

ČEZDistribuce, E.ON Distribuce, E.ON CZ., ČEPS PREdistribuce, ZSE	ZKRATOVÉ PROUDY – VÝPOČET ÚČINKŮ – ČÁST 2: PŘÍKLADY VÝPOČTŮ	PNE 33 3041 druhé vydání
<p>Odsouhlasení normy</p> <p>Konečný návrh podnikové normy energetiky pro rozvod elektrické energie odsouhlasily tyto organizace: ČEPS, a.s., ČEZDistribuce, a.s., E.ON Česká republika, s.r.o., E.ON Distribuce, a.s., PREdistribuce, a.s., ZSE, a.s.</p> <p>Porovnání s předchozím vydáním</p> <ul style="list-style-type: none"> - Aktualizace souvisících norem - Přepočítání příkladů na nové návrhové požadavky podle IEC 60865-1 Ed. 3 - Doplnění variant výpočtu - Celkové vyhodnocení u příkladu 		
	Norma nahrazuje vydání PNE 33 3041 z 1.4.1997	Účinnost: od 1.1.2012

PŘEDMLUVA

Citované a související normy ČSN

ČSN EN 60909 – 0 Zkratové proudy v trojfázových střídavých soustavách – Výpočet proudů (33 3022)

STN EN 60909-0 Skratové prúdy v trojfázových striedavých sústavách. Časť 0: Výpočet prúdov

ČSN EN 60 865 – 1 Zkratové proudy – Výpočet účinků (33 3040)

STN EN 60865-1 Skratové prúdy. Výpočet účinkov. Časť 1: Definície a výpočtové metódy

ČSN 33 3201 Elektrické instalace nad AC 1kV

STN 33 3201 Elektrické inštalácie so striedavým napätím nad 1 kV

ČSN EN 61936-1 Elektrické instalace nad AC 1kV – Část 1: Všeobecná pravidla (33 3201)

STN EN 61936-1 Silnoprúdové inštalácie na striedavé napätia prevyšujúce 1 kV. Časť 1: Spoločné pravidlá

Návrh technické normy IEC 60865-1 Ed. 3 (IEC 73/152/CDV)

Zpracovatel: Ing. Jan Špetlík, Ph.D.

Pracovník oborové normalizace: Jaroslav Bárta, ÚJV Řež, a.s. divize
Energoprojekt Praha

Obsah

PŘEDMLUVA.....	2
Obsah	3
Předmět normy a rozsah platnosti.....	5
Normativní odkazy.....	5
Značky a jednotky.....	5
Příklad 1 – Mechanické účinky na zařízení 10 kV s jednoduchými tuhými vodiči.....	6
1. Vstupní údaje	6
2. Vrcholová síla mezi hlavními vodiči při trojfázovém zkratu	7
3. Namáhání vodiče a síly na podpěry	7
3.1.1. Zjednodušená metoda	7
3.1.2. Podrobná metoda.....	9
4. Vyhodnocení	10
Příklad 2 – Mechanické účinky na zařízení 10 kV s vícenásobnými tuhými vodiči	11
1. Vstupní údaje (změny oproti variantě A předchozího příkladu).....	11
2. Vrcholová síla mezi hlavními vodiči při trojfázovém zkratu	12
3. Vrcholová síla mezi souběžnými dílčími vodiči (maximální síla na vnější dílčí vodič)	12
4. Namáhání vodiče a síly na podpěry	12
4.1.1. Zjednodušená metoda	13
4.1.2. Podrobná metoda.....	14
5. Vyhodnocení	16
Příklad 3 – Mechanické účinky na zařízení 110 kV s trubkovými vodiči	17
1. Vstupní údaje	18
2. Vrcholová síla mezi hlavními vodiči při trojfázovém zkratu	19
3. Namáhání vodiče a síly na podpěry	19
3.1.1. Zjednodušená metoda	19
3.1.2. Podrobná metoda.....	22
4. Vyhodnocení	24
Příklad 4 – Mechanické účinky se zavěšenými vodiči bez izolačních závěsů zařízení 110 kV	25
1. Vstupní údaje	26
2. Výpočet tahových sil během a po zkratu	27
3. Výpočet minimální vzdušné vzdálenosti	31
4. Vyhodnocení	32
Příklad 5 – Mechanické účinky na lanové vodiče s izolačními závěsy zařízení 220 kV.....	33
1. Vstupní údaje	33
2. Výpočet tahových sil během a po zkratu	34
3. Výpočet minimální vzdušné vzdálenosti	38
4. Výpočet kontrakční síly svazku	39
5. Vyhodnocení	42
Příklad 6 – Mechanické účinky na lanové vodiče s izolačními závěsy zařízení 420 kV.....	44
1. Vstupní údaje	44
2. Výpočet tahových sil během a po zkratu	46
3. Výpočet minimální vzdušné vzdálenosti	49
4. Výpočet kontrakční síly svazku	50
5. Vyhodnocení	53
6. Cilivostní analýza úlohy.....	54
Příklad 7 – Tepelné účinky zkratového proudu na holé vodiče systému 22 kV	55
1. Vstupní údaje	55

2. Výpočty.....	55
3. Vyhodnocení.....	57

Předmět normy a rozsah platnosti

Účelem této normy je ukázat praktické použití postupů podle ČSN EN 60865-1 a zpřesňujícího návrhu normy IEC 73/152/CDV pro výpočet mechanických a tepelných účinků způsobených zkratovými proudy. Tato podniková norma je dodatkem k ČSN EN 60865-1 a nemění normalizované postupy v ČSN EN 60865-1.

Normativní odkazy

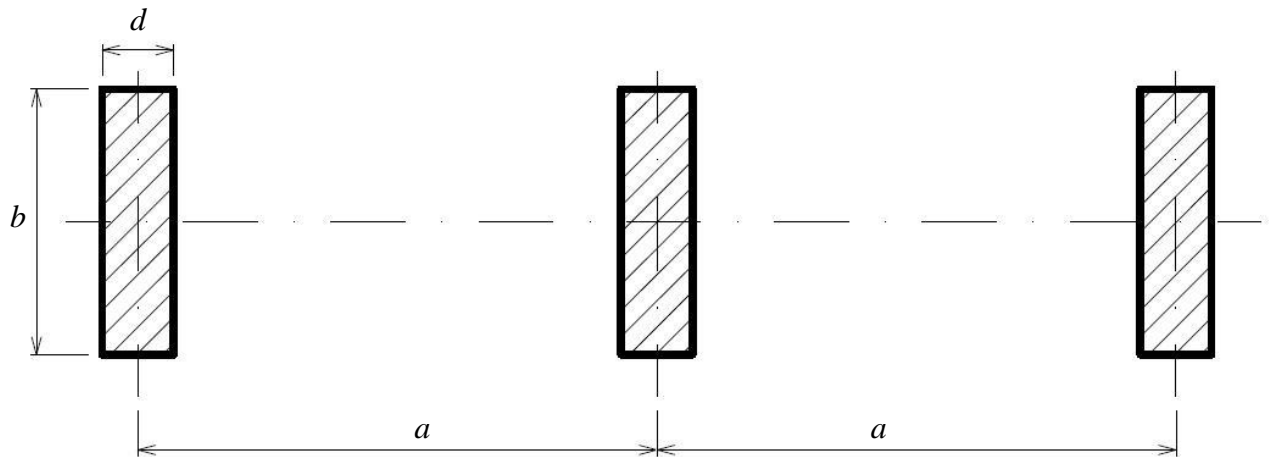
ČSN EN 60865-1: květen 2002, Zkratové proudy – Výpočet účinků. Část 1: Definice a výpočetní metody

Značky a jednotky

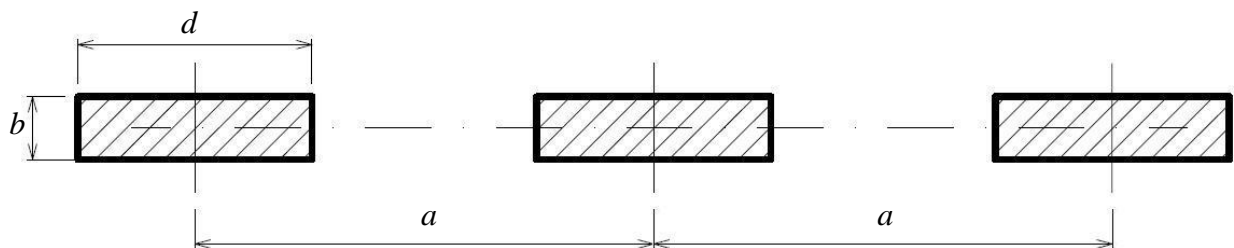
Význam značek a jednotek je uveden v ČSN EN 60865-1.

