Elektrárny
A1M15ENY

přednáška č. 4

Jan Špetlík

spetlij@fel.cvut.cz - v předmětu emailu „ENY"

Katedra elektroenergetiky, Fakulta elektrotechniky ČVUT, Technická 2, 166 27 Praha 6

Výpočty parametrů:

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

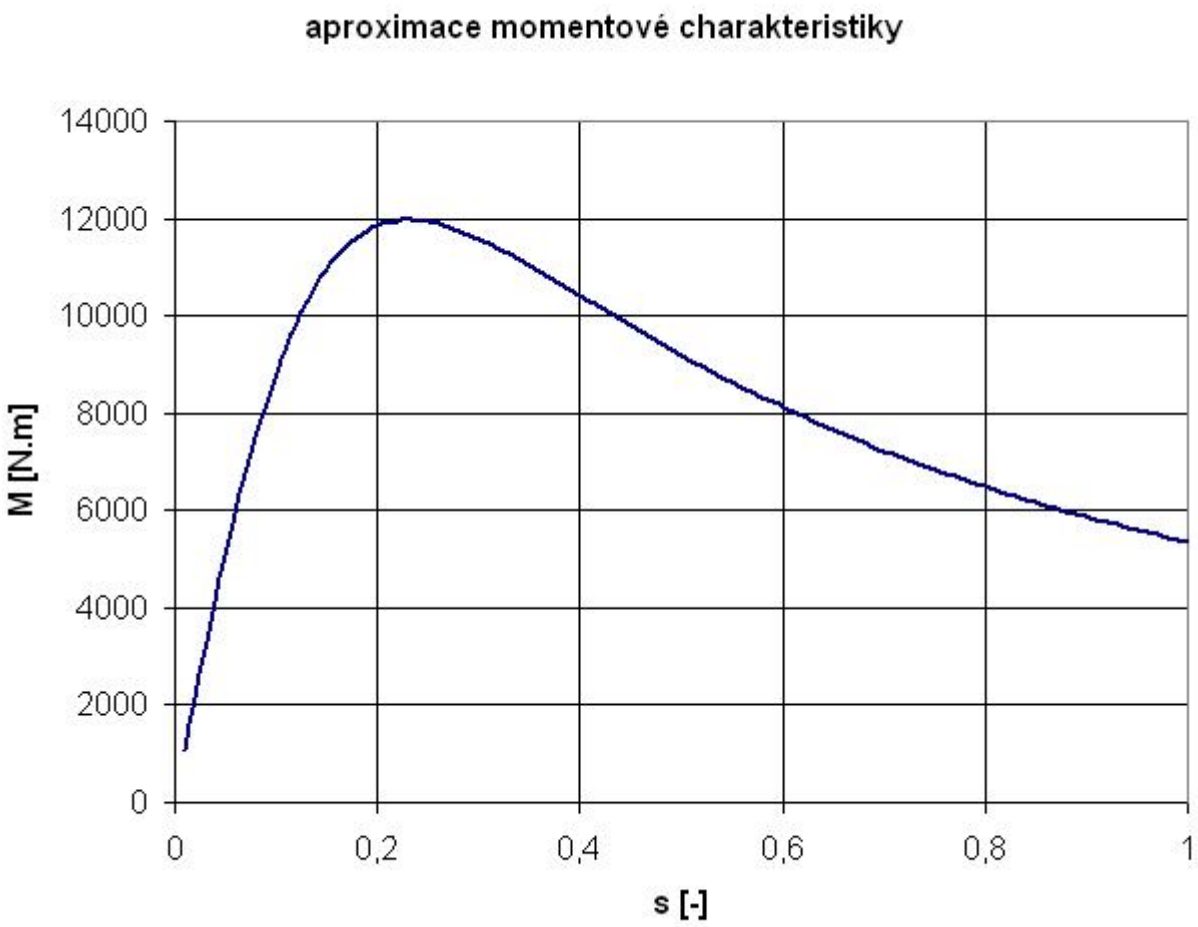
$$R_s = \frac{234,5+\vartheta}{234,5+\vartheta_0}.R_{s20} = \frac{234,5+80}{234,5+20}.R_{s20} = 0,178\ \Omega$$

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

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

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

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



Zkratové poměry ve VS

Zkratové proudy se počítají dle normy ČSN EN 60 909-0 nebo podle PNE 33 3042

Silové účinky zkratových proudů se počítají dle normy ČSN EN 60 909-1 nebo podle PNE 33 3041

