

OBCIĄŻALNOŚĆ CIEPLNA ORAZ ZABEZPIECZENIA NADPRĄDOWE PRZEWODÓW I KABLI¹

Problematyka zabezpieczeń przeciążeniowych oraz zabezpieczeń zwarciovych przewodów i kabli niskiego napięcia jest nierozdzielnie związana z ich roboczą i zwarciovą obciążalnością cieplną. Najpierw ustalić trzeba, jakie wartości prądu i w jakim czasie są dopuszczalne w warunkach roboczych i w warunkach zwarciovych, a potem zastanawiać się można, jak przewody zabezpieczyć przed nadmiernymi, niedopuszczalnymi obciążeniami cieplnymi. Dobrane zabezpieczenia nadprądowe powinny mieć prądy znamionowe bądź nastawcze i czasy działania jak najniższe, by skutecznie zabezpieczały chroniony obwód, ale na tyle wysokie, by przetrzymywały wszelkie prądy normalnego użytkowania (w tym prądy załączeniowe obwodu, np. prądy rozruchowe silników) i – poza obwodami odbiorczymi – działały wybiórczo z zabezpieczeniami na niższych stopniach rozdziału energii.

1. Temperatury obliczeniowe

Obliczeniowa temperatura otoczenia τ_0 jest to najwyższa temperatura powietrza otaczającego rozważane urządzenie elektryczne występująca stale lub okresowo, w normalnych warunkach użytkowania.

W przypadku pojedynczego urządzenia (aparatu, silnika, rozdzielnicy, trasy przewodów) można ją zmierzyć – w sytuacjach spornych – za pomocą trzech termometrów rozmieszczonych równomiernie wokół urządzenia, na średniej wysokości jego części przewodzących prąd, w odległości około 1 m od niego, po czym obliczyć średnią arytmetyczną otrzymanych wyników. Termometry należy chronić przed prądami powietrza i wpływem ciepła z obcych źródeł; najlepiej umieszczać je w pojemnikach zawierających około pół litra oleju, aby wskazania uniezależnić od krótkotrwałych wahań temperatury.

Wartość obliczeniowej temperatury otoczenia uwzględnia warunki klimatu naturalnego, a więc zależy od strefy klimatycznej, i w razie potrzeby uwzględnia dodatkowy przyrost temperatury z tytułu kryptoklimatu we wnętrzu pomieszczeń, w obudowach bądź w ciasnych przestrzeniach stropów podwieszanych albo szybów instalacyjnych. Wartości właściwe dla Polski i w uzgodnieniu ze stroną polską podane w normie IEC 60287-3-1/A1:1999 [16] są zestawione w tabl. 1.

Tablica 1. Obliczeniowa temperatura otoczenia τ_0 w Polsce

Rodzaj przewodów i warunki ich układania	τ_0 [°C]	
Przewody w pomieszczeniach	25	
Przewody izolowane	nie narażone na bezpośrednie nasłonecznienie	25
w przestrzeniach zewnętrznych	narażone na bezpośrednie nasłonecznienie	40
Kable w ziemi w zależności od pory roku		20 (15; 5)

Jeśli występują okoliczności uzasadniające przyjęcie wyższej temperatury niż podana w normie (np. pomieszczenie kotłowni, ciasne wnętrza rozdzielnic), należy to uczynić. W zasadzie nie

¹ W tekście artykułu wykorzystano materiały szkoleniowe przygotowane dla członków Kujawsko-Pomorskiej Okręgowej Izby Inżynierów Budownictwa (Bydgoszcz – Toruń – Włocławek, 25-26 kwietnia 2008 r.).

dopuszcza się przyjmowania temperatury niższej, bo przemawiające za tym przesłanki są złudne. Gdyby przewody we wnętrzu komory chłodniczej dobrać do temperatury utrzymywanej w niej w normalnych warunkach użytkowania, np. $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$, to nie dałoby się w ogóle przeprowadzić technologicznego rozruchu urządzeń po zakończeniu ich budowy lub remontu.

Nowsze normy międzynarodowe zawierają tablice obciążalności długotrwałej przewodów dla temperatury otaczającego powietrza (ang. *ambient air temperature*) $30\text{ }^{\circ}\text{C}$, występującej w krajach śródziemnomorskich, czyli w warunkach najbardziej niekorzystnych w Europie. Dla innych warunków podano współczynniki poprawkowe w tablicy 52-D1. Według wspomnianej normy IEC 60287-3-1/A1:1999 (rys. 1) w warunkach polskich $\tau_o = 25\text{ }^{\circ}\text{C}$, wobec czego współczynnik poprawkowy dla przewodów o izolacji polwinitowej ($\tau_{dd} = 70\text{ }^{\circ}\text{C}$) wynosi 1,06, co wynika z prostego przeliczenia:

$$I_{z25} = I_{z30} \cdot \sqrt{\frac{\tau_{dd} - 25}{\tau_{dd} - 30}} = I_{z30} \cdot \sqrt{\frac{70 - 25}{70 - 30}} = 1,06 \cdot I_{z30} \quad (1)$$

i oznacza, że obciążalność długotrwała I_{z25} takich przewodów w polskich warunkach klimatycznych jest o 6 % większa niż wartość I_{z30} odczytana z normy. Takie postępowanie nakazują postanowienia 523.2.3 oraz tablica 52-D1 normy PN-IEC 60364-5-523:2001. W polskojęzycznej wersji normy należało po prostu zamieścić tablice obciążalności dla temperatury otoczenia $25\text{ }^{\circ}\text{C}$, jak to w swojej wersji normy uczynili Niemcy, żyjący w tej samej strefie klimatycznej.

Australia i Nowa Zelandia wspólnie opracowują i ustanawiają normy AS/NZS, ale mają w nich osobne tablice obciążalności przewodów i kabli dla temperatury otaczającego powietrza i gruntu odpowiednio: $40\text{ }^{\circ}\text{C}/30\text{ }^{\circ}\text{C}$ w Australii oraz $25\text{ }^{\circ}\text{C}/15\text{ }^{\circ}\text{C}$ w Nowej Zelandii [18]. Podobnie, nie ma powodu, by polscy elektrycy wierzyli, że po ustanowieniu normy PN-IEC 60364-5-523:2001 temperatury w Polsce zrównały się z występującymi na Sycylii i w Maroku, co próbują im wmówić ci, którzy tekst normy źle przetłumaczyli.

Z kolei zamieszczone w normie IEC 60364-5-523:1999 [15] tablice obciążalności długotrwałej kabli ułożonych w ziemi odnoszą się do:

- temperatury gruntu $\tau_o = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$, właściwej dla Polski w okresie letnim,
- rezystywności cieplnej gruntu $2,5\text{ K}\cdot\text{m}/\text{W}$, skrajnie dużej, jaką wykazują żużel, popiół i grunt piaszczysty bardzo suchy, co wyjaśniono następująco w ustępie 523.3.1: *This value is considered necessary as a precaution for worldwide use when the soil type and geographical location are not specified.*

Według normy IEC 60287-3-1/A1:1999 [16] w przeciętnych polskich warunkach układania kabli rezystywność cieplna gruntu wynosi $1,0\text{ K}\cdot\text{m}/\text{W}$; taką wartość przyjmowały również wcześniejsze polskie przepisy [9] i norma [8]. Odczytane w normie PN-IEC 60364-5-523:2001 wartości obciążalności I_z kabli układanych w ziemi należy zatem mnożyć przez współczynnik poprawkowy 1,18 (tabl. 52-D3 normy [13]). Takie postępowanie nakazuje pkt 523.3.1 normy [16] o treści: *Corrections factors for soil thermal resistivities other than $2,5\text{ K}\cdot\text{m}/\text{W}$ are given in table 52-D3*, co krajowi manipulatorzy, zainteresowani zwiększeniem popytu na miedź, przetłumaczyli podstępnie [13]: *Współczynniki poprawkowe dla gruntu o rezystywności cieplnej większej niż $2,5\text{ K}\cdot\text{m}/\text{W}$ są podane w tablicy 52-D3.*

Rezystywność cieplna gruntu ma też wpływ na wzajemne oddziaływania cieplne sąsiadujących ze sobą kabli, a więc na wartości współczynników poprawkowych podanych w tablicach 52-E2, 52-E3. Niestety ich wartości podano w normie tylko dla gruntu o rezystywności cieplnej $2,5\text{ K}\cdot\text{m}/\text{W}$, kiedy te oddziaływania są słabsze.

Temperatura graniczna dopuszczalna długotrwałe τ_{dd} jest to najwyższa temperatura, do jakiej mogą nagrzewać się żyły przewodów i stykające się z nimi warstwy izolacji przez czas nieograniczony przy zachowaniu trwałości termicznej izolacji na poziomie 20÷30 lat. Wartość temperatury τ_{dd} zależy od materiału użytego na izolację przewodu (tabl. 2) i ew. od warunków otoczenia. W przypadku materiałów izolacyjnych najwyższej klasy ciepłoodporności C ($\tau_{dd} > 180\text{ }^{\circ}\text{C}$), jak politetrafluoroetylen PTFE (teflon) i tlenek magnezu MgO (przewody o izolacji mineralnej) war-

tość temperatury granicznej dopuszczalnej długotrwałe, a zwłaszcza wartość temperatury dopuszczalnej przy zwarciu może być ograniczona względami zagrożenia pożarowego.

FOREWORD

This amendment has been prepared by subcommittee 20A: High-voltage cables, of IEC technical committee 20: Electric cables.

The text of this amendment is based on the following documents:

FDIS	Report on voting
20A/403/FDIS	20A/408/RVD

Full information on the voting for the approval of this amendment can be found in the report on voting indicated in the above table.

Page 27

4.11 Poland

Replace this subclause by the following subclause:

4.11 Poland

1) *Thermal characteristics of the soil*

a) *Thermal resistivity:*

average value to be used in calculations 1,0 K.m/W

b) *Temperature:*

average value to be used in calculations 20 °C

minimum value 5 °C

2) *Depth of laying for directly buried cables*

Cables at voltages

up to 1 kV 700 mm

up to 15 kV 800 mm

above 15 kV 1 000 mm

3) *Ambient air temperature*

Average value to be used in calculations 25 °C

Rys. 1. Stronica normy IEC 60287-3-1/A1:1999 [16] zawierająca właściwe dla warunków polskich obliczeniowe temperatury otoczenia, obliczeniową rezystywność cieplną gruntów i głębokość układania kabli

Temperatura graniczna dopuszczalna przejściowo τ_{dp} jest to najwyższa temperatura, jaką dopuszcza się przy sporadycznie występujących awaryjnych przeciążeniach ruchowych o ograniczonym czasie trwania, np. nie dłużej niż 100 h w ciągu roku i nie dłużej niż 500 h w całym przewidywanym okresie eksploatacji. Przeciążenia takie wywołują dodatkowe zużycie termiczne izolacji, np. w odniesieniu do jednego przeciążenia – nie większe niż 0,1 % trwałości i nie większe niż 200 h. Wartość temperatury τ_{dp} zależy od materiału izolacji (tabl. 2); określają ją tylko niektóre normy bądź przepisy i raczej w odniesieniu do przewodów o dużej obciążalności, używanych w sieciach rozdzielczych i przesyłowych. Dawna norma PN-55/E-05021 [8] określała, jak wyznaczać obciążalność przejściową przewodów gołych oraz kabli o izolacji papierowo-olejowej; w porównaniu z obciążalnością długotrwałą była ona większa o 22 % dla przewodów gołych i o 14 % dla kabli niskonapięciowych układanych w ziemi (o 17 % dla kabli układanych w powietrzu).

Tablica 2. Temperatura graniczna dopuszczalna dla przewodów zależnie od materiału izolacji

Materiał izolacji	Temperatura graniczna [°C] dopuszczalna		
	długotrwałe	przejściowo ¹⁾	przy zwarciu
Bez izolacji, przewody gołe miedziane	80	100	200
Guma naturalna	60	60	200
Papier-olej (kable niskiego napięcia)	65	80	200
Polwinit (PVC)	70	100	160 ²⁾
Polietylen (PE)	75	90	150
Guma butylowa (IJK)	85		220
Polwinit ciepłoodporny, polietylen sieciowany (XLPE), guma etylenowo-propylenowa (EPR)	90	130	250
Polietylenowinyloacetat (EVA)	120		
Guma silikonowa	180		350

¹⁾ Nie występuje w aktualnych polskich normach ani przepisach.
²⁾ 140°C dla przewodów o przekroju $s > 300 \text{ mm}^2$.

Temperatura graniczna dopuszczalna przy zwarcu τ_{dz} jest to najwyższa temperatura żył przewodu, jaką dopuszcza się w końcowej chwili trwania zwarcia. Jest ona tak ustalona, że zwarcie wprawdzie wywołuje znaczący ubytek trwałości termicznej izolacji¹⁾, ale nie zagraża natychmiastowym uszkodzeniem izolacji, np. jej zapaleniem, roztopieniem czy chociażby zmięknięciem powodującym trwałe przemieszczenie żyły. Wartość temperatury τ_{dz} , zależna od materiału izolacji (tabl. 2), może być zróżnicowana, np. nieco niższa w przypadku przewodów o wyższym napięciu znamionowym i/lub o dużym przekroju żył ze względu na większe prawdopodobieństwo deformacji przegrzanej izolacji albo groźniejsze skutki takiej deformacji. Przyjęta wartość nie powinna też powodować nadmiernego obniżenia wytrzymałości mechanicznej żył przewodów, zwłaszcza w przypadku linii napowietrznych i szyn sztywnych. Ponadto wartość τ_{dz} powinna uwzględniać zagrożenia dla otoczenia, zwłaszcza dla podłoża, na którym przewód jest ułożony.

¹⁾ Oceniając ubytek trwałości termicznej izolacji należy pamiętać, że czas trwania podwyższonej temperatury jest wielokrotnie dłuższy niż czas trwania zwarcia.

2. Obciążalność długotrwała przewodów

W stanie cieplnie ustalonym strumień ciepły $q = I^2 R$ w watach, wydzielany w jednożyłowym przewodzie o rezystancji elektrycznej R w omach (przekroju żyły s i konduktywności γ) przez prąd I w amperach, w całości odpływa do otoczenia przez rezystancję cieplną R_c w kelwinach na wat, wywołując przyrost temperatury \mathcal{G} w kelwinach:

$$\mathcal{G} = q \cdot R_c = I^2 \cdot R \cdot R_c, \quad (2)$$

przy czym obie rezystancje odnoszą się do jednostki długości przewodu. Przy największym długotrwanie dopuszczalnym prądzie I_z występuje przyrost temperatury dopuszczalny długotrwanie $\mathcal{G}_{dd} = \tau_{dd} - \tau_o$ o wartości:

$$\mathcal{G}_{dd} = I_z^2 \cdot R \cdot R_c \quad (3)$$

Z zależności tej można wyznaczyć obciążalność długotrwałą przewodu:

$$I_z = \sqrt{\frac{\mathcal{G}_{dd}}{R \cdot R_c}} = \sqrt{\frac{\tau_{dd} - \tau_o}{R_c} s \cdot \gamma} \quad (4)$$

co pozwala sprawdzić, jak wpływają na nią różne czynniki i na zasadzie proporcji, z obciążalności długotrwałej w znanych warunkach, obliczyć obciążalność długotrwałą dla innych warunków (patrz wzór 1), jeżeli nie zmienia się rezystancja cieplna R_c . Jest to bowiem parametr, którego wartość liczbowa dla określonej sytuacji najtrudniej ustalić. Wartość rezystancji cieplnej zależy m.in. od przekroju żyły s , co sprawia, że wbrew pozorom obciążalność długotrwałą przewodu, wynikająca ze wzoru (4), niekoniecznie jest proporcjonalna do przekroju żyły w potęgze $\frac{1}{2}$. Występujące w powyższych wzorach elektryczna rezystancja żyły R oraz jej konduktywność γ przyjmują wartości odpowiadające ustalonej temperaturze w rozpatrywanych warunkach, np. temperaturze τ_{dd} , przy której oblicza się obciążalność długotrwałą I_z . W przypadku przewodu wielożyłowego wzór byłby bardziej złożony, ale charakter zależności pozostałby ten sam. W przewodach niskonapięciowych na ogół pomijalnie mały jest strumień ciepły wydzielany poza żyłami przewodu, tzn. w izolacji, a także w innych częściach przewodu, jak metalowa powłoka lub metalowa osłona obejmująca wszystkie żyły czynne obwodu przemiennoprądowego, co zapobiega indukowaniu w powłoce lub osłonie prądów wirowych i ew. zmiennego strumienia magnetycznego.