Příklad 1 – Mechanické účinky na zařízení 10 kV s jednoduchými tuhými vodiči

Výpočet je proveden pro dvě varianty uspořádání trojfázové přípojnice systému 10 kV s jedním vodičem na fázi. Vodiče tvoří spojitý nosníky s prostým podepřením o stejném rozpětí. Uspořádání vodičů je ukázáno na obrázcích 1 a 2.



obrázek 1: Uspořádání vodičů (varianta A)



obrázek 2: Uspořádání vodičů (varianta B)

1. Vstupní údaje

System:

Nejvyšší provozovací napětí	12 kV
Jmenovité napětí sítě	10 kV
Jmenovitý kmitočet	50 Hz
Jmenovitá výdržná napětí	75/28 kV
Jmenovitý zkratový proud	$I_{k3} = 16 \text{ kA (1 sec)}$
Jmenovitý nárazový proud	$i_{p3} = 40 \text{ kA}$
Min. vzdušná vzdálenost	210 mm
Trojpolový OZ:	ne

Propojení:

Počet rozpětí:	>3
Vzdálenost mezi podpěrkami	$l = 1 \text{ m}$
Fázová vzdálenost mezi vodiči	$a = 0,35 \text{ m}$

Vodič:

Pasové vodiče Al 63x10mm, materiál E-Al 99,5

Hmotnost na jednotku délky: $m' = 1,62 \text{ kg/m}$ Modul pružnosti v tahu: $E = 70 \text{ GPa}$ Min. mez průtažnosti: $R_{p0,2} = 40 \text{ MPa}$ Max. mez průtažnosti: $R'_{p0,2} = 80 \text{ MPa}$ **Varianta A (obrázek 1):**Uložení „nastojato“ $b = 0,063 \text{ m}, d = 0,010 \text{ m}$ **Varianta B (obrázek 2):**Uložení „naležato“ $b = 0,010 \text{ m}, d = 0,063 \text{ m}$ **2. Vrcholová síla mezi hlavními vodiči při trojfázovém zkratu**Součinitel k_{12} :

Podle ČSN EN 60 865-1, Obrázek 1

Varianta A: poměr $b/d = 6,3$, poměr $a/d = 35$ $k_{12} = 0,9948$ Varianta B: poměr $b/d = 0,16$, poměr $a/d = 5,56$ $k_{12} = 1,0053$ Účinná vzdálenost mezi vodiči:Varianta A: $a_m = \frac{a}{k_{12}} = \frac{0,35}{0,9948} = 0,3518 \text{ m}$ Varianta B: $a_m = \frac{a}{k_{12}} = \frac{0,35}{1,0053} = 0,3482 \text{ m}$ Síly mezi vodiči:Varianta A: $F_{m3} = \frac{\mu_0}{2\pi} \cdot \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot i_{p3}^2 \cdot \frac{l}{a_m} = \frac{4\pi \cdot 10^{-7}}{2\pi} \cdot \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot 40^2 \cdot 10^6 \cdot \frac{1}{0,3518} = 787,7 \text{ N}$ Varianta B: $F_{m3} = \frac{4\pi \cdot 10^{-7}}{2\pi} \cdot \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot 40^2 \cdot 10^6 \cdot \frac{1}{0,3482} = 796 \text{ N}$ **3. Namáhání vodiče a síly na podpěry**

Výpočet může být proveden podle následujících článků 4.3.1. a 4.3.2.

3.1.1. Zjednodušená metodaMoment setrvačnosti:Varianta A: $J = \frac{b \cdot d^3}{12} = \frac{0,063 \cdot 0,01^3}{12} = 5,25 \cdot 10^{-9} \text{ m}^4$ Varianta B: $J = \frac{0,01 \cdot 0,063^3}{12} = 2,084 \cdot 10^{-7} \text{ m}^4$

Průřezový modul:

$$\text{Varianta A: } Z = \frac{J}{\frac{d}{2}} = \frac{b \cdot d^2}{6} = \frac{5,25 \cdot 10^{-9}}{\frac{0,01}{2}} = 1,05 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3$$

$$\text{Varianta B: } Z = \frac{2,084 \cdot 10^{-7}}{\frac{0,063}{2}} = 6,615 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3$$

Ohybové napětí vodiče:

$$V_\sigma \cdot V_r = 1 \quad \text{podle ČSN EN 60 865-1, tabulka 2}$$

$$\beta = 0,73 \quad \text{podle ČSN EN 60 865-1, tabulka 3}$$

$$\text{Varianta A: } \sigma_{tot} = \sigma_m = V_\sigma \cdot V_r \cdot \beta \cdot \frac{F_{m3} \cdot l}{8 \cdot Z} = 1,0,73 \cdot \frac{787,7 \cdot 1}{8 \cdot 1,05 \cdot 10^{-6}} = 68,45 \text{ MPa}$$

$$\text{Varianta B: } \sigma_{tot} = \sigma_m = 1,0,73 \cdot \frac{796,1}{8 \cdot 6,615 \cdot 10^{-6}} = 10,98 \text{ MPa}$$

Přípojnice jsou odolné vůči zkratové síle, jestliže

$$\sigma_{tot} \leq q \cdot R_{p0,2}$$

s minimální hodnotou $R_{p0,2}$. Pro obdélníkový průřez $q = 1,5$, viz. ČSN EN 60 865-1, tabulka 4. Tedy $q \cdot R_{p0,2} = 1,5 \cdot 40 \text{ MPa} = 60 \text{ MPa}$.

$$\text{Varianta A: } \sigma_{tot} = \sigma_m = 68,45 \text{ MPa} > 60 \text{ MPa} \quad \textbf{nevyhovuje}$$

$$\text{Varianta B: } \sigma_{tot} = \sigma_m = 10,98 \text{ MPa} \leq 60 \text{ MPa} \quad \textbf{vyhovuje}$$

Ohybové síly na podpěrky:

Dynamická síla F_d se vypočítá podle vztahu:

$$F_d = V_F \cdot V_r \cdot \alpha \cdot F_{m3}$$

Podle ČSN EN 60 865-1, tabulky 2 pro maximální hodnotu $R'_{p0,2}$ a trojfázový zkrat

$$\text{Varianta A: } \frac{\sigma_{tot}}{0,8 \cdot R'_{p0,2}} = \frac{68,45}{0,8 \cdot 80} = 1,07 \geq 1$$

tomu odpovídá $V_F \cdot V_r = 1$

$$\text{Varianta B: } \frac{\sigma_{tot}}{0,8 \cdot R'_{p0,2}} = \frac{10,98}{0,8 \cdot 80} = 0,172 \leq 0,37$$

tomu odpovídá $V_F \cdot V_r = 2,7$

Síly na vnější podpěrky:

Pro vnější podpěrky platí podle ČSN EN 60 865-1, tabulky 3 $\alpha_A = 0,4$

$$\text{Varianta A: } F_d = V_F \cdot V_r \cdot \alpha_A \cdot F_{m3} = 1,0 \cdot 4,787,7 = 315 \text{ N}$$

$$\text{Varianta B: } F_d = V_F \cdot V_r \cdot \alpha_A \cdot F_{m3} = 2,7 \cdot 0,4 \cdot 796 = 859,7 \text{ N}$$

Síly na vnitřní podpěrky:

Pro vnitřní podpěrky platí podle ČSN EN 60 865-1, tabulky 3 $\alpha_B = 1,1$

$$\text{Varianta A: } F_d = V_F \cdot V_r \cdot \alpha_B \cdot F_{m3} = 1,1 \cdot 1,796 = 866,4 \text{ N}$$

$$\text{Varianta B: } F_d = V_F \cdot V_r \cdot \alpha_B \cdot F_{m3} = 2,7 \cdot 1,1 \cdot 796 = 2364 \text{ N}$$

3.1.2. Podrobná metodaSoučinitel γ :

Pro 3 nebo více polí platí podle ČSN EN 60 865-1, tabulky 3 $\gamma = 3,56$

Vlastní kmitočet f_c a součinitelé V_F , V_r a V_σ :

$$\text{Varianta A: } f_c = \frac{\gamma}{l^2} \cdot \sqrt{\frac{E \cdot J}{m'}} = \frac{3,56}{1^2} \cdot \sqrt{\frac{7 \cdot 10^{10} \cdot 5,25 \cdot 10^{-9}}{1,62}} = 53,6 \text{ Hz}$$

$$\frac{f_c}{f} = \frac{53,6}{50} = 1,072$$

$$\text{Varianta B: } f_c = \frac{3,56}{1^2} \cdot \sqrt{\frac{7 \cdot 10^{10} \cdot 2,084 \cdot 10^{-7}}{1,62}} = 337,8 \text{ Hz}$$

$$\frac{f_c}{f} = \frac{337,8}{50} = 6,756$$

Z poměru f_c/f vyplývají podle ČSN EN 60 865-1, obrázku 4 následující hodnoty součinitelů:

$$\text{Varianta A: } V_F = 1,8, V_r = 1, V_\sigma = 1$$

$$\text{Varianta B: } V_F = 1, V_r = 1, V_\sigma = 1$$

Ohybové napětí vodiče:

$$\text{Varianta A: } \sigma_{tot} = \sigma_m = V_\sigma \cdot V_r \cdot \beta \cdot \frac{F_{m3} \cdot l}{8 \cdot Z} = 1,1 \cdot 0,73 \cdot \frac{787,7 \cdot 1}{8 \cdot 1,05 \cdot 10^{-6}} = 68,45 \text{ MPa}$$

$$\text{Varianta B: } \sigma_{tot} = \sigma_m = 1,1 \cdot 0,73 \cdot \frac{796 \cdot 1}{8 \cdot 6,615 \cdot 10^{-6}} = 10,98 \text{ MPa}$$

Síly na vnější podpěrky:

Pro vnější podpěrky platí podle ČSN EN 60 865-1, tabulky 3 $\alpha_A = 0,4$

$$\text{Varianta A: } F_d = V_F \cdot V_r \cdot \alpha_A \cdot F_{m3} = 1,8 \cdot 1,0 \cdot 0,4 \cdot 787,7 = 567,1 \text{ N}$$

$$\text{Varianta B: } F_d = V_F \cdot V_r \cdot \alpha_A \cdot F_{m3} = 1,1 \cdot 1,0 \cdot 0,4 \cdot 796 = 318,4 \text{ N}$$

Síly na vnitřní podpěrky:

Pro vnitřní podpěrky platí podle ČSN EN 60 865-1, tabulky 3 $\alpha_B = 1,1$

$$\text{Varianta A: } F_d = V_F \cdot V_r \cdot \alpha_B \cdot F_{m3} = 1,8 \cdot 1,1 \cdot 1,1 \cdot 796 = 1560 \text{ N}$$

$$\text{Varianta B: } F_d = V_F \cdot V_r \cdot \alpha_B \cdot F_{m3} = 1,1 \cdot 1,1 \cdot 1,1 \cdot 796 = 875 \text{ N}$$

4. Vyhodnocení

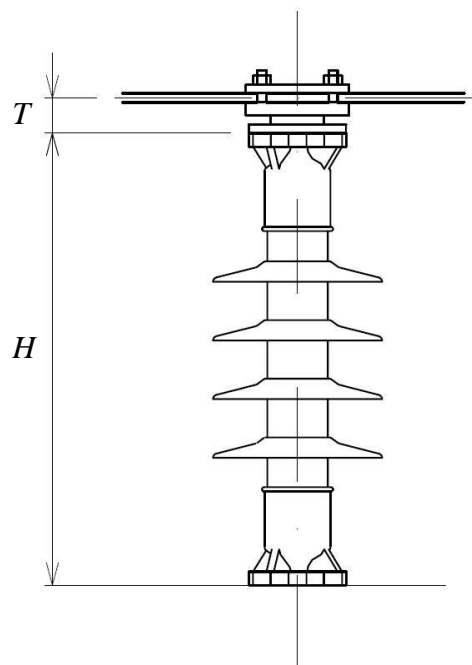
	varianta A		varianta B	
	zjednodušená metoda	podrobná metoda	zjednodušená metoda	podrobná metoda
odolnost přípojníc proti zkratové síle	nevyhovuje	nevyhovuje	vyhovuje	vyhovuje
ohybové napětí	68,45 MPa	68,45 MPa	10,98 MPa	10,98 MPa
dynamická síla na vnější podpěrky	315 N	567 N	860 N	318 N
dynamická síla na vnitřní podpěrky	866 N	1560 N	2364 N	875 N

Poznámka č. 1:

Ohybová síla je vztažena k ose těžiště průřezu vodiče. Na jmenovitou pevnost podpěrky je nutné provést korekci uvažující s vlivem těžiště vodiče např.

$$F_d < P \cdot \frac{H}{H + T}$$

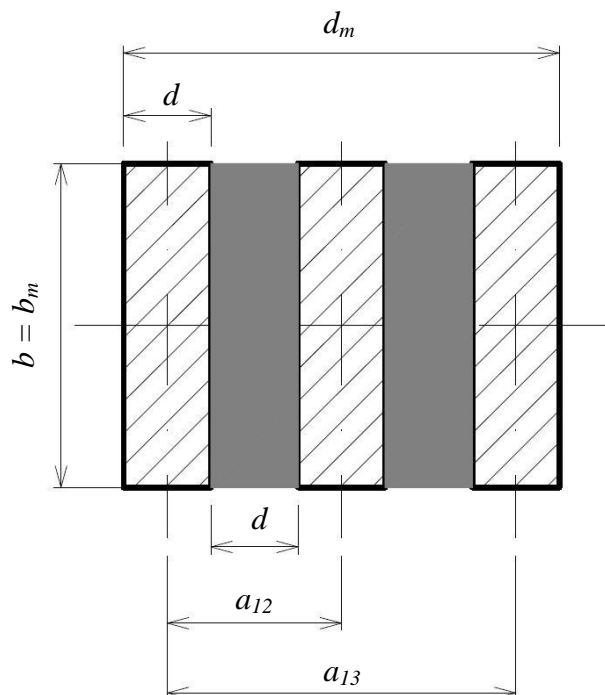
kde P je jmenovitá pevnost podpěrky, H je výška podpěrky a T je převýšení těžiště vodiče oproti vrcholu podpěrky



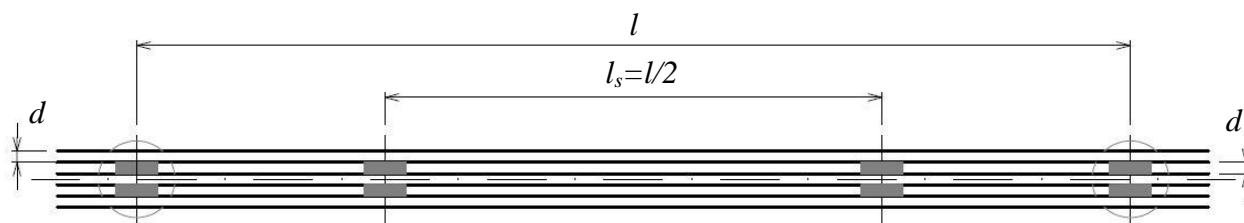
obrázek 3: Těžiště vodiče a výška podpěrky

Příklad 2 – Mechanické účinky na zařízení 10 kV s vícenásobnými tuhými vodiči

Výpočet je proveden pro stejné trojfázové přípojnice 10 kV jako v příkladě 1 ve variantě A, ale s hlavním vodičem složeným ze třech dílčích vodičů.



obrázek 4: Řez hlavního vodiče jedné fáze složeného ze tří dílčích vodičů



obrázek 5: Uspořádání rozpěrek a dílčích vodičů jedné fáze

1. Vstupní údaje (změny oproti variantě A předchozího příkladu)

Vodiče:

Počet dílčích vodičů	$n = 3$
Osová vzdálenost dílčích vodičů ve směru síly	$d = 10 \text{ mm}$
Počet rozpěrek v jednom rozpětí	$k = 2$
Vzdálenost mezi rozpěrkami	$l_s = 0,5 \text{ m}$

Rozpěrky jsou z materiálu AlMgSi 0,5 o rozměrech 60 mm x 60 mm x 10 mm

Pasové vodiče 3 x Al 63x10mm, materiál E-Al 99,5

Hmotnost na jednotku délky:	$m' = 1,62 \text{ kg/m}$
Modul pružnosti v tahu:	$E = 70 \text{ GPa}$
Min. mez průtažnosti:	$R_{p0,2} = 40 \text{ MPa}$
Max. mez průtažnosti:	$R'_{p0,2} = 80 \text{ MPa}$
Rozměry jednoho vodiče	$b = 0,063 \text{ m}, d = 0,010 \text{ m}$

2. Vrcholová síla mezi hlavními vodiči při trojfázovém zkratu

Součinitel k_{12} :

Podle ČSN EN 60 865-1, Obrázek 1. Oproti předchozímu příkladu postupujeme stejně, pouze za hodnotu d dosadíme d_m . Rozměry d_m a b_m jsou ukázány na obrázku 2b v ČSN EN 60 865-1 a na obrázku 4 této normy.

$$\text{poměr } b_m / d_m = 63 \text{ mm} / 50 \text{ mm} = 1,26,$$

$$\text{poměr } a / d_m = 350 \text{ mm} / 50 \text{ mm} = 7$$

tomu odpovídá $k_{12} = 1,00$

Účinná vzdálenost mezi vodiči:

$$a_m = \frac{a}{k_{12}} = \frac{0,35}{1,00} = 0,35 \text{ m}$$

Síly mezi hlavními vodiči:

$$F_{m3} = \frac{\mu_0}{2\pi} \cdot \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot i_{p3}^2 \cdot \frac{l}{a_m} = \frac{4\pi \cdot 10^{-7}}{2\pi} \cdot \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot 40^2 \cdot 10^6 \cdot \frac{1}{0,35} = 791,8 \text{ N}$$

3. Vrcholová síla mezi souběžnými dílčími vodiči (maximální síla na vnější dílčí vodič)

Součinitelé k_{12} a k_{13} :

Podle ČSN EN 60 865-1, Obrázek 1. Rozměry a_{12} a a_{13} jsou též ukázány na obrázku 4 této normy.

$$\text{poměr } a_{12} / d = 20 \text{ mm} / 10 \text{ mm} = 2, b / d = 63 \text{ mm} / 10 \text{ mm} = 6,3, \text{ tomu odpovídá } k_{12} = 0,6$$

$$\text{poměr } a_{13} / d = 40 \text{ mm} / 10 \text{ mm} = 4, b / d = 63 \text{ mm} / 10 \text{ mm} = 6,3, \text{ tomu odpovídá } k_{13} = 0,78$$

Účinná vzdálenost mezi dílčími souběžnými vodiči:

$$a_s = \left(\frac{k_{12}}{a_{12}} + \frac{k_{13}}{a_{13}} \right)^{-1} = \left(\frac{0,6}{0,02} + \frac{0,78}{0,04} \right)^{-1} = 0,0202 \text{ m}$$

Síly mezi dílčími vodiči:

$$F_s = \frac{\mu_0}{2\pi} \cdot \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot \left(\frac{i_{p3}}{n} \right)^2 \cdot \frac{l_s}{a_s} = \frac{4\pi \cdot 10^{-7}}{2\pi} \cdot \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot \left(\frac{40 \cdot 10^3}{3} \right)^2 \cdot \frac{0,5}{0,0202} = 762,1 \text{ N}$$

4. Namáhání vodiče a síly na podpěry

Výpočet může být proveden podle následujících článků 5.4.1. a 5.4.2.

