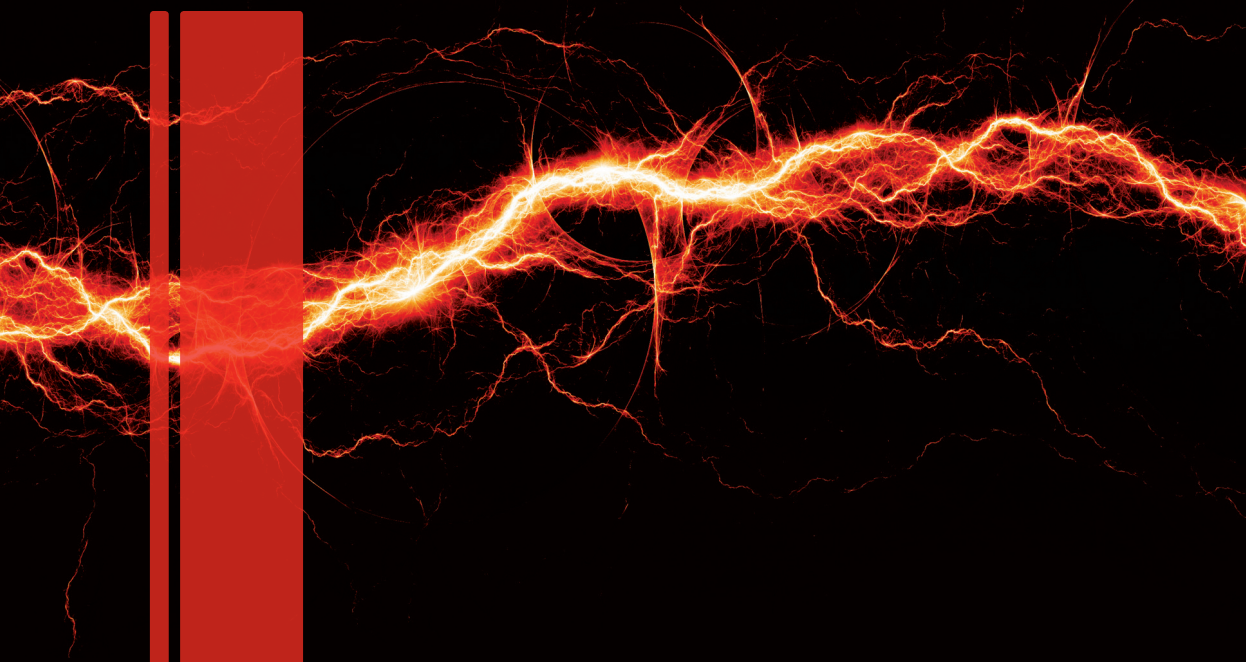
Henryk Markiewicz

Urządzenia elektroenergetyczne



Wydawnictwo WNT

O Autorze:

Prof. dr hab. inż. Henryk Markiewicz jest pracownikiem naukowo-dydaktycznym Wydziału Elektrycznego Politechniki Wrocławskiej, a także członkiem Komitetu Elektrotechniki PAN. W swoim dorobku ma 7 książek oraz około 100 publikacji naukowych i naukowo-technicznych dotyczących urządzeń i stacji elektroenergetycznych, instalacji elektrycznych oraz uziemień i ochrony przeciwporażeniowej.

Wszelkie uwagi na temat książki prosimy kierować pod adresem poczty elektronicznej prof. H. Markiewicza: i8@elektryk.ie.pwr.wroc.pl

Urządzenia elektroenergetyczne

Henryk Markiewicz

Urządzenia elektroenergetyczne

Wydanie czwarte

Wydawnictwo WNT

Opiniodawca: *prof. dr hab. inż. Gerhard Bartodziej*

Redaktor: *mgr inż. Barbara Chojnowska-Ślisz*
Redaktor techniczny: *Anna Szeląg*
Projekt okładki i stron tytułowych: *Przemysław Spiechowski*
Ilustracja na okładce: *Martin Capek/Shutterstock*
Wydawca: *Adam Filutowski*

Współpraca reklamowa: *reklama@pwn.pl*

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 Henryk Markiewicz
Warszawa 2001, 2008
Copyright © by Wydawnictwo WNT
Warszawa 2012
Copyright © by Wydawnictwo Naukowe PWN SA
Warszawa 2016

ISBN 978-83-01-18594-7

Wydanie IV – 1 dodruk (PWN)
Warszawa 2016

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
www.pwn.pl

Druk i oprawa: OSDW Azymut Sp. z o.o.

SPIS TREŚCI

Przedmowa **11**

1. Wiadomości ogólne **13**

1.1. Klasyfikacja urządzeń elektroenergetycznych i niektóre definicje 13
1.2. Narażenia klimatyczne i środowiskowe 16
1.3. Narażenia napięciowe oraz izolacja urządzeń elektroenergetycznych 17
1.4. Warunki eksploatacji i kompatybilności urządzeń elektroenergetycznych 25
1.4.1. Wyjaśnienia ogólne 25
1.4.2. Środowiskowe warunki pracy 26
1.4.3. Elektryczne warunki pracy 28
1.4.4. Kompatybilność elektromagnetyczna 30

2. Zwarcia w układach elektroenergetycznych **35**

2.1. Wiadomości ogólne 35
2.2. Przebiegi prądu zwarciowego 37
2.3. Metoda PNE obliczania prądów zwarciowych 42
2.3.1. Wyjaśnienia ogólne 42
2.3.2. Zwarcia odległe od generatorów 43
2.3.3. Zwarcia w pobliżu generatora 50
2.3.4. Obliczanie niektórych charakterystycznych wielkości prądu zwarciowego 53
2.3.5. Zwarcia jednofazowe w sieciach o małym prądzie ziemnozwarciowym 61
2.3.6. Zwarcia w sieciach niskiego napięcia 68
2.4. Impedancje elementów układu elektroenergetycznego 70
2.5. Przeliczanie impedancji elementów układu elektroenergetycznego na jeden poziom napięcia 81

2.6. Przykłady obliczeń prądów zwarciowych ... 82
2.6.1. Zwarcie trójfazowe w sieci średniego napięcia ... 82
2.6.2. Zwarcia w sieci i instalacji niskiego napięcia ... 87

3. Cieplne oddziaływania prądów roboczych i zwarciowych ... 95

3.1. Źródła ciepła w urządzeniach elektrycznych ... 95
3.2. Wpływ temperatury na właściwości materiałów ... 100
3.3. Przewodzenie i oddawanie ciepła do otoczenia ... 105
3.4. Nagrzewanie się przewodów i przewodników pod wpływem prądów roboczych ... 109
3.5. Nagrzewanie się cewek ... 112
3.6. Obciążalność prądowa przewodów i urządzeń ... 114
3.7. Cieplne działanie prądów zwarciowych ... 120
3.8. Zwarciowa cieplna obciążalność przewodów i urządzeń elektrycznych ... 123

4. Dynamiczne oddziaływania prądów zwarciowych ... 126

4.1. Podstawowe zależności ... 126
4.2. Analiza niektórych charakterystycznych układów przewodników ... 129
4.2.1. Dwa równoległe przewodniki ... 129
4.2.2. Prostopadłe układy przewodników ... 133
4.2.3. Siły elektrodynamiczne w elementach urządzeń o zmiennym przekroju torów prądowych . 134
4.3. Siły elektrodynamiczne w obwodach prądu przemiennego ... 135
4.4. Odporność urządzeń elektrycznych i szyn zbiorczych na narażenia mechaniczne ... 137

5. Łączniki elektroenergetyczne. Wiadomości ogólne ... 149

5.1. Klasyfikacja i podstawowe parametry łączników ... 149
5.2. Zestyki elektryczne ... 153
5.2.1. Wiadomości ogólne ... 153
5.2.2. Rezystancja zestykowa ... 153
5.2.3. Nagrzewanie się zestyków ... 156
5.2.4. Obciążalność zwarciowa zestyków ... 158
5.2.5. Odskoki sprężyste styków ... 160
5.2.6. Materiały stykowe ... 162
5.2.7. Erozja styków ... 164
5.2.8. Typowe konstrukcje zestyków rozłącznych ... 165
5.3. Elektryczny łuk łączeniowy ... 166
5.3.1. Jonizacja przestrzeni łukowej ... 166
5.3.2. Dejonizacja przestrzeni łukowej ... 169
5.3.3. Zapalanie się łuku elektrycznego między rozchodzącymi się stykami łączników ... 171
5.3.4. Charakterystyki prądowo-napięciowe łuku ... 171
5.3.5. Warunki gaszenia łuku elektrycznego ... 173
5.3.6. Wytrzymałość elektryczna przerwy międzystykowej łączników podczas naturalnego gaśnięcia łuku ... 178
5.3.7. Łuk elektryczny w próżni ... 179

5.4. Techniki gaszenia łuku elektrycznego ... 183
5.4.1. Informacje ogólne ... 183
5.4.2. Gaszenie łuku w powietrzu ... 184
5.4.3. Gaszenie łuku w cieczach ... 187
5.4.4. Gaszenie łuku w strumieniu sprężonego powietrza ... 189
5.4.5. Gaszenie łuku w strumieniu sprężonego sześciofluorku siarki ... 191
5.4.6. Gaszenie łuku w próżni ... 192
5.4.7. Gaszenie łuku w obecności materiałów samogazujących ... 193
5.4.8. Gaszenie łuku w materiałach drobnoziarnistych ... 194

6. Łączniki wysokiego napięcia ... 199

6.1. Klasyfikacja ... 199
6.2. Wyłączniki ... 200
6.2.1. Wiadomości ogólne ... 200
6.2.2. Wyłączniki małoolejowe ... 200
6.2.3. Wyłączniki pneumatyczne ... 203
6.2.4. Wyłączniki z sześciofluorkiem siarki ... 205
6.2.5. Wyłączniki próżniowe ... 209
6.2.6. Wyłączniki magnetowydmuchowe ... 211
6.3. Rozłączniki izolacyjne, styczniki ... 214
6.4. Odłączniki, uziemniki, zwierniki ... 219
6.5. Bezpieczniki ... 223
6.5.1. Wiadomości wstępne ... 223
6.5.2. Bezpieczniki z materiałem drobnoziarnistym jako gasiwem ... 223
6.5.3. Bezpieczniki gazowydmuchowe ... 229
6.6. Ograniczniki prądu zwarciowego ... 229

7. Przebiegi łączeniowe w obwodach prądu przemiennego ... 232

7.1. Wiadomości ogólne ... 232
7.2. Napięcia powrotne między rozchodzącymi się stykami łączników ... 233
7.2.1. Obwody jedno- i dwuczęstotliwościowe jednofazowe ... 233
7.2.2. Obwody trójfazowe o elementach skupionych ... 238
7.2.3. Obwody z liniami długimi ... 241
7.2.4. Zwarcie pobliskie ... 243
7.2.5. Obwody probiercze ... 244
7.3. Załączanie obwodów indukcyjnych ... 246
7.4. Wyłączanie obwodów indukcyjnych ... 250
7.5. Załączanie baterii kondensatorów ... 253
7.5.1. Załączanie samotnych i dzielonych baterii ... 253
7.5.2. Załączanie trójfazowych baterii kondensatorów ... 256
7.6. Wyłączanie obwodów pojemnościowych ... 259

8. Przekładniki ... 261

8.1. Wiadomości ogólne ... 261
8.2. Przekładniki prądowe ... 262
8.2.1. Zasada działania i podstawowe zależności ... 262

8.2.2. Błędy transformacji i sposoby ich zmniejszania ... 265
8.2.3. Parametry znamionowe i niektóre charakterystyczne konstrukcje przekładników ... 268
8.2.4. Niektóre charakterystyczne warunki pracy przekładników ... 276
8.3. Przekładniki napięciowe ... 277
8.3.1. Zasada działania i podstawowe zależności ... 277
8.3.2. Błędy transformacji i sposoby ich zmniejszania ... 279
8.3.3. Przekładniki napięciowe pojemnościowe ... 281
8.3.4. Parametry znamionowe przekładników ... 284
8.4. Niekonwencjonalne konstrukcje przekładników ... 287
8.4.1. Wiadomości ogólne ... 287
8.4.2. Przekładniki prądowe niekonwencjonalne ... 288
8.4.3. Przekładniki napięciowe niekonwencjonalne ... 292

9. Urządzenia i obwody główne stacji elektroenergetycznych ... 295

9.1. Wiadomości ogólne ... 295
9.2. Układy połączeń stacji ... 302
9.2.1. Wymagania podstawowe ... 302
9.2.2. Pola rozdzielni i ich wyposażenie ... 304
9.2.3. Układy z szynami zbiorczymi ... 307
9.2.4. Układy bezszynowe ... 317
9.2.5. Układy rozdzielni 110 kV i wyższych napięć ... 321
9.2.6. Układy stacji średniego napięcia ... 324
9.3. Transformatory i autotransformatory ... 327
9.3.1. Uwagi ogólne ... 327
9.3.2. Charakterystyczne parametry i właściwości transformatorów ... 328
9.3.3. Regulacja napięcia ... 333
9.3.4. Sposoby chłodzenia i przeciążalność transformatorów ... 336
9.3.5. Praca równoległa transformatorów ... 339
9.3.6. Kryteria doboru transformatorów ... 342
9.3.7. Fundamenty stanowisk transformatorowych i komory transformatorowe ... 345
9.4. Rozwiązania konstrukcyjne stacji ... 349
9.4.1. Wymagania ogólne ... 349
9.4.2. Rozdzielnie wysokich napięć ... 351
9.4.3. Rozdzielnice średnich napięć ... 364
9.4.4. Prefabrykowane stacje średniego napięcia ... 372

10. Niektóre urządzenia pomocnicze i urządzenia kierowania pracą stacji ... 378

10.1. Potrzeby własne stacji ... 378
10.2. Dławiki gaszące, rezystory i transformatory uziemiające ... 383
10.3. Ograniczanie prądów zwarciowych ... 388
10.3.1. Wyjaśnienia ogólne ... 388
10.3.2. Dławiki zwarciowe ... 390
10.4. Ochrona odgromowa i przeciwprzepięciowa ... 399
10.4.1. Przepięcia, napięcia wytrzymywane i koordynacja izolacji ... 399
10.4.2. Ochrona przed bezpośrednimi wyładowaniami atmosferycznymi ... 401
10.4.3. Ograniczniki przepięć. Właściwości i zasady doboru ... 405

10.5. Urządzenia kierowania pracą stacji elektroenergetycznych 419
10.5.1. Automatyka zabezpieczeniowa 419
10.5.2. Automatyka restytucyjna 434
10.5.3. Telemechanika i komputeryzacja stacji 436

11. Zasilanie i rozdział energii elektrycznej w zakładach przemysłowych 447

11.1. Wymagania dotyczące pewności zasilania 447
11.2. Niezawodność dostawy i jakość energii 449
11.2.1. Przerwy w dostawie energii 449
11.2.2. Parametry napięcia zasilającego 450
11.2.3. Zależności ogólne niezawodności 455
11.2.4. Koszty zawodności zasilania 461
11.3. Metody wyznaczania obliczeniowych mocy szczytowych 464
11.3.1. Wiadomości ogólne 464
11.3.2. Podstawowe zależności i zakres zastosowania niektórych metod obliczeniowych 466
11.4. Zasilanie zakładów przemysłowych energią elektryczną 473
11.4.1. Wiadomości ogólne 473
11.4.2. Napięcie znamionowe sieci rozdzielczych 474
11.4.3. Przemysłowe sieci rozdzielcze średniego napięcia 480
11.4.4. Sieci rozdzielcze niskiego napięcia 486

Literatura 490

Skorowidz 495

PRZEDMOWA

Urządzeniami elektroenergetycznymi lub elektrycznymi nazywa się urządzenia przeznaczone do wytwarzania, przesyłania, rozdziału i przetwarzania energii elektrycznej na inne pożądane formy energii, w tym również na energię elektryczną, lecz o innych parametrach znamionowych. Nie ma zadowalająco jednoznacznych kryteriów podziału na urządzenia elektroenergetyczne i elektryczne.