Podawane w normach wartości obciążalności długotrwałej I_z przewodów pochodzą z pomiarów przeprowadzonych dla niektórych przekrojów i wybranych sytuacji modelowych, których wyniki są następnie przeliczane dla wielu innych warunków wykazujących podobieństwo fizyczne (w tym przypadku – podobieństwo termodynamiczne). Przekształcając wzór (4) można zauważyć, że obciążalność długotrwałą I_z przewodu jest funkcją potęgową **przekroju żyły**:

$$I_z = A \cdot s^m - B \cdot s^n \approx A \cdot s^m \quad (5)$$

Potrzeba uwzględniania drugiego składnika wzoru ($B \neq 0$) zachodzi w przypadku bardzo dużego przekroju żył (powyżej 120 mm^2 , a nawet dopiero powyżej 300 mm^2). Stała A ma wartość zależną od budowy przewodu, sposobu układania i dopuszczalnego przyrostu temperatury (tabl. B.52-1 normy). Teoretycznie wykładnik potęgowy m przyjmuje wartości od 0,50, jeśli rezystancja cieplna R_c żyła-otoczenie nie zależy od przekroju żyły s i pola jej zewnętrznej powierzchni, do 0,75 – jeśli rezystancja cieplna R_c jest odwrotnie proporcjonalna do pola zewnętrznej powierzchni żyły (przewody gołe) i w rezultacie $R_c \propto s^{-0,5}$. W rzeczywistości dla przewodów izolowanych zakres wartości wykładnika potęgowego jest znacznie mniejszy: $m = 0,55 \div 0,67$.

Na przykład, dla przewodów o izolacji polwinitowej o trzech żyłach obciążonych przy sposobie układania B1 obowiązuje zależność: $I_z = 11,84 \cdot s^{0,628}$ (tabl. B.52-1 normy). Skoro obciążalność długotrwałą przewodu miedzianego 4 mm^2 wynosi 28 A (tabl. 52-C3 normy), to obciążalność przewodu 10 mm^2 w tych samych warunkach wynosi:

$$I_{z10} = I_{z4} \left(\frac{10}{4} \right)^{0,628} = 28 \cdot \left(\frac{10}{4} \right)^{0,628} = 50 \text{ A.} \quad (6)$$

Wynik obliczenia jest precyzyjny, jeżeli zmienia się tylko **materiał żyły**, np. w porównaniu z przewodem miedzianym ($I_z = 100 \text{ A}$ albo 100%) podobny przewód aluminiowy tak samo ułożony ma obciążalność

$$I_{zAL} = I_{zCu} \cdot \sqrt{\frac{\gamma_{Al}}{\gamma_{Cu}}} = 100 \cdot \sqrt{\frac{34,8}{56}} = 79 \text{ A} \quad (79 \%), \quad (7)$$

czyli o 21% mniejszą (o 20% – przy porównywaniu chemicznie czystych metali). Miedź i aluminium mają niemal identyczną wartość temperaturowego współczynnika rezystywności, wobec czego nie popełnia się błędu wpisując w powyższym wzorze konduktywności w temperaturze 20°C zamiast w temperaturze granicznej dopuszczalnej długotrwałe τ_{dd} .

Wynik przeliczenia jest tylko orientacyjny, jeżeli zmienną jest **liczba żył przewodu** wielożyłowego albo liczba jednożyłowych przewodów w rurce, przy czym wszystkie one są identyczne i obciążone prądem o tej samej wartości. Znając obciążalność długotrwałą przewodu jednożyłowego I_{z1} można oszacować obciążalność przewodu N -żyłowego o podobnej budowie i tak samo ułożonego ze wzoru empirycznego:

$$I_{zN} = \frac{I_{z1}}{\sqrt[3]{N}} \quad (8)$$

Z tego przeliczenia wynika, że przewód 3-żyłowy w porównaniu z przewodem 2-żyłowym ma obciążalność długotrwałą równą w przybliżeniu: $\sqrt[3]{2/3} = 0,87 = 87 \%$.

Norma wprawdzie przestrzega, że przewód neutralny może być obciążony prądem porównywalnym z prądem w przewodzie fazowym, ale nie podaje obciążalności przewodów 4-żyłowych. Trzeba zatem samemu umieć wstępnie oszacować, że przewód 4-żyłowy w porównaniu z przewodem 3-żyłowym ma obciążalność długotrwałą w przybliżeniu: $\sqrt[3]{3/4} = 0,91 = 91 \%$, czyli o około 9% mniejszą. Dokładniejsze wartości, zależne od obciążenia czwartej żyły, podaje tabl. 7.

W tablicach 3, 4, 5 oraz 6 zestawiono wybrane informacje z normy PN-IEC 60364-5-523:2001 dotyczące obciążalności długotrwałej przewodów. Norma klasyfikuje różne sposoby układania przewodów zaliczając je do jednej z licznych grup (A, B ... G) bądź podgrup (A1, A2) i stosownie do tego różnicując obciążalność długotrwałą przewodów. Takie postępowanie jest zrozumiałe, ale jego prezentacja w zawyżonych tablicach 52-B1 i 52-B2 jest nieprzejrzysta i utrudnia doszukiwanie się w nich logiki i ewentualnych potknięć. Na przykład, do sposobu układania przewodów B1 zalicza się w poz. 6 (tablica 52-B2) *przewody jednożyłowe w listwie instalacyjnej na ścianie drewnianej*, ale kiedy przewody są układane w listwie z przegrodami (poz. 13), to z niejasnych powodów materiał podłoża już nie ma znaczenia. Podobna wątpliwość dotyczy odpowiednio pozycji 7 i 14 tejże tablicy. Po ujednoczeniu tej klasyfikacji (tabl. 3 i 4) widać w niej więcej rozstrzygnięć budzących zdziwienie.

Norma PN-IEC 60364-5-523:2001 nie zastępuje w pełni dawniejszych polskich przepisów określających obciążalność przewodów [9]. Nie uwzględnia wielu szczególnych warunków układania kabli wpływających na ich obciążalność cieplną i w ogóle nie obejmuje przewodów ruchomych. To nieprawda, że komitet krajowy (PKN) ma ręce związane treścią dokumentu IEC. Wystarczy spojrzeć na sam tytuł równoważnej normy niemieckiej: DIN VDE 0298-4 (VDE 0298 Teil 4):1998-11 [17], do której włączono przewody ruchome (niem. *flexible Leitungen*). Dopóki ten arkusz [15] nie ma statusu normy europejskiej EN, dopóty takie zabiegi są możliwe.

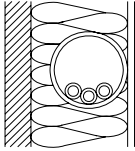
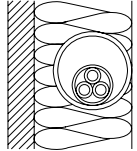
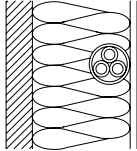
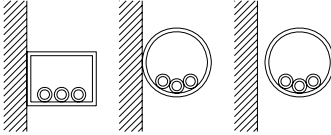
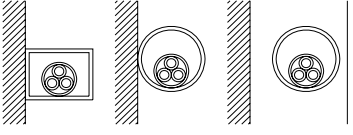
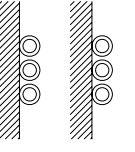
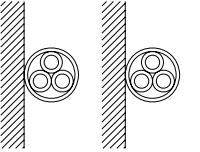
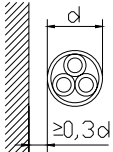
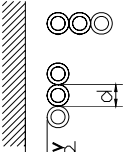
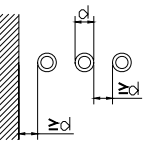
Arkusz 523 wprowadza liczne współczynniki poprawkowe korygujące obciążalność długotrwałą przewodów z tytułu warunków odprowadzania ciepła innych niż wzorcowe, przyjęte przy sporządzaniu tablic obciążalności. Są one związane przede wszystkim z liczbą jednocześnie obciążonych żył przewodu wielożyłowego (tabl. 5), z liczbą jednocześnie obciążonych przewodów układanych w wiązkach (tabl. 6), a także z obciążeniem przewodu neutralnego w obwodzie trójfazo-

wym obciążonym wprowadzie symetrycznie, ale prądami odkształconymi.

Tablica 3. Ważniejsze sposoby układania przewodów oraz kabli i ich umowne oznaczenia

Sposób układania przewodów	Oznaczenie			
Przewody jednożyłowe w rurze w ścianie termoizolacyjnej	A2	A		
Przewód wielożyłowy bezpośrednio w ścianie termoizolacyjnej				
Przewody jednożyłowe lub przewód wielożyłowy w ościeżnicach (drzwiowych, okiennych)				
Przewód wielożyłowy w rurze w ścianie termoizolacyjnej	A2			
Przewody jednożyłowe w rurze w ścianie murowanej	B1	B		
Przewody jednożyłowe w rurze lub w listwie na ścianie (drewnianej)				
Przewody jednożyłowe w rurze bezpośrednio na ścianie (drewnianej albo murowanej) albo w odległości mniejszej niż $0,3 \cdot D$ od ściany				
Przewody jednożyłowe w podwieszanej listwie				
Przewody w przestronnym kanale instalacyjnym ($5 \cdot d \leq V < 50 \cdot d$)				
Przewody jednożyłowe w rurze w przestronnym kanale instalacyjnym ($V \geq 20 \cdot D$)				
Przewody jednożyłowe w korytku podłogowym w podłodze				
Przewody w podwójnym suficie lub podłodze przy dużym prześwicie ($5 \cdot d \leq V < 50 \cdot d$)				
Przewody jednożyłowe w rurze w ścianie murowanej			B2	B
Przewód wielożyłowy w rurze lub listwie na ścianie (drewnianej)				
Przewód wielożyłowy w rurze bezpośrednio na ścianie (drewnianej lub murowanej) albo w odległości mniejszej niż $0,3 \cdot D$ od ściany				
Przewód wielożyłowy w podwieszanej listwie				
Przewody w ciasnym kanale instalacyjnym ($1,5 \cdot d \leq V < 5 \cdot d$)				
Przewody jednożyłowe w rurze w ciasnym kanale instalacyjnym ($1,5 \cdot D \leq V < 20 \cdot D$)				
Przewód wielożyłowy w korytku podłogowym w podłodze				
Przewody w podwójnym suficie lub podłodze przy małym prześwicie ($1,5 \cdot d \leq V < 5 \cdot d$)				
Przewody na ścianie drewnianej w odległości mniejszej niż $0,3 \cdot d$ od ściany	C	C		
Przewody (jedno- lub wielożyłowe) bezpośrednio na suficie drewnianym				
Przewody w korytku nieperforowanym (w odległości niemniejszej niż $0,3 \cdot d$ od ściany)				
Kable bezpośrednio w ziemi	D	D		
Kabel wielożyłowy w rurze w ziemi				
Przewód wielożyłowy w powietrzu, w odległości co najmniej $0,3 \cdot d$ od ściany	E	E		
Przewody w korytku perforowanym lub na drabince (w odległości niemniejszej niż $0,3 \cdot d$ od ściany)				
Przewody (jedno- lub wielożyłowe) zawieszane na linie nośnej lub przewody wielożyłowe samonośne				
Przewody jednożyłowe w powietrzu stykające się, w odległości co najmniej d od ściany	F	F		
Przewody w korytku perforowanym lub na drabince (w odległości niemniejszej niż $0,3 \cdot d$ od ściany)				
Przewody (jedno- lub wielożyłowe) zawieszane na linie nośnej lub przewody wielożyłowe samonośne				
Przewody jednożyłowe w powietrzu niestykające się, w odległości $\geq d$ od ściany i między sobą	G	G		
Przewody gołe lub izolowane zawieszane na izolatorach				
<p>d – średnica zewnętrzna przewodu D – średnica zewnętrzna rury instalacyjnej V – głębokość kanału instalacyjnego Ściana termoizolacyjna – ściana mająca wewnętrzne pokrycie o współczynniku przenikania ciepła niemniejszym niż $10 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$.</p>				

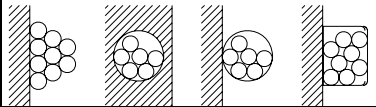
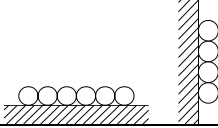
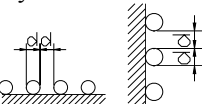
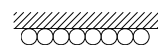
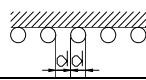
Tablica 4. Sposoby układania na stałe przewodów kabelkowych oraz jednożyłowych przewodów izolowanych

Sposób układania	A1	A2		B1	B2	
Rysunek						
Opis	jednożyłowe w rurach lub listwach	w rurach lub listwach	bezpośrednio w ścianie	jednożyłowe	w rurach lub listwach na ścianie, w ścianie lub w podłodze	
		wielożyłowe				
w ścianach termoizolacyjnych						
Sposób układania	C			E	F	G
Rysunek						
Opis	jednożyłowe	wielożyłowe		wielożyłowe	stykające się	nie stykające się
	po wierzchu, na ścianie albo suficie lub w ścianie albo w suficie z materiału o rezystywności cieplnej $\rho \leq 2 \text{ K}\cdot\text{m}/\text{W}$, lub w korytkach kablowych nieperforowanych (tzn. o powierzchni otworów < 30 % całkowitej powierzchni korytka)				wtynkowe w ścianie, suficie lub przestrzeni instalacyjnej	jednożyłowe
				swobodnie w powietrzu, na linie nośnej, na drabince kablowej		

Tablica 5. Obciążalność długotrwała I_z [A] przewodów miedzianych o izolacji polwinitowej przy obliczeniowej temperaturze otoczenia 25 °C i największy dopuszczalny prąd znamionowy I_n ich zabezpieczenia nadprądowego

Ułożenie	A1		A2		B1		B2		C		E		F			G		
	2	3	2	3	2	3	2	3	2	3	2	3	2	3	3	3	3	
Liczba jednocześnie obciążonych żył															obok siebie w pionie lub poziomie	w wiązce	poziomo	pionowo
Przekrój [mm ²]	Obciążalność długotrwała przewodów [A] Prąd znamionowy zabezpieczenia nadprądowego [A]																	
1,5	16,5	14,5	16,5	14	18,5	16,5	17,5	16	21	18,5	23	19,5	-	-	-	-	-	
	16	13	16	13	16	16	16	16	20	16	20	16	-	-	-	-	-	
2,5	21	19	19,5	18,5	25	22	24	21	29	25	32	27	-	-	-	-	-	
	20	16	16	16	25	20	20	20	25	25	32	25	-	-	-	-	-	
4	28	25	27	24	34	30	32	29	38	34	42	36	-	-	-	-	-	
	25	25	25	20	32	25	32	25	35	32	40	35	-	-	-	-	-	
6	36	33	34	31	43	38	40	36	49	43	54	46	-	-	-	-	-	
	35	32	32	25	40	35	40	35	40	40	50	40	-	-	-	-	-	
10	49	45	46	41	60	53	55	49	67	60	74	64	-	-	-	-	-	
	40	40	40	40	50	50	50	40	63	50	63	63	-	-	-	-	-	
16	65	59	60	55	81	72	73	66	90	81	100	85	-	-	-	-	-	
	63	50	50	50	80	63	63	63	80	80	100	80	-	-	-	-	-	
25	85	77	80	72	107	94	95	85	119	102	126	107	139	121	117	155	138	
	80	63	80	63	100	80	80	80	100	100	125	100	125	100	100	125	125	
35	105	94	98	88	133	117	118	105	146	126	157	134	172	152	145	192	172	
	100	80	80	80	125	100	100	100	125	125	125	125	160	125	125	160	160	
50	126	114	117	105	160	142	141	125	178	153	191	162	208	184	177	232	209	
	125	100	100	100	160	125	125	125	160	125	160	160	200	160	160	200	200	

Tablica 6. Współczynniki poprawkowe obciążalności długotrwałej dla wiązek przewodów

Sposób układania	Liczba wielożyłowych przewodów/kabli lub liczba obwodów wykonanych przy użyciu jednożyłowych przewodów/kabli (2 lub 3 przewody obciążone prądem)														
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	12	14	16	18	20
<p>Wiązka bezpośrednio na ścianie lub podłodze albo w rurze lub korytku na ścianie lub w ścianie</p> 	1	0,8	0,7	0,65	0,6	0,57	0,54	0,52	0,5	0,48	0,45	0,43	0,41	0,39	0,38
<p>Jedna warstwa stykających się przewodów na ścianie lub podłodze</p> 	1	0,85	0,79	0,75	0,73	0,72	0,72	0,71	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7
<p>Jedna warstwa przewodów na ścianie lub podłodze, odstępy między przewodami równe ich średnicy</p> 	1	0,94	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9
<p>Jedna warstwa stykających się przewodów na suficie</p> 	0,95	0,81	0,72	0,68	0,66	0,64	0,63	0,62	0,61	0,61	0,61	0,61	0,61	0,61	0,61
<p>Jedna warstwa przewodów na suficie, odstępy między przewodami równe ich średnicy</p> 	0,95	0,85	0,85	0,85	0,85	0,85	0,85	0,85	0,85	0,85	0,85	0,85	0,85	0,85	0,85
O jest symbolem jedno- lub wielożyłowego przewodu/kabla															

Na trudne pytanie o obciążalność długotrwałą układu czterech przewodów obwodu trójfazowego, z żyłą neutralną obciążoną znacznym prądem, norma IEC 60364-5-523:1999 snuje nieprzekonującą opowieść w Załączniku C i daje banalne rady. W tej sytuacji pomocna może być tablica 7 z opracowania E. Heringa [4], którą należy posługiwać się następująco:

- Dla rozpatrywanego przekroju przewodów w normie (tabl. 5) należy odczytać – stosownie do sposobu ich układania – obciążalność długotrwałą I_{z3} dla 3 żył lub 3 przewodów jednożyłowych obciążonych prądem.
- W kolumnie 1 tablicy 7 należy odszukać wiersz odpowiadający względnemu obciążeniu żyły neutralnej lub jednożyłowego przewodu neutralnego $v = I_N / I_L$ rozpatrywanego obwodu trójfazowego.
- W tym wierszu należy znaleźć – stosownie do sposobu układania przewodów – wartość współczynnika poprawkowego r .
- Iloczyn $r \cdot I_{z3} = I_{z4}$ jest poszukiwaną obciążalnością długotrwałą I_{z4} przewodu 4-żyłowego (lub zespołu 4 przewodów jednożyłowych) o identycznych żyłach, w którym względne obciążenie żyły neutralnej wynosi v .

