

REFERAT KONFERENCYJNY

XXXI KONFERENCJA

SZKOLENIOWO-TECHNICZNA
ELEKTROENERGETYCZNE SIECI
KABLOWE I NAPOWIETRZNE

KABEL
2026 ▲

10 – 13 marca 2026 r.

Świeradów-Zdrój Elements Hotel & Spa *****

Autor: Przemysław Krawczykowski

Firma: TELE-FONIKA Kable S.A., Zakład Bydgoszcz

KABEL
2026 ▲

Tytuł: *Prądy zwarciovowe w różnych typach konstrukcji
kablów WN*



CENTRUM SZKOLENIOWO-KONFERENCYJNE
"ENERGETYK" S.C.

20-867 Lublin, ul. Sudecka 73

✉ biuro@energetyk.lublin.pl

🌐 www.energetyk.lublin.pl

Spis treści

1. Wstęp	3
2. Normy	4
3. Obliczanie prądów zwarciovych żyły roboczej	5
3.1. Prąd adiabatyczny aluminiowej żyły roboczej	5
3.2. Prąd nieadiabatyczny aluminiowej żyły roboczej	7
3.3. Prąd adiabatyczny miedzianej żyły roboczej.....	10
3.4. Prąd zwarciovowy nieadiabatyczny miedzianej żyły roboczej.....	11
4. Obliczanie prądów zwarciovych ekranów metalicznych	15
4.1. Prąd zwarciovowy adiabatyczny ekranu metalicznego z drutów miedzianych.....	15
4.2. Prąd zwarciovowy nieadiabatyczny ekranu metalicznego z drutów miedzianych.....	17
4.3. Prąd zwarciovowy adiabatyczny ekranu metalicznego z drutów aluminiowych.....	19
4.4. Prąd zwarciovowy nieadiabatyczny ekranu metalicznego z drutów aluminiowych.....	20
5. Obliczanie prądów zwarciovych powłok metalicznych	23
5.1. Prąd zwarciovowy adiabatyczny ołowianej powłoki metalicznej.....	23
5.2. Prąd zwarciovowy nieadiabatyczny ołowianej powłoki metalicznej.....	25
6. Problematyka	27
7. Wnioski	28

1. Wstęp

W systemach wysokiego napięcia, podczas awarii mogą wystąpić prądy zwarciove, których wartości są znaczne (liczone w kiloamperach). Nie powinny one prowadzić do utraty stabilności systemu elektroenergetycznego ani do uszkodzeń elementów infrastruktury, dlatego kluczowa jest ich analiza, aby poprawnie dobrać kabel, osprzęt oraz zabezpieczenia. Od prawidłowego doboru zależy bezpieczeństwo ludzi oraz niezawodność i trwałość infrastruktury.

Zjawiska towarzyszące przepływowi prądów zwarciowych mają zarówno charakter cieplny, jak i mechaniczny. W czasie zwarcia przez żyłę roboczą lub ekran metaliczny przepływa prąd o wartości wielokrotnie przewyższającej prąd znamionowy, co prowadzi do gwałtownego wydzielania energii cieplnej. Nawet stosunkowo krótki prąd zwarciowy może doprowadzić do:

- przegrzania żyły roboczej,
- skrócenia żywotności kabla,
- uszkodzenia izolacji,
- degradacji powłoki zewnętrznej,
- defektów, które mogą być widoczne dopiero z czasem (starzenie materiału).

Drugim skutkiem jest powstawanie sił elektrodynamicznych. Przepływ prądów zwarciowych powoduje powstawanie sił dynamicznych między przewodami. Podczas projektowania infrastruktury z kablami wysokich napięć należy uwzględnić siły mechaniczne, aby nie doprowadzić do niekontrolowanych przemieszczeń kabli, deformacji kabla lub uszkodzeń uchwytów, konstrukcji wsporczych bądź głowic.

Z punktu widzenia kabla, żyłę roboczą należy dobrać tak, aby bezawaryjnie była w stanie przenieść prąd zwarciowy trójfazowy. Prąd ten występuje stosunkowo rzadko, ale często generuje on największą wartość prądu zwarciowego. Ekran metaliczny zaś dobierany jest na prąd zwarciowy jednofazowy (doziemny). Wartość tego prądu zależy od zastosowanego uziemienia w sieci. Na rynku niemieckim na przykład praktykowane jest uziemienie przez cewkę, co znacznie zmniejsza wartość prądu zwarciowego. W efekcie często można spotkać małe przekroje ekranów metalicznych kabli przeznaczonych na rynek niemiecki (50 mm^2). Oczywiście kluczowy jest czas zadziałania zabezpieczeń, ponieważ mocno rzutuje on na wartość prądu zwarciowego, jaki konstrukcja jest w stanie przenieść. Z punktu widzenia budowy kabla, istotne są nie tylko materiały użyte do elementów przewodzących, ale także materiał użyty do izolacji oraz powłoki zewnętrznej. Narzucają bowiem one dopuszczalne temperatury.

W referacie przedstawiono normy, na których oparte są obliczenia dopuszczalnych prądów zwarciowych adiabatycznych i nieadiabatycznych różnych konstrukcji kabli WN wraz ze wskazaniem problematycznych aspektów. Pokazano również przykładowe obliczenia

dla wybranych typów kabli. Należy jednak zaznaczyć, że obliczenia te skupione są wokół konstrukcji kabla, a nie analizy sieci.

Współczesne systemy elektroenergetyczne charakteryzują się rosnącymi poziomami mocy zwarciovych, wynikającymi z rozbudowy sieci, zwiększania mocy źródeł oraz integracji generacji rozproszonej. Powoduje to, że wymagania stawiane kablom wysokiego napięcia w zakresie odporności zwarciowej stają się coraz bardziej rygorystyczne.

Projektowanie konstrukcji kablowych nie może ograniczać się wyłącznie do obciążalności długotrwałej – równie istotna jest zdolność do bezpiecznego przeniesienia prądów zwarciovych w zadanym czasie działania zabezpieczeń. W praktyce często to właśnie warunek zwarciowy determinuje minimalny przekrój elementów przewodzących.

2. Normy

Główną normą, na podstawie której realizowane są obliczenia dopuszczalnych prądów zwarciovych kabli jest norma IEC 60949. Dzięki niej można obliczyć dopuszczalny prąd zwarciowy żyły roboczej, ekranu metalicznego oraz powłoki metalicznej wraz z ich wariacjami. Norma ta posiada stabelaryzowane współczynniki którymi należy się sugerować podczas obliczeń.

Rozróżniono tutaj obliczenia dla procesu adiabatycznego i nieadiabatycznego. W procesie adiabatycznym zakłada się, że układ nie wymienia ciepła z otoczeniem. To podejście jest zasadne tylko w przypadku bardzo krótkich czasów. Proces nieadiabatyczny z kolei zakłada, że część ciepła zostaje przekazana do medium otaczającego element przewodzący (izolacja bądź powłoka zewnętrzna). W efekcie, wartość dopuszczalnego prądu jest wyższa.

Drugą normą kluczową do obliczania prądów zwarciovych jest norma IEC 61443. Zawarte są w niej limity temperatur dla poszczególnych materiałów/warstw kabla. W tej normie również zaprezentowano tabele z wartościami, aczkolwiek dopuszcza ona wyższe temperatury, jeśli dla danego materiału przedstawione zostaną badania, które potwierdzą możliwość zastosowania wyższych temperatur. Należy mieć na uwadze, że poszczególni klienci/operatorzy mogą narzucić własne limity. Przykładem jest PSE, których wytyczne jasno wskazują maksymalną temperaturę dla zwarć równą 250 °C (XLPE) zarówno dla żyły roboczej jak i ekranu metalicznego. Warty jest wspomnienia fakt, że każdy z materiałów zawartych w kablu nie powinien ulec degradacji przy prądzie zwarciowym. Na przykład taśmy półprzewodzące, zapewniające szczelność wzdłużną, mogą stracić swoje właściwości uszczelniające po stopieniu pod wpływem zbyt wysokiej temperatury.

Temperaturę początkową dla zwarcia żyły roboczej limituje materiał izolacyjny. Dla izolacji XLPE jest to 90 °C. W praktyce dla takiego przypadku można przyjąć temperaturę początkową ekranu metalicznego dla zwarcia równą 80 °C. Jeśli natomiast wymagane są dokładniejsze obliczenia, to należy wyznaczyć tę temperaturę z obliczeń obciążalności długotrwałej. Zdarza się bowiem tak, że temperatura żyły roboczej kabla, bądź

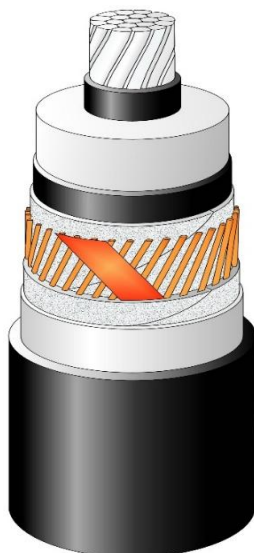
nawet temperatura powłoki kabla są limitowane przez założenia projektowe bądź uwarunkowania środowiskowe.