4.1.1. Zjednodušená metoda

Moment setrvačnosti dílčího vodiče:

$$J_s = \frac{b \cdot d^3}{12} = \frac{0,063 \cdot 0,01^3}{12} = 5,25 \cdot 10^{-9} \text{ m}^4$$

Průřezový modul hlavního vodiče:

Pro výpočet průřezového modulu Z hlavního vodiče složeného ze dvou a více dílčích vodičů se směrem zatížení podle obrázku 2b se použije tabulka 5 normy ČSN EN 60 865-1. Pro tuto konfiguraci vychází:

$$Z = 1,98 \cdot b \cdot d^2 = 1,98 \cdot 0,063 \cdot 0,01^2 = 1,247 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3$$

Průřezový modul dílčího vodiče:

Průřezový modul se shoduje s hodnotu vypočtenou pro příklad 1 varianta A:

$$Z_s = 1,05 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3$$

Ohybové napětí způsobené silami mezi hlavními vodiči:

$$V_\sigma \cdot V_r = 1 \quad \text{podle ČSN EN 60 865-1, tabulka 2}$$

$$\beta = 0,73 \quad \text{podle ČSN EN 60 865-1, tabulka 3}$$

$$\sigma_m = V_\sigma \cdot V_r \cdot \beta \cdot \frac{F_{m3} \cdot l}{8 \cdot Z} = 1,0,73 \cdot \frac{791,8 \cdot 1}{8 \cdot 1,247 \cdot 10^{-5}} = 5,79 \text{ MPa}$$

Ohybové napětí způsobené silami mezi dílčími vodiči:

$$V_{\sigma_s} \cdot V_{r_s} = 1 \quad \text{podle ČSN EN 60 865-1, tabulka 2}$$

$$\sigma_s = V_{\sigma_s} \cdot V_{r_s} \cdot \frac{F_s \cdot l_s}{16 \cdot Z_s} = 1 \cdot \frac{762,1 \cdot 0,5}{16 \cdot 1,05 \cdot 10^{-6}} = 22,68 \text{ MPa}$$

Výsledné ohybové napětí v materiálu přípojnice:

$$\sigma_{tot} = \sigma_m + \sigma_s = 5,79 + 22,68 = 28,47 \text{ MPa}$$

Přípojnice jsou odolné vůči zkratové síle, jestliže

$$\sigma_{tot} \leq q \cdot R_{p0,2}$$

$$\sigma_s \leq R_{p0,2}$$

pro tento případ

$$\sigma_{tot} = 28,47 \text{ MPa} \leq 1,5 \cdot 40 = 60 \text{ MPa} \quad \text{vyhovuje}$$

$$\sigma_s = 28,47 \text{ MPa} \leq 40 \text{ MPa} \quad \text{vyhovuje}$$

Ohybové síly na podpěrky:

Dynamická síla F_d se vypočítá podle vztahu:

$$F_d = V_F \cdot V_r \cdot \alpha \cdot F_{m3}$$

Podle ČSN EN 60 865-1, tabulky 2 pro maximální hodnotu $R'_{p0,2}$ a trojfázový zkrat

$$0,37 \leq \frac{\sigma_{tot}}{0,8 \cdot R'_{p0,2}} = \frac{28,47}{0,8 \cdot 80} = 0,44 \leq 1$$

a proto

$$V_F \cdot V_r = \frac{0,8 \cdot R'_{p0,2}}{\sigma_{tot}} = \frac{0,8 \cdot 80}{28,47} = 2,25$$

Síly na vnější podpěrky:

Pro vnější podpěrky platí podle ČSN EN 60 865-1, tabulky 3 $\alpha_A = 0,4$

$$F_d = V_F \cdot V_r \cdot \alpha_A \cdot F_{m3} = 2,25 \cdot 0,4 \cdot 791,8 = 712,6 \text{ N}$$

Síly na vnitřní podpěrky:

Pro vnitřní podpěrky platí podle ČSN EN 60 865-1, tabulky 3 $\alpha_B = 1,1$

$$F_d = V_F \cdot V_r \cdot \alpha_B \cdot F_{m3} = 2,25 \cdot 1,1 \cdot 791,8 = 1959,7 \text{ N}$$

4.1.2. Podrobná metoda

Součinitel γ :

Pro 3 nebo více polí platí podle ČSN EN 60 865-1, tabulky 3 $\gamma = 3,56$

Součinitel c :

Podle ČSN EN 60 865-1, obrázku 3c pro $k = 2$ a poměr

$$\frac{m_z}{n \cdot m'_s \cdot l} = \frac{1,62 \cdot 0,06 \cdot 2}{3 \cdot 1,62 \cdot 1} = 0,04$$

Vychází $c = 0,97$

Vlastní kmitočet f_c a součinitelé V_F , V_r a V_σ :

$$f_c = c \cdot \frac{\gamma}{l^2} \cdot \sqrt{\frac{E \cdot J}{m'}} = 0,97 \cdot \frac{3,56}{1^2} \cdot \sqrt{\frac{7 \cdot 10^{10} \cdot 5,25 \cdot 10^{-9}}{1,62}} = 52 \text{ Hz}$$

$$\frac{f_c}{f} = \frac{52}{50} = 1,04$$

Z poměru f_c/f vyplývají podle ČSN EN 60 865-1, obrázku 4 a 5 následující hodnoty součinitelů:

$$V_F = 1,8, V_r = 1, V_\sigma = 1$$

Vlastní kmitočet f_{cs} a součinitelé V_{rs} a $V_{\sigma s}$:

$$f_{cs} = c \cdot \frac{\gamma}{l_s^2} \cdot \sqrt{\frac{E \cdot J}{m'}} = \frac{3,56}{0,5^2} \cdot \sqrt{\frac{7 \cdot 10^{10} \cdot 5,25 \cdot 10^{-9}}{1,62}} = 214,5 \text{ Hz}$$

$$\frac{f_c}{f} = \frac{214,5}{50} = 4,29$$

Z poměru f_{cs}/f vyplývají podle ČSN EN 60 865-1, obrázku 4 a 5 následující hodnoty součinitelů:

$$V_{rs} = 1, V_{\sigma s} = 1$$

Ohybové napětí vodiče:

$$\sigma_m = V_\sigma \cdot V_r \cdot \beta \cdot \frac{F_{m3} \cdot l}{8 \cdot Z} = 1 \cdot 1,8 \cdot 0,73 \cdot \frac{791,8 \cdot 1}{8 \cdot 1,247 \cdot 10^{-5}} = 5,79 \text{ MPa}$$

$$\sigma_s = V_{\sigma s} \cdot V_{rs} \cdot \frac{F_s \cdot l_s}{16 \cdot Z_s} = 1 \cdot 1 \cdot \frac{762,1 \cdot 0,5}{16 \cdot 1,05 \cdot 10^{-6}} = 22,68 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{tot} = \sigma_m + \sigma_s = 5,79 + 22,68 = 28,47 \text{ MPa}$$

Síly na vnější podpěrky:

Pro vnější podpěrky platí podle ČSN EN 60 865-1, tabulky 3 $\alpha_A = 0,4$

$$F_d = V_F \cdot V_r \cdot \alpha_A \cdot F_{m3} = 1,8 \cdot 1,8 \cdot 0,4 \cdot 791,8 = 570,1 \text{ N}$$

Síly na vnitřní podpěrky:

Pro vnitřní podpěrky platí podle ČSN EN 60 865-1, tabulky 3 $\alpha_B = 1,1$

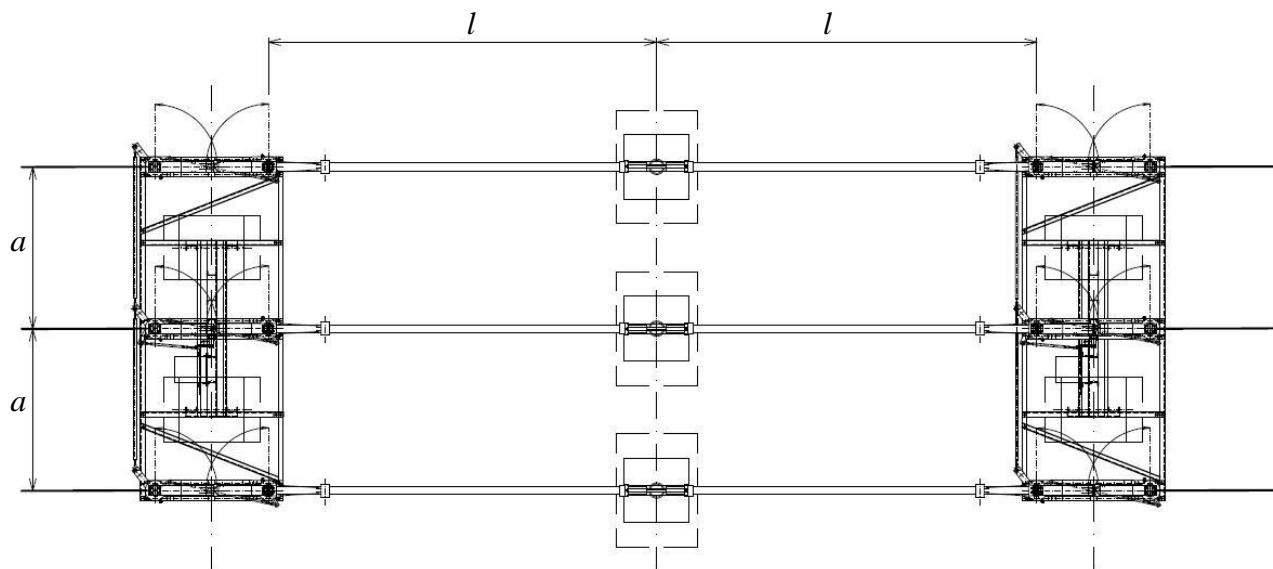
$$F_d = V_F \cdot V_r \cdot \alpha_B \cdot F_{m3} = 1,8 \cdot 1,8 \cdot 1,1 \cdot 791,8 = 1567,7 \text{ N}$$

