



Fundusze Europejskie
dla Rozwoju Społecznego



Rzeczpospolita
Polska

Dofinansowane przez
Unię Europejską



Politechnika Świętokrzyska
Wydział Elektrotechniki, Automatyki i Informatyki

Kierunek studiów:
Elektrotechnika

Kamil Paduszyński

Materiały dydaktyczne do przedmiotu

Aparaty elektryczne

opracowane w ramach realizacji Projektu
**„Dostosowanie kształcenia
w Politechnice Świętokrzyskiej do potrzeb
współczesnej gospodarki”**
FERS.01.05-IP.08-0234/23

Kielce, 2025



Politechnika Świętokrzyska
Kielce University of Technology

Projekt „Dostosowanie kształcenia w Politechnice Świętokrzyskiej do potrzeb współczesnej gospodarki” nr FERS.01.05-IP.08-0234/23



Spis treści

1. Wprowadzenie	4
1.1. Definicje, terminologia podstawowa i skróty	4
1.2. Klasyfikacja aparatów	5
1.2.1. Napięcie znamionowe	5
1.2.2. Funkcja	6
1.2.3. Rola aparatów w systemie elektroenergetycznym	6
2. Aparaty łączeniowe	8
2.1. Łączniki nN	8
2.1.1. Łączniki instalacyjne	8
2.1.2. Łączniki wtykowe	9
2.1.3. Łączniki warstwowe	10
2.1.4. Łączniki drążkowe	10
2.1.5. Przyciski	11
2.1.6. Styczniki	11
2.1.7. Łączniki bezstykowe	13
2.1.8. Wyłączniki instalacyjne	14
2.1.8.1. Wyłączniki nadprądowe	14
2.1.8.2. Różnicowoprądowe	19
2.1.9. Bezpieczniki	29
2.2. Łączniki SN i WN	32
2.2.1. Odłącznik	32
2.2.2. Rozłącznik	33
2.2.3. Wyłącznik	33
2.3. Zjawiska fizyczne związane z procesem łączenia	34
3. Przekładniki pomiarowe	44
3.1. Przekładniki prądowe	44
3.2. Przekładniki napięciowe	49
4. Literatura	51



Fundusze Europejskie
dla Rozwoju Społecznego



Rzeczpospolita
Polska

Dofinansowane przez
Unię Europejską



Materiały dydaktyczne objęte licencją Creative Commons BY 4.0.

Licencja dostępna pod adresem: <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>





1. Wprowadzenie

1.1. Definicje, terminologia podstawowa i skróty

Aparat elektryczny – urządzenie lub grupa urządzeń w wykonaniu elektromechanicznym, elektromagnetycznym, elektronicznym lub o budowie mieszanej, służące do pełnienia funkcji łączeniowych, pomiarowych, przeciwprzepięciowych, przeciwzwarciovych zarówno w warunkach roboczych oraz zakłóceń.

Napięcie znamionowe (U_n) – wartość skuteczna napięcia na jaką urządzenie zostało zbudowane i zdefiniowane przez producenta.

Odlącznik - może przerywać obwód elektryczny tylko w stanie beznapięciowym. Zapewnia widoczną przerwę w obwodzie i spełnia funkcję łącznika izolacyjnego.

Rozłącznik – łącznik zdolny do przerywania prądów roboczych linii.

Wyłącznik – łącznik zdolny do załączania, przewodzenia i wyłączania prądów roboczych, przeciążeniowych i zwarciovych.

Stycznik – łącznik posiadający tylko jedno położenie spoczynkowe styków ruchomych, zdolny do załączania, przewodzenia i wyłączania prądów w normalnych warunkach pracy obwodu, a także przy przewidywanych przeciążeniach w pracy roboczej. Styczniki służą do zdalnego sterowania i automatyzacji załączania odbiorników mocy np. silników czy urządzeń grzewczych.

Uziemnik – pozwala na szybkie i skuteczne uziemienie wszystkich faz obwodu, na którym mają być prowadzone prace.

Zakłócenie samogasnące - uszkodzenie izolacji, przy którym łuk gaśnie samoistnie bez konieczności wyłączenia urządzenia spod napięcia w celu odbudowy jego właściwości izolacyjnych.

Zakłócenie trwałe - zakłócenie urządzenia nie pozwalające na jego powtórne uruchomienie bez interwencji obsługi w miejscu zakłócenia

Zakłócenie, zwarcie przemijające - uszkodzenie izolacji, urządzenia naruszające chwilowo jego właściwości elektryczne, które zostają przywrócone samoistnie po krótkim czasie.

Zwarcie – przypadkowe lub celowe zmniejszenie impedancji pomiędzy dwoma lub więcej częściami przewodzącymi i/lub ziemią różnych potencjałów, które prowadzi do obniżenia napięcia pomiędzy nimi i przepływu prądu nieprzewidzianego w warunkach normalnych.



Zwarcie doziemne - zwarcie między przewodem fazowym, a ziemią w sieci z punktem neutralnym, uziemionym bezpośrednio lub w sieci z punktem neutralnym, uziemionym przez impedancję.

RCD – wyłącznik różnicowoprądowy

RCBO – wyłącznik różnicowoprądowy z wbudowanym zabezpieczeniem nadprądowym

RCCB – wyłącznik różnicowoprądowy bez wbudowanego zabezpieczenia nadprądowego

SPD – ogranicznik przepięć

1.2. Klasyfikacja aparatów

1.2.1. Napięcie znamionowe

Aparaty elektryczne możemy podzielić ze względu na ich pracę na określonym poziomie napięcia według poniższej tabeli:

Tabela 1. Klasyfikacja aparatów według napięcia znamionowego.

Napięcie	Zakres napięcia	Przykładowe urządzenia i zastosowanie
niskie (nN)	do 1 kV	wyłączniki różnicowoprądowe RCD, styczniki, rozłączniki, wyłączniki nadprądowe, rozdzielnice nN
średnie (SN)	od 1 do 60 kV	rozdzielnice SN, wyłączniki próżniowe, odłączniki i uziemniki SN, przekładniki SN, dławiki zwarciove
wysokie (WN)	od 60 do 200 kV	wyłączniki mocy, przekładniki WN, odłączniki, pola stacyjne WN
najwyższe (NN)	od 220 do 400 kV	rozdzielnie NN, łączniki NN



1.2.2. Funkcja

Podział funkcjonalny odzwierciedla rolę aparatu w obwodzie i determinuje jego podstawowe parametry znamionowe oraz kryteria badań typu.

- Aparaty łączeniowe:
 - wyłączniki (nN: wyłączniki instalacyjne, SN/WN: próżniowe, SF6), odłączniki, rozłączniki, styczniki, uziemniki
 - parametry kluczowe: zdolność łączeniowa, trwałość łączeniowa, selektywność i koordynacja zabezpieczeń
- Aparaty pomiarowe:
 - przekładniki prądowe i napięciowe, liczniki energii
 - parametry kluczowe: klasa dokładności, obciążalność wtórna, bezpieczeństwo zwarcia, moc probiercza
- Aparaty zabezpieczające:
 - bezpieczniki, wyłączniki nadprądowe, wyłączniki różnicowoprądowe (RCD/RCBO), ograniczniki przepięć (SPD), przekaźniki zabezpieczeniowe (prądowe, ziemnozwarciowe, różnicowe, odległościowe)
 - parametry kluczowe: charakterystyki czasowo-prądowe, prąd i energia, poziomy ochrony U_p (dla SPD), czułość i czasy wyzwalania, algorytmy i nastawy przekaźników

W praktyce wiele urządzeń pełni równolegle funkcje łączeniowe i zabezpieczeniowe lub pomiarowe i zabezpieczeniowe.

1.2.3. Rola aparatów w systemie elektroenergetycznym

Aparaty elektryczne są kluczowym elementem systemu elektroenergetycznego. Sterują przepływem mocy, mierzą i nadzorują wielkości elektryczne oraz selektywnie eliminują zakłócenia, aby utrzymać ciągłość zasilania i bezpieczeństwo ludzi oraz urządzeń. Ich działanie obejmuje stany normalne i awaryjne, łącząc funkcje łączeniowe, zabezpieczeniowe, pomiarowe i automatyki w spójnej architekturze wytwarzania, przesyłania i dystrybucji energii.

Sterowanie i łączenie

Aparaty łączeniowe (wyłączniki, rozłączniki, odłączniki, uziemniki, styczniki) kształtują topologię sieci i obwodów, umożliwiając bezpieczne manewry łączeniowe w eksploatacji planowej oraz szybkie odcięcie uszkodzonych odcinków przy zwarciach i



przeciążeniach. W stacjach elektroenergetycznych urządzenia te tworzą pola rozdzielcze, w których realizuje się selektywne załączanie i wyłączanie odpływów oraz rekonfigurację pracy węzłów sieci.

Zabezpieczenia i selektywność

Zabezpieczenia nadprądowe, różnicowoprądowe, odległościowe i ziemnozwarciowe ograniczają skutki uszkodzeń, minimalizując energię zwarcia i obszar wyłączenia, co chroni ludzi, urządzenia i instalacje. Sелеktywna koordynacja charakterystyk urządzeń zapewnia, że zadziała możliwie najbliższy zabezpieczeniu aparat, utrzymując zasilanie nienaruszonych części instalacji i podnosząc niezawodność.

Pomiar i nadzór

Przekładniki prądowe i napięciowe skalują i izolują sygnały dla przekaźników, liczników i analizatorów jakości energii, umożliwiając bezpieczny i dokładny pomiar oraz rejestrację stanów pracy i zakłóceń. Dane pomiarowe stanowią podstawę sterowania i diagnostyki, w tym analizy jakości energii, co wspiera działania prewencyjne i optymalizację pracy sieci.

Automatyzacja stacji i cyfryzacja

Zintegrowane urządzenia elektroniczne oraz systemy automatyki stacyjnej realizują ochronę, sterowanie, blokady, synchronizację i sekwencje łączeniowe z interoperacyjnością i wymianą danych po magistralach procesowych i stacyjnych.

Jakość energii i kompatybilność

Ograniczniki przepięć oraz układy poprawy jakości energii ograniczają udary atmosferyczne i łączeniowe oraz skutki zaburzeń, redukując ryzyko uszkodzeń odbiorników i przestojów. Dławiki i inne elementy reakcyjne ograniczają prądy zwarciovowe.

Niezawodność i ciągłość zasilania

Poprawnie dobrane i skoordynowane aparaty minimalizują liczbę wyłączeń, skracają czas trwania przerw i ograniczają zasięg oddziaływania awarii, co wspiera wymagania operatorów systemu co do ciągłości dostaw. Sелеktywność (częściowa lub całkowita) i koordynacja zabezpieczeń w szeregu stopni zasilania stanowią podstawowy mechanizm utrzymania pracy nieuszkodzonych fragmentów instalacji.

Integracja źródeł i rozwój sieci

Rola aparatów rośnie wraz z integracją OZE i rozproszonych źródeł, które wymagają dynamicznych funkcji zabezpieczeniowych, pomiarowych i regulacyjnych do stabilnej współpracy z systemem. Automatyzacja i wymiana danych w czasie rzeczywistym umożliwiają adaptacyjne algorytmy ochrony i sterowania, zwiększając elastyczność i odporność systemu elektroenergetycznego.



2. Aparaty łączeniowe

2.1. Łączniki nN

Łączniki możemy podzielić na ręczne oraz automatyczne. Łączniki ręczne: instalacyjne, wtykowe, warstwowe, drążkowe, przyciski. Automatyczne: styczniki, łączniki bezstykowe, wyłączniki i bezpieczniki.

2.1.1. Łączniki instalacyjne

Łączniki instalacyjne wykorzystywane są w instalacjach elektrycznych domowych oraz przemysłowych. Ze względu na montaż rozróżnia się podtynkowe montowane w puszkach podtynkowych, natynkowe oraz natynkowo-wtynkowe. W tabeli 1 przedstawione zostały symbole graficzne wykorzystywane w projektowaniu instalacji elektrycznych.

Tabela 2. Symbole łączników instalacyjnych. [5]

symbol ogólny	
z podświetleniem	
jednobiegunowy	
dwubiegunowy	
schodowy	
krzyżowy	
grupowy	
szeregowy	
ściemniacz	



Stosowane głównie do załączania oraz wyłączania oświetlenia w instalacjach domowych.

2.1.2. Łączniki wtykowe

Służą do podłączania odbiorników przenośnych, poprzez wpięcie wtyku do gniazda. W tabeli 3 pokazano przykładowe symbole wykorzystywane w projektowaniu instalacji elektrycznych.

Tabela 3. Przykładowe symbole łączników wtykowych. [5]

symbol ogólny	
gniazdo podwójne z uziemieniem i ochroną IP 44	
gniazdo podwójne z uziemieniem	
gniazdo telekomunikacyjne	
gniazdo trójfazowe	
zestaw: gniazdo potrójne, łącze TV i Ethernet	

W oznaczeniach często pojawiają się litery związane z przeznaczeniem gniazda np.

- P – pralka,
- L – lodówka,
- Z – zmywarka,
- O – okap,
- B – balkon
- TV - telewizja
- RJ45 lub LAN – Ethernet
- TP – telefon
- FX – fax

2.1.3. Łączniki warstwowe

[Tekst alternatywny. Obraz przedstawia symbol graficzny wykorzystywany w schematach elektrycznych dla łącznika obrotowego. Jest to pozioma linia przerywana ukośną linią, która tworzy symbol styku zwrotnego. Nad ukośną linią, w miejscu jej przecięcia z poziomą, widoczna jest krótka przerywana linia zakończona poprzeczką w górnej części.]



Rys. 1. Symbol łącznika obrotowego bez powrotu samoczynnego. [5]

Konstrukcja łącznika warstwowego opiera się na izolowanych przegrodach z ruchomymi i nieruchomymi stykami szczękowymi, których połączenie następuje przez obrót osi z pokrętkiem sterującym. Przykładem takiego łącznika jest przełącznik wielopozycyjny, pozwalający na ręczne przełączanie pomiędzy różnymi układami sterowania np. gwiazda/trójkąt czy oświetlenia. Stosowane również w rozdzielnicach jako rozłączniki. Łączniki te nie wyłączają prądów zwarciovych.

2.1.4. Łączniki drążkowe

Wśród łączników drążkowych możemy wyróżnić:

- Łączniki nożowe
- Łączniki dociskowe.

Łącznik drążkowy nożowy posiada styki ruchome w postaci noży, które wsuwają się w nieruchome styki w celu i zwierania. Przykładem mogą być rozłączniki bezpiecznikowe typu RBK. W łącznikach dociskowych styki zwierane są na zasadzie docisku styków.

2.1.5. Przyciski

Pozwalają na załączanie obwodów z reguły o niewielkich prądach znamionowych. Stosowane w obwodach sterowania i sygnalizacji. Typowym przykładem będzie przycisk bezpieczeństwa. Przycisk może powracać do swojego pierwotnego stanu samoczynnie lub po usunięciu blokady. Przyciski mogą być w wykonaniu ze stykami zwiernymi (zamykające) lub rozwiernymi (przerywające).

[Tekst alternatywny: Dwa cienkie, współśrodkowe okręgi tworzą minimalistyczną ikonę przypominającą celownik lub przycisk na jednolitym białym tle.]



Rys. 2. Symbol przycisku.

[Tekst alternatywny: Dwa cienkie, współśrodkowe okręgi, a wewnątrz mniejszego okręgu krzyżują się dwie ukośne linie tworzące X, wszystko na jednolitym białym tle.]



