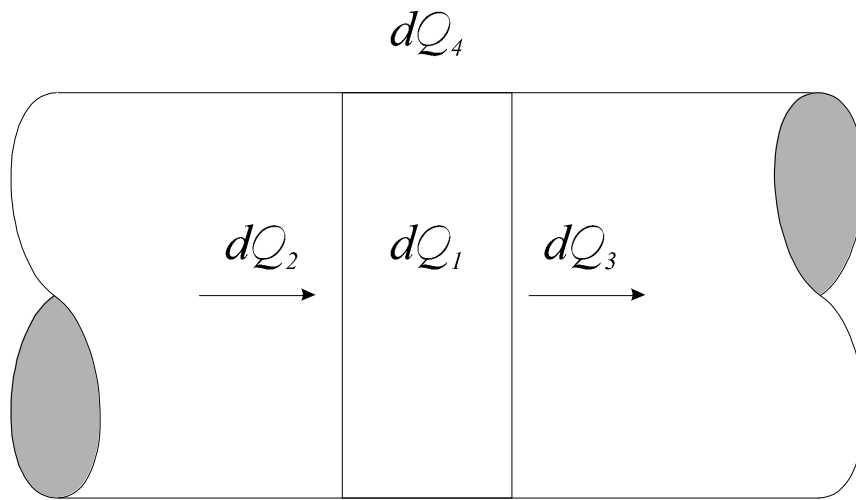


4.8 TEPELNÉ ÚČINKY ZKRATOVÉHO PROUDU

4.8.1 Maximální oteplení vodiče - tepelná bilance vodiče



$$dQ = dQ_1 + dQ_2 - dQ_3 - dQ_4$$

$$dQ_1 = dR \cdot I^2 dt = \frac{\rho \cdot dx}{S} I^2 dt \quad dQ_2 = -\lambda S \frac{\partial \vartheta}{\partial x} dt$$

$$dQ_3 = -\lambda S \frac{\partial \left[\vartheta + \frac{\partial \vartheta}{\partial x} dx \right]}{\partial x} dt = -\lambda S \left(\frac{\partial \vartheta}{\partial x} + \frac{\partial^2 \vartheta}{\partial x^2} dx \right) dt$$

$$dQ_4 = \mu dP(\vartheta - \vartheta_0) dt = \mu o dx(\vartheta - \vartheta_0) dt$$

$$dQ = c_V dV \frac{\partial \vartheta}{\partial t} dt = c_V S dx \frac{\partial \vartheta}{\partial t} dt$$

$$c_V S \frac{\partial \vartheta}{\partial t} = \frac{\rho}{S} I^2 + \lambda S \frac{\partial^2 \vartheta}{\partial x^2} - \mu o(\vartheta - \vartheta_0)$$

4.8.2 Zjednodušení tepelné bilance pro zkratové poměry

Zjednodušující předpoklady:

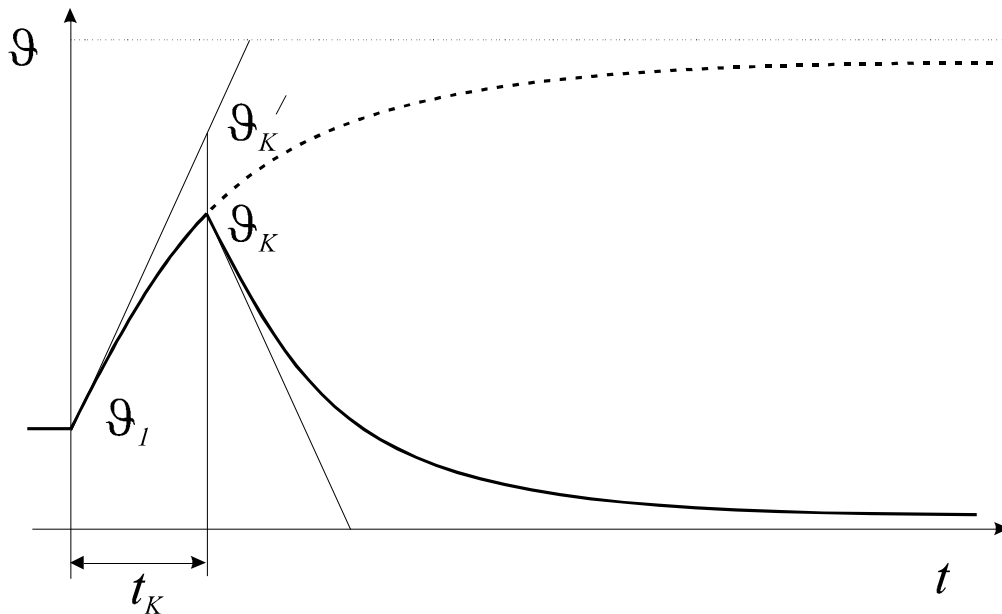
1. Zanedbáme vedení tepla podél vodiče:

