trudne wyjście
	BA5	z kwalifikacjami		
			BE	Materiały
	BB	Rezystancja	BE1	brak zagrożenia
			BE2	zagrożenie pożarowe
	BC	Kontakt z ziemią	BE3	zagrożenie wybuchowe
	BC1	brak	BE4	zagrożenie skażeniem
	BC2	rzadki		
	BC3	częsty		
	BC4	ciągły		
C – obiekty budowlane	CA	Materiały	CB	Konstrukcja
	CA1	niepalne	CB1	zagrożenie pomijalne
	CA2	palne	CB2	rozprzestrzenianie pożaru
			CB3	przemieszczalna
			CB4	elastyczna

– pierwsza litera oznacza: A – środowisko, B – użytkownika i sposób użytkowania, C – konstrukcję obiektu budowlanego;

– druga litera (od A do S) oznacza rodzaj i cechy wpływów zewnętrznych, takie jak: temperatura, woda, wilgotność, nasłonecznienie, promieniowanie, flora, wibracje, materiały, wiatr, zdolność i kwalifikacje osób, sposób ewakuacji i in.

Urządzenia elektryczne powinny być dobrane i zainstalowane w sposób zapewniający ich działanie zgodnie z przeznaczeniem w warunkach normalnej eksploatacji oraz przewodzenie prądów zakłóceńowych bez negatywnych następstw w czasie określonym przez charakterystyki czasowo-prądowe urządzeń zabezpieczających. Powinny być również spełnione wymagania dotyczące ochrony przeciwporażeniowej oraz wpływów środowiska. Dobór urządzeń polega na wyznaczeniu parametrów znamionowych i cech charakterystycznych urządzeń, takich jak: napięcie znamionowe, prąd (moc) znamionowy, odporność na wpływy środowiska, kompatybilność, dostępność oraz identyfikacja.

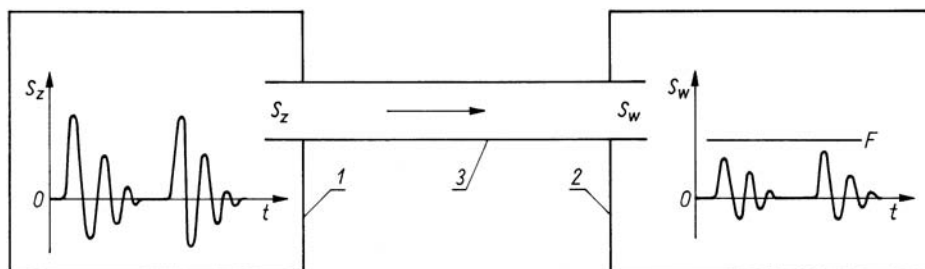
Cechy charakterystyczne urządzeń, określone stopniem ochrony IPXX (tabl. 1.7 i 1.8) lub wynikami prób, powinny być odpowiednie do wpływów środowiska, jakim te urządzenia mogą podlegać. Jeżeli cechy te nie odpowiadają warunkom wpływów środowiska w miejscu ich zainstalowania lub mogą występować jednocześnie różne wpływy środowiska o skutkach niezależnych od siebie lub nawzajem na siebie działających, to należy przewidzieć odpowiednią ochronę przed tymi wpływami. Zastosowane środki ochrony nie powinny pogarszać warunków pracy urządzeń chronionych.

Wymagane cechy charakterystyczne urządzeń ze względu na niektóre wpływy środowiska podano w tabl. 1.10.

TABLICA 1.10. Wymagane cechy urządzeń elektrycznych ze względu na niektóre wpływy środowiska, wg PN-IEC 60364-5-51 [161]

Cechy środowiska		Wymagane cechy urządzeń																								
kod (tabl. 1.9)	określenie i intensywność wpływów																									
AD AD1 AD2 AD3 AD4 AD5 AD7	Obecność wody pomijalna krople wody swobodnie spadające rozpylona woda rozbryzgi wody strumienie wody zanurzenie	IPX0 IPX1 IPX3 IPX4 IPX5 IPX7																								
AE AE1 AE2 AE3 AE4	Obecność obcych ciał stałych pomijalna ciała drobne (2,5 mm) ciała bardzo drobne (1 mm) pył	IP0X IP3X IP4X IP5X – jeżeli przenikanie pyłu nie spowoduje zakłóceń w pracy urządzeń IP6X – jeżeli nie przewiduje się przenikania pyłu do urządzeń																								
BA BA1 BA2 BA3	Zdolność użytkownika przeciętna dzieci upośledzone osoby	normalne stopień ochrony wyższy niż IP2X; niedostępność urządzeń, których powierzchnie zewnętrzne mają temperaturę wyższą niż 80°C zależnie od stopnia upośledzenia																								
BC BC1 BC2 BC3 BC4	Kontakt ludzi z potencjałem ziemi brak — — — — — rzadki — — — — — częsty — — — — — ciągły — — — — —	<table><tr><th colspan="4">Klasy ochronności urządzeń według tabl. 1.6</th></tr><tr><th>0</th><th>I</th><th>II</th><th>III</th></tr><tr><td>A</td><td>Y</td><td>A</td><td>A</td></tr><tr><td>A</td><td>A</td><td>A</td><td>A</td></tr><tr><td>X</td><td>A</td><td>A</td><td>A</td></tr><tr><td colspan="4">wymagania w opracowaniu</td></tr></table> A – urządzenia dopuszczone X – urządzenia zabronione Y – stosowane o klasie ochronności 0	Klasy ochronności urządzeń według tabl. 1.6				0	I	II	III	A	Y	A	A	A	A	A	A	X	A	A	A	wymagania w opracowaniu			
Klasy ochronności urządzeń według tabl. 1.6																										
0	I	II	III																							
A	Y	A	A																							
A	A	A	A																							
X	A	A	A																							
wymagania w opracowaniu																										