Rys. 3. Symbol podświetlonego przycisku

2.1.6. Styczniki

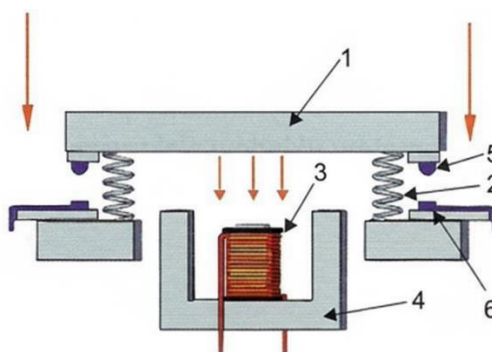
Stycznik składa się z elektromagnesu, mechanizmu ruchomego i zestawu styków (głównych i pomocniczych). Po podaniu napięcia na cewkę elektromagnes przyciąga ruchomą część, co powoduje zamknięcie lub otwarcie styków, realizując załączenie lub rozłączenie obwodu. Ilość i konfiguracja styków zależą od modelu i przeznaczenia.

Rodzaje styczników

- Styczniki modułowe (instalacyjne) — montowane na szynie DIN w rozdzielnicach, przeznaczone do obwodów o niskim prądzie (AC1), typowe w systemach HVAC, oświetleniu i automatyce budynkowej.
- Styczniki przemysłowe (mocy) — przeznaczone do obwodów dużych prądów, montowane na szynach TH35 lub płytach, używane do sterowania maszynami i silnikami.

- Styczniki prądu przemiennego (AC) — stosowane do typowych obciążeń prądu przemiennego, w wielu gałęziach przemysłu i budownictwa.
- Styczniki prądu stałego (DC) — używane w systemach trakcyjnych, akumulatorowych i kolejowych, charakteryzujące się specjalną konstrukcją styków i cewek.
- Stycznik bistabilny — utrzymuje stan załączenia po impulsie sterującym, co pozwala na oszczędność energii.
- Styczniki elektroniczne — wykorzystują półprzewodnikowe elementy do realizacji funkcji załączenia i wyłączenia bez elementów mechanicznych

[Tekst alternatywny: Przekrój elektromagnesu z cewką i rdzeniem w kształcie litery U, przyciągającym ruchomą belkę na sprężynach w dół, aby zamknąć styki.]



Rys. 4. Schemat działania stycznika. [14]

Na rysunku 4 przedstawiony został schemat działania stycznika, gdzie 1 to zwora podparta dwoma sprężynami powrotnymi oznaczonymi cyfrą 2. Cyfra 3 wskazuje na cewkę znajdującą się na rdzeniu opisanym cyfrą 4. Po zasileniu przyciągana zostaje zwora zamykając styk ruchomy (5) do styku stałego (6).

Zastosowanie

Styczniki są szeroko stosowane w automatyce przemysłowej, budynkach, instalacjach OZE i systemach sterowania, umożliwiając zdalną i bezpieczną obsługę odbiorników energii elektrycznej, często w połączeniu z zabezpieczeniami i regulatorami.

Klasy styczników

Tabela 4. Klasy styczników.

Kategoria	Zastosowanie
AC-1	obciążenia nieindukcyjne lub o małej indukcyjności, piece oporowe
AC-2	silniki pierścieniowe: rozruch, wyłączanie
AC-3	silniki klatkowe: rozruch, wyłączanie podczas biegu



Kategoria	Zastosowanie
AC-4	silniki klatkowe: rozruch, hamowanie przeciwwprądem, nawrót, impulsowanie
AC-5A	włączanie lamp wyładowczych
AC-5B	włączanie lamp żarowych
AC-6A	włączanie transformatorów
AC-6B	włączanie baterii kondensatorów
AC-7A	obciążenia o małej indukcyjności w gospodarstwach domowych i podobnych zastosowaniach
AC-7B	obciążenia silnikowe w urządzeniach domowego użytku
AC-8A	sterowanie hermetycznymi silnikami chłodziarek sprężarkowych z ręcznym kasowaniem wyzwalaczy nadprądowych
AC-8B	sterowanie hermetycznymi silnikami chłodziarek sprężarkowych z samoczynnym kasowaniem wyzwalaczy nadprądowych
AC-53a	sterowanie silnikami klatkowymi ze stycznikami półprzewodnikowymi
DC-1	obciążenia nieindukcyjne lub o małej indukcyjności, piece oporowe
DC-3	silniki bocznikowe: rozruch, hamowanie przeciwwprądem, nawrót, impulsowanie, hamowanie oporowe
DC-5	silniki szeregowo: rozruch, hamowanie przeciwwprądem, nawrót, impulsowanie, hamowanie oporowe

2.1.7. Łączniki bezstykowe

Łączniki bezstykowe to łączniki elektryczne, które nie wykorzystują mechanicznych styków do przełączania prądu, lecz bazują na elementach półprzewodnikowych, takich jak tranzystory, tyrystory czy triaki. Dzięki temu łączenie odbywa się bez istnienia fizycznego kontaktu między stykami, eliminując zużycie mechaniczne i iskrzenie podczas przełączania.

Zalety łączników bezstykowych to bardzo duża trwałość łączeniowa wynikająca z braku obciążeń mechanicznych, szybkość działania oraz cicha praca. Z kolei ich wada to większa wrażliwość na przepięcia

W zależności od konstrukcji i przeznaczenia stosuje się różne układy obwodów głównych łączników półprzewodnikowych, np. układy z dwukierunkowymi tyrystorami, odwrotnie równoległe tyrystory czy mieszane układy tyrystorowo-diodowe.

Łączniki bezstykowe znajdują zastosowanie m.in. w układach sterowania, automatyce budynkowej oraz przemysłowej tam, gdzie wymagana jest szybka i trwała praca przełączania, np. przy sterowaniu obwodami oświetleniowymi i silnikami.



2.1.8. Wyłączniki instalacyjne

Wyłączniki instalacyjne składają się z:

- Układu zestyków głównych i pomocniczych,
- Komory gaszącej,
- Urządzenia wyzwalającego,
- Zamka,
- Napędu.

Możemy wyróżnić wyłączniki nadprądowe i różnicowoprądowe.

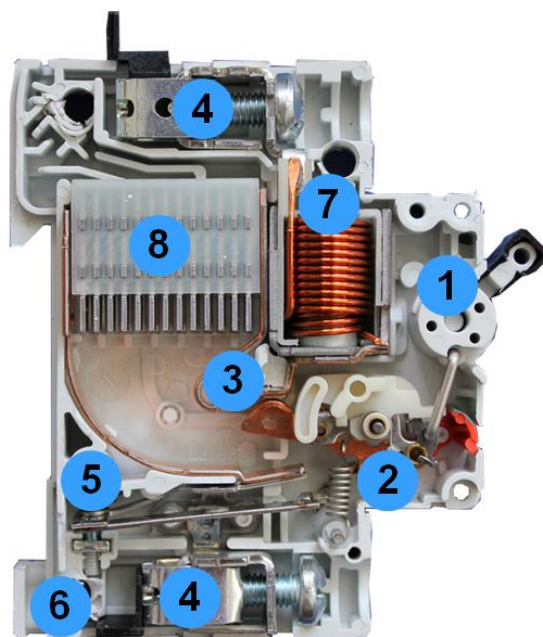
2.1.8.1. Wyłączniki nadprądowe

Wyłączniki instalacyjne nadprądowe, znane też jako automatyczne bezpieczniki, chronią instalacje elektryczne w zakresie prądowym od 0,5 do 63 A. Ich rolą jest zabezpieczenie kabli przed przeciążeniem oraz zwarciami. Ich budowa umożliwia montaż na standardowej szynie TH 35 oraz integrację z innymi modułowymi urządzeniami. Specjalne rozmieszczenie zacisków ułatwia łączenie różnych aparatów przy użyciu dedykowanych szyn.

Budowa

Wyłączniki używają bimetalowych (termicznych) mechanizmów wyzwalających do detekcji przeciążeń oraz elektromagnetycznych do ograniczania prądów zwarciovych i udarowych. W przypadku zwarcia energia cieplna jest znacząco redukowana dzięki odpowiedniemu kształtowi styków oraz komorze gaszącej łuk elektryczny.

[Tekst alternatywny: Przekrój obudowy wyłącznika nadprądowego z widocznymi ponumerowanymi elementami wewnętrznymi. Po prawej stronie znajduje się dźwignia sterująca „1”, poniżej mechanizm wyzwalający „2” i złącza toru prądowego „3”. W centrum widoczna jest cewka wyzwalacza elektromagnetycznego „7” oraz nad nią blok styków lub komora gaszeniowa „8”. W dolnej i górnej części po lewej oznaczono terminale przyłączeniowe „4” z śrubami mocującymi, w pobliżu znajdują się elementy sprężynujące „5–6”. Obraz pokazuje przebieg toru prądu od zacisku dolnego przez styk ruchomy i mechanizmy wyzwalające do zacisku górnego.]



Rys. 5. Przekrój wyłącznika nadprądowego „S”. [10]

1. Dźwignia napędu, 2. Zamek, 3. Styk stały i ruchomy 4. Zaciski przyłączeniowe 5. Wyzwalacz termobimetalowy 6. Wkręt regulacyjny 7. Wyzwalacz elektromagnetyczny 8. Komora gaszeniowa

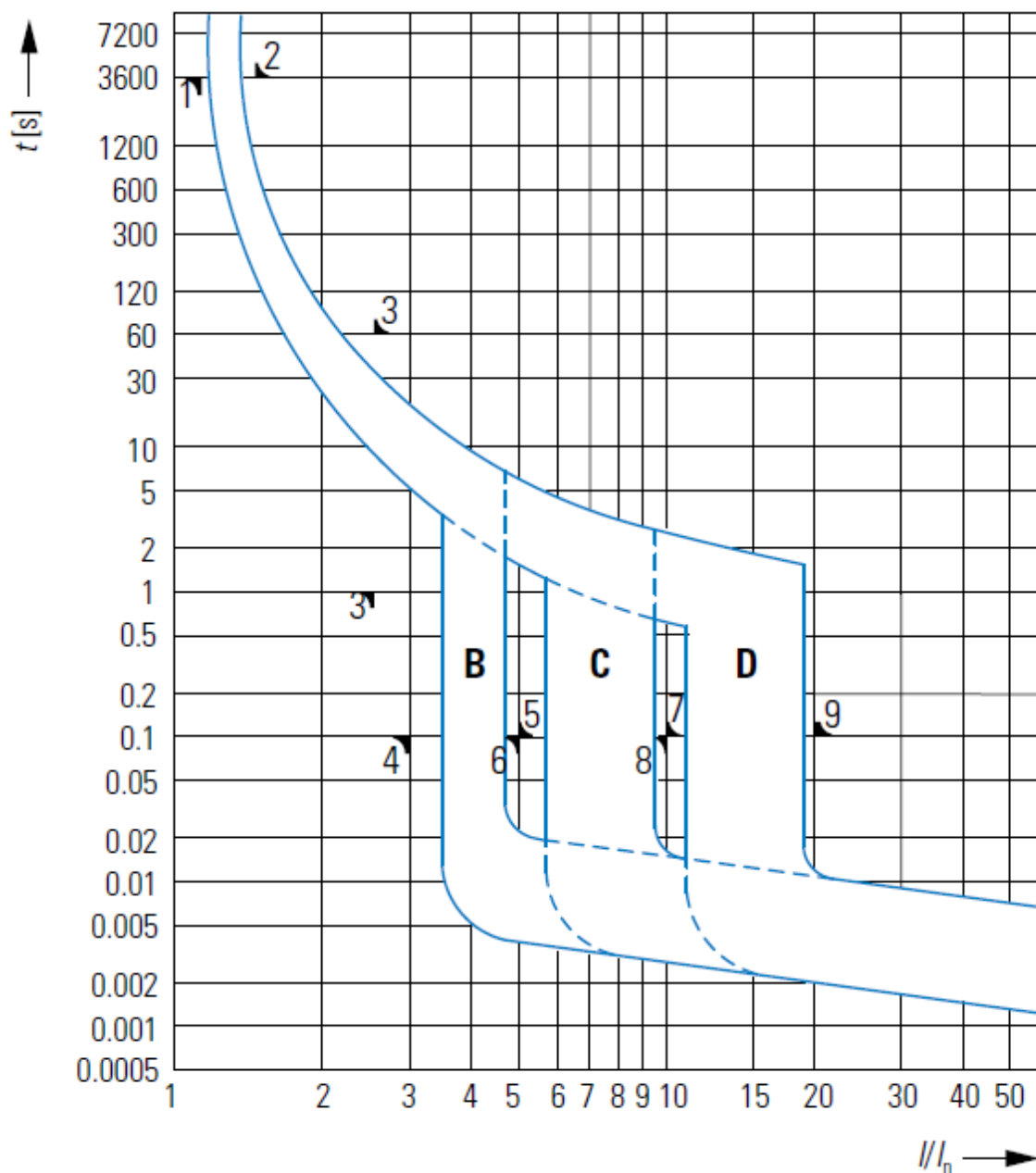
Charakterystyki

Typy charakterystyk B, C, D stosowane w wyłącznikach są zgodne z wymaganiami normy PN-EN 60898-1. Parametry tych wyłączników są dobierane do właściwości nagrzewania przewodów. Istnieją także wyłączniki dostosowane do obwodów prądu stałego (DC).

Charakterystyka B służy głównie do ochrony odbiorników o niskiej wrażliwości na przeciążenia termiczne i niewielkich prądach rozruchowych. Typowo stosuje się je w instalacjach domowych lub przemysłowych w obwodach z małą ilością opraw oświetleniowych czy odbiornikami rezystancyjnymi. Wyłącznik jest uruchamiany przez prąd o wartości od 3 do 5 razy większej niż maksymalny prąd znamionowy. Jeśli przez dłuższy czas płynie prąd bliski tej wartości, zadziała również wyzwalacz termiczny. Dla typu B umowny prąd niezadziałania termicznego w czasie poniżej jednej godziny wynosi 1,13 prądu znamionowego, natomiast zadziałanie następuje przy krotności 1,45 tego prądu.

[Wykres charakterystyk czasowo-prądowych wyłączników nadprądowych, z osią pionową czasu zadziałania t w sekundach od 0.0005 do 7200 i osią poziomą prądu I/I_n od 1 do 50. Zaznaczone są trzy strefy wyzwalania B, C i D; pasma B zaczynają się ok. 3–5 krotności prądu I_n , C ok. 5–10 krotności prądu I_n , a D ok. 10–20 krotności prądu I_n , pokazując krótszy czas wyłączenia dla większych prądów. Pełne pola

przedstawiają typowe tolerancje, a linie przerywane granice przecięcia się charakterystyk.]



Rys. 6. Charakterystyki wyłączników nadprądowych B, C, D. [10]



Objaśnienie [10]:

1. Prąd niezadziałania: $I_{nt} = 1.13 \times I_n$; $t > 1 \text{ h}$

I_{nt} to umowny prąd niezadziałania wyzwalacza zwłocznego przeciążeniowego. Przy prądzie do $1,13 \cdot I_n$ aparat nie powinien zadziałać przez 1 h (dla wyłączników do 63 A) albo przez 2 h (dla wyłączników powyżej 63 A).

2. Prąd zadziałania: $I_t = 1.45 \times I_n$; $t < 1 \text{ h}$

I_t to umowny prąd zadziałania wyzwalacza zwłocznego. Prąd co najmniej $1,45 \cdot I_n$ musi spowodować wyłączenie najpóźniej po upływie czasu umownego, tj. 1 h (dla wyłączników do 63 A) lub 2 h (dla wyłączników powyżej 63 A).