$$\frac{\partial I}{\partial x} = 0 \quad \rho = konst. \quad S = konst. \quad \Rightarrow$$

$$\frac{\partial Q_1}{\partial x} = 0 \quad \Rightarrow \quad \frac{\partial \vartheta}{\partial x} \approx konst. \quad \Rightarrow \quad \frac{\partial^2 \vartheta}{\partial x^2} \approx 0$$

2. Zanedbáme ochlazování pro velmi krátký děj

$$Q_4 \approx 0$$



Zjednodušená bilanční rovnice s formálním uvažováním I_{KE} je:

$$c_V S \frac{\partial \vartheta}{\partial t} = \frac{\rho}{S} I_{KE}^2$$

$$S^2 c_V \int_{\vartheta_1}^{\vartheta_K} d\vartheta = \rho I_{KE}^2 \int_0^{t_K} dt$$

$$S = I_{KE} \sqrt{\frac{\rho t_K}{c_V (\vartheta_K - \vartheta_1)}}$$

$$K = \sqrt{\frac{c_V (\vartheta_K - \vartheta_1)}{\rho}} \quad S_{MIN} = \frac{I_{KE} \sqrt{t_K}}{K} \leq S$$

$$\frac{\partial c_V}{\partial \vartheta} \neq 0 \quad \frac{\partial \rho}{\partial \vartheta} \neq 0 \quad \Rightarrow$$

$$K = \sqrt{\frac{c_{V0} (\vartheta_F + 20)}{\rho_{20}} \ln \frac{\vartheta_F + \vartheta_K}{\vartheta_F + \vartheta_1}}$$

$$\vartheta_F = \frac{1}{\alpha} \left[\frac{K}{\Omega} \right] \quad \alpha = \frac{\partial \rho}{\partial \vartheta} \left[\frac{\Omega}{K} \right]$$