Pojęcie urządzenia elektroenergetyczne dotyczy licznych i bardzo różnych urządzeń, nie tylko generatorów i transformatorów o mocach rzędu setek megawoltoamperów i masie dziesiątków ton, lecz także np. przekaźników i gniazd wtyczkowych. W żadnym więc podręczniku ani wielotomowym poradniku liczącym nawet kilka tysięcy stron nie można omówić wystarczająco dokładnie wszystkich tych urządzeń, zasad ich działania, rozwiązań konstrukcyjnych, właściwości technicznych i różnorodnych zjawisk występujących w nich podczas eksploatacji.

Każdy autor książki o podobnym tytule musi dokonać wyboru urządzeń i zagadnień, którymi pragnie się zajmować. Naraża się przy tym na słuszny w zasadzie zarzut, że pominął inne bardzo ważne zagadnienia. W podobnej, choć nieco korzystniejszej sytuacji, jestem ja – autor tej oraz innych dostępnych na rynku książek o urządzeniach elektrycznych niskiego napięcia, takich jak „*Instalacje elektryczne*” oraz „*Bezpieczeństwo w elektroenergetyce*”. Mogłem bowiem zrezygnować z omawiania wielu zagadnień opisanych szczegółowo w tamtych publikacjach, aby teraz przedstawić bardziej wyczerpująco urządzenia i obiekty elektroenergetyczne wysokiego i średniego napięcia. Chodzi tu o zasady ich działania, zastosowane rozwiązania konstrukcyjne, a także o różne inne zagadnienia teoretyczne i techniczne związane z doborem oraz pracą tych urządzeń w normalnych i zakłóceniowych warunkach.

W konsekwencji takiego wyboru Czytelnicy zainteresowani urządzeniami zarówno niskiego, jak i wysokiego napięcia powinni mieć dostęp do wszystkich trzech wymienionych książek, które nawzajem się uzupełniają i tworzą zwartą całość zawierającą ważne informacje o bardzo różnych urządzeniach elektroenergetycznych.

Mam nadzieję, że ten podręcznik, podobnie jak inne moje wcześniejsze książki, spotka się z żywym zainteresowaniem Czytelników i zostanie dobrze przyjęty.

Wrocław, 2008 r. Henryk Markiewicz

1

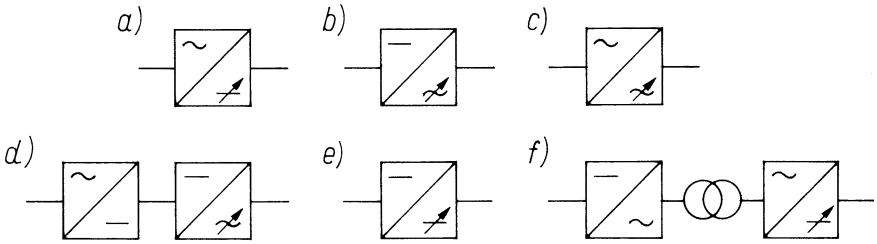
WIADOMOŚCI OGÓLNE

1.1. Klasyfikacja urządzeń elektroenergetycznych i niektóre definicje

Do *urządzeń elektroenergetycznych* zalicza się wszystkie urządzenia i elementy instalacji elektrycznych wysokiego i niskiego napięcia o dużych mocach znamionowych, rzędu wielu kilowatów, przeznaczone do wytwarzania, przesyłania, rozdziału i przetwarzania energii elektrycznej. *Urządzenia elektryczne* to z kolei urządzenia niskiego napięcia o umiarkowanych mocach znamionowych, tworzące instalacje elektryczne w obiektach nieprzemysłowych i przemysłowych, a także urządzenia oraz instalacje teletechniczne i elektroniczne, przyrządy i obwody pomiarowe, sygnalizacyjne, sterowania, monitorowania i inne. Podział ten nie jest jednak zadowalająco jednoznaczny i dlatego może być dyskusyjny.

Kryteria podziału urządzeń elektroenergetycznych ze względu na ich mnogość i różnorodność mogą być bardzo różne, a częściowo wynikają już z samej definicji urządzenia. Jak dotychczas najbardziej rozpowszechnionymi kryteriami podziału są: rodzaj prądu, napięcie znamionowe, przeznaczenie oraz lokalizacja urządzeń.

W elektroenergetyce dominują urządzenia prądu przemiennego. Obecnie coraz powszechniejsze stają się różne przetworniki, przetwarzające zarówno prąd przemienny na stały oraz odwrotnie, jak i prąd przemienny 50 Hz na przemienny o innej, często regulowanej częstotliwości, a także realizujące inne przekształcenia (rys. 1.1). Przekształtniki są urządzeniami elektrycznymi, przy czym główne problemy teoretyczne, techniczne i konstrukcyjne dotyczą energoelektroniki przemysłowej. Mają one już własną bardzo bogatą literatu-



Rys. 1.1. Symbole bloków funkcjonalnych przekształtników: a) przekształtnik prądu przemiennego na prąd stały (prostownik); b) przekształtnik prądu stałego na prąd przemienny (falownik); c) przekształtnik prądu przemiennego na prąd przemienny (sterownik napięcia przemiennego, bezpośredni przemiennik częstotliwości); d) pośredni przemiennik prądu przemiennego na prąd przemienny (przemiennik częstotliwości z pośrednim obwodem napięcia stałego); e) bezpośredni przekształtnik prądu stałego na prąd stały; f) pośredni przekształtnik prądu stałego na prąd stały
Zaczerpnięto z [6]

rę, np. [5, 6, 42] i dlatego autor czuje się zwolniony z obowiązku omawiania tego rodzaju urządzeń w tej książce.

Ze względu na napięcia robocze rozróżnia się urządzenia niskiego i wysokiego napięcia. Do *urządzeń niskiego napięcia* zalicza się urządzenia o napięciu znamionowym do 1000 V prądu przemiennego i 1500 V prądu stałego. *Urządzenia wysokiego napięcia* dzieli się na urządzenia średniego napięcia (6÷30 kV), wysokiego napięcia (110÷400 kV) oraz najwyższych napięć, powyżej 400 kV. Podział ten w zakresie napięć 110 kV i niższych nie jest zadowalająco jednoznaczny w sensie technicznym ani zbyt poprawny językowo.

Z bardzo obszernego zbioru urządzeń elektroenergetycznych wyróżnia się często ważną grupę urządzeń, zwanych *aparatami*. Są to urządzenia przeznaczone do wykonywania w warunkach roboczych i zakłóceniowych następujących czynności:

- łączeniowych (łączniki różnych typów),
- pomiarowych, głównie dużych wartości prądów i napięć (przekładniki, dzielniki napięcia),
- ograniczania prądów zwarciowych (dławiki, ograniczniki prądu, wyłączniki ograniczające, bezpieczniki),
- ograniczania przepięć (iskierniki, ograniczniki przepięć),
- rozruchowych i regulacyjnych.

W zależności od miejsca zainstalowania i funkcji, jaką pełnią urządzenia, rozróżnia się *urządzenia przemysłowe* stosowane w zakładach przemysłowych, górnictwie, rolnictwie itp. oraz *nieprzemysłowe*, przy czym te ostatnie obejmują zarówno urządzenia niskiego napięcia o niewielkich mocach znamionowych, instalowane w domach mieszkalnych, biurach, szkołach itp., jak i urządzenia energetyki zawodowej wysokiego i niskiego napięcia, przeznaczone do przesyłu i rozdziału energii oraz zasilania dużych zakładów przemysłowych w energię elektryczną.

Równie ważna jak podział poszczególnych urządzeń jest klasyfikacja zgrupowania wielu urządzeń o różnym przeznaczeniu, tworzących specjalistyczne obiekty elektroenergetyczne, takie jak stacje transformatorowo-rozdzielcze, rozdzielnie i rozdzielnice. Wyróżniają się one wieloma charakterystycznymi właściwościami wymagającymi bliższego omówienia.

Pojedyncze urządzenia elektryczne, jak i złożone konstrukcje grupujące wiele urządzeń, charakteryzują się znamionowymi parametrami określającymi ich właściwości w normalnych i zakłóceniowych warunkach pracy. Niektóre z nich dotyczą wielu różnych urządzeń, inne zaś są specyficzne tylko dla pewnych ich typów.

Napięcie znamionowe izolacji urządzenia jest to wartość napięcia międzyprzewodowego, na którą izolacja została zbudowana i oznaczona, i która wytrzymuje w określonych warunkach wartości napięć probierczych przez czas trwania próby.

Prąd znamionowy ciągły cieplny jest to wartość skuteczna prądu, na którą urządzenie zostało zbudowane i oznaczone. W ustalonych warunkach działania (badania) urządzenia długotrwały przepływ prądu, równy prądowi znamionowemu, nie spowoduje podwyższenia się temperatury żadnej części urządzenia ponad wartość graniczną dopuszczalną długotrwale.

Znamionowy prąd krótkotrwały (*n*-sekundowy) jest to wartość skuteczna prądu zwarciowego (prądu zastępczego I_{th}) o stałej wartości, który w określonych warunkach może przepływać przez tory prądowe urządzenia przez *n* sekund i nie spowoduje w żadnej części urządzenia przekroczenia temperatury granicznej dopuszczalnej krótkotrwale dla tych części ani sczepienia się styków w łącznikach.

Prąd znamionowy szczytowy (prąd dynamiczny) jest to największa chwilowa wartość prądu, który przepływając przez urządzenie nie spowoduje uszkodzeń mechanicznych ani uszkodzenia izolacji. W łącznikach prąd ten dotyczy skutecznie zamkniętych zestyków łącznika i nie powinien być przyczyną trwałego sczepiania się styków rozłącznych.

Stacją transformatorowo-rozdzielczą nazywa się obiekt elektroenergetyczny obejmujący teren, budowle i urządzenia, w którym następuje przetwarzanie i rozdział energii elektrycznej przy różnych poziomach napięć. Przetwarzanie energii elektrycznej może odbywać się przez transformatory oraz prostowniki i falowniki przekształcające prąd przemienny na stały lub odwrotnie.

Rozdzielnicą nazywa się zespół urządzeń elektroenergetycznych składający się z aparatury rozdzielczej, zabezpieczeniowej, pomiarowej, sterowniczej i sygnalizacyjnej wraz z szynami zbiorczymi i elementami izolacyjnymi oraz konstrukcją mechaniczną i osłonową, przeznaczony do rozdziału energii przy jednym napięciu znamionowym.

Rozdzielnią nazywa się natomiast wyodrębnioną część stacji elektroenergetycznej zawierającej wydzielone pomieszczenie, zespół pomieszczeń lub wydzielony teren, gdzie znajduje się zespół urządzeń rozdzielczych określonego napięcia, umożliwiający dokonywanie czynności łączeniowych.

W odniesieniu do stacji napowietrznych o napięciu 110 kV i wyższym przeważnie nie wyróżnia się pojęcia rozdzielnica i używa się jedynie terminu rozdzielnia.

1.2. Narażenia klimatyczne i środowiskowe

Urządzenia elektryczne stosuje się w różnych warunkach środowiskowych, które mogą wpływać niekorzystnie na pracę i szybkość ich zużywania się, a w pewnych przypadkach ograniczać lub eliminować instalowanie niektórych, nieprzystosowanych konstrukcji. Warunki te określa się głównie temperaturą, wilgotnością, ciśnieniem i zanieczyszczeniem otaczającego powietrza. Urządzenia muszą być wykonane w taki sposób i z zastosowaniem takich materiałów, aby była zapewniona skuteczna ochrona przed szkodliwym oddziaływaniem środowiska oraz poprawna i bezpieczna praca urządzeń w miejscu ich zainstalowania.

Tablica 1.1. Klasyfikacja stref klimatycznych, wg [25, 36]

Klimat (strefa klimatyczna)	Wartość graniczna dopuszczalna		
	temperatura powietrza	wilgotność względna %	ciśnienie hPa
Zimny	najniższa średnia miesięczna niższa niż –15°C	brak ustaleń	> 775
Umiarkowany	– średnia miesięczna w zakresie od –15°C do +25°C – najwyższa w roku do +37°C	brak ustaleń	> 775
Gorący suchy	– najwyższa średnia miesięczna wyższa niż 25°C – najwyższa w roku przeważnie powyżej +37°C	średnia miesięczna wilgotność nie przekracza 80% w średniej miesięcznej temperaturze wyższej niż 20°C	> 775
Gorący wilgotny	przynajmniej jedna średnia miesięczna temperatura w roku wyższa niż 20°C, a jednocześnie średnia miesięczna wilgotność w danym miesiącu większa niż 80%		
Wysokościowy	brak ustaleń	brak ustaleń	< 775

Urządzenia są wytwarzane z przeznaczeniem do instalowania w pomieszczeniach zamkniętych (wykonanie wnętrzowe) oraz na wolnym powietrzu (wykonanie napowietrzne). Warunki środowiskowe występujące w pomieszczeniach zamkniętych są do siebie zbliżone w różnych strefach geograficznych, chociaż mogą się pojawiać istotne różnice wywołane np. temperaturą, wilgotnością czy narażeniami biologicznymi. W bardzo odmiennych warunkach mogą natomiast pozostawać urządzenia elektryczne instalowane na wolnym powietrzu w różnych warunkach środowiskowych. Z tego względu przyjęto wyróżniać 5 charakterystycznych stref klimatycznych (tabl. 1.1).

Urządzenia instalowane w klimacie innym niż umiarkowany muszą być wykonane w wersji przeznaczonej do pracy w specyficznych dla danego klimatu warunkach środowiskowych, określanych granicznymi dopuszczalnymi wartościami różnych wielkości fizycznych, umożliwiającej prawidłową pracę urządzeń w czasie technicznie i ekonomicznie uzasadnionym.

Oprócz warunków środowiskowych właściwych dla różnych stref klimatycznych mogą występować lokalne zmiany klimatu powodowane obecnością niektórych gałęzi przemysłu (kopalnie, huty, przemysł budowlany, chemiczny), charakteryzujące się zwiększonym zapyleniem, pojawianiem się agresywnych związków chemicznych, zwiększoną wilgotnością i innymi zanieczyszczeniami powietrza.