3. Obliczanie prądów zwarciovych żyły roboczej

W normie IEC 60949 zawarte są osobno obliczenia dla żyły roboczej i osobno dla ekranów/powłok. W tym punkcie skupiono się na obliczeniach dotyczących żył roboczych. Poniżej przedstawiono przykładowe obliczenia dla żyły miedzianej oraz aluminiowej. W celach porównawczych zachowano ten sam przekrój, temperatury oraz materiał izolacyjny. Izolacja wykonana jest z XLPE (Cross-linked polyethylene).

3.1. Prąd adiabatyczny aluminiowej żyły roboczej

Na rysunku 1 przedstawiono poglądowy rysunek kabla z aluminiową żyłą roboczą. Z kolei tabela 1 przedstawia parametry przyjęte do obliczeń.



Rysunek. 1. Poglądowy rysunek kabla z aluminiową żyłą roboczą

Tabela. 1. Parametry do wyznaczania adyabatycznego prądu zwarciego aluminiowej żyły roboczej

$K=148$	$\frac{A \cdot \sqrt{S}}{\text{mm}^2}$	Współczynnik zależny od metalu przewodzącego prąd (dla Cu = 226; dla Al = 148; dla Pb = 41)
$S=630$	mm^2	Przekrój geometryczny żyły przewodzącej prąd zwarcia
$t=1$	s	Czas trwania zwarcia
$\beta=228$	K	Współczynnik oporu materiału przewodzącego prąd w 0 °C (dla Cu = 234,5; dla Al = 228; dla Pb = 230)
$\theta_f=250$	°C	Końcowa temperatura zwarcia
$\theta_i=90$	°C	Początkowa temperatura zwarcia
I_{AD}	A	Prąd zwarcia obliczony na przy założeniu adyabatyczności procesu

$$I_{AD} = \frac{K \cdot S}{\sqrt{t}} \cdot \sqrt{\ln\left(\frac{\beta + \theta_f}{\beta + \theta_i}\right)}$$

$$I_{AD} = \frac{148 \cdot 630}{\sqrt{1}} \cdot \sqrt{\ln\left(\frac{228 + 250}{228 + 90}\right)}$$

$$I_{AD} = 59524,77 \text{ A}$$

W powyższym przypadku, aluminiowa żyła robocza o przekroju 630 mm² jest w stanie przenieść prąd zwarciego adyabatyczny o wartości 59,5 kA w czasie 1 sekundy. Temperatura początkowa wynosi 90 °C, a temperatura końcowa 250 °C.

3.2. Prąd nieadiabatyyczny aluminiowej żyły roboczej

Tabela 2 przedstawia parametry niezbędne do wyznaczenia wartości współczynnika ε , który z kolei jest potrzebny do wyznaczenia prądu nieadiabatyycznego.

Tabela. 2. Parametry do wyznaczania nieadiabatyycznego prądu zwarciego aluminiowej żyły roboczej

$X=0,57$	$\sqrt{\frac{\text{mm}^2}{s}}$	Stałe dla żył roboczych kabli oraz nie stykających się drutów ekranu dla Cu w XLPE $X=0,41$; dla Al w XLPE $X=0,57$
$Y=0,16$	$\frac{\text{mm}^2}{s}$	Stałe dla żył roboczych kabli oraz nie stykających się drutów ekranu dla Cu w XLPE $Y=0,12$; dla Al w XLPE $Y=0,16$
ε		Współczynnik uwzględniający przepływ ciepła do przyległych materiałów (dla obliczeń adiabatyčných $\varepsilon = 1$)
I	A	Dopuszczalny prąd zwarcia

$$\varepsilon = \sqrt{1 + X \cdot \sqrt{\frac{t}{S}} + Y \cdot \frac{t}{S}}$$

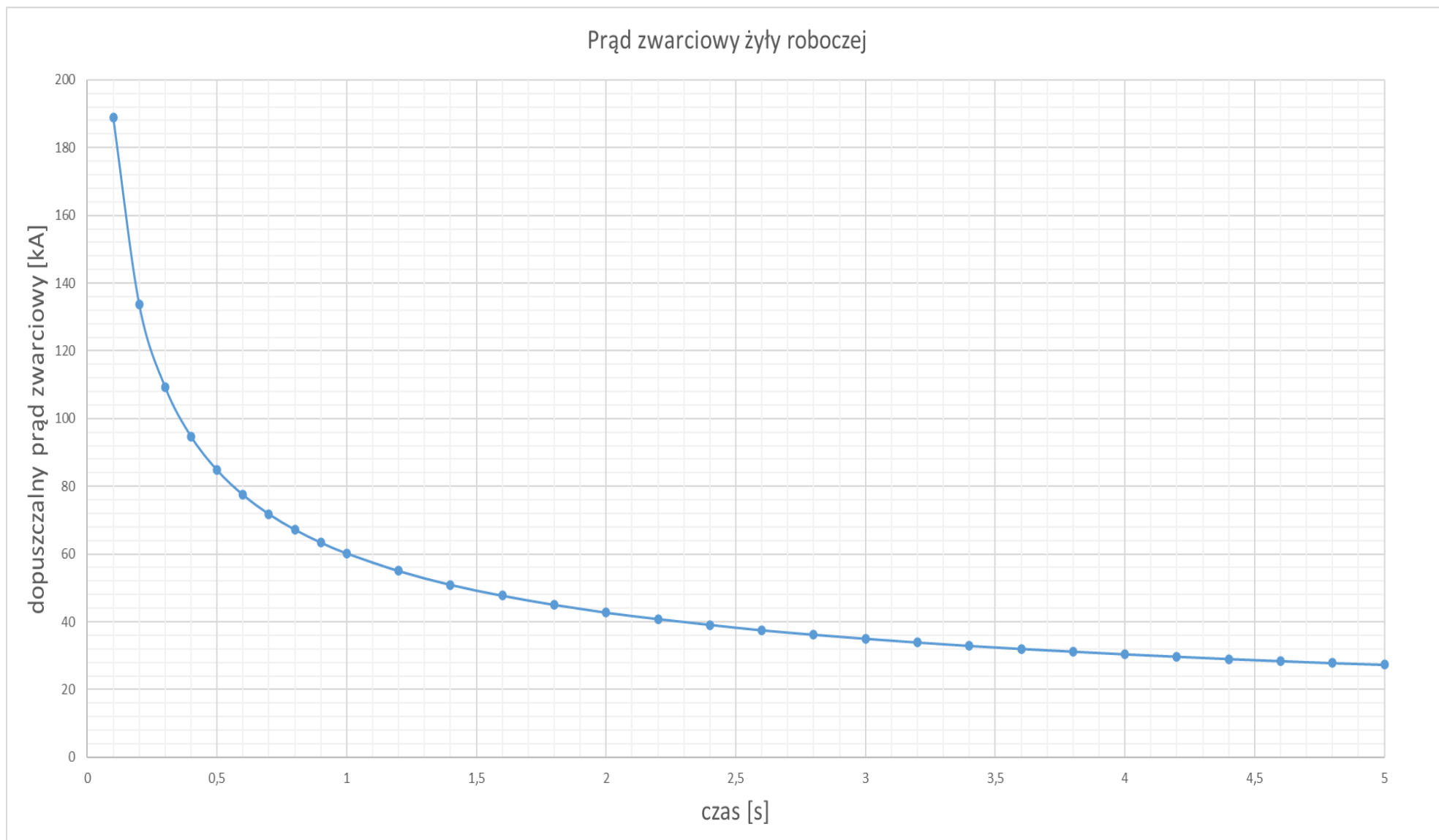
$$\varepsilon = \sqrt{1 + 0,57 \cdot \sqrt{\frac{1}{630}} + 0,16 \cdot \frac{1}{630}}$$