Tablica 7. Współczynniki poprawkowe obciążalności układanych na stałe 4-żyłowych przewodów obwodów trójfazowych w zależności od względnej wartości prądu w żyły neutralnej N (PEN)

Stosunek prądu w przewodzie neutralnym do prądu w przewodzie fazowym $v = \frac{I_N}{I_L}$	Sposób układania przewodów						
	A1	A2	B1	B2	C	E	F
	w rurze lub listwie				bez rury lub listwy		
	w ścianie termoizolacyjnej		po wierzchu, na ścianie przewody stykające się			w odległości od ściany	
	jednożyłowe	wielozżyłowe	jednożyłowe	wielozżyłowe	wielozżyłowe	0,3·d	1,0·d
						jednożyłowe niestykające się	
						jednowarstwowo	wiązka
	współczynnik poprawkowy r						
$v \leq 0,2$	1,00	1,00	1,00		1,00		1,00
$0,2 < v \leq 0,4$	0,97	0,97	0,97		0,97		0,96
$0,4 < v \leq 0,6$	0,94	0,94	0,94		0,94		0,93
$0,6 < v \leq 0,8$	0,91	0,91	0,91		0,91		0,90
$0,8 < v \leq 1,0$	0,87	0,87	0,87		0,87		0,86
$1,0 < v \leq 1,2$	0,83	0,83	0,83		0,83		0,82
$1,2 < v \leq 1,4$	(0,78)	0,78	(0,78)		0,78		(0,77)
$1,4 < v \leq 1,6$	(0,72)	0,72	(0,72)		0,72		(0,71)
$1,6 < v \leq 1,8$	(0,65)	0,65	(0,65)		0,65		(0,64)
$1,8 < v \leq 2,0$	(0,57)	0,57	(0,57)		0,57		—

1. Przez współczynnik poprawkowy r należy pomnożyć obciążalność długotrwałą przewodów I_{z3} odczytaną w PN-IEC 60364-5-523 (dla 3 żył obciążonych prądem), aby otrzymać obciążalność przewodów czterożyłowych o 4 identycznych żyłach (lub 4 identycznych przewodów jednożyłowych) $I_{z4} = r \cdot I_{z3}$, przy czym żyła neutralna (przewód neutralny) jest obciążona w stopniu v . Wszystkie wartości prądu są wartościami skutecznymi.
2. W układzie TN-C stosunek v oznacza względną wartość prądu w przewodzie PEN. Jednakowoż układ TN-C jest niezalecany przy większych wartościach stosunku $v = I_N / I_L$, na przykład przy $v > 0,5$.
3. Wartości współczynnika poprawkowego r podane w nawiasie oznaczają, że w tych przypadkach należy rozważyć zastosowanie przewodu neutralnego N o przekroju większym niż przekrój przewodów fazowych bądź zastosowanie dwóch przewodów neutralnych.

3. Obciążalność zwarciova cieplna przewodów

Przyjmuje się, że energia cieplna wydzielona w czasie trwania zwarcia T_k nieprzekraczającym 3 lub 5 sekund¹ przez rzeczywiście płynący prąd zwarciovy i_k (lub prąd zwarciovy zastępczy cieplny I_{th}), której miarą jest skutek cieplny (całka Joule'a):

$$\int_0^{T_k} i_k^2 dt = I_{th}^2 \cdot T_k \quad (9)$$

w całości zostaje zużyta na adiabatyczne (bez wymiany ciepła z otoczeniem) nagrzewanie żyły przewodu o przekroju s i długości l , od temperatury przed zwarcie τ_{pz} do temperatury granicznej dopuszczalnej przy zwarcie τ_{dz} :

$$I_{th}^2 \cdot T_k \cdot \frac{1}{\gamma_{sr} \cdot s} = s \cdot l \cdot c \cdot (\tau_{dz} - \tau_{pz}) \quad (10)$$

przy czym c – ciepło właściwe materiału żyły w $J/(cm^3 \cdot K)$,
 γ_{sr} – konduktywność materiału żyły w temperaturze τ_{sr} w $m/(\Omega \cdot mm^2)$.

Skoro zakłada się liniową zależność rezystancji przewodu od temperatury, to dla rozpatrywanego procesu nagrzewania prądem zwarciovy należy przyjąć konduktywność żyły w temperaturze będącej średnią arytmetyczną temperatury początkowej i temperatury końcowej:

$$\tau_{sr} = \frac{\tau_{pz} + \tau_{dz}}{2} \quad (11)$$

Znając przyrost temperatury dopuszczalny przy zwarcie $\vartheta_{dz} = \tau_{dz} - \tau_{pz}$ i własności materiału żyły można obliczyć **największą dopuszczalną jednosekundową gęstość prądu k** [A/mm^2] czyli średnią kwadratową gęstość prądu, jaką w żyłce przewodu można dopuścić podczas zwarcia trwającego $T_k = 1$ s.

$$k = \frac{I_{th}}{s} = \sqrt{\gamma_{sr} \cdot c \cdot \frac{\tau_{dz} - \tau_{pz}}{T_k}} \quad (12)$$

Tablica 8. Największa dopuszczalna jednosekundowa gęstość prądu k [A/mm^2] dla przewodów izolowanych

Materiał izolacji	Jednosekundowa gęstość prądu k [A/mm^2] w żyłach		
	miedzianych	aluminiowych	
Polwinit, przewody o przekroju	$s > 300 \text{ mm}^2$	103	68
	$s \leq 300 \text{ mm}^2$	115	76
Guma naturalna	141	93	
Guma etylenowo-propylenowa, polietylen sieciowany	143	94	

Na przykład dla przewodu aluminiowego (wg normy: $\gamma_{20} = 35,38 \text{ m}/\Omega \cdot \text{mm}^2$, $\rho = 2,7 \text{ g}/\text{cm}^3$, $c = 2,5 \text{ J}/\text{cm}^3 \cdot \text{K}$) o izolacji polwinitowej ($\tau_{dz} = 160 \text{ }^\circ\text{C}$, $\tau_{pz} = \tau_{dd} = 70 \text{ }^\circ\text{C}$) średnia arytmetyczna obliczona z temperatury początkowej i temperatury końcowej przy nagrzewaniu prądem zwarciovy wynosi

¹ Zastrzeżenia na ten temat w normach nie są jednolite. Wartość 3 s powinna dotyczyć przewodów o mniejszym przekroju żył.

$$\tau_{sr} = \frac{\tau_{pz} + \tau_{dz}}{2} = \frac{160 + 70}{2} = 115^\circ \text{C}$$

a konduktywność aluminium w tej temperaturze

$$\gamma_{sr} = \frac{\gamma_{20}}{1 + \alpha \cdot (\tau_{sr} - 20)} = \frac{35,38}{1 + 0,0040 \cdot (115 - 20)} = 25,64 \frac{\text{m}}{\Omega \cdot \text{mm}^2}$$

Największa dopuszczalna jednosekundowa gęstość prądu k w takim przewodzie wynosi (po sprawdzeniu jednostek, bo wartości liczbowe nie są wyrażone w jednostkach podstawowych układu SI):

$$k = \sqrt{\gamma_{sr} \cdot c \frac{\tau_{dz} - \tau_{pz}}{T_k}} = \sqrt{25,64 \cdot 2,5 \cdot \frac{160 - 70}{1}} = 76 \frac{\text{A}}{\text{mm}^2}$$

Inne wartości największej dopuszczalnej jednosekundowej gęstości prądu są zestawione w tabl. 8.

Autorzy normy we wzorze (12) bądź równoważnym opuścili czas trwania zwarcia $T_k = 1$ s. Może uznali, że dzielenie przez 1 niczego nie zmieni. Rzeczywiście, wyniku liczbowego to nie zmienia, ale przypisuje mu dziwną jednostkę $[\text{A} \cdot \sqrt{\text{s}} / \text{mm}^2]$, którą ze wstydu najchętniej się przemilcza, a sam wynik nazywa się pokrętnie *współczynnikiem k* zamiast *największą dopuszczalną jednosekundową gęstością prądu*, jak go nazywano przez minione kilkadziesiąt lat. Kwestią najważniejszą nie jest tu nawet terminologia, lecz upowszechniająca się maniera redagowania tekstów norm IEC oraz EN w sposób skłaniający, a nawet zmuszający użytkowników norm do bezmyślnego ich stosowania bez rozumienia istoty rzeczy. W sytuacjach nietypowych, wymagających indywidualnego podejścia, tak traktowany użytkownik norm jest bezbronny. Na potwierdzenie tego zarzutu można przedstawić jeszcze jeden przykład związany z tą samą kwestią, a mianowicie ze sposobem obliczania największej dopuszczalnej jednosekundowej gęstości prądu k . Przeciętny inżynier elektryk jest w stanie zrozumieć wyprowadzenie i sens wzoru (12), pojąć ukrytą w nim fizykę zjawiska i sposób korzystania ze wzoru. Niech spróbuje to zrozumieć analizując równoważny wzór w załączniku A normy PN-IEC 60364-5-54:1999 (z poważnym błędem drukarskim) lub w załączniku A normy PN-HD 60364-5-54:2007 (bez tego błędu).

Co gorsza, ta maniera z norm przenika do literatury technicznej, do artykułów i referatów komentujących postanowienia norm, do broszur szkoleniowych, a nawet do podręczników akademickich. Objawianie istoty rzeczy i nakłanianie ludzi do myślenia nie jest już w cenie.

4. Wstępne zasady doboru zabezpieczeń i obciążalności przewodów

Pierwszym krokiem jest ustalenie wartości **obliczeniowego prądu szczytowego** I_B obwodu, co stanowi podstawę doboru prądu znamionowego ciągłego aparatów oraz wstępnego doboru obciążalności długotrwałej I_z przewodów. W obwodzie pojedynczego odbiornika, transformatora lub generatora jest to co najmniej prąd znamionowy tego urządzenia (tabl. 9). Dobra praktyka jako obliczeniowy prąd szczytowy I_B obwodu każe przyjmować wartość większą, podaną w kolumnie 3 tabelicy 10 jako zalecany prąd znamionowy ciągły wyłącznika.

Drugim krokiem jest dobór prądu znamionowego i/lub prądu nastawczego zabezpieczeń nadprądowych w taki sposób, aby przetrzymywały one bez zadziałania nie tylko obliczeniowy prąd szczytowy obwodu I_B , ale również wszelkie prądy załączeniowe, będące prądami normalnego użytkowania (prąd rozruchowy silnika, prąd rozświetlania lampy, prąd załączania kondensatorów itp.). To z tych powodów podany w kolumnie 2 (tabl. 10) potrzebny prąd znamionowy wkładki topikowej określonej klasy może być znacznie większy niż prąd obliczeniowy obwodu podany w kolumnie 3. Podobnie, do prądów załączeniowych obwodu dobiera się prąd nastawczy członu zabezpieczeniowego zwarciovego wyłącznika (kolumna 5 tabelicy 10).

W obwodach rozdzielczych wymagane prądy znamionowe bądź nastawcze zabezpieczeń i ew. zwłoka ich działania mogą wymagać zwiększenia ze względu na wybiórczość działania z zabezpieczeniami usytuowanymi na niższych stopniach rozdziału energii.

Trzecim krokiem jest dobór przekroju przewodu w taki sposób, by spełniał on wszelkie stawiane mu wymagania odnośnie do: wytrzymałości mechanicznej, obciążalności cieplnej długotrwałej i zwarciovowej oraz dopuszczalnego spadku napięcia.

W obwodach bezpieczeństwa (oświetlenie awaryjne, urządzenia tryskaczowe, pompy pożarnicze, kontrola dostępu, bezpieczeństwo ruchu lotniczego, kolejowego, drogowego, wodnego) trzeba zminimalizować możliwość zbędnych zadziałań. Wobec tego nie należy w nich stosować zabezpieczeń różnicowoprądowych ani przeciążeniowych działających na wyłączenie, a prądy znamionowe bądź nastawcze zabezpieczeń zwarciovych zawyżać się o jeden lub dwa stopnie w porównaniu z wartością wynikającą ze zwykłych zasad ich doboru.

Reasumując, wszelkie zabezpieczenia nadprądowe tak się dobiera, aby miały – ze względu na czułość zabezpieczenia – prądy i czasy działania jak najmniejsze, ale – ze względu na ciągłość zasilania – wystarczająco duże dla zapobieżenia zbędnym zadziałaniom z powodu:

- jakichkolwiek prądów rozruchowych (silników), prądów załączeniowych (lamp, transformatorów, zasilaczy impulsowych) bądź innych zwiększonych prądów normalnego użytkowania,
- braku wybiórczości z zabezpieczeniami usytuowanymi na niższych stopniach zabezpieczeń.

Następnie przewody tak się dobiera, aby – poza spełnieniem innych wymagań – wytrzymywały narażenia cieplne przy przeciążeniach i zwarciach dyktowane m.in. przez wcześniej dobrane zabezpieczenia nadprądowe.

