Elektrárny
B1M15ENY

přednáška č. 4

Druhy zkratových proudů
Tepelné účinky
Dotykové napětí na uzemnění
Silové účinky

Ing. Jan Špetlík, Ph.D.
ČVUT FEL Katedra elektroenergetiky
E-mail: **spetlij@fel.cvut.cz**

Výpočty parametrů:

$$X_s \cong X'_r = \frac{1}{2}.\frac{\sqrt{3.U_k^2.I_k^2 - P_k^2}}{3.I_k^2} = \frac{10^3}{2}.\frac{\sqrt{3.1,529^2.185^2 - 127,5^2}}{3.185^2} = 2,3\ \Omega$$

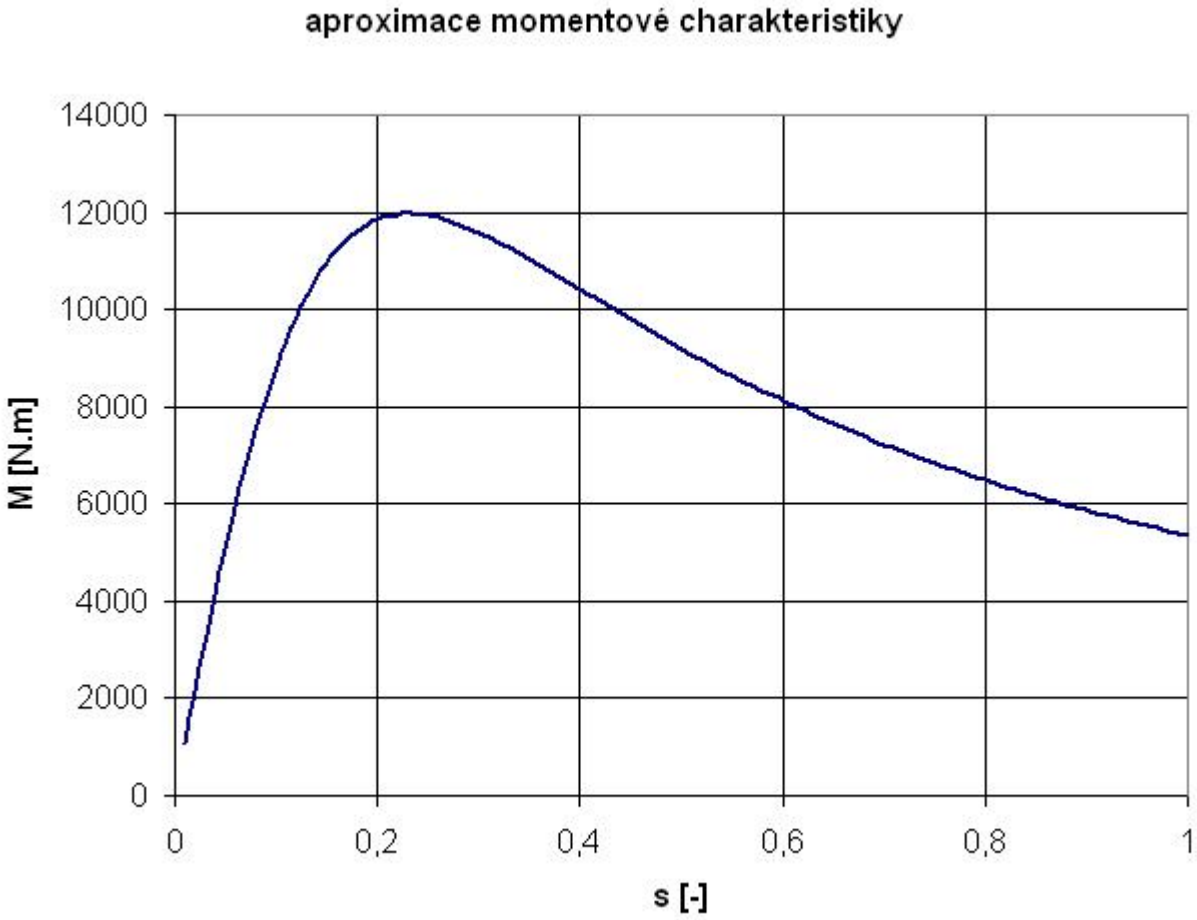
$$R_s = \frac{234,5+\vartheta}{234,5+\vartheta_0}.R_{s20} = \frac{234,5+80}{234,5+20}.R_{s20} = 0,178\ \Omega$$

$$R'_r = \frac{P_k}{3.I_k^2} - R_s = \frac{127,5}{3.185^2}.10^3 - 0,178 = 1,064\ \Omega$$

$$M = \frac{R'_r}{s.\Omega_{SM}}.\frac{U^2}{\left(X_s + X'_r\right)^2 + \left(R_s + \frac{R'_r}{s}\right)^2} =$$

$$= \frac{1,064}{s.100.\pi}.\frac{U^2}{\left(2,3+2,3\right)^2 + \left(0,178 + \frac{1,064}{s}\right)^2} =$$

$$M = \frac{3,386.10^{-3}}{s} \cdot \frac{U^2}{5,308 + \left(0,178 + \frac{1,064}{s}\right)^2}$$



Druhy zkratových proudů

Zkrat

náhodné nebo úmyslné vodivé spojení mezi dvěma nebo více vodivými částmi, vedoucí k tomu, že rozdíl elektrických potenciálů mezi těmito vodivými částmi je roven nule nebo má hodnotu blízkou nule (dle ČSN EN 60 909-0)

Výpočty zkratových proudů a jejich tepelných účinků

dle normy ČSN EN 60 909-0 (popř. podle PNE 33 3042)