$$\varepsilon = 1,01142$$

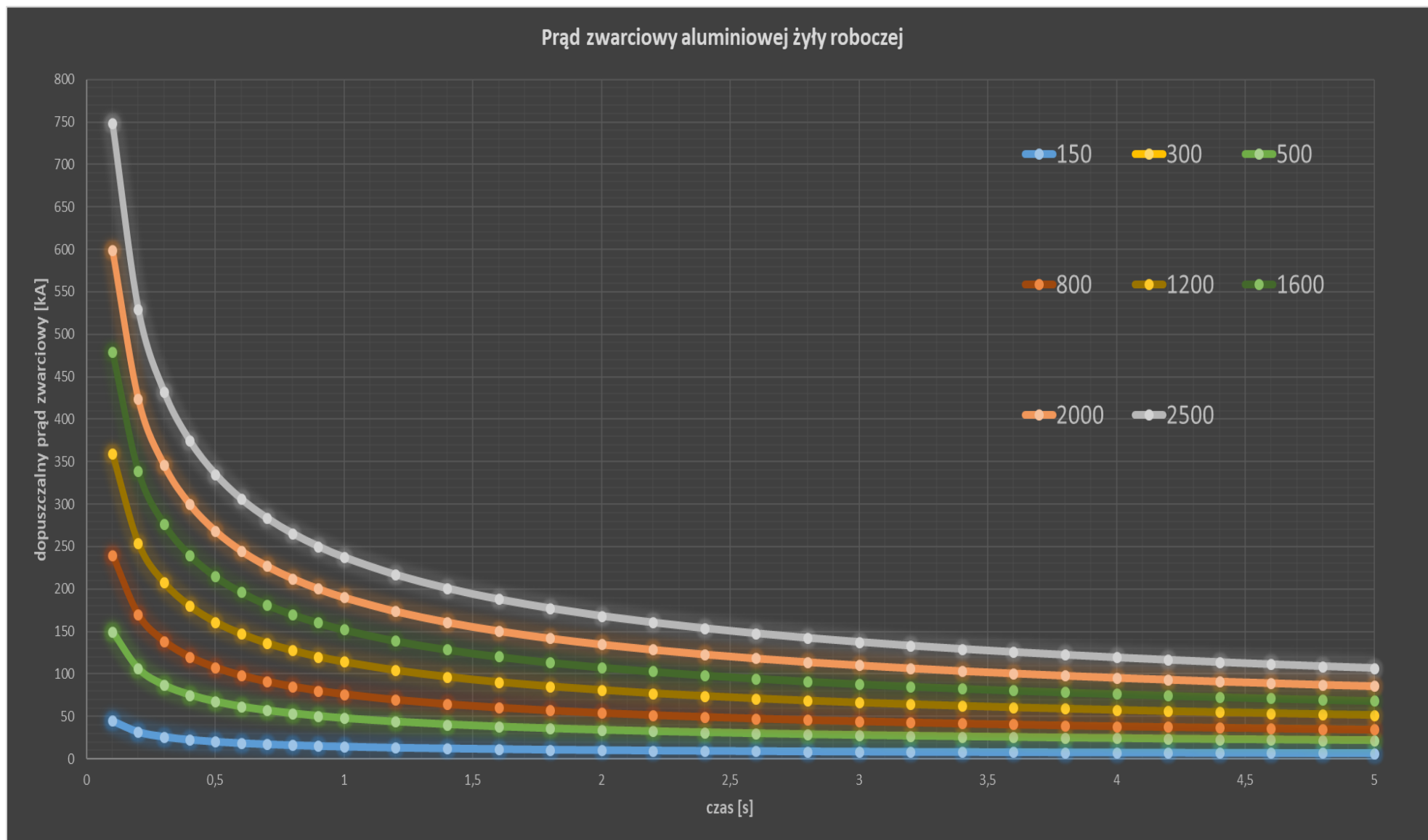
$$I = \varepsilon \cdot I_{AD} = 60,20 \text{ kA}$$

Jak widać powyżej, ta sama żyła aluminiowa jest w stanie przenieść prąd zwarciego nieadiabatyyczny o wartości 60,2 kA przy tych samych warunkach. Zatem dopuszczalna wartość prądu zwarciego nieznacznie wzrosła.

Rysunek 2 przedstawia zależność dopuszczalnego prądu zwarciego nieadiabatyycznego aluminiowej żyły roboczej (630 mm²) od czasu trwania zwarcia. Natomiast na rysunku 3 zestawiono zależność dopuszczalnego prądu zwarciego nieadiabatyycznego wybranych przekrojów aluminiowych żył roboczych od czasu trwania zwarcia.



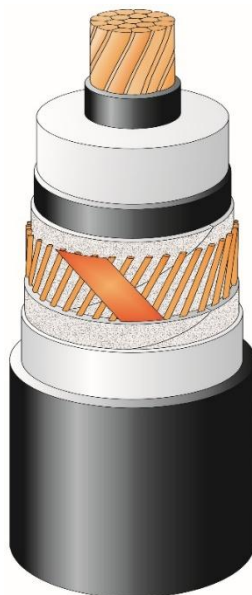
Rysunek. 2. Zależność dopuszczalnego prądu zwarciového od czasu dla kabla z aluminiową żytą roboczą o przekroju 630 mm²



Rysunek. 3. Zależność dopuszczalnego prądu zwarciový od czasu dla kabla z aluminiową żytą roboczą (wybrane przekroje)

3.3. Prąd adiabatyczny miedzianej żyły roboczej

Na rysunku 4 przedstawiono poglądowy rysunek kabla z miedzianą żyłą roboczą. Z kolei tabela 3 przedstawia parametry przyjęte do obliczeń.



Rysunek. 4. Poglądowy rysunek kabla z miedzianą żyłą roboczą

Tabela. 3. Parametry do wyznaczania adiabatycznego prądu zwarciovego miedzianej żyły roboczej

K=226	$\frac{A \cdot \sqrt{S}}{\text{mm}^2}$	Współczynnik zależny od metalu przewodzącego prąd (dla Cu = 226 ; dla Al = 148; dla Pb = 41)
S=630	mm^2	Przekrój geometryczny żyły przewodzącej prąd zwarcia
$t=1$	s	Czas trwania zwarcia
$\beta=234,5$	K	Współczynnik oporu materiału przewodzącego prąd w 0 °C (dla Cu = 234,5 ; dla Al = 228; dla Pb = 230)
$\theta_f=250$	°C	Końcowa temperatura zwarcia
$\theta_i=90$	°C	Początkowa temperatura zwarcia
I_{AD}	A	Prąd zwarcia obliczony na przy założeniu adiabatyczności procesu

$$I_{AD} = \frac{K \cdot S}{\sqrt{t}} \cdot \sqrt{\ln\left(\frac{\beta + \theta_f}{\beta + \theta_i}\right)}$$

$$I_{AD} = \frac{226 \cdot 630}{\sqrt{1}} \cdot \sqrt{\ln\left(\frac{234,5 + 250}{234,5 + 90}\right)}$$

$$I_{AD} = 90142,61 \text{ A}$$

W powyższym przypadku, miedziana żyła robocza o przekroju 630 mm² jest w stanie przenieść prąd zwarcia adiabatyczny o wartości 90,1 kA w czasie 1 sekundy. Temperatura początkowa wynosi 90 °C, a temperatura końcowa 250 °C.

3.4. Prąd zwarcia nieadiabatyczny miedzianej żyły roboczej

Tabela 4 przedstawia parametry niezbędne do wyznaczenia wartości współczynnika ϵ , który z kolei jest potrzebny do wyznaczenia prądu nieadiabatycznego.

Tabela. 4. Parametry do wyznaczania nieadiabatycznego prądu zwarcia miedzianej żyły roboczej

$X=0,41$	$\sqrt{\frac{\text{mm}^2}{s}}$	Stałe dla żył roboczych kabli oraz nie stykających się drutów ekranu dla Cu w XLPE $X=0,41$; dla Al w XLPE $X=0,57$
$Y=0,12$	$\frac{\text{mm}^2}{s}$	Stałe dla żył roboczych kabli oraz nie stykających się drutów ekranu dla Cu w XLPE $Y=0,12$; dla Al w XLPE $Y=0,16$
ϵ		Współczynnik uwzględniający przepływ ciepła do przyległych materiałów (dla obliczeń adiabatycznych $\epsilon = 1$)
I	A	Dopuszczalny prąd zwarcia

$$\epsilon = \sqrt{1 + X \cdot \sqrt{\frac{t}{S}} + Y \cdot \frac{t}{S}}$$

$$\epsilon = \sqrt{1 + 0,41 \cdot \sqrt{\frac{1}{630}} + 0,12 \cdot \frac{1}{630}}$$

$$\epsilon = 1,00823$$

$$I = \epsilon \cdot I_{AD} = 90,88 \text{ kA}$$

Jak widać powyżej, ta sama żyła miedziana jest w stanie przenieść prąd zwarcia nieadiabatyczny o wartości 90,88 kA przy tych samych warunkach. Zatem dopuszczalna wartość prądu zwarcia nieznacznie wzrosła.

Rysunek 5 przedstawia zależność dopuszczalnego prądu zwarcia nieadiabatycznego miedzianej żyły roboczej (630 mm²) od czasu trwania zwarcia. Natomiast na rysunku 6 zestawiono zależność dopuszczalnego prądu zwarcia nieadiabatycznego wybranych przekrojów miedzianych żył roboczych od czasu trwania zwarcia.