Tablica 9. Sposób wyznaczania prądu znamionowego I_n bądź obliczeniowego prądu szczytowego I_B urządzeń w obwodach trójfazowych

Piec, kuchnia, ogrzewacz rezystancyjny	Urządzenie oświetleniowe (lampy wyładowcze)	Silnik indukcyjny	Generator	Transformator	Bateria kondensatorów
Moc i prąd w obwodzie w warunkach znamionowych					
$\cos \varphi = 1$	$\lambda_n \approx 0,80 \div 0,96$ z kompensacją $\lambda_n \approx 0,5$ bez kompensacji	$\cos \varphi_n = 0,75 \div 0,90$	$\cos \varphi_n = 0,8$	wymuszony przez obciążenie	$\cos \varphi = 0_{\text{poj}}$
$I_n = \frac{P_n}{\sqrt{3} \cdot U_n}$	$I_B = k_{as} \frac{\sum (P_n + \Delta P)}{\sqrt{3} \cdot U_n \cdot \lambda_n}$	$I_n = \frac{P_n}{\sqrt{3} \cdot U_n \cdot \eta_n \cdot \cos \varphi_n}$	$I_n = \frac{S_n}{\sqrt{3} \cdot U_n}$	$I_{n1(2)} = \frac{S_n}{\sqrt{3} \cdot U_{n1(2)}}$	$I_n = \frac{Q_n}{\sqrt{3} \cdot U_n}$
<p>Objaśnienie oznaczeń: napięcie znamionowe (U_n), napięcie znamionowe pierwotne (U_{n1}) i wtórne (U_{n2}); moc znamionowa czynna (P_n), pozorna (S_n) i bierna (Q_n); sprawność znamionowa (η_n); współczynnik mocy znamionowy ($\lambda_n = P_n/S_n$, a w obwodach prądu sinusoidalnego $\cos \varphi_n = P_n/S_n$); prąd znamionowy pojedynczego urządzenia (I_n), obliczeniowy prąd szczytowy odbiornika lub grupy odbiorników (I_B), współczynnik niesymetrii obciążenia trzech faz ($k_{as} = I_{L_{\max}}/I_{L_{\text{śr}}} = 1,05 \div 1,25$).</p>					

Tablica 10. Uproszczone wskazania doboru zabezpieczeń nadprądowych w obwodach odbiorczych

Urządzenie zasilane o prądzie znamionowym I_n	Bezpiecznik	Wyłącznik nadprądowy		
	Prąd znamionowy wkładki topikowej	Prąd znamiono- wy ciągły wyłącznika	Prąd nastawczy członu przeciąże- niowego	Prąd nastawczy członu zwarcio- wego
	Krotność prądu znamionowego I_n zasilanego urządzenia			
	\geq	\geq	=	\geq
Ogrzewacz, piec rezystancyjny, kuchnia	1,0 ÷ 1,1	1,0 ÷ 1,1	—	—
Lampy żarowe	1,5 ÷ 2,5	1,10	—	9 ÷ 12
Lampy wyładowcze z kompensacją równoległą	1,5 ÷ 2,5	1,30	1,30	10 ÷ 14
Silnik indukcyjny o rozruchu bezpośrednim lekkim	1,6 ÷ 2,5	1,10÷1,25	1,0 ÷ 1,1	10 ÷ 14
Silnik indukcyjny o rozruchu bezpośrednim ciężkim	1,9 ÷ 3,5	1,10÷1,25	1,0 ÷ 1,1	10 ÷ 14
Silnik indukcyjny z rozrusznikiem gwiazda-trójkąt	1,25 ÷ 1,35	1,10÷1,25	1,0 ÷ 1,1	10 ÷ 16
Silnik indukcyjny z układem łagodnego rozruchu <i>softstart</i>	2,0 ÷ 4,0 ¹⁾	1,25	1,0 ÷ 1,1	10 ÷ 14 ²⁾
Jednoczłonowa bateria kondensatorów	1,5 ÷ 1,8	1,50	1,35 ÷ 1,50	10 ÷ 14
Człon wieloczłonowej baterii kondensatorów	1,7 ÷ 2,2	1,50	1,35 ÷ 1,50	10 ÷ 16

¹⁾ Wkładki topikowe o charakterystyce bardzo szybkiej, do półprzewodników. Pozostałe wkładki klasy gG.
²⁾ Można obniżyć dwukrotnie w opcji bez *kickstartu*.

5. Dobór przekroju przewodów

Podane niżej zasady doboru przekroju dotyczą przewodów czynnych (L, N); tylko niektóre z nich można odnosić również do przewodów ochronnych PE (wytrzymałość mechaniczna, obciążalność zwarciova cieplna). Kolejne kryteria doboru (5.1÷5.6) określają najmniejszy dopuszczalny przekrój przewodu. To kryterium, które dyktuje przekrój największy, jest rozstrzygające; tak dobrany przekrój spełnia wszystkie pozostałe wymagania [1, 2, 7].

Zanim przystąpi się do doboru przekroju przewodu trzeba zdawać sobie sprawę, o jakie przewody chodzi: linii napowietrznej, linii kablowej, czy instalacji wewnętrznej. W przypadku przewodów instalacyjnych trzeba uprzednio do warunków użytkowania dobrać **rodzaj przewodów** uwzględniając w szczególności:

- napięcie znamionowe instalacji;
- sposób układania: przewody układane na stałe czy przewody ruchome (bardzo giętkie);
- narażenia środowiskowe (np. podwyższona temperatura otoczenia, wilgoć, woda, narażenia mechaniczne);
- zagrożenia dla otoczenia, np. ułożenie na podłożu łatwo zapalnym.

5.1. Dobór przekroju przewodów ze względu na wytrzymałość mechaniczną

Przewód i jego połączenia powinny być niezawodne, powinny wytrzymywać zwykłe narażenia mechaniczne przy montażu i w czasie normalnego użytkowania [1]. Z tą myślą wymaga się pewnego przekroju minimalnego (tabl. 11), nawet gdyby ze wszystkich pozostałych powodów wystarczał przekrój mniejszy.

Tablica 11. Najmniejszy dopuszczalny przekrój przewodu ze względu na wytrzymałość mechaniczną

Rodzaj i zastosowanie przewodu		przewód miedziany mm ²	przewód aluminiowy mm ²
Gołe przewody napowietrzne na izolatorach przy rozpiętości przęsła <i>a</i>	$a \leq 20$ m	4	16
	$20 < a \leq 45$ m	6	16
	$a > 45$ m	10	25
Przewody elektroenergetyczne ułożone na stałe w pomieszczeniach		1,5	2,5 (w Polsce 16)
Przewody sterownicze ułożone na stałe w pomieszczeniach		0,5	zabroniony
Przewody izolowane we wnętrzu rozdzielnic i sterownic przy prądzie obciążenia <i>I</i>	$I \leq 2,5$ A	0,5	zabroniony
	$2,5 < I \leq 16$ A	0,75	zabroniony
	$I > 16$ A	1	zabroniony
Przewody obwodu wtórnego przekładnika prądowego		2,5	zabroniony
Przewody obwodu wtórnego przekładnika napięciowego		1,5	zabroniony

5.2. Dobór przekroju przewodów ze względu na nagrzewanie prądem roboczym

Obciążalność długotrwała przewodów I_z , powinna być niemniejsza niż **obliczeniowy prąd szczytowy** obwodu I_B :

$$I_z \geq I_B \quad (13)$$

Przy wyrównanym w czasie przebiegu obciążenia prąd I_B jest największym prądem normalnego użytkowania, płynącym wystarczająco długo, aby przyrost temperatury przewodu (ponad temperaturę otoczenia) ustalił się, tj. przestał się zwiększać. Przy zmiennym obciążeniu prąd I_B jest fikcyjnym prądem zastępczym, niezmiennym w czasie, który wywołuje taki sam największy przyrost temperatury, jak prąd rzeczywiście płynący.

Ten warunek jest istotny tylko w przypadku przewodów, które nie wymagają zabezpieczenia

od przeciążeń. Jeżeli przewody wymagają zabezpieczenia od przeciążeń, to powyższy warunek (13) jest samorzutnie spełniony przez dotrzymanie warunku (14).

5.3. Dobór przekroju przewodów ze względu na nagrzewanie prądem przeciążeniowym

Przewody układane w budynkach w zasadzie wymagają zabezpieczenia od przeciążeń. W instalacjach budynków zagrożenie pożarowe jest znacznie większe niż w sieciach rozdzielczych i dlatego stawia się (rys. 2) dwa następujące wymagania:

1. Obciążalność długotrwała przewodu I_z powinna być nie mniejsza niż prąd znamionowy lub prąd nastawczy I_n aparatu stanowiącego zabezpieczenie przeciążeniowe obwodu; ten z kolei – by zapobiec zbędnym zaszacowanym – powinien być nie mniejszy niż obliczeniowy prąd szczytowy obwodu I_B :

$$I_z \geq I_n \geq I_B \quad (14)$$

2. Prąd przeciążeniowy o wartości $1,45 \cdot I_z$, przy której przyrost temperatury przewodu ustala się na poziomie dwukrotnie większym niż dopuszczalny długotrwale, powinien wywoływać zadziałanie nadprądowego zabezpieczenia obwodu (nie określa się czasu zadziałania). Powinien być zatem spełniony warunek:

$$1,45 \cdot I_z \geq I_2, \quad \text{czyli} \quad I_z \geq \frac{I_2}{1,45} \quad (15)$$

gdzie:

I_2 – najmniejszy prąd niezawodnie wywołujący zadziałanie (członu przeciążeniowego) zabezpieczenia nadprądowego, czyli górny prąd probierczy urządzenia zabezpieczającego [A].

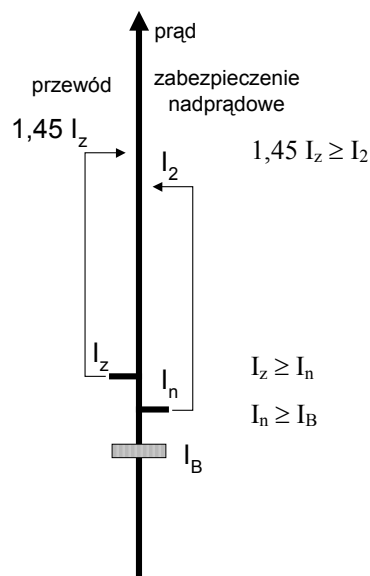
Wartość I_2 można ustalić na podstawie charakterystyki czasowo-prądowej urządzenia zabezpieczającego. Wynosi ona w stosunku do prądu znamionowego lub prądu nastawczego I_n :

- 1,9 – dla wkładek topikowych¹ o prądzie znamionowym $6 \leq I_n \leq 13$ A (wyłączenie przed upływem 1 h),
- 1,6 – dla wkładek topikowych o $I_n > 13$ A (wyłączenie przed upływem 1÷4 h zależnie od prądu znamionowego),
- 1,45 – dla wyłączników nadprądowych instalacyjnych B, C lub D (wyłączenie przed upływem 1 h),
- 1,2 – dla przekaźników termobimetalowych i elektronicznych współpracujących ze stycznikami oraz wyłącznikami sieciowymi i stacyjnymi (wyłączenie przed upływem 2 h)
- 1,2 – dla wyzwalaczy nadprądowych o charakterystyce typu E, (niem. *Exact-Charakteristik*) w ogranicznikach mocy pobieranej (wyłączenie przed upływem 20 min)

Podany wyżej – wymagany przez normy przedmiotowe – czas wyłączania urządzenia zabezpieczającego ma oczywiście wpływ na przyrost temperatury osiągnięty przez przeciążony przewód, ale nie ma wpływu na dobór obciążalności długotrwałej przewodu według procedury podanej w normie 60364 [10, 12].

Jeśli w obwodzie jest więcej niż jedno zabezpieczenie nadprądowe (np. bezpiecznik i stycznik z przekaźnikiem przeciążeniowym), to dla doboru przekroju przewodów przyjmuje się wartość prądu I_2 tego zabezpieczenia, dla którego wypada ona najmniejsza.

¹ Dotyczy tylko wkładek topikowych o pełnozakresowej zdolności wyłączania „g”; wkładki o niepełnozakresowej zdolności wyłączania „a” nie mogą być uważane za zabezpieczenie przeciążeniowe.



Rys. 2. Zestawienie wymagań odnośnie do przeciążeniowego zabezpieczenia przewodów w instalacjach budynków

Wymagania powyższe nie dotyczą przewodów napowietrznych i kablowych sieci rozdzielczych (pkt 473.1.2.d normy 60364 [12]) oraz takich obwodów instalacji w budynkach, w których prawdopodobieństwo występowania prądów przeciążeniowych jest pomijalnie małe (pkt 473.1.2.b [12]), np. obwodu odbiorników rezystancyjnych, jak kuchnia, piekarnik, ogrzewacz pomieszczenia lub ogrzewacz wody.

5.4. Dobór przekroju przewodów ze względu na nagrzewanie prądem zwarciovym

Zabezpieczenia przed niszczącymi skutkami zwarcia wymagają przewody wszelkich obwodów. Skutek cieplny prądu zwarciovego (9) dopuszczalny dla przewodu o przekroju s [mm²] i największej dopuszczalnej jednosekundowej gęstości prądu k [A/mm²] wynosi $(k \cdot s)^2 \cdot 1$ [A²s]. Powinien być on niemniejszy niż rzeczywiście występujący skutek cieplny prądu zwarciovego, na który przewód jest narażony [5, 10], tzn.:

- albo obliczony przez projektanta iloczyn ($I_{th}^2 \cdot T_k$) prądu zwarciovego zastępczego cieplnego I_{th} podniesionego do kwadratu i czasu trwania zwarcia T_k , jeśli zabezpieczenie zwarciove nie działa ograniczająco, zwłaszcza jeżeli wyłącza prąd zwarciovym z określoną zwłoką,
- albo podana przez wytwórcę wartość całki Joule'a wyłączenia ($I^2 t_w$) bezpiecznika ograniczającego lub wyłącznika ograniczającego (tabl. 12 i 13) zabezpieczającego przewód.

W urządzeniach niskonapięciowych w pierwszym z powyższych przypadków można utożsamiać prąd zwarciovym zastępczy cieplny I_{th} z prądem zwarciovym początkowym I_k'' [5]. Wspomniane wymaganie można zapisać następująco:

$$(k \cdot s)^2 \cdot 1 \geq I_{th}^2 \cdot T_k \quad \text{lub} \quad (k \cdot s)^2 \cdot 1 \geq (I^2 t)_w \quad (16)$$

Z zależności tych można obliczyć **przekrój przewodu wymagany ze względu na obciążalność zwarciovą cieplną**:

$$s \geq \frac{I_{th}}{k} \sqrt{\frac{T_k}{1}} \quad \text{lub} \quad s \geq \frac{1}{k} \sqrt{\frac{(I^2 t)_w}{1}} \quad (17)$$

W obu przypadkach druga postać wzoru dotyczy sytuacji, gdy narażenia zwarciove cieplne są scharakteryzowane wartością $(I^2 t)_w$ wyłączenia bezpiecznika albo wyłącznika, czyli całką Joule'a wyłączenia (tabl. 12 oraz 13). Jedyneką w mianowniku wyrażenia podpierwiastkowego oznacza czas 1 s, którego dotyczy gęstość prądu k , i pozostała tam dla zgodności jednostek.

Tablica 12. Największa dopuszczalna wartość I^2t wyłączania (prądu zwarcowego) wyłączników nadprądowych instalacyjnych o prądzie znamionowym ciągłym nieprzekraczającym 32 A

Znamionowa zwarciowa zdolność łączenia	Prąd znamionowy ciągły wyłącznika	I^2t wyłączania wyłączników o charakterystyce	
		B	C
kA	A	$A^2 \cdot s$	$A^2 \cdot s$
3	$I_n \leq 16$	15 000	18 000
	$16 < I_n \leq 32$	18 000	22 000
6	$I_n \leq 16$	35 000	42 000
	$16 < I_n \leq 32$	45 000	55 000
10	$I_n \leq 16$	70 000	84 000
	$16 < I_n \leq 32$	90 000	110 000

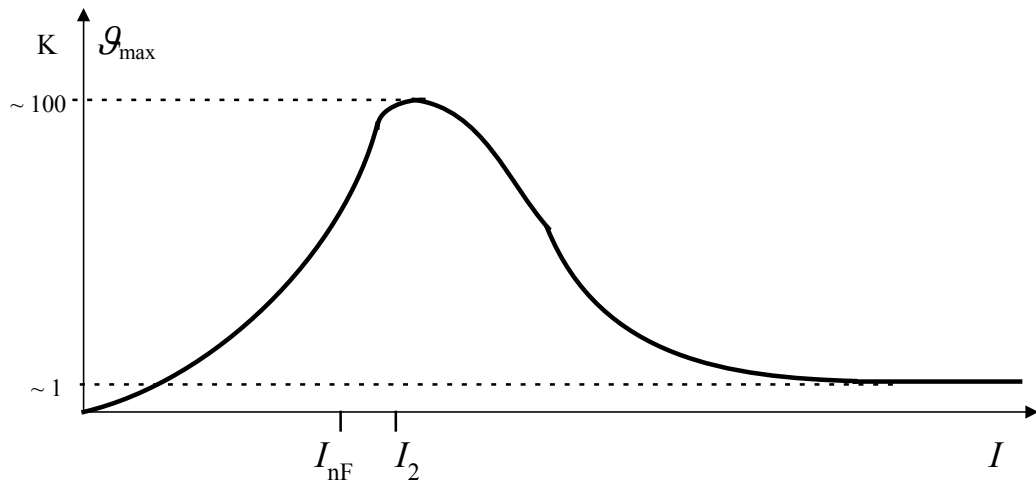
Dane dotyczą wyłączników oznaczonych cyfrą 3 w kwadracie (klasy 3. ograniczania wartości I^2t , tzn. o najmniejszej wartości I^2t)

Jak widać, sprawdzenie skuteczności zabezpieczenia przewodów przed skutkami cieplnymi przepływu największego spodziewanego prądu zwarcowego (przy zwarcu na początku obwodu) opiera się na jednoznacznym kryterium i wymaga niewielu informacji o przewodzie.