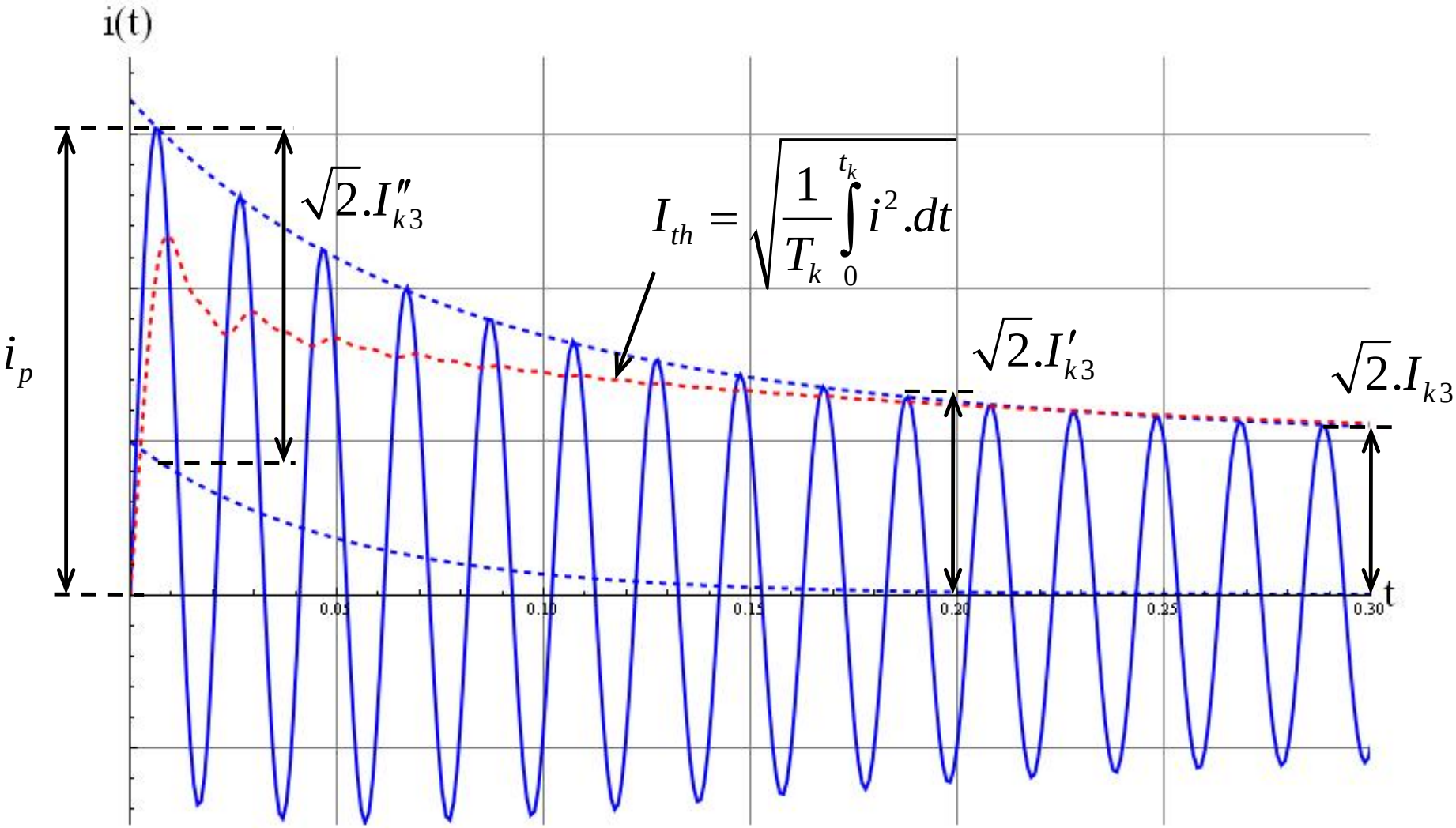
Silové účinky zkratových proudů

dle normy ČSN EN 60 865-1 (příklady ji doplňuje PNE 33 3041)

Terminologie:

I''_{k3}	Trojfázový rázový symetrický zkratový proud	i_p	Nárazový proud
I''_{k1}	Jednofázový rázový symetrický zkratový proud	I_{th}	Ekvivalentní oteplovací proud
I'_{k3}	Trojfázový přechodný zkratový proud	I_b	Vypínací zkratový proud
I_{k3}	Trojfázový ustálený zkratový proud	T_k	Doba trvání zkratu

Druhy zkratových proudů



Nárazový zkratový proud

Výpočet nárazového zkratového proudu dle normy ČSN EN 60 909-0:

$$i_p = \kappa.\sqrt{2}.I''_k \qquad \kappa = 1,02 + 0,98.e^{-3.R/X}$$

<u>Poznámka:</u>

Tabulka z již zrušené ČSN 33 3020, z níž je patrná typická hodnota součinitele κ :

Hodnota součinitele K pro výpočet nárazového zkratového proudu		
Místo zkratu	bez asynchronních motorů	s asynchronními motory [4])
za alternátorem do 55 MW [1])	1,95	2,7
v soustavě vvn, zvn	1,7	-
v soustavě vn	1,6	2,4
v soustavě nn	1,4	-
v kabelovém rozvodu nn [2])	1,3	1,9
za transformátory [3])		
vvn/vn nebo vn/nn	1,7	2,5
vn/nn do 250 kVA včetně	1,3	1,9
do 630 kVA včetně	1,5	2,1
do 1600 kVA včetně	1,6	2,3

[1]) Pro zkrat v blízkosti alternátoru nebo za blokovým transformátorem

[2]) Pro zkrat vzdálený od napájecího transformátoru i alternátoru (impedance mezi místem zkratu a napájecím transformátorem je větší než 10% ze sousledné impedance zkratového obvodu)

[3]) Pro zkrat v blízkosti sekundární strany transformátoru (impedance mezi místem zkratu a napájecím transformátorem je do 10% sousledné impedance zkratového obvodu)

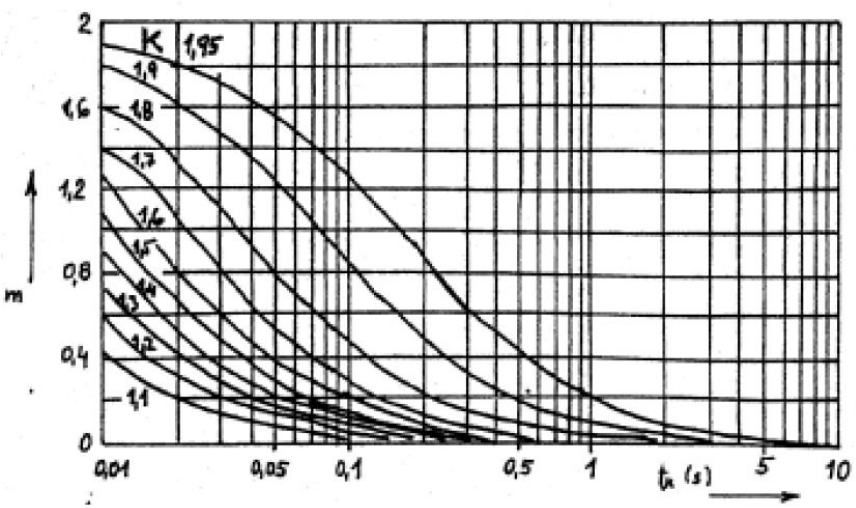
[4]) Hodnoty součinitele K ve sloupci II slouží k orientačnímu stanovení nárazového zkratového proudu v el. rozvodu s asynchronními motory. Ve vztahu pro výpočet nárazového zkratového proudu se přitom použije hodnota počátečního rázového zkratového proudu stanovená bez příspěvku asynchronních motorů.

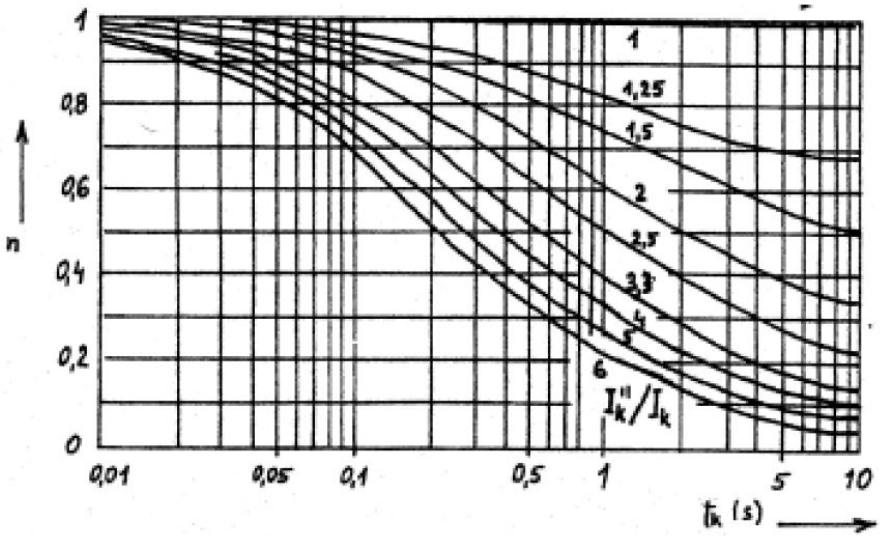
Ekvivalentní oteplovací zkratový proud

Výpočet ekvivalentního oteplovacího proudu dle normy ČSN EN 60 909-0:

$$I_{th} = I''_k . \sqrt{m+n}$$

Součinitel pro tepelné účinky ss. složky *m* a stř. složky *n* se odečtou z grafů v normě ČSN EN 60 909-0:





Ekvivalentní oteplovací zkratový proud

Poznámka:

Tabulka z již zrušené ČSN 33 3020 pro typické hodnoty součinitele

Dřívější označení $I_{th} \approx I_{ke}$, $T_k \approx t_k$, $\sqrt{m+n} \approx k_e$:

Součinitele k_e pro výpočet ekvivalentního oteplovacího proudu bez uvažování vlivu asynchronních motorů