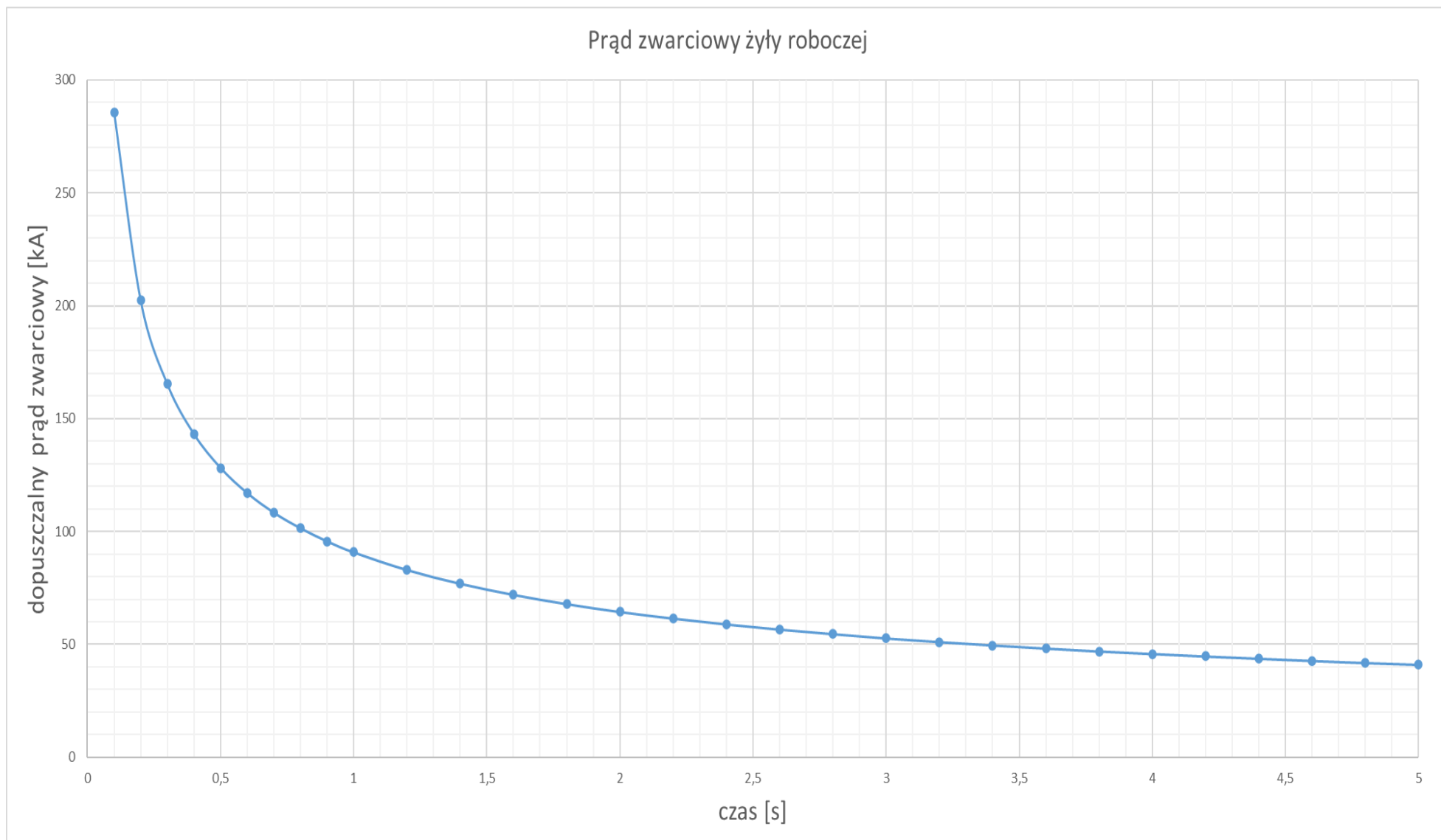
W tabeli 5 zestawione zostały wyniki dla dwóch różnych materiałów żyły roboczej o przekroju 630 mm².

Tabela. 5. Porównanie wyników

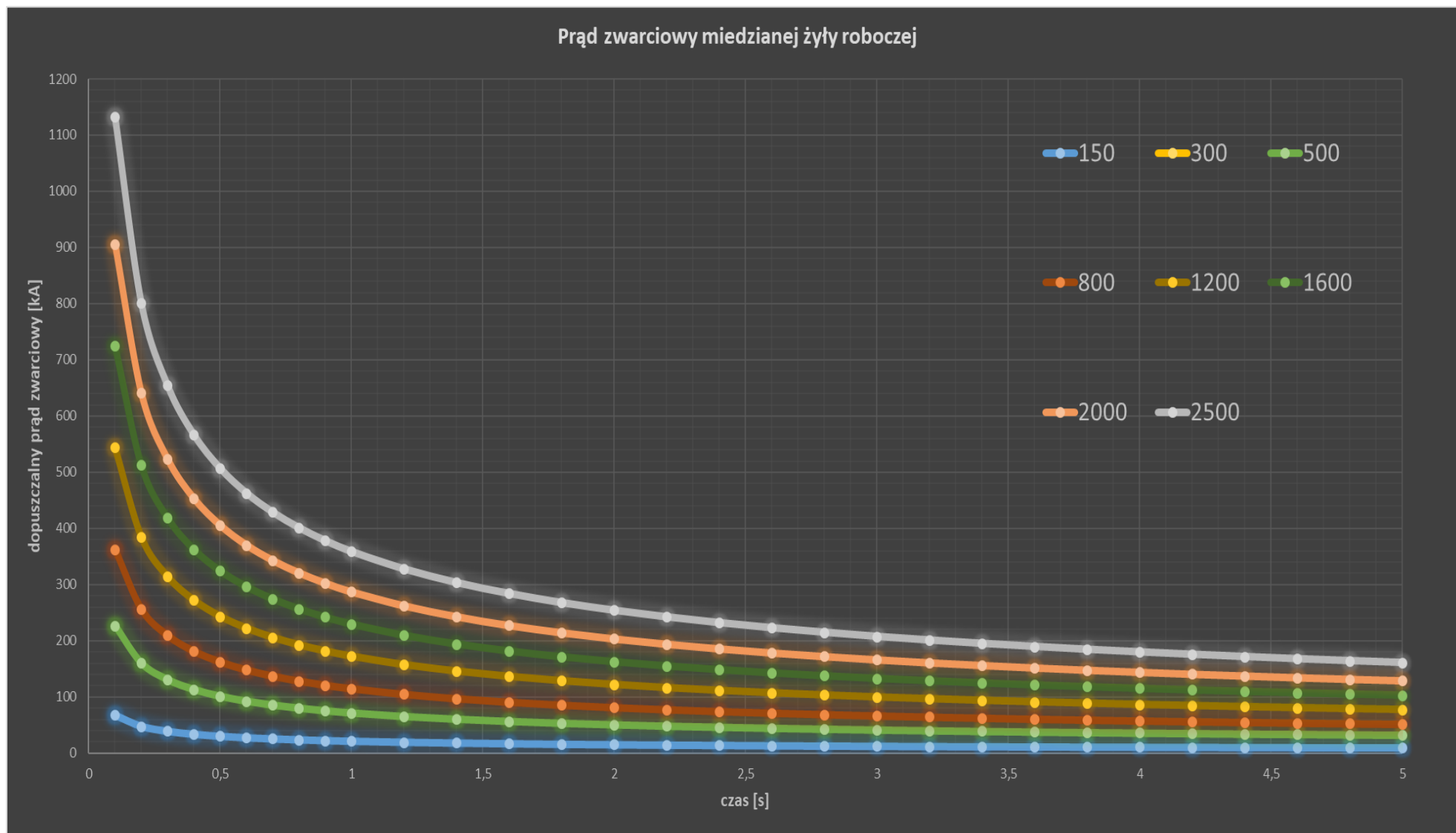
Parametr	Aluminium	Miedź
Dopuszczalny prąd adiabatyyczny [A]	59524,77	90142,61
Dopuszczalny prąd nieadiabatyyczny [A]	60204,33	90884,37
Epsilon (wzrost)	1,01142	1,00823

KABEL

2026



Rysunek. 5. Zależność dopuszczalnego prądu zwarciového od czasu dla kabla z miedzianą żytą roboczą o przekroju 630 mm²



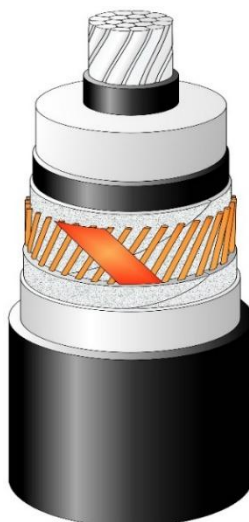
Rysunek. 6. Zależność dopuszczalnego prądu zwarciového od czasu dla kabla z miedzianą żyłą roboczą (wybrane przekroje)

4. Obliczanie prądów zwarciovych ekranów metalicznych

Poniżej przybliżono obliczenia prądów zwarciovych dla ekranów metalicznych zbudowanych z drutów. Skupiono się na najczęściej wykorzystywanych materiałach, czyli na drutach miedzianych oraz aluminiowych. W celach porównawczych zachowano ten sam przekrój, temperatury oraz materiały izolacyjne. Izolacja wykonana jest z XLPE, a powłoka zewnętrzna z HDPE (High density polyethylene).

4.1. Prąd zwarciovy adyabatyczny ekranu metalicznego z drutów miedzianych

Na rysunku 7 przedstawiono poglądowy rysunek kabla z ekranem metalicznym zbudowanym z drutów miedzianych. Z kolei tabela 6 przedstawia parametry przyjęte do obliczeń prądu zwarciowego adyabatycznego.