Tablica 13. Największa dopuszczalna wartość I^2t wyłączania (prądu zwarcowego) bezpieczników ogólnego przeznaczenia o pełnozakresowej zdolności wyłączania gG

Prąd znamionowy wkładki topikowej	$(I^2t)_w$	Prąd znamionowy wkładki topikowej	$(I^2t)_w$
A	$A^2 \cdot s$	A	$A^2 \cdot s$
6	193,6	125	104 000
10	640	160	185 000
16	1210	200	302 000
20	2500	250	557 000
25	4000	315	900 000
32	5750	400	1 600 000
40	9000	500	2 700 000
50	13 700	630	5 470 000
63	21 200	800	10 000 000
80	36 000	1000	17 400 000
100	64 000	1250	33 100 000

Jeżeli jedynym zabezpieczeniem nadprądowym przewodów jest bezpiecznik, to największe narażenie cieplne przewodów (rys. 3) występuje przy prądzie nieco większym niż górny prąd probierczy wkładki I_2 [3]. Jeżeli zatem bezpiecznik został tak dobrany, że spełnia rolę przeciążeniowego zabezpieczenia przewodów (14), to nie ma potrzeby sprawdzać, czy zabezpiecza on je również w wypadku zwarcia. Warunek (16) jest wtedy samorzutnie spełniony i to z dużym nadmiarem (por. przykład 1).



Rys. 3. Maksymalny przyrost temperatury osiągany przez przewód zabezpieczony bezpiecznikiem o prądzie znamionowym I_{nF} i górnym prądzie probierczym I_2 w zależności od wartości prądu przetężeniowego

Z rysunku 3 wynika, że nawet jeżeli w następstwie zmiany warunków zasilania spodziewany prąd zwarciový w instalacji znacznie wzrasta, to nie ulegają znaczącej zmianie narażenia cieplne przewodów zabezpieczonych bezpiecznikami.

5.5. Dobór przekroju przewodów ze względu na dopuszczalny spadek napięcia wywołany obliczeniowym prądem szczytowym I_B

Po wstępnym dobraniu przekroju przewodów według powyższych wskazówek, można obliczyć występujący w nich spadek napięcia, wywołany obliczeniowym prądem szczytowym obwodu I_B . Jeśli nie przekracza on wartości dopuszczalnej (2÷8 % zależnie od okoliczności), dobrany przekrój jest wystarczający. Jeśli przekracza, można przekrój kolejno powiększać o jeden stopień i obliczenia powtarzać aż do uzyskania zadowalającego wyniku.

Można też bezpośrednio obliczyć wymagany przekrój przewodów obwodu jednofazowego:

$$s \geq \frac{1}{\gamma \cdot \left(\frac{\Delta U_{\%} \cdot U}{200 \cdot I \cdot l \cdot \cos \varphi} - x_L \cdot 10^{-3} \cdot \operatorname{tg} \varphi \right)} \quad (18)$$

i obwodu trójfazowego

$$s \geq \frac{1}{\gamma \cdot \left(\frac{\Delta U_{\%} \cdot U}{100 \cdot \sqrt{3} \cdot I \cdot l \cdot \cos \varphi} - x_L \cdot 10^{-3} \cdot \operatorname{tg} \varphi \right)} \quad (19)$$

gdzie:

- U – napięcie znamionowe obwodu [V];
- s – przekrój przewodu [mm^2];
- l – długość obwodu [m];
- γ – konduktywność żyły przewodu [$\text{m}/\Omega \cdot \text{mm}^2$];
- x_L – reaktancja jednostkowa przewodu [Ω/m];
- I – obliczeniowy prąd szczytowy [A];
- $\Delta U_{\%}$ – największy dopuszczalny spadek napięcia przy obciążeniu prądem I [%];
- $\cos \varphi$ – współczynnik mocy odpowiadający prądowi I [-];
- $\operatorname{tg} \varphi$ – wartość funkcji tangens związana z powyższą wartością funkcji cosinus.

Jeśli reaktancja przewodów x_L jest pomijalnie mała (przewody instalacyjne, kable o niedużym przekroju), to wzory powyższe upraszczają się do postaci odpowiednio dla obwodu jednofazowego:

$$s \geq 200 \cdot \frac{I \cdot l \cdot \cos \varphi}{\gamma \cdot \Delta U_{\%} \cdot U}, \quad (20)$$

i dla obwodu trójfazowego:

$$s \geq 100 \cdot \sqrt{3} \cdot \frac{I \cdot l \cdot \cos \varphi}{\gamma \cdot \Delta U_{\%} \cdot U}. \quad (21)$$

5.6. Dobór przekroju przewodów ze względu na dopuszczalny spadek napięcia wywołany prądem załączeniowym obwodu

Tok obliczeń przedstawia się jak powyżej, lecz do wzorów należy wstawić prąd załączeniowy oraz odpowiadający mu współczynnik mocy $\cos \varphi$ (i właściwą wartość $\operatorname{tg} \varphi$), a także – większy dopuszczalny spadek napięcia $\Delta U_{\%}$. Ze względu na znacznie mniejszy współczynnik mocy przy załączaniu (w obwodzie silnika indukcyjnego na przykład: $0,3 \div 0,4$ zamiast $0,8 \div 0,9$) pomijanie reaktancji przewodów może być niedopuszczalne, nawet jeżeli byłoby do zaakceptowania w określaniu spadku napięcia przy obliczeniowym prądzie szczytowym obwodu (punkt 5.5). Dla zachowania jednolitości obliczeń lepiej wtedy uwzględnić reaktancję w obu przypadkach (punkty 5.5 i 5.6).

Z tego kryterium doboru przekroju przewodów może wynikać przekrój większy niż z poprzedniego, jeśli prąd załączeniowy jest wielokrotnie większy od prądu I_B , a nie można w podobnym stopniu¹ zwiększyć dopuszczalnego spadku napięcia.

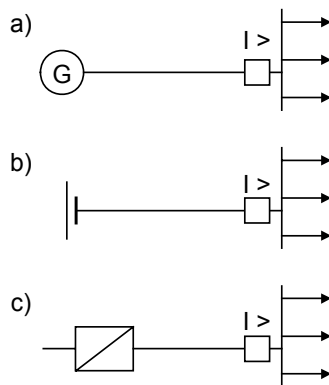
Problem występuje np. przy rozruchu silnika, a zwłaszcza – przy jednoczesnym rozruchu grupy silników. Wartość dopuszczalnego spadku napięcia powinna uwzględniać zarówno wymagania stawiane przez urządzenie załączane (np. możliwość odbycia rozruchu), jak i przez inne urządzenia zasilane z tej samej sieci (np. migotanie światła, odpadanie styczników).

¹ Wywołany spadek napięcia nie zwiększa się w tym samym stopniu co prąd, bo inny jest współczynnik mocy przy obliczeniowym prądzie szczytowym I_B , a inny — przy prądzie załączeniowym.

6. Umiejscowienie zabezpieczeń nadprądowych

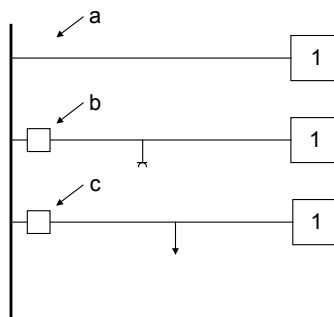
Zabezpieczenia nadprądowe mają wyłączyć obwód w razie przepływu nadmiernego prądu wywołanego **przeteżeniem**, czyli **zwarcie** albo **przeciążeniem**. Między tymi zdarzeniami jest taka różnica, że prąd zwarciovowy płynie w obwodzie o uszkodzonej izolacji, a prąd przeciążeniowy – w obwodzie nieuszkodzonym. Największe spodziewane prądy zwarciovowe są wielokrotnie większe od prądów przeciążeniowych, ale – ściśle biorąc – kryterium odróżniającym zwarcia od przeciążenia nie jest wartość prądu, bo przy zwarciu oporowym (przez dużą rezystancję w miejscu zwarcia, np. przez zwęgloną izolację) płynie w obwodzie prąd zwarciovowy, chociaż może mieć wartość sugerującą przeciążenie.

Zdarzeniem, kiedy może nie zadziałać w porę żadne z tych zabezpieczeń, jest zwarcie oporowe na trasie przewodów. Prąd może być za mały, by pobudzić zabezpieczenie zwarciovowe. Natomiast zabezpieczenie przeciążeniowe zadziałałoby, gdyby było zabezpieczeniem nadprądowym i to umieszczonym na początku obwodu. Tak być nie musi, bo może to być zabezpieczenia nadprądowe u końca obwodu, przy odbiorniku, a może też to być czujnik temperatury wbudowany w zabezpieczanym urządzeniu.



Rys. 4. Odcinek przewodów od źródła energii do rozdzielni niezabezpieczony przed skutkami zwarcia – dopuszczalne odstępstwo w przypadku: a) generatora; b) baterii akumulatorów; c) przekształtnika

Zabezpieczenie zwarciovowe z definicji jest wymagane na początku każdego obwodu instalacji elektrycznej, w miejscu wyprowadzenia go lub odgałęzienia, najdalej 3 m od tego miejsca. Jest też potrzebne w miejscach, w których następuje zmniejszenie obciążalności zwarciovowej przewodów (zmniejszenie przekroju żył i/lub zmiana budowy przewodów: materiału żył, materiału izolacji). Pewne odstępstwa od tej zasady (przewody od generatora, przekształtnika lub baterii akumulatorów do rozdzielni, jak na rys. 4) dopuszcza się, jeżeli przewody są **odporne na zwarcie** (izolacja wzmocniona, podwyższone napięcie znamionowe, chronione od uszkodzeń) i nie sąsiadują z materiałami łatwo zapalnymi.



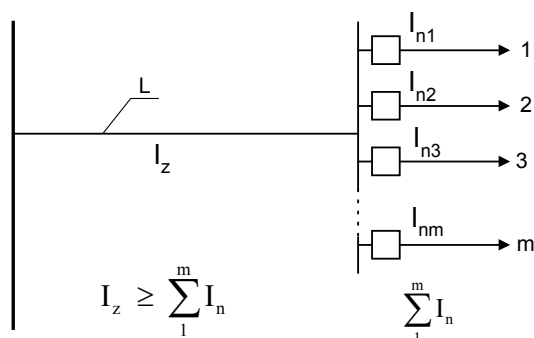
Rys. 5. Przypadki dozwolonej (a) i niedozwolonej (b, c) rezygnacji z zabezpieczenia przeciążeniowego

1 – odbiornik niezagrażający przeciążeniem lub odbiornik z wbudowanym zabezpieczeniem przeciążeniowym

Zabezpieczenie przeciążeniowe jest wymagane w obwodach silników podatnych na przeciążenie; bywa stosowane w odniesieniu do innych odbiorników, a także do transformatorów i baterii kondensatorów dużej mocy. Poza miejscami zagrożonymi pożarem i/lub wybuchem wolno je umieścić na końcu obwodu. Jako zabezpieczenie przeciążeniowe stosuje się przekładniki nadprądowe termobimetalowe albo elektroniczne, współdziałające ze stycznikami bądź wyłącznikami, a także

wbudowane czujniki temperatury. Niejako przy okazji zabezpieczają one od przeciążeń również przewody obwodu, w którym są zainstalowane. Bezpieczniki nie są w stanie zabezpieczać przeciążeniowo odbiornika, bo prądy po przekroczeniu których zaczynają interweniować są o 30÷60 % większe niż prąd, którym wolno je długotrwale obciążyć. Rolę w miarę skutecznego zabezpieczenia przeciążeniowego bezpieczniki mogą spełniać tylko w odniesieniu do:

- transformatorów SN/400 V – pod warunkiem użycia wkładek klasy gTr;
- przewodów – pod warunkiem ich przewymiarowania.



Rys. 6. Przewody zabezpieczone przed przeciążeniem przez zabezpieczenia przeciążeniowe linii odgałęźnych (odpływowych)

Od zabezpieczenia przeciążeniowego przewodów wolno odstąpić, jeśli prawdopodobieństwo wystąpienia przeciążenia jest pomijalnie małe, tzn. przewody mają obciążalność długotrwałą I_z niemniejszą niż obliczeniowy prąd szczytowy I_B i występuje co najmniej jedna z następujących okoliczności:

- Przewody bez odgałęzień i gniazd wtyczkowych (rys. 5) zasilają urządzenie z wbudowanym zabezpieczeniem przeciążeniowym albo zasilają urządzenie niezagrażające wystąpieniem prądu przeciążeniowego (urządzenie grzejne rezystancyjne, silnik o prądzie w stanie zahamowanym I_{LR} mniejszym niż obciążalność długotrwała przewodów I_z).
- Przewody zasilają wiele odgałęzień bądź linii odpływowych (1, 2... m), z których każda ma zabezpieczenie przeciążeniowe, a suma prądów znamionowych (prądów nastawczych) tych zabezpieczeń jest nie większa niż obciążalność długotrwała I_z przewodów linii głównej L (rys. 6).
- Przewody łączą źródło energii (generator, transformator, przekształtnik, baterię akumulatorów) z rozdzielnicą i mają obciążalność długotrwałą niemniejszą niż prąd znamionowy tego źródła (rys. 4); jeżeli jednak zabezpieczenie przeciążeniowe znajduje się w samej rozdzielnicy, u końca obwodu, razem z zabezpieczeniem zwarciovym, to przewody uważa się za zabezpieczone przed przeciążeniami.
- Przewody łączą wirnik silnika indukcyjnego pierścieniowego z rozrusznikiem.
- Przewody o silnie zmiennym obciążeniu (np. przerywanym lub dorywczym) podlegające specjalnym zasadom doboru.
- Linie kablowe i linie napowietrzne, wchodzące w skład sieci rozdzielczej, których przeciążenie nie zagraża ludziom ani mieniu o dużej wartości.
- Przewody obwodów pomocniczych (zabezpieczeniowych, sterowniczych, sygnalizacyjnych, pomiarowych).

Rozważając właściwe usytuowanie zabezpieczeń nadprądowych trzeba też rozstrzygnąć, w których przewodach powinny się one znaleźć i które przewody – po wykryciu przetężenia – powinny rozłączać. Zwięzłe zasady dla instalacji o **układzie TN i układzie TT** podaje tabl. 14. Korzystając z niej należy pamiętać, że każdy obwód powinien mieć oddzielne, tylko do niego należące, przewody czynne. W szczególności każdy obwód powinien mieć oddzielny przewód neutralny N (albo ochronno-neutralny PEN), jeśli taki przewód występuje w przyjętym układzie. Nie dopuszcza się wspólnego przewodu neutralnego N (PEN) dla dwóch lub więcej obwodów. Natomiast w obwodach TT oraz TN-S dopuszcza się wspólny przewód ochronny PE dla dwóch lub więcej obwodów, jeżeli spełnia on wymagania stawiane oddzielnemu przewodowi ochronnemu PE każdego z tych obwodów.

Tablica 14. Wymagania co do zabezpieczania nadprądowego poszczególnych przewodów w trójfazowych obwodach instalacji o układzie TN i TT

Przewody		Kontrola prądu w przewodzie	Rozłączanie przewodu w razie przetężenia
fazowe L (o przekroju s_L)		wymagana	wymagane
neutralny N (o przekroju s_N)	$s_N \geq s_L$	nie wymagana ¹⁾	nie wymagane ²⁾
	$s_N < s_L$	wymagana ³⁾	nie wymagane ²⁾
ochronny PE		dozwolona	zabronione
ochronno-neutralny PEN		dozwolona	zabronione

¹⁾ Kontrola prądu w przewodzie N jest wskazana w obwodach o obciążeniu silnie odkształconym, zwłaszcza przy znaczącym udziale harmonicznych rzędu podzielnego przez 3 (*triplen*).