Místo zkratu	T_a (s)	k_e pro t_k (s)								
		0,02	0,035	0,05	0,08	0,1	0,2	0,5	1,0	3,0
za alternátorem do 55 MW [1])	0,161	1,65	1,60	1,58	1,54	1,50	1,46	1,23	1,08	1,03
v soustavě [2])										
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 [2])	0,008	1,18	1,11	1,08	1,05	1,04	1,02	1,01	1,00	1,00
za transformátory [3])										
vvn/vn nebo vn/vn	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

[1]) Pro zkrat v blízkosti alternátoru nebo za blokovým transformátorem

[2]) Pro zkrat vzdálený od napájecího transformátoru i alternátoru (impedance mezi místem zkratu a napájecím transformátorem je větší než 10% ze sousledné impedance zkratového obvodu)

[3]) Pro zkrat v blízkosti sekundární strany transformátoru (impedance mezi místem zkratu a napájecím transformátorem je do 10% sousledné impedance zkratového obvodu)

Tepelné účinky zkratových proudů

Dimenzování zařízení:

Obecně je nutné dodržet štítkové hodnoty *Ithr*, *Tkr*, tj. $I_{thr} \geq I_{th} \quad T_{kr} \geq T_k$

Je-li $I_{thr} \geq I_{th}$ a $T_{kr} < T_k$, potom je možné dimenzovat $T_{kr} . \left(\frac{I_{thr}}{I_{th}} \right)^2 \geq T_k$

Poznámka:

Obrácený postup pro $T_{kr} \geq T_k$ a $I_{thr} < I_{th}$ norma nepřipouští, tj vždy $I_{thr} \geq I_{th}$

Příklad:

Třípolohový vypínač se střadačem pro "VYP" (jmenovité hodnoty)

Podle DIN VDE 0670 Díl 101 až 107 a IEC 60056				Jmenovité napětí U_r			
				7,2 kV	12 kV	17,5 kV	25 kV
Jmenovitý proud		I_r	A	250/630[1)]	250/630[1)]	250/630[1)]	250/630[1)]
Jmenovitý krátkodobý výdržný proud	pro trvání zkratu t_{th} = 1 s	I_k	kA	20	20	16	16
	pro trvání zkratu t_{th} = 3 s	I_k	kA	20	20	16	16
Jmenovitý dynamický výdržný proud		I_p	kA	50	50	40	40
Jmenovitý zkratový zapínací proud		I_{ma}	kA	50	50	40	40
Jmenovitý zkratový vypínací proud		I_{sc}	kA	20	20	16	16
Jmenovitý vypínací proud kabelu		I_c	A	50	50	50	50
Jmenovitý sled spínání		–		0 – 3 min – C0 – 3 min – C0			

I_{thr}

T_{kr}

$i_{p(zař.)}$

I_b

Poznámka:

dále musí být (v souvislosti se zkraty) splněno:

$$i_{p(zař.)} \geq i_p$$

$$I_b \geq I''_k$$

Tepelné účinky zkratových proudů

Dimenzování holých vodičů:

Obecný předpoklad: krátká doba zkratu T_k, adiabatický děj

$$\boxed{S_{thr} \geq S_{th} \cdot \sqrt{\frac{T_{kr}}{T_k}} = \frac{I_{th}}{A} \cdot \sqrt{\frac{T_{kr}}{T_k}}}$$

$$S_{thr} = \sqrt{\frac{\kappa_{20} . c . \rho}{\alpha_{20}} . \ln\left(\frac{1+\alpha_{20}.(\theta_e - 20°C)}{1+\alpha_{20}.(\theta_b - 20°C)}\right)}$$

kde:

S_{thr} Hustota jmenovitého krátkodobého proudu pro dobu tvrvání zkratu $T_{kr} = 1$ s

S_{th} Hustota krátkodobého proudu

θ_b Počáteční teplota vodiče

A Průřez vodiče

θ_e Konečná teplota vodiče

	měď	hliník, slitina hliníku, AlFe vodiče	ocel
c [J.kg^{-1}.°C^{-1}]	390	910	480
ρ [kg.m^{-3}]	8900	2700	7850
κ_{20} [Ω^{-1}.m^{-1}]	56.10^6	34,8.10^6	7,25.10^6
α_{20} [°C^{-1}]	0,0039	0,004	0,0045

Poznámka:

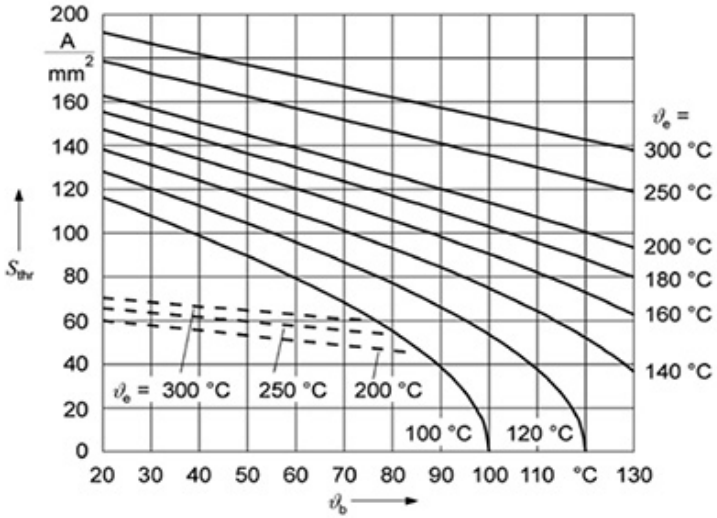
Může platit také pro $T_{kr} \geq T_k$ a $S_{thr} < S_{th}$ (narozdíl od zařízení)

Tepelné účinky zkratových proudů

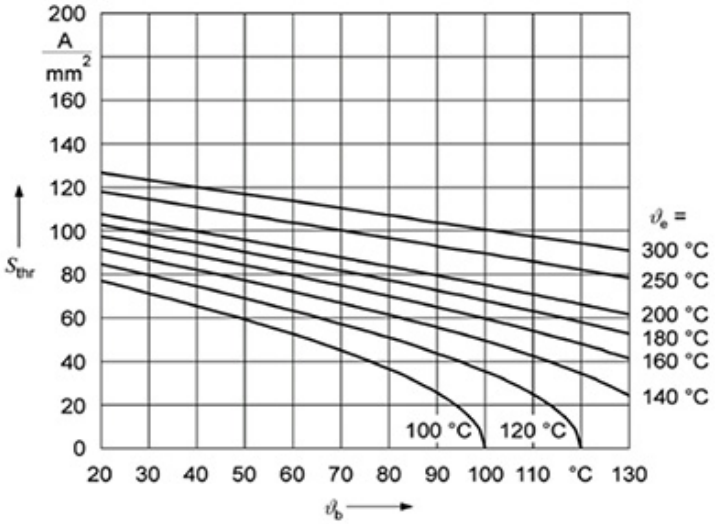
- za počáteční teplotu se volí nejvyšší provozní teplota
- za konečnou teplotu se doporučuje zvolit:

Typ vodiče	Maximální doporučená teplota při zkratu
Holé vodiče, kompaktní nebo splétané: Cu, Al, nebo Al slitiny	200 °C
Holé vodiče, kompaktní nebo splétané: ocel	300 °C

Diagramy $S_{thr}\left(\theta_b, \theta_e\right)$ pro hliník, měď a ocel



Obr. 2a Plné čáry, měď; čárkované čáry, nízkolegovaná ocel



Obr. 2b Hliník, slitina hliníku, hliníkový vodič s ocelovým jádrem (ALFe)

<u>Poznámka:</u>

Kromě toho musí průřez vodiče současně vyhovět i pro **silové účinky, úbytek napětí**, **provozní tvalé (ev. krátkodobé) proudy, funkci ochran** popř. kritériím **hospodárného průřezu**