Wymagania dotyczące kompatybilności polegają na tym, że urządzenie elektryczne powinno poprawnie funkcjonować w warunkach oddziaływań elektromagnetycznych w miejscu jego zainstalowania, powodowanych pracą innych urządzeń. Samo urządzenie nie powinno także wpływać szkodliwie na pracę innych urządzeń zainstalowanych w strefie jego oddziaływania elektromagnetycznego. Ogólny schemat sprzężenia obiektów zakłócającego i zakłócanego przedstawiono na rys. 1.6. Sygnał zakłócający nie powinien wywoływać zakłóceń większych niż

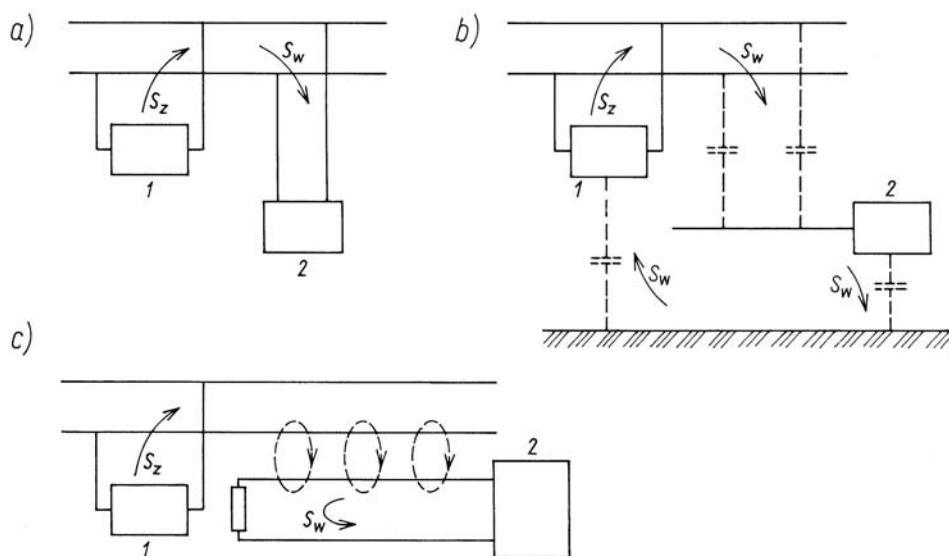


Rys. 1.6. Szkic przedstawiający zjawisko sprzężenia elektromagnetycznego zakłócającego, wg [40]
 1 – obiekt zakłócający, 2 – obiekt zakłócany, 3 – droga przesyłu sygnału zakłócającego, F – dopuszczalny poziom zakłócenia, S_z – sygnał zakłócający, S_w – sygnał w obiekcie zakłócanym

dopuszczalne w urządzeniu zakłócanym. Zakłócenia przekraczające ten poziom mogą powodować nieprawidłową pracę zakłócanych urządzeń, a w przypadkach szczególnie niekorzystnych, gdy zakłócenie jest większe niż wytrzymałość (odporność) urządzenia na zakłócenia, może dochodzić do zniszczenia urządzenia.

Sygnał zakłócający może mieć różnorodny charakter (ciągły, dyskretny, impulsowy), a sprzężenie między obiektem zakłócającym a zakłócanym może mieć charakter galwaniczny, pojemnościowy, indukcyjny lub inny (rys. 1.7).

Urządzeniami zakłócającymi są przeważnie urządzenia elektroenergetyczne (linie wysokiego napięcia, transformatory, łączniki, układy prostownikowe z tyrystorami i in.) oraz stacje (nadajniki) radiowe i radarowe. Obiektami zakłócanymi, najbardziej wrażliwymi na zakłócenia mogą być urządzenia ze zintegrowanymi elementami elektronicznymi (odbiorniki RTV, komputery, sieci komputerowe i teletechniczne, statyczne układy sterowania i zabezpieczeń oraz inne podobne). Wymagania dotyczące kompatybilności urządzeń polegają na tym, że nie powinny one wywierać



Rys. 1.7. Przykłady sprzężeń zakłócających: a) galwaniczne; b) pojemnościowe; c) indukcyjne

szkodliwego wpływu na pracę innych urządzeń i źródeł zasilania podczas normalnej eksploatacji, w tym również w czasie wykonywania czynności łączeniowych.

Przez dostępność rozumie się takie zainstalowanie urządzeń wraz z oprzewodowaniem, które zapewnia swobodny dostęp do urządzeń i połączeń, umożliwiający przeglądy i konserwacje. Możliwości te nie powinny być ograniczone po zamontowaniu urządzeń w obudowach albo w pomieszczeniach.

Urządzenia (aparaty) łączeniowe i sterownicze powinny być wyposażone w tabliczki lub inne środki identyfikacyjne informujące o ich przeznaczeniu, chyba że nie ma możliwości popełnienia pomyłki. W pewnych przypadkach może okazać się celowe umieszczenie różnorodnych wskaźników sygnalizujących pracę urządzeń, widocznych ze stanowiska pracy operatora.