Rysunek. 7. Poglądowy rysunek kabla z ekranem metalicznym zbudowanym z drutów miedzianych

Tabela. 6. Parametry do wyznaczania adiabatycznego prądu zwarciego ekranu metalicznego z drutów miedzianych

$K=226$	$\frac{A \cdot \sqrt{S}}{\text{mm}^2}$	Współczynnik zależny od metalu przewodzącego prąd (dla Cu = 226; dla Al = 148; dla Pb = 41)
$t=1$	s	Czas trwania zwarcia
$\beta=234,5$	K	Współczynnik oporu materiału przewodzącego prąd w 0 °C (dla Cu = 234,5; dla Al = 228; dla Pb = 230)
I_{AD}	A	Prąd zwarcia obliczony przy założeniu adiabatyczności procesu
$F=0.5$		Współczynnik uwzględniający rzeczywisty kontakt między drutami ekranu a otaczającym nie-metalicznym materiałem (dla kabli olejowych F=1)
$S=397,6$	mm ²	Przekrój geometryczny ekranu metalicznego
$d=2,5$	mm	Średnica pojedynczego drutu
$n=81$	No	Ilość drutów w ekranie metalicznym
$S_w=4,9$	mm ²	Geometryczny przekrój pojedynczego drutu
$\theta_f=350$	°C	Końcowa temperatura zwarcia
$\theta_i=80$	°C	Początkowa temperatura zwarcia

$$S_w = \frac{\pi \cdot d^2}{4} = 4,9087 \text{ mm}^2$$

$$I_{AD} = \frac{K \cdot S_w}{\sqrt{t}} \cdot \sqrt{\ln \left(\frac{\beta + \theta_f}{\beta + \theta_i} \right)}$$

$$I_{ADwires} = n \cdot I_{AD}$$

$$I_{ADwires} = 70742,37 \text{ A}$$

W powyższym przypadku, ekran metaliczny o przekroju 397,6 mm² złożony z drutów miedzianych 2,5 mm jest w stanie przenieść prąd zwarciego adiabatyczny o wartości 70,7 kA w czasie 1 sekundy. Temperatura początkowa wynosi 80 °C, a temperatura końcowa 350 °C.

4.2. Prąd zwarciovy nieadiabatyczny ekranu metalicznego z drutów miedzianych

Tabela 7 przedstawia parametry niezbędne do wyznaczenia wartości współczynnika ε , który z kolei jest potrzebny do wyznaczenia prądu nieadiabatycznego.

Tabela. 7. Parametry do wyznaczania nieadiabatycznego prądu zwarciovego ekranu metalicznego z drutów miedzianych

$A=0.5914$	$\sqrt{\frac{\text{mm}^2}{\text{s}}}$	A, B empiryczne stałe nie-metalicznych materiałów przyległych lub otaczających druty ekranu metalicznego
$B=0.2425$	$\frac{\text{mm}^2}{\text{s}}$	
$\sigma_c=3.45 \cdot 10^6$	$\frac{\text{J}}{\text{K} \cdot \text{m}^3}$	Ciepło właściwe metalu przewodzącego prąd zwarciovy $\text{Cu}=3.45 \cdot 10^6$; $\text{Al}=2.50 \cdot 10^6$; $\text{Pb}=1.45 \cdot 10^6$
$\sigma_i=2.4 \cdot 10^6$	$\frac{\text{J}}{\text{K} \cdot \text{m}^3}$	Ciepło właściwe materiału przylegającego do metalu przewodzącego prąd zwarciovy $\text{XLPE}=2.4 \cdot 10^6$; $\text{PVC}=1.7 \cdot 10^6$; $\text{EPR}=2.0 \cdot 10^6$; $\text{PE}=2.4 \cdot 10^6$
$\rho_i=3.5$	$\frac{\text{K} \cdot \text{m}}{\text{W}}$	Rezystywność termiczna materiału przylegającego do metalu przewodzącego prąd zwarciovy, $\text{XLPE}=3.5$; $\text{PVC}=6.0$; $\text{EPR}=5.0$; $\text{PE}=3.5$
$C_1=2464$	$\frac{\text{mm}}{\text{m}}$	Stała, dla żył roboczych oraz odseparowanych drutów ekranu metalicznego
$C_2=1.22$	$\frac{\text{K} \cdot \text{m} \cdot \text{mm}^2}{\text{J}}$	Stała, dla żył roboczych oraz odseparowanych drutów ekranu metalicznego

$$A = \frac{C_1}{\sigma_c} \cdot \sqrt{\frac{\sigma_i}{\rho_i}}$$

$$B = \frac{C_2}{\sigma_c} \cdot \frac{\sigma_i}{\rho_i}$$

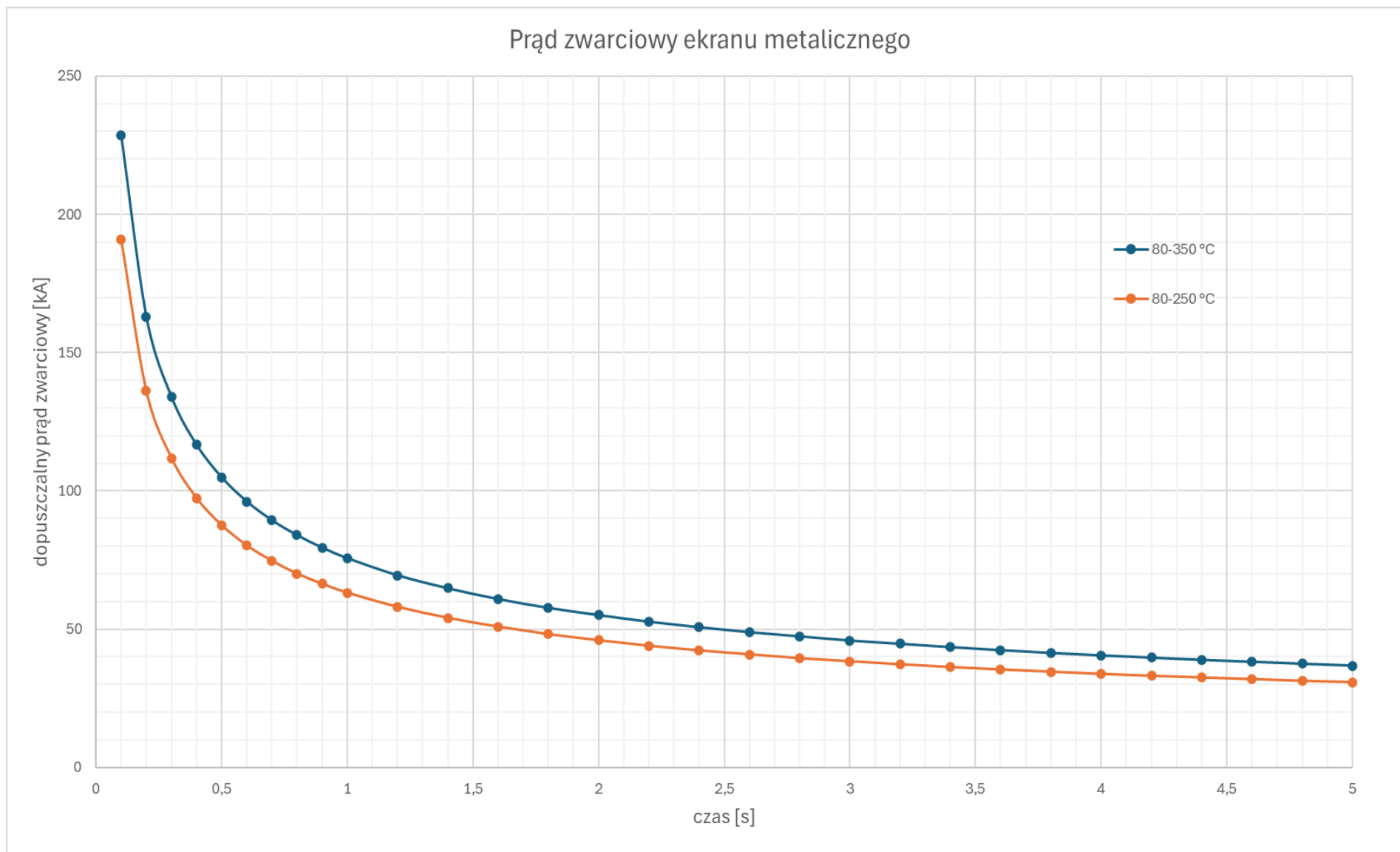
$$\varepsilon = \sqrt{1 + F \cdot A \cdot \sqrt{\frac{t}{S}} + F^2 \cdot \beta \cdot \frac{t}{S}}$$

$$\varepsilon = 1,07043$$

$$I = \varepsilon \cdot I_{ADwires} = 75,725 \text{ kA}$$

Uwzględniając nieadiabatyczny proces prądu zwarciovego, ten sam ekran metaliczny jest w stanie przenieść prąd o wartości 75,7 kA przy tych samych warunkach. Zatem dopuszczalna wartość znacznie wzrosła.

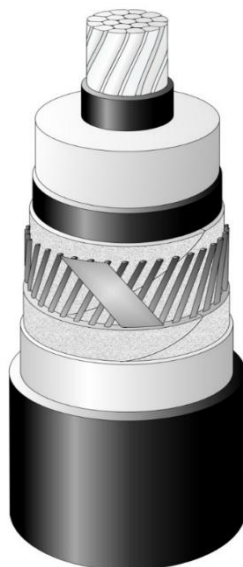
Rysunek 8 przedstawia zależność dopuszczalnego prądu zwarciovego nieadiabatycznego ekranu metalicznego z drutów miedzianych ($397,6 \text{ mm}^2$) od czasu trwania zwarcia.



