

WYZNACZANIE PRZEKROJU PRZEWODÓW I KABLI IZOLOWANYCH

Manuel Bolotinha, mgr inż., specjalista w dziedzinie elektryki

1. OGÓLNE WARUNKI I METODY OBLICZEŃ

1. 1. REGUŁY POMIARU

Przekrój przewodu izolowanego musi być obliczony zgodnie z następującymi parametrami, które są zdefiniowane w normie *HD*¹ 603. Do parametrów tych należy:

- obciążalność prądowa kabla w porównaniu do prądu wymaganego przez urządzenie i/lub system,
- dopuszczalny spadek napięcia,
- obciążalność cieplna w przypadku prądów przeciążeniowych i zwarciovych.

1. 2. OBCIĄŻALNOŚĆ PRĄDOWA DŁUGOTRWAŁA KABLI I PRZEWODÓW

Obciążalność prądowa długotrwała przewodów i kabli izolowanych zależy od:

- materiału przewodnika żyły (najczęściej miedź lub aluminium) i rodzaju jego izolacji (zwykle XLPE² i PVC³),
- napięcia znamionowego ($U_0/U(U_m)$),
- liczby przewodzących żył oraz
- rodzaju instalacji (podziemna lub w powietrzu; w przypadku kabli jednożyłowych należy również znać układ kabli – płaski lub trójżyłowy).

Obciążalność prądowa długotrwała kabli i przewodów jest zwykle określona w obowiązujących normach i przepisach oraz w katalogach producentów.

Obciążalność prądowa kabli, która jest określona w wyżej wymienionych dokumentach, ma zastosowanie pod pewnymi warunkami (które powinny być również określone w dokumentach). Jeśli rzeczywiste warunki instalacji odbiegają od tych określonych w dokumentach, wówczas na obciążalność prądową kabli wpływa tzw. współczynnik zmniejszający wartość znamionową (współczynniki te są również podawane w dokumentach). Podstawowe warunki określone przez producentów oraz normy i przepisy są na ogół następujące:

- **oporność cieplna właściwa przy gruncie** (instalacja w ziemi) – standardowo **1 k.m/W**.
- **temperatura gruntu** (instalacja w ziemi) – standardowo **20 °C**,
- **głębokość ułożenia** (instalacja w ziemi) – standardowo **0,0-0,6 m**,
- **temperatura otoczenia** (instalacja w powietrzu) – standardowo **30 °C**,
- typ i liczba korytek kablowych, liczba kabli w jednym korytku i odległość między kablami.

(Warunki określone w dokumentacji mogą niekiedy nieznacznie odbiegać od wyżej podanych, co zależy od producenta oraz zastosowanych przez niego norm i przepisów)

¹ **HD**: norma opracowana przez CENELEC; **CENELEC**: Europejski Komitet Normalizacyjny Elektrotechniki.

² **XLPE**: polwinit ciepłoodporny, polietylen sieciowany.

³ **PVC**: polwinit.

1. 3. SPADEK NAPIĘCIA

Spadek napięcia nie może być wyższy niż określony w obowiązujących normach i przepisach, a jego wartości nie mogą zagrażać stabilności sieci i działaniu urządzeń (jeśli spadek napięcia podczas uruchamiania silnika przekracza 10%, silnik nie uruchomi się).

W układzie trójfazowym spadek napięcia oblicza się według następującego równania:

$$\Delta U [V] = \sqrt{3} \times I \times (R_{20} \cos \phi + X \sin \phi) \quad [1]$$

Gdzie:

- I : Prąd znamionowy instalacji.
- R_{20} : Rezystancja żyły w temperaturze 20 °C.
- X : Reaktancja indukcyjna przewodu,
- ϕ : Przesunięcie fazowe instalacji.

Oraz:

$$\Delta U [\%] = (\Delta U [V] / U) \times 100 \quad [2]$$

Wartość U to napięcie znamionowe instalacji.