2



Zasady obliczania prądów zwarciovych



2.1. Definicje oraz podstawowe zależności

Zwarcie nazywa się połączenie – bezpośrednie lub przez impedancję o pomijalnie małej wartości – dwóch lub więcej punktów obwodu elektrycznego, które w normalnych warunkach pracy mają różne potencjały (napięcia). Zwarcia powstają najczęściej w wyniku uszkodzenia izolacji doziemnej lub izolacji pomiędzy różnymi fazami (biegunami) urządzeń. Nierzadką przyczyną zwarć w instalacjach są błędne połączenia powstałe po wykonanych naprawach instalacji i urządzeń.

W przypadkach zwarć dwu- i trójfazowych – niezależnie od układu sieci – płyną zawsze prądy o bardzo znacznych wartościach, najczęściej wielokrotnie większe od prądów roboczych, zagrażające zniszczeniem urządzeń i przewodów w wyniku ich oddziaływania cieplnego i dynamicznego.

W sieciach i instalacjach o układzie TN zwarcie jednofazowe powoduje również przepływ prądu o znacznej wartości, porównywalnej z prądami zwarć trójfazowych. W sieciach i instalacjach o układzie TT podczas zwarcia jednofazowego prądy osiągną jedynie umiarkowane wartości zbliżone do prądów znamionowych urządzeń, a nawet i mniejsze, gdyż płyną przez uziemienia oraz ziemię. W sieciach izolowanych IT prądy jednofazowych doziemień są bardzo małe, rzędu miliamperów. Zwarcia jednofazowe – niezależnie od układu sieci i wartości prądów – bardzo zmieniają na niekorzyść warunki bezpieczeństwa pod względem porażeniowym, przez co staje się konieczne stosowanie specjalnych urządzeń ochronnych powodujących szybkie wyłączenie zasilania, ograniczenie napięć dotykowych do wartości dopuszczalnych w danych warunkach albo (w sieciach IT) sygnalizację.

W trakcie projektowania instalacji konieczne jest ustalenie m.in. największych wartości prądów zwarciovych w różnych fragmentach sieci i instalacji, występujących w przypadkach zwarć trójfazowych bezoporowych oraz zwarć jednofazowych.

Prądy zwarć trójfazowych oraz jednofazowych z przewodem ochronnym lub ochronno-neutralnym w instalacjach jednofazowych warunkują dobór aparatów

elektrycznych oraz przewodów, głównie ze względu na wymagane zdolności łączeniowe, czasy działania wyzwalaczy i przełączników łączników oraz odporności na ciepłe i dynamiczne oddziaływania prądów zwarciovych.

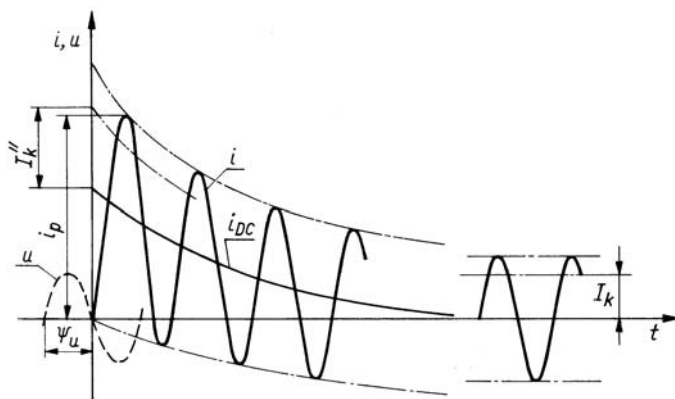
Prądy zwarcı jednofazowych z udziałem ziemi (z przewodem PE, PEN lub dowolnym uziemionym elementem urządzeń) w dużym stopniu decydują o stanie zagrożenia porażeniowego oraz warunkują działanie większości urządzeń ochrony przeciwporażeniowej.

W schematach zastępczych sieci i instalacji elektrycznych, wykorzystywanych do obliczeń prądów zwarciovych, występują napięcia źródłowe oraz rezystancje i reaktancje, a w sieciach o układzie IT również pojemności. W przypadku zwarcia płynie prąd zwarciový będący sumą składowej okresowej prądu zmieniającej się z częstotliwością napięcia źródłowego oraz składowej nieokresowej (jednokierunkowej) i_{DC} zanikającej według krzywej wykładniczej (rys. 2.1). Wartość maksymalna składowej nieokresowej prądu zależy od kąta fazowego napięcia w chwili zwarcia i jest największa, równa amplitudzie składowej okresowej prądu, lecz o przeciwnym znaku, przy kącie $\Psi_u = 0$ lub π , tj. przy chwilowej wartości napięcia w chwili zwarcia równej zero.

Amplituda składowej okresowej prądu nie ma również wartości stałej. Jest ona największa, równa ok. $\sqrt{2} I_k''$, dla czasu trwania zwarcia $t_k = 0$, aby po ok. 0,1 s zmniejszyć się do wartości ustalonej, równej $\sqrt{2} I_k$. Związane to jest ze zjawiskami elektromagnetycznymi występującymi w generatorach, w uzwojeniach wzbudzenia i tłumiących. Przy zwarciach odległych od generatorów na poziomie napięć niskich, a często również i średnich, w obliczeniach praktycznych można przyjmować $I_k'' = I_k$. Nie dotyczy to dużych silników zainstalowanych blisko miejsca zwarcia.

Prądy i warunki zwarciové są opisywane wieloma charakterystycznymi wielkościami. Do najbardziej rozpowszechnionych należy zaliczyć (rys. 2.1):

Prąd początkowy I_k'' – wartość skuteczna składowej okresowej prądu zwarciovego w chwili powstania zwarcia (dla $t_k = 0$).