Rysunek. 8. Zależność dopuszczalnego prądu zwarciovego od czasu dla kabla z miedzianym ekranem metalicznym o przekroju 397,6 mm². Maksymalne temperatury: 250 °C oraz 350 °C

4.3. Prąd zwarcia adiabatyczny ekranu metalicznego z drutów aluminiowych

Na rysunku 9 przedstawiono poglądowy rysunek kabla z ekranem metalicznym zbudowanym z aluminiowych drutów. Z kolei tabela 8 przedstawia parametry przyjęte do obliczeń prądu zwarcia adiabatycznego.



Rysunek. 9. Poglądowy rysunek kabla z ekranem metalicznym zbudowanym z aluminiowych drutów

Tabela. 8. Parametry do wyznaczania adiabatycznego prądu zwarcia ekranu metalicznego z drutów aluminiowych

$K=148$	$\frac{A \cdot \sqrt{S}}{\text{mm}^2}$	Współczynnik zależny od metalu przewodzącego prąd (dla Cu = 226; dla $Al = 148$; dla Pb = 41)
$t=1$	s	Czas trwania zwarcia
$\beta=228$	K	Współczynnik oporu materiału przewodzącego prąd w 0 °C (dla Cu = 234,5; dla $Al = 228$; dla Pb = 230)
I_{AD}	A	Prąd zwarcia obliczony na przy założeniu adiabatyczności procesu
$F=0.5$		Współczynnik uwzględniający rzeczywisty kontakt między drutami ekranu a otaczającym nie-metalicznym materiałem (dla kabli olejowych $F=1$)
$S=397,6$	mm^2	Przekrój geometryczny ekranu metalicznego
$d=2,5$	mm	Średnica pojedynczych drutów
$n=81$	No	Ilość drutów w ekranie metalicznym
$S_w=4,9$	mm^2	Geometryczny przekrój pojedynczego drutu
$\theta_f=350$	°C	Końcowa temperatura zwarcia
$\theta_i=80$	°C	Początkowa temperatura zwarcia

$$S_w = \frac{\pi \cdot d^2}{4} = 4,9087 \text{ mm}^2$$

$$I_{AD} = \frac{K \cdot S_w}{\sqrt{t}} \cdot \sqrt{\ln \left(\frac{\beta + \theta_f}{\beta + \theta_i} \right)}$$

$$I_{ADwires} = n \cdot I_{AD}$$

$$I_{ADwires} = 46688,03 \text{ A}$$

W powyższym przypadku, ekran metaliczny o przekroju 397,6 mm² złożony z drutów aluminiowych 2,5 mm jest w stanie przenieść prąd zwarcia adiabatyczny o wartości 46,7 kA w czasie 1 sekundy. Temperatura początkowa wynosi 80 °C, a temperatura końcowa 350 °C.

4.4. Prąd zwarcia nieadiabatyczny ekranu metalicznego z drutów aluminiowych

Tabela 9 przedstawia parametry niezbędne do wyznaczenia wartości współczynnika ϵ , który z kolei jest potrzebny do wyznaczenia prądu nieadiabatycznego.

Tabela. 9. Parametry do wyznaczania nieadiabatycznego prądu zwarcia ekranu metalicznego z drutów aluminiowych

$A=0.8162$	$\sqrt{\frac{\text{mm}^2}{\text{s}}}$	A, B empiryczne stałe nie-metalicznych materiałów przyległych lub otaczających druty ekranu metalicznego
$B=0.3346$	$\frac{\text{mm}^2}{\text{s}}$	
$\sigma_c=2.5 \cdot 10^6$	$\frac{\text{J}}{\text{K} \cdot \text{m}^3}$	Ciepło właściwe metalu przewodzącego prąd zwarcia Cu=3.45 · 10 ⁶ ; Al=2.50 · 10 ⁶ ; Pb=1.45 · 10 ⁶
$\sigma_i=2.4 \cdot 10^6$	$\frac{\text{J}}{\text{K} \cdot \text{m}^3}$	Ciepło właściwe materiału przylegającego do metalu przewodzącego prąd zwarcia XLPE=2.4 · 10 ⁶ ; PVC=1.7 · 10 ⁶ ; EPR=2.0 · 10 ⁶ ; PE=2.4 · 10 ⁶
$\rho_i=3.5$	$\frac{\text{K} \cdot \text{m}}{\text{W}}$	Rezystywność termiczna materiału przylegającego do metalu przewodzącego prąd zwarcia, XLPE=3.5; PVC=6.0; EPR=5.0; PE=3.5
$C_1=2464$	$\frac{\text{mm}}{\text{m}}$	Stała, dla żył roboczych oraz odseparowanych drutów ekranu metalicznego
$C_2=1.22$	$\frac{\text{K} \cdot \text{m} \cdot \text{mm}^2}{\text{J}}$	Stała, dla żył roboczych oraz odseparowanych drutów ekranu metalicznego

$$A = \frac{C_1}{\sigma_c} \cdot \sqrt{\frac{\sigma_i}{\rho_i}}$$

$$B = \frac{C_2}{\sigma_c} \cdot \frac{\sigma_i}{\rho_i}$$

$$\varepsilon = \sqrt{1 + F \cdot A \cdot \sqrt{\frac{t}{S}} + F^2 \cdot \beta \cdot \frac{t}{S}}$$

$$\varepsilon = 1,09601$$

$$I = \varepsilon \cdot I_{ADwires} = 51,17 \text{ kA}$$

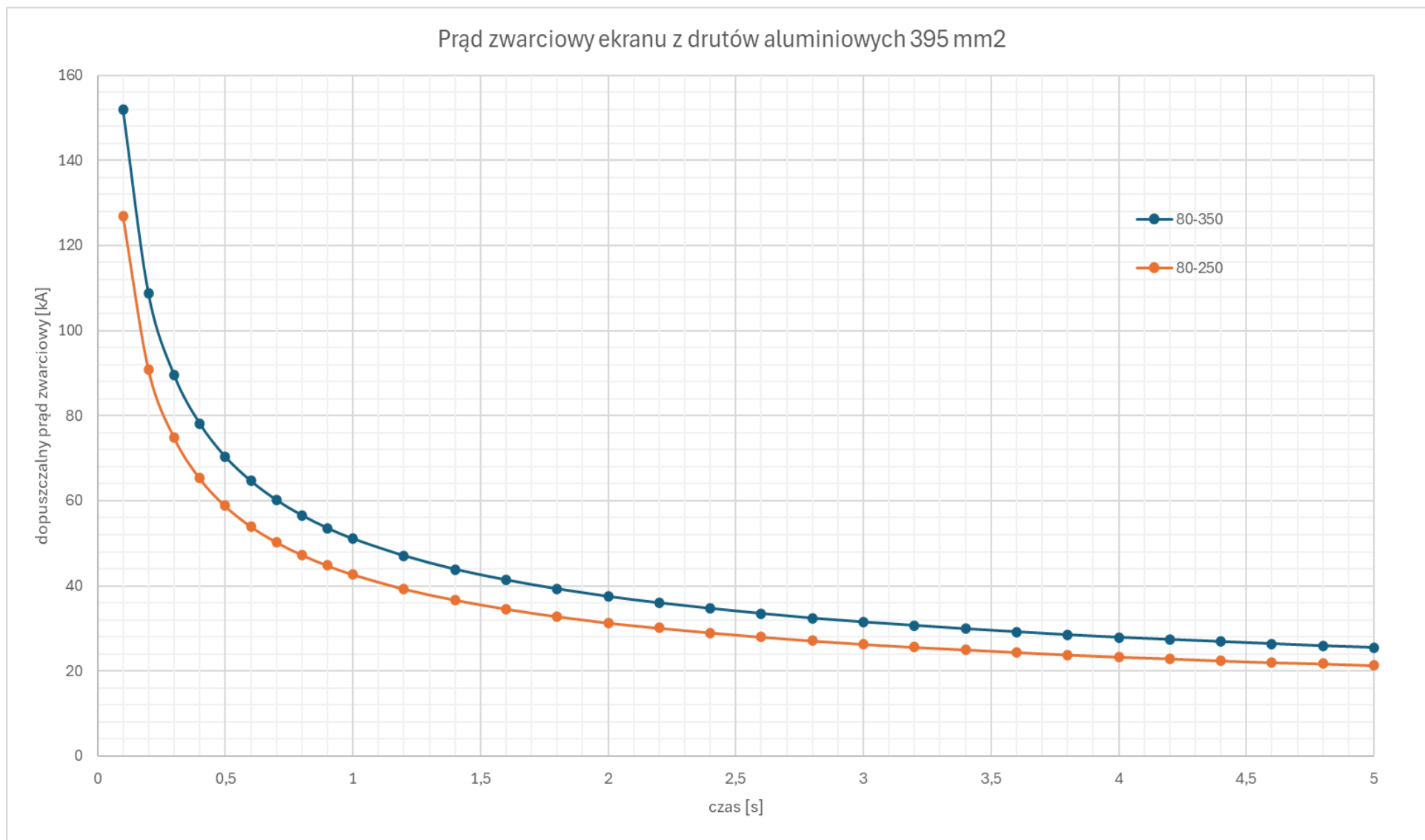
Uwzględniając nieadiabaticzny proces prądu zwarcowego, ten sam ekran metaliczny jest w stanie przenieść prąd o wartości 51,17 kA przy tych samych warunkach. Zatem dopuszczalna wartość znacznie wzrosła.