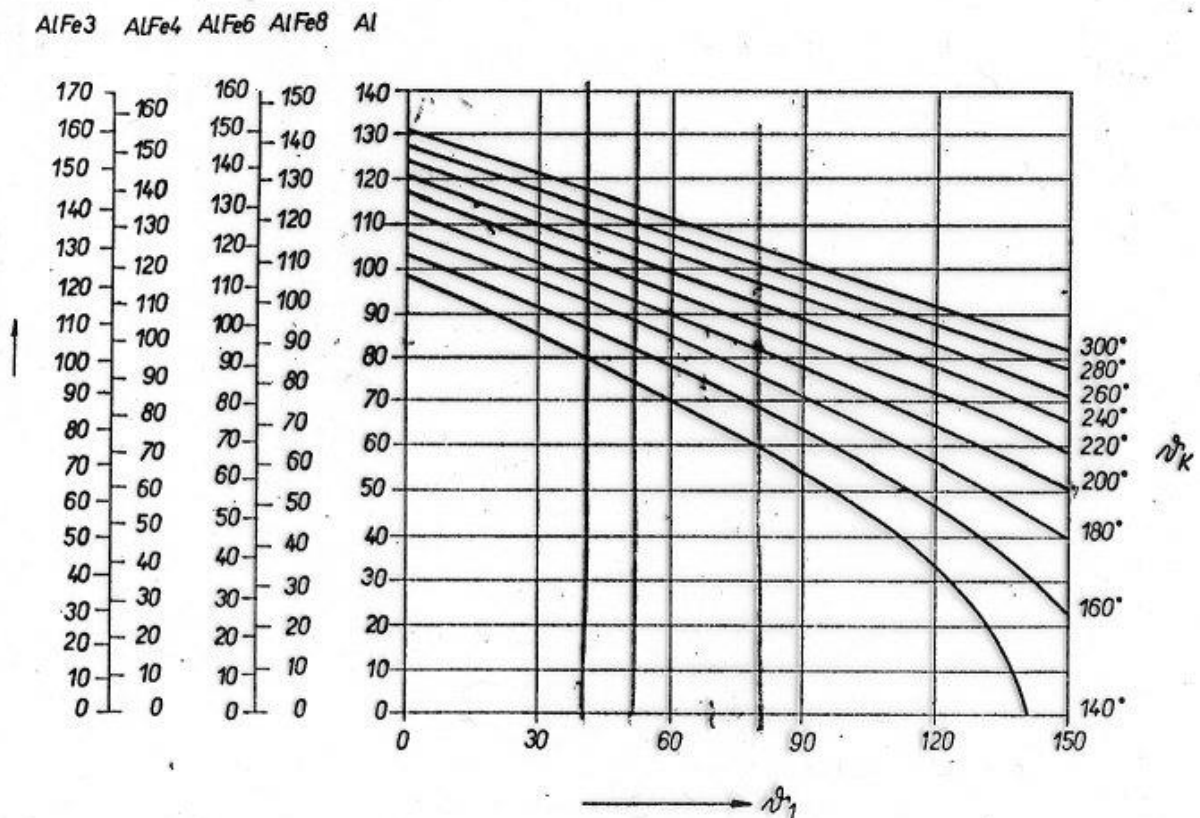
Parametry vodiče:

Veličina	Význam	Dosazovaná velikost
ϑ_F	Fiktivní teplota vodiče - teplotní rozdíl potřebný k změně měrného odporu vodiče o jeden Ω	Cu – 234,5 °C / Ω Al – 228,0 °C / Ω Fe – 222,0 °C / Ω
Materiál	$c_{V0} [J \cdot cm^{-3} \cdot K^{-1}]$ $[J \cdot mm^{-2} m^{-1} \cdot K^{-1}]$	$\rho_{20} [\mu \cdot \Omega \cdot m]$ $[\Omega \cdot mm^2 / m]$
Cu	3.500	0.0179
Al	2.417	0.0294
Fe	3.770	0.1430

Parametry izolace:

Veličina	Význam	Dosazovaná velikost
ϑ_1	Teplota vodiče bezprostředně před vznikem zkratu	Maximální TRVALE dovolená teplota izolace
ϑ_K	Teplota vodiče v době vypnutí zkratu	Maximální KRÁTKODOBĚ dovolená teplota izolace

Druh izolace vodiče	Zkratka názvu	Značka	Základní teplota okolního vzduchu (°C)	Nejvyšší dovolená provozní teplota (°C)	Nejvyšší dovolená teplota při zkratu (°C)
Polyvinylchlorid měkčený	PVC	Y	30	70	140
Elastomery na bázi přírodního nebo syntetického kaučuku	guma pryž kaučuk	G	30	60-120	200-250
Etylenpropylenová pryž	EPR		30	90	250
Polyetylén	PE	E	30	70	130-150
Zesítěný polyetylén	XPE, XLPE, PRC	X	30	90	250
Polytetrafluoretylén	PTFE		90	200	300
Propylén	FEP		90	200	250
Skleněné vlákno			90	130	180
Holé vodiče plné nebo slané Al nebo Cu - mechanicky zatížené			30	80	200
- mechanicky nezatížené			30	80	300