3. $2.55 \times I_n$; $t = 1 \div 60 \text{ s}$ ($I_n < 32 \text{ A}$), $t = 1 \div 120 \text{ s}$ ($I_n > 32 \text{ A}$)

Prąd $2,55 \cdot I_n$ wyznacza granicę tolerancji dla prób czasu zadziałania (obszar niezdefiniowanego działania). Zakres ten nie jest używany jako kryterium projektowe.

4. $3 \times I_n$; $t > 0.1 \text{ s}$
5. $5 \times I_n$; $t < 0.1 \text{ s}$
6. $5 \times I_n$; $t > 0.1 \text{ s}$
7. $10 \times I_n$; $t < 0.1 \text{ s}$
8. $10 \times I_n$; $t > 0.1 \text{ s}$
9. $20 \times I_n$; $t < 0.1 \text{ s}$

Dla 4,6 oraz 8: Umowny prąd niezadziałania wyzwalacza bezzwłocznego (zwarciovego); człon zwarciovyy nie powinien zadziałać poniżej tej wartości, np. dla charakterystyki B do $3 \cdot I_n$.

Dla 5,7 i 9: Umowny prąd zadziałania wyzwalacza bezzwłocznego; po przekroczeniu tej wartości aparat ma zadziałać w czasie do 0,1 s, np. dla charakterystyki B przy $5 \cdot I_n$.

Charakterystyka C przeznaczona do zabezpieczania odbiorów z nieco większymi prądami rozruchowymi, jak obwody silników małej mocy oraz uzyskiwania selektywności zabezpieczeń. Wyzwalacz elektromagnetyczny reaguje na prąd od 5 do 10 razy wyższy od prądu znamionowego. Jeśli prąd ten jest mniejszy, wyłącznik nie wyłączy obwodu przy krótkotrwałym przeciążeniu. Parametry termiczne są analogiczne jak w charakterystyce B.

Charakterystyka D dedykowana do ochrony obwodów z bardzo dużymi prądami rozruchowymi, m.in. w instalacjach z silnikami o ciężkim rozruchu, dużych maszynach czy transformatorach. Elektromagnetyczny wyzwalacz zadziała w



zakresie 10–20-krotności prądu znamionowego. Wyzwalacz termiczny zachowuje takie same parametry jak typy B i C [10].

Selektywność zabezpieczeń

Aby ochrona współpracujących wyłączników była efektywna, wyłącznik instalacyjny i lub bezpiecznik topikowy trzeba dobrać w taki sposób, aby najbliższy z nich odłączył awaryjny obwód jako pierwszy. Selektywność zapewnia prawidłowe działanie zabezpieczeń, minimalizując zakres odcinanego fragmentu instalacji przy zwarcu lub przeciążeniu. Szczegóły doboru wynikają z analizy charakterystyk czasowo-prądowych obu urządzeń.

Analiza selektywności zwarciorowej polega na porównaniu charakterystyk czasowo-prądowych współpracujących zabezpieczeń. Wymagane jest, by dla wszystkich możliwych prądów zwarciorowych całkowita energia Joule'a, którą przepuści wyłącznik zanim zadziała, była mniejsza od energii koniecznej do przepalenia bezpiecznika topikowego.

Porównywanie tych charakterystyk jest zadaniem czasochłonnym, dlatego producenci publikują tablice z wartościami granicznymi prądów zwarciorowych, przy których ich wyłączniki jedno-, dwu- lub trójbiegunowe współpracują selektywnie z bezpiecznikami topikowymi różnych typów i szybkości działania. W tych tabelach znajdziemy dopuszczalne wartości prądów zwarciorowych, przy których selektywność jest spełniona, a specjalny symbol informuje o braku selektywności.

Warunki doboru

$$I_b \leq I_n \leq I_z \quad (1)$$

$$I_2 = kI_n \quad (2)$$

gdzie:

I_b – prąd obciążenia

I_n – prąd znamionowy lub nastawy zabezpieczenia

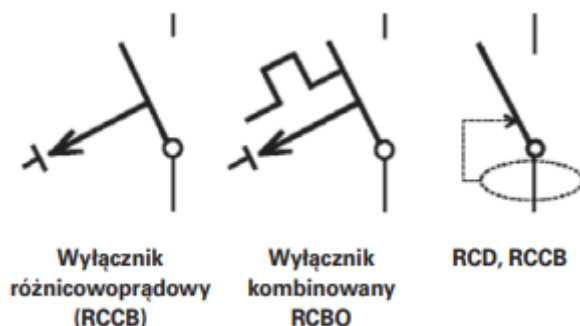
I_z – obciążalność długotrwała przewodu

I_2 – prąd zadziałania urządzenia zabezpieczającego

k – współczynnik krotności prądu powodującego zadziałanie dla wyłączników nadprądowych o charakterystykach B, C, D wynosi 1,45

2.1.8.2. Różnicowoprądowe

[Tekst alternatywny: Trzy symbole graficzne aparatów ochronnych. Od lewej: symbol wyłącznika różnicowoprądowego RCCB z ukośnym przełącznikiem i znakiem testu; pośrodku symbol wyłącznika kombinowanego RCBO z członem nadprądowym; po prawej wariant symbolu RCD/RCCB z zaznaczonym przekładnikiem kropkowaną linią.]



Rys. 7. Symbole graficzne wyłączników różnicowoprądowych [1].

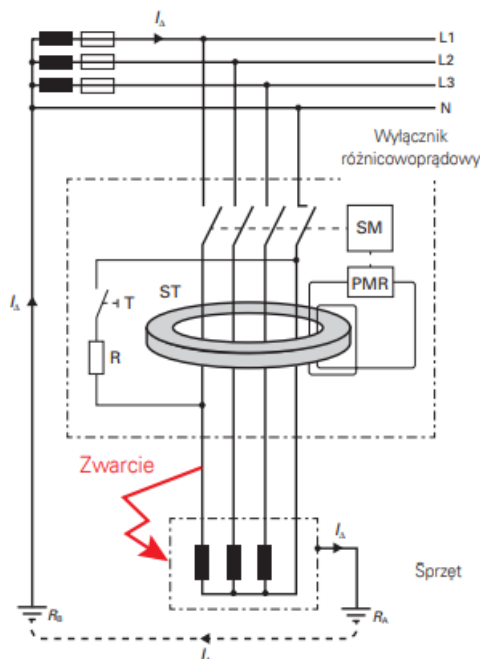
Zasada działania

Każdy wyłącznik różnicowoprądowy (RCD) zbudowany jest z trzech kluczowych części: przekładnika prądowego sumującego, przekaźnika wyzwalającego i elementu przełączającego. Ich współpraca polega na wykrywaniu oraz analizie prądu różnicowego i natychmiastowym rozłączaniu zasilania, jeśli prąd upływowy przekroczy ustalony próg bezpieczeństwa. Aby urządzenie działało poprawnie, przez przekładnik prądowy muszą przechodzić wszystkie czynne przewody (lub przynajmniej taka ich liczba, która umożliwi właściwą pracę RCD w danym układzie).

RCD działa, porównując wartości prądów płynących w przewodach zasilających przechodzących przez przekładnik prądowy urządzenia. W typowych warunkach, gdy nie występuje uszkodzenie, suma chwilowych wartości prądów wszystkich przewodów wynosi zero. Strumień magnetyczny powstający w rdzeniu przekładnika jest wynikiem indukowania się prądów z przewodów czynnych, przy czym ich suma wektorowa jest równa zero. Kiedy na przykład pojawi się upływ prądu do ziemi, część prądu odpływa poza przewody pod napięciem – powstaje stan niezrównoważenia. Wtedy wewnątrz rdzenia przekładnika indukuje się strumień magnetyczny proporcjonalny do tej różnicy, a uzwojenie wyjściowe generuje prąd, który wyzwala przekaźnik i powoduje natychmiastowe rozłączenie styków RCD.

[Tekst alternatywny: Schemat działania wyłącznika różnicowoprądowego w układzie trójfazowym L1–L3 z przewodem N; prądy fazowe prowadzone przez przekładnik

sumujący ST, którego sygnał steruje przekaźnikiem PMR i mechanizmem przełączania SM. Czerwona strzałka „Zwarcie” wskazuje uszkodzenie odbiornika; pokazano tor prądu różnicowego oraz punkty uziemienia z rezystancjami R_A (sprzęt) i R_B (zasilacz). Po lewej widoczny obwód testu z przyciskiem T i rezystorem R.]



Rys. 8. Schemat podłączenia wyłącznika różnicowoprądowego do sieci w układzie TT [1].

Oznaczenia:

SM - mechanizm przełączania; PMR - przekaźnik z magnesami trwałymi; ST - prąd sumaryczny transformatora; T - przycisk testu; R – rezystor; I_{Δ} - prąd różnicowy; R_A - rezystancja uziemienia urządzenia; R_B - rezystancja uziemienia zasilacza

Przekładnik prądowy w wyłączniku różnicowoprądowym zazwyczaj ma konstrukcję transformatora pierścieniowego, którego rdzeń wykonany jest z materiałów magnetycznych o wysokiej przenikalności, na przykład z permalaju. W nowoczesnych urządzeniach stosuje się również materiały magnetyczne o strukturze nanokrystalicznej, co poprawia czułość i stabilność pracy. Głównym elementem układu wyzwalań jest przekaźnik z magnesem trwałym (PMR). W stanie spoczynkowym armatura przekaźnika pozostaje przyciągnięta przez magnes. Jeśli przez cewkę pobudzającą popłynie prąd, generowane pole magnetyczne osłabia działanie magnesu trwałego, a napięta sprężyna odciąga armaturę przekaźnika, przerywając obwód.

Cały układ przełączający wyłącznika różnicowoprądowego musi wyróżniać się dużą czułością, lecz również zapewniać odpowiedni docisk i siłę styków. Tor prądowy



powinien być tak skonstruowany, by zawsze przewodził pełne prądy znamionowe przez cały okres żywotności aparatu. Dodatkowo, odległość między otwartymi stykami po zadziałaniu urządzenia powinna gwarantować właściwą izolacyjność, a same styki muszą być zabezpieczone przed prądami udarowymi i zwarciovymi. W urządzeniach wielobiegunowych styki przewodu neutralnego N muszą zamykać się chwilę wcześniej i otwierać później niż styki fazowe, co pozwala ograniczyć ryzyko przepięć.

Testowanie

Każdy wyłącznik różnicowoprądowy (RCD) musi być wyposażony w łatwo dostępny i dobrze oznakowany przycisk testowy. Zaleca się regularne sprawdzanie funkcjonalności urządzenia za pomocą tego przycisku, zwykle co miesiąc, zgodnie z wytycznymi producenta. W przypadku nowoczesnych RCD o podwyższonej niezawodności okres testowania może wynosić od sześciu miesięcy do roku.

Obwód testowy przycisku jest zaprojektowany tak, aby generować prąd różnicowy przekraczający znamionową wartość prądu różnicowego $I_{\Delta n}$ wyłącznika. Normy produktowe wymagają, by przy napięciu znamionowym indukowany strumień magnetyczny w przekładniku prądowym nie przekraczał 2,5 krotności wartości indukowanej przez prąd znamionowy. Urządzenie testujące musi zachować poprawne działanie przy napięciu co najmniej 0,8 razy większym od znamionowego.

Czterobiegunowe RCD mogą być stosowane w obwodach z mniejszą liczbą przewodów pod napięciem, pod warunkiem prawidłowego podłączenia przewodów do odpowiednich zacisków, aby zachować funkcjonalność obwodu testowego. Typowy tester w RCD pracuje przy napięciu sieciowym (400 V), a także bez problemu współpracuje z napięciem fazowym (230 V). Zalecane schematy połączeń znajdują się w dokumentacji katalogowej. W przypadku obwodów elektronicznych, jeśli jest taka potrzeba, system sygnalizuje niedozwolone połączenia. Powszechnym i uniwersalnym rozwiązaniem jest podłączenie wszystkich zacisków wejściowych do wszystkich przewodów pod napięciem w sieci, natomiast do zacisków wyjściowych podłącza się tylko niezbędną liczbę przewodów.

Parametry wyłączników RCD

Wartość znamionowego prądu różnicowego $I_{\Delta n}$ to podstawowy parametr określany przez producenta – jest to taka wartość prądu upływowego, przy której wyłącznik różnicowoprądowy musi zadziałać w zadanych warunkach. Informację tę można znaleźć na obudowie urządzenia razem z innymi charakterystykami technicznymi. Parametr ten wyznacza próg ochrony przed porażeniem prądem elektrycznym i typowe wartości wynoszą 10, 30, 100, 300, 500 mA lub 1 A.

Prąd różnicowy I_{Δ} (zwany też prądem upływu) to chwilowa suma wektorowa natężeń przepływających przez wszystkie przewody główne RCD. Może przyjmować wartości mniejsze, równe lub większe od $I_{\Delta n}$.



Prąd niewyzwalający $I_{\Delta n0}$ oznacza wartość prądu różnicowego, przy której (lub dla niższych wartości) wyłącznik nie powinien zadziałać – zgodnie z normą nie wyzwala się przy prądach równych lub mniejszych niż $0,5 I_{\Delta n}$. W praktyce wartości robocze i nierobocze są kalibrowane fabrycznie zwykle na poziomie $0,75 I_{\Delta n}$.

Granica czasu bezczynności $t_{\Delta a}$ oznacza, jak długo wyłącznik może pozostawać nieaktywny (nie rozłączyć obwodu) po wystąpieniu prądu wyższego od $I_{\Delta n}$, zanim nastąpi zadziałanie. Dotyczy to modeli z opóźnieniem czasowym, takich jak typy G (czas opóźnienia do 10 ms) czy typy S (do 40 ms). W tym czasie wyłącznik pozostaje uodporniony na krótkie prądy różnicowe.

Praktycznie oznacza to, że RCD o czułości 30 mA może zadziałać już dla prądu upływu od ok. 15 mA (czyli 50% $I_{\Delta n}$), a musi zadziałać dla wartości równej lub wyższej od 30 mA. Z tego powodu przy wyższych prądach upływu stosuje się RCD o większej wartości $I_{\Delta n}$, dopasowując urządzenie do specyfiki chronionego obwodu.

Odporność na zwarcia i przeciążenia

Główne parametry odnoszące się do wytrzymałości wyłączników różnicowoprądowych (RCD) na prądy udarowe to:

- Znamionowa zdolność przełączania i wyzwalań I_m — oznacza maksymalną wartość szczytową składnika przemiennego prądu zwarcowego (w przewodach pod napięciem), który RCD może bezpiecznie przełączać w określonych warunkach.
- Znamionowa zdolność przełączania i wyzwalań $I_{\Delta m}$ — to wartość skuteczna elementu przemiennego prądu różnicowego (między przewodem pod napięciem a przewodem ochronnym), którą RCD może bezpiecznie przełączać w określonych warunkach.

W przypadku wyłączników różnicowoprądowych (RCCB) bez dodatkowych elementów bezpieczeństwa, zdolność do wyłączania prądów udarowych jest zależna od prądu znamionowego urządzenia: dla $I_n = 40$ A zdolność wynosi 500 A, dla 63 A to 630 A, dla 80 A – 800 A, a przy 100 A osiąga 1000 A. Mimo umieszczenia styków w komorach gaszenia łuku, rzeczywiste czasy zadziałania są relatywnie duże.

Bezpiecznik wstępny może być umieszczony na dowolnym wejściu. Parametr warunkowej rezystancji zwarcowej (I_c) definiuje prąd zwarcia, przy którego wartości styki RCD nie ulegają uszkodzeniu, gdy współpracują z bezpiecznikiem topikowym gG/gL.

Te parametry są kluczowe dla zapewnienia bezpieczeństwa i niezawodności wyłączników RCD wobec prądów udarowych powstających w systemach elektrycznych.