Również same urządzenia w czasie pracy mogą oddziaływać ujemnie na środowisko przez podwyższenie temperatury pomieszczenia, hałas, wibracje, możliwość porażenia elektrycznego, powstanie pól elektromagnetycznych czy wywołanie pożaru. Oddziaływania te muszą być wyeliminowane lub ich intensywność ograniczona do poziomu nieszkodliwego i niedokuczliwego dla ludzi oraz niezakłócającego pracę innych urządzeń.

1.3. Narażenia napięciowe oraz izolacja urządzeń elektroenergetycznych

Tory prądowe, a także dowolne inne części czynne aparatów oraz urządzeń elektroenergetycznych i elektrycznych, znajdujące się w normalnych warunkach pracy pod napięciem powinny być izolowane względem siebie (izolacja międzybiegunowa, międzyfazowa) oraz względem ziemi (izolacja doziemna). W urządzeniach zawierających uzwojenia (transformatory, przekładniki, dławiki, silniki) izolacje te pełnią często również funkcję izolacji międzyzwojowej.

W aparatach przeznaczonych do zamykania i otwierania obwodów (odłączniki, rozłączniki, podstawy bezpiecznikowe, wyłączniki) wytrzymałość elektryczna przerwy między w pełni rozwartymi stykami łącznika powinna być co najmniej o 15% większa od wytrzymałości elektrycznej izolacji doziemnej. Oznacza to, że minimalne udarowe napięcie przeskoku przerwy powinno być wyższe od 100-procentowego udarowego napięcia przeskoku izolacji doziemnej. Wymagania te są podyktowane względami bezpieczeństwa.

Izolacja urządzeń elektrycznych podlega działaniu długotrwałych przepięć w warunkach podwyższonej temperatury, powodowanej przepływem prądów roboczych i niekiedy zwarciowych o bardzo dużych wartościach, wpływającej niekorzystnie na właściwości izolacji. Wymagana wytrzymałość elektryczna i mechaniczna izolacji powinna być zachowana przez cały przewidywany okres użytkowania urządzenia. Okres ten dla większości urządzeń wynosi 25÷30 lat, pomimo zachodzących naturalnych procesów

starzeniowych, których intensywność może być znacznie wzmożona niekorzystnymi wpływami atmosferycznymi i oddziaływaniem mikroklimatu w miejscu zainstalowania urządzenia (zabrudzenie, zawilgocenie, silne nasłonecznienie i inne).

Odporność izolacji na długotrwałe narażenia napięciowe powodowane napięciem roboczym jest określona *napięciem znamionowym izolacji.*

Izolacja urządzenia powinna być odpowiednia do napięcia znamionowego sieci, w której urządzenie zostanie zainstalowane. W warunkach roboczych, ze względów technicznych, może występować napięcie zarówno wyższe, jak i niższe od znamionowego. Dopuszczalne długotrwałe podwyższenie się napięcia roboczego U_{rm} ponad wartość znamionową U_N jest wyrażone zależnością

$$U_{rm} = k_r U_N \tag{1.1}$$

w której k_r – współczynnik zależny od napięcia znamionowego, zawarty w granicach 1,02÷1,20 (tabl. 1.2).

Tablica 1.2. Najwyższe dopuszczalne długotrwale napięcia robocze urządzeń prądu przemiennego, wg [87, 88]

Napięcie znamionowe U_N, kV	6	10	15	20	30	110	220	400	750
Najwyższe napięcie robocze U_{rm}, kV	7,2	12	17,5	24	36	123	245	420	765
Współczynnik k_r	1,20	1,20	1,16	1,20	1,20	1,12	1,11	1,05	1,02

W zakłóceniowych warunkach pracy izolacja urządzeń elektrycznych może być narażona na przepięcia wszelkiego pochodzenia o różnym przebiegu, różnej wartości szczytowej i różnym czasie trwania. Rozróżnia się następujące rodzaje przepięć:

– *dorywcze o częstotliwości sieciowej* nietłumione lub słabo tłumione; w pewnych przypadkach częstotliwość przepięcia może być kilkakrotnie mniejsza lub większa od częstotliwości sieciowej;
– *przejściowe o krótkim czasie trwania* (do kilku milisekund), oscylacyjne lub nieoscylacyjne zwykle silnie tłumione; w zależności od szybkości narastania fali rozróżnia się przepięcia przejściowe o łagodnym czole (łączeniowe), o stromym czole (udar piorunowy) oraz o bardzo stromym czole.

Narażenia powodowane przepięciami są charakteryzowane *współczynnikiem przepięć* k_p (tabl. 1.3) określanym zależnością

$$k_p = \frac{u_p}{\sqrt{2}U_{rmf}} = \frac{\sqrt{3}u_p}{\sqrt{2}U_{rm}} \tag{1.2}$$

w której: u_p – szczytowa wartość przepięcia, U_{rmf} – największa wartość skuteczna napięcia fazowego, którego wartość międzyprzewodową U_{rm} określa zależność (1.1).

Tablica 1.3. Klasyfikacja i charakterystyczne parametry przepięć wewnętrznych, wg [12, 25, 26]

Rodzaj przepięcia	Przyczyna lub warunki powstawania	Parametr charakteryzujący przebieg		
		największa wartość współczynnika k_p	częstotliwość przebiegu, Hz	czas trwania przepięcia
Dynamiczne	wywołana nagłą zmianą obciążenia i bezwładnością regulatora napięcia i prędkości obrotowej turbiny	1,3 dla turbogeneratorów, 1,7 dla hydrogeneratorów	zbliżona do 50	poniżej sekundy
Ziemnozwarciowe	jednofazowe zwarcie z ziemią w sieci o izolowanym punkcie neutralnym – bezłukowe – łukowe	 $\sqrt{3}$ 3,5÷4	 50 kilkaset	minuty, godziny, teoretycznie długo, praktycznie do uszkodzenia izolacji
	jednofazowe zwarcie z ziemią w sieci kompensowanej, w warunkach występowania łuku	3,5÷4	kilkaset	ułamki sekundy wskutek zgaszenia łuku prądu skompensowanego
	jedno- i dwufazowe zwarcie z ziemią w sieci o skutecznie uziemionym punkcie neutralnym – bezłukowe – łukowe	 > 1,4 2,0÷2,5	 50 kilkaset	ułamki sekundy*
Łączeniowe	związane z wyłączaniem zwarć	1,9÷2,4	od kilkuset do kilkudziesięciu tysięcy	ułamki sekundy*
	związane z wyłączaniem nieobciążonej linii długiej o uziemionym punkcie neutralnym	1,2÷1,5 (3,0÷3,5)**	50	ułamki sekundy
	związane z wyłączaniem transformatora w stanie jałowym	2÷3 (4,5÷6)**	krzywa piłowa o częstotliwości kilkuset herców	ułamki sekundy
Ferrorezonansowe	powstanie obwodu szeregowo połączonych indukcyjności (z rdzeniem ferromagnetycznym) i pojemności w warunkach zbliżonych do rezonansu szeregowego	do kilkunastu	kilkaset	do uszkodzenia izolacji

* Zależy od czasu działania zabezpieczeń zwarciowych.
** Wartości w nawiasach dotyczą starszych konstrukcji wyłączników.

Przepięcia o częstotliwości sieciowej mogą być powodowane wyłączaniem dużych odbiorów i bezwładnością urządzeń regulacji napięcia (przepięcia dynamiczne). Czas trwania takich zakłóceń jest stosunkowo krótki, a szczytowe wartości przepięć nie przekraczają zwykle 1,2÷1,3 amplitudy

napięcia roboczego. Inną przyczyną przepięć o częstotliwości sieciowej mogą być zwarcia doziemne. W sieciach o izolowanym punkcie neutralnym oraz w sieciach kompensowanych wartości skuteczne napięć (przepięcia) względem ziemi faz nieuszkodzonych w niekorzystnych warunkach mogą osiągać wartości do ok. 1,9 napięcia znamionowego i trwać nawet kilka godzin. W sieciach o uziemionym punkcie neutralnym przepięcia trwają krótko, przeważnie krócej niż 1 s, a współczynniki przepięć na ogół są mniejsze niż 1,4.

Przepięcia o częstotliwości własnej obwodu, bliskiej częstotliwości sieciowej, mogą wystąpić podczas różnych czynności łączeniowych, takich jak wyłączenia prądów zwarciowych, wyłączenia nieobciążonych linii i transformatorów, palenia się łuku przerywanego przy zwarciach doziemnych w sieciach kompensowanych oraz o punkcie neutralnym izolowanym względem ziemi. Szczytowe wartości takich przepięć zależą od wielu czynników i mogą osiągać do 4,5 krotności amplitudy napięcia roboczego. Większe wartości współczynników przepięć występują w sieciach izolowanych i kompensowanych o napięciu znamionowym 6÷20 kV.

Przepięcia przejściowe powodowane bezpośrednimi wyładowaniami atmosferycznymi mogą osiągać bardzo duże wartości, rzędu 1000 kV lub więcej. Aby nie były one przyczyną trwałego uszkodzenia izolacji urządzeń, konieczne jest stosowanie – właściwych do występujących zagrożeń – urządzeń ochrony przeciwprzepięciowej (iskierniki, odgromniki, ograniczniki przepięć) ograniczających przepięcia do wartości mniejszej od wytrzymywanej przez urządzenia elektryczne.

Izolacja urządzeń elektrycznych powinna wytrzymywać zagrożenia powodowane różnymi przyczynami. Sprawdza się to podczas wykonania znormalizowanych prób napięciowych w celu wykazania, że wytrzymałość elektryczna izolacji jest nie mniejsza od znormalizowanych napięć wytrzymywanych (napięć probierczych).

W normie [88] wyróżnia się dwa zakresy napięciowe:

zakres I – urządzenia o napięciu roboczym do 245 kV,
zakres II – urządzenia o napięciu roboczym wyższym od 245 kV.

Znamionowy poziom izolacji urządzeń wyznacza się na podstawie próby znamionowym napięciem wytrzymywanym:

a) dla urządzeń I zakresu:
   – krótkotrwałym o częstotliwości sieciowej,
   – udarowym piorunowym;
b) dla urządzeń II zakresu:
   – udarowym łączeniowym,
   – udarowym piorunowym.

Wartości znormalizowanych napięć wytrzymywanych (probierczych) podano w tabl. 1.4 i 1.5.

Tablica 1.4. Znormalizowane poziomy izolacji zakresu I (1 kV < $U_{rm} \leq$ 245 kV) i minimalne odstępy w powietrzu, wg [88, 89]

Najwyższe napięcie pracy urządzeń U_{rm} kV (wartość skuteczna)	Znormalizowane napięcie wytrzymywane, kV		Minimalny odstęp doziemny i międzyfazowy, mm	
	krótkotrwale o częstotliwości sieciowej* (wartość skuteczna)	udarowe piorunowe* (wartość szczytowa)	rozdzielnie	
			wnętrzowe	napowietrzne
3,6	10	20 40	60 60	120 20
7,2	20	40 60	60 90	120 120
12	28	60 75 95	90 120 160	150 160 160
17,5	38	75 95	120 160	160 160
24	50	95 125 145	160 220 220	160 220 220
36	70	145 170	270 320	270 320
52	95	250	480	
72,5	140	325	630	
123	(185)	(450)	900	
	230	550	1100	
145	(185)	(450)	900	
	230	550	1100	
	275	650	1300	
170	(230)	(550)	1100	
	275	650	1300	
	325	750	1500	
245	(275)	(650)	1500	
	(325)	(750)	1500	
	360	850	1700	
	395	950	1900	
	460	1050	2100	

* Jeżeli wartości podane w nawiasach są niewystarczające dla wykazania, że wymagane międzyprzewodowe napięcia wytrzymywane są zadowalające, konieczne jest przeprowadzenie dodatkowych prób wytrzymałości izolacji międzyfazowej.

Tablica 1.5. Znormalizowane poziomy izolacji zakresu II (U_{rm} > 245 kV), wg [88, 89]

Najwyższe napięcie pracy urządzeń U_{rm} kV (wartość skuteczna)	Znormalizowana wytrzymałość na udary łączeniowe			Znormalizowane wytrzymywane napięcie udarowe piorunowe, kV (wartość szczytowa)
	izolacja wzdłużna* kV (wartość szczytowa)	faza-ziemia kV (wartość szczytowa)	międzyfazowa (w stosunku do wartości szczytowej faza-ziemia)	
300	750	750	1,50	850 950
	750	850	1,50	950 1050
362	850	850	1,50	950 1050
	850	950	1,50	1050 1175
420	850	850	1,60	1050 1175
	950	950	1,50	1175 1300
	950	1050	1,50	1300 1450
525	950	950	1,70	1175 1300
	950	1050	1,60	1300 1425
	950	1175	1,50	1425 1550
765	1175	1300	1,70	1675 1800
	1175	1425	1,70	1800 1950
	1175	1550	1,60	1950 2100

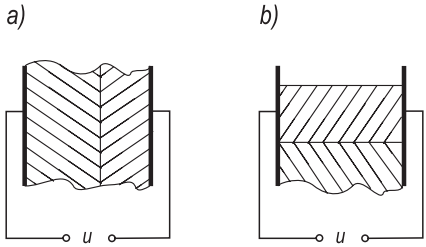
* Wartość składowej udarowej w stosowanej próbie napięciem kombinowanym.

Ze względu na rodzaj zastosowanych materiałów izolacyjnych rozróżnia się izolację powietrzną otwartą, gazową lub próżniową szczelnie zamkniętą, olejową oraz stałą.

Układ izolacyjny może być jednorodny lub niejednorodny o szeregowym lub równoległym układzie poszczególnych warstw izolacji wykonanych z różnych materiałów izolacyjnych (rys. 1.2).

W układzie szeregowym (rys. 1.2a) jednym z elementów jest na ogół izolacja stała, która może współdziałać z powietrzem, olejem izolacyjnym, gazem lub próżnią. W układzie takim przekroczenie wytrzymałości elektrycznej izolacji powoduje przebicie wszystkich warstw, w tym również

izolacji stałej. Jest to jednoznaczne z trwałym zniszczeniem układu izolacyjnego. W układzie równoległym (rys. 1.2b) przekroczenie wytrzymałości elektrycznej układu spowoduje przebicie warstwy izolacyjnej o najmniejszej wytrzymałości. Powinna to być warstwa powietrza, gazu lub oleju. Może też wystąpić wyładowanie po powierzchni izolacji stałej, nie powodujące trwałego uszkodzenia części stałej układu izolacyjnego.