1. 4. OBCIĄŻALNOŚĆ ZWARCIOWA CIEPLNA

Minimalny przekrój przewodu, który może sprostać cieplnym obciążeniom zwarciovym jest obliczany przy użyciu następującego równania:

$$S = I''_{K3} \times \sqrt{t/K} \quad [3]$$

Gdzie:

- I''_{K3} : Trójfazowy prąd zwarciovym [A]
- t : Czas trwania zwarcia [s]
- K : Stała materiałowa, uwzględniająca pojemność cieplną właściwą, rezystywność materiału żyły i współczynnik temperaturowy jej wzrostu oraz przyrost temperatury żyły (Tabela 1).

Przewodnik	Materiał izolacji	
	PVC	XLPE
Miedź	115	143
Aluminium	76	94

Tabela 1. Stała materiałowa K dla wybranych materiałów i żyły roboczej.

2. PRZYKŁAD – PRZEWÓD ŚREDNIEGO NAPIĘCIA DO SILNIKA

Rozważmy trójfazowy silnik elektryczny o następujących parametrach:

- Napięcie znamionowe: $U = 6 \text{ kV}$
- Prąd elektryczny: $P_{\text{elec}} = 1000 \text{ kW}$
- Częstotliwość znamionowa: $f = 50 \text{ Hz}$
- Prąd rozruchowy: $I_{\text{start}} = 4,5 \times I_n$ (I_n : Prąd pracy silnika)

4 $X = \omega L = 2\pi f L$, gdzie ω to prędkość obrotowa silnika (rad/s), f – częstotliwość (Hz), natomiast L – izolacja (mH).

- Współczynnik mocy podczas normalnej pracy silnika: $\cos \phi = 0,82^5$
- Współczynnik mocy przy rozruchu silnika: $\cos \phi = 0,59^6$
- Prąd zwarciov przy zwarciu trójfazowym: $I''_{k3} = 12 \text{ kA} / 1,2 \text{ s}$

Najważniejsze cechy przykładowego kabla to (kabel oznaczmy następująco: **LXHIV**):

- Napięcie znamionowe: **3,6/6(10) kV**
- Pojedyncza żyła aluminiowa
- Materiał otoczenia żyły (izolacji): **XLPE**
- Powłoka metalowa
- Płaszcz zewnętrzny: **PVC**

Kable (**jeden kabel na fazę**) położone są w **powietrzu** (temperatura otoczenia: $\theta_0 = 40 \text{ }^\circ\text{C}$), w układzie koniczynowym, w korytku kablowym typu drabinka, gdzie dwa pozostałe obwody są również zainstalowane za pomocą kabli jednożytowych w układzie koniczynowym (odległość między każdym trójnikiem jest równa średnicy kabla). Długość każdego kabla dla silnika wynosi $l = 480 \text{ m}$, a dopuszczalna temperatura w przewodzie, przy ciągłej pracy silnika, wynosi $\theta_p = 90 \text{ }^\circ\text{C}$.

Wymiarowanie zgodnie z dopuszczalną wartością znamionową prądu

Prąd znamionowy pojedynczego urządzenia (I_n):

$$P_{\text{elec}} = \sqrt{3} \times U \times I_n \times \cos \phi \quad \Leftrightarrow \quad I_n = P_{\text{elec}} / (\sqrt{3} \times U \times \cos \phi)$$

$$I_n = 1000 \times 10^3 / (\sqrt{3} \times 6 \times 10^3 \times 0,82) \approx 117 \text{ A}$$

Współczynniki zmniejszające wartość znamionową, które należy zastosować, podano w tabelach 2 i 3.

Temperatura otoczenia ($\theta_0 - ^\circ\text{C}$)	Dopuszczalna temperatura w przewodzie w trybie pracy ciągłej ($\theta_p - ^\circ\text{C}$)					
	70	75	80	85	90	95
15	1,17	1,16	1,14	1,13	1,12	1,11
20	1,12	1,11	1,10	1,09	1,08	1,07
25	1,06	1,05	1,05	1,04	1,04	1,04
30	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
35	0,94	0,94	0,95	0,95	0,96	0,96
40	0,87	0,88	0,89	0,90	0,91	0,92
45	0,79	0,82	0,84	0,85	0,87	0,88
50	0,71	0,75	0,78	0,80	0,82	0,83

Tabela 2. Wartości współczynnika zmniejszającego dla temperatury otoczenia innej niż $30 \text{ }^\circ\text{C}$