Obr. 2. Koeficient k pro určení minimálního průřezu hliníkových vodičů a ocelohliníkových lan podle zkratových poměrů

Příklad:

Určete tepelné poměry na kabelu napájeného transformátorem o výkonu 0.5 MVA a napětí nakrátko 10% na hladině 400 V. Rychlost jištění kabelu je 0,1 sec. Použitý kabel je hliníkový s PVC izolací.

$$X_C = u_K \frac{U_N^2}{S_N} = 0.1 \frac{400^2}{0.5 \cdot 10^6} \Omega = 32 \text{ m}\Omega$$

$$I_K'' = 1.1 \frac{U_N}{\sqrt{3} \cdot X_C} = 1.1 \frac{400}{\sqrt{3} \cdot 0.032} \text{ A} = 7.94 \text{ kA}$$

Místo zkratu	T_a (s)	k_c pro t_k (s)								
		0,02	0,04	0,05	0,08	0,1	0,2	0,5	1	3
za alternátorem do 55 MW	0,16	1,65	1,6	1,58	1,54	1,5	1,46	1,23	1,08	1,03
v soustavě										
vvn a zvn	0,03	1,44	1,32	1,24	1,16	1,13	1,07	1,03	1,01	1,00
vn	0,02	1,35	1,24	1,17	1,11	1,09	1,05	1,02	1,01	1,00
nn	0,01	1,24	1,15	1,10	1,07	1,05	1,03	1,01	1,00	1,00
v kabelovém rozvodu nn	0,008	1,18	1,11	1,08	1,05	1,04	1,02	1,01	1,00	1,00
za transformátory										
vvn/vn nebo vn/nn	0,036	1,49	1,37	1,29	1,20	1,17	1,09	1,04	1,02	1,01
vn/nn do 250 kVA včetně	0,008	1,18	1,11	1,08	1,05	1,04	1,02	1,01	1,00	1,00
do 630 kVA včetně	0,014	1,29	1,18	1,13	1,09	1,07	1,04	1,01	1,01	1,00
do 1600 kVA včetně	0,019	1,35	1,24	1,17	1,11	1,09	1,05	1,02	1,01	1,00

$$nn \text{ 400V, } t_K = 0.1 \text{ sec} \Rightarrow K_E = 1.05$$

$$I_{KE} = K_E \cdot I_K'' = 1.05 \cdot 7.94 \text{ kA} = 8.34 \text{ kA}$$

Pro starší normativní parametry izolace odpovídající nomogramu:

$$PVC \Rightarrow \vartheta_1 = 65^\circ C, \vartheta_K = 200^\circ C \Rightarrow K \approx 88$$

Koeficient K určíme z nomogramu, nebo:

$$K = \sqrt{\frac{2.417(228 + 20)}{0.0294} \ln \frac{228 + 200}{228 + 65}} \approx 88$$

Potom minimální průřez je:

$$S_{MIN} = \frac{8.34\sqrt{0.1}}{88} = 30 \text{ mm}^2$$

Pro měděný kabel by vycházelo:

$$K \approx 136, \quad S_{MIN} = 19 \text{ mm}^2$$

Pro ocelový kabel by vycházelo:

$$K \approx 50, \quad S_{MIN} = 53 \text{ mm}^2$$

Alternativní možnosti zlepšení jsou:

- Izolace s vyšší **krátkodobě** dovolenou provozní teplotou.
- Rychlejší reakce chránění vodiče.
- Omezení velikosti zkratového proudu sériovým reaktorem.
- Vodič s nižší rezistivitou.
- Vodič s vyšší měrnou tepelnou kapacitou.

Online aplikace pro výpočet kontroly na tepelné účinky zkratového proudu:

<http://home.zcu.cz/~nohac/EE1/TepelneUcinkyZkratovehoProudu/>