5. Vyhodnocení

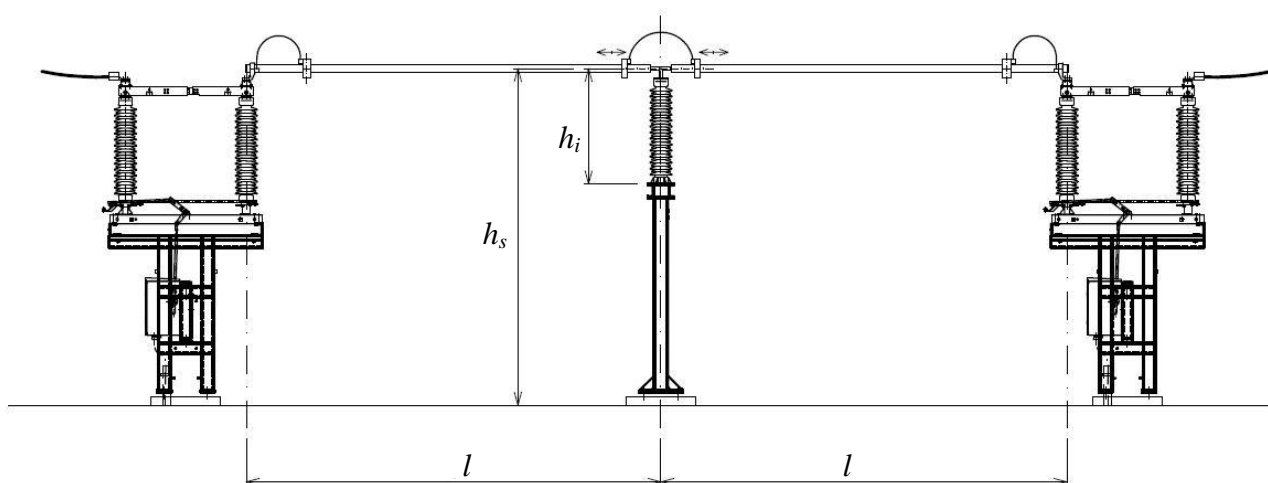
metoda	zjednodušená	podrobná
odolnost přípojnic proti zkratové síle	vyhovuje	vyhovuje
ohybové napětí	28,47 MPa	28,47 MPa
dynamická síla na vnější podpěrky	713 N	570 N
dynamická síla na vnitřní podpěrky	1960 N	1568 N

Příklad 3 – Mechanické účinky na zařízení 110 kV s trubkovými vodiči

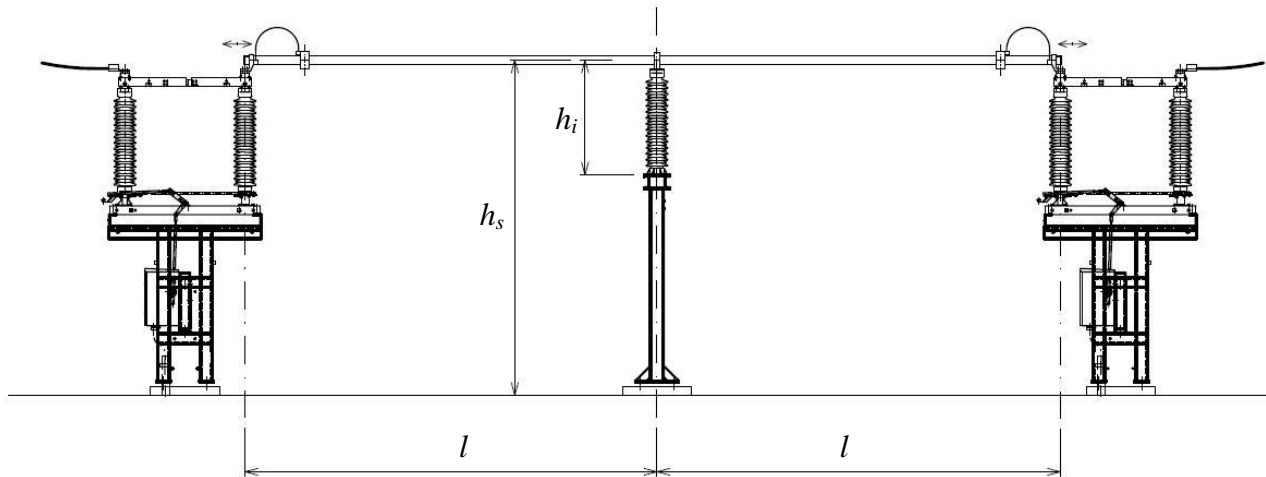
Výpočet je proveden pro dvě varianty trojfázové přípojnice systému 110 kV se dvěma rozpětími za sebou. Varianty se liší upevněním fázového vodiče na střední podpěrný izolátor. V první variantě je použita kluzná svorka rozdělující trubkový vodič na dva samostatné vodiče (obrázek 7), ve druhé variantě pevná průběžná svorka (obrázek 8).



obrázek 6: Půdorysné uspořádání k příkladu 3



obrázek 7: Řez uspořádání k příkladu 3 s použitím kluzné svorky uprostřed (varianta A)



obrázek 8: Řez uspořádání k příkladu 3 s použitím pevné svorky uprostřed (varianta B)

1. Vstupní údaje

Systém:

Nejvyšší provozovací napětí	123 kV
Jmenovité napětí sítě	110 kV
Jmenovitý kmitočet	50 Hz
Jmenovitá výdržná napětí	230/550 kV
Jmenovitý zkratový proud	$I''_{k3} = 31,5$ kA
Jmenovitý nárazový proud	$i_{p3} = 80$ kA
Doba zkratu	$T_k = 0,5$ s
Min. vzdušná vzdálenost	1100 mm
Trojpolový OZ:	ano

Rozpětí:

Počet rozpětí:	2
Délka jednoho rozpětí (obě stejně dlouhá):	$l = 5$ m
Fázová rozteč	$a = 2$ m
Výška izolátoru se svorkou	$h_i = 1,3$ m
Výška podpěry (celková)	$h_s = 4$ m

Vodič:

Trubkový vodič 100x5, materiál AlMgSi 0,5	
Hmotnost na jednotku délky:	$m' = 4,03$ kg/m
Vnější průměr:	$D = 100$ mm
Tloušťka stěny:	$s = 5$ mm
Modul pružnosti v tahu:	$E = 70$ GPa
Mez průtažnosti*:	$R_{p0,2} = 120$ MPa

* zadána pouze jedna hodnota

2. Vrcholová síla mezi hlavními vodiči při trojfázovém zkratu

Výsledky jsou shodné pro varianty A i B.

Účinná vzdálenost mezi vodiči:

Pro vodiče s kruhovým průřezem platí:

$$a_m = a = 2 \text{ m}$$

Síly mezi vodiči:

$$F_{m3} = \frac{\mu_0}{2\pi} \cdot \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot i_{p3}^2 \cdot \frac{l}{a_m} = \frac{4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}}{2\pi} \cdot \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot 80^2 \cdot 10^6 \cdot \frac{5}{2} = 2771 \text{ N}$$

3. Namáhání vodiče a síly na podpěry

Výpočet může být proveden podle následujících článků 6.3.1. a 6.3.2.