Rys. 2.1. Stylizowany przebieg prądu zwarciovego

I_k'' – prąd zwarciový początkowy, I_k – prąd zwarciový ustalony, i_p – prąd udarowy, i_{DC} – składowa nieokresowa prądu, u – napięcie, Ψ_u – kąt fazowy napięcia w chwili wystąpienia zwarcia (na rysunku $\Psi_u = \pi, 0$)

Prąd ustalony I_k – wartość skuteczna składowej okresowej prądu zwarcowego, po zaniku składowych okresowych przejściowych prądu zwarcowego.

Prąd zwarcowy nieokresowy i_{DC} – składowa nieokresowa prądu zwarcowego; w przypadku zwarć przy $\Psi_u = 0$ prąd ten jest określony zależnością

$$i_{DC} = \sqrt{2} I_k'' e^{-\frac{R}{L}t} \quad (2.1)$$

w której: R i L – rezystancja i indukcyjność obwodu zwarcowego, t – czas liczony od chwili wystąpienia zwarcia.

Prąd udarowy i_p – największa chwilowa wartość prądu zwarcowego, decydująca o skutkach elektrodynamicznych.

Moc zwarcowa S_k'' – iloczyn prądu początkowego I_k'' , napięcia znamionowego U_N i współczynnika $\sqrt{3}$. Moc $S_k'' = \sqrt{3} U_N I_k''$ nie ma znaczenia fizycznego, jest bowiem iloczynem wielkości niewystępujących jednocześnie. Bardzo dobrze opisuje warunki zwarcowe, umożliwiając wyznaczenie parametrów zastępczych obwodu zwarcowego oraz innych charakterystycznych wielkości prądu zwarcowego.

Prąd początkowy przy zwarcu trójfazowym oblicza się wg zależności

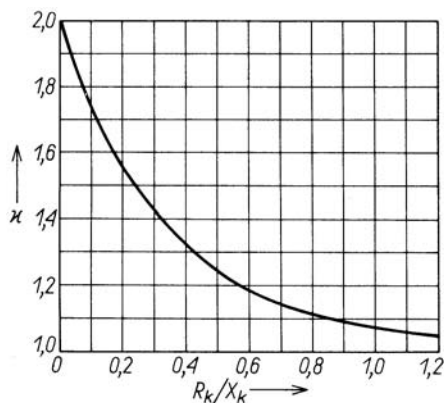
$$I_k'' = \frac{c U_N}{\sqrt{3} Z_k} \quad (2.2)$$

a prąd udarowy

$$i_p = \sqrt{2} \kappa I_k'' \quad (2.3)$$

w których: U_N – napięcie znamionowe, V; κ – współczynnik udaru (rys. 2.2); Z_k – impedancja zastępcza zgodna obwodu zwarcowego, Ω ; c – współczynnik napięciowy (tabl. 2.1).

W obliczeniach prądów zwarcowych w sieciach i instalacjach niskiego napięcia powinno się uwzględniać impedancje: uzwojeń przekładników prądowych, cewek wyzwalaczy elektromagnetycznych łączników, szyn zbiorczych, zestyków stałych i rozłącznych itp. Wyznaczenie tych impedancji jest zazwyczaj kłopotliwe i przez to często pomijane. Wskutek tego uzyskuje się nieco zawyżone wyniki obliczeń. Błąd wynikający z takiego postępowania jest tym mniejszy, im mniejsza jest moc znamionowa transformatora zasilającego i im mniejsze są przekroje przewodów.



Rys. 2.2. Zależność współczynnika udaru κ od ilorazu R_k/X_k

TABLICA 2.1. Wartości współczynników napięciowych c

Napięcie znamionowe U_N	Wartość współczynnika c do obliczania prądu zwarciovego	
	największego	najmniejszego
Niskie, do 1000 V:		
– 230/400 V	1,00	0,95
– inne napięcia	1,05	1,00
Wysokie, ponad 1 kV	1,10	1,00

Impedancja obwodu zwarciovego Z_k jest wyrażona wzorem
gdzie:

$$Z_k = \sqrt{R_k^2 + X_k^2} \quad (2.4)$$

gdzie:

$$R_k = R_Q + R_T + R_{L1} + R_{L2} + \dots \quad (2.5)$$

$$X_k = X_Q + X_T + X_{L1} + X_{L2} + \dots \quad (2.6)$$

w których: R, X – rezystancje i reaktancje: układu zasilania (R_Q, X_Q), transformatora (R_T, X_T), linii i obwodów odbiorczych (R_L, X_L).

Rezystancje i reaktancje poszczególnych elementów obwodu zwarciovego należy obliczać wg następujących zależności:

Układ zasilania

$$R_Q \approx 0$$

$$X_Q \approx Z_Q = \frac{1,1 U_N^2}{S_k''} \quad (2.7)$$

gdzie: U_N – napięcie znamionowe, V; S_k'' – moc zwarciova, V · A (lub odpowiednio kV oraz MV · A).