Tabela 5. Wartości maksymalnych zabezpieczeń różnicowoprądowych dla zabezpieczeń przeciwzwarciovych.

RCCB [A]	Zabezpieczenie przeciwzwarciovie [A]
16	63 gG/gL
25	63 gG/gL
40	63 gG/gL
63	63 gG/gL
80	80 gG/gL
100	100 gG/gL

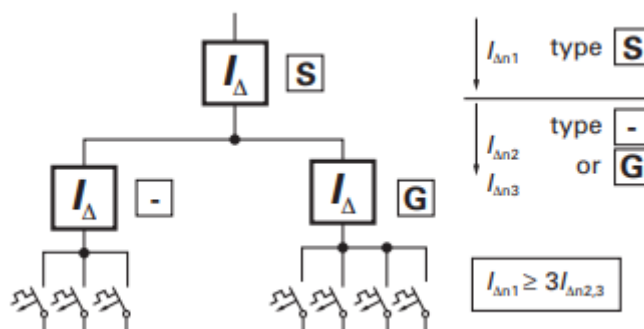
Selektywność

W instalacjach, w których RCD są instalowane szeregowo, ich selektywne wyzwalanie jest wymagane w celu odłączenia tylko tej części instalacji, w której wystąpiła usterka. Selektywność pomiędzy urządzeniami podłączonymi szeregowo może być pełna lub częściowa. Pełna selektywność między urządzeniami RCD jest gwarantowana, gdy spełnione są oba poniższe warunki:

1. Wyłącznik RCD po stronie zasilania jest typu S (selektywny).
2. RCD po stronie obciążenia ma niższą wartość znamionowego prądu różnicowego niż RCD po stronie zasilania wzór numer (3).

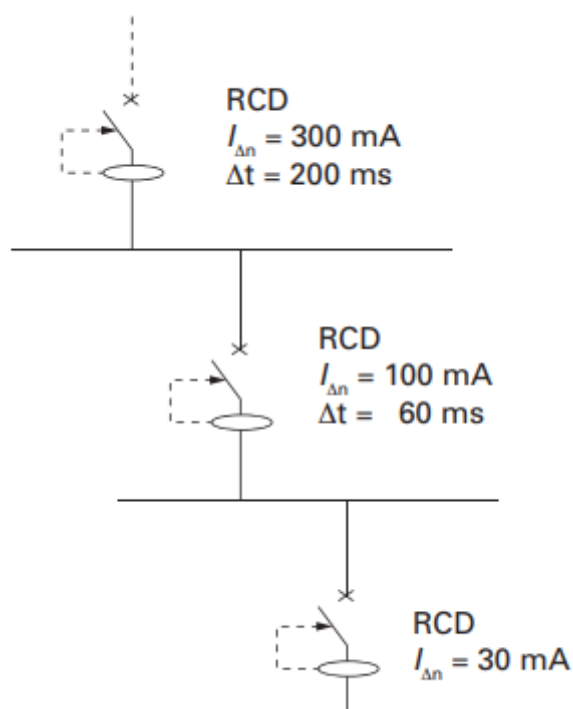
$$I_{\Delta n1S} \geq I_{\Delta n2,3} \quad (3)$$

[Tekst alternatywny: Schemat selektywnego doboru wyłączników różnicowoprądowych w układzie kaskadowym. Na górze główny RCD oznaczony I_{Δ} z literą S (typ selektywny), z którego odchodzą dwa odgałęzienia do podrzędnych RCD: po lewej standardowy (znak „-”), po prawej typ G (opóźniony). Obok pokazano warunek doboru: czułość głównego większa lub równa trzykrotności czułości podrzędnych.]



Rys. 9. Selektywny dobór zabezpieczeń różnicowoprądowych [1]

[Tekst alternatywny: Schemat kaskadowo połączonych wyłączników różnicowoprądowych (RCD) z podanymi progami i opóźnieniami. Najwyższy stopień: $I_{\Delta n} = 300 \text{ mA}$, $\Delta t = 200 \text{ ms}$; środkowy: $I_{\Delta n} = 100 \text{ mA}$, $\Delta t = 60 \text{ ms}$; najniższy przy odbiorniku: $I_{\Delta n} = 30 \text{ mA}$. Linie poziome oznaczają kolejne poziomy rozdziału.]



Rys.10. Selektywny dobór RCD. [1]

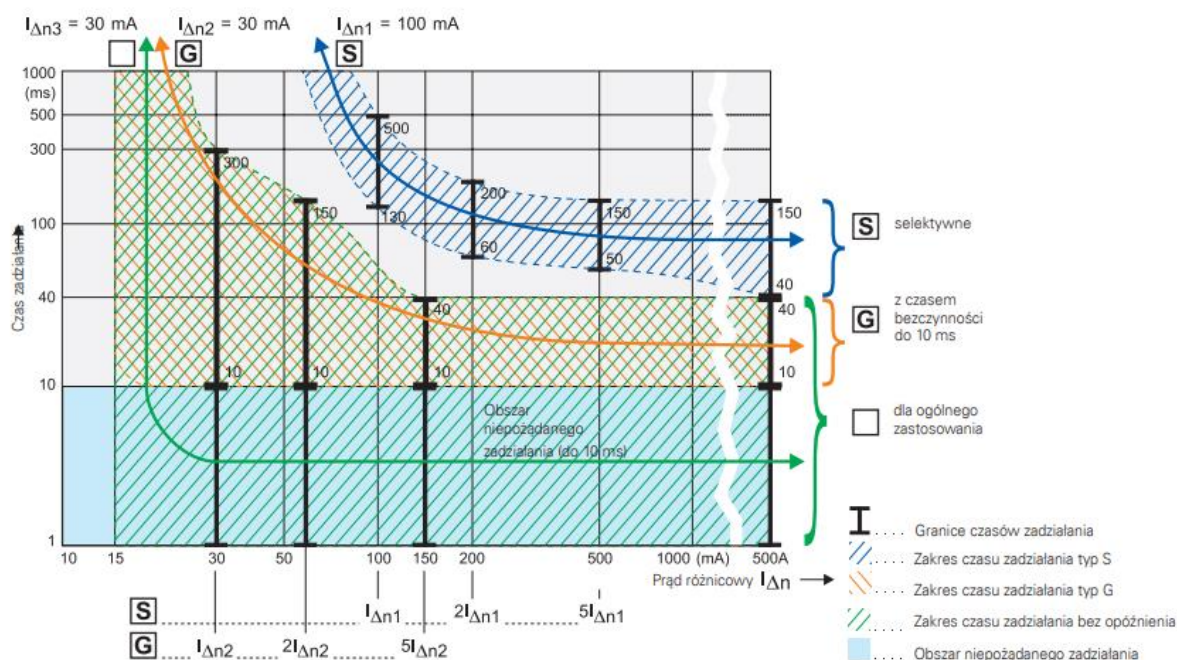
Selektywność wyłączników różnicowoprądowych można uzyskać poprzez stosowanie odpowiedniego stopniowania czasowego i prądowego w hierarchii. Przykład został przedstawiony na rysunku 10.

Charakterystyki działania

Wyłączniki RCD posiadają cztery charakterystyki działania:

- bez oznaczenia – do zastosowań ogólnych, bezzwłoczne reagujące na prądy udarowe do 250 A, reagujące na krótkotrwałe wzrosty prądu;
- typu G – z krótkim opóźnieniem 10 ms, charakteryzuje się odpornością na prądy udarowe do 3 kA;
- typu R – dla urządzeń rentgenowskich, z czasem beczynności 10 ms;
- typu S – selektywne, z opóźnieniem 40 ms, z odpornością minimalnie 3 kA, spełnia warunki zadziałania w zakresie od 0,4 do 0,2 s.

[Tekst alternatywny: Wykres selektywnej koordynacji RCD z trzema poziomami czułości: $I_{\Delta n3} = 30 \text{ mA}$, $I_{\Delta n2} = 30 \text{ mA}$, $I_{\Delta n1} = 100 \text{ mA}$; oś X – prąd różnicowy I_{Δ} (10 mA–500 A), oś Y – czas zadziałania (1–1000 ms, skala logarytmiczna); zaznaczone strefy działania: bez opóźnienia, typ G (do 10 ms) i typ S selektywny; u dołu obszar niepożądanego zadziałania do 10 ms; pionowe znaczniki dla 30, 50, 100 i 300 mA z czasami granicznymi.]



Rys. 11. Charakterystyki działania wyłączników różnicowoprądowych [1].

Tabela 6. Granice czasowe poprawnego działania RCD dla różnych prądów różnicowych.

Typ RCD		Czas zadziałania [ms]			
		$I = I_n$	$I_n \times 2$	$I_n \times 5$	500A
	bezwzględne	≤ 300	≤ 150	≤ 40	≤ 40
	opóźnienie 10 ms	$10 \div 300$	$10 \div 150$	$10 \div 40$	$10 \div 40$
	opóźnienie 40 ms	$130 \div 500$	$60 \div 200$	$50 \div 150$	$40 \div 150$

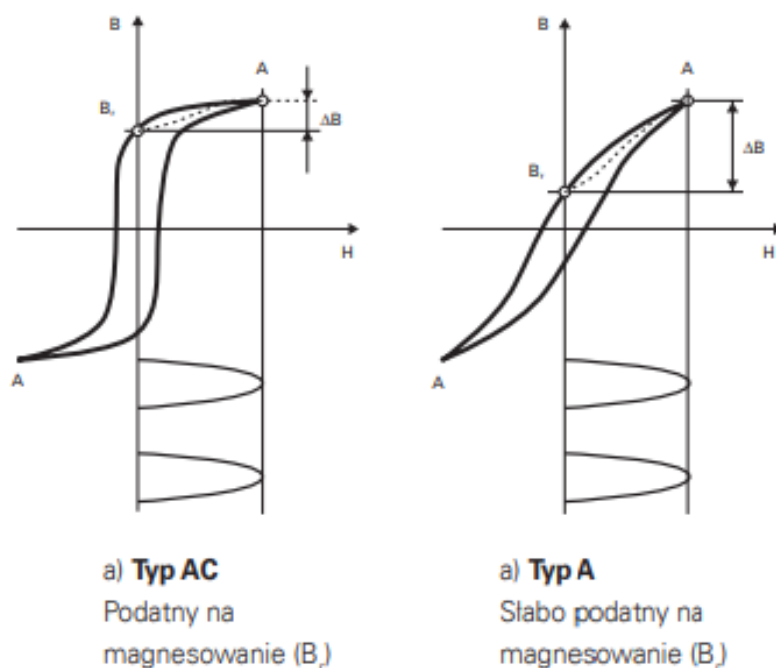
Podział typów ze względu na działanie rodzaju prądu

Wyłączniki różnicowoprądowe (RCD) dzielą się na typy AC, A, B, F, U, które różnią się czułością w zależności od rodzaju prądów różnicowych.

- Typ AC jest przeznaczony do wykrywania wyłącznie przemiennych prądów różnicowych.
- Typ A reaguje na prądy przemiennie oraz pulsujące prądy stałe, tolerując składową stałą do 6 mA. Tym typem zabezpiecza się najczęściej domowe instalacje z urządzeniami elektronicznymi, jak pralki czy płyty indukcyjne.
- Typ F to specjalna odmiana typu A z rozszerzoną charakterystyką częstotliwościową, przystosowana do wykrywania prądów o wysokiej częstotliwości (do 1 kHz) i stosowana m.in. w urządzeniach z falownikami (klimatyzatory, pompy ciepła).
- Typ U jest starszym rozwiązaniem, poprzedzającym typ F.
- Typ B jest najbardziej zaawansowany i wykrywa wszystkie rodzaje prądów różnicowych: przemiennie, pulsujące, a także prądy stałe. Stosowany jest w instalacjach z falownikami, ładowarkami pojazdów elektrycznych i systemami fotowoltaicznymi.

Dobór właściwego typu RCD zależy od charakterystyki obciążenia i wymagań instalacji, by zapewnić skuteczną ochronę i zgodność z normami.

[Tekst alternatywny: Dwa wykresy pętli histerezy magnetycznej dla przekąźników różnicowoprądowych. Po lewej „Typ AC – podatny na magnesowanie (Br)”: krzywa szybko dochodzi do nasycenia, punkt remanencji Br wysoki, przyrost ΔB niewielki. Po prawej „Typ A – słabo podatny na magnesowanie (Br)”: krzywa ma łagodniejsze nachylenie, remanencja Br mniejsza, a ΔB większe. Oś pozioma H – natężenie pola, oś pionowa B – indukcja.]



Rys. 12. Histereza magnesowania rdzeni wyłączników typu AC i A [1].

Podział ze względu na zastosowanie

Tabela 7. Zastosowanie wyłączników różnicowoprądowych w zależności od przeznaczenia.

Zastosowanie	Rodzaj wyłącznika różnicowoprądowego
Budownictwo mieszkaniowe	RCCB, RCBO
Instalacje przemysłowe	MRCD, CBR, RCM
Instalacje przenośne	SRCD, PRCD

RCCB - Wyłączniki różnicowoprądowe bez wbudowanego zabezpieczenia nadprądowego do użytku domowego i podobnych zastosowań

RCBO - Wyłączniki różnicowoprądowe z wbudowanym zabezpieczeniem nadprądowym do użytku domowego i podobnych zastosowań

RCM - Monitory różnicowoprądowe do użytku domowego i podobnych zastosowań

MRCD - Modułowe urządzenia różnicowoprądowe z przekładnikiem

CBR - Wyłącznik kompaktowy z wbudowanym urządzeniem różnicowoprądowym

SRCD - Stałe gniazdo z wbudowanym wyłącznikiem różnicowoprądowym

PRCD - Przenośne urządzenie różnicowoprądowe

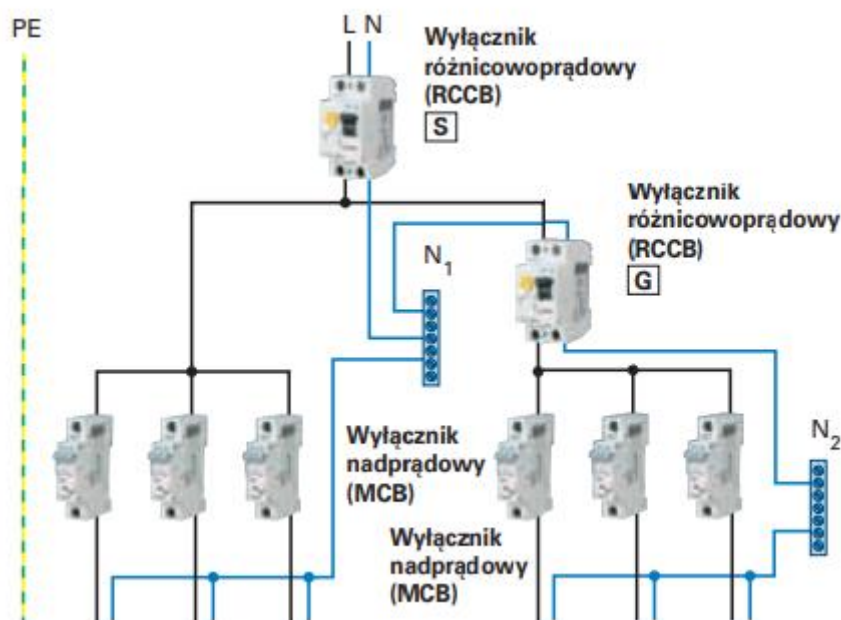
Oznakowanie

Oznakowanie musi spełniać wymogi odpowiedniej normy produktu. W przypadku małych urządzeń, po zainstalowaniu urządzenia muszą być widoczne przynajmniej następujące informacje:

- Prąd znamionowy
- Znamionowy prąd różnicowy
- Dla selektywnych typów: Symbol S w kwadratowej ramce
- Symbol typu A, F lub B

Grupowanie obwodów

[Tekst alternatywny: Schemat rozdzielni z selektywną ochroną różnicowoprądową i nadprądową. Na zasilaniu L i N znajduje się główny wyłącznik różnicowoprądowy RCCB typu S; za nim rozgałęzienia prowadzą do grup obwodów chronionych wyłącznikami nadprądowymi MCB oraz do podrzędnego RCCB typu G. Po lewej listwa PE, pośrodku i prawej listwy neutralne N1 i N2 przypisane odpowiednio do sekcji z RCCB S i G.]