²⁾ Rozłączalny biegun N powinien być przerywany nie wcześniej niż bieguny fazowe L, a załączany – nie później niż one. Nie wolno w biegunie N umieścić bezpiecznika przerywającego obwód jednobiegunowo, co groziłoby wystąpieniem asymetrii napięć fazowych.

³⁾ Dopuszczalne odstępstwo, jeśli obciążalność długotrwała przewodu N jest dobrana z zapasem (nie grozi mu przeciążenie) i jest on wystarczająco zabezpieczony przed skutkami zwarcia przez zabezpieczenia w przewodach fazowych.

Problem **zabezpieczania i rozłączania przewodu (toru) neutralnego N** wymaga szerszego komentarza. Jak wynika z zapisów w tabl. 14, tylko w szczególnych okolicznościach jest wymagana kontrola wartości prądu w przewodzie neutralnym trójfazowego układu TN-S lub TT, ale nawet wtedy nie jest wymagane rozłączanie przewodu (toru) neutralnego. Nie jest wymagane, ale nie jest również zabronione, czyli jest dozwolone. Takie wnioski i takie zasady wynikają z norm dotyczących zabezpieczania przewodów od przetężeń [12].

Z kolei względy bezpieczeństwa porażeniowego przy konserwacji i remontach wymagają [11], by istniała możliwość odłączania od zasilania wszystkich przewodów czynnych obwodu, czyli możliwość stworzenia bezpiecznej przerwy izolacyjnej we wszystkich torach przepływu energii. Przewód N jest przewodem czynnym. Między przewodem neutralnym N a przewodem ochronnym PE i częściami przewodzącymi dostępnymi w rozpatrywanych układach TN-S oraz TT może z różnych powodów pojawić się napięcie wyczuwalne, a nawet niebezpieczne. Może się pojawić również w nieczynnym urządzeniu, w obwodzie wyłączonym, o przerwanych wszystkich przewodach (torach) fazowych. Zdarzyć się to może w następstwie zwarcia w innym miejscu rozpatrywanej sieci TN lub TT, a także w następstwie zwarcia w poprzedzającej sieci średniego napięcia bądź w wyniku przepięć pochodzenia atmosferycznego, zwłaszcza przy bezpośrednim lub pobliskim uderzeniu pioruna. Grozi to nie tylko porażeniem ludzi bądź zwierząt, ale i wybuchem w przestrzeniach o takim zagrożeniu. Problem występuje ostrzej w znacznie mniej rozpowszechnionym układzie TT, w którym przewód neutralny N jest uziemiony w zasadzie tylko u źródła zasilania, przy stacji zasilającej.

To dodatkowe wymaganie odłączania wszystkich przewodów czynnych wielu fałszywych ekspertów radzi spełnić w jedyny sposób, jaki przychodzi im do głowy: instalując dodatkowy łącznik. Rekordzistom udało się w pospolitym obwodzie silnika 4 kW wcisnąć aż cztery łączniki: rozłącznik, wyłącznik nadprądowy, stycznik z przekaźnikiem przeciążeniowym oraz wyłącznik różnicowoprądowy¹. To równie mądre, jak doradzanie zakupu czterech samochodów po to, aby podczas jazdy wykorzystywać z jednego silnika, z drugiego kierownicę, z trzeciego hamulce, a z czwartego klimatyzację.

Bezpieczną przerwę izolacyjną w obwodzie może stworzyć dowolny łącznik, który choćby ubocznie spełnia funkcję łącznika izolacyjnego:

¹ Fira M. (rec): Wiatr J., Orzechowski M.: Poradnik projektowania i wykonawstwa. Zasilanie budynków nieprzemysłowych w energię elektryczną. Dom Wydawniczy MEDIUM, Warszawa, 2004 r. Biul. SEP INPE „Informacje o normach i przepisach elektrycznych”, 2005, nr 68-69, s. 130-136 (uwaga nr 12).

- wyłącznik izolacyjny,
- rozłącznik izolacyjny (rozłącznik izolacyjny bezpiecznikowy, rozłącznik izolacyjny z bezpiecznikami albo rozłącznik izolacyjny bez bezpieczników) lub
- odłącznik – łącznik o znikomej zdolności łączenia, przeznaczony tylko do tworzenia bezpiecznej przerwy izolacyjnej, stosowany obecnie raczej tylko w urządzeniach wysokonapięciowych.

Interesujące są dwie pierwsze możliwości połączenia w jednym aparacie funkcji odłączania wszystkich przewodów czynnych od zasilania oraz funkcji nadprądowego zabezpieczenia obwodu. W czteroprzewodowym obwodzie trójfazowym TN-S lub TT taki aparat musi mieć cztery bieguny: L1, L2, L3, N. Rozłączalny biegun neutralny powinien się zamykać wcześniej, a otwierać później niż inne bieguny.

W przypadku 4-biegunowego **izolacyjnego rozłącznika** bezpiecznikowego wchodzi w rachubę tylko jedno rozwiązanie: w biegunie neutralnym N zwora zamiast wkładki topikowej. Inna możliwość, tzn. użycie wkładek wybijakowych – również w biegunie N – inicjujących pełnobiegunowe otwarcie rozłącznika, nie jest u nas wykorzystywana w urządzeniach niskiego napięcia.

Z kolei w przypadku 4-biegunowego **izolacyjnego wyłącznika** w biegunie neutralnym N będzie zestyk łączeniowy, ale niekoniecznie (tabl. 14) będzie wyzwalacz nadprądowy. Biegun neutralny może mieć ten sam bądź inny prąd znamionowy ciągły niż bieguny fazowe. Do obwodów, w których prąd w przewodzie neutralnym I_N jest większy niż prąd w przewodach fazowych I_L : $\nu = I_N/I_L > 1$ (tabl. 7), są oferowane wyłączniki, których biegun neutralny ma prąd znamionowy ciągły większy o jeden stopień ciągu R5 prądów znamionowych łączników, tzn. większy w stosunku $\sqrt[5]{10} = 1,58$. Przykładowo, wyłącznik 160 A ma wtedy biegun neutralny 250 A.

Nie od rzeczy będzie na koniec wyjaśnić, co to jest wyłącznik izolacyjny. Otóż jest to wyłącznik, czyli łącznik przystosowany do samoczynnego wyłączania prądów zwarciovych, który spełnia co najmniej dwa dodatkowe wymagania:

- w stanie otwartym zapewnia bezpieczną przerwę biegunową, czyli wytrzymuje określone normą napięcie probiercze przyłożone między zaciski tego samego bieguna,
- ma wskaźnik położenia styków (otwarte – zamknięte) sprzężony mechanicznie nie z dźwignią napędową, lecz z układem styków ruchomych.

Ewolucja norm międzynarodowych sprawiła, że rozłączanie wszystkich przewodów (torów) czynnych, również przewodu neutralnego obwodu trójfazowego TN-S i TT, zaczęto uważać za rozwiązanie eleganckie, bardziej funkcjonalne, a w wielu sytuacjach zalecane ze względów bezpieczeństwa [6], zwłaszcza w obwodach odbiorczych.

Tych, którzy chcieliby to uznać za nowość i nowoczesność, można odesłać do pochodzącej z roku 1928 normy PNE/10 – 1932/46, która w § 8.6 stanowiła [19]:

„Liczba biegunów. Wyłączniki do odbiorników muszą być w zasadzie wielobiegunowe i przerywać prąd jednocześnie na wszystkich fazach lub biegunach, a także w przewodzie zerowym. Wyjątek stanowią: ...”

7. Przykłady obliczeniowe

Przykład 1

Obwód trójfazowy o obliczeniowym prądzie szczytowym $I_B = 90$ A ma być zabezpieczony tylko bezpiecznikami. W obwodzie nie występują duże krótkotrwałe prądy robocze, a długość obwodu jest mała. Należy dobrać bezpieczniki i przewody miedziane o izolacji polwinitowej (sposób układania B1) oraz ocenić narażenia cieplne przewodów przy przeciążeniach i przy zwarciach.

W obwodzie są potrzebne bezpieczniki o prądzie znamionowym spełniającym warunek $I_n \geq I_B$, czyli bezpieczniki gG 100 A ($I_2 = 160$ A) oraz przewody o obciążalności długotrwałej co najmniej

$$I_z \geq I_n = 100 \text{ A} \quad \text{oraz} \quad I_z \geq \frac{I_2}{1,45} = \frac{160}{1,45} = 110 \text{ A},$$

np. przewody 35 mm^2 (tabl. 5) o obciążalności $I_z = 117$ A. Przewody o izolacji polwinitowej mogą nagrzewać się od obliczeniowej temperatury otoczenia $\tau_o = 25$ °C do temperatury granicznej dopuszczalnej długotrwałe $\tau_{dd} = 70$ °C i do temperatury granicznej dopuszczalnej przy zwarciu $\tau_{dz} = 160$ °C; ich największa dopuszczalna jednosekundowa gęstość prądu wynosi $k = 115$ A/mm² (tabl. 8). Bezpieczniki gG 100A mają górny prąd probierczy $I_2 = 160$ A i całkę Joule'a wyłączenia $I^2 t_w = 64\,000$ A²s (tabl. 13). Największy przyrost temperatury przewodów osiągany przy przeciążeniu, w warunkach nagrzewania z wymianą ciepła z otoczeniem wynosi w przybliżeniu

$$\mathcal{G}_p = (\tau_{dd} - \tau_o) \left(\frac{I_2}{I_z} \right)^2 = (70 - 25) \left(\frac{160}{117} \right)^2 = 84 \text{ K}.$$

Natomiast przy przepływie dużego prądu zwarciovego, w warunkach nagrzewania adiabatyicznego, przewody osiągają przyrost temperatury wielokrotnie mniejszy (por. rys. 3):

$$\mathcal{G}_z = (\tau_{dz} - \tau_{dd}) \frac{I^2 t_w}{(k \cdot s)^2 \cdot 1} = (160 - 70) \frac{64000}{(115 \cdot 35)^2 \cdot 1} = 0,4 \text{ K}.$$

Jak widać, przewody zabezpieczone przed przeciążeniami przez bezpieczniki tym bardziej są przez nie zabezpieczone przed skutkami zwarć i nie wymagają dodatkowego sprawdzania z tego tytułu.

Przykład 2

Dobrac zabezpieczenia i przewody obwodu kuchni elektrycznej mającej 4 płytki ($3 \times 2,6$ kW + 1,85 kW) oraz piekarnik (3,1 kW). Instalacja elektryczna budynku jest po przebudowie, mieszkanie jest zasilane 3-fazowo i ma odpowiednią moc przyłączeniową. Obwód o długości 8 m ma być zasilany z rozdzielniczy mieszkaniowej, przy której po remoncie zmierzono rezystancję pętli zwarciovowej L-PE, otrzymując wynik 0,40 Ω. Jednożyłowe przewody DY (A07V-U1) bądź LgY (A07V-K1)¹ mają być wciągnięte do zawczasu ułożonej rurki winidurowej $\phi 28$ pod tynkiem (sposób układania B1).

Przed przystąpieniem do szczegółowych rozważań i obliczeń zawsze warto dostrzec **kwestie zasadnicze**. W tym przypadku są one następujące: 1) kuchnia o podanej mocy jest kuchnią 3-fazową; 2) ze względu na regulację mocy grzejnej trzeba do kuchni doprowadzić nie tylko przewody fazowe, lecz również przewód neutralny o tym samym przekroju; 3) nie jest możliwy taki tryb pracy, aby wszystkie cztery przewody czynne (L1, L2, L3, N) były jednocześnie obciążone w dużym stopniu, wobec czego można przyjąć z normy obciążalność dla trzech przewodów w rur-

¹ Przewody giętkie są wskazane, jeżeli przy przyłączaniu konieczne będzie przesuwanie kuchni i przeginanie przewodu.

ce; 4) nie jest możliwy taki tryb pracy, aby w przewodzie neutralnym płynął prąd większy niż obliczeniowy prąd szczytowy kuchni; 5) sama kuchnia nie wymaga zabezpieczenia przeciążeniowego; 6) kuchnia nie pobiera zwiększonego prądu przy załączaniu, zatem wystarczy wyłącznik o charakterystyce typu B.

Moc zainstalowana kuchni (przy pominięciu niewielkiej mocy pobieranej przez wskaźniki świetlne i ew. wentylator) jest sumą mocy znamionowych wszystkich elementów grzejnych:

$$P_i = 3 \cdot 2,6 + 1,85 + 3,1 = 12,75 \text{ kW}$$

Obliczeniowa moc szczytowa będzie mniejsza, zapewne nie przekroczy 10 kW, bo prawdopodobieństwo jednoczesnego pełnego wykorzystywania mocy wszystkich grzejników jest pomijalnie małe. Jednakże w rozważanym obwodzie nie uzyska się z tego tytułu żadnych oszczędności, wobec czego można przyjąć jako obliczeniowy prąd szczytowy (tabl. 10) wartość nieco zawyżoną, wynikającą z mocy zainstalowanej:

$$I_B = k_{as} \frac{P_B}{\sqrt{3} \cdot U_n} = 1,25 \frac{12750}{\sqrt{3} \cdot 400} = 23,0 \text{ A}$$

Wartość współczynnika niesymetrii $k_{as} = 1,25$ uwzględnia największą możliwą niesymetrię mocy grzejników, a mianowicie przyłączenie dwóch płytek 2,6 kW do jednej fazy. Przy doborze wyłącznika nie jest potrzebna korekta temperaturowa, bo ma być on umieszczony w obszernej wnęce ściennej z otworami wentylacyjnymi. Należy zainstalować 4-biegunowy wyłącznik nadprądowy B25, o prądzie znamionowym 25 A i charakterystyce typu B.

Potrzebne są jednożyłowe przewody miedziane o przekroju nie mniejszym niż:

- ze względu na wytrzymałość mechaniczną (tabl. 11) $s \geq 1,5 \text{ mm}^2$;
- ze względu na nagrzewanie prądem roboczym $I_B = 23 \text{ A}$ są potrzebne przewody o przekroju 4 mm^2 , o obciążalności długotrwałej $I_z = 30 \text{ A}$ (tabl. 5, sposób układania B1, 3 przewody w rurce)¹;
- ze względu na nagrzewanie prądem zwarciovym; wyłącznik B20 o zdolności wyłączenia 6 kA ma I^2t wyłączenia $45\,000 \text{ A}^2 \cdot \text{s}$ (tabl. 12), wobec czego wymagany przekrój przewodu:

$$s \geq \frac{1}{k} \sqrt{\frac{I^2 t}{1}} = \frac{1}{115} \sqrt{\frac{45\,000}{1}} = 1,85 \text{ mm}^2 \quad \text{tzn. co najmniej } 2,5 \text{ mm}^2;$$

- ze względu na nagrzewanie prądem przeciążeniowym², w obwodzie zabezpieczonym wyłącznikiem nadprądowym $I_n = 25 \text{ A}$ prąd $I_2 = 1,45 \cdot 25 = 36,25 \text{ A}$:

$$I_z \geq I_n \qquad I_z \geq 20 \text{ A}$$

$$1,45 I_z \geq I_2 \qquad 1,45 I_z \geq 1,45 \cdot 25 \qquad I_z \geq 25 \text{ A}$$

byłyby wymagane przewody 4 mm^2 o obciążalności długotrwałej $I_z = 30 \text{ A}$;

- ze względu na dopuszczalny spadek napięcia (3 % w obwodzie zasilającym odbiorniki siłowe i grzejne), przy uwzględnieniu konduktywności miedzi „na gorąco” (mniejszej w stosunku 1,25), wymagany przekrój przewodu

$$s \geq 100 \sqrt{3} \cdot \frac{I \cdot l \cdot \cos \varphi}{\gamma \cdot \Delta U_{\%} \cdot U} = 100 \sqrt{3} \cdot \frac{23 \cdot 8 \cdot 1}{\frac{58}{1,25} \cdot 3 \cdot 400} \approx 0,6 \text{ mm}^2$$

Rozstrzygające są wymagania (b, d): potrzebne są przewody o przekroju 4 mm^2 . Obliczenia

¹ Przy oszczędnym doborze wystarczyłyby przewód $2,5 \text{ mm}^2$ o obciążalności odpowiednio 25 A (2 przewody w rurce) i 22 A (3 przewody w rurce), bo nie jest możliwy aż w trzech przewodach prąd o wartości równej bądź bliskiej 23 A.