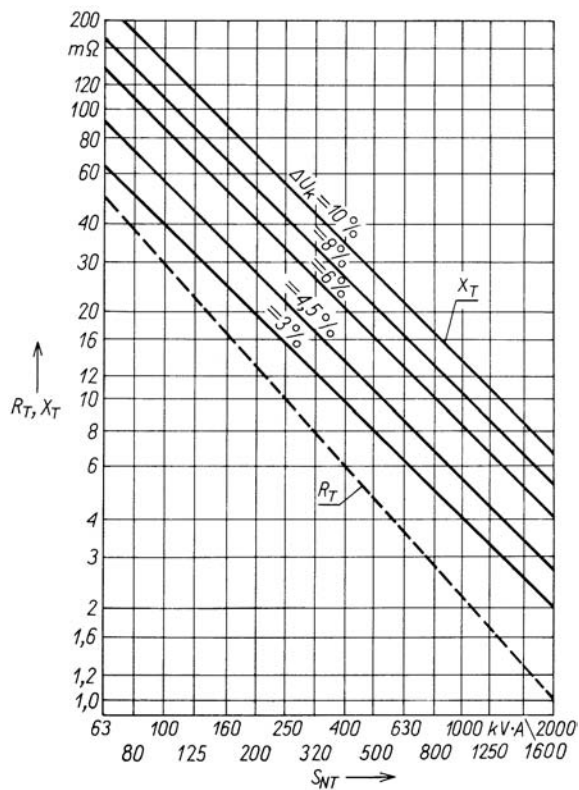
Transformatory dwuuzwojeniowe (rys. 2.3, tabl. 2.2)

$$Z_T = \frac{\Delta U_{k\%} U_N^2}{100 S_{NT}} \quad (2.8)$$

$$R_T = \frac{\Delta P_{N\%} U_N^2}{100 S_{NT}} \quad (2.9)$$

$$X_T = \sqrt{Z_T^2 - R_T^2} \quad (2.10)$$

przy czym: $\Delta U_{k\%}$ – napięcie zwarcia transformatora, %; $\Delta P_{N\%}$ – straty obciążeniowe znamionowe, %; S_{NT} – moc znamionowa transformatora.



Rys. 2.3. Rezystancje R_T i reaktancje X_T transformatorów o napięciu znamionowym wtórnym 380 V i różnych wartościach napięć zwarcia $\Delta U_{k\%}$ w zależności od ich mocy znamionowej

TABLICA 2.2. Rezystancje, reaktancje i impedancje transformatorów dwuuzwojeniowych obliczone przy napięciu $U_N = 400\text{ V}$

Moc znamionowa S_{NT} kV · A	Napięcie zwarcia ΔU_k %	Straty obciążeniowe znamionowe		Spadek napięcia na reaktancji ΔU_x %	Rezystancja R_T mΩ	Reaktancja X_T mΩ	Impedancja Z_T mΩ
		ΔP_N W	ΔP_N %				
50	4	1 100	2,20	3,34	70,40	106,92	128,00
100	4	1 750	1,75	3,60	28,00	57,55	64,00
160	4	2 350	1,47	3,72	14,69	37,21	40,00
200	4	2 850	1,43	3,74	11,40	29,90	32,00
250	4	3 250	1,30	3,78	8,32	24,21	25,60
315	4	3 900	1,24	3,80	6,29	19,32	20,32
400	4	4 600	1,15	3,83	4,60	15,32	16,00
500	4	5 500	1,10	3,85	3,52	12,31	12,80
630	4	6 500	1,03	3,86	2,62	9,82	10,16
800	6	8 400	1,05	5,91	2,10	11,82	12,00
1 000	6	10 500	1,05	5,91	1,68	9,45	9,60
1 250	6	13 000	1,04	5,91	1,33	7,56	7,68
1 600	6	17 000	1,06	5,91	1,06	5,91	6,00
2 000	6	21 500	1,06	5,90	0,86	4,72	4,80
2 500	6	26 500	1,06	5,91	0,68	3,78	3,84

Linie i obwody odbiorcze (rys. 2.4 i 2.5)

$$R_L = \frac{l}{\gamma S} \quad (2.11)$$

$$X_L = x' l \quad (2.12)$$

gdzie: γ – konduktywność (przewodność właściwa) materiału żył, $\text{m}/\Delta \cdot \text{mm}^2$ (56 dla miedzi, 33 dla aluminium); l – długość linii, m; S – przekrój żył, mm^2 ; x' – reaktancja jednostkowa, Ω/m (rys. 2.4 i 2.5).

Jeżeli do szyn zbiorczych rozdzielnicy, głównie w instalacjach przemysłowych, są przyłączone silniki indukcyjne (asynchroniczne) o znacznych mocach znamionowych, to należy uwzględnić ich wpływ na warunki zwarciovie. Wpływ ten można pominąć, jeżeli suma prądów znamionowych silników (bez silników rezerwowych) jest mniejsza niż 0,01 prądu zwarciovego początkowego I''_{kQ} wyznaczonego bez udziału silników.

Silniki traktuje się jako oddzielne generatory asynchroniczne o impedancji

$$Z_M = \frac{U_N^2}{k_r S_{NM}} \quad (2.13)$$

gdzie

$$S_{NM} = \frac{P_{NM}}{\eta_M \cos \varphi_{NM}} \quad (2.14)$$

przy czym: k_r – współczynnik rozruchu (iloraz prądu rozruchowego i znamionowego silnika), przy rozruchu bezpośrednim $k_r = 5 \div 7$; η_M , $\cos \varphi_{NM}$ – sprawność i znamionowy współczynnik mocy silnika.

Współczynnik udaru κ_M dla silników niskiego napięcia wynosi 1,3÷1,4.