Rys. 1.2.
Szkice układów izolacyjnych: a) szeregowy; b) równoległy

Układ izolacyjny aparatów elektrycznych jest najczęściej układem równoległym, utworzonym z izolacji wewnętrznej stałej oraz izolacji zewnętrznej w postaci otaczającego aparat powietrza. Izolacja wewnętrzna powinna wytrzymywać przepięcia większe niż wytrzymałość izolacji zewnętrznej. Oznacza to, że w przypadkach przepięć przekraczających wytrzymałość elektryczną układu izolacyjnego wystąpi przebicie izolacji zewnętrznej aparatu, nie powodujące zniszczenia lub uszkodzenia całego aparatu. Aparaty spełniające ten warunek mają więc izolację wewnętrznie skoordynowaną. Wymaga to dokładnego ustalenia kształtu i wymiarów geometrycznych układu izolacyjnego oraz właściwości elektrycznych zastosowanych materiałów izolacyjnych.

Powietrze stanowi dobrą i tanią izolację elementów urządzeń należących do różnych faz (różniących się potencjałem względem siebie oraz względem ziemi) i dlatego jest powszechnie wykorzystywane w konstrukcji wielu aparatów elektrycznych. Wytrzymałość elektryczna powietrza zależy od ciśnienia (wysokości n.p.m.), wilgotności, temperatury oraz odległości między elektrodami i ich kształtu. Jest najmniejsza dla układu elektrod ostrze–powierzchnia uziemiona.

Odległość izolacyjna w powietrzu, wyznaczona z uwzględnieniem możliwego zbliżenia przewodów i przewodników, powodowanego wiatrem lub np. oddziaływaniami elektrodynamicznymi prądów zwarciowych, nie powinna być mniejsza od podanych w tabl. 1.6.

Przy wymiarowaniu urządzeń wyznacza się przeważnie odległości między osiami szyn, izolatorów itp. Ustalając odległości między elementami urządzeń należy uwzględnić to, że pod napięciem znajdują się również np. okucia i nasadki izolatorów, wskutek czego rzeczywiste odległości między przewodnikami (szynami) mogą być znacznie mniejsze od odległości między osiami szyn czy izolatorów, należących do różnych faz.

Tablica 1.6. Zalecane drogi upływu, wg [88, 89]

Poziom zabrudzeń	Przykłady typowego środowiska	Minimalna znamionowa droga upływu, mm/kV*
I Lekki	– obszary bez przemysłu i o małej gęstości zabudowy wyposażonej w instalacje grzewcze – obszary o małej gęstości przemysłu lub budynków, lecz o dużej częstości wiatrów i/lub deszczy – obszary rolnicze** – obszary górskie – wszystkie te obszary są położone w odległości co najmniej 10÷20 km od morza i nie są narażane na wiatry wiejące bezpośrednio od morza***	16,0
II Średni	– obszary z przemysłem nie wytwarzającym szczególnie zanieczyszczonych dymów i/lub o średniej gęstości zabudowy wyposażonej w instalacje grzewcze – obszary o dużej gęstości zabudowy i/lub przemysłu, lecz z częstymi wiatrami i/lub opadami deszczu – obszary narażane na wiatry wiejące od morza, lecz oddalone od wybrzeża nie mniej niż kilka kilometrów	20,0
III Ciężki	– obszary o dużej gęstości przemysłu oraz przedmieścia dużych miast o dużej gęstości zabudowy wyposażonej w instalacje grzewcze zanieczyszczające atmosferę – obszary w bliskości morza lub narażone na ciągłe silne wiatry wiejące od morza***	25,0
IV Bardzo ciężki	– obszary niezbyt rozległe narażone na pyły przewodzące i na dymy przemysłowe tworzące szczególnie grube osady przewodzące – obszary niezbyt rozległe, bardzo bliskie wybrzeża morza i narażone na mgły morskie lub na silne zabrudzające wiatry od morza – obszary pustynne charakteryzujące się długimi okresami bez opadów, narażone na silne wiatry niosące piasek i sól oraz narażone na regularną kondensację	31,0

Uwaga: Niniejsza tablica powinna być stosowana tylko dla szklanej i porcelanowej izolacji i nie dotyczy niektórych szczególnych narażeń środowiskowych, takich jak śnieg i lód w strefach ciężkich zabrudzeń, bardzo silne deszcze, obszary suche itp.

* Wg IEC 815 minimalna droga upływu izolatorów między fazą a ziemią dotyczy najwyższego napięcia sieci (faza-faza).

** Rozpylanie nawozów lub wypalanie ściernisk może prowadzić do podwyższenia poziomu zabrudzeń ze względu na roznoszenia cząstek przez wiatr.

*** Odległości od wybrzeża morskiego zależą od jego topografii oraz od ekstremalnych parametrów wiatru.

Zabrudzenie powierzchni izolacji pyłem przewodzącym oraz solami, zwłaszcza zwilżonych rosą, mgłą, śniegiem lub słabym deszczem, bez wyraźnego efektu zmywania, może powodować istotne obniżenie wytrzymałości elektrycznej układu izolacyjnego. Izolatory i inne elementy izolacyjne powinny wytrzymywać długotrwale najwyższe napięcia sieci również w warunkach zabrudzeniowych, przy akceptowalnym ryzyku przeskoku.

Aby zachować znamionowy poziom izolacji, konieczne jest powiększenie, w stopniu odpowiednim do warunków zabrudzeniowych, odległości

między elementami urządzeń (drogi upływu) znajdujących się pod różnym potencjałem. Klasyfikację środowiska ze względu na stopień (poziom) zabrudzenia oraz wymagane jednostkowe drogi upływu podano w tabl. 1.6.

W konsekwencji należy stwierdzić, że izolacja urządzeń spełniająca kryterium poprawnego działania musi być projektowana tak, aby ograniczyć do ekonomicznie i technicznie uzasadnionego poziomu prawdopodobieństwo jej uszkodzenia lub zakłócenia ciągłości działania urządzeń, powodowane narażeniami napięciowymi. Kryterium to jest zwykle określone w formie akceptowanego, możliwego do przyjęcia wskaźnika liczby uszkodzeń układu izolacyjnego na rok lub liczbę lat między uszkodzeniami. Poprawne działanie urządzeń jest możliwe, jeżeli ich izolacje przejdą z wynikiem pozytywnym znormalizowane próby napięciowe, wykonane napięciami probierczymi (wytrzymywanymi) o częstotliwości sieciowej oraz o przebiegu udarowym. Kryterium oceny dopuszcza jednak możliwość wystąpienia uszkodzenia (przebicia) izolacji, przy czym ważny jest rodzaj izolacji, która uległa uszkodzeniu i miejsce wystąpienia tego uszkodzenia.

Do oceny jakości wykonania izolacji wykorzystuje się pojęcie *koordynacji izolacji*. Jest to całokształt przedsięwzięć technicznych zapewniających takie stopniowanie izolacji równoległej urządzeń, aby przeskok lub przebicie izolacji wywołane przepięciami łączeniowymi lub piorunowymi były ograniczone do miejsc i urządzeń niezagrażających obsłudze i urządzeniom elektroenergetycznym, a więc ewentualne szkody i zakłócenia ruchowe były możliwie najmniejsze. Urządzenia takie to głównie iskierniki, ograniczniki przepięć i odgromniki.

Bliższe omówienie przyczyn występowania przepięć i sposobów ich ograniczania podano w p. 10.4.

1.4. Warunki eksploatacji i kompatybilności urządzeń elektroenergetycznych

1.4.1. Wyjaśnienia ogólne

Poprawne działanie urządzeń elektroenergetycznych i energoelektronicznych wymaga spełnienia określonych warunków, w szczególności w odniesieniu do:

– środowiska, w którym urządzenia mają pracować,
– jakości układu zasilania,
– zakłóceń elektromagnetycznych.

Jednocześnie urządzenia te nie powinny wpływać ujemnie na pracę innych urządzeń technicznych, np. przez nadmierne podwyższenie temperatury w pomieszczeniu, wibracje, zakłócenia elektromagnetyczne, ani powodować znacznej uciążliwości dla przebywających w pobliżu osób.

Większość urządzeń elektrycznych takich jak silniki, transformatory, odbiorniki oświetleniowe, urządzenia grzejne i inne jest najczęściej mało wrażliwa na zmiany warunków otoczenia i zasilania wówczas, gdy zmiany te występują w ograniczonym zakresie. Same również nie wywołują istotnych zmian mikroklimatu środowiska, w którym są eksploatowane, ani zakłóceń w układzie zasilania, w stopniu utrudniającym pracę innych urządzeń technicznych. Jeżeli jednak niektóre z nich są przyczyną tych zmian i emitują zakłócenia, to zwykle możliwe jest ograniczenie źródła emisji i zredukowanie ich oddziaływania. Polega to na takim zlokalizowaniu urządzeń i zastosowaniu takiego układu zasilania, przy których są zapewnione pożądane warunki pracy tych oraz innych urządzeń. Wówczas ulegają ograniczeniu różne zakłócenia powodowane pracą urządzeń.

Wzajemne dopasowanie urządzeń elektrycznych i elektronicznych do warunków środowiskowych i technicznych przyjęto obecnie nazywać *kompatybilnością*. W zależności od tego, czego ono dotyczy, rozróżnia się kompatybilność środowiskową, kompatybilność z układem zasilania oraz kompatybilność elektromagnetyczną (EMC).

1.4.2. Środowiskowe warunki pracy

Warunki środowiskowe, w których są instalowane urządzenia elektryczne powinny zapewniać m.in. właściwe chłodzenie przez odprowadzenie ciepła powodowanego stratami energii elektrycznej w urządzeniach i układzie zasilania. Chłodzenie może być naturalne lub sztuczne, polegające na zainstalowaniu urządzeń wymuszających wymianę powietrza w pomieszczeniu lub ruch innego czynnika chłodzącego, np. wody czy oleju.

Inne warunki, w tym wilgotność oraz zanieczyszczenie powietrza cząsteczkami stałymi lub gazami agresywnymi, nie powinny ograniczać możliwości wykorzystania znamionowych parametrów urządzenia ani powodować jego przyspieszonego zużycia.

Rozróżnia się [72, 93] normalne i nienormalne warunki eksploatacji. Za *warunki normalne* uważa się takie, w których m.in.:

– temperatura czynnika chłodzącego i temperatura otoczenia są niższe niż wartości podane w tabl. 1.7;
– wilgotność względna otaczającego powietrza jest nie mniejsza niż 15% i nie większa od tej, przy której w danych warunkach występuje kondensacja pary;
– powietrze powinno być czyste, spełniające wymagania IEC 664 [6] dla stopnia zanieczyszczenia 1.

Za warunki pracy inne niż normalne (*warunki nienormalne*) uważa się takie, w których np.:

– temperatura powietrza lub czynnika chłodzącego wykracza poza zakres wartości podanych w tabl. 1.7;

– woda chłodząca może powodować w stosunkowo krótkim czasie korozję lub niedrożność instalacji, np. woda morska lub nadmiernie twarda;
– w otaczającym powietrzu występuje zanieczyszczenie cząstkami stałymi, gazami agresywnymi, spalinami lub parami oleju;
– wahania temperatury przekraczają 5°C/h lub wahania wilgotności względnej 5%/h;
– wysokość nad poziomem morza jest wyższa niż 1000 m;
– występują inne nietypowe warunki użytkowania, wykraczające poza granice warunków pracy uznawanych za normalne.

Tablica 1.7. Dopuszczalna chwilowa ekstremalna temperatura czynnika chłodzącego na wejściu systemu chłodzenia, wg [93]

Czynnik	Dopuszczalna temperatura, °C	
	minimalna	maksymalna
Powietrze	0	+40
Woda	+5	+30
Olej	–5	+30

Prawidłowa i długotrwała, niezawodna praca urządzenia elektrycznego zależy od technicznych warunków jego zasilania i eksploatacji, jak również od warunków środowiskowych, w których urządzenie jest zainstalowane i eksploatowane, a wcześniej było składowane i transportowane. Zastosowane materiały i sposób ochrony przed oddziaływaniem środowiska powinny być odpowiednie do spodziewanej intensywności zjawisk negatywnie oddziaływujących na urządzenie oraz skutecznie chronić je przed tymi narażeniami. Urządzenia powinny być składowane i transportowane w warunkach nie narażających ich na zniszczenie lub przyspieszone uszkodzenie, również w przyszłości.

Urządzenia w wykonaniu napowietrznym są budowane do zainstalowania w określonej strefie klimatycznej (tabl. 1.1). W pewnych przypadkach warunki środowiskowe w miejscu zainstalowania urządzenia elektrycznego mogą być różne od tych, jakie wynikają z klimatu naturalnego. Warunki te określa się nazwą mikroklimatu. Pod tym pojęciem należy rozumieć trwałe zmiany klimatu naturalnego, występujące na ograniczonym terenie, spowodowane głównie działalnością gospodarczą człowieka, wywołującą np. zwiększone zapylenie, obecność szkodliwych związków chemicznych, zwiększoną wilgotność powietrza w pobliżu dużych zakładów chemicznych, hut i elektrowni.

Niezależnie od stref klimatycznych i mikroklimatu bardzo różne i zmienne w czasie mogą być lokalne warunki środowiskowe w niektórych obiektach i pomieszczeniach zamkniętych (podziemia kopalń, statki, pojazdy i inne) lub wewnątrz szaf i obudów, głównie w przypadkach zgrupowania w ograniczonej przestrzeni wielu różnych urządzeń technicznych, nie

tylko elektrycznych. Warunki takie przyjęto nazywać *klimatem technicznym* lub kryptoklimatem. Obudowy i osłony powinny chronić zainstalowane w nich urządzenia elektryczne przed narażeniami tego środowiska. Jednak one same ze względu na zamknięcie urządzeń w ograniczonej przestrzeni i utrudnioną wskutek tego wymianę ciepła z otoczeniem powodują wystąpienie nowych warunków wewnątrz obudowy, głównie podwyższenie się temperatury, co może uniemożliwiać wykorzystanie znamionowych parametrów zainstalowanych tam urządzeń.

1.4.3. Elektryczne warunki pracy

Urządzenia elektroenergetyczne i energoelektroniczne przetwarzające energię elektryczną na inne postacie energii lub na energię elektryczną, lecz o innych parametrach technicznych, są budowane przy założeniu, że będą one zasilane energią elektryczną wysokiej jakości, określonej przede wszystkim następującymi wymaganiami:

- wartość skuteczna napięcia zasilania jest równa wartości znamionowej lub występujące odchylenia od wartości znamionowej są mniejsze niż wartości graniczne dopuszczalne, różne dla różnych urządzeń, przeważnie jednak rzędu kilku procent;
- częstotliwość napięcia zasilania jest równa częstotliwości znamionowej;
- zmiany i szybkie zmiany (wahania) napięcia i częstość ich występowania nie są większe niż wartości graniczne dopuszczalne;
- nie występuje asymetria napięć w układzie wielofazowym lub jest ona odpowiednio mała;
- odkształcenie napięcia zasilania od przebiegu sinusoidalnego o podstawowej częstotliwości, określone wartością współczynnika odkształcenia harmonicznymi (współczynnika deformacji) THD_U jest niewielkie, na ogół mniejsze niż 5% w przypadku odbiorników zasilanych z sieci niskiego napięcia w obiektach specjalnych (szpitale, lotniska itp.) oraz 8% dla odbiorników w obiektach ogólnych (zakłady przemysłowe, budynki mieszkalne i inne podobne).