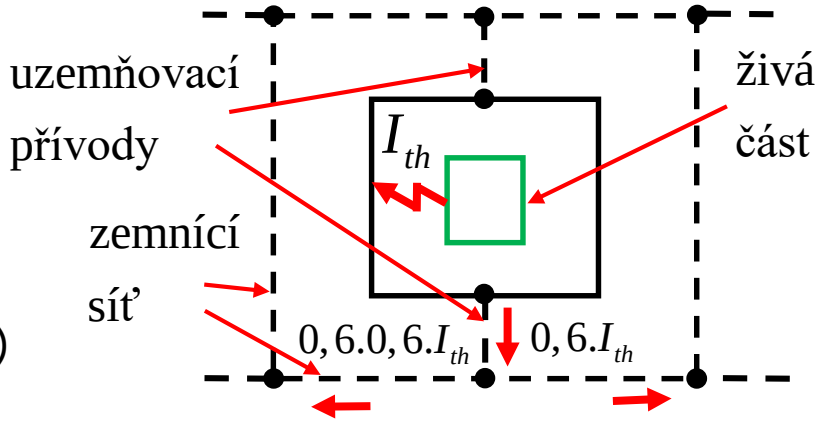
Účinky zkratových proudů na uzemnění

Tepelné účinky na uzemňovací přívody a zemnící soustavu (síť):

a) Pro poruchy kratší než 5 s

Výpočet je identický jako pro holé vodiče

Pro dva paralelní uzemňovací přívody popř. rozdělení proudu ze svodu do mřížové sítě se doporučuje volit faktor nerovnoměrného rozdělení 0,6 (viz. obrázek)



Poznámka:

Podle ČSN EN 50 522 se poč. teplota volí 20°C a konečná 300°C, v tabulce je uvedena zatížitelnost pásků FeZn pro a konečnou teplotu 300°C:

t [s]	Dovolený proud [A]		
	30x4 mm	40x4 mm	20x5 mm
0,1	26700	35600	22200
0,2	18900	25200	15700
0,3	15400	20500	12800
0,4	13300	17800	11100
0,5	11900	15900	9960
0,6	10900	14500	9090
0,7	10100	13400	8420
0,8	9450	12600	7870
0,9	8910	11800	7420
1	8450	11200	7040

Účinky zkratových proudů na uzemnění

b) Pro poruchy delší než 5 s

- Odečítá se z tabulek ČSN EN 50 522

Trvalé zatížení FeZn pásků pro konečnou teplotu 300°C

Profil	Dovolený trvalý proud [A]
pásek 30x4	420
pásek 40x4	540
pásek 20x5	330
Drát průměr 10 mm	220

Přepočítání trvalého zatížení pro jinou konečnou teplotu

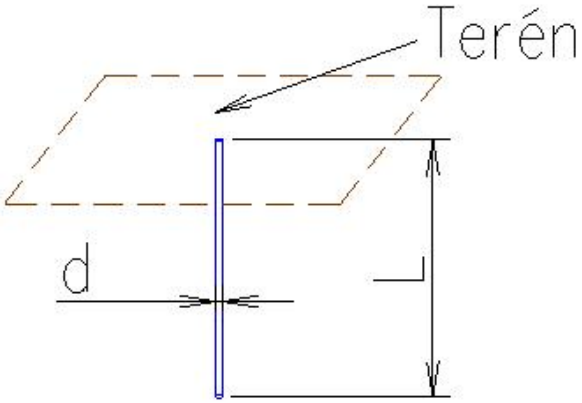
Konečná teplota ve °C	Přepočítací činitel
400	1,2
350	1,1
300	1,0
250	0,9
200	0,8
150	0,7
100	0,6

Uzemnění a dotykové napětí

Se zkratovým proudem souvisí i <u>dimenzování uzemnění:</u>

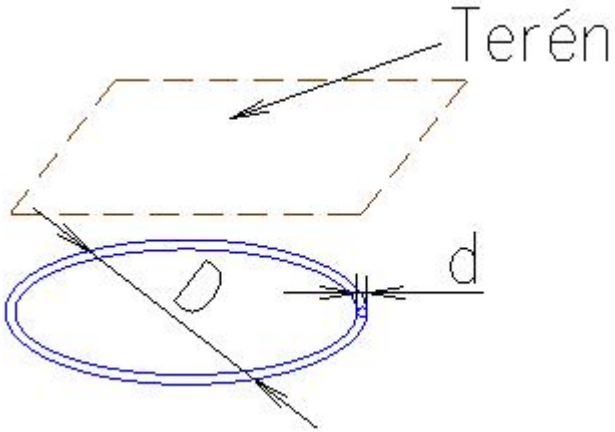
I. Výpočet odporu uzemnění:

a) Tyčový zemnič



$$R_E = \frac{\rho_E}{2.\pi.L}.\ln\frac{4.L}{d}$$

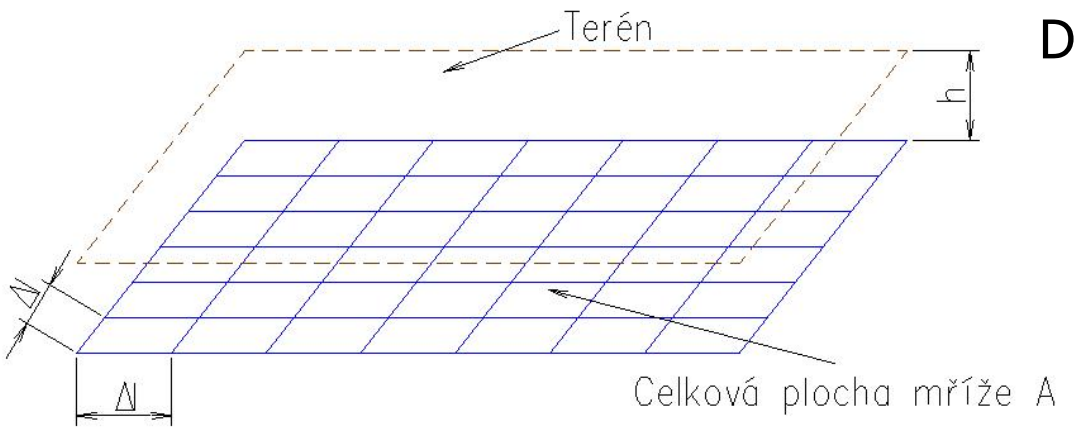
b) Kruhový zemnič



$$R_E = \frac{\rho_E}{\pi^2.D}.\ln\frac{2.\pi.D}{d}$$

Uzemnění a dotykové napětí

c) Mřížová síť



Dle platné ČSN EN 50 522:

$$R_E = \frac{\rho_E}{2.D} = \frac{\rho_E}{4}\sqrt{\frac{\pi}{A}}$$

(Dwightův vztah)

Dříve používaný vzorec (ČSN 33 2050) a používaný std. IEEE (Laurent-Niemahnův vztah):

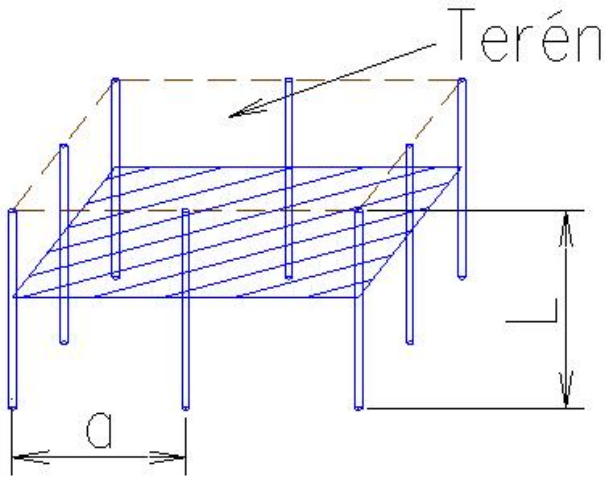
$$R_E = \rho_E \cdot \left[\frac{1}{4}\sqrt{\frac{\pi}{A}} + \frac{1}{L}\right] \cong \rho_E \cdot \left[\frac{1}{4}\sqrt{\frac{\pi}{A}} + \frac{1}{2.\left(N+\sqrt{N}\right).\Delta l}\right]$$