<u>Terminologie:</u>

I''_{k3} Trojfázový rázový symetrický zkratový proud

I''_{k1} Jednofázový rázový symetrický zkratový proud

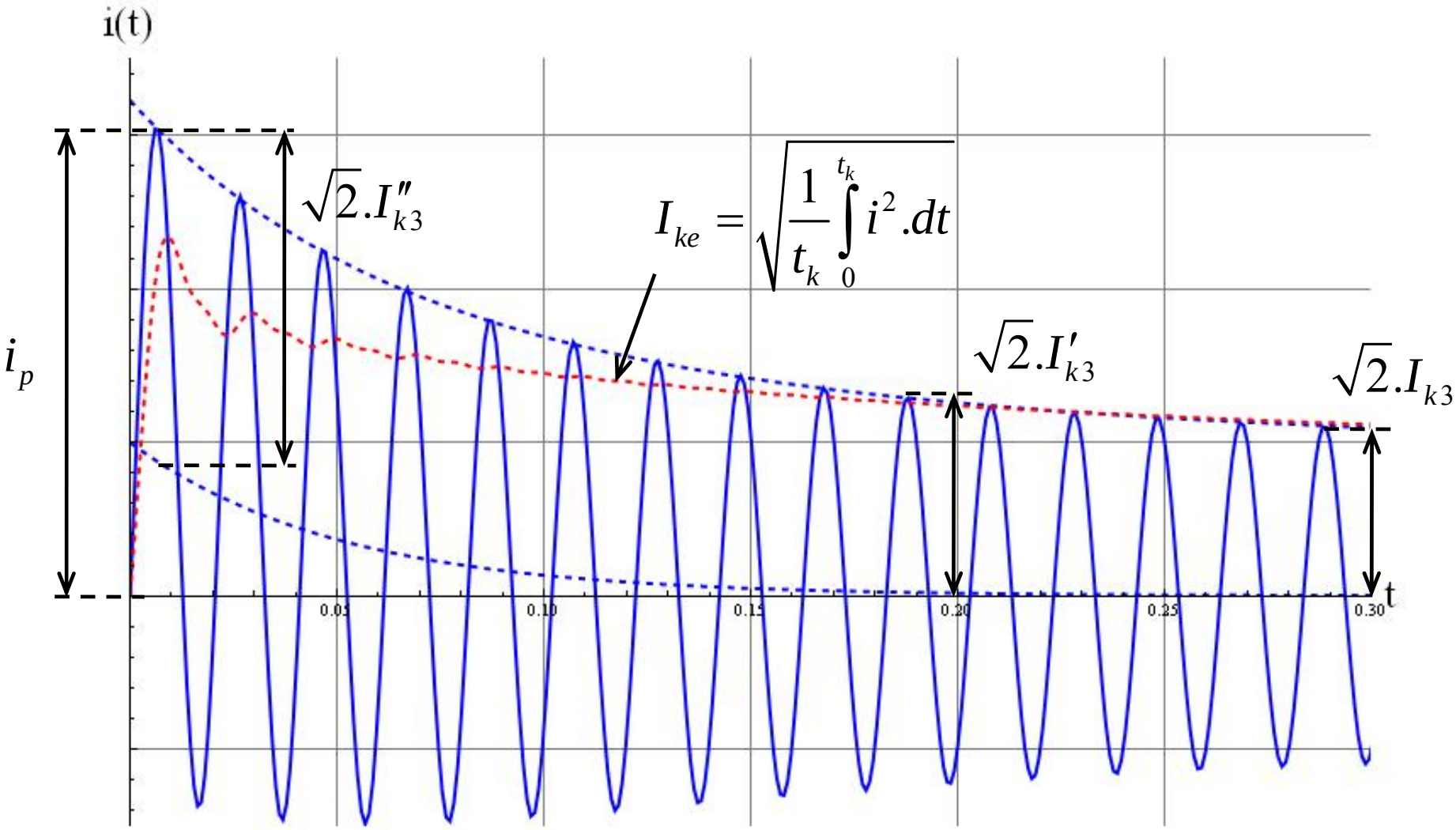
I'_{k3} Trojfázový přechodný zkratový proud

I_{k3} Trojfázový ustálený zkratový proud

i_p Nárazový proud

I_{ke} Ekvivalentní oteplovací proud

Druhy zkratových proudů



Druhy zkratových proudů

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

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

Tabulka pro součinitel κ z již zrušené ČSN 33 3020:

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.