W tabeli 10 zestawione zostały wyniki dla dwóch różnych materiałów ekranu metalicznego o przekroju 397,6 mm².

Tabela. 10. Porównanie wyników

Parametr	Miedź	Aluminium
Dopuszczalny prąd adiabaticzny [A]	70742,37	46688,03
Dopuszczalny prąd nieadiabaticzny [A]	75724,67	51170,35
Epsilon (wzrost)	1,07043	1,09601

Rysunek 10 przedstawia zależność dopuszczalnego prądu zwarcowego nieadiabaticznego ekranu metalicznego z drutów aluminiowych (397,6 mm²) od czasu trwania zwarcia.



Rysunek. 10. Zależność dopuszczalnego prądu zwarciovego od czasu dla kabla z aluminiovym ekranem metalicznym o przekroju 397,6 mm². Maksymalne temperatury: 250 °C oraz 350 °C

5. Obliczanie prądów zwarciovych powłok metalicznych

Poniżej ukazano obliczenia prądów zwarciovych dla powłok metalicznych. Przytoczono tutaj przykład powłoki ołowianej. W celach porównawczych zachowano ten sam przekrój, temperatury oraz materiały izolacyjne. Izolacja wykonana jest z XLPE, a powłoka zewnętrzna z HDPE.

5.1. Prąd zwarciovowy adiabaticzny ołowianej powłoki metalicznej

Na rysunku 11 przedstawiono poglądowy rysunek kabla z ołowianą powłoką metaliczną. Z kolei tabela 11 przedstawia parametry przyjęte do obliczeń prądu zwarciovego adiabaticznego.



Rysunek. 11. Poglądowy rysunek kabla z ołowianą powłoką metaliczną

Tabela. 11. Parametry do wyznaczania adyabatycznego prądu zwarcowego powłoki metalicznej ołowianej

S=397,73	mm ²	Przekrój geometryczny ekranu metalicznego
t=1,0	s	Czas trwania zwarcia
K=41	$\frac{A \cdot \sqrt{S}}{\text{mm}^2}$	Współczynnik zależny od metalu przewodzącego prąd (dla Cu = 226; dla Al = 148; dla Pb = 41)
β = 230	K	Współczynnik oporu materiału przewodzącego prąd w 0 °C (dla Cu = 234,5; dla Al = 228; dla Pb = 230)
θ _f =210	°C	Końcowa temperatura zwarcia
θ _i =80	°C	Początkowa temperatura zwarcia

$$I_{ADC} = \frac{K \cdot S}{\sqrt{t}} \cdot \sqrt{\ln \left(\frac{\beta + \theta_f}{\beta + \theta_i} \right)}$$

$$I_{ADC} = 9649,99 \text{ A}$$

W powyższym przypadku ołowiana powłoka o przekroju 397,73 mm² jest w stanie przenieść prąd zwarcowy adyabatyczny o wartości 9,65 kA w czasie 1 sekundy. Temperatura początkowa wynosi 80 °C, a temperatura końcowa 210 °C.

KABEL
2026

5.2. Prąd zwarciovy nieadiabatyczny ołowianej powłoki metalicznej

Tabela 12 przedstawia parametry niezbędne do wyznaczenia wartości współczynnika M oraz ε , które są potrzebne do wyznaczenia prądu nieadiabatycznego.

Tabela. 12. Parametry do wyznaczania nieadiabatycznego prądu zwarciovego ołowianej powłoki metalicznej

$\delta=2,0$	mm	Grubość powłoki
$\sigma_1=1,45 \cdot 10^6$	$\frac{J}{K \cdot m^3}$	Ciepło właściwe powłoki Cu=3.45 · 10 ⁶ ; Al=2.50 · 10 ⁶ ; Pb=1.45 · 10 ⁶
$\sigma_2=2,4 \cdot 10^6$	$\frac{J}{K \cdot m^3}$	Ciepło właściwe materiału pod powłoką XLPE=2.4 · 10 ⁶ ; PVC=1.7 · 10 ⁶ ; EPR=2.0 · 10 ⁶ ; PE=2.4 · 10 ⁶
$\sigma_3=2,4 \cdot 10^6$	$\frac{J}{K \cdot m^3}$	Ciepło właściwe materiału nad powłoką XLPE=2.4 · 10 ⁶ ; PVC=1.7 · 10 ⁶ ; EPR=2.0 · 10 ⁶ ; PE=2.4 · 10 ⁶
$F=0.7$		Współczynnik uwzględniający rzeczywisty kontakt między drutami ekranu a otaczającym nie-metalicznym materiałem
$\rho_2=3,5$	$\frac{K \cdot m}{W}$	Rezystywność termiczna materiału pod powłoką XLPE=3.5; PVC=6.0; EPR=5.0; PE=3.5
$\rho_3=3,5$	$\frac{K \cdot m}{W}$	Rezystywność termiczna materiału nad powłoką XLPE=3.5; PVC=6.0; EPR=5.0; PE=3.5
M		Współczynnik kontaktu termicznego

$$M = \frac{\sqrt{\frac{\sigma_2}{\rho_2}} + \sqrt{\frac{\sigma_3}{\rho_3}}}{2 \cdot \sigma_1 \cdot \delta \cdot 10^{-3}} \cdot F$$

$$M = 0,19988$$

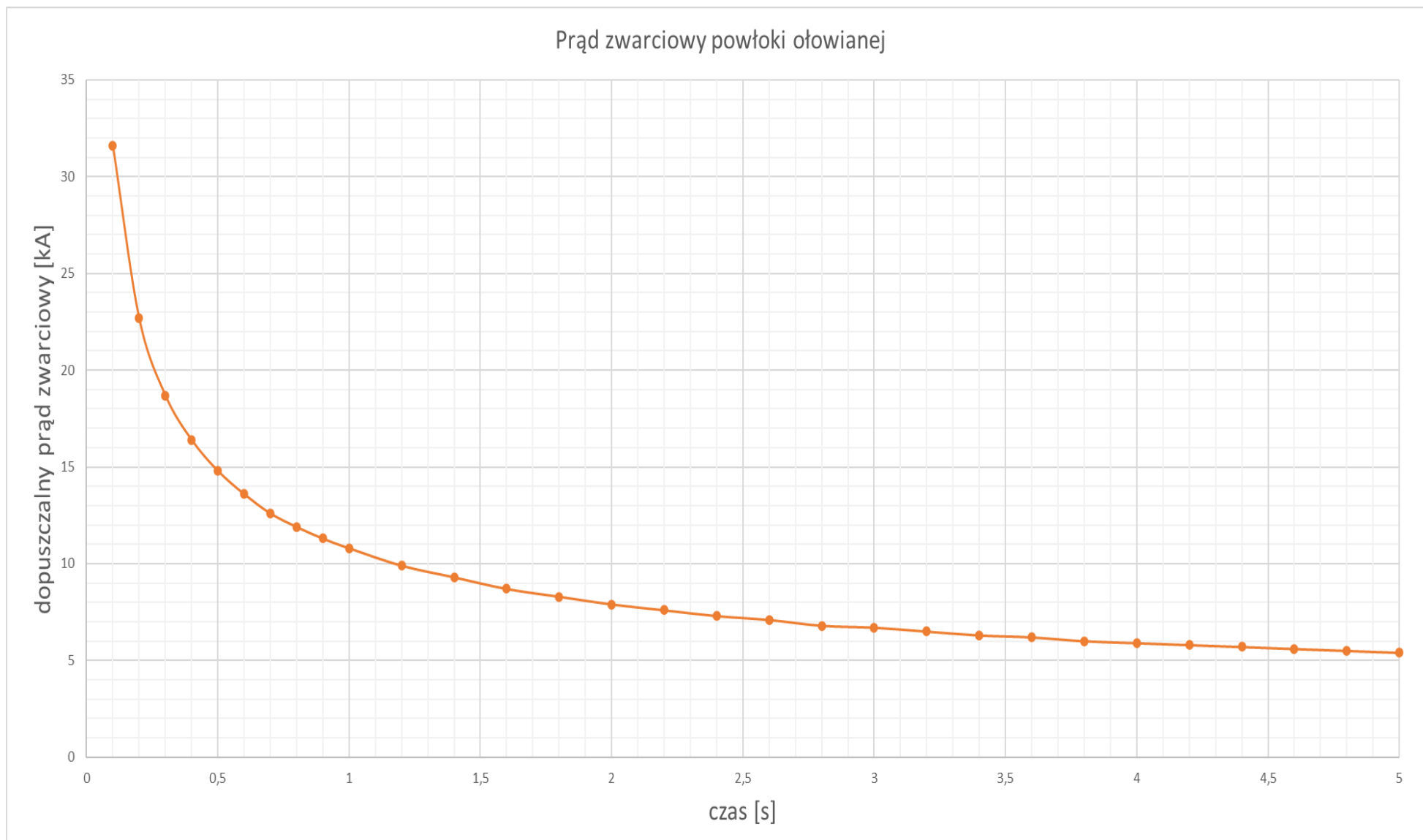
$$\varepsilon = 1 + 0,61 \cdot M\sqrt{t} - 0,069(M\sqrt{t})^2 + 0,0043(M\sqrt{t})^3$$

$$\varepsilon = 1,11921$$

$$I_{NADSC} = \varepsilon \cdot I_{ADSC} = 10,8 \text{ kA}$$

Uwzględniając nieadiabatyczny proces prądu zwarciovego, ta sama powłoka ołowiana jest w stanie przenieść prąd o wartości 10,8 kA przy tych samych warunkach. Zatem dopuszczalna wartość zauważalnie wzrosła.