Rys. 13. Grupowanie obwodów pod zabezpieczenia RCD [1]

Odporność układów zabezpieczeń różnicowoprądowych (RCD) na niepożądane zadziałania znacznie wzrasta, jeśli instalacje zostaną podzielone na mniejsze, niezależne grupy. Przykładowo, w typowej instalacji domowej na wejściu stosuje się RCD typu selektywnego o czułości 300 mA, który zapewnia ochronę



przeciwporażeniową. W obwodach gniazdowych konieczne jest dodatkowe zabezpieczenie przy pomocy wyłączników o czułości 30 mA (typ G), co gwarantuje wysoką odporność na fałszywe wyzwolenia.

Przy zwarcu za wyłącznikiem, gdzie zastosowano wcześniejszy, opóźniony RCD typu G, zwarcie jest zwykle odłączane w czasie do 10 ms, podczas gdy opóźniony RCD jest nieaktywny. Dzięki temu reszta instalacji pozostaje nienaruszona i nie dochodzi do nieplanowanych przerw w innych obwodach.

Obwody oświetleniowe i specjalne gniazda (lodówka, pompa ciepła, serwery) mogą działać bez oddzielnego zabezpieczenia różnicowoprądowego, co stanowi kompromis pomiędzy ochroną, a wygodą użytkowania. W praktyce, dla budynku jednorodzinnego czy większego mieszkania optymalna liczba RCD wynosi zwykle od 3 do 5, co pozwala na skuteczny podział instalacji na niezależne sekcje.

Ulepszeniem jest stosowanie RCD z rozłączanym torem neutralnym (N), które odłączają jednocześnie wszystkie przewody robocze i neutralny, ułatwiając lokalizację usterek. Takie rozwiązanie dobrze sprawdziło się w Austrii. Dodatkowo, coraz częściej stosuje się wyłączniki kombinowane (RCBO) o czułości do 30 mA, które łączą funkcję różnicoprądową z ochroną nadprądową w jednym urządzeniu, zapewniając ochronę poszczególnych gniazd.

2.1.9. Bezpieczniki

Budowa bezpiecznika

Bezpiecznik składa się z podstawy (gniazda bezpiecznikowego) oraz wkładki topikowej. W przypadku bezpieczników instalacyjnych wkładkę mocuje się w podstawie przy użyciu gwintowanej główki bezpiecznika.

W podstawie bezpiecznika znajduje się miejsce, gdzie można wkręcić wymienną wkładkę, która ogranicza możliwość zamiany właściwej wkładki na taką z większym prądem znamionowym, zapewniając dopasowanie do wymaganej wartości zabezpieczenia.

W zależności od wartości znamionowego napięcia i prądu, dostępne są różne rozmiary gniazd i wkładek bezpiecznikowych. Jednakże podstawowe wymiary wkładek (wysokość, średnica) przeznaczonych do danego typu gniazda są takie same. Zmienne są natomiast średnice dolnych styków wkładek – dla większych wartości prądu są one odpowiednio większe – co odpowiada parametrom właściwych wstawek kalibrowanych.

Popularnym rozwiązaniem obok bezpieczników instalacyjnych są bezpieczniki topikowe typu przemysłowego – stacjonarne, wysokoprądowe. Stosowane są tu styki



nożowe, a wykonania o stykach cylindrycznych zaprojektowane są do połączeń śrubowych albo jako elementy wkładane do specjalnych opraw. Wkładki i podstawy do tych bezpieczników mają różne rozmiary, zależne od wartości prądu znamionowego zabezpieczenia.

Kluczowym elementem bezpiecznika jest metalowa część topikowa – najczęściej wykonana z miedzi, w formie pojedynczego lub kilku drutów równoległych. W bezpiecznikach przeznaczonych do większych prądów stosuje się paski lub kilka pasków. Te elementy topikowe umieszczane są w korpusie porcelanowym, który jest wypełniony piaskiem kwarcowym. Piasek spełnia kilka istotnych funkcji:

- ułatwia gaszenie łuku powstałego podczas stopienia elementu topikowego;
- dzięki dobrej przewodności cieplnej pomaga zwiększyć efektywność przerywania prądów, jednocześnie umożliwiając stosowanie węższego przekroju drutu;
- ogranicza wzrost ciśnienia wewnątrz wkładki podczas powstawania łuku elektrycznego, chroniąc ścianki korpusu przed uszkodzeniem.

Elementy topikowe bezpieczników mają wyznaczone punkty przeciążeniowe oraz zwarciove. Miejsca podatne na przeciążenie realizowane są poprzez wykorzystanie lutów z cyny i ołowiu o niższej temperaturze topnienia niż miedź – to właśnie tam rozpoczyna się stapianie elementu podczas przeciążeń. Lokalizacje zwarciove natomiast tworzone są poprzez specjalne przewężenia lub otwory w paskach topikowych.

Gdy przez bezpiecznik płynie prąd przeciążeniowy, elementy topikowe nagrzewają się stosunkowo powoli. Stopienie drutu i pojawienie się łuku następują w okolicy środka drutu, a czas ten jest stosunkowo długi – w efekcie wydłuża się proces przerywania prądu oraz wzrasta możliwość powstawania łuku. Długość tego procesu zmniejsza efektywność gaszenia łuku (czyli nie wszystkie bezpieczniki mają dobrą zdolność wyłączania prądu przeciążeniowego).

W sytuacji powstania zwarcia przez bezpiecznik może przepłynąć bardzo duży prąd, co sprawia, że topik osiąga na całej długości wysoką temperaturę. Topik rozpada się mechanicznie, pojawia się równocześnie wiele łuków i gwałtowny wzrost ciśnienia wewnątrz wkładki. W efekcie prąd ograniczony przez wkładkę jest dużo mniejszy niż wartość prądu udarowego.

Bezpieczniki są oznaczane literami (g lub a) oraz wielkimi literami dla wskazania kategorii użytkowej:

- „g” oznacza pełną zdolność wyłączania wszystkich prądów od minimalnych, nawet powodujących przepalenie topika, do maksymalnych.

- „a” oznacza ograniczoną zdolność wyłączania: wkładka skutecznie wyłącza prądy przekraczające określone wartości, ale nie jest zdolna do obsługi pełnych przeciążeń.

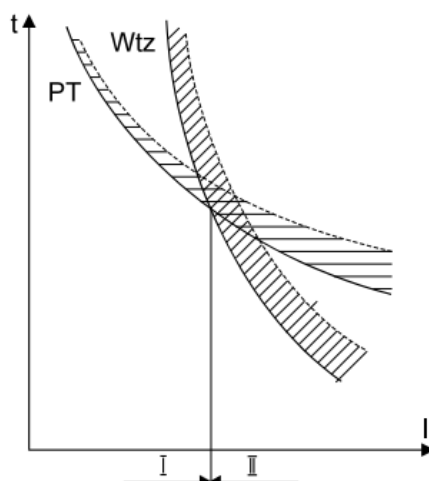
Litery użytkowe (np. L, M, R, B, T) określają, do jakich obwodów stosować dane bezpieczniki: L – kable i przewody, M – silniki, R – elementy energoelektroniczne, B – urządzenia górnicze, T – transformatory, G – ogólne przeznaczenie.

Normy produkcyjne podają przykładowe oznaczenia: gL, aM, aR, gR, gB, gTr, gG; jednak nie wszystkie typy znajdują się na rynku polskim.

Wkładki mogą być bardzo szybkie (Bi-WtS), szybkie (Bi-Wt), lub ekstremalnie szybkie do zabezpieczeń półprzewodnikowych (Btp).

Elementy topikowe bezpieczników mają tzw. punkty przeciążeniowe i zwarciove. Punkty przeciążeniowe to miejsca, gdzie na drucie topikowym umieszcza się lut o niższej temperaturze topnienia niż miedź, dzięki czemu tam zaczyna się proces przerywania prądu podczas przeciążenia – pozwala to na projektowanie charakterystyki czasowo-prądowej bezpiecznika. Punkty zwarciove realizuje się jako przewężenia lub otwory w paskach topikowych.

[Tekst alternatywny: Wykres czasowo-prądowy porównujący działanie bezpiecznika topikowego BI-Wtz i przekaźnika termicznego PT. Oś pozioma – prąd I, oś pionowa – czas t. Dwie przecinające się strefy: szersza pochyłona dla bezpiecznika Wtz oraz węższa dla przekaźnika PT; przecięcie wyznacza granicę koordynacji. Na dole zaznaczone obszary I – strefa działania przekaźnika i II – strefa działania bezpiecznika.]



Rys. 14. Charakterystyki czasowo-prądowe bezpiecznika topikowe Bi-Wtz oraz przekaźnika termicznego PT [2].



2.2. Łączniki SN i WN

[Tekst alternatywny. Symbol styku zwiernego, będący poziomą linią przerwana skośnie biegnącą linią.]



Rys. 15. Symbol ogólny łącznika.

Wśród łączników SN i WN możemy wyróżnić odłącznik, rozłącznik i wyłącznik. Każdy z tych aparatów posiada różne właściwości do zastosowania w układach elektroenergetycznych.

2.2.1. Odłącznik

Odłącznik to dwupozycyjny łącznik mechaniczny zapewniający bezpieczną separację obwodu poprzez przerwę izolacyjną. Nie jest przeznaczony do łączenia prądów roboczych i w normach nie przypisuje mu się znamionowych zdolności załączania ani wyłączania prądów, lecz wymagany jest znamionowy krótkotrwały prąd wytrzymywany (np. 1 s) i spełnienie prób wytrzymałościowych mechanicznych i elektrycznych. W zakresie SN/WN/NN definicję i wymagania odłączników oraz uziemników określa IEC 62271-102, obejmując instalacje wewnętrzne i napowietrzne powyżej 1 kV oraz urządzenia napędowe i wyposażenie pomocnicze, a także warianty zabudowy w rozdzielnicach osłoniętych.

Zasadnicze cechy konstrukcyjne odłączników obejmują widoczną przerwę izolacyjną lub równoważne rozwiązania konstrukcyjne wewnętrzne, jednoznaczny wskaźnik położenia styków powiązany z napędem oraz możliwość blokad w celu zapewnienia bezpieczeństwa prac eksploatacyjnych. W układach stacyjnych odłączniki wraz z uziemnikami kształtują topologię pól i torów obejściowych, zapewniając warunki beznapięciowej pracy obsługi, przy czym wymaga się odporności termicznej i dynamicznej torów prądowych na działanie spodziewanych prądów zwarciovych w stanie zamkniętym.



2.2.2. Rozłącznik

Rozłącznik to łącznik obciążeniowy przeznaczony do załączania, przenoszenia i wyłączania prądów eksploatacyjnych w granicach kategorii użytkowania, lecz bez zdolności wyłączania prądów zwarciovych. Odłącznik izolacyjny natomiast zapewnia jedynie funkcję separacji bez łączenia obciążenia, co precyzuje IEC 60947-3. W praktyce rozłączniki często współpracują z wkładkami topikowymi lub wyłącznikami mocy (tworząc zespoły rozłącznik - bezpiecznik lub rozłącznik - wyłącznik), aby zapewnić ochronę zwarciovą i selektywność, ponieważ sam rozłącznik nie ma znamionowej zdolności wyłączenia zwarcia.

Różnicę funkcjonalną między rozłącznikiem a odłącznikiem podkreśla wymaganie IEC 60947-3, że odłącznik może wykonywać łączenia jedynie przy prądach znikomo małych i bez różnicy potencjałów między zaciskami, podczas gdy rozłącznik jest oceniany dla określonej kategorii obciążenia i ma przypisane prądy łączeniowe oraz trwałość łączeniową. W układach fotowoltaicznych i DC stosuje się rozłączniki o specjalnych parametrach dla prądu stałego i podwyższonych napięć z odpowiednimi układami gaszenia łuku i oznaczeniami zgodnymi z IEC 60947-3 dla zastosowań PV.

2.2.3. Wyłącznik

Wyłączniki są łącznikami zdolnymi do załączania, prowadzenia i wyłączania prądów w warunkach normalnych, przeciążeniowych i zwarciovych, a ich dobór i ocena opierają się na parametrach zdolności zwarciovych oraz charakterystykach czasowo-prądowych i selektywności. W sieciach SN/WN wyłączniki próżniowe (VCB) i gazowe (SF₆) realizują gaszenie łuku odpowiednio w próżni lub w medium SF₆, przy czym normy IEC 62271-100 określają wymagania dotyczące wyłączników WN/SN.

Wyłączniki próżniowe charakteryzują się niską energią łuku, bardzo szybką rekonwalescencją dielektryczną szczeliny, hermetycznymi komorami niezależnymi od warunków środowiskowych i wysoką trwałością łączeniową, co przekłada się na niskie wymagania obsługowe w zastosowaniach SN oraz w aplikacjach specjalnych. Wyłączniki SF₆ wykorzystują wysoką elektrojemność i właściwości gaszące gazu do przerywania dużych prądów w szerokim zakresie napięć, jednak wymagają nadzoru szczelności i gospodarki gazowej, co jest uwzględniane w kryteriach doboru i eksploatacji w stacjach WN/NN. Niezależnie od technologii gaszenia, zapewnienie funkcji zabezpieczeniowych na poziomie SN/WN opiera się na współpracy wyłącznika z przekaźnikami zabezpieczeniowymi i układami automatyki pola/stacji, a w nn na właściwym doborze wyzwalaczy i koordynacji selektywnej zgodnie z wytycznymi norm i producentów.



W związku z najnowszymi wytycznymi rezygnuje się ze stosowania wyłączników SF6 jednak ze względu na powszechne użytkowanie zdecydowano się zamieścić informację ich dotyczącą.

2.3. Zjawiska fizyczne związane z procesem łączenia

Ciepłne działanie prądu

Analizując nagrzewanie przewodów prądowych w aparatach elektrycznych, należy najpierw zidentyfikować przyczynę tego zjawiska, a następnie ustalić kryteria dopuszczalnej temperatury nagrzania. Głównym źródłem generowanego ciepła są straty Joule'a, które wynikają z przepływu prądu przez tor prądowy. Dodatkowo, konieczne jest uwzględnienie możliwego nagrzewania związanego z kontaktem elementów oraz wpływem otoczenia.

Obliczenia termiczne torów prądowych wykonuje się dla dwóch głównych przypadków: ciągłego nagrzewania pod wpływem prądów roboczych oraz krótkotrwałych prądów zwarciovych. W pierwszym przypadku ilość ciepła wydzielanego w przewodach równoważy się z ilością ciepła oddawanego do otoczenia. W obu sytuacjach podstawowym kryterium dopuszczalnego stanu cieplnego są ustalone maksymalne temperatury poszczególnych elementów toru prądowego, które nie mogą zostać przekroczone, aby zapewnić bezpieczną i niezawodną pracę aparatu.

Temperatura dopuszczalna przy krótkotrwałym nagrzewaniu torów prądowych aparatów może być wyższa niż przy nagrzewaniu ciągłym, ponieważ krótkotrwałe nagrzanie wywołuje mniejsze negatywne skutki.