Druhy zkratových proudů

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

$$I_{ke} = k_e . I''_k \qquad k_e = \sqrt{m+n}$$

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

Tabulka pro součinitel k_e z již zrušené ČSN 33 3020:

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)

Druhy zkratových proudů

Místo zkratu	k_e pro t_k [s]								
	0,02	0,035	0,05	0,08	0,1	0,2	0,5	1	3
v soustavě vn pro $M \leq 0{,}2$	1,40	1,25	1,18	1,12	1,10	1,05	1,02	1,01	1,00
pro $M > 0{,}2$	1,50	1,30	1,20	1,10	1,06	1,00	0,90	0,87	0,85
v kabel. rozvodu nn pro $M \leq 0{,}1$	1,18	1,11	1,08	1,05	1,04	1,02	1,01	1,00	1,00
pro $M > 0{,}1$	1,24	1,09	1,04	1,02	1,00	0,96	0,93	0,92	0,90
za trafy vn/vn, vvn/vn pro $M \leq 0{,}2$	1,43	1,33	1,26	1,19	1,16	1,09	1,04	1,02	1,01
pro $M > 0{,}2$	1,55	1,37	1,28	1,17	1,12	1,01	0,92	0,88	0,85
za transform. vn/nn									
do 250 kVA pro $M \leq 0{,}1$	1,20	1,12	1,08	1,05	1,04	1,02	1,01	1,00	1,00
pro $M > 0{,}1$	1,25	1,10	1,06	1,02	1,00	0,96	0,93	0,92	0,91
do 630 kVA pro $M \leq 0{,}1$	1,26	1,18	1,13	1,09	1,07	1,04	1,02	1,01	1,00
pro $M > 0{,}1$	1,32	1,17	1,11	1,05	1,03	0,98	0,94	0,93	0,92
do 1600 kVA pro $M \leq 0{,}1$	1,30	1,22	1,17	1,12	1,10	1,05	1,02	1,01	1,00
pro $M > 0{,}1$	1,35	1,20	1,15	1,08	1,05	0,99	0,95	0,93	0,92

Pozn.: $M = (I_k'' - I_{k\ \text{bez M}}'') / I_{k\ \text{bez M}}''$

Tepelné účinky

Správné dimenzování průřezu:

$$S \geq \frac{I_{ke} \cdot \sqrt{t_k}}{K_\vartheta}$$

$$K_\vartheta = \sqrt{\frac{(\vartheta_F + 20).c_{V20}}{\rho_{20}} . \ln \frac{\vartheta_F + \vartheta_K}{\vartheta_F + \vartheta_1}}$$

Veličina	Význam	Dosazovaná velikost
ϑ_F	Fiktivní teplota vodiče - teplotní rozdíl potřebný s změně měrného odporu vodiče o jeden Ω	Cu – 234,5 °C / Ω Al – 228,0 °C / Ω Fe – 222,0 °C / Ω
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

Materiál	$c_{V0}\,[J/cm^3 \cdot K]$ $[J/mm^2 \cdot m \cdot K]$	$\rho_{20}\,[\mu \cdot \Omega \cdot m]$ $[\Omega \cdot mm^2/m]$
Cu	3.500	0.0179
Al	2.417	0.0294
Fe	3.770	0.1430

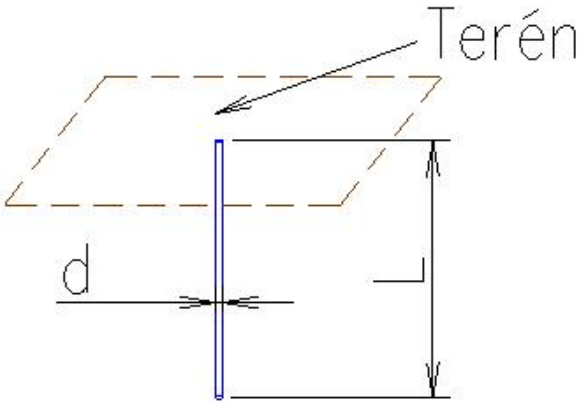
Pozor! Průřez musí dále vyhovět i na úbytek napětí, provozní proudy popř. hospodárnosti

Uzemnění a dotykové napětí

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

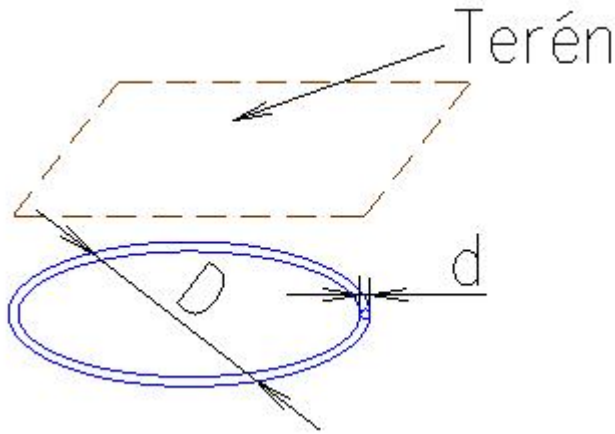
I. Výpočet odporu uzemnění:

a) Tyčový zemnič



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

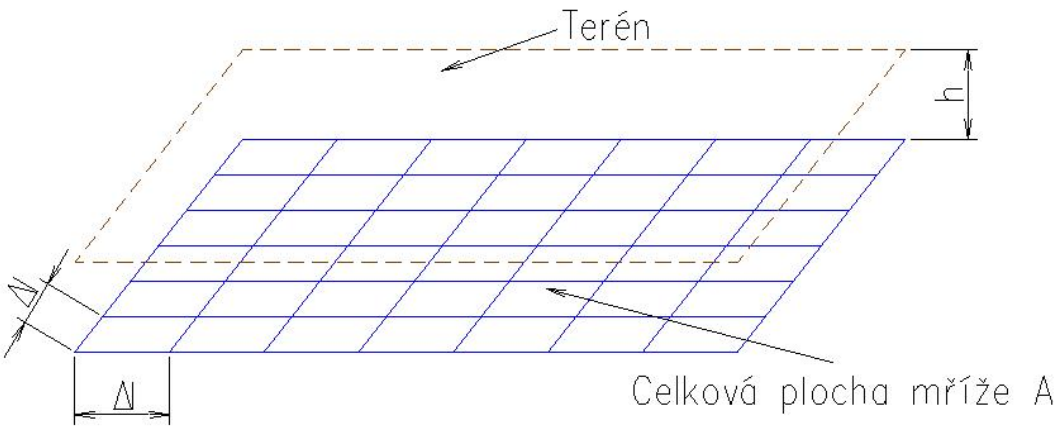
b) Kruhový zemnič



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

Uzemnění a dotykové napětí

c) Mřížová síť



Dle platné ČSN 33 3201:

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

(Dwightův vztah)

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

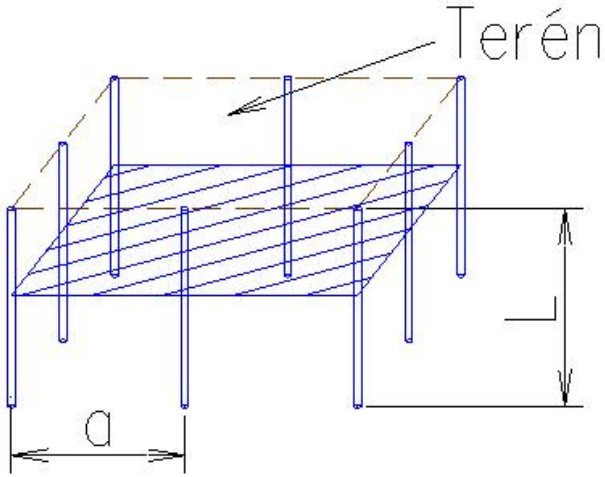
$$R_E = \rho_E \cdot \left[\frac{1}{4}\sqrt{\frac{\pi}{A}} + \frac{1}{L}\right] \cong \rho_E \cdot \left[\frac{1}{4}\sqrt{\frac{\pi}{A}} + \frac{1}{2.\left(N + \sqrt{N}\right).\Delta l}\right]$$

Přesnější vztah:

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

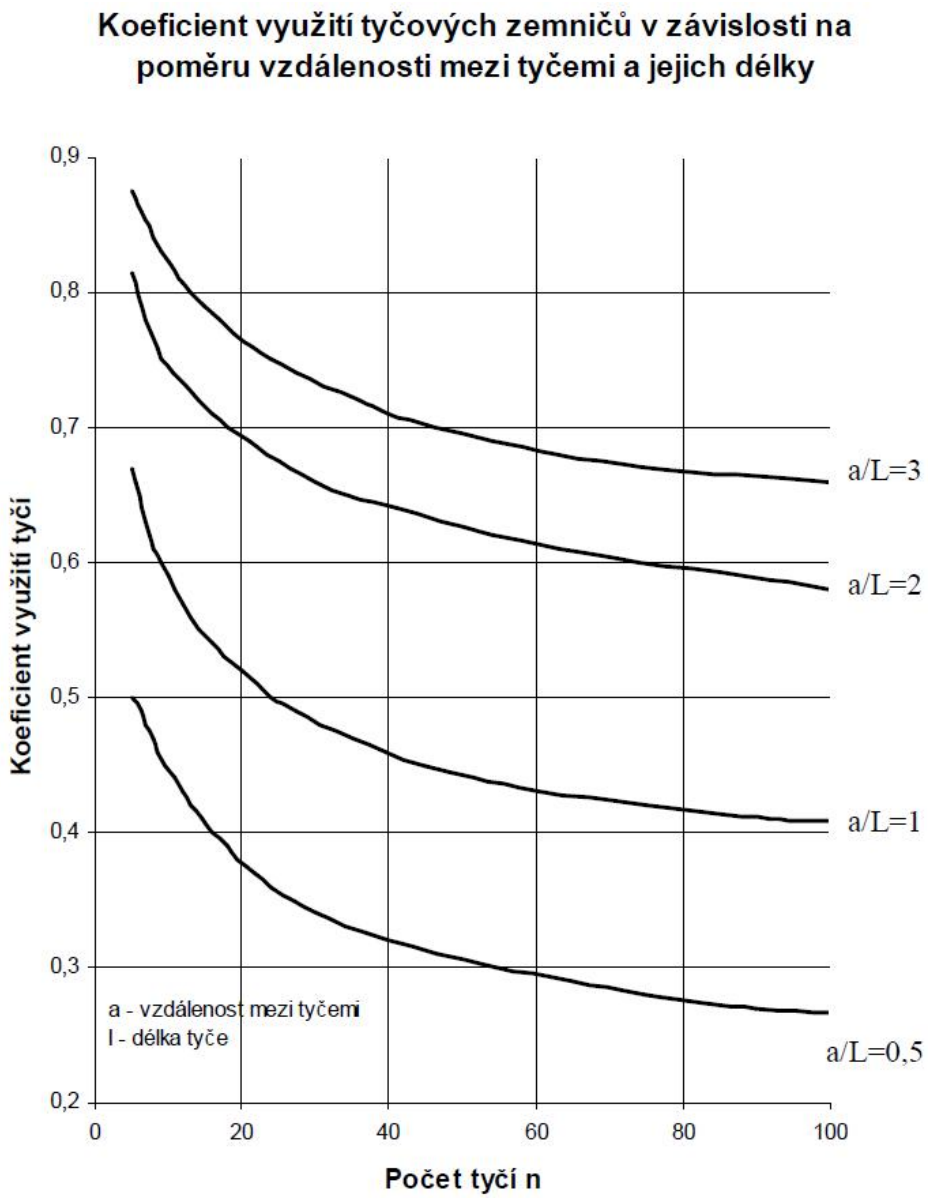
Uzemnění a dotykové napětí

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. Proudová zatížitelnost uzemňovacího přívodu a zemniče

a) Pro poruchy kratší než 5 s

$$S_{\min} = \frac{I_{ke}}{K} \cdot \sqrt{\frac{t_k}{\ln \frac{\vartheta_K + \vartheta_F}{\vartheta_1 + \vartheta_F}}}$$

Materiál	β	K
Al	228	148
Cu	234,5	226
Fe	202	78

Pozn. Podle ČSN 33 2201 se poč. teplota volí 20°C a konečná 300°C

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

Uzemnění a dotykové napětí

b) Pro poruchy delší než 5 s

- Odečítá se z tabulek ČSN 33 3201, příl. C

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

III. 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 $I_E = r . \sqrt{I_{\mathrm{Res}}^2 + I_L^2}$

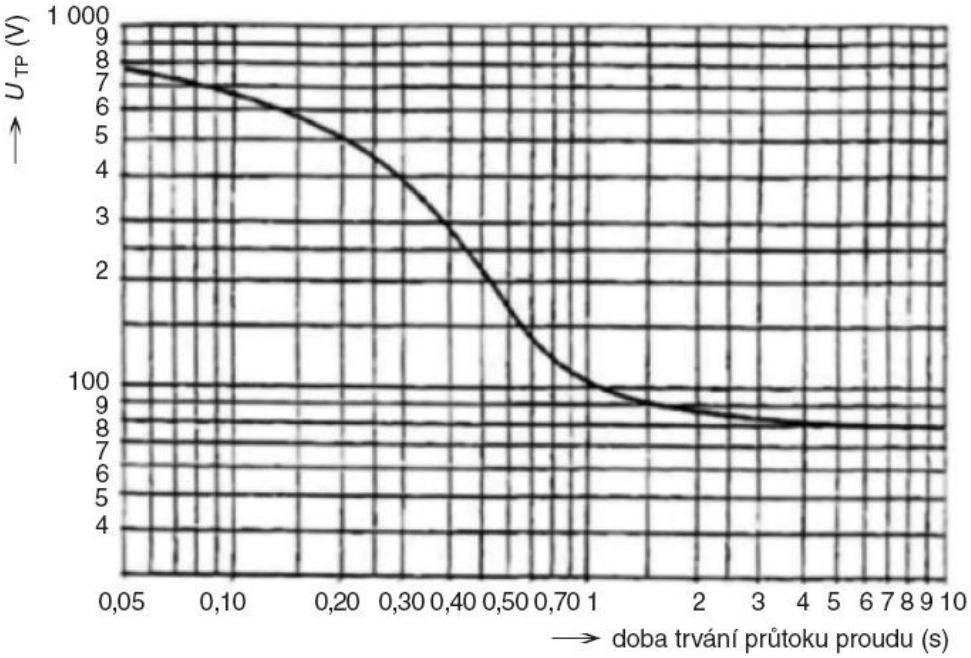
Síť IT(r) s uzemněním přes odpor $I_E = r . I_{\mathrm{Res}}$