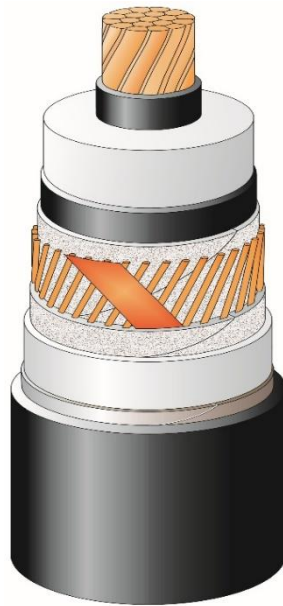
Rysunek 12 przedstawia zależność dopuszczalnego prądu zwarciovego nieadiabatycznego ołowianej powłoki metalicznej (397,73 mm²) od czasu trwania zwarcia.



Rysunek. 12. Zależność dopuszczalnego prądu zwarciového od czasu dla kabla z ołowianą powłoką metaliczną o przekroju 397,73 mm². Maksymalna temperatura: 210 °

6. Problematyka

Norma IEC 60949 powstała stosunkowo dawno i nie nadąża za zmianami na rynku. Ostatni dodatek do normy został wydany w 2008 roku, natomiast nie wprowadził on zbyt wiele kluczowych zmian. Norma nie uwzględnia nowych typów konstrukcji, np. SWAS (Smooth welded aluminium sheath), gdzie wykorzystywane jest nie czyste aluminium, a stop o odpowiednich właściwościach elektrycznych i mechanicznych (spawalniczych). Dodatkowo norma nie zawiera szczegółowych wytycznych postępowania w przypadku łączenia dwóch warstw np. zarówno druty jak i powłoka ołowiana. Poglądową budowę takiego kabla przedstawiono na rysunku 13. Ponadto są rynki (na przykład rynek włoski), gdzie panuje zwyczaj uwzględnienia zarówno drutów jak i taśmy aluminiowej (klejonej z zakładką) do obliczeń dopuszczalnych prądów zwarciovych. Norma IEC 60949 zawiera jedynie wzmiankę o wykorzystaniu dzielnika prądowego, natomiast dalej nie uwzględnia to warstw półprzewodzących, ani sposobu łączenia warstw kabla w osprzęcie kablowym. Można stwierdzić, że dodatkowym buforem bezpieczeństwa jest fakt, iż w obliczeniach dopuszczalnych prądów zwarciovych pomijane są taśmy przeciwskrętne. Na podstawie powyższego, da się zauważyć, że istnieje potrzeba rewizji normy. Powinna ona być uzupełniona o wytyczne dla nowych typów konstrukcji i materiałów. Powinna ona również być dostosowana do obecnie stosowanych praktyk rynkowych, nie tylko pod kątem budowy samego kabla.



Rysunek. 13. Poglądowy rysunek kabla zarówno z ołowianą powłoką metaliczną jak i ekranem metalicznym z drutów miedzianych

Uzupełnieniem normy IEC 60949 może być norma IEC 60865-1 Short-circuit currents - Calculation of effects - Part 1: Definitions and calculation methods z 2011 roku, która skupia się na skutkach termicznych i mechanicznych prądów zwarciovych.

Dodatkowym zagadnieniem wymagającym doprecyzowania jest wpływ rzeczywistej geometrii konstrukcji na rozkład temperatury w czasie zwarcia. Modele normowe opierają się na szeregu uproszczeń (jednorodność materiałów, idealny kontakt termiczny, symetryczny rozkład temperatury), które w praktyce nie zawsze są spełnione. W przypadku konstrukcji wielowarstwowych, takich jak kombinacja ekranu z drutów i powłoki metalicznej, rzeczywisty rozptyw prądu pomiędzy warstwy zależy od impedancji, sposobu połączenia w osprzęcie oraz warunków uziemienia. W normie brak jednoznacznych wytycznych w tym zakresie, co prowadzi do stosowania uproszczeń lub podejścia konserwatywnego.

7. Wnioski

Mówiąc o obliczeniach dopuszczalnych prądów zwarciovych z punktu widzenia budowy kabla, można wyróżnić następujące aspekty:

- 1) Na dopuszczalny prąd zwarciovowy wpływ ma przekrój, materiał elementu przewodzącego, materiały otaczające element przewodzący (w przypadku procesu nieadiabaticznego) oraz czas trwania zwarcia. Warto zauważyć, że rezystancja, współczynnik skoku ekranu, budowa żyły (współczynnik k_s , k_p , typ RE/RMS/RM nie są brane pod uwagę).
- 2) Należy dobrać konstrukcje w taki sposób, aby prąd zwarciovowy nie doprowadził do uszkodzenia elementów kabla. Degradacja materiału może wystąpić po czasie.
- 3) Główną wytyczną jest prąd zwarciovowy w danym punkcie sieci. Czasami dyktowany jest on przez specyfikacje czy wymogi klienta. Istnieją natomiast także ograniczenia produkcyjne. Przykładowo na rynku niemieckim występują bardzo małe prądy zwarciovowe 1-fazowe dzięki uziemieniu przez cewkę. Zdarza się, że operatorzy narzucają przekrój nie większy niż 50 mm^2 czy 70 mm^2 . Z kolei konieczność stosowania izolacji o grubości 18 mm skutkuje dużym przekrojem ośrodka. Finalnie powstaje duża szczelina między drutami ekranu metalicznego, co jest niepożądane, a nie zawsze jest możliwość zastosowania bardzo cienkich drutów w celu zniwelowania szczeliny.
- 4) Uwzględniając proces nieadiabaticzny, dopuszczalna wartość prądu zwarciovowego wzrasta. Jest to bardziej widoczne w przypadku ekranów oraz powłok metalicznych, ponieważ tam brane są pod uwagę materiały zarówno nad i pod ekranem/powłoką. W przypadku żył roboczych jest jedynie materiał nad żyłą roboczą. Dodatkowo kluczowy staje się współczynnik F , czyli niedoskonałość kontaktu termicznego (przyleganie) oraz przestrzeń między drutami.
- 5) Z wykresów przytoczonych powyżej, widać, że zależność dopuszczalnego prądu zwarciovowego od czasu jest nieliniowa. Kluczowe są pierwsze sekundy zwarcia. Prąd zwarciovowy powinien być jak najszybciej wyeliminowany. Dla krótkich czasów trwania, konstrukcja jest w stanie przenieść znaczne wartości, natomiast im dłużej trwa zwarcie, tym mniejsza różnica w wartości dopuszczalnego prądu zwarciovowego.
- 6) Spośród przedstawionych wyżej materiałów, najlepszym materiałem pod kątem prądów zwarciovowych jest miedź, choć jest droga i ciężka. Kompromisowym wydaje się być aluminium. Nie można jednak tego samego powiedzieć o ołowiu, który wykazuje najgorsze właściwości,

a w dodatku jest niezdrowy i ciężki. Mimo, że powłoka ołowiana stanowi doskonałą barierę wodną, to nierzadko istnieje konieczność dołożenia drutów pod powłoką, aby spełnić wymagany prąd zwarciovowy. Stąd też powstały alternatywne konstrukcje jak SWAS, czy CAS (Corrugated aluminium sheath).

- 7) Stosując wzory opisane w normie, ten sam przekrój ekranu metalicznego zbudowany na drutach o małej średnicy da większą wartość dopuszczalnego prądu zwarciovowego, niż ekran zbudowany z drutów o większej średnicy.
- 8) W praktyce przemysłowej warunek zwarciovowy bardzo często stanowi kryterium krytyczne przy doborze konstrukcji kabla. Szczególnie widoczne jest to w przypadku ekranów metalicznych, gdzie wymagany prąd zwarciovowy może znacząco wpływać na całkowitą średnicę kabla, jego masę, koszt, a nawet sposób transportu i instalacji (promienie gięcia).
- 9) Wraz ze wzrostem poziomów mocy zwarciovowych w systemach elektroenergetycznych rośnie znaczenie optymalizacji konstrukcji pod kątem odporności zwarciovowej. Wymaga to nie tylko znajomości norm, ale również świadomości ich ograniczeń oraz umiejętności interpretacji wyników w kontekście konkretnego projektu.
- 10) Można przewidywać, że przyszłe rewizje norm będą musiały uwzględnić nowe materiały, konstrukcje hybrydowe oraz bardziej zaawansowane modele wymiany ciepła.
- 11) Warunek zwarciovowy w ujęciu adiabatycznym sprowadza się do spełnienia poniższej zależności, co oznacza, że energia Joule'a wydzielona w przewodniku nie może przekroczyć wartości odpowiadającej dopuszczalnemu przyrostowi temperatury.

$$I^2 \cdot t = const$$

2026

Przemysław Krawczykowski

High Voltage Systems Process Engineer

przemyslaw.krawczykowski@tfkable.com