² W obwodzie odbiornika rezystancyjnego przeciążenia nie są spodziewane i to wymaganie można by pominąć (pkt 473.1.2 b normy [12]), co jednak nie wpływa na dobór elementów rozpatrywanego obwodu.

dotyczą przewodów czynnych L i N. Przewód ochronny PE powinien w tym przypadku mieć przekrój niemniejszy niż przewody czynne. Do rurki należy zatem wciągnąć 5 przewodów o przekroju 4 mm^2 .

Pozostaje sprawdzić warunek samoczynnego wyłączenia zasilania, tzn. czy przy uszkodzeniu izolacji podstawowej w pobliżu zacisków przyłączowych kuchni nastąpi samoczynne wyłączenie. Do rozdzielnicy mieszkaniowej rezystancja pętli zwarciowej L-PE wynosi $R_{kQ} = 0,40 \Omega$. Rezystancję wprowadzaną przez obwód, w którym oblicza się najmniejszy spodziewany prąd zwarciowy, należy przyjąć „na gorąco”; wynosi ona dla obwodu kuchni:

$$R_L = \frac{2 \cdot l}{\gamma \cdot s} = \frac{2 \cdot 8}{\frac{58}{1,25} \cdot 4} = 0,09 \Omega$$

Najmniejszy spodziewany prąd zwarciowy u końca obwodu wynosi

$$I_{k1min}'' = \frac{c_{min} \cdot U_0}{R_{kQ} + R_L} = \frac{0,95 \cdot 230}{0,40 + 0,09} = 446 \text{ A}$$

i jest znacznie większy niż prąd wyłączający wyłącznika nadprądowego B25 o wartości: $I_a = 5 \cdot 25 = 125 \text{ A}$; przy prądzie 446 A wyłącznik B20 przerywa przepływ prądu w czasie nieprzekraczającym $0,02 \text{ s}$. Potwierdza to spełnienie warunku samoczynnego wyłączenia zasilania.

Jeżeli w obwodzie jest wyłącznik różnicowoprądowy, choćby niskoczulý ($I_a = 0,1 \text{ A}$ lub $0,3 \text{ A}$), to stan ochrony przeciwporażeniowej dodatkowej tym bardziej jest zadowalający; w takim przypadku najmniejszy spodziewany prąd zwarciowy na pewno jest dostatecznie duży do pobudzenia wyłącznika i wystarczyłoby sprawdzać ciągłość połączeń ochronnych.

Przykład 3

Dobrać zabezpieczenia i przekrój miedzianego przewodu kabelkowego lub kabla o izolacji i powłoce polwinitowej (A07VV-...) układanego po wierzchu (sposób C) do zasilania trójfazowego pieca rezystancyjnego o danych: $U_n = 400 \text{ V}$, $P_n = 55 \text{ kW}$. Długość obwodu wynosi 50 m . W projekcie obliczono, że impedancja pętli zwarciowej L-PE od źródła zasilania do rozdzielnicy oddziałowej pieca wynosi $Z_{kQ} = 0,12 \Omega$.

Kwestie zasadnicze. Przemysłowy piec rezystancyjny jest odbiornikiem o takim charakterze jak kuchnia z przykładu 2. Grzejniki symetrycznie obciążają trzy fazy. Obwód będzie miał na początku bezpieczniki (ew. rozłącznik bezpiecznikowy), a u końca – stycznik. Piec nie wymaga zabezpieczenia od przeciążeń. Prąd znamionowy pieca (tabl. 9) wynosi:

$$I_n = \frac{P_B}{\sqrt{3} \cdot U_n} = \frac{55000}{\sqrt{3} \cdot 400} = 79,4 \text{ A}$$

Uwzględniając możliwość długotrwałej pracy przy napięciu podwyższonym do $1,05 \cdot U_n$, jako obliczeniowy prąd szczytowy obwodu bezpiecznie jest przyjąć wartość: $I_B = 1,05 \cdot I_n = 1,05 \cdot 79,4 = 83 \text{ A}$. Potrzebne są zatem w obwodzie (tabl. 10):

- bezpieczniki klasy gG o prądzie znamionowym 100 A – bezpieczniki stacyjne WTN00 100;
- stycznik LS 77, nadający się do sterowania pieca rezystancyjnego (kategoria użytkowania AC-1) o mocy do 72 kW i wytrzymujący narażenia zwarciove za bezpiecznikiem klasy gG o prądzie znamionowym nieprzekraczającym 100 A .

Przekrój przewodów powinien być niemniejszy niż:

- a) ze względu na wytrzymałość mechaniczną (tabl. 11) $s \geq 1,5 \text{ mm}^2$;
- b) ze względu na nagrzewanie prądem roboczym $I_B = 83 \text{ A}$ jest potrzebny przewód o przekroju 25 mm^2 , o obciążalności długotrwałej (tabl. 5) $I_z = 102 \text{ A}$;

- c) ze względu na nagrzewanie prądem zwarciovym; bezpiecznik gG 100 A ma I^2t wyłączenia $64\,000\text{ A}^2 \cdot \text{s}$ (tabl. 13), wobec czego wymagany przekrój przewodu

$$s \geq \frac{1}{k} \sqrt{\frac{I^2 t}{1}} = \frac{1}{115} \sqrt{\frac{64\,000}{1}} = 2,2\text{ mm}^2, \quad \text{tzn. co najmniej } 2,5\text{ mm}^2;$$

- d) ze względu na nagrzewanie prądem przeciążeniowym – można pominąć to wymaganie, bo przeciążenie w obwodzie pieca rezystancyjnego, użytkowanego w warunkach przemysłowych (przez osoby wykwalifikowane), jest niemal nieprawdopodobne (pkt 473.1.2 b normy [12]); dotyczy to również możliwości zwarcia oporowego na trasie przewodów;
- e) ze względu na dopuszczalny spadek napięcia (3 % w obwodzie zasilającym odbiorniki siłowe i grzejne) przy uwzględnieniu konduktywności miedzi „na gorąco”:

$$s \geq 100 \cdot \sqrt{3} \cdot \frac{I \cdot l \cdot \cos \varphi}{\gamma \cdot \Delta U_{\%} \cdot U} = 100 \sqrt{3} \cdot \frac{80 \cdot 50 \cdot 1}{\frac{58}{1,25} \cdot 3 \cdot 400} \approx 12,4\text{ mm}^2, \quad \text{tzn. co najmniej } 16\text{ mm}^2.$$

Rozstrzygające jest wymaganie b) – potrzebny jest przekrój 25 mm^2 dla żył fazowych L. Piec może wymagać doprowadzenia żyły N, dla załączania tylko niektórych elementów grzejnych. Żyła ochronna PE powinna mieć przekrój co najmniej 16 mm^2 . Zależnie od okoliczności potrzebny jest zatem kabel czterożyłowy $3 \times 25 + 16\text{ mm}^2$ albo $4 \times 25\text{ mm}^2$ bądź kabel pięćżyłowy $4 \times 25 + 16\text{ mm}^2$ albo $5 \times 25\text{ mm}^2$.

Należy ponadto sprawdzić warunek samoczynnego wyłączenia zasilania. Do rozdzielnic oddziałowej impedancja pętli zwarcioviej L-PE wynosi $Z_{kQ} = 0,12\ \Omega$. Rozpatrywany obwód pieca w przypadku mniej korzystnym (żyła ochronna 16 mm^2) wnosi rezystancję:

$$R_L = \frac{l}{\gamma \cdot s_L} + \frac{l}{\gamma \cdot s_{PE}} = \frac{30}{\frac{58}{1,25} \cdot 25} + \frac{30}{\frac{58}{1,25} \cdot 16} = 0,026 + 0,040 = 0,066\ \Omega$$

Najmniejszy spodziewany prąd zwarciovym u końca obwodu wynosi

$$I''_{k1\min} = \frac{c_{\min} \cdot U_0}{Z_{kQ} + R_L} = \frac{0,95 \cdot 230}{0,12 + 0,066} = 1170\text{ A}$$

Uproszczenie polegające na arytmetycznym dodawaniu impedancji Z_{kQ} i rezystancji R_L daje niewielki błąd w kierunku bezpiecznym; można tak postąpić w głębi przemysłowej sieci kablowej, z dala od transformatora. Wynik jest zadowalający, bo zastosowane wkładki topikowe dla wymaganego czasu wyłączenia 0,4 s (układ TN o napięciu fazowym $120\text{ V} < U_0 < 230\text{ V}$) mają prąd wyłączający $I_a = 1000\text{ A}$, a zatem przy spodziewanym prądzie 1170 A wyłączą przed upływem 0,4 s. Warunek samoczynnego wyłączenia zasilania jest spełniony.

Przykład 4

Dobrać zabezpieczenia i przekrój przewodu kabelkowego (A07VV-...) układanego po wierzchu na uchwytych odległościowych (sposób E) dla obwodu o długości 25 m, zasilającego silnik klatkowy dwubiegunowy ($2p = 2$), 400 V, 11 kW, IP54, o rozruchu bezpośrednim średnim, niezbyt częstym. Z pomiaru uzyskano impedancję pętli zwarcioviej L-PE od źródła zasilania do rozdzielnic oddziałowej silnika $Z_{kQ} = 0,13\ \Omega$.

Kwestie zasadnicze. Zwykłym wyposażeniem takiego obwodu jest rozrusznik bezpośredni: bezpieczniki (ew. wyłącznik) oraz stycznik z przekaźnikiem przeciążeniowym, bo silnik wymaga zabezpieczenia przed przeciążeniami. Prąd rozruchowy uwzględnia się przy doborze wszystkich aparatów oraz przy doborze przekroju przewodu ze względu na spadek napięcia przy rozruchu. Można pominąć wpływ rzadkich rozruchów na nagrzewanie przewodu. Brakujące dane znamionowe silni-

ka można znaleźć na stronie www.zeltech.pl/handel/silniki/sk3fazeksp.pdf (sprawność 0,895, współczynnik mocy 0,89, krotność prądu rozruchowego 6,1) i obliczyć prąd znamionowy silnika (tabl. 9):

$$I_n = \frac{P_n}{\sqrt{3} \cdot U_n \cdot \eta_n \cdot \cos \varphi_n} = \frac{11000}{\sqrt{3} \cdot 400 \cdot 0,895 \cdot 0,89} = 19,9 \text{ A} \approx 20 \text{ A}$$

Do rozpatrywanego obwodu należy dobrać następujące aparaty:

- bezpieczniki klasy gG o prądzie znamionowym wg tabl. 10: $(1,6 \div 2,5) \cdot I_n = 32 \div 50 \text{ A}$ przy rozruchu lekkim, a zważywszy rozruch średni rozważanego silnika – bezpieczniki 50 A: instalacyjne Bi-Wtz 50 A lub stacyjne WTN00 50 A;
- stycznik LS 27 o znamionowej mocy manewrowej 11 kW przy 400 V w kategorii użytkowania AC-3 (załączanie prądu rozruchu bezpośredniego, wyłączenie prądu obciążenia);
- przekaźnik termobimetalowy b27T, o klasie wyzwalań 10, o zakresie prądów nastawczych $15 \div 23 \text{ A}$, który należy nastawić na prąd równy prądowi znamionowemu silnika (20 A), a w razie zbędnych zadziałań – na prąd większy najwyżej o 10 % (22 A).

Przekrój przewodów w rozpatrywanym obwodzie powinien być niemniejszy niż:

- a) ze względu na wytrzymałość mechaniczną (tabl. 11) $s \geq 1,5 \text{ mm}^2$;
- b) ze względu na nagrzewanie prądem roboczym $I_B = 1,2 \cdot I_n = 1,2 \cdot 20 = 24 \text{ A}$ jest potrzebny przewód o przekroju $2,5 \text{ mm}^2$, o obciążalności długotrwałej (tabl. 5) $I_z = 27 \text{ A}$;
- c) ze względu na nagrzewanie prądem zwarciovym; bezpiecznik gG 50 A ma I^2t wyłączenia $13\,700 \text{ A}^2 \cdot \text{s}$ (tabl. 13), wobec czego wymagany przekrój przewodu

$$s \geq \frac{1}{k} \sqrt{\frac{I^2 t}{1}} = \frac{1}{115} \sqrt{\frac{13700}{1}} = 1,0 \text{ mm}^2 ;$$

wynik wskazuje, jak skutecznym zabezpieczeniem zwarciovym jest bezpiecznik i przekonuje, że sprawdzanie tego warunku w obwodzie z bezpiecznikiem nie jest potrzebne;

- d) ze względu na nagrzewanie prądem przeciążeniowym; zabezpieczeniem przeciążeniowym jest przekaźnik termobimetalowy, który wolno nastawić na prąd najwyżej $I_{n \max} = 1,1 \cdot I_n = 1,1 \cdot 20 = 22 \text{ A}$ i który – tak nastawiony – na pewno zadziała przy prądzie przeciążeniowym $I_2 = 1,2 \cdot 22 \approx 26,4 \text{ A}$

$$I_z \geq I_{n \max} \quad I_z \geq 22 \text{ A}$$

$$1,45 I_z \geq 1,1 \cdot 1,2 I_n \quad 1,45 I_z \geq 26,4 \quad I_z \geq \frac{26,4}{1,45} = 18,2 \text{ A} ,$$

potrzebny jest przewód $2,5 \text{ mm}^2$, o obciążalności długotrwałej $I_z = 27 \text{ A}$;

- e) ze względu na dopuszczalny spadek napięcia przy obciążeniu znamionowym (3 % w obwodzie zasilającym odbiorniki siłowe i grzejne) przy uwzględnieniu konduktywności miedzi „na gorąco”:

$$s \geq 100 \sqrt{3} \cdot \frac{I \cdot l \cdot \cos \varphi}{\gamma \cdot \Delta U \% \cdot U} = 100 \sqrt{3} \cdot \frac{20 \cdot 25 \cdot 0,89}{\frac{58}{1,25} \cdot 3 \cdot 400} = 1,4 \text{ mm}^2 \quad \text{tzn. co najmniej } 1,5 \text{ mm}^2 ;$$

- f) ze względu na dopuszczalny spadek napięcia (10 %) wywołany prądem rozruchowym silnika $I_{LR} = 6,1 \cdot I_n$, przy współczynniku mocy przy rozruchu 0,4 (do 0,3 dla silników większej mocy) i rozruchach ze stanu zimnego:

$$s \geq 100\sqrt{3} \cdot \frac{I \cdot l \cdot \cos \varphi}{\gamma \cdot \Delta U_{\%} \cdot U} = 100\sqrt{3} \cdot \frac{6,1 \cdot 20 \cdot 25 \cdot 0,4}{58 \cdot 10 \cdot 400} = 0,9 \text{ mm}^2 \quad , \text{ tzn. co najmniej } 1 \text{ mm}^2.$$

Rozstrzygające są wymagania (b, d) – potrzebny jest przekrój przewodu $2,5 \text{ mm}^2$. Jeżeli stycznik z przekaźnikiem przeciążeniowym jest u końca obwodu, to trzeba ułożyć przewód kabelkowy $5 \times 2,5 \text{ mm}^2$ (z przewodem neutralnym N do zasilania obwodu sterowniczego i przewodem ochronnym PE). Natomiast jeżeli stycznik jest w rozdzielnicy, to wystarczy przewód kabelkowy $4 \times 2,5 \text{ mm}^2$ (L1, L2, L3, PE).