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 333201, příl M (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

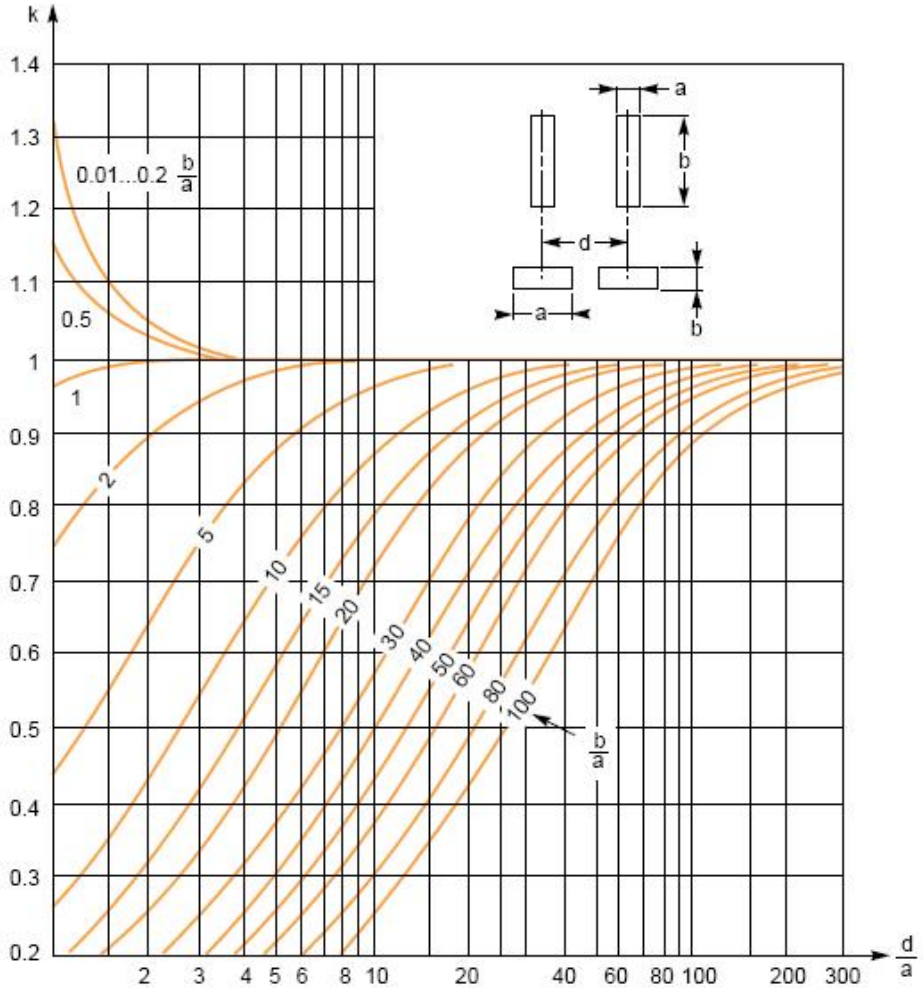
Síla na střední vodič:

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

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:

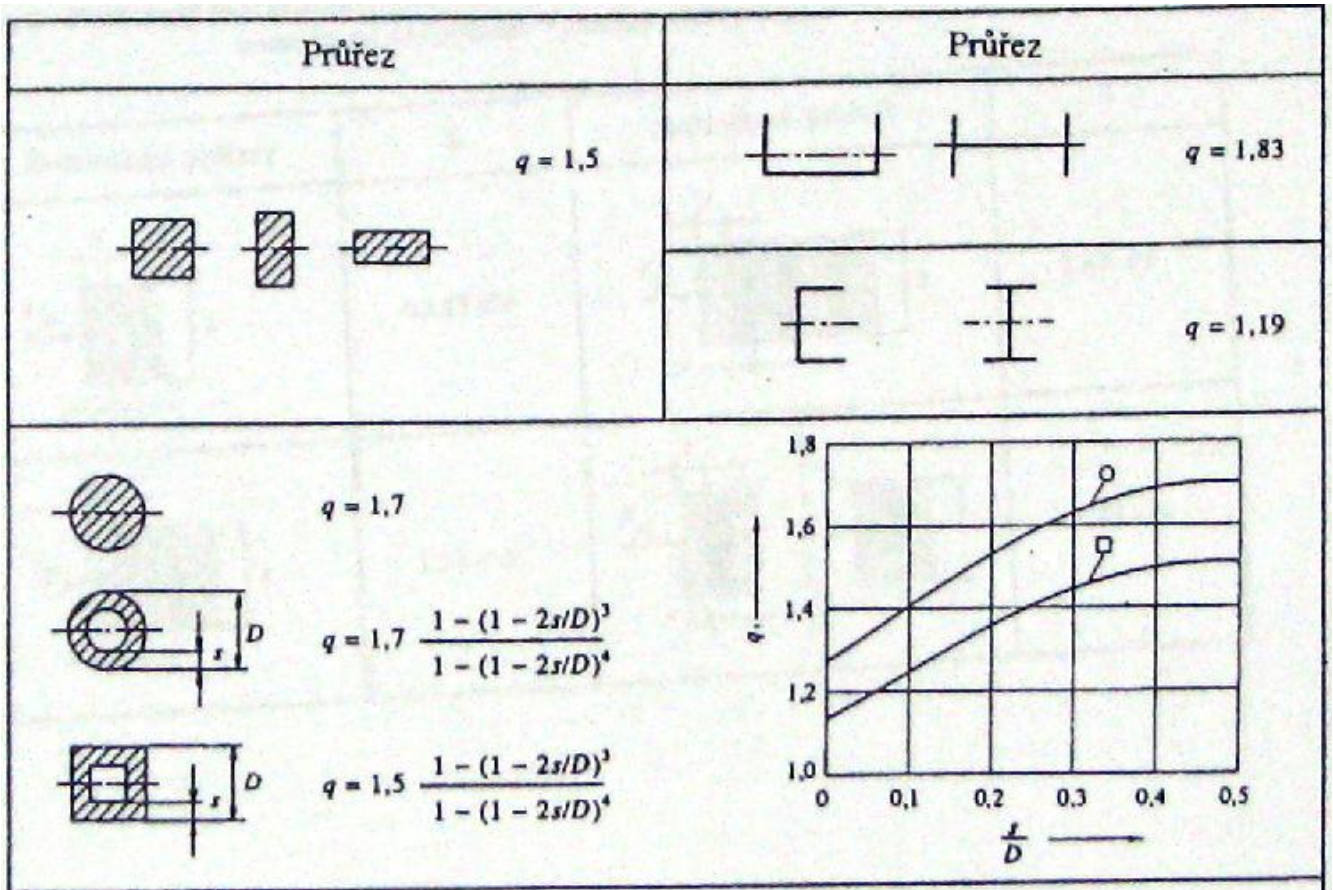
Udává, při jakém σ dojde k prodloužení o 0,2%

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

q - koeficient respektující tvar průřezu.

Silové účinky – tuhé vodiče

Součinitel *q*



Součinitel *q* je vztažen k vyznačené ose průřezu. Síly jsou kolmé k ose.