Přesnější vztah:

$$R_E = \rho_E \cdot \left[\frac{1}{4}\sqrt{\frac{\pi}{A}} + \frac{1}{2.N.\Delta l}\left(\frac{1}{\sqrt{2}.\pi}\ln\frac{0{,}165.\Delta l.\sqrt{\pi}}{2.\sqrt{S_{FeZn}}}\right)\right]\left(1-1{,}128.\frac{2.h}{\sqrt{A}}\right)$$

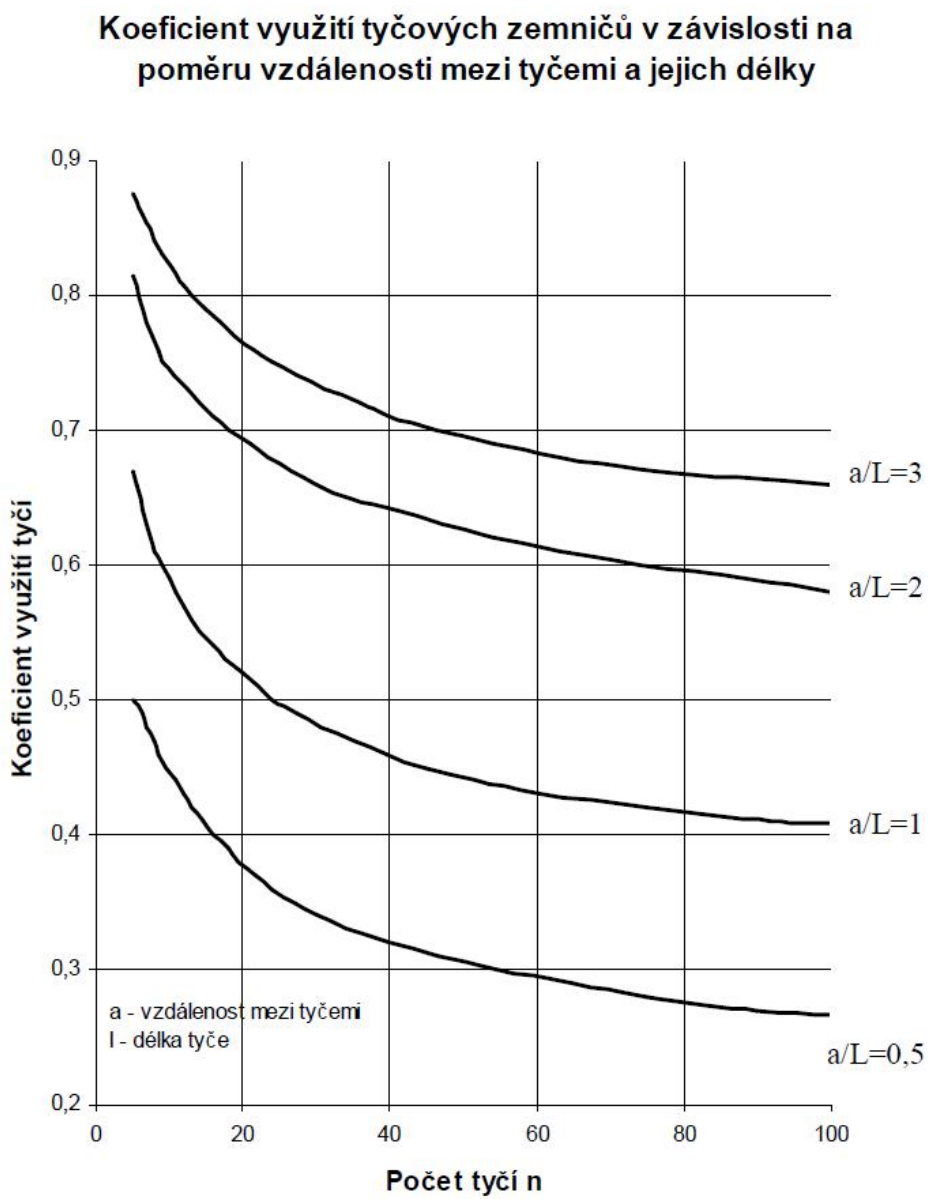
Uzemnění a dotykové napětí

d) Kombinace mřížová síť + tyč



Dle PNE 33 0000-4:

$$R_E = \frac{1}{\frac{1}{R_{E1}} + \frac{\eta_{E2}.n}{R_{E2}}} \cdot \frac{1}{0,9}$$



Uzemnění a dotykové napětí

II. Dotykové napětí a napětí na uzemnění

Napětí na uzemnění U_E je napětí mezi daným bodem a referenční zemí v místě zkratu a při hodnotě zkratového proudu.

$$U_E = R_E . I_E$$

kde I_E je zemní proud

Síť TT s nízkohmovým uzemněním uzlu $I_E = r . I''_{k1}$

Síť IT s uzemněním přes tlumivku $I_E = r . \sqrt{I_{\mathrm{Res}}^2 + I_L^2}$

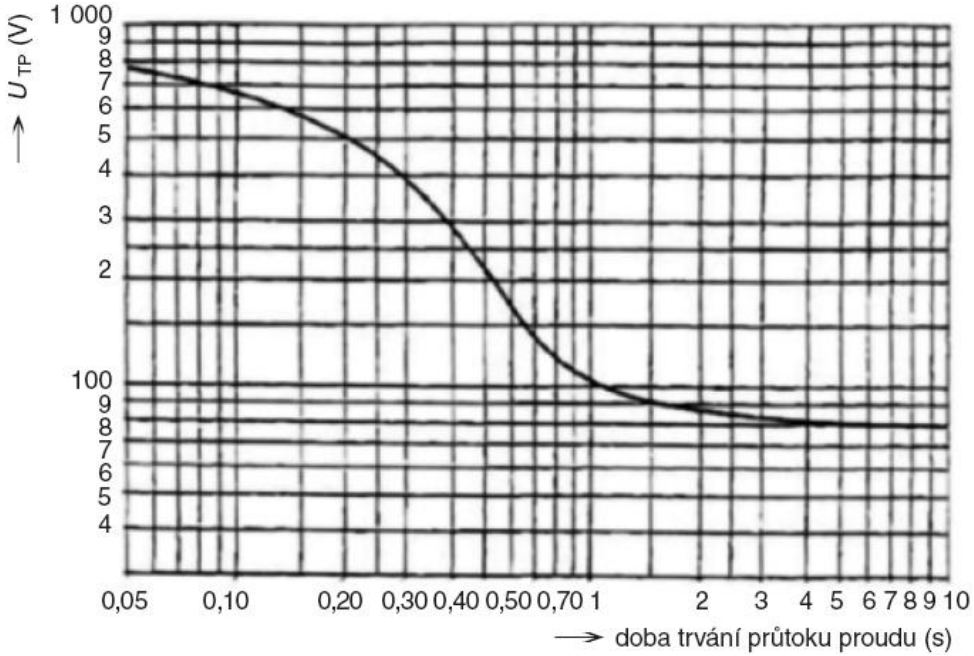
Síť IT(r) s uzemněním přes odpor $I_E = r . I_{\mathrm{Res}}$

zbytkový proud zemního spojení, nejvýše 10% I_C

r je redukční činitel respektující odvedení části zkratového proudu nebo proudu zemního spojení zemními lany nebo přes stínění kabelů

Uzemnění a dotykové napětí

Dotykové napětí U_{Tp} je napětí mezi vodivými částmi, kterých se člověk nebo zvíře dotýká. Velikost skutečného dotykového napětí může významně ovlivnit impedance těla člověka nebo zvířete při elektrickém dotyku s těmito vodivými částmi



Provozovna s napětím nad 1 kV AC:

$$U_E \leq 2.U_{Tp}$$

Není-li splněno:

$$U_E \leq 4.U_{Tp}$$

+ je třeba zrealizovat zvláštní opatření podle ČSN EN 61936-1, (asfaltový pás, ekvipotenciální práh atd.)