Urządzeniami elektrycznymi szczególnie wrażliwymi na odstępstwa od znamionowych warunków zasilania są różnego rodzaju przekształtniki energoelektroniczne, które jednocześnie same wnoszą znaczne zakłócenia do układu zasilania. Zsumowane odkształcenia nie mogą przekraczać zakresu dopuszczalnego dla danej *klasy odporności przekształtnika*.

Przekształtniki wykonuje się w trzech klasach odporności na zmiany i odkształcenia występujące w sieci zasilającej (tabl. 1.8), spełniających warunki kompatybilności z tą siecią. Deformacje napięcia zasilającego i prądu większe od podanych mogą powodować:

- zmianę właściwości przekształtnika, polegającą np. na zmniejszeniu dopuszczalnej mocy wyjściowej (skutek *F*);

– przerwę w pracy spowodowaną zadziałaniem zabezpieczeń, przy czym ponowne załączenie po ustaniu zakłócenia może być samoczynne lub w wyniku działania obsługi (skutek *T*);
– trwałe uszkodzenie przekształtnika lub zniszczenie niektórych jego elementów, np. przyrządów półprzewodnikowych w wyniku przepięcia (skutek *D*).

Tablica 1.8. Klasy odporności przekształtników sieciowych, wg [93]

Zmiany napięcia i częstotliwości linii zasilającej		Klasa odporności			Możliwy skutek
		A	B	C	
Zmiany napięcia w stanie ustalonym, %		+10/–10	+10/–10	+10/–5	*F*
Krótkotrwałe (0,5÷30 okresów) zmiany napięcia przy pracy do wartości znamionowych U_{dN}/I_{dN}*: – praca prostownikowa – praca falownikowa		 +15/–15 +15/–15	 +15/–10 +15/–10	 +15/–10 +15/–7,5	 *T* *T*
Zawartość wyższych harmonicznych w stanie ustalonym, %: – składowe nieparzyste – składowe parzyste		 12,5 2	 5 2	 2,5 1	 *F* *F*
Załamania komutacyjne (głębokość) w stanie ustalonym (% amplitudy U_{LWm})**		100	40	20	*T*
Zakres zmian częstotliwości, %		+2/–2	+2/–2	+1/–1	*F*
Szybkość zmian częstotliwości, %/s		+2/–2	+1/–1	+1/–1	*F*
Asymetria napięcia trójfazowego***	w stanie ustalonym	5	5	2	*T*
	zmiany krótkotrwałe: – tylko praca prostownikowa – praca prostownikowa i falownikowa	 5 5	 5 5	 3 2	 *T* *T*

* Znamionowe napięcie wyprostowane U_{dN} i znamionowy prąd wyprostowany I_{dN}.
** U_{LWm} – maksymalna wartość chwilowa napięcia międzyprzewodowego po stronie zasilania (bez uwzględnienia przepięcia przejściowego).
*** Składowa symetryczna przeciwna podawana w procentach składowej symetrycznej zgodnej.

Przekształtniki muszą być odporne na występujące zmiany i zniekształcenia napięcia zasilającego.

Wymagania klasy A dotyczą urządzeń pracujących w szczególnie niekorzystnych warunkach zasilania, występujących np. przy zasilaniu wielu urządzeń z jednego transformatora o stosunkowo niewielkiej mocy znamionowej lub z sieci autonomicznych, zasilanych z zespołów prądotwórczych o małej mocy zwarciowej. Urządzenia (przekształtniki) o klasie odporności A należy instalować również w sieciach, w których prawdopodobieństwo przekroczenia warunków zasilania odpowiadających klasom B i C jest wprawdzie niewielkie, ale negatywne skutki takiego zdarzenia mogłyby być szczególnie duże. Niekiedy zasadne jest zainstalowanie dodatkowych urządzeń poprawiających warunki zasilania, takich jak ograniczniki przepięć, filtry wyższych harmonicznych i inne.

Przekształtniki odpowiadające wymaganiom klasy C mogą być instalowane w sieciach o dużej wartości mocy zwarciowej względem mocy przekształtnika, rzędu 50 i więcej, w których nie występują nagłe zmiany obciążenia.

Koszty wytworzenia przekształtnika o zwiększonej odporności na zakłócenia w sieci zasilającej (klasy A) są znacznie większe niż przekształtników o takich samych pozostałych właściwościach i mocy znamionowej, lecz o mniejszej odporności na zakłócenia (klasy B i C).

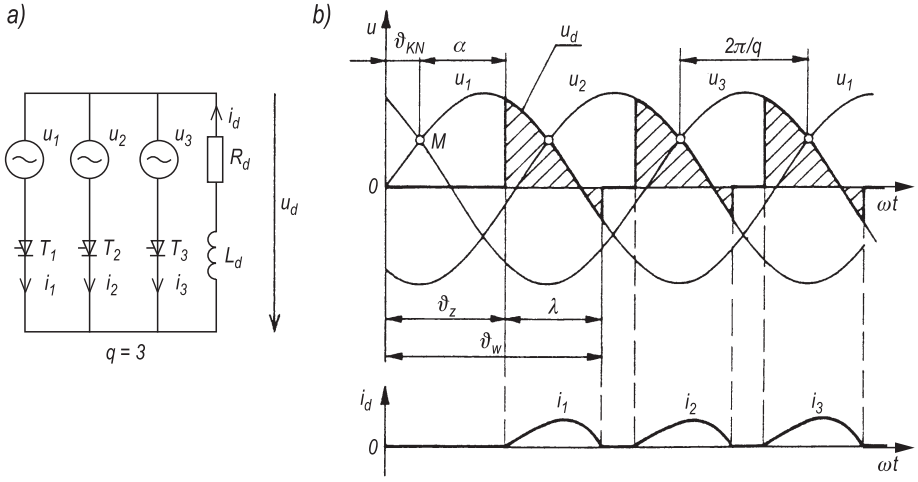
1.4.4. Kompatybilność elektromagnetyczna

Praca większości urządzeń elektrycznych wywołuje określone zakłócenia w sieci zasilającej i otaczającym je środowisku, przeważnie wskutek strat energii oraz nagłych zmian prądu i napięcia w czasie załączania i wyłączania obwodów i odbiorników, a także w przypadkach zwarć.

W przekształtnikach energoelektronicznych ze sterowanymi elementami półprzewodnikowymi przebiegi czasowe prądu i napięcia – również w czasie normalnej pracy – mają kształt impulsów o bardzo dużych stromościach narastania, rzędu wielu amperów i woltów na mikrosekundę ze składowymi harmonicznymi zawartymi w pasmie 10÷1000 MHz (rys. 1.3).

Szybkozmienne przebiegi napięć i prądów o dużych częstotliwościach oraz wysokim poziomie energetycznym wywołują zmienne pole elektromagnetyczne, będące źródłem zakłóceń rozchodzących się w różny sposób, w tym także w postaci fal elektromagnetycznych.

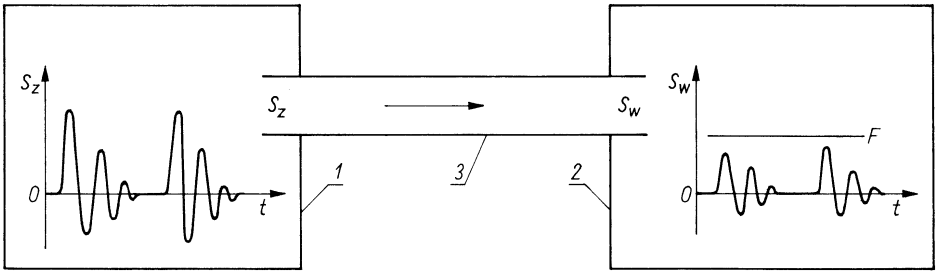
Zgrupowanie dużej liczby urządzeń o różnych właściwościach i przeznaczeniu w ograniczonej przestrzeni powoduje, że oddziaływują one wzajemnie negatywnie na siebie, co prowadzi do pogorszenia się warunków ich pracy.



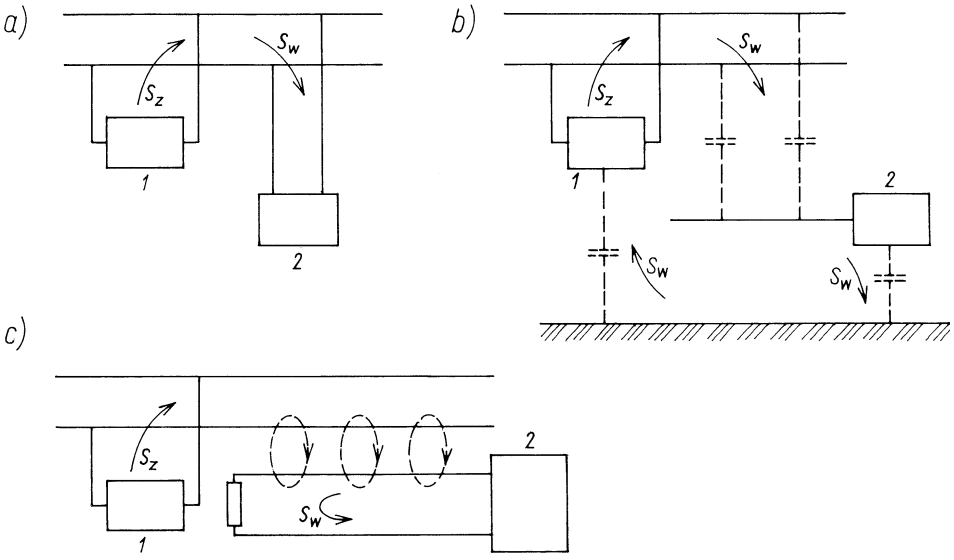
Rys. 1.3. Wielopulsowy prostownik sterowany fazowo: a) schemat układu; b) przebiegi czasowe napięć i prądów przy pracy impulsowej
Zaczerpnięto z [42]

Zdolność urządzenia elektrycznego do długotrwałego poprawnego funkcjonowania w środowisku elektromagnetycznym bez niedopuszczalnie szkodliwego oddziaływania na środowisko i pracujące tam inne urządzenia przyjęto nazywać *kompatybilnością elektromagnetyczną*.

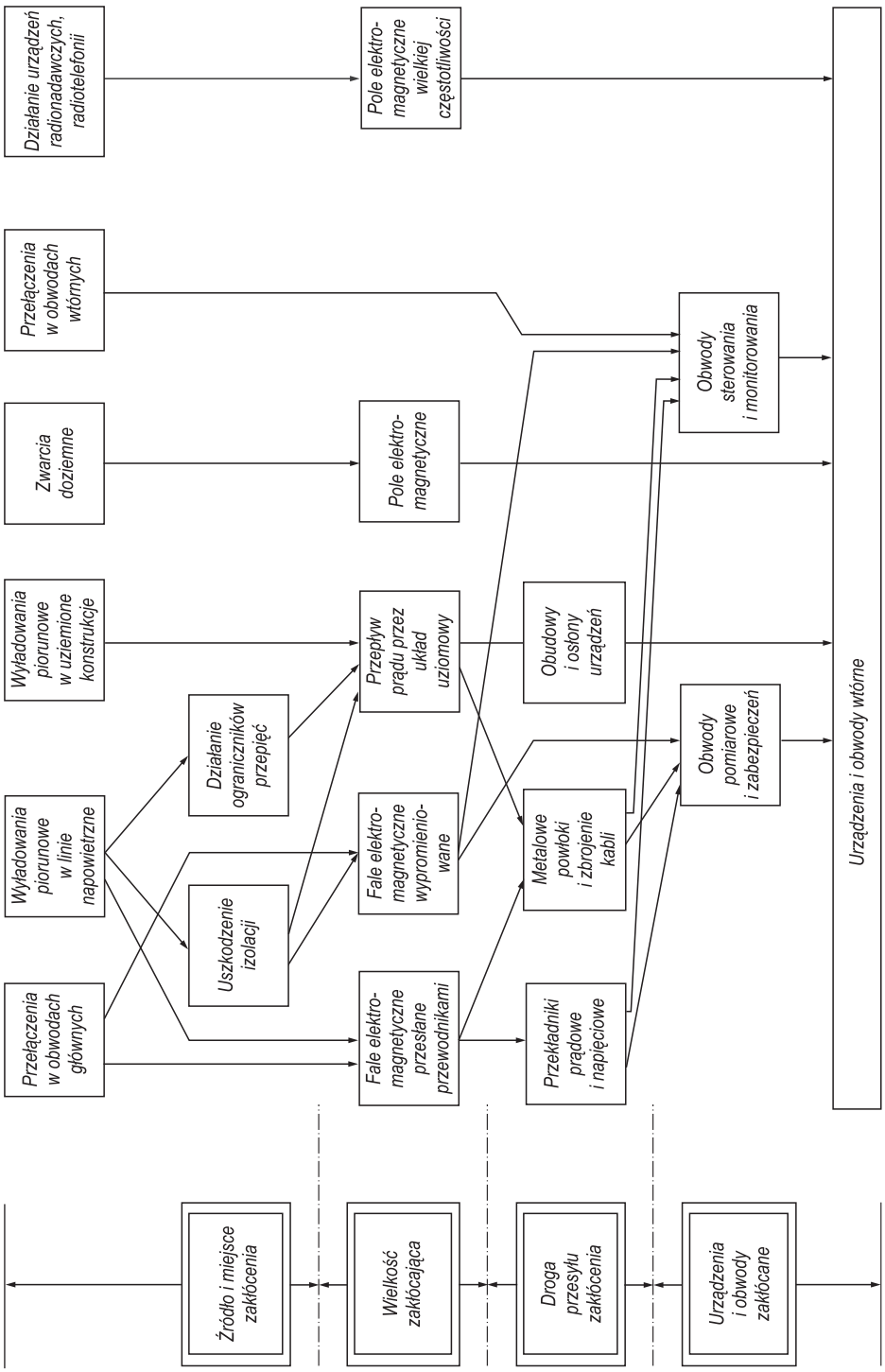
Ogólny schemat sprzężenia obiektów zakłócającego i zakłócanego przedstawiono na rys. 1.4. Sygnał zakłócający może mieć charakter ciągły, dyskretny lub impulsowy, a sprzężenie między obiektami może być związane z galwaniczym połączeniem, pojemnościowe, indukcyjne lub inne (rys. 1.5).