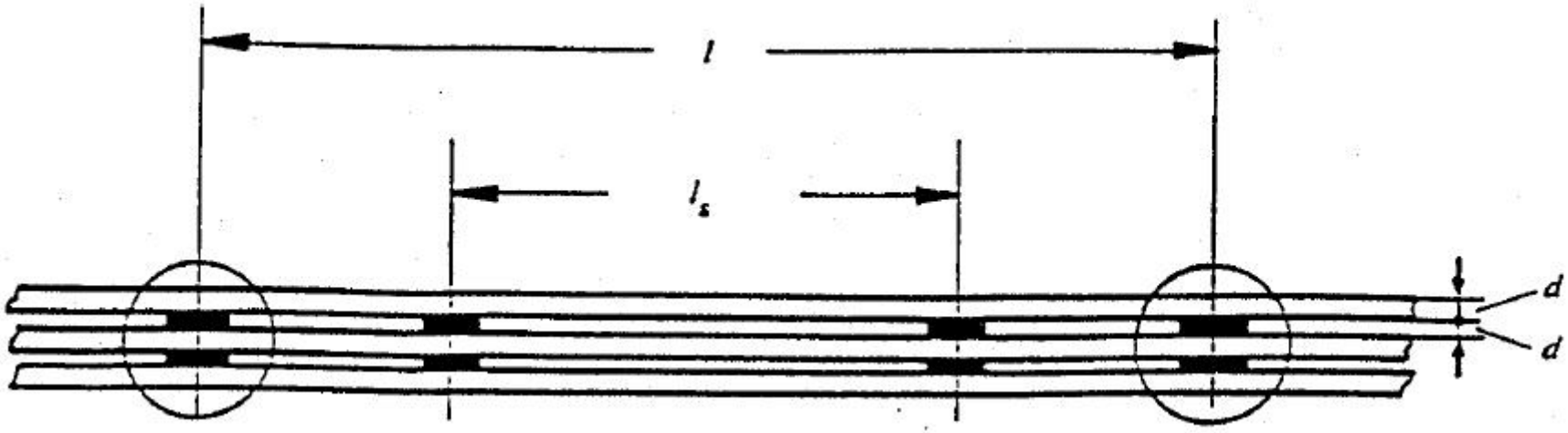
Silové účinky – tuhé vodiče

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

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

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

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

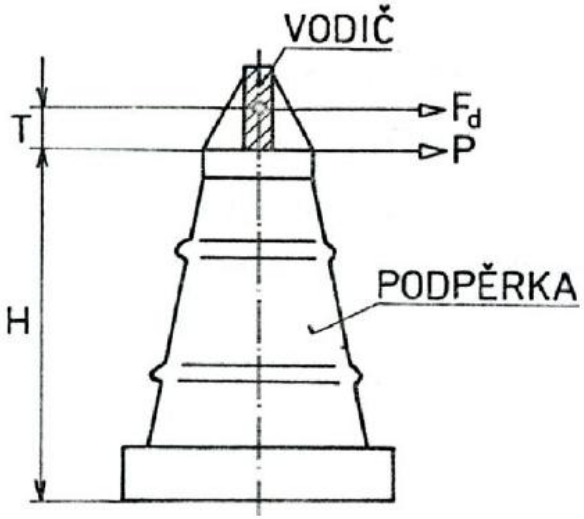
dtto při neúspěšném OZ: V_r

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:

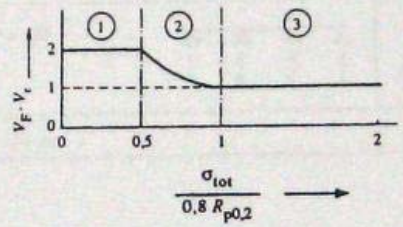
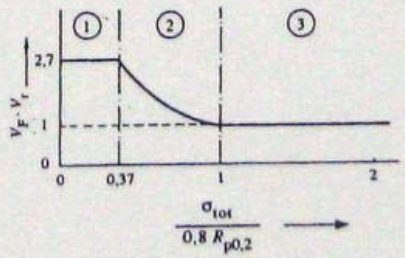
$$f_c = \frac{\gamma}{l^2} \cdot \sqrt{\frac{E.I}{m'}}$$

γ Součinitel (plasticita vodiče)

E Modul pružnosti

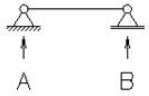
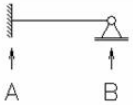
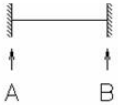
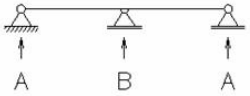
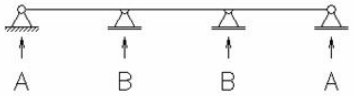
m' Hmotnost na jednotku délky

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

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 2 cm

Počet podpěrek: 5

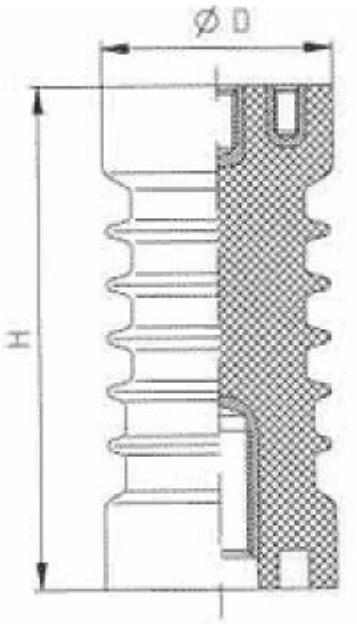
Uvažujte pro jednoduchost:

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

$$I''_{k3} = 25 \text{ kA} \quad \kappa = 1,7$$ (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