Dopuszczalne wartości temperatur torów prądowych określone są przez:

- wytrzymałość mechaniczną elementów toru,
- rezystancję styków,
- wytrzymałość cieplną izolacji otaczającej tor prądowy.

Wzrost temperatury materiału przewodzącego obniża jego wytrzymałość mechaniczną.

W zakresie temperatur do około 300 stopni Celsjusza rezystancja styków wzrasta wraz z temperaturą z powodu większej rezystywności materiału stykowego. Dodatkowo, jeśli materiał styków ulega utlenianiu, zwiększona temperatura przyspiesza ten proces, co również prowadzi do wzrostu rezystancji styków.

W przypadku, gdy obok toru prądowego znajduje się materiał izolacyjny, dopuszczalna temperatura, która decyduje o nagrzewaniu, zazwyczaj jest ograniczona wartością maksymalnej dopuszczalnej temperatury izolacji. Podwyższenie temperatury izolacji powoduje wzrost strat dielektrycznych, co może prowadzić do uszkodzenia izolacji na skutek przegrzania termicznego. Na tej podstawie ustalono maksymalne dopuszczalne temperatury dla poszczególnych elementów toru prądowego, które są określone i ujęte w obowiązujących normach technicznych.

Ilość wydzielanego ciepła można obliczyć według uproszczonego wzoru

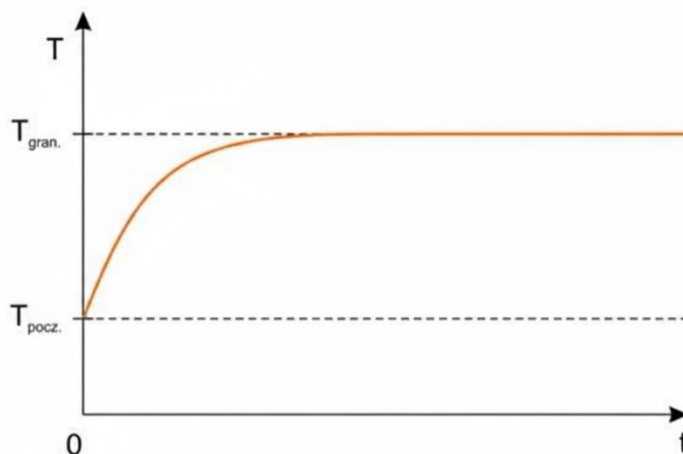
$$Q = I^2 R t \quad (4)$$

gdzie:

Q – ilość ciepła; I – prąd obciążenia; R – rezystancja przewodnika; t – czas przepływu prądu

Wzór jasno wskazuje, że ilość wytwarzanego ciepła (Q) rośnie wraz ze wzrostem wartości prądu (I), rezystancji przewodu (R) oraz czasu (t) przepływu prądu.

[Tekst alternatywny: Wykres wzrostu temperatury w funkcji czasu. Krzywa startuje z poziomu temperatury początkowej i szybko rośnie, następnie przechodzi w łagodne nasycenie, zbliżając się asymptotycznie do poziomu granicznego.; oś pionowa temperatura, oś pozioma czas.]



Rys. 16. Charakterystyka nagrzewania się przewodu. [13]

Łuk elektryczny

Łuk elektryczny to zjawisko samoistnego wyładowania mającego bardzo dużą gęstość prądu, które najczęściej pojawia się podczas przerywania obwodów prowadzących znaczne prądy elektryczne. Powstaje w wyniku procesu, w którym wyładowanie jest podtrzymywane dzięki samoistnej jonizacji przestrzeni pomiędzy



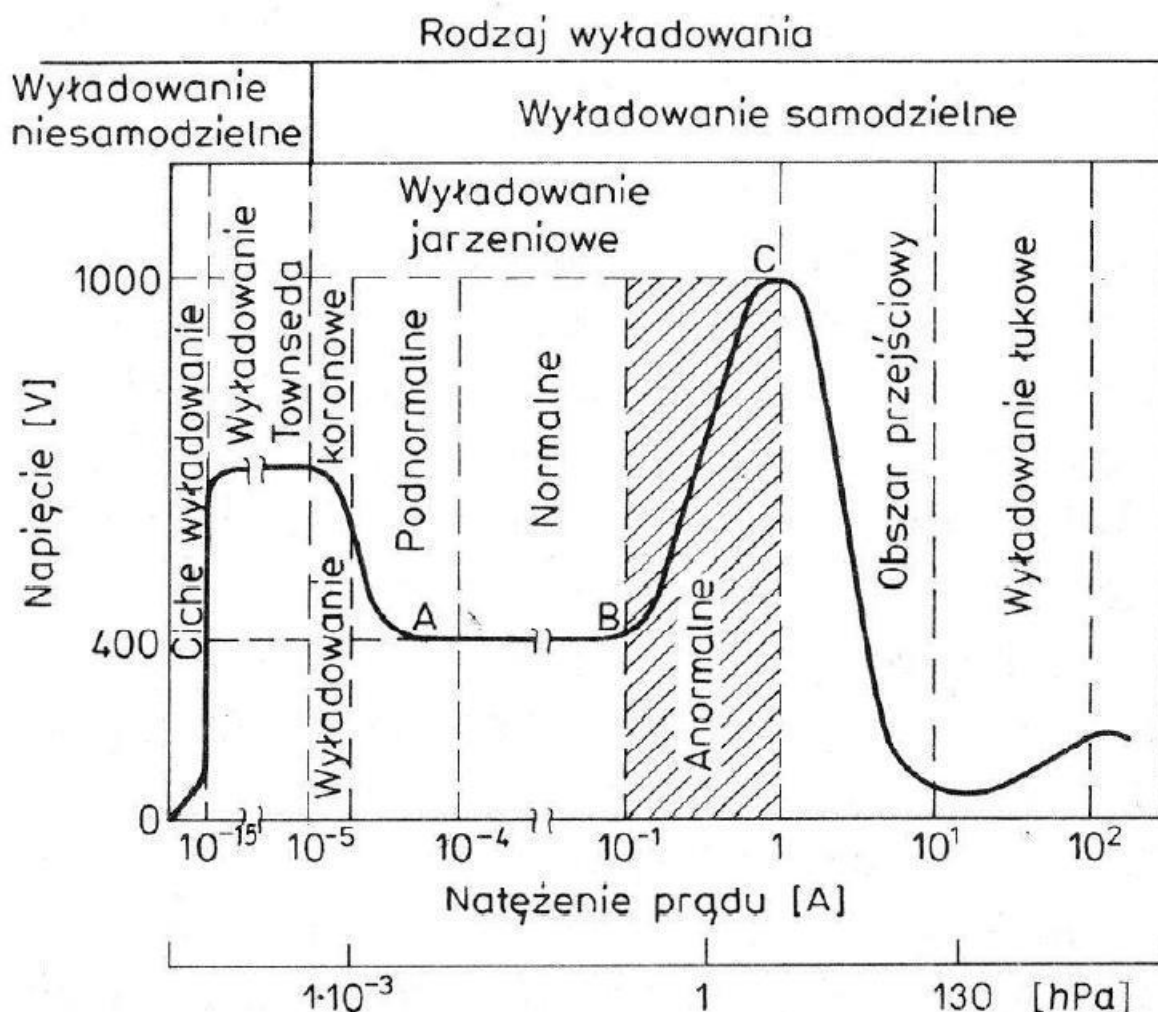
elektrodami. Przewodnictwo gazu jest możliwe dzięki obecności swobodnych elektronów — w warunkach typowych poruszają się one chaotycznie, jednak pod wpływem pola elektrycznego zaczynają być przyspieszane. Osiągając odpowiednią energię podczas zderzeń, mogą wybijać z atomów obojętnych kolejne elektrony, co prowadzi do jonizacji nazywanej jonizacją zderzeniową.

Podobny efekt wywołuje jonizacja termiczna, w której energia niezbędna dla jonizacji pochodzi z wysokiej temperatury — proces rozpoczyna się w temperaturach rzędu $10\,000^{\circ}\text{C}$. Oba opisane procesy występują na całej objętości gazu, stanowiąc przykłady tzw. jonizacji objętościowej.

Łuk elektryczny jest samopodtrzymującym się wyładowaniem gazowym o dużej gęstości prądu i małej różnicy potencjałów, w którym plazma łukowa ma temperaturę rzędu kilku do kilkunastu tysięcy kelwinów, a nośniki ładunku dostarczane są m.in. przez emisję termoelektronową i parowanie materiału elektrod. Charakterystyka prądowo - napięciowa łuku wykazuje w pewnym zakresie ujemną rezystancję różniczkową, przez co stabilizacja wymaga elementu balastowego lub warunków ograniczających prąd.

Napięcie łuku składa się z przybliżenie stałych spadków na katodzie i anodzie oraz spadku w kolumnie łukowej proporcjonalnego do długości. Gaszenie realizuje się przez wydłużanie i chłodzenie kolumny, zwiększanie ciśnienia, wydmuch podłużny, rozdział na komory dejonizacyjne, medium o dużej zdolności do pochłaniania energii np. SF_6 lub próżnię. Dynamikę przewodności łuku w procesach łączeniowych opisują modele energetyczne, które równoważą moc doprowadzaną i moc strat do otoczenia, pozwalając przewidywać skłonność do ponownego zapłonu oraz wymagania dla szybkości wzrostu dielektryczności po wygaśnięciu.

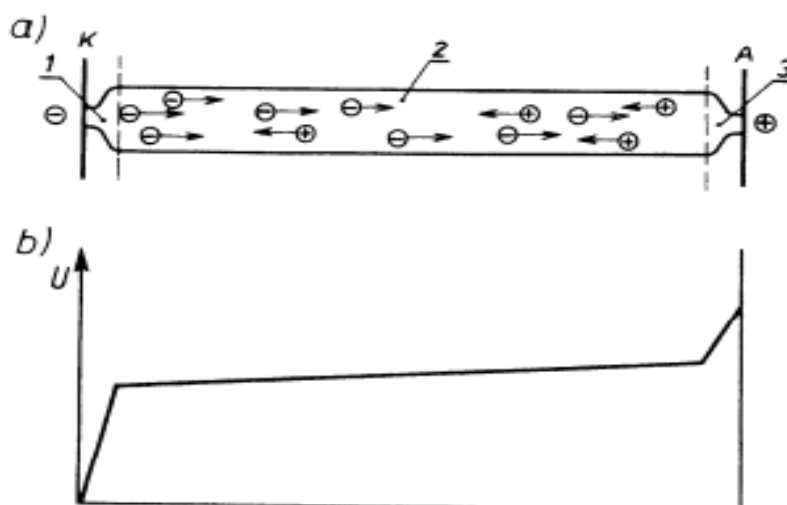
[Tekst alternatywny: Wykres napięcie – prąd, dla wyładowań w gazach z podziałem na rodzaje wyładowania. Oś pionowa: napięcie [V] (0–1000), oś pozioma: natężenie prądu [A] w skali logarytmicznej od 10^{-15} do 10^2 ; u dołu oś pomocnicza ciśnienia od $1 \cdot 10^{-3}$ do 130 hPa. Lewa część opisuje wyładowanie niesamodzielne: ciche, koronne i Townsend'a; środkowa – wyładowanie samodzielne jarzeniowe: podnormalne (punkt A), normalne (płaskie), anormalne (zaciemniony obszar między B a C); prawa – obszar przejściowy i wyładowanie łukowe. Krzywa pokazuje spadek napięcia przy wzroście prądu w jarzeniu oraz gwałtowny spadek przy przejściu do łuku.]



Rys. 17. Charakterystyka prądowo - napięciowa wyładowania elektrycznego w argonie [15].

Łuk prądu stałego

[Tekst alternatywny: Dwa rysunki ilustrujące przewodzenie prądu w przewodzie. a) Przekrój prostego przewodnika 2 między katodą 1 (po lewej) i anodą 3 (po prawej); w środku zaznaczone swobodne elektrony poruszające się w prawo oraz jony dodatnie w lewo, strzałki pokazują kierunki ich ruchu. b) Charakterystyka napięciowa U : szybki wzrost napięcia od zera, następnie niemal liniowy łagodny przyrost, a na końcu niewielkie załamanie ku większym wartościom.]



Rys. 18. Ruch elektronów i charakterystyka napięciowa łuku prądu stałego [11].

W łuku prądu stałego można wyróżnić trzy charakterystyczne strefy:

- 1 - przykatodową
- 2 - kolumnę łukową
- 3 - przyanodową

Strefa przykatodowa o długości rzędu 10^{-4} cm cechuje się dużym spadkiem napięcia na poziomie około 10 V, co powoduje powstanie silnego pola elektrycznego o natężeniu sięgającym 10^7 V/m (10^5 V/cm). Tak intensywne pole wywołuje zjawisko autoemisji elektronów z powierzchni katody, a bardzo wysoka temperatura łuku prowadzi dodatkowo do termoemisji elektronów i intensywnej termojonizacji gazu w tej strefie [11].

Strefa przyanodowa, w przeciwieństwie do katodowej, charakteryzuje się brakiem ładunków dodatnich, ponieważ anoda nie uwalnia jonów. Te, które powstają w jej pobliżu, migrują w stronę katody. Spadek napięcia wokół anody jest nieco niższy niż w strefie katodowej.

Kolumna łukowa, będąca środkową częścią wyładowania, osiąga bardzo wysokie temperatury sięgające nawet $15\,000^{\circ}\text{C}$. W tej części łuku dominującym mechanizmem jonizacji jest termojonizacja, czyli uwalnianie elektronów pod wpływem energii cieplnej zderzających się cząstek gazu.

Istnieją dwa podstawowe sposoby gaszenia łuku prądu stałego:

1. Wydłużenie łuku polega na przesunięciu charakterystyki łuku w kierunku wyższych wartości napięcia. Osiąga się to przez odpowiednie rozwarcie

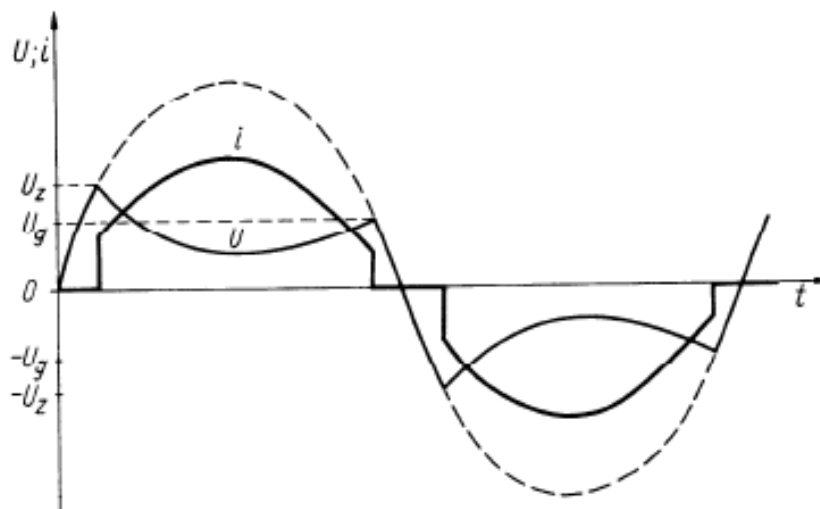
styków łącznika na właściwą odległość, odpowiednie ukształtowanie powierzchni styków, a także poprzez mechanizmy wydmuchu łuku.

2. Zwiększenie rezystancji obwodu powoduje obniżenie charakterystyki $E-iR$ obwodu, co również wpływa na warunki gaszenia łuku.

Te działania mają na celu utrudnienie podtrzymywania łuku elektrycznego, co przyczynia się do skuteczniejszego przerywania obwodu i eliminacji zjawiska łukowego.