Należy ponadto sprawdzić warunek samoczynnego wyłączenia zasilania. Do rozdzielnicy oddziałowej impedancja pętli zwarciowej L-PE wynosi $Z_{kQ} = 0,13 \Omega$. Rozpatrywany obwód silnika wnosi rezystancję:

$$R_L = \frac{2 \cdot l}{\gamma \cdot s} = \frac{2 \cdot 25}{\frac{58}{1,25} \cdot 2,5} = 0,43 \Omega$$

Najmniejszy spodziewany prąd zwarciowy u końca obwodu wynosi

$$I''_{k1min} = \frac{c_{min} \cdot U_0}{Z_{kQ} + R_L} = \frac{0,95 \cdot 230}{0,13 + 0,43} = 390 \text{ A}$$

Zachodzi pytanie, czy bezpiecznik gG 50 A wyłączy taki prąd przed upływem 0,4 s (układ TN o napięciu fazowym $120 \text{ V} < U_0 < 230 \text{ V}$). Prąd wyłączający I_a zależy od typu bezpiecznika. Największy mają wkładki małogabarytowe – dla wkładki 50 A dla czasu 0,4 s prąd wyłączający $I_a = 480 \text{ A}$. Gdyby takie wkładki miały być zainstalowane samodzielnie albo w rozłączniku bezpiecznikowym, wtedy dla zapewnienia samoczynnego wyłączenia zasilania należałoby przekrój przewodów zwiększyć do 4 mm^2 . Wyniki byłyby następujące:

$$R_L = \frac{2 \cdot l}{\gamma \cdot s} = \frac{2 \cdot 25}{\frac{58}{1,25} \cdot 4} = 0,27 \Omega \qquad I''_{k1min} = \frac{c_{min} \cdot U_0}{Z_{kQ} + R_L} = \frac{0,95 \cdot 230}{0,13 + 0,27} = 546 \text{ A}$$

Dzięki zwiększeniu przekroju przewodu o jeden stopień warunek samoczynnego wyłączenia zasilania ($I''_{k1min} \geq I_a$) został spełniony.

Przykład 5

Dobrać zabezpieczenia trójfazowej sieci oświetleniowej 400 V zasilającej 36 słupów, każdy z jedną lampą metalohalogenkową 400 W, ustawionych na terenie zakładu przemysłowego.

Kwestie zasadnicze. Słupy ustawione wzdłuż dróg wewnętrznych zakładu będą zasilane kablem ziemnym na przemian z różnych faz; na jedną fazę przypada 12 słupów. Linie magistralną zasilającą przelotowo słupy oświetleniowe należy traktować jako elektroenergetyczną sieć rozdzielczą. We wnęce przyłączowej każdego słupa będzie miniaturowe złącze kablowe i jednofazowe odgałęzienie do lampy, które należy traktować jako obwód odbiorczy. Na początku linii rozdzielczej i na początku każdego obwodu odbiorczego będzie zabezpieczenie zwarciowe i będzie to bezpiecznik albo rozłącznik bezpiecznikowy, a nie wyłącznik nadprądowy. Większość zwarć to zwarcia doziemne, jednofazowe. W razie takiego zwarcia w kablu lub wnęce przyłączowej wyłącznik na początku wyłączałby wszystkie lampy, a rozłącznik bezpiecznikowy wyłączy co trzecią lampę. Z kolei we wnęce słupa na wolnym powietrzu lepiej mieć tak prosty aparat jak bezpiecznik niż wyłącznik nadprądowy z zamkiem narażonym na korozję i zacinać się.

Wbrew pozorom pojedyncza lampa nie pobiera prądu o wartości $400 \text{ W}/230 \text{ V} = 1,74 \text{ A}$; płynie przez nią prąd prawie dwa razy większy. Bilans mocy w obwodzie pojedynczej lampy jest ciekawy, ale zawiły, bo przebieg prądu jest odkształcony i zawodzą proste reguły operowania mocą czynną, bierną i pozorną. Podana moc znamionowa 400 W jest mocą czynną pobieraną przez samo

źródło światła, czyli przez jarznik lampy, na który przypada napięcie 118 V i przez który płynie prąd 3,4 A, co daje moc: $118 \text{ V} \times 3,4 \text{ A} \approx 400 \text{ W}$. Jeśli do tego dodać moc 25 W traconą w stateczniku, otrzymuje się moc czynną 425 W pobieraną przez pojedynczą oprawę.

Bez kondensatora kompensacyjnego oprawa pobiera prąd 3,4 A, współczynnik mocy λ , czyli stosunek mocy czynnej do mocy pozornej¹⁾, wynosi ok. 0,51, a pobierana moc pozorna $400 \text{ W}/0,51 \approx 782 \text{ VA} = 3,4 \text{ A} \times 230 \text{ V}$. Tak jest bez kondensatora, czyli bez kompensacji mocy biernej pobieranej przez statecznik indukcyjny. Taka sytuacja występuje w pojedynczej oprawie również wtedy, kiedy uszkodzony kondensator zostaje odłączony przez zabezpieczenie wewnętrzne. Taka sytuacja występuje w całej instalacji, jeżeli zamówi się oprawy bez kondensatorów albo usunie je z opraw, aby znacznie zmniejszyć odkształcenie prądu. Trzeba jednak zaakceptować większą wartość pobieranego prądu (3,4 A zamiast 2,3 A na oprawę) i grupową kompensację mocy biernej przy rozdzielnicy.

Jeżeli w rozpatrywanej instalacji przyjąć zwykłe rozwiązanie, tzn. oprawy z kondensatorem kompensacyjnym, to okazuje się, że taka oprawa pobiera prąd 2,3 A i moc pozorną 530 VA. Prąd jest silnie odkształcony, w przewodzie neutralnym obwodu 3-fazowego obciążonego symetrycznie płynie prąd równy około 70 % prądu w przewodzie fazowym ($\nu = 0,7$ w tablicy 7). Z tego powodu – patrz uwaga 2 w tablicy 7 – lepiej unikać przewodu ochronno-neutralnego PEN i zastosować 5-żyłowy kabel uliczny (układ TN-S) z żyłą neutralną N o pełnym przekroju ($s_N = s_L$).

Załączeniu przyjętej lampy metalohalogenkowej towarzyszy, trwający ok. 0,1 ms, impuls prądu załączeniowego kondensatora (kilkadziesiąt i więcej amperów, zależnie od impedancji pętli zwarciowej i liczby jednocześnie załączanych lamp), po czym przez 2÷4 min płynie prąd rozświetlania (rozgrzewu) lampy równy $(1,4 \div 1,9) \cdot I_n$. Takie prądy, bez zadziałania i przyspieszonego starzenia, mają przetrzymywać wspomniane wyżej bezpieczniki. Jeżeli nawet podczas normalnego użytkowania lampy są załączane grupami, to w razie zaniku i powrotu napięcia bezpieczniki na początku linii magistralnej będą narażone na przepływ prądu załączeniowego wszystkich wcześniej załączonych lamp.

Dobór bezpiecznika we wnęce słupów (tabl. 10):

$$I_{nF} \geq (1,5 \div 2,5) \cdot I_n = (1,5 \div 2,5) \cdot 2,3 = 3,4 \div 6 \text{ A}$$

Wystarczy bezpiecznik 6 A i na tym można by poprzestać. A można też tak pomyśleć: obwód oświetlenia zewnętrznego to niemal obwód bezpieczeństwa i lepiej zwiększyć prąd znamionowy bezpiecznika. Tym bardziej że przewody $2,5 \text{ mm}^2$ odgałęzienia w słupie, zależnie od sposobu układania, i tak dopuszczają zabezpieczenie 16÷25 A. Rozsądnie będzie zalecić bezpieczniki gG 10 A, aby znacznie zmniejszyć prawdopodobieństwo zbędnych zdarzeń.

Dobór bezpieczników na początku linii magistralnej (tabl. 10):

$$I_{nF} \geq (1,5 \div 2,5) \cdot \Sigma I_n = (1,5 \div 2,5) \cdot 12 \cdot 2,3 = 41 \div 69 \text{ A}$$

Wchodzi w rachubę bezpiecznik gG 63 A lub 80 A. Rozumowanie, jak wyżej, można by zakończyć decyzją po doborze przekroju i obciążalności kabla. Każdy z bezpieczników, które wchodzi w rachubę, będzie działał wybiórczo z bezpiecznikami gG 10 A we wnękach słupów.

Ochrona przeciwporażeniowa. Wchodzi w rachubę następujące rozwiązania:

1. **Słupy nieprzewodzące.** Jeżeli wybierze się słupy kompozytowe (z żywicy poliestrowej wzmocnionej włóknem szklanym), to znika problem ochrony przeciwporażeniowej dodatkowej (ochrony przy uszkodzeniu).
2. **Słupy przewodzące, a ich wyposażenie elektryczne o izolacji ochronnej** spełniającej wymagania stawiane ochronie przeciwporażeniowej dodatkowej (ochronie przy uszkodzeniu). Jeżeli

¹⁾ Przy przebiegach odkształconych traci sens posługiwanie się pogładowym pojęciem $\cos \varphi$. Nie ma już jednej sinusoidy napięcia i jednej sinusoidy prądu, których przesunięcie fazowe φ można wskazać i którego wartość kosinusa jest równa stosunkowi mocy (czynnej) do mocy pozornej (iloczynu prądu, napięcia i współczynnika skojarzenia).

klasę ochronności II mają złącze u dołu i oprawa oświetleniowa u góry słupa, a przewody we wnętrzu słupa wciągnięte do giętkiej rury izolacyjnej, to całe urządzenie odbiorcze (słup z lampą) ma wykonanie równoważne klasie ochronności II. Zgodnie z PN-IEC 60364-7-714 [14], pkt 714.413.2 do słupa **nie wolno przyłączyć przewodu ochronnego PE** i nie ma problemu samoczynnego wyłączenia zasilania dla celów ochrony przeciwporażeniowej. Na ten zakaz trzeba najusilniej zwrócić uwagę, bo nadal mamy do czynienia z maniakami, którzy nie pojmują, że przyłączając przewód ochronny do części przewodzących słupów, złączy, rozdzielnic i innych urządzeń klasy ochronności II samowolnie zmieniają klasę ochronności na klasę I, likwidując korzyści właściwe izolacji ochronnej. Nie pojmują, że bardziej niezawodne są środki ochrony niewymagające użycia przewodu ochronnego.

3. **Słupy przewodzące**, niespełniające warunków wyżej podanych, wobec czego traktowane jako **urządzenie klasy ochronności I**. Do zacisku ochronnego słupa należy przyłączyć przewód ochronny PE i sprawdzić warunek samoczynnego wyłączenia zasilania. Podobnie, jak w poprzednich przykładach, należy obliczyć najmniejszy spodziewany prąd zwarciový I''_{klmin} przy zwarciu L-PE. Bezpiecznik gG 10 A dla czasu 0,4 s ma prąd wyłączający $I_a = 80$ A i co najmniej taką wartość powinien mieć prąd I''_{klmin} w razie zwarcia w pobliżu zacisków dowolnej lampy; to łagodny warunek. Bezpiecznik cylindryczny gG 63 A w rozłączniku bezpiecznikowym w rozdzielnicy dla czasu 5 s (sieć rozdzielcza) ma prąd wyłączający $I_a = 250$ A i co najmniej taką wartość powinien mieć prąd I''_{klmin} w razie zwarcia L-PE w dowolnym słupie przed zabezpieczeniem gG 10 A odgałęzienia. Gdyby ten warunek nie był spełniony (przy najbardziej oddalonych słupach), wtedy **największy błąd, jaki można popełnić, to zainstalować na początku linii magistralnej wyłącznik różnicowoprądowy i na domiar złego – wyłącznik wysokoczuły**. Norma [14] (pkt 714.413.1) stanowczo przed tym przestrzega w sytuacjach kiedy wygaśnięcie ogółu lamp jest bardziej niebezpieczne niż wyimaginowane zagrożenie porażeniowe. Jest ono tutaj czysto teoretyczne, bo prawdopodobieństwo zwarcia, o które chodzi, jest znikome, a gdyby wystąpiło, to napięcie na przewodzącym słupie (mniej niż 90 V w układzie TN 230/400 V) udziela się otaczającemu gruntowi i dotknięcie słupa nie jest groźne, bo napięcie dotykowe nie przekracza 50 V. Dmuchając na zimne, można wtedy słupom dodać prosty uziom wyrównawczy: przyłączony do słupa płaskownik FeZn 30×3 mm zakopać na głębokości 0,6 m, tworząc wokół słupa spiralny otok o średnicy 1,5 m.

Ten przykład dowodzi, że są sytuacje, kiedy dobór elementów prostych instalacji wymaga nie tyle pracochłonnych obliczeń, ile wszechstronnej wiedzy i umiejętności logicznego myślenia. W takich przypadkach bezmyślne stosowanie utartych schematów postępowania i zaufanie do fałszywych proroków prowadzi na manowce.

Bibliografia

1. Altenbernd G., Möller W.: Netzelemente: Leitungen und Kabel. Leibniz Universität Hannover, 2006 (http://www.zdt.uni-hannover.de/images/c/cd/5_1leitungen_und_kabel_c.pdf).
2. Fischer M.: Neue Verlegearten und Strombelastbarkeit von Kabeln und Leitungen. Elektropraktiker, 1999, nr 6, s. 530-532.
3. Gogolewski W.: Krytyczne obciążenia prądowe przewodów elektroenergetycznych zabezpieczonych bezpiecznikami. Zeszyty Naukowe Politechniki Wrocławskiej nr 83, Elektryka XVIII, 1964, s. 119-140.
4. Hering E.: Leitungen mit vier belasteten Leitern. Elektropraktiker, 2004, nr 9, s. 722-726.
5. Musiał E.: Prądy zwarciový w niskonapięciowych instalacjach i urządzeniach prądu przemiennego. Biul. SEP INPE „Informacje o normach i przepisach elektrycznych” 2001, nr 40, s. 3-50.
6. Role and protection of neutral in a LV installation. DBTP152ART2/EN, Merlin Gerin, 2004.
7. UTE C 15-105:2003. Guide pratique: Détermination des sections de conducteurs et choix des dispositifs de protection. Méthodes pratiques.
8. PN-55/E-05021 Urządzenia elektroenergetyczne. Wyznaczanie obciążalności przewodów i kabli.
9. Zarządzenie nr 29 Ministra Górnictwa i Energetyki z dnia 17 lipca 1974 r. w sprawie doboru przewodów i kabli elektroenergetycznych do obciążeń prądem elektrycznym. Dziennik Budownictwa z 1974 r. nr 7,

- poz. 22. Przepisy Budowy Urządzeń Elektroenergetycznych, zeszyt 10.
10. PN-IEC 60364-4-43:1999 Instalacje elektryczne w obiektach budowlanych. Ochrona dla zapewnienia bezpieczeństwa. Ochrona przed prądem przetężeniowym..
 11. PN-IEC 60364-4-46:1999 Instalacje elektryczne w obiektach budowlanych. Ochrona dla zapewnienia bezpieczeństwa. Odłączanie izolacyjne i łączenie.
 12. PN-IEC 60364-4-473:1999 Instalacje elektryczne w obiektach budowlanych. Ochrona dla zapewnienia bezpieczeństwa. Stosowanie środków ochrony zapewniających bezpieczeństwo. Środki ochrony przed prądem przetężeniowym.
 13. PN-IEC 60364-5-523:2001 Instalacje elektryczne w obiektach budowlanych. Dobór i montaż wyposażenia elektrycznego. Obciążalność prądowa długotrwała przewodów.
 14. PN-IEC 60364-7-714:2003 Instalacje elektryczne w obiektach budowlanych. Wymagania dotyczące specjalnych instalacji lub lokalizacji. Instalacje oświetlenia zewnętrznego.
 15. IEC 364-5-523:1999 Electrical installations of buildings. Part 5: Selection and erection of electrical equipment – Section 523: Current-carrying capacities in wiring systems.
 16. IEC 60287-3-1/A1:1999 Electric cables – Calculation of the current rating – Part 3-1: Sections on operating conditions – Reference operating conditions and selection of cable type.
 17. DIN VDE 0298-4:1998-11 Verwendung von Kabeln und isolierten Leitungen für Starkstromanlagen. Teil 4: Empfohlene Werte für die Strombelastbarkeit von Kabeln und Leitungen für feste Verlegung in Gebäuden und von flexiblen Leitungen
 18. Australian/New Zealand Standard. Electrical installations – Selection of cables. Part 1.1: Cables for alternating voltages up to and including 0,6/1 kV – Typical Australian installation conditions. 3rd Committee Draft, January 2006. Project No. 471.
 19. PNE/10 – 1932/46: Przepisy budowy i ruchu urządzeń elektrycznych prądu silnego.

Dane bibliograficzne

Musiał E.: **Obciążalność cieplna oraz zabezpieczenia nadprądowe przewodów i kabli**. Miesięcznik SEP „Informacje o normach i przepisach elektrycznych”. 2008, nr 107, s. 3-41.