Rys. 1.4. Szkic przedstawiający zjawisko sprzężenia elektromagnetycznego zakłócającego, wg [25]
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



Rys. 1.5. Przykłady sprzężeń zakłócających: a) galwanicznych; b) pojemnościowych; c) indukcyjnych



Rys. 1.6. Przyczyny i miejsca powstawania zakłóceń w sieciach elektroenergetycznych oraz drogi ich przenikania do urządzeń i obwodów wtórnych

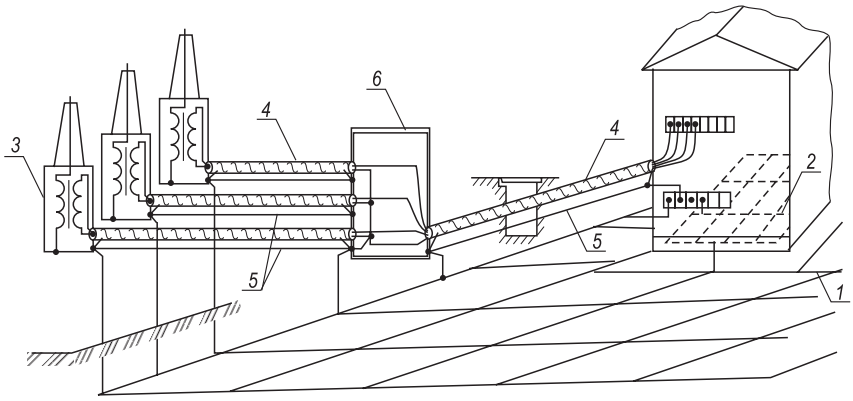
Urządzeniami zakłócającymi są przeważnie urządzenia elektroenergetyczne (linie wysokiego napięcia, transformatory, przekształtniki energoelektroniczne i inne) oraz stacje (nadajniki) radiowe i radarowe. Obiektami zakłócanymi najbardziej wrażliwymi na zakłócenia, szczególnie elektromagnetyczne, są natomiast urządzenia i układy ze zintegrowanymi elementami elektronicznymi (odbiorniki RTV, komputery, sieci komputerowe i telekomunikacyjne, sprzęt elektromedyczny, statyczne układy sterowania i zabezpieczeń oraz inne podobne).

Przyczyny i miejsca powstawania zakłóceń w sieciach elektroenergetycznych oraz drogi ich przenikania do urządzeń i obwodów wtórnych przedstawiono na rys. 1.6. Czynności łączeniowe, wyładowania atmosferyczne lub zwarcia w obwodach pierwotnych mogą oddziaływać szkodliwie na aparaty i obwody wtórne powodując ich nieprawidłowe działanie. Należy więc je tak wykonać i zainstalować, aby oddziaływania te wyeliminować lub ograniczyć do wymaganego poziomu. W rozwiązaniach praktycznych przeważnie konieczne jest zastosowanie więcej niż jednego środka ochrony, spośród takich jak:

- zwiększenie odległości między przewodami należącymi do różnych obwodów do 30 cm i większej oraz ograniczenie długości, na której przewody są ułożone obok siebie;
- zastosowanie kilku przewodów dwużyłowych zamiast jednego wielożyłowego o wspólnej żyle powrotnej;
- galwaniczne rozdzielenie obwodów wtórnych;
- zastosowanie przewodów ekranowanych oraz ekranowanie niektórych, szczególnie wrażliwych aparatów;
- ograniczenie wartości szczytowych oraz stromości narastania przepięć, przez zastosowanie ograniczników przepięć;
- wyrównanie potencjału, przez połączenie ze sobą – przewodem o bardzo małej impedancji – przewodzących osłon aparatów i części przewodzących obcych, między którymi mogą wystąpić różnice potencjałów (napięć);
- zastosowanie filtrów szerokopasmowych ograniczających rozprzestrzenianie się zakłóceń o wielkiej częstotliwości;
- zastosowanie przekładników pośredniczących prądowych i napięciowych.

Przykładowo we wtórnych obwodach przekładników w stacji napowietrznej (rys. 1.7) zasadne jest zastosowanie następujących rozwiązań szczegółowych:

- ułożenie przewodów równolegle, możliwie blisko uziemionego przewodu wyrównawczego;
- dwustronne połączenie ekranów kabli sterujących z uziemioną szyną wyrównawczą lub bezpośrednio z uziomem;
- prowadzenie przewodu wyrównawczego wzdłuż przewodów (kabli);



Rys. 1.7. Szkic przedstawiający sposób wykonania uziemień i połączeń wyrównawczych urządzeń wysokiego napięcia i obwodów wtórnych w stacji elektroenergetycznej napowietrznej, wg [36]
1 – układ uziomowy stacji, *2* – uziom fundamentowy budynku nastawni, *3* – przekładniki, *4* – kable ekranowane obwodów wtórnych, *5* – połączenia wyrównawcze, *6* – szafka

– połączenie ze sobą i uziomem, w kilku miejscach, przewodzących elementów budynków i obudów (osłon) urządzeń;
– zastosowanie światłowodów dla przekazywania informacji o wartościach różnych wielkości elektrycznych.

Uzwojenia wtórne przekładników powinny być uziemione tylko w jednym miejscu.

Możliwość wystąpienia różnych zakłóceń, głównie elektromagnetycznych, należy uwzględnić w fazie koncepcji i projektowania obiektów elektroenergetycznych; wtedy też należy poszukiwać właściwych sposobów ich eliminacji lub ograniczenia. Istnieją programy komputerowe pozwalające na obliczenie intensywności różnorodnych zakłóceń, takich jak przepięcia atmosferyczne i łączeniowe w obwodach głównych oraz wtórnych, oddziaływanie urządzeń elektroenergetycznych w normalnych warunkach pracy oraz w przypadkach różnych zakłóceń w obwodach głównych na kable telekomunikacyjne i wynikające stąd deformacje przekazywanych nimi sygnałów. Rzeczywisty poziom zakłóceń elektromagnetycznych należy sprawdzić po wybudowaniu obiektu, podczas pracy urządzeń w różnych warunkach technicznych oraz po wygenerowaniu różnorodnych zakłóceń za pomocą symulatora impulsów elektromagnetycznych, generatorów udarów prądowych i napięciowych oraz innych.

2

ZWARCIA W UKŁADACH ELEKTROENERGETYCZNYCH

2.1. Wiadomości ogólne

Zwarcie jest zakłóceniem polegającym na połączeniu bezpośrednim, przez łuk elektryczny lub przewodnik o bardzo małej impedancji (rezystancji) jednego lub więcej punktów układu elektroenergetycznego należących do różnych faz między sobą lub z ziemią.

Zwarcie powstaje w wyniku uszkodzenia lub zniszczenia izolacji oddzielającej różne punkty układu elektroenergetycznego między sobą oraz ziemią. Może być spowodowane przyczynami pochodzenia elektrycznego, takimi jak:

– przepięcia atmosferyczne i łączeniowe,
– długotrwałe przeciążenia,
– pomyłki łączeniowe,

oraz nielektrycznego, w tym głównie:

– zawilgoceniem izolacji,
– zanieczyszczeniem izolatorów,
– nadmiernym zbliżeniem przewodów,
– uszkodzeniami mechanicznymi słupów, izolatorów, kabli,
– wadami fabrycznymi urządzeń,
– obecnością zwierząt,
– działaniem celowym.

W zależności od liczby punktów, w których wystąpiło zwarcie, rozróżnia się zwarcia jednomiejscowe (pojedyncze) oraz wielomiejscowe (podwójne, potrójne).

W układach elektroenergetycznych trójfazowych mogą występować zwarcia:

a) *symetryczne*:
   – trójfazowe,
   – trójfazowe z ziemią,
b) *niesymetryczne*:
   – jednofazowe, w przypadku połączenia jednej fazy z ziemią, przewodem neutralnym lub ochronnym (N, PE, PEN),
   – dwufazowe bezpośrednie,
   – dwufazowe przez ziemię.

Częstość występowania różnych rodzajów zwarć nie jest jednakowa. Nie są jednakowe również wartości prądów zwarciowych. Zwarcia trójfazowe stanowią jedynie ok. 5% wszystkich zwarć. Ponieważ prądy zwarciowe przy takich zwarciach są na ogół największe, przeto przekroje przewodów i parametry aparatów elektrycznych dobiera się i sprawdza na warunki zwarciowe występujące przy zwarciach trójfazowych.

Bezpośrednim skutkiem zwarć jest przepływ prądów zwarciowych o wartościach najczęściej wielokrotnie większych od prądów płynących w normalnych warunkach pracy urządzeń. Powoduje to wystąpienie znacznych sił elektrodynamicznych między częściami urządzeń przewodzącymi prąd oraz intensywne nagrzewanie się urządzeń i elementów stykających się z nimi. Napięcie między zwartymi elementami urządzeń jest równe zeru, lecz napięcie osłon urządzeń, w których wystąpiło zwarcie, względem ziemi lub innych uziemionych elementów urządzeń może osiągać znaczne wartości, niebezpieczne dla obsługi i osób przypadkowych mających kontakt z tymi urządzeniami.

Jeżeli wartości prądu zwarciowego przekraczają zdolność łączeniową łączników, dynamiczną i cieplną zwarciową wytrzymałość urządzeń, to może nastąpić ich uszkodzenie lub zniszczenie, czemu nierzadko towarzyszą wybuchy, pożary oraz wypadki z ludźmi. Wszystko to uzasadnia potrzebę, a nawet konieczność, wyznaczania wartości różnych charakterystycznych wielkości prądu zwarciowego.

Dokładne obliczenia prądów zwarciowych są bardzo trudne ze względu na ciągłe zmiany zachodzące w systemie elektroenergetycznym, polegające głównie na zmianach układów połączeń, liczby i parametrów włączonych urządzeń wytwarzających, przesyłających i przetwarzających energię elektryczną. Wymaga to wprowadzenia założeń upraszczających. W rozważaniach praktycznych metody obliczeń obarczone błędem nie większym niż 10% należy uważać za zadowalająco dokładne.

Do celów projektowania i związanego z tym doboru urządzeń elektrycznych ze względu na wymaganą zdolność łączeniową łączników oraz cieplne i dynamiczne działanie prądu zwarciowego, istotne są obliczenia:

– w układach o skutecznie uziemionym punkcie neutralnym – zwarć trójfazowych oraz jednofazowych,

– w układach o izolowanym punkcie neutralnym oraz w układach kompensowanych lub uziemionych przez rezystor ograniczający – zwarć trójfazowych.

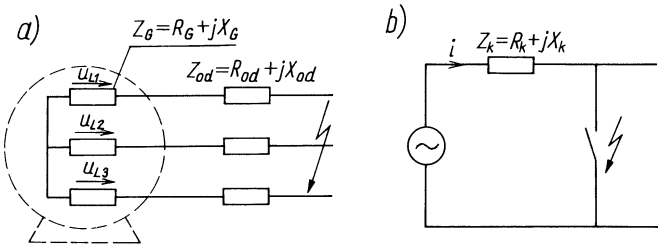
W obliczeniach należy uwzględnić przewidywaną rozbudowę systemu i taką jego konfigurację, przy której występują największe wartości prądów zwarciowych. Nie należy jednak brać pod uwagę układów połączeń, przy których prądy zwarciowe mogą osiągać szczególnie duże wartości, lecz trwają krótko, np. w czasie przełączeń eksploatacyjnych. Nie należy też uwzględniać wpływu silników rezerwowych.

Do celów zabezpieczeń i automatyki elektroenergetycznej są często potrzebne informacje o najmniejszych wartościach prądów zwarciowych podczas zwarć symetrycznych (trójfazowych) oraz niesymetrycznych, a zwłaszcza jednofazowych zwarć doziemnych. Wartości najmniejsze oblicza się przyjmując minimalną, lecz praktycznie możliwą liczbę źródeł energii oraz dróg jej przepływu w układzie. Należy uwzględnić przewidywany sposób eksploatacji, np. możliwość sekcjonowania szyn zbiorczych, wyłączenia poszczególnych transformatorów pracujących równolegle, wydzielenia części źródeł na osobne systemy szyn zbiorczych. W obliczeniach najmniejszych wartości prądu zwarciowego pomija się wpływ silników oraz zakłada „najbardziej odległe”, lecz prawdopodobne miejsce zwarcia, przy którym impedancja obwodu zwarciowego jest największa.

2.2. Przebiegi prądu zwarciowego

Zwarcie jest związane z nagłą zmianą parametrów obwodu elektrycznego, a przede wszystkim z wielokrotnym zmniejszeniem się impedancji obwodu zewnętrznego względem źródeł energii. W schematach zastępczych obwodów zwarciowych oprócz napięcia źródłowego występują reaktancje indukcyjne i rezystancje, przy czym rezystancje zwartych obwodów wysokiego napięcia – najczęściej wielokrotnie mniejsze od reaktancji – są w obliczeniach praktycznych często pomijane. Jedynie w przypadkach zwarć jednofazowych w sieciach o małym prądzie zwarcia doziemnego istotną rolę odgrywają pojemności sieci, a w sieciach niskiego napięcia – rezystancje.

Schematy zastępcze obwodu zwartego zależą od rodzaju zwarcia. Najprostszym przypadkiem, dobrze ilustrującym przebiegi prądu zwarciowego, jest zwarcie symetryczne (rys. 2.1a). W rozważaniach układ trójfazowy można zastąpić układem jednofazowym (rys. 2.1b). Przebiegi napięć i prądów przemiennych (okresowych) w pozostałych fazach są takie same, jedynie przesunięte o $2\pi/3$ i $4\pi/3$ w stosunku do przebiegów wyznaczonych w układzie jednofazowym. Składowe nieokresowe prądów w pozostałych fazach są różne, a suma ich wartości chwilowych jest równa zeru.



Rys. 2.1. Schematy zastępcze obwodów zwarciowych: a) trójfazowego; b) jednofazowego
Z_G, Z_{od} – impedancje źródła zasilania i obwodu odbiorczego, Z_k – impedancja wypadkowa

W chwili zamknięcia wyłącznika w obwodzie, do którego jest doprowadzone napięcie sinusoidalne o wartości chwilowej

$$u = U_m \sin(\omega t + \psi) \tag{2.1}$$

popłynie prąd o wartości chwilowej i, spełniający równanie różniczkowe

$$U_m \sin(\omega t + \psi) = Ri + L\frac{\mathrm{d}i}{\mathrm{d}t} \tag{2.2}$$

gdzie: U_m – amplituda napięcia, ω – pulsacja, ψ – kąt fazowy napięcia w chwili zamknięcia obwodu, R, X – rezystancja i reaktancja obwodu zwartego.

Równanie to ma rozwiązanie

$$i = I_m\left[\sin(\omega t + \psi - \varphi) - \mathrm{e}^{-\frac{R}{L}t}\sin(\psi - \varphi)\right] \tag{2.3}$$

w którym:

$$I_m = \frac{U_m}{\sqrt{R^2 + (\omega L)^2}} \tag{2.4}$$

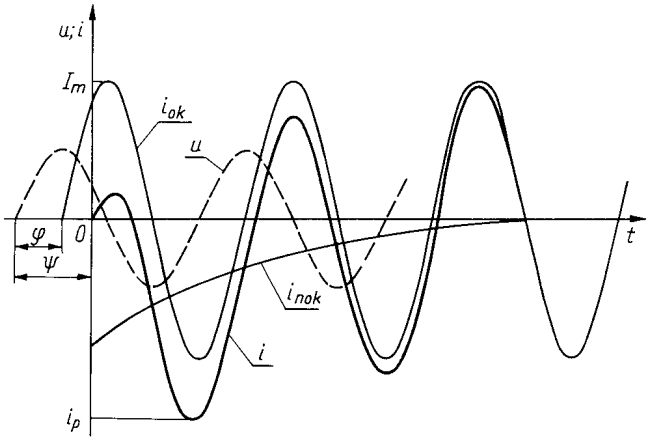
$$\varphi = \mathrm{arctg}\frac{X}{R}$$

przy czym I_m – amplituda składowej okresowej prądu.