Jeżeli silnik lub silniki są połączone z fragmentem sieci krótkimi odcinkami linii kablowych, których impedancje można pominąć, to wartość prądu zwarciovego I''_{kM} od silników może być obliczona ze wzoru

$$I''_{kM} \approx \kappa_r I_{NM} \quad (2.15)$$

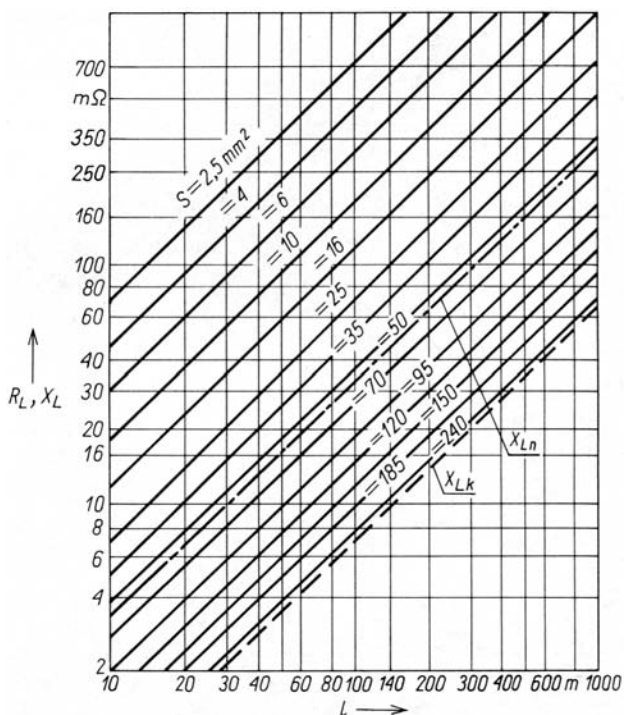
gdzie I_{NM} – prąd znamionowy silnika lub suma prądów znamionowych wszystkich silników pracujących na zwarcie (zastępczy silnik równoważny).

Prąd zwarciov przy zwarciu jednofazowym należy obliczyć z zależności

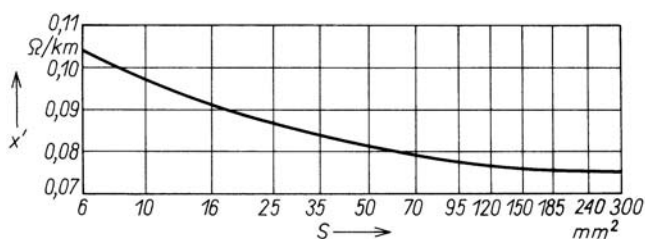
$$I''_{k1} = \frac{c \sqrt{3} U_N}{\underline{Z}_{1k} + \underline{Z}_{2k} + \underline{Z}_{0k}} \quad (2.16)$$

w którym: $\underline{Z}_{1k}$, $\underline{Z}_{2k}$, $\underline{Z}_{0k}$ – impedancje obwodu zwarciovego: zgodna, przeciwna i zerowa.

W obwodach niskiego napięcia impedancje zgodne i przeciwne poszczególnych elementów układu są jednakowe ($\underline{Z}_{1k} = \underline{Z}_{2k}$) i należy je obliczać wg wzorów (2.7)÷(2.12). Impedancje zerowe zależą natomiast od rodzaju urządzenia. Impedancję zerową źródła zasilania można pominąć ($\underline{Z}_{0Q} = 0$). Rezystancje i reaktancje zerowe transformatorów trójfazowych dwuuzwojeniowych zależą od sposobu połączenia uzwojeń wysokiego i niskiego napięcia (od grupy połączeń). Podano je w tabl. 2.3.



Rys. 2.4. Rezystancje i reaktancje linii napowietrznych i kablowych niskiego napięcia o długości l i przekroju S żył miedzianych (dla przewodów aluminiowych wyznaczoną rezystancję R_L należy pomnożyć przez 1,7) X_{Lk} – reaktancja linii kablowej, X_{Ln} – reaktancja linii napowietrznej



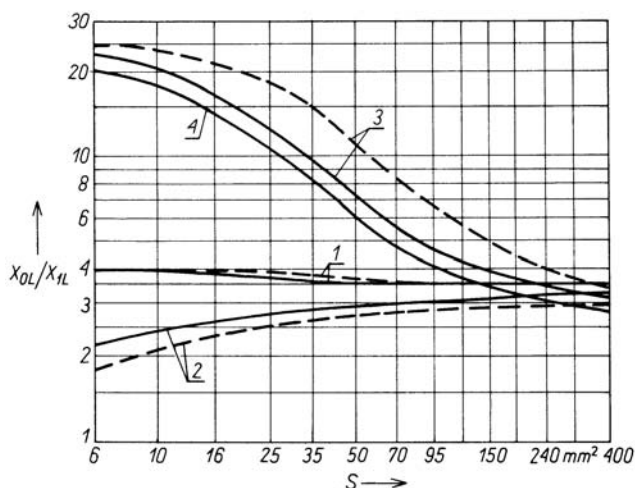
Rys. 2.5. Reaktancja jednostkowa kabli wielożyłowych 1 kV w zależności od przekroju żył

TABLICA 2.3. Rezystancje i reaktancje zerowe transformatorów dwuuzwojeniowych

Wielkość	Grupa połączeń transformatorów		
	Dy	Dz, Yz	Yy ¹⁾
R_{0T}	R_T	$0,4 R_T$	R_T
X_{0T}	$(0,93 \div 1,0) X_T$	$0,1 X_T$	$(7 \div 24) X_T$

¹⁾ W zasadzie nie stosowane w sieciach niskiego napięcia.

Rezystancje i reaktancje zerowe linii napowietrznych i kablowych, w których jedyną drogą powrotną prądu jest czwarty przewód lub czwarta żyła kabla, są wyrażone zależnościami: $R_{0L} \approx 4R_{1L}$ oraz $X_{0L} \approx 3,5X_{1L}$. Dla linii kablowych, w których prąd przepływa również powłoką metalową kabla oraz ziemią, wartości te mogą się znacznie różnić od podanych, szczególnie w przypadku niewielkich przekrojów żył (rys. 2.6).