Łuk prądu przemiennego

[Tekst alternatywny: Wykres przebiegów czasowych napięcia i prądu łuku prądu przemiennego. Krzywa przerywana to przebieg napięcia zasilającego obwód. Napięcie zapłonu jest większe od napięcia gaszenia.]



Rys. 19. Charakterystyka przebiegu napięcia i prądu łuku przemiennego w czasie [11].

gdzie:

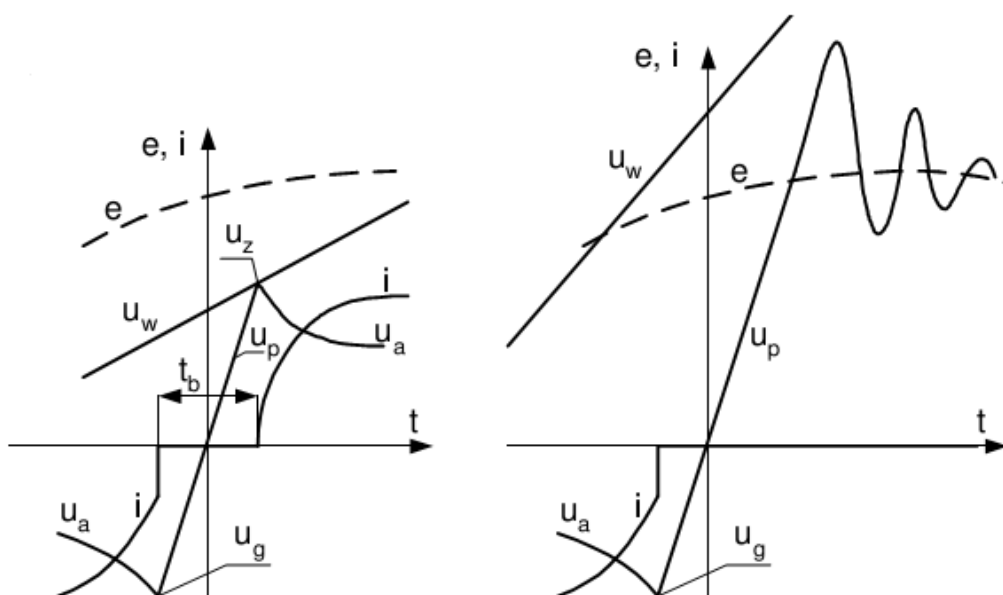
- - - linia przerywana przebieg napięcia zasilającego; U_z – napięcie zapłonu;
 U_g – napięcie gaszenia; i – przebieg prądu.

Prąd przemienny zmienia kierunek przepływu w sposób ciągły, przez co okresowo jego wartość osiąga zero. W tych chwilach łuk elektryczny gaśnie, a po wzroście prądu ponownie się zapala. Napięcie potrzebne do wywołania zapłonu łuku (U_z) jest wyższe od napięcia, przy którym łuk gaśnie (U_g).

W obwodach o zdecydowanej przewadze rezystancji, podczas przejścia prądu przez zero – a więc podczas wygaszenia łuku – napięcie również dąży do zera. Natomiast w układach, w których dominującym składnikiem jest reaktancja, napięcie podczas tego przejścia utrzymuje się na poziomie zbliżonym do wartości maksymalnej.

Z tego powodu wyładowanie łukowe łatwiej gasić w obwodach, gdzie rezystancja jest większa niż reaktancja. Takie warunki sprzyjają szybkiej dejonizacji kanału łuku i trwałemu jego wygaśnięciu.

[Tekst alternatywny: Dwa wykresy czasowe napięcia, prądu i impulsu udarowego. Lewy rysunek: przerywana krzywa e to napięcie źródła; prosta u_w to przebieg wzrostu wytrzymałości przerwy połukowej; w chwili t_b napięcie u osiąga próg u_z i następuje przewodzenie – pojawia się stromy impuls prądu i oraz wzrost napięcia u_p , po czym prąd i i napięcie u_a maleją. Prawy rysunek: gwałtowny impuls u_p w chwili przełączenia, następnie oscylacje napięcia e wokół prostej u_w ; poniżej pokazano krótkotrwały impuls prądu oraz napięcie powrotnego na stykach u_g .]



Rys. 20. Charakterystyka gaszenia łuku prądu przemiennego [16].

gdzie,

e – przebieg siły elektromotorycznej źródła; u_w – przebieg wzrostu wytrzymałości przerwy połukowej; u_p – przebieg napięcia powrotnego na stykach

Gaszenie łuku w łącznikach, które pracują na prądzie przemiennym, polega na zapobieganiu ponownemu zapłonowi łuku po każdym przejściu prądu przez zero. Łuk wygasa wtedy, gdy krzywa napięcia powrotnego u_p , pojawiająca się na rozchodzących się stykach, nie przecięła się z krzywą wzrostu wytrzymałości połukowej u_w . Jednak, jeśli dojdzie do przecięcia tych krzywych, łuk zapala się ponownie i wyładowanie trwa dalej przez następny półokres. Kształt krzywej wytrzymałości połukowej $u_w=f(t)$ jest zależny od czasu trwania przerwy bezprądowej t_b .



Podsumowując, skuteczne gaszenie łuku wymaga zapewnienia, by napięcie powrotne nie przecięło charakterystyki odporności łuku, co umożliwia trwałe wygaszenie wyładowania po zaniku prądu.

Gaszenie łuku elektrycznego prądu przemiennego

Metody gaszenia łuku:

- Szybkie (migowe) rozdzielanie styków
- Wydłużenie łuku poprzez odpowiednie ukształtowanie styków i wydmuch elektromagnetyczny
- Wydłużenie łuku w przegrodach falistych
- Podział łuku na części między płytkami dejonizacyjnymi
- Chłodzenie łuku w dyszach szczelinowych
- Chłodzenie łuku poprzez wydmuch gazu
- Chłodzenie łuku w oleju lub innych cieczach
- Zastosowanie próżni

Jonizacja

- Nośniki elektryczności powstają w gazie w wyniku działania jonizatorów zewnętrznych jak i wewnętrznych
- Wyróżnia się następujące procesy jonizacyjne:
 - jonizacja zderzeniowa elektronów
 - fotojonizacja
 - jonizacja powierzchniowa

Jonizacja zderzeniowa elektronowa zachodzi, gdy swobodne elektrony zyskują w polu elektrycznym wystarczającą energię kinetyczną, poruszając się na drodze swobodnych elektronów między zderzeniami. Jonizacja inicjuje się, gdy energia kinetyczna elektronu (zależna od jego masy m_e i prędkości v_e) przekroczy energię jonizacyjną cząsteczek gazu (W_j).

$$\frac{m_e v_e^2}{2} \cdot \frac{m_{cz}}{m_e + m_{cz}} \geq W_j \quad (5)$$

gdzie,

m_e – masa elektronu, v_e – średnia prędkość elektronu przed zderzeniem, m_{cz} – masa cząsteczki powietrza, W_j – energia jonizacji cząsteczki powietrza

Po pierwszym zderzeniu powstają trzy nośniki ładunku: jeden jon oraz dwa elektrony, które z kolejnymi zderzeniami mnożą się lawinowo — po drugim zderzeniu ich liczba wzrasta do siedmiu, a po trzecim do piętnastu.



Ten kaskadowy proces jonizacji zderzeniowej jest podstawą powstawania lawiny elektronowej, co jest kluczowym mechanizmem przy rozwijaniu się wyładowań elektrycznych w gazach.

Jonizacja termiczna, może zachodzić wówczas, gdy energia cząsteczek znajdujących się w ruchu cieplnym przekracza energię jonizacji. Polega na wybijaniu elektronów z cząsteczek gazu przez wzajemne zderzanie się. Wymaga odpowiedniej wartości energii kinetycznej i zależy od temperatury gazu. Aby zaszła jonizacja termiczna musi zająć zależność opisana wzorem (6).

$$\frac{mv^2}{2} = \frac{3kT}{2} \geq W_j \quad (6)$$

gdzie,

$k = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ [J} \cdot \text{K}^{-1}]$ – stała Boltzmanna, T – temperatura gazu [K]

Fotojonizacja polega na jonizacji atomów lub cząsteczek gazu za pomocą promieniowania elektromagnetycznego. Warunkiem zajścia tego procesu jest to, aby energia fotonu była wyższa niż energia jonizacyjna danej cząsteczki lub atomu. Dzięki temu foton może oderwać elektron z atomu, co prowadzi do powstania jonu i swobodnego elektronu.

$$h \cdot f \geq W_j \quad (7)$$

gdzie,

$h = 6,625 \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$ – stała Plancka, f – częstotliwość promieniowania.

Przechodząc na długość fali $\lambda = c/v$ warunek można wyrazić również wzorem (8):

$$\lambda \leq \frac{c \cdot h}{W_j} \quad (8)$$

gdzie,

$c = 300 \text{ m}/\mu\text{s}$ - prędkość światła

Promieniowanie widzialne, obejmujące zakres długości fal od około 380 do 780 nm, nie ma właściwości jonizujących. Najniższe częstotliwości promieniowania zdolnego do jonizacji mieszczą się w nadfiolecie, czyli tuż poza zakresem widzialnym.

Promieniowanie rentgenowskie oraz promienie alfa, beta, gamma i promieniowanie kosmiczne wywołują znacznie silniejszą jonizację niż nadfiolet. Charakteryzują się one wyższą energią i zdolnością do wybijania elektronów z atomów, co skutkuje tworzeniem ładunków jonowych w materiałach.

Jonizacja powierzchniowa zachodzi na skutek uwalniania elektronów z katody. W materiale metalicznym występują dwa typy elektronów: elektrony związane z jądrami



atomów oraz elektrony swobodne znajdujące się w paśmie przewodnictwa na różnych poziomach energetycznych. Aby elektrony swobodne mogły opuścić metal, należy dostarczyć im minimalną energię zwaną pracą wyjścia (pracą swobodną).

Elektrony mogą być wyzwalane z katody poprzez różne mechanizmy:

- naświetlanie powierzchni metalu, zwane fotoemisją,
- podgrzewanie katody, co prowadzi do termoemisji,
- działanie silnego pola elektrycznego, powodujące autoemisję, czyli emisję zimną,
- bombardowanie katody przez jony dodatnie, które wywołuje emisję jonową.

Te procesy dotyczą elektronów uwalnianych z powierzchni metalu, a ich zachodzenie warunkuje powstawanie wyładowań i przewodnictwo elektryczne w układach z jonizacją powierzchniową.

Dejonizacja

Dejonizacja to proces zmniejszenia liczby nośników ładunku elektrycznego w przestrzeni między elektrodami. Można wyróżnić trzy główne mechanizmy dejonizacji:

- a) Rekombinacja – łączenie się naładowanych przeciwnie cząstek, czyli jonów i elektronów, co prowadzi do ich neutralizacji.
- b) Dyfuzja – jest to ruch elektronów i jonów z obszarów o wysokim stężeniu do miejsc, gdzie koncentracja tych cząstek jest mniejsza.
- c) Absorpcja – polega na przechwycie elektronów przez cząsteczki gazu, co także zmniejsza ilość swobodnych nośników ładunku.

Te procesy wspólnie przyczyniają się do spadku jonizacji w gazie, co jest istotne dla wygaszenia wyładowań elektrycznych.

Rekombinacja to proces neutralizacji cząstek o przeciwnych ładunkach, który zachodzi w wyniku ich zderzeń, takich jak elektron z jonem dodatnim oraz jon ujemny z jonem dodatnim. W trakcie rekombinacji następuje redukcja energii wewnętrznej cząstek, co skutkuje emisją energii promienistej.

Dyfuzja jest zjawiskiem polegającym na samorzutnym przemieszczaniu się naładowanych cząstek, takich jak jony i elektrony, z obszarów o większej koncentracji do miejsc o mniejszym stężeniu, wskutek chaotycznych ruchów termicznych. W procesie tym elektronowy współczynnik dyfuzji jest znacznie wyższy niż jonowy ze względu na większą średnią drogę swobodną i średnią prędkość ruchu.

W przypadku wyładowań elektronicznych występuje często dyfuzja dwuskładnikowa (ambipolarna), w której odpowiednio zbalansowane ruchy jonów dodatnich i elektronów prowadzą do powstania pól elektrycznych wewnętrznych, hamujących lub przyspieszających cząstki w zależności od ich prędkości i ładunku.

Rekombinacja i dyfuzja są kluczowymi mechanizmami dejonizacji, wpływającymi na zmniejszenie ładunków elektrycznych w gazach jonizowanych i tym samym na wygaszanie wyładowań elektrycznych.

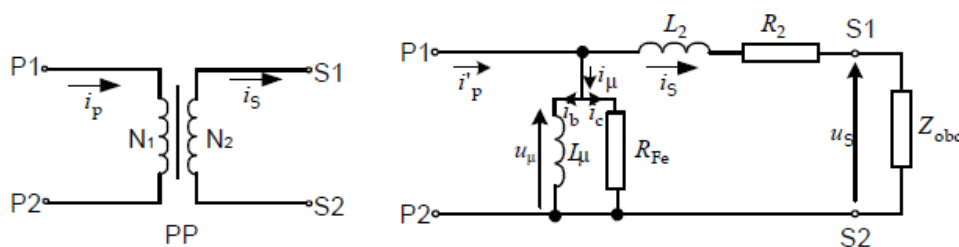
3. Przekładniki pomiarowe

3.1. Przekładniki prądowe

Przekładniki prądowe są urządzeniami pomiarowymi przetwarzającymi duże prądy pierwotne na bezpieczne prądy wtórne (najczęściej 1 A lub 5 A) z zapewnieniem izolacji galwanicznej i kontrolowanych błędów pomiarowych.

Zasada działania i budowa

[Tekst alternatywny: Dwa schematy transformatora. Po lewej ideowy przekładnika prądowego: uzwojenie pierwotne N_1 między zaciskami P1–P2 z prądem i_p oraz uzwojenie wtórne N_2 między S1–S2 z prądem i_s . Po prawej model zastępczy: w gałęzi głównej kolejno indukcyjność rozproszenia L_2 , rezystancja uzwojenia R_2 i obciążenie Z_{obc} na zaciskach S1–S2 z napięciem u_s i prądem i_s ; równoległe gałąź magnesująca: indukcyjność L_μ z prądem i_μ rozdzielonym na i_b i i_c oraz rezystancja strat w żelazie R_{Fe} ; wejście od strony P1–P2 z prądem i_p i napięciem u_μ .]



Rys. 21. Schemat ideowy i zastępczy przekładnika prądowego.

Zaciski znajdujące się po stronie pierwotnej przekładnika oznaczają się jako P1 i P2 (w starszych polskich wersjach spotyka się oznaczenia K i L), natomiast po stronie wtórnej jako S1 i S2 (odpowiednio k i l w starszych wykonaniach). Oznaczenie to wskazuje, że kiedy prąd płynie do zacisku P1 na stronie pierwotnej, wówczas proporcjonalny prąd wtórny wypływa z zacisku S1 na stronie wtórnej.



Indukcyjność oznaczona jako L_μ odpowiada za sprzężenie strumienia magnetycznego Φ_μ w rdzeniu ferromagnetycznym, który jest wspólny dla obu uzwojeń. Rezystancja R_{Fe} opisuje straty w rdzeniu, wynikające z efektów takich jak prądy wirowe oraz proces przemagnesowania (pętla histerezy). Wartości rezystancji i indukcyjności uzwojenia wtórnego oznaczono odpowiednio jako R_2 i L_2 .