Wartość prądu w obwodzie z indukcyjnością nie może się zmienić nagle, gdyż pociągałoby to za sobą nagłą zmianę skojarzonego z nią strumienia magnetycznego, co nie jest możliwe ze względu na prawo bezwładności magnetycznej. Z zależności (2.3) wynika, że prąd zwarciowy (rys. 2.2) ma dwie składowe: i_{ok} zmieniającą się okresowo z częstotliwością napięcia (*składowa okresowa prądu*) oraz i_{nok} przejściową, zanikającą według krzywej wykładniczej (*składowa nieokresowa prądu*), przy czym

$$i_{\mathrm{ok}} = I_m \sin(\omega t + \psi - \varphi) \tag{2.5}$$

$$i_{\mathrm{nok}} = I_m \mathrm{e}^{-\frac{R}{L}t}\sin(\psi - \varphi) \tag{2.6}$$



Rys. 2.2.
Przebiegi przejściowe prądu zwarciowego
i_{ok} – składowa okresowa, i_{nok} – składowa nieokresowa, i – prąd wypadkowy, i_p – prąd udarowy, u – napięcie

Wartość składowej nieokresowej zależy od parametrów obwodu zwartego oraz od chwili, w której wystąpiło zwarcie (od wartości kąta ψ). Szybkość zanikania tej składowej zależy od stałej czasowej L/R, czyli od rezystancji i reaktancji obwodu. Największa wartość bezwzględna składowej nieokresowej, równa wartości I_m, występuje wtedy, gdy

$$\sin(\psi - \varphi) = \pm 1 \tag{2.7}$$

tj. gdy

$$\psi = \frac{\pi}{2} + \varphi \quad \text{lub} \quad \psi = \frac{3}{2}\pi + \varphi$$

W obwodach wysokonapięciowych jest zwykle spełniony warunek $X \gg R$, skąd $\varphi \approx \pi/2$. Największe wartości składowej nieokresowej prądu oraz największe chwilowe wartości prądu zwarciowego występują więc w przypadkach, w których kąt $\psi = 0$ lub π, tj. dla zwarć powstających w chwili, gdy wartość chwilowa napięcia jest równa zeru. Prawdopodobieństwo powstania zwarcia w tym momencie powodowane zniszczeniem izolacji jest wtedy najmniejsze.

Największa wartość chwilowa prądu (*prąd udarowy*) wystąpi w chwili, w której znak amplitudy składowej okresowej będzie zgodny ze znakiem składowej nieokresowej, tj. po czasie t_p spełniającym równanie

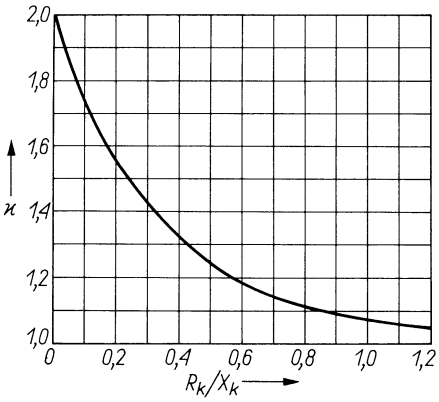
$$\sin(\omega t_p + \psi - \varphi) = -1 \tag{2.8}$$

Przy założeniu $\psi = \pi$, $\varphi = \pi/2$ otrzymuje się

$$\omega t_p = \pi$$

a z tego, dla $f = 50$ Hz i $\omega = 2\pi f \ \frac{1}{\text{s}}$

$$t_p = 0{,}01 \text{ s}$$



Rys. 2.3.
Zależność współczynnika udaru κ od ilorazu R_k/X_k

Bezwzględna wartość prądu udarowego jest określona równaniem

$$i_p = \sqrt{2}\kappa I_m \tag{2.9}$$

w którym *współczynnik udaru* (rys. 2.3)

$$\kappa = 1 + \mathrm{e}^{-\frac{R}{L}\cdot 0{,}01} \tag{2.10}$$

W układach trójfazowych przy zwarciu trójfazowym prądy w poszczególnych fazach są określone następującymi równaniami:

$$\left.\begin{aligned}
i_{L1} &= I_m\left[\sin(\omega t + \psi - \varphi) - \mathrm{e}^{-\frac{R}{L}t}\sin(\psi - \varphi)\right] \\
i_{L2} &= I_m\left[\sin\left(\omega t + \psi - \varphi - \frac{2}{3}\pi\right) - \mathrm{e}^{-\frac{R}{L}t}\sin\left(\psi - \varphi - \frac{2}{3}\pi\right)\right] \\
i_{L3} &= I_m\left[\sin\left(\omega t + \psi - \varphi - \frac{4}{3}\pi\right) - \mathrm{e}^{-\frac{R}{L}t}\sin\left(\psi - \varphi - \frac{4}{3}\pi\right)\right]
\end{aligned}\right\} \tag{2.11}$$

Składowe okresowe prądu zwarciowego są takie same we wszystkich fazach, jedynie są przesunięte o kąt $2\pi/3$ i $4\pi/3$ względem siebie. Składowe nieokresowe prądu w poszczególnych fazach są różne. Suma składowych nieokresowych prądów wszystkich faz w dowolnej chwili t jest równa zeru. Największe chwilowe wartości prądów w poszczególnych fazach nie są jednakowe.

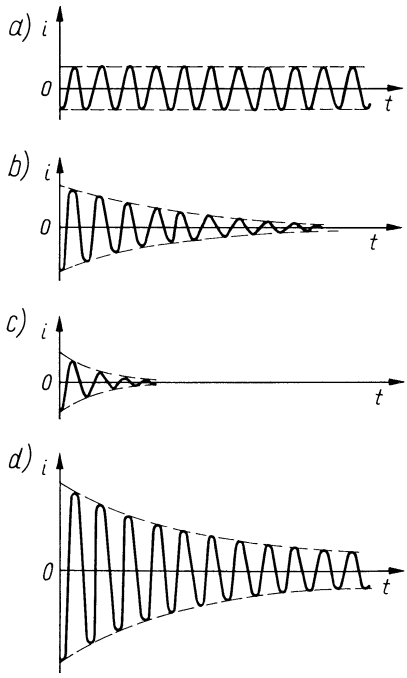
Prąd obciążenia przed zwarciem nie wpływa na wartość amplitudy i przebieg składowych okresowych prądu. Wpływa natomiast na wartość składowej nieokresowej prądu. Wartość prądu nieokresowego fazy L1, z uwzględnieniem prądu obciążenia I_B, jest wyrażona wzorem

$$i_{\mathrm{nok}} = -\left[I_m \sin(\psi - \varphi) - I_{Bm}\sin(\psi - \varphi_n)\right]\mathrm{e}^{-\frac{R}{L}t} \tag{2.12}$$

przy czym: I_{Bm} – amplituda prądu obciążenia, φ_n – kąt przesunięcia między prądem obciążenia a napięciem.

Analogiczne równania, uwzględniające przesunięcie napięcia między fazami, opisują składowe nieokresowe prądu zwarciowego w pozostałych fazach. W obliczeniach praktycznych wpływ prądu obciążenia na przebieg prądu zwarciowego jest najczęściej pomijany, gdyż jego wartość jest przeważnie wielokrotnie mniejsza od wartości prądu zwarciowego.

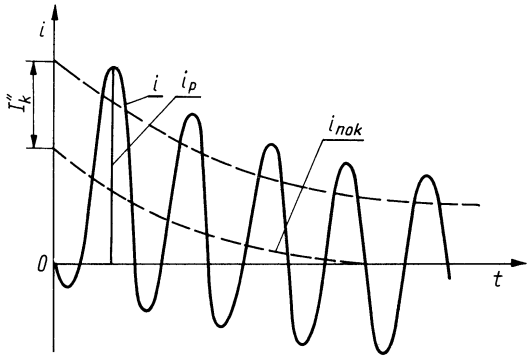
W rzeczywistych obwodach zwarciowych z generatorami synchronicznymi wartość skuteczna składowej okresowej w stanie przejściowym nie jest stała. Jest największa w chwili $t = 0$ i maleje wraz z upływem czasu do pewnej wartości ustalonej. Jest to spowodowane zjawiskami elektromagnetycznymi występującymi w generatorach. W uzwojeniu wzbudzenia i uzwojeniach tłumiących wirnika pojawiają się, po wystąpieniu zwarcia, zanikające składowe nieokresowe prądu, które swoimi strumieniami magnetycznymi indukują w tworniku prądy okresowe o pulsacji ω i zanikającej amplitudzie (rys. 2.4).



Rys. 2.4.
Przebiegi składowych okresowych prądu zwarciowego:
a) ustalonej; b) przejściowej głównej; c) przejściowej wstępnej; d) składowej okresowej całkowitej

Składowa prądu zwarciowego powstająca w wyniku oddziaływania uzwojenia wzbudzenia jest nazywana *składową okresową główną*, natomiast składowa powstająca w wyniku oddziaływania uzwojeń tłumiących – *składową wstępną*. Przebieg prądu zwarciowego z uwzględnieniem zmian składowej okresowej prądu przedstawiono na rys. 2.5.

W przypadkach zwarć bliskich źródeł zasilania (generatorów, dużych silników) udział składowej okresowej przejściowej w prądzie początkowym jest duży i nie może być pominięty w obliczeniach.



Rys. 2.5.
Przebieg prądu zwarciowego w jednej fazie obwodu zwarciowego z uwzględnieniem zmian składowej okresowej prądu
I_k'' – prąd początkowy (wartość skuteczna składowej okresowej w chwili $t = 0$), i_{nok} – składowa nieokresowa, i_p – prąd udarowy

Przy zwarciach odległych od źródeł zasilania, za które można uważać zwarcia na innym poziomie napięć niż generatorowe (zwarcie za transformatorem), udział składowej okresowej przejściowej w prądzie początkowym jest zwykle niewielki i może być pominięty.

2.3. Metoda PNE obliczania prądów zwarciowych

2.3.1. Wyjaśnienia ogólne

W celu doboru urządzeń elektroenergetycznych do warunków zwarciowych jest obecnie powszechnie stosowana metoda obliczeń podana w normie PN-EN 60909-0:2002 „Prądy zwarciowe w sieciach trójfazowych prądu przemiennego. Część 0: Obliczanie prądów”. Jest to tzw. norma uznaniowa z angielskim tekstem w polskich okładkach. Jest tłumaczeniem publikacji IEC nr 909 z 1988 r. Publikacja ta była też podstawą opracowania analogicznych norm również w innych krajach, m.in. w Niemczech, gdzie jako norma DIN VDE 102 obowiązuje od 01.01.1990 r.

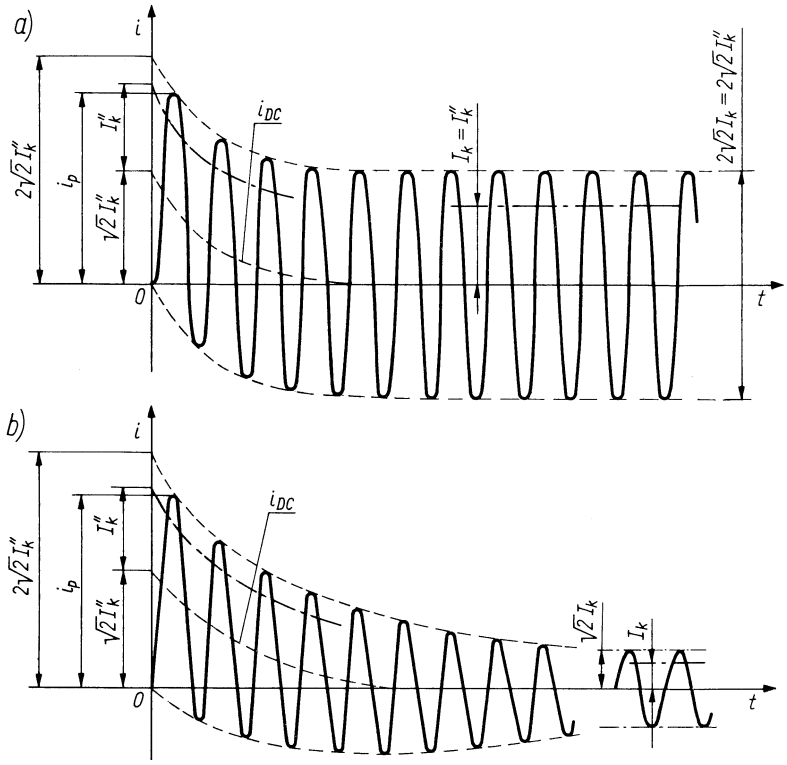
Podstawową wielkością, jaką wyznacza się w tej metodzie obliczeń, jest *prąd początkowy* I_k'', którego wartość jest równa wartości skutecznej składowej okresowej prądu zwarciowego w chwili $t = 0$. Inne charakterystyczne wielkości prądu zwarciowego, określające wymagania dotyczące cieplnej i dynamicznej wytrzymałości zwarciowej urządzeń oraz zdolności łączeniowej łączników, są powiązane z prądem początkowym I_k'' prostymi zależnościami.

2.3.2. Zwarcia odległe od generatorów

2.3.2.1. Obliczanie zwarć symetrycznych trójfazowych

Za *zwarcia odległe* uznaje się zwarcia w sieciach, w których w czasie trwania nie występują zmiany napięcia źródeł zasilania powodujących przepływ prądu zwarciowego ani znaczące zmiany impedancji parametrów obwodu zwarciowego. Przy takich założeniach prąd zwarciowy spodziewany jest sumą dwóch składowych (rys. 2.6a):

– okresowej o stałej amplitudzie w czasie trwania zwarcia,
– nieokresowej i_{DC} o wartości początkowej $\sqrt{2}I_k''$ zanikającej wykładniczo do zera.



Rys. 2.6. Przebiegi prądu zwarciowego przy zwarciu: a) odległym od źródła zasilania; b) bliskim źródła zasilania

W obliczeniach praktycznych za zwarcie odległe od generatorów uznaje się zwarcie zasilane przez transformator, którego reaktancja (impedancja) jest co najmniej dwukrotnie większa od impedancji źródła zasilania obliczonej z zależności (2.22).