Je zapotřebí dodržet dostatečnou vzdálenost uzemnění provozovny od uzemnění jiných objektů napájených z veřej. sítě (min. 20 m)!

Silové účinky – tuhé vodiče

Pro dimenzování musí být dodrženo:

a) ohybové napětí vodiče

b) ohybové síly na podpěrku

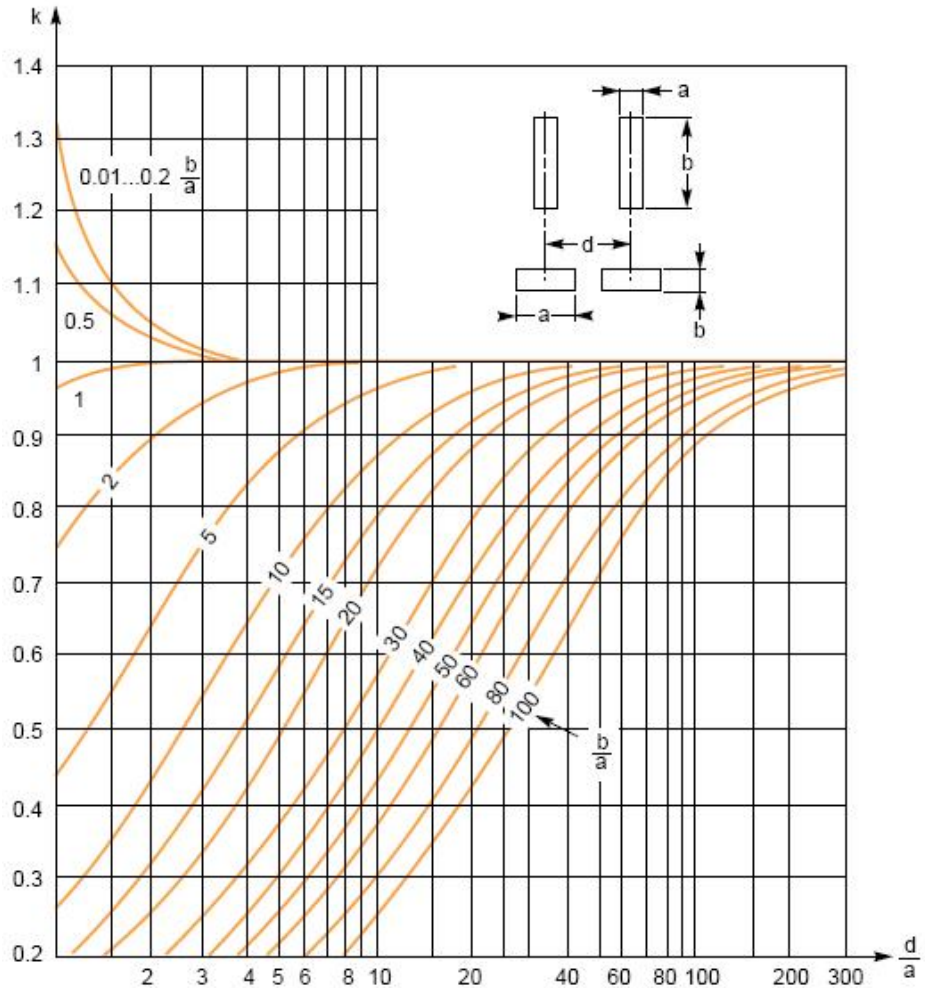
Síla na střední vodič:

$$F_{m3} = \frac{\mu_0}{2.\pi} \cdot \frac{\sqrt{3}}{2} . i_{p3}^2 . \frac{l}{d_m}$$

účinná vzdálenost

$$d_m = \frac{d}{k}$$

Pro vodiče obdélníkového průřezu:
(IEC 865-1 / ČSN EN 60865-1)



Silové účinky – tuhé vodiče

a) Ohybové napětí vodiče:

$$\sigma_m = \frac{M_o}{Z} = V_\sigma . V_r . \beta . \frac{F_{m3} . l}{8 . Z}$$

Poměr mezi dyn. a stat. namáháním vodiče: V_σ

dtto při neúspěšném OZ: V_r

Koeficient respektující uchycení podpěrky: β

Modul ohybu v průřezu:

$$Z = \frac{I}{\frac{b}{2}}$$

Musí být splněno:

$$\boxed{\sigma_m < q . \sigma_{0,2}}$$

Moment setrvačnosti:

$$I = \int_S r^2 . dS$$

Pro obdélníkový vodič:

$$I = \frac{a . b^3}{12}$$

Pro kruhový vodič:

$$I = \frac{\pi}{4} r^4$$

Pro trubkový vodič:

$$I = \frac{\pi}{4} \left(r_1^4 - r_2^4 \right)$$

Mez průtažnosti vodiče:

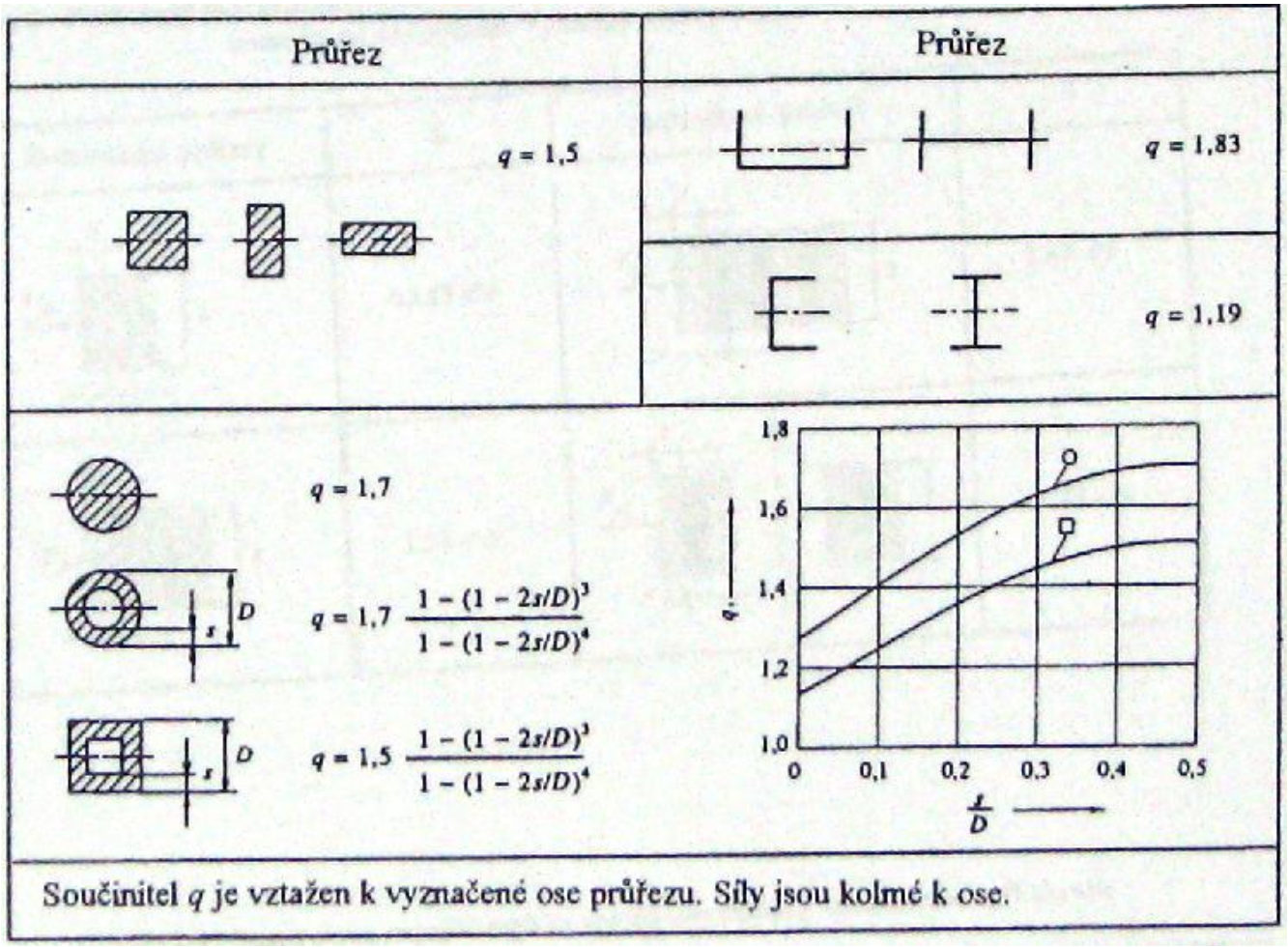
Udává, při jakém σ dojde k prodloužení o 0,2%