Rys. 2.6. Zależność ilorazu reaktancji zwarciovych X_{0L} i zgodnych X_{1L} kabli wielożyłowych 1 kV od przekroju żył S oraz drogi powrotnej prądu

1 – tylko czwartą żyłą kabla, 2 – czwartą żyłą kabla oraz zewnętrzną powłoką metalową, 3 – czwartą żyłą kabla i ziemią, 4 – czwartą żyłą kabla, powłoką zewnętrzną oraz ziemią; linie ciągłe – kable o żyłach miedzianych, linie kreskowe – kable o żyłach aluminiowych

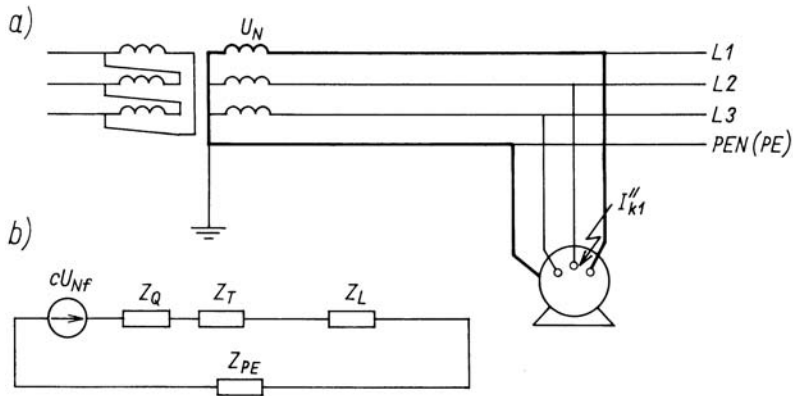
W czasie przepływu prądu zwarciovego temperatura żył przewodów może się znacznie różnić od temperatury otoczenia. Dlatego w obliczeniach prądów zwarciovych przy zwarciach jednofazowych, dokonywanych w celu oceny skuteczności działania urządzeń ochrony przeciwporażeniowej, rezystancje przewodów powinny być określone dla temperatury $\vartheta \approx 80^\circ\text{C}$, co można uzyskać, mnożąc wartości uzyskane ze wzoru (2.11) przez współczynnik 1,24.

W obliczeniach praktycznych do wyznaczenia prądów jednofazowych korzysta się często z metody uproszczonej. Prąd początkowy oblicza się wg wzoru

$$I''_{k1} \approx \frac{0,95 U_{Nf}}{Z_{kz}} \quad (2.17)$$

w którym: U_{Nf} – napięcie fazowe, Z_{kz} – impedancja pętli zwarciovowej równa sumie impedancji źródła zasilania Z_Q , transformatora Z_T , przewodu fazowego Z_L i przewodu powrotnego Z_{PE} (rys. 2.7).

Jeżeli przewody fazowe (liniowe) oraz ochronne (PE, PEN) mają takie same 44 przekroje żył, to $Z_L = Z_{PE}$.



Rys. 2.7. Droga przepływu prądu (a) i impedancje obwodu przy zwarciu jednofazowym (b)

2.2. Przykład obliczeniowy

Wyznaczyć wartości prądów zwarciovych w rozdzielnicy (rys. 2.8) przy zwarciu trójfazowym w celu doboru aparatów i przewodów na warunki zwarciove oraz przy zwarciu jednofazowym dla sprawdzenia skuteczności działania zabezpieczeń zwarciovych jako elementów systemu ochrony przeciwporażeniowej. Impedancje elementów obwodu zwarciovego (rys. 2.8b):

– układ zasilania

$$R_Q \approx 0$$

$$X_Q \approx Z_Q = \frac{1,1 U_N^2}{S_k''} = \frac{1,1 \cdot 0,4^2}{200} = 0,0009 \Omega \quad X_Q = 0,9 \text{ m}\Omega$$

– transformatora (wzory (2.8÷2.10) lub rys. 2.3)

$$R_T = \frac{1 \cdot 0,4^2}{100 \cdot 0,315} = 0,0051 \Omega \quad R_T = 5,1 \text{ m}\Omega$$

$$Z_T = \frac{4,5 \cdot 0,4^2}{100 \cdot 0,315} = 0,0229 \Omega \quad Z_T = 22,9 \text{ m}\Omega$$

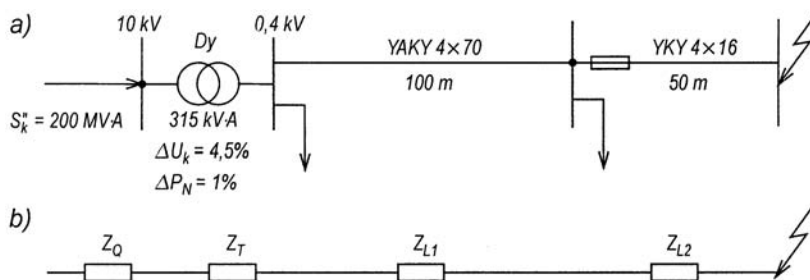
$$X_T = \sqrt{22,9^2 - 5,1^2} \quad X_T = 22,3 \text{ m}\Omega$$

– linii zasilających; impedancje linii można wyznaczyć wg zależności (2.11) i (2.12) lub z rys. 2.4;

– dla linii L1 wykonanej kablem o żyłach aluminiowych, typu YAKY $4 \times 70 \text{ mm}^2$ długości $l_1 = 100 \text{ m}$ otrzymuje się

$$R_{L1} = \frac{100 \cdot 10^3}{33 \cdot 70} = 43,3 \text{ m}\Omega$$

$$X_{L1} = 0,079 \cdot 100 = 7,9 \text{ m}\Omega$$



Rys. 2.8. Fragment sieci rozdzielczej niskiego napięcia: a) schemat układu; b) układ połączeń impedancji przy zwarciu trójfazowym