Przekładnik prądowy jest specjalnym transformatorem, który służy do pomiaru wysokich wartości prądu poprzez sprowadzenie ich do poziomu bezpiecznego dla przyrządów pomiarowych. Składa się z dwóch uzwojeń: pierwotnego (N_1), przez które płynie mierzony prąd i_p , oraz wtórnego (N_2), przez które płynie prąd pomiarowy i_s . Prąd wtórny jest proporcjonalny do prądu pierwotnego i zależy od przekładni zwojowej (N_1/N_2).

Schemat po lewej stronie na rysunku 21 przedstawia uproszczony model transformatora – przekładnika prądowego, a po prawej widoczny jest szczegółowy schemat zastępczy uwzględniający elementy rzeczywiste, takie jak:

- indukcyjność rozproszenia uzwojenia wtórnego L_2
- rezystancja uzwojenia wtórnego R_2
- impedancja obciążenia wtórnego Z_{obc}
- uzwojenie magnesujące L_μ
- rezystancja strat rdzeniowych R_{Fe}

Prąd wejściowy dzieli się na prąd magnesujący i_μ oraz prąd wtórny i_s . Prąd magnesujący, nie przechodzi do obwodu wtórnego, lecz służy do wytworzenia zmiennego strumienia magnetycznego w rdzeniu, indukując siłę elektromotoryczną w uzwojeniu wtórnym. Prąd wtórny płynie przez rezystancję uzwojenia wtórnego oraz obciążenie pomiarowe.

W eksploatacji oraz doborze krytyczne są: obciążenie wtórne w VA, współczynnik bezpieczeństwa przyrządów FS (dla przekładników pomiarowych), współczynnik granicy dokładności ALF (dla przekładników zabezpieczeniowych).



Klasy dokładności i zastosowanie

Tabela 8. Klasy dokładności przekładników prądowych pomiarowych

Klasa	Błąd prądowy [±%]				Błąd kątowy [min]			
	5	10	100	120	5	10	100	120
0,1	0,4	0,2	0,1	0,1	15	8	5	5
0,2	0,75	0,35	0,2	0,2	30	15	10	10
0,5	1,5	0,75	0,5	0,5	90	45	30	30
1	3,0	1,5	1,0	1,0	180	90	60	60

Tabela 9. Specjalne klasy dokładności przekładników prądowych pomiarowych [PN-EN 61869-2]

Klasa	Błąd prądowy [±%]					Błąd kątowy [min]				
	1	5	10	100	120	1	5	10	100	120
0,2s	0,75	0,35	0,2	0,2	0,35	30	15	10	10	10
0,5s	1,5	0,75	0,5	0,5	0,75	90	45	30	30	30

Klasa	Błąd prądowy [±%]					Błąd kątowy [min]				
	1	5	10	100	120	1	5	10	100	120
0,2s	0,75	0,35	0,2	0,2	0,35	30	15	10	10	10
0,5s	1,5	0,75	0,5	0,5	0,75	90	45	30	30	30

Badania dokładności wykonuje się dla obciążenia znamionowego dla różnych wartości prądów znamionowych 5, 20, 100 i 120%.

Tabela 10. Klasy dokładności przekładników prądowych do zabezpieczeń.

Klasa dokładności	Błąd prądowy ΔI	Błąd kątowy δ_i	Błąd całkowity ε_c
	%	min	%
5P	1	60	5
10P	3	-	10
TPX	0,5	30	10
TPY	1,0	60	10
TPZ	1,0	180±18	10

Współczynnik graniczny dokładności ALF (5, 10, 15, 20 i 30) określa stosunek znamionowego granicznego prądu pierwotnego do prądu znamionowego. Dla przekładników pomiarowych istotny jest natomiast współczynnik bezpieczeństwa FS (≤ 5 lub ≤ 10), ograniczający prąd wtórny przy przeciążeniach, aby nie uszkodzić przyrządów.

$$K_{ALF} \geq 1,5 \frac{I_{nast}(Z_2 + Z_{obcn})}{I_{sn}(Z_2 + Z_{obcrz})} \quad (9)$$



$$K_{ALF} \geq 1,5 \frac{I_{p1}(Z_2 + Z_{obcn})}{I_{pn}(Z_2 + Z_{obcrz})} \quad (10)$$

gdzie,

Z_2 - impedancja uzwojenia wtórnego, Z_{obcrz} – impedancja obciążenia obwodu wtórnego, Z_{obcn} – impedancja obciążenia znamionowa, I_{p1} - największa wartość skuteczna prądu pierwotnego przy zwarcu na końcu pierwszej strefy, I_{pn} – znamionowy prąd pierwotny

Wzór (10) stosuje się dla zabezpieczeń nadprądowych zwłoczących i bezzwłoczących o klasie dokładności 5P lub 10P. Natomiast zależność opisaną wzorem (11) stosuje się dla zabezpieczenia odległościowego i klasach dokładności 5P lub TPX, TPY, TPZ.

Dla zabezpieczeń różnicowych wymagania zależą od struktury układu i sposobu realizacji pomiaru. Stosuje się specjalną klasę dokładności TPS.

Błędy i parametry metrologiczne

- Błąd prądowy

$$\Delta I_{\%} = \frac{K_I I_2 - I_1}{I_1} 100\% \quad (11)$$

Błąd prądowy to różnica między wartością skuteczną prądu wtórnego pomnożonego przez przekładnię znamionową, a wartością skuteczną prądu pierwotnego wyrażoną w procentach prądu pierwotnego. Błąd prądowy jest zawsze ujemny przy obciążeniu indukcyjnym, dodatni przy pojemnościowym.

- Błąd kątowy: różnica faz między prądem pierwotnym i wtórnym; istotna przy pomiarach mocy i energii.

$$\delta_i = \arg(I_1) - \arg(I_2)$$

Błąd kątowy należy uznać za dodatni, jeżeli wektor prądu wtórnego wyprzedza wektor prądu pierwotnego.

- Błąd całkowity

$$\varepsilon_c = \frac{100}{I_1} \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T (K_I i_2 - i_1)^2 dt}$$



gdzie,

I_1 -wartość skuteczna prądu pierwotnego; i_1, i_2 - wartości chwilowe prądu pierwotnego i wtórnego

Warunki doboru

- Warunek doboru pierwotnego prądu znamionowego:

Prąd obciążenia wynosi:

$$I_{obc} = \frac{P_{EL}}{\sqrt{3} \cdot U_n \cdot \cos \varphi} \quad (12)$$

$$0,1 I_n < I_{obc} < 1,2 I_n \quad (13)$$

- Warunek doboru prądu wtórnego

$$I_{2obl} \leq I_{2n} \quad (14)$$

gdzie,

I_{2obl} – maksymalny obliczeniowy prąd obciążeniowy po stronie wtórnej

$$I_{2obl} = \frac{I_{1obl}}{\frac{I_{1n}}{I_{2n}}} \quad (15)$$

- Warunek wytrzymałości zwarciowej:

$$I_{th} > I_{ths} \quad (16)$$

- Warunek znamionowego prądu dynamicznego.

$$I_{dyn} \geq i_p \quad (17)$$

- Warunek mocowy

$$0,25 \cdot S_n < S < S_n \quad (18)$$



3.2. Przekładniki napięciowe

Przekładniki napięciowe dzielą się na indukcyjne i pojemnościowe. Pierwsze są klasycznymi transformatorami pomiarowymi pracującymi blisko stanu jałowego, drugie łączą dzielnik pojemnościowy z częścią indukcyjną i często służą także do sprzęgania telekomunikacji energetycznej na poziomach WN/NN. Dobór opiera się na klasie dokładności (pomiarowe i zabezpieczeniowe), współczynniku napięciowym, mocy znamionowej i wymaganiach izolacyjnych, a układy połączeń w SN/WN obejmują konfiguracje jedno- i dwubiegunowe oraz układy otwartego trójkąta do pomiaru składowej zerowej $3U_0$ przy zwarciach doziemnych

Wskazówki doboru i eksploatacji

Zadania:

- dostosowanie napięcia do poziomu odpowiedniego dla zabezpieczeń,
- przetwarzanie napięć pierwotnych na znormalizowane wartości wtórne,
- odizolowanie urządzeń pomiarowych i zabezpieczeniowych od napięcia pierwotnego,
- galwaniczne odizolowanie od siebie napięć wtórnych z różnych przekładników.

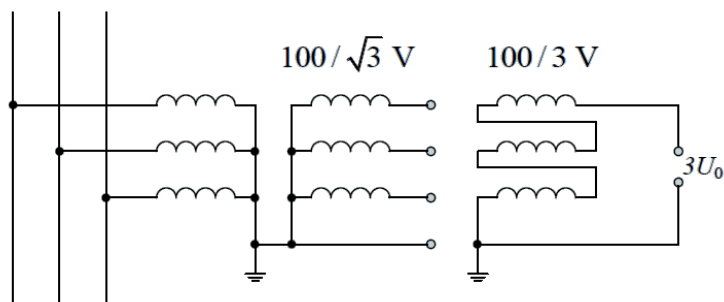
Znormalizowane napięcia po stronie wtórnej:

100 V dla jednej fazy, $\frac{100}{\sqrt{3}}$ V dla trzech faz oraz $\frac{100}{3}$ V dla układu trójkątnego.

Rodzaje i zasada działania

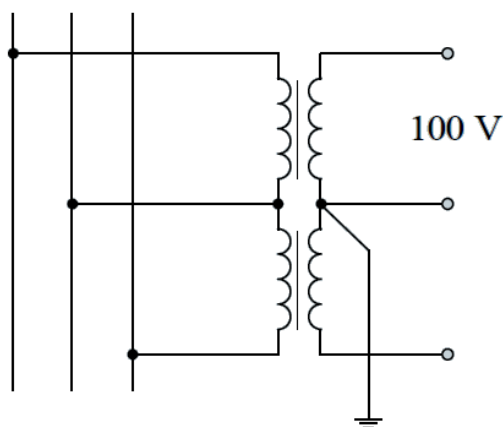
Przekładniki indukcyjne są jednofazowymi transformatorami napięciowymi, które skalują napięcie pierwotne do standardowych wartości wtórnych (typowo 110 V lub $110/\sqrt{3}$ V) przy pracy z małym obciążeniem i zachowaniu określonych błędów przekładni i kąta fazowego w zakresie 0,8–1,2 U_n .

[Tekst alternatywny: Schemat przedstawiają po lewej trzy fazy sieci; w środku układ o napięciu wtórnym $100/\sqrt{3}$ V z uzwojeniami połączonymi w gwiazdę i uziemionym punktem neutralnym; po prawej układ $100/3$ V z uzwojeniami połączonymi w otwartą trójkąt do pomiaru napięcia składowej zerowej $3U_0$.]



Rys. 22. Układ pełnej gwiazdy i otwartego trójkąta do pomiaru $3U_0$.

[Tekst alternatywny: Schemat przyłączenia przekładników napięciowych w sieci trójfazowej. Po lewej trzy przewody fazowe; po prawej strona wtórna o napięciu 100 V: dwa przekładniki połączone w układ otwartej trójkąta (V), z jednym węzłem uziemionym; wyprowadzone są trzy zaciski pomiarowe.]



Rys. 23. Układ niepełnej gwiazdy połączeń przekładników napięciowych.

Błędy i klasa dokładności przekładników napięciowych

- błąd napięciowy

$$\Delta U = \frac{K_I U_2 - U_1}{U_1} 100\% \quad (19)$$

- błąd kątowy

$$\delta_u = \arg(\underline{U}_2) - \arg(\underline{U}_1) \quad (20)$$



Tabela 11. Dopuszczalne wartości błędów przekładników napięciowych do celów zabezpieczeniowych

Klasa dokładności	Błąd napięciowy ΔU ($\pm\%$)	Błąd kątowy δ_u ($\pm\text{min}$)
3P	3,0	120
6P	6,0	240

Tabela 12. Klasy dokładności przekładników napięciowych do pomiarów.

Klasa dokładności	Błąd napięciowy ΔU ($\pm\%$)	Błąd kątowy δ_u ($\pm\text{min}$)
0,1	0,1	5
0,2	0,2	10
0,5	0,5	20
1,0	1,0	40
3,0	3,0	-

Uwagi eksploatacyjne i doborowe

- Warunek napięcia znamionowego:

$$U_{ns} < U_{nu} \quad (21)$$

$$15kV < 17,5 kV$$

- Warunek mocy

$$0,25 \cdot S_n < S < S_n \quad (22)$$

4. Literatura

- Stepan F., Wyłączniki mocy i aparatura łączeniowa niskiego napięcia: Katalog (<https://www.eaton.com/content/dam/eaton/products/low-voltage-power-distribution-controls-systems/low-voltage-switchgear/xenergy-main/polish/catalogs-page/polish-catalogs/eaton-circiut-breakers-catalog-pl-pl.pdf>, dostępny 15.08.2025)
- Instytut Mechatroniki i Systemów Informatycznych, Politechnika Łódzka. (2023). Instrukcja ćwiczenia 13: Badanie zabezpieczeń instalacji elektrycznych. (https://imsi.p.lodz.pl/sites/i25/files/2023-12/LAB_13.pdf, dostępny 15.08.2025)
- PN-EN 61008-1 Wyłączniki różnicowoprądowe bez zabezpieczenia nadprądowego (RCCB) — Część 1: Wymagania ogólne.



4. PN-EN 60898-1 Wyłączniki nadprądowe do użytku domowego i podobnego — Część 1: Wyłączniki do prądu przemiennego.
5. PN-EN 60617: Symbole graficzne stosowane w elektrotechnice.
6. PN-HD 60364-4-41 „Instalacje elektryczne niskiego napięcia — Część 4-41: Ochrona dla zapewnienia bezpieczeństwa — Ochrona przed porażeniem elektrycznym
7. PN-HD 60364-6 „Instalacje elektryczne niskiego napięcia — Część 6: Sprawdzanie (weryfikacja)
8. PN-HD 60364-5-53 „Instalacje elektryczne niskiego napięcia — Część 5-53: Dobór i montaż wyposażenia elektrycznego — Aparatura łączeniowa i sterownicza.
9. PN-HD 60364-7-xxx „Instalacje elektryczne niskiego napięcia — Część 7: Wymagania dotyczące specjalnych instalacji lub lokalizacji.
10. Kanał Elektryczny. Budowa i zasada działania wyłączników nadprądowych. (<https://kanalelektryczny.pl/budowa-i-zasada-dzialania-wylacznikow-nadpradowych/>, dostępny 15.08.2025)
11. Kotlarski, W., & Grad, J. (2013). Aparaty i urządzenia elektryczne. Wydawnictwa Szkolne i Pedagogiczne.
12. PN-EN 60617: Symbole graficzne stosowane w elektrotechnice.
13. Artur Szulc. Dlaczego przewód się nagrzewa? Prawo Joule'a. (<https://teoriaelektryki.pl/dlaczego-przewod-sie-nagrzewa-prawo-joulea/>, dostępny 15.08.2025)
14. Zespół autorów. (2020). Styczniki i przekaźniki [materiały dydaktyczne]. (https://zskarlino.pl/wp-content/uploads/2020/05/IITM_UiSM_Styczniki-i-przeka%C5%BAniki-12.05.pdf, dostępny 15.08.2025)
15. Burakowski T., Wierzchoń T. (1995). *Inżynieria powierzchni metali*, Wydawnictwo Naukowo-Techniczne. Warszawa.
16. Autor nieznany. (2020). Urządzenia elektryczne: Zestyki łączników elektrycznych [materiał dydaktyczny]. Politechnika Rzeszowska. (https://e-learning.prz.edu.pl/pluginfile.php/107198/mod_resource/content/1/Urz%C4%85dzenia_elektryczne_2020_N_2.pdf, dostępny 15.08.2025)