$\sigma_{0,2\,AlMgSi} = 120 - 180$ MPa $\quad \sigma_{0,2\,Cu} = 80$ MPa

q - koeficient respektující tvar průřezu.

Silové účinky – tuhé vodiče

Součinitel *q*



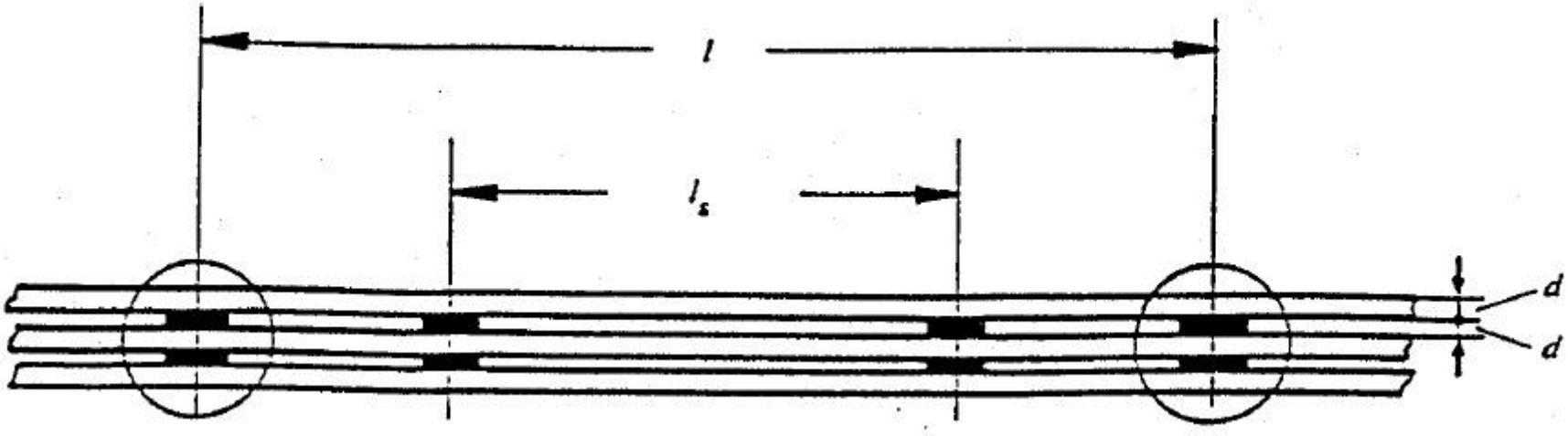
Silové účinky – tuhé vodiče

Je-li vodičů na fázi více, pak se připočítají ještě síly těchto vodičů vzájemně:

$$F_s = \frac{\mu_0}{2.\pi} \cdot \left(\frac{i_{p3}}{n} \right)^2 \cdot \frac{l_s}{d_{ms}} \qquad \sigma_s = V_\sigma . V_r . \beta . \frac{F_s . l_s}{8.Z} \qquad \sigma_{tot} = \sigma_m + \sigma_s$$

Musí být splněno:

$$\boxed{\sigma_{tot} < q.\sigma_{0,2}}$$



Silové účinky – tuhé vodiče

b) Ohybové síly na podpěrku

Síla působící na podpěrku:

$$F_D = V_F . V_r . \alpha . F_{m3}$$

Poměr mezi dyn. a stat. silou na vodič: V_F

$$V_F = \min\ 1; \frac{0,8.\sigma_{0,2}}{\sigma_{tot}}; \max\ 2,7$$

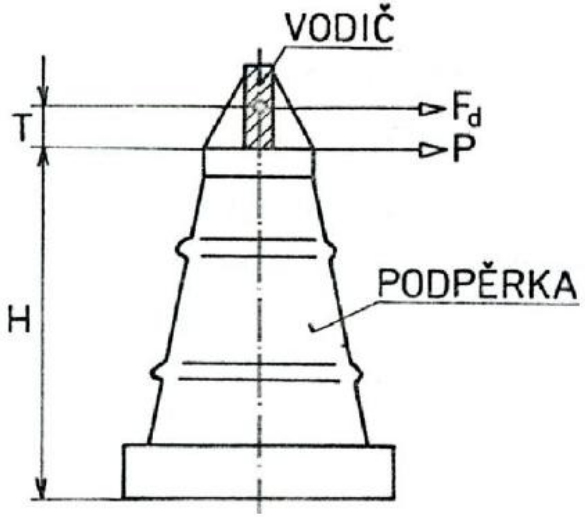
dtto při neúspěšném OZ: V_r

Koeficient respektující vetknutí podpěrky: α

Musí být splněno:

$$\boxed{F_D < F_d = 0,8.P.\frac{H}{H+T}}$$

Kde P je mechanická pevnost podpěrky



Silové účinky – tuhé vodiče

Součinitele V_F, V_r, V_σ:

Pozn.:

Pro přesnější výpočty se tyto součinitele určí z vlastního kmitočtu hlavního vodiče:

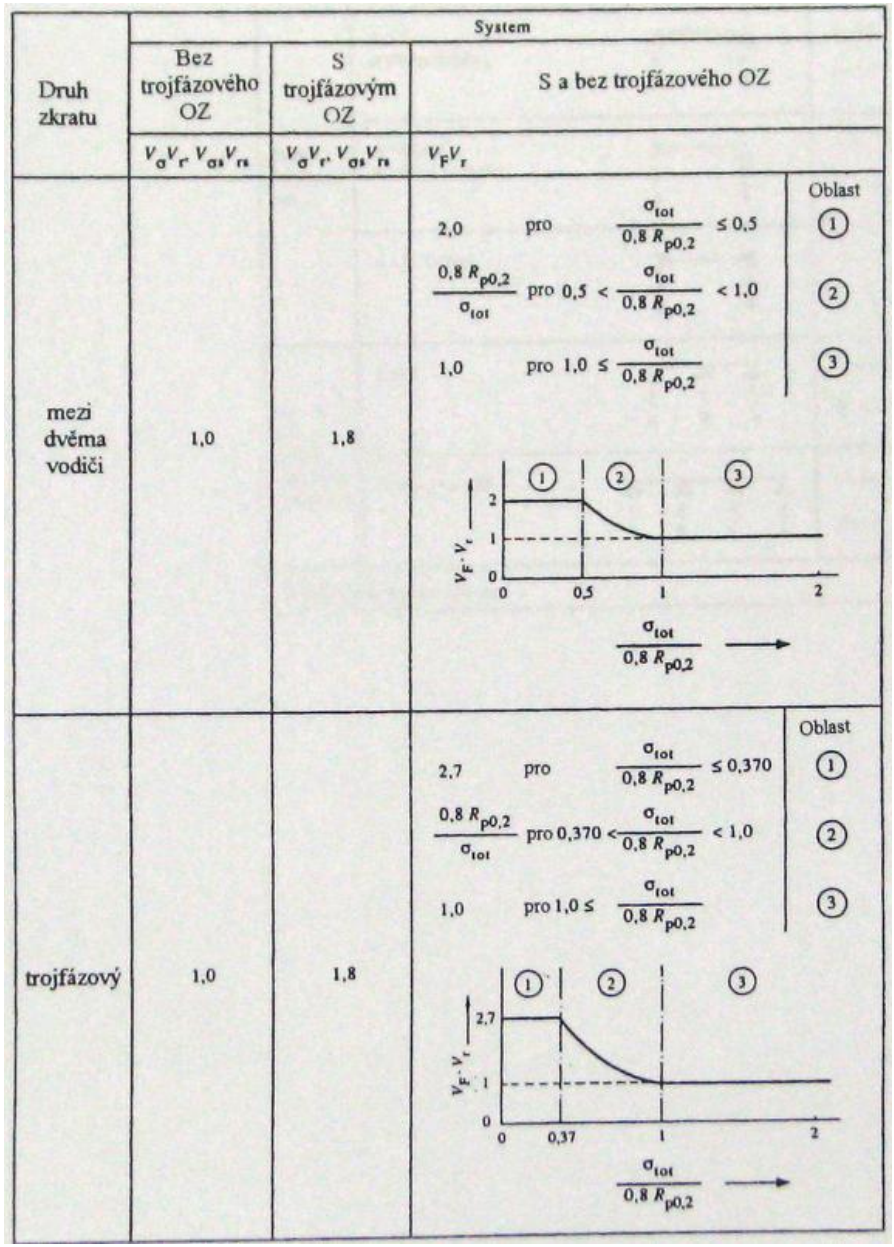
$$f_c = \frac{\gamma}{l^2} \cdot \sqrt{\frac{E.I}{m'}}$$

γ Součinitel (plasticita vodiče)

E Modul pružnosti

m' Hmotnost na jednotku délky

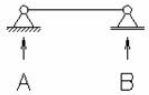
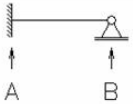
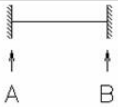
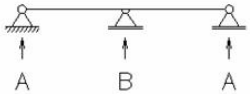
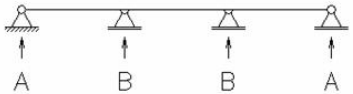
Pozn.: Vodič se prakticky chová stejně, je-li vlastní rezonance za 10xf sítě. Nejhorší výsledky dává cca 1-2xf sítě / mezi podpěrkami se musí volit tak, aby se vodič nedostal do oblasti rezonance



Druh zkratu	System: Bez trojfázového OZ	System: S trojfázovým OZ	System: S a bez trojfázového OZ	Oblast
	$V_\sigma V_r, V_{\sigma s} V_{rs}$	$V_\sigma V_r, V_{\sigma s} V_{rs}$	$V_F V_r$	
mezi dvěma vodiči	1,0	1,8	$2{,}0$ pro $\frac{\sigma_{tot}}{0{,}8\,R_{p0,2}} \le 0{,}5$	1
			$\frac{0{,}8\,R_{p0,2}}{\sigma_{tot}}$ pro $0{,}5 < \frac{\sigma_{tot}}{0{,}8\,R_{p0,2}} < 1{,}0$	2
			$1{,}0$ pro $1{,}0 \le \frac{\sigma_{tot}}{0{,}8\,R_{p0,2}}$	3
trojfázový	1,0	1,8	$2{,}7$ pro $\frac{\sigma_{tot}}{0{,}8\,R_{p0,2}} \le 0{,}370$	1
			$\frac{0{,}8\,R_{p0,2}}{\sigma_{tot}}$ pro $0{,}370 < \frac{\sigma_{tot}}{0{,}8\,R_{p0,2}} < 1{,}0$	2
			$1{,}0$ pro $1{,}0 \le \frac{\sigma_{tot}}{0{,}8\,R_{p0,2}}$	3

Silové účinky – tuhé vodiče

Součinitele α, β, γ :

Typ nosníku a způsob upevnění			Typ			
nosník o jednom poli	A a B prosté podepření		A	$\alpha_A = 0,5$ $\alpha_B = 0,5$	$\beta = 1$	$\gamma = 1,57$
	A : vetknutí B : prosté podepření		B	$\alpha_A = 0,625$ $\alpha_B = 0,375$	$\beta = 0,73$	$\gamma = 2,45$
	A a B vetknutí		C	$\alpha_A = 0,5$ $\alpha_B = 0,5$	$\beta = 0,5$	$\gamma = 3,56$
nosník o více polích o stejných rozpětích	2 pole		D	$\alpha_A = 0,375$ $\alpha_B = 1,25$	$\beta = 0,73$	$\gamma = 2,45$
	3 nebo více polí		E	$\alpha_A = 0,4$ $\alpha_B = 1,1$	$\beta = 0,73$	$\gamma = 3,56$

Silové účinky – ohebné vodiče

Silové účinky na volně zavěšené vodiče:

Vychází se ze síly na jednotku délky:

$$F_{/l} = \frac{\mu_0}{2.\pi} \cdot \frac{3}{4} \cdot \frac{I''^2_{k3}}{d_m} \cdot \frac{l_c}{l}$$

Podrobnější výpočet dále viz. IEC 865-1

Kontroluje se:

- Tahová síla/napětí při zkratu F_t
- Tahová síla/napětí po zkratu F_f
- Minimální vzdušná vzdálenost při rozkmitu vodičů $a_{\min}$
- Maximální horizontální výchylka (průhyb) b_h
- Kontrakce svazku u svazkových vodičů

Glosa k 4. přednášce

Volba sklonu vodiče:

Příklad:

Vodiče trojfázového systému 10,5 kV jsou tvořeny pasovými vodiči Al 63x10 mm (jeden na fázi), rozpětí mezi podpěrkami je 1m a fázová rozteč je 0,5m. Rozhodněte, kterou podpěrku zvolíte a zda vodič mechanicky vyhoví jestliže budou pasy umístěny:

1) Naležato
2) Nastojato

Namontovaná svorka přidá v obou případech k těžišti pasu 3 cm

Počet podpěrek: 5

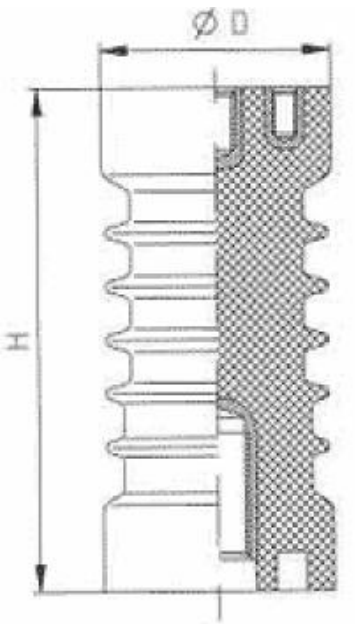
Uvažujte pro jednoduchost:

$$d_m = 0,5 \text{ m} \quad \sigma_{0,2} = 120 \text{ MPa}$$

$$I''_{k3} = 25 \text{ kA} \quad \kappa = 1,7$$ (pouze trojpólový zkrat bez OZ)

Glosa k 4. přednášce

Na výběr jsou podpěrky:



	Přeskokové rázové napětí [kV]	Povrchová dráha [mm]	Pevnost v ohybu [kN]	Výška H [mm]	Průměr D [mm]
1.	75	174	5	130	60
2.	75	187	10	130	72
3.	75	195	16	130	90