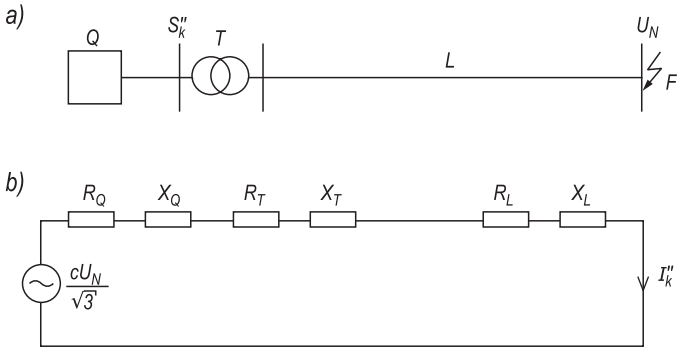
Tablica 2.1. Wartości współczynników napięciowych *c*, wg [52, 97]

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

Prąd zwarciowy początkowy I_k'' przy zwarciu trójfazowym zasilanym z pojedynczego źródła należy obliczać według wzoru

$$I_k'' = \frac{cU_N}{\sqrt{3}Z_k} = \frac{cU_N}{\sqrt{3}\sqrt{R_k^2 + X_k^2}} \tag{2.13}$$

w którym: c – współczynnik napięciowy (tabl. 2.1) równy stosunkowi napięcia, jakie może występować w miejscu zwarcia przed pojawieniem się zwarcia, do napięcia znamionowego U_N; Z_k – impedancja zwarciowa zgodna w miejscu zwarcia ($Z_k = Z_1$); R_k – suma rezystancji zgodnych (R_{k1}) elementów obwodu zwarciowego połączonych szeregowo (rys. 2.7); X_k – suma reaktancji zgodnych elementów obwodu zwarciowego połączonych szeregowo (rys. 2.7). Rezystancje mogą być pominięte, jeżeli jest spełniony warunek $R_k < 0{,}3X_k$.

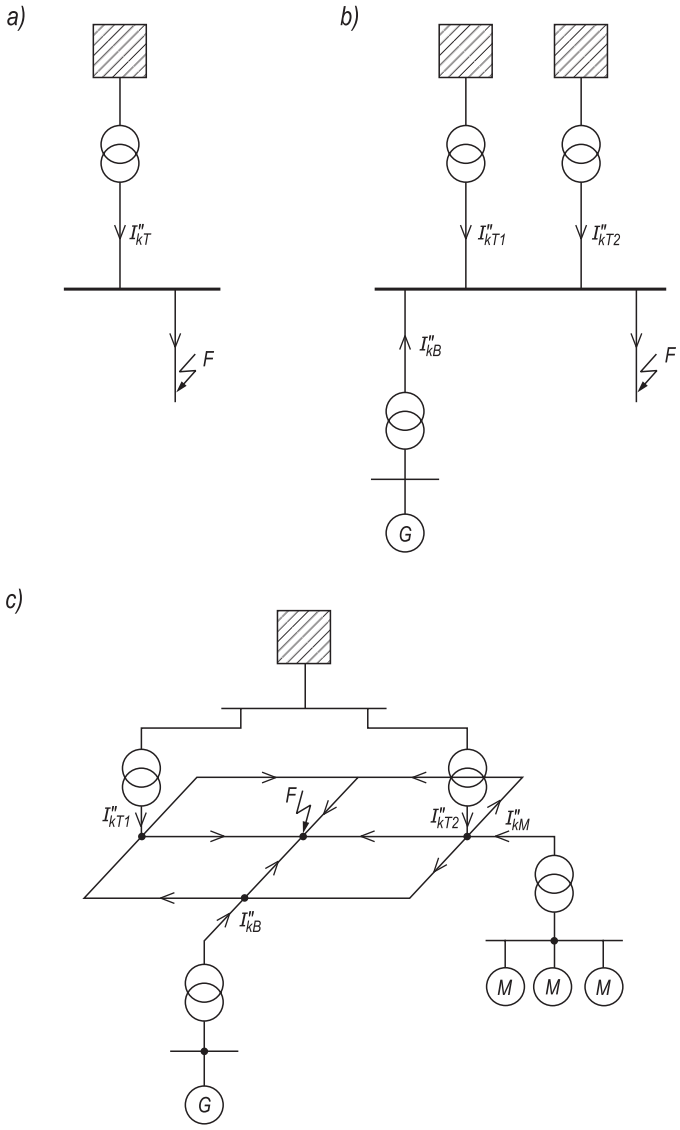


Rys. 2.7. Uproszczony schemat systemu elektroenergetycznego (a) oraz układ połączeń (b) rezystancji *R* i reaktancji *X* poszczególnych elementów systemu, dotyczący obliczeń prądu zwarciowego przy zwarciu symetrycznym trójfazowym
Q – zastępcze źródło zasilania o mocy zwarciowej S_k'', *T* – transformator, *L* – linia elektroenergetyczna

Największą chwilową wartość prądu zwarciowego nazywa się *prądem udarowym* i_p. Oblicza się go według wzoru

$$i_p = \sqrt{2}\kappa I_k'' \tag{2.14}$$

przy czym κ – współczynnik udaru, którego wartość zależy od ilorazu R_k i X_k obwodu zwarciowego (rys. 2.3).



Rys. 2.8.
Różne układy sieci warunkujące sposób obliczania prądów zwarciowych: a) zasilana jednostronnie; b) zasilana z wielu źródeł; c) zamknięta (kratowa)

Współczynnik ten może być też obliczony według zależności

$$\kappa \approx 1{,}02 + 0{,}98\mathrm{e}^{-3R_k/X_k} \tag{2.15}$$

W sieciach zasilanych z kilku (N) niezależnych źródeł (rys. 2.8b, c) prąd zwarciowy początkowy w miejscu zwarcia wyznacza się jako sumę geometryczną prądów zwarciowych poszczególnych gałęzi, obliczonych jak dla przypadku zasilania z pojedynczego źródła

$$I''_k = \sum_{i=1}^{N} \underline{I}''_{ki} \tag{2.16}$$

W większości przypadków prądy I''_{ki} mają zbliżone kąty fazowe, tak że prąd zwarciowy I''_k może być obliczony jako suma algebraiczna prądów poszczególnych gałęzi.

Podobnie udarowy prąd zwarciowy w miejscu zwarcia jest sumą prądów i_{pi} w poszczególnych gałęziach

$$i_p = \sum_{i=1}^{N} i_{pi} \tag{2.17}$$

W **sieciach zamkniętych** (rys. 2.8c) prąd zwarciowy początkowy I''_k oblicza się również według wzoru (2.13). Rzeczywisty układ impedancji, zawierający elementy połączone szeregowo, równolegle, w gwiazdę i trójkąt należy przekształcić zgodnie z prawami elektrotechniki w jeden element $Z_k = Z_{k1}$ stanowiący rezystancję R_k i reaktancję X_k, a w układach wysokonapięciowych, w których $X_k \gg R_k$, jedynie reaktancję X_k.

Udarowy prąd zwarciowy i_p w sieciach zamkniętych oblicza się według wzoru (2.17). Prąd do miejsca zwarcia płynie różnymi gałęziami, o różnej wartości ilorazu R_{ki} i X_{ki}, od którego zależą wartości współczynników udaru κ_i. W zależności od pożądanej dokładności obliczeń współczynnik κ można wyznaczyć trzema metodami: A, B i C.

W **metodzie A** współczynnik udaru wyznacza się z rys. 2.3 lub według zależności (2.15). Do obliczeń należy przyjąć tę gałąź, dla której stosunek R do X jest najmniejszy spośród wszystkich gałęzi. W obliczeniach uwzględnia się te gałęzie, przez które przepływa łącznie co najmniej 80% prądu zwarciowego. Metoda A wyznaczania współczynnika κ może być stosowana w przypadkach, w których nie wymaga się dużej dokładności obliczeń.

W **metodzie B** współczynnik udaru κ oblicza się według wzoru

$$\kappa = 1{,}15\kappa_b \tag{2.18}$$

w którym 1,15 jest współczynnikiem bezpieczeństwa uwzględniającym założenie upraszczające wprowadzone przy przekształcaniu sieci zamkniętych i w obliczeniach impedancji zespolonej $Z_k = R_k + \mathrm{j}X_k$ w miejscu zwarcia F.

Współczynnik κ_b wyznacza się z rys. 2.3 dla obliczonej wartości R_k/X_k, przy czym reaktancja X_k ma być wyliczona przy częstotliwości sieci 50 Hz.

Niezależnie od wyników obliczeń wartości współczynnika udaru κ, wykonanych według zależności (2.18), nie należy przyjmować wartości większych niż 1,8 w sieciach niskiego napięcia oraz 2,0 w sieciach wysokiego napięcia.

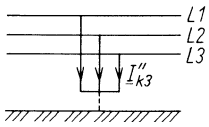
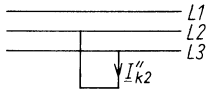
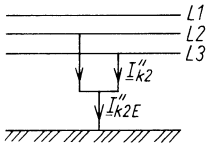
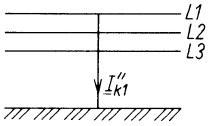
W **metodzie C** obliczania współczynnika udaru κ wyznacza się impedancję zastępczą $Z_c = R_c + \mathrm{j}X_c$ widzianą z miejsca zwarcia F, gdy zastępcze źródło napięcia o częstotliwości $f_c = 20$ Hz umieszczone w miejscu zwarcia jest jedynym w sieci. Przy tej częstotliwości otrzymuje się wartości rezystancji i reaktancji zastępczej sieci inne niż przy częstotliwości sieciowej $f = 50$ Hz. Współczynnik κ_c wyznacza się z rys. 2.3 dla

$$\frac{R}{X} = \frac{R_c f_c}{X_c f} = 0{,}4\frac{R_c}{X_c} \tag{2.19}$$

2.3.2.2. Zwarcia niesymetryczne dwufazowe i jednofazowe

Wzory do obliczania prądu początkowego w przypadkach zwarć różnego rodzaju zestawiono w tabl. 2.2. Występujące we wzorach wielkości Z_1, Z_2, Z_0 to impedancje odpowiednio składowej zgodnej, przeciwnej i zerowej obwodu zwarciowego, które należy obliczyć według zależności podanych w p. 2.4. Prądy udarowe wyznacza się z zależności (2.14), przy czym do wzoru należy wstawić wartość prądu początkowego I''_k właściwą dla danego rodzaju zwarcia. Wartość współczynnika udaru κ można przyjąć taką samą jak dla zwarcia trójfazowego.

Tablica 2.2. Wzory do obliczania prądu początkowego I''_k przy zwarciu symetrycznym i przy zwarciach niesymetrycznych

Rodzaj zwarcia	Szkic miejsca zwarcia	Prąd początkowy
Trójfazowe bez udziału ziemi lub z udziałem ziemi		$I''_{k3} = \dfrac{cU_N}{\sqrt{3}\lvert \underline{Z}_1 \rvert}$
Dwufazowe		$I''_{k2} = \dfrac{cU_N}{\lvert \underline{Z}_1 + \underline{Z}_2 \rvert}$
Dwufazowe doziemne		$I''_{k2E} = \dfrac{\sqrt{3}cU_N}{\left\lvert \underline{Z}_1 + \underline{Z}_0 + \underline{Z}_0 \dfrac{\underline{Z}_1}{\underline{Z}_2} \right\rvert}$
Jednofazowe doziemne lub do przewodu ochronnego (PE, PEN) w sieciach niskiego napięcia		$I''_{k1} = \dfrac{\sqrt{3}cU_N}{\lvert \underline{Z}_1 + \underline{Z}_2 + \underline{Z}_0 \rvert}$

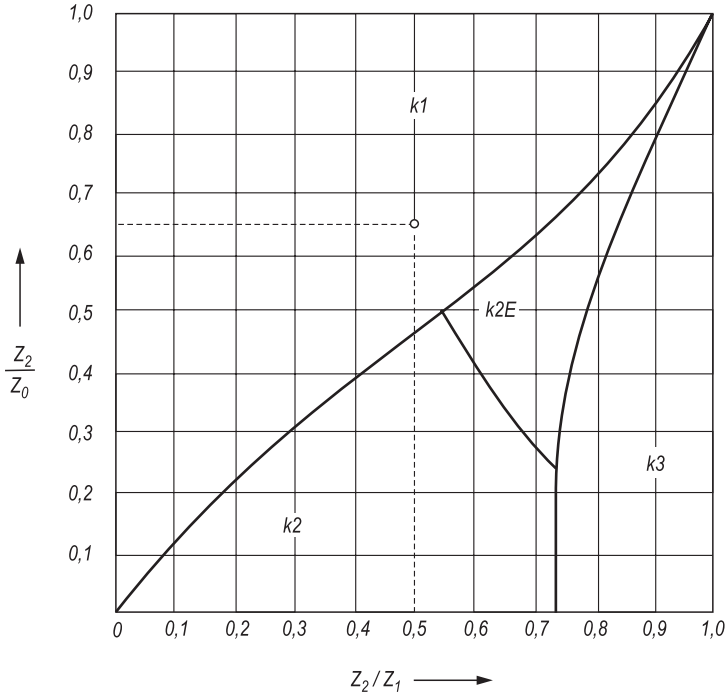
Z_1, Z_2, Z_0 – impedancje zwarciowe: zgodna (Z_1), przeciwna (Z_2) i zerowa (Z_0).

Jeżeli dysponujemy dokładnymi danymi dotyczącymi rezystancji i reaktancji poszczególnych składowych, to współczynnik udaru κ dla zwarcia jednofazowego może być wyznaczony z rys. 2.3 dla R/X wyrażonego zależnością

$$\frac{R}{X} = \frac{R_1 + R_2 + R_0}{X_1 + X_2 + X_0} \tag{2.20}$$

Impedancje składowej zgodnej Z_1 i przeciwnej Z_2 poszczególnych elementów systemu elektroenergetycznego są przeważnie jednakowe, natomiast impedancje Z_0 są najczęściej większe od Z_1. Z tego względu prądy zwarciowe przy zwarciach trójfazowych są z reguły największe. Są jednak przypad-

ki, gdy $Z_1 \neq Z_2$ oraz $Z_0 < Z_1$, co powoduje, że prądy przy zwarciach niesymetrycznych mogą być większe niż przy zwarciu trójfazowym. Relacje między poszczególnymi impedancjami obwodu zwarciowego (Z_2/Z_1 oraz Z_2/Z_0), przy których występują największe wartości prądów zwarciowych przy różnych rodzajach zwarć przedstawiono na rys. 2.9.



Rys. 2.9. Diagram wyznaczający rodzaj zwarcia, przy którym wartość prądu zwarciowego jest największa, w zależności od ilorazu impedancji składowej przeciwnej Z_2 i zgodnej Z_1 oraz przeciwnej Z_2 i zerowej Z_0
Symbole na poszczególnych płaszczyznach oznaczają poszukiwany rodzaj zwarcia (*E* – ziemia)
Zaczerpnięto z [36]

2.3.2.3. Najmniejsze wartości prądów zwarciowych

Do celów nastawień urządzeń automatyki elektroenergetycznej są zwykle konieczne dane dotyczące najmniejszych, praktycznie możliwych wartości prądów zwarciowych w przypadkach różnego rodzaju zwarć. W obliczeniach należy korzystać z zależności podanych w tabl. 2.2 przy następujących dodatkowych założeniach:

- wartość współczynnika napięciowego c dobiera się według tabl. 2.1 dla minimalnego prądu zwarciowego ($c = c_{\min}$),
- pomija się wpływ silników,
- ustala się taką konfigurację sieci, przy której występuje najmniejsza, lecz praktycznie możliwa liczba źródeł zasilania i linii zasilających miejsce zwarcia,