Zatem: **$K1 = 0,91$**

⁵ $\sin \phi = 0,57$

⁶ $\sin \phi = 0,81$

Rodzaj instalacji	Liczba kabli na tym samym wsporniku fizycznym				
	1	2	3	4	5
W suficie	0,95	0,81	0,72	0,68	0,66
W rynnach kablowych z cyrkulacją powietrza	1,00	0,88	0,82	0,77	0,75
W uchwytach ściennych	1,00	0,87	0,82	0,80	0,80

Tabela 3. Wartości współczynnika zmniejszającego dla liczby kabli (układ płaski lub trójżyłowy) zainstalowanych na tym samym wsporniku fizycznym.

Zatem: **K2 = 0,82**

Dopuszczalny prąd stały (I_c) wynosi:

$$I_c = I_n / (K1 \times K2) \quad \Leftrightarrow \quad I_c = 117 / (0,91 \times 0,82) \approx 157 \text{ A}$$

Przekrój żył zgodnie z dopuszczalną wartością znamionową dla wybranego kabla podano w tabeli 4, w której wymieniono właściwości jednożyłowego kabla LXHIV 3,6/6(10) kV.

Przekrój (mm ²)	Dopuszczalny prąd stały dla kabla ułożonego w powietrzu w układzie koniczyny (A)	Rezystancja dla prądu przemiennego w temperaturze 90 °C (Ω/km)	Indukcyjność – L (mH/km)
35	154	1,113	0,419
50	184	0,822	0,403
70	230	0,568	0,378
95	280	0,410	0,361
120	324	0,324	0,346
150	368	0,264	0,337
185	424	0,210	0,324
240	502	0,160	0,313
300	577	0,128	0,304
400	673	0,100	0,295

Tabela 4. Główne parametry jednożyłowego kabla LXHIV 3,6/6(10) kV

Biorąc pod uwagę dopuszczalną wartość znamionową, przekrój kabla będzie wynosił:

- **s = 50 mm²**

Pomiar prądu zwarcowego

Zgodnie z równaniem [3] i tabelą 1, przekrój kabla, który musi wytrzymać cieplne obciążenie zwarcowe wynosi:

$$s = 12.000 \times \sqrt{1,2 / 94} \approx 140 \text{ mm}^2$$

Zgodnie z normalizacją przekroju podaną przez producenta **należy wybrać przekrój 150 mm²**, aby spełnić wymagania dotyczące zwarcia.

Przy czym:

$$150 \text{ mm}^2 > 50 \text{ mm}^2$$

Obliczanie spadku napięcia

Przyjmuje się, że maksymalny dopuszczalny spadek napięcia podczas normalnej pracy silnika może wynosić 5%.

Biorąc pod uwagę obliczenia przeprowadzone powyżej, test przekroju dla spadku napięcia przeprowadzamy dla **s = 150 mm²**.

Po wykonaniu obliczeń na podstawie równań [1] i [2] z wyrzysaniem wartości z tabeli 4 otrzymujemy następujące wyniki:

a) Spadek napięcia przy normalnej pracy silnika

$$\begin{aligned}\Delta U [V] &= \sqrt{3} \times 117 \times (0,264 \times 0,48 \times 0,82 + 2 \times \pi \times 50 \times 0,337 \times 10^{-3} \times 0,48 \times 0,57) \approx 27 \text{ V } \Delta U [\%] \\ &= 27/6000 \times 100 \approx 0,45\% < 5\%\end{aligned}$$

b) Spadek napięcia w chwili rozruchu silnika

$$\begin{aligned}\Delta U [V] &= \sqrt{3} \times 117 \times 4,5 \times (0,264 \times 0,48 \times 0,59 + 2 \times \pi \times 50 \times 0,337 \times 10^{-3} \times 0,48 \times 0,81) \approx 106 \text{ V } \Delta U [\%] \\ &= 106/6000 \times 100 \approx 1,77\% < 10\%\end{aligned}$$

Na podstawie wyznaczonych wartości można stwierdzić, że przekrój obliczony dla obciążalności zwarciowej cieplnej (s = 150 mm²) spełnia wymagania dotyczące spadku napięcia.