– dla linii L2 wykonanej kablem o żyłach miedzianych, typu YKY $4 \times 16 \text{ mm}^2$ długości $l_2 = 50 \text{ m}$ otrzymuje się

$$R_{L2} = \frac{50 \cdot 10^3}{56 \cdot 16} = 55,8 \text{ m}\Omega$$

$$X_{L1} = 0,092 \cdot 50 = 4,6 \text{ m}\Omega$$

Rezystancja obwodu zwarciovego

$$R_k = R_Q + R_T + R_{L1} + R_{L2} = 0 + 5,1 + 43,3 + 55,8 = 104,2 \text{ m}\Omega$$

Reaktancja obwodu zwarciovego

$$X_k = X_Q + X_T + X_{L1} + X_{L2} = 0,9 + 22,3 + 7,9 + 4,6 = 35,7 \text{ m}\Omega$$

Impedancja obwodu zwarciovego

$$Z_k = \sqrt{104,2^2 + 35,7^2} = 110,1 \text{ m}\Omega$$

Początkowy prąd zwarciovym I_k'' przy zwarciu trójfazowym, zgodnie z zależnością (2.1) oraz dla $c = 1$ (tabl. 2.1)

$$I_k'' = \frac{1 \cdot 400 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 110,1} = 2098 \text{ A}$$

Do obliczenia prądu zwarcia jednofazowego korzysta się z zależności (2.16). Impedancje składowej zgodnej i przeciwnej są jednakowe $Z_{1k} = Z_{2k} = Z_k$.

Impedancje składowej zerowej

– układu zasilania

$$R_{0Q} = 0 \quad X_{0Q} = 0$$

– transformatora (tabl. 2.3)

$$R_{0T} = R_T = 5,1 \text{ m}\Omega$$

$$X_{0T} = 0,95 X_T = 0,95 \cdot 22,3 = 21,2 \text{ m}\Omega$$

– linii zasilających:
 rezystancja: $R_{0L}/R_L = 4$
 reaktancja (rys. 2.6): $X_{0L}/X_L = 3,5$ dla kabla YAKY $4 \times 70 \text{ mm}^2$ oraz 3,8 dla kabla YKY $4 \times 16 \text{ mm}^2$

$$R_{0L1} = 4 \cdot 43,3 = 173,2 \text{ m}\Omega$$

$$R_{0L2} = 4 \cdot 55,8 = 223,2 \text{ m}\Omega$$

$$X_{0L1} = 3,5 \cdot 7,9 = 27,6 \text{ m}\Omega$$

$$X_{0L2} = 3,8 \cdot 4,6 = 17,5 \text{ m}\Omega$$

Wypadkową impedancję obwodu zwarciovego Z_{kw1} przy zwarciu jednofazowym należy obliczyć z następujących zależności:

$$R_{kw1} = 2R_Q + 2R_T + R_{0T} + 1,24(2R_{L1} + 2R_{L2} + R_{0L1} + R_{0L2})$$

$$X_{kw1} = 2X_Q + 2X_T + X_{0T} + 2X_{L1} + X_{0L1} + 2X_{L2} + X_{0L2}$$

$$R_{kw1} = 0 + 2 \cdot 5,1 + 5,1 + 1,24(2 \cdot 43,3 + 2 \cdot 55,8 + 173,2 + 223,2) = 752,6 \text{ m}\Omega$$

$$X_{kw1} = 2 \cdot 0,9 + 2 \cdot 22,3 + 21,2 + 2 \cdot 7,9 + 27,6 + 2 \cdot 4,6 + 17,5 = 137,7 \text{ m}\Omega$$

$$Z_{kw1} = \sqrt{752,6^2 + 137,7^2} = 765 \text{ m}\Omega$$

Współczynnik 1,24 uwzględnia podwyższenie temperatury i zwiększenie rezystancji przewodów wywołane przepływem prądu zwarciovego.

Prąd zwarcia jednofazowego

$$I''_{k1} = \frac{0,95 \sqrt{3} \cdot 400 \cdot 10^3}{765} = 860 \text{ A}$$

Do obliczenia prądu jednofazowego zwarcia z ziemią metodą uproszczoną korzysta się z zależności (2.17).

Rezystancję i reaktancję obwodu zwarciovego oblicza się ze wzorów

$$R_{k1} = R_Q + R_T + 1,24(R_{L1} + R_{L2} + R_{PE1} + R_{PE2})$$

$$X_{k1} = X_Q + X_T + X_{L1} + X_{L2} + X_{PE1} + X_{PE2}$$

Przekroje przewodów fazowych i ochronnych kabli są jednakowe, a to oznacza, że $R_{PE1} = R_{L1}$, $R_{PE2} = R_{L2}$ oraz

$$R_{k1} = 0 + 5,1 + 1,24(2 \cdot 43,3 + 2 \cdot 55,8) = 250,9 \text{ m}\Omega$$

$$X_{k1} = 0,9 + 22,3 + 2 \cdot 7,9 + 2 \cdot 4,6 = 48,2 \text{ m}\Omega$$

$$Z_{k1} = \sqrt{250,9^2 + 48,2^2} = 255,5 \text{ m}\Omega$$

Prąd zwarcia jednofazowego

$$I''_{k1} = \frac{0,95 \cdot 230 \cdot 10^3}{255,5} = 856 \text{ A}$$