3.1.1. Zjednodušená metoda

Moment setrvačnosti:

$$J = \frac{\pi}{64} \cdot (D^4 - d^4) = \frac{\pi}{64} \cdot (0,1^4 - 0,09^4) = 1,69 \cdot 10^{-6} \text{ m}^4$$

Průřezový modul:

$$Z = \frac{J}{\frac{D}{2}} = \frac{1,69 \cdot 10^{-6}}{\frac{0,1}{2}} = 3,37 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3$$

Ohybové napětí vodiče:

$$V_\sigma \cdot V_r = 1,8 \text{ podle ČSN EN 60 865-1, tabulka 2}$$

Varianta A:

$$\beta = 1 \text{ podle ČSN EN 60 865-1, tabulka 3 (pro variantu A se použije uspořádání A)}$$

Varianta B:

$$\beta = 0,73 \text{ podle ČSN EN 60 865-1, tabulka 3 (pro variantu B se použije uspořádání D)}$$

$$\text{Varianta A: } \sigma_{tot} = \sigma_m = V_\sigma \cdot V_r \cdot \beta \cdot \frac{F_{m3} \cdot l}{8 \cdot Z} = 1,8 \cdot 1 \cdot \frac{2771,5}{8 \cdot 3,37 \cdot 10^{-5}} = 92,35 \text{ MPa}$$

$$\text{Varianta B: } \sigma_{tot} = \sigma_m = 1,8 \cdot 0,73 \cdot \frac{2771,5}{8 \cdot 3,37 \cdot 10^{-5}} = 67,41 \text{ MPa}$$

Přípojnice jsou odolné vůči zkratové síle, jestliže

$$\sigma_{tot} \leq q \cdot R_{p0,2}$$

Pro kruhový průřez (viz. ČSN EN 60 865-1, tabulka 4)

$$q = 1,7 \cdot \frac{1 - \left(1 - \frac{2 \cdot s}{D}\right)^3}{1 - \left(1 - \frac{2 \cdot s}{D}\right)^4} = \frac{1 - \left(1 - \frac{2 \cdot 0,005}{0,1}\right)^3}{1 - \left(1 - \frac{2 \cdot 0,005}{0,1}\right)^4} = 1,339$$

Tedy $q \cdot R_{p0,2} = 1,339 \cdot 120 \text{ MPa} = 160,8 \text{ MPa}$.

Varianta A: $\sigma_{tot} = \sigma_m = 92,35 \text{ MPa} \leq 160,8 \text{ MPa}$ **vyhovuje**

Varianta B: $\sigma_{tot} = \sigma_m = 67,41 \text{ MPa} \leq 160,8 \text{ MPa}$ **vyhovuje**

Ohybové síly na podpěrky:

Dynamická síla F_d se vypočítá podle vztahu:

$$F_d = V_F \cdot V_r \cdot \alpha \cdot F_{m3}$$

Podle ČSN EN 60 865-1, tabulky 2 pro $R_{p0,2}$ a trojfázový zkrat (s i bez OZ):

$$\text{Varianta A: } 0,37 \leq \frac{\sigma_{tot}}{0,8 \cdot R_{p0,2}} = \frac{92,35}{0,8 \cdot 120} = 0,962 \leq 1$$

$$\text{tomu odpovídá } V_F \cdot V_r = \frac{0,8 \cdot R_{p0,2}}{\sigma_{tot}} = \frac{0,8 \cdot 120}{92,35} = 1,04$$

$$\text{Varianta B: } 0,37 \leq \frac{\sigma_{tot}}{0,8 \cdot R_{p0,2}} = \frac{67,41}{0,8 \cdot 120} = 0,702 \leq 1$$

$$\text{tomu odpovídá } V_F \cdot V_r = \frac{0,8 \cdot R_{p0,2}}{\sigma_{tot}} = \frac{0,8 \cdot 120}{67,41} = 1,42$$

Síly na vnější podpěrky:

Varianta A:

Pro vnější podpěrky platí podle ČSN EN 60 865-1, tabulky 3 $\alpha_A = 0,5$

$$F_d = V_F \cdot V_r \cdot \alpha_A \cdot F_{m3} = 1,04 \cdot 0,5 \cdot 2771 = 1441 \text{ N}$$

Varianta B:

Pro vnější podpěrky platí podle ČSN EN 60 865-1, tabulky 3 $\alpha_A = 0,375$

$$F_d = V_F \cdot V_r \cdot \alpha_A \cdot F_{m3} = 1,42 \cdot 0,375 \cdot 2771 = 1476 \text{ N}$$

Síly na vnitřní podpěrky:

Varianta A:

Pro vnitřní podpěrku platí podle ČSN EN 60 865-1, tabulky 3 $\alpha_B = 0,5$. Protože silové působení na podpěrku je z obou stran, je nutné výsledek vynásobit dvěma.

$$F_d = 2 \cdot V_F \cdot V_r \cdot \alpha_B \cdot F_{m3} = 2 \cdot 1,04 \cdot 0,5 \cdot 2771 = 2882 \text{ N}$$

Varianta B:

Pro vnitřní podpěrku platí podle ČSN EN 60 865-1, tabulky 3 $\alpha_B = 1,25$

$$F_d = V_F \cdot V_r \cdot \alpha_B \cdot F_{m3} = 1,42 \cdot 1,25 \cdot 2771 = 4918 \text{ N}$$

Ohybové momenty:

Varianta A:

Ohybový moment v patě vnějšího podpěrného izolátoru:

$$M_{iA} = F_{dA} \cdot h_i = 1441 \cdot 1,3 = 1,873 \text{ kN.m}$$

Ohybový moment v patě vnější nosné konstrukce (stoličky):

$$M_{sA} = F_{dA} \cdot h_s = 1441 \cdot 4 = 5,764 \text{ kN.m}$$

Ohybový moment v patě vnitřního podpěrného izolátoru:

$$M_{iB} = F_{dB} \cdot h_i = 2882 \cdot 1,3 = 3,747 \text{ kN.m}$$

Ohybový moment v patě vnitřní nosné konstrukce (stoličky):

$$M_{sB} = F_{dB} \cdot h_s = 2882 \cdot 4 = 11,528 \text{ kN.m}$$

Varianta B:

Ohybový moment v patě vnějšího podpěrného izolátoru:

$$M_{iA} = F_{dA} \cdot h_i = 1476 \cdot 1,3 = 1,919 \text{ kN.m}$$

Ohybový moment v patě vnější nosné konstrukce (stoličky):

$$M_{sA} = F_{dA} \cdot h_s = 1476 \cdot 4 = 5,904 \text{ kN.m}$$

Ohybový moment v patě vnitřního podpěrného izolátoru:

$$M_{iB} = F_{dB} \cdot h_i = 4918 \cdot 1,3 = 6,393 \text{ kN.m}$$

Ohybový moment v patě vnitřní nosné konstrukce (stoličky):

$$M_{sB} = F_{dB} \cdot h_s = 4918 \cdot 4 = 19,672 \text{ kN.m}$$

3.1.2. Podrobná metoda

Součinitel γ :

Varianta A:

Pro tuto variantu (konfiguraci A) platí podle ČSN EN 60 865-1, tabulky 3 $\gamma = 1,57$

Varianta B:

Pro tuto variantu (konfiguraci D) platí podle ČSN EN 60 865-1, tabulky 3 $\gamma = 2,45$

Vlastní kmitočet f_c a součinitelé V_F , V_r a V_σ :

$$\text{Varianta A: } f_c = \frac{\gamma}{l^2} \sqrt{\frac{E \cdot J}{m'}} = \frac{1,57}{5^2} \sqrt{\frac{7 \cdot 10^{10} \cdot 1,69 \cdot 10^{-6}}{4,03}} = 10,75 \text{ Hz}$$

$$\frac{f_c}{f} = \frac{10,75}{50} = 0,215$$

$$\text{Varianta B: } f_c = \frac{2,45}{5^2} \sqrt{\frac{7 \cdot 10^{10} \cdot 1,69 \cdot 10^{-6}}{4,03}} = 16,78 \text{ Hz}$$

$$\frac{f_c}{f} = \frac{16,78}{50} = 0,336$$

Z poměru f_c/f a $\kappa = \frac{80}{31,5 \cdot \sqrt{2}} = 1,795$ vyplývají podle ČSN EN 60 865-1, obrázku 4 následující

hodnoty součinitelů:

Varianta A: $V_F = 0,785$, $V_r = 1,41$, $V_\sigma = 0,693$

Varianta B: $V_F = 0,9$, $V_r = 1,292$, $V_\sigma = 0,797$

Ohybové napětí vodiče:

$$\text{Varianta A: } \sigma_{tot} = \sigma_m = V_\sigma \cdot V_r \cdot \beta \cdot \frac{F_{m3} \cdot l}{8 \cdot Z} = 0,693 \cdot 1,41 \cdot 1 \cdot \frac{2771,5}{8,3 \cdot 37 \cdot 10^{-5}} = 50,13 \text{ MPa}$$

$$\text{Varianta B: } \sigma_{tot} = \sigma_m = 0,797 \cdot 1,292 \cdot 0,73 \cdot \frac{2771,5}{8,3 \cdot 37 \cdot 10^{-5}} = 38,56 \text{ MPa}$$

Síly na vnější podpěrky:

Varianta A:

Pro vnější podpěrky platí podle ČSN EN 60 865-1, tabulky 3 $\alpha_A = 0,5$

$$F_d = V_F \cdot V_r \cdot \alpha_A \cdot F_{m3} = 0,785 \cdot 1,41 \cdot 0,5 \cdot 2771 = 1534 \text{ N}$$

Varianta B:

Pro vnější podpěrky platí podle ČSN EN 60 865-1, tabulky 3 $\alpha_A = 0,375$

$$F_d = V_F \cdot V_r \cdot \alpha_A \cdot F_{m3} = 0,9 \cdot 1,292 \cdot 0,375 \cdot 2771 = 1208 \text{ N}$$

Síly na vnitřní podpěrky:

Varianta A:

Pro vnitřní podpěrku platí podle ČSN EN 60 865-1, tabulky 3 $\alpha_B = 0,5$. Protože silové působení na podpěrku je z obou stran, je nutné výsledek vynásobit dvěma.

$$F_d = 2 \cdot V_F \cdot V_r \cdot \alpha_B \cdot F_{m3} = 2 \cdot 0,785 \cdot 1,41 \cdot 0,5 \cdot 2771 = 3068 \text{ N}$$

Varianta B:

Pro vnitřní podpěrku platí podle ČSN EN 60 865-1, tabulky 3 $\alpha_B = 1,25$

$$F_d = V_F \cdot V_r \cdot \alpha_B \cdot F_{m3} = 0,9 \cdot 1,292 \cdot 1,25 \cdot 2771 = 4027 \text{ N}$$

Ohybové momenty:

Varianta A:

Ohybový moment v patě vnějšího podpěrného izolátoru:

$$M_{iA} = F_{dA} \cdot h_i = 1534 \cdot 1,3 = 1,994 \text{ kN.m}$$

Ohybový moment v patě vnější nosné konstrukce (stoličky):

$$M_{sA} = F_{dA} \cdot h_s = 1534 \cdot 4 = 6,136 \text{ kN.m}$$

Ohybový moment v patě vnitřního podpěrného izolátoru:

$$M_{iB} = F_{dB} \cdot h_i = 3068 \cdot 1,3 = 3,988 \text{ kN.m}$$

Ohybový moment v patě vnitřní nosné konstrukce (stoličky):

$$M_{sB} = F_{dB} \cdot h_s = 3068 \cdot 4 = 12,272 \text{ kN.m}$$

Varianta B:

Ohybový moment v patě vnějšího podpěrného izolátoru:

$$M_{iA} = F_{dA} \cdot h_i = 1208 \cdot 1,3 = 1,570 \text{ kN.m}$$

Ohybový moment v patě vnější nosné konstrukce (stoličky):

$$M_{sA} = F_{dA} \cdot h_s = 1208 \cdot 4 = 4,832 \text{ kN.m}$$

Ohybový moment v patě vnitřního podpěrného izolátoru:

$$M_{iB} = F_{dB} \cdot h_i = 4027 \cdot 1,3 = 5,235 \text{ kN.m}$$

Ohybový moment v patě vnitřní nosné konstrukce (stoličky):

$$M_{sB} = F_{dB} \cdot h_s = 4027 \cdot 4 = 16,108 \text{ kN.m}$$

4. Vyhodnocení

	varianta A		varianta B	
	zjednodušená metoda	podrobná metoda	zjednodušená metoda	podrobná metoda
odolnost přípojníc proti zkratové síle	vyhovuje	vyhovuje	vyhovuje	vyhovuje
ohybové napětí	92,35 MPa	50,13 MPa	67,41 MPa	38,56 MPa
dynamická síla na vnější podpěrky	1441 N	1534 N	1476 N	1208 N
dynamická síla na vnitřní podpěrky	2882 N	3068 N	4918 N	4027 N
ohybový moment v patě vnějšího podpěrného izolátoru	1,87 kN.m	1,99 kN.m	1,92 kN.m	1,57 kN.m
ohybový moment v patě vnější nosné konstrukce (stoličky)	5,76 kN.m	6,14 kN.m	5,90 kN.m	4,83 kN.m
ohybový moment v patě vnitřního podpěrného izolátoru	3,75 kN.m	3,99 kN.m	6,39 kN.m	5,24 kN.m
ohybový moment v patě vnitřní nosné konstrukce (stoličky)	11,5 kN.m	12,3 kN.m	19,7 kN.m	16,1 kN.m

Poznámka č. 1:

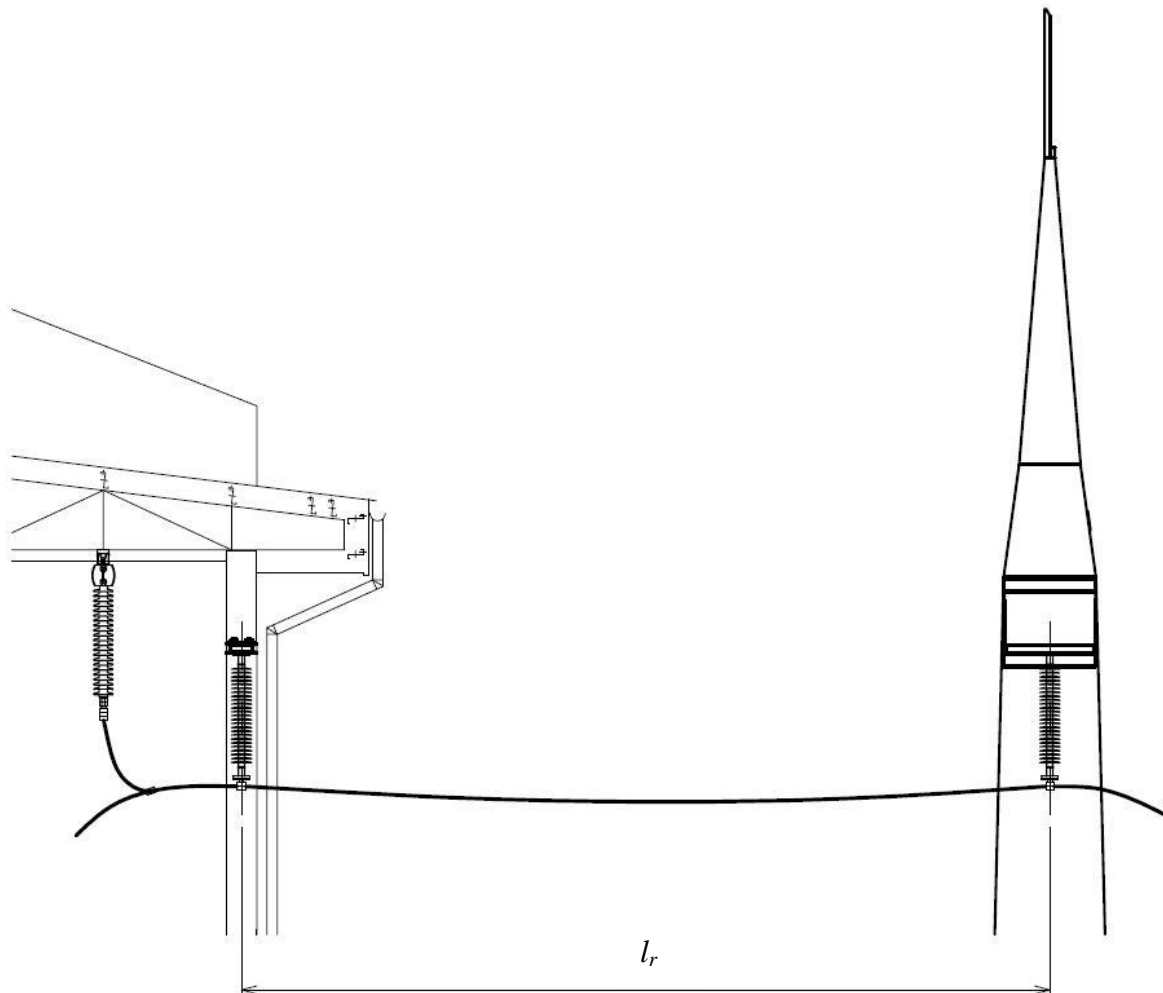
Z výše uvedených výsledků vyplývá, že užití výkyvných typů svorek v tomto případě zrovnoměňuje dynamické namáhání a klade tak menší nároky na podpěrky i konstrukce.

Poznámka č. 2:

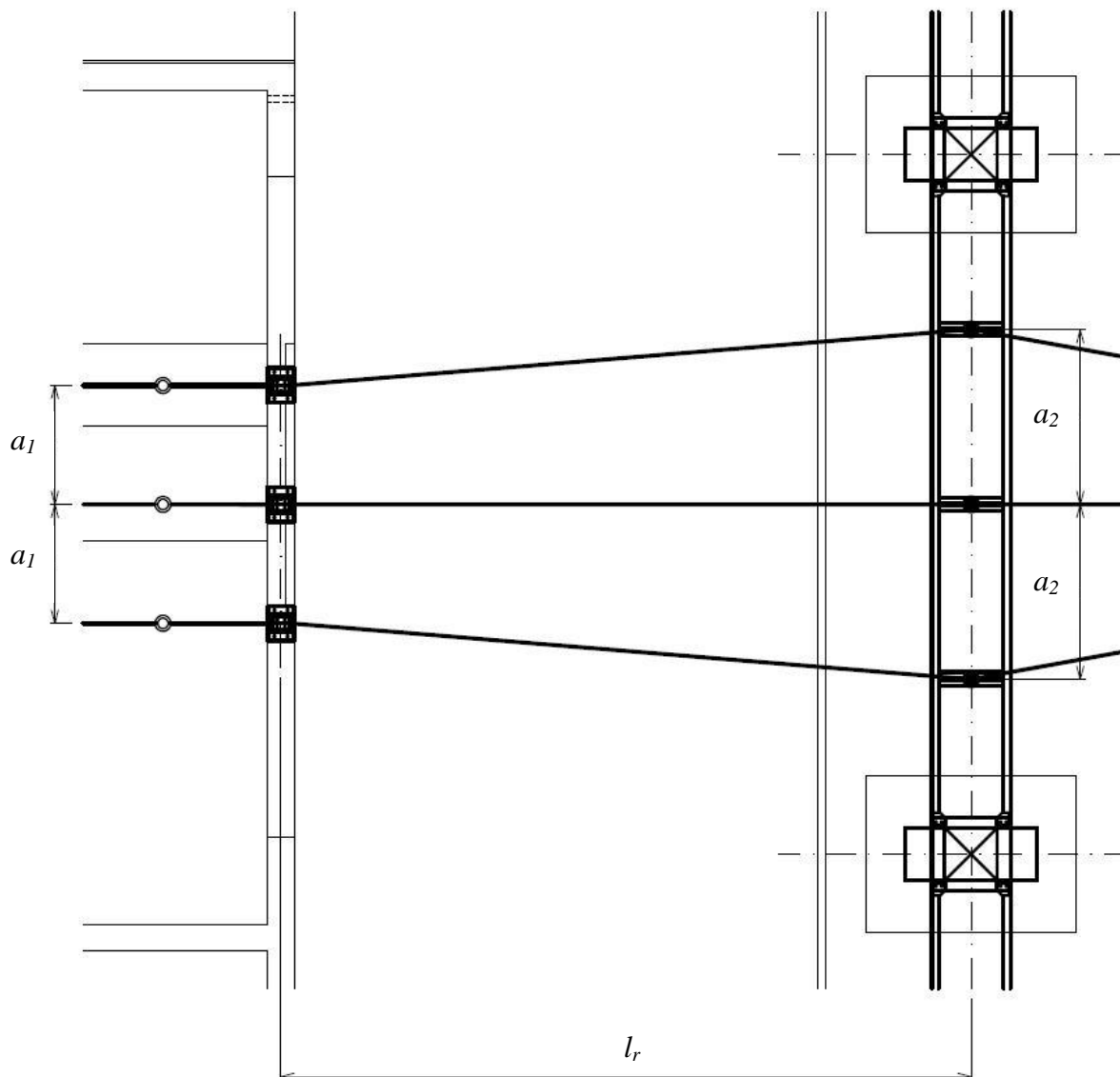
Ohybové síly na podpěrky jsou vztaženy k ose trubkového vodiče. Při výběru vhodného typu podpěrného izolátoru je třeba provést korekci obdobně jako v poznámce k příkladu 1.

Příklad 4 – Mechanické účinky se zavěšenými vodiči bez izolačních závěsů zařízení 110 kV

Výpočet je proveden pro trojfázové propojení provedené pomocí ohebných přípojníc s jedním lanovým vodičem AlFe na fázi s měnicí se vzdáleností mezi vodiči. Kotevní body jsou podpěrné izolátory umístěné na ocelové konstrukci a na vrchní části okna stání transformátoru.



obrázek 9: Řez polem systému s volně zavěšenými lany k příkladu 4



obrázek 10: Půdorys pole systému s volně zavěšenými lany k příkladu 4

1. Vstupní údaje

System:

Nejvyšší provozovací napětí	123 kV
Jmenovité napětí sítě	110 kV
Jmenovitý kmitočet	50 Hz
Jmenovitá výdržná napětí	230/550 kV
Jmenovitý zkratový proud	$I''_{k3} = 31,5$ kA
Jmenovitý nárazový proud	$i_{p3} = 80$ kA
Doba zkratu	$T_k = 0,5$ s
Min. vzdušná vzdálenost	1100 mm
Min. vzdušná vzdálenost při zkratu	550 mm

Rozpětí:

Počet rozpětí:	1
Délka jednoho rozpětí (obě stejně dlouhá):	$l = 8,5 \text{ m}$
Fázová rozteč na počátku rozpětí	$a_1 = 1,5 \text{ m}$
Fázová rozteč na konci rozpětí	$a_2 = 2 \text{ m}$
Celková pérová konstanta rozpětí	$S = 100 \text{ N/mm}$

Vodič:

758-AL1/43-ST1A	
Modul pružnosti	$E = 62,3 \text{ GPa}$
Součinitel tepelné roztažnosti	$\alpha = 2,11 \cdot 10^{-5} \text{ K}^{-1}$
Hmotnost vodiče na metr	$m' = 2,4364 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-1}$
Materiál vodiče	AlFe
Průřez dílčího vodiče	$A_s = 801,2 \text{ mm}^2$
Průřez Al dílčího vodiče	$A_{sAl} = 758,1 \text{ mm}^2$
Průměr dílčího vodiče	$d_s = 36,5 \text{ mm}$

Vstupy ze statických výpočtů rozpětí:

Statické výpočty byly provedeny pro max. osový tah 1,5 kN s montážní tolerancí 10%. Jako výchozí hodnoty pro výpočet kritických zkratů, které je třeba ověřit výpočtem, poslouží výsledky statických výpočtů pro *maximální výpočtovou teplotu* (+80°C) a *základní hodnotu tahu* (1,5 kN/1,1 = 1,364 kN) a také pro *minimální výpočtovou teplotu* (-30°C) a *zvýšenou hodnotu tahu* (1,5 kN). Statické výpočty prováděné pro jednotlivé zatěžovací stavy nejsou předmětem této normy.

zatěžovací stav	statický tah ve vodiči F_{st}	délka lana l_c
maximální výpočtová teplota (+80°C) a základní hodnota tahu (1,364 kN)	614 N	8,534 m
minimální výpočtová teplota (-30°C) a zvýšená hodnota tahu (1,5 kN)	950 N	8,507 m

Pro účely výpočtu bude postupováno dle zadaných hodnot. Norma ČSN EN 60 865-1 připouští stanovení $l_c = l_r$.

2. Výpočet tahových sil během a po zkratuEkvivalentní fázová rozteč:

Ekvivalentní fázovou rozteč vypočítáme podle přibližného vztahu

$$a = \frac{a_1 + a_2}{2} = \frac{1,5 + 2}{2} = 1,75 \text{ m}$$

Je možné využít přesnější vztah (respektující střední hodnotu síly působící mezi vodiči), který se výrazněji liší pro velké diference fázových roztečí, pro tento případ je však

$$a = \frac{a_2 - a_1}{\ln \frac{a_2}{a_1}} = \frac{2 - 1,5}{\ln \frac{2}{1,5}} = 1,738 \text{ m}$$

Elektromagnetická síla na jednotku délky:

$$F' = \frac{\mu_0}{2\pi} \cdot 0,75 \cdot \frac{I_{k3}^2}{a} = \frac{4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}}{2\pi} \cdot 0,75 \cdot \frac{31,5^2 \cdot 10^6}{1,738} = 85,637 \text{ N.m}^{-1}$$

Parametr r :

$$r = \frac{F'}{m' \cdot g} = \frac{85,637}{2,4364 \cdot 9,81} = 3,5831$$

Úhel výsledné síly δ_1 :

$$\delta_1 = \arctg(r) = \arctg(3,5831) = 74,41^\circ$$

Ekvivalentní statické průhyby $b_{c,-30}$ a $b_{c,80}$:

$$b_{c,-30} = \frac{m' \cdot g \cdot l_{c,-30}^2}{8 \cdot F_{st,-30}} = \frac{2,4364 \cdot 9,81 \cdot 8,507^2}{8 \cdot 9,950} = 0,2275 \text{ m}$$

$$b_{c,80} = \frac{m' \cdot g \cdot l_{80}^2}{8 \cdot F_{st,80}} = \frac{2,4364 \cdot 9,81 \cdot 8,534^2}{8 \cdot 6,614} = 0,3534 \text{ m}$$

Doby kmitání T_{-30} a T_{80} :

$$T_{-30} = 2\pi \cdot \sqrt{0,8 \cdot \frac{b_{c,-30}}{g}} = 2\pi \cdot \sqrt{0,8 \cdot \frac{0,2275}{9,81}} = 0,8550 \text{ s}$$

$$T_{80} = 2\pi \cdot \sqrt{0,8 \cdot \frac{b_{c,80}}{g}} = 2\pi \cdot \sqrt{0,8 \cdot \frac{0,3534}{9,81}} = 1,0666 \text{ s}$$

Protože $T_k = 0,5 > 0,342 = 0,4 \cdot 0,8550 = 0,4 \cdot T_{-30}$ bude dále počítáno s $T_{k1,-30} = 0,342 \text{ s}$

a protože $T_k = 0,5 > 0,4266 = 0,4 \cdot 1,0666 = 0,4 \cdot T_{80}$ bude dále počítáno s $T_{k1,80} = 0,4266 \text{ s}$

Výsledné doby kmitání $T_{res,-30}$ a $T_{res,80}$:

$$T_{res,-30} = \frac{T_{-30}}{\sqrt[4]{1+r^2} \cdot \left[1 - \frac{\pi^2}{64} \cdot \left(\frac{\delta_1}{90^\circ} \right)^2 \right]} = \frac{0,8550}{\sqrt[4]{1+3,5831^2} \cdot \left[1 - \frac{\pi^2}{64} \cdot \left(\frac{74,41^\circ}{90^\circ} \right)^2 \right]} = 0,4961 \text{ s}$$

$$T_{res,80} = \frac{T_{-30}}{\sqrt[4]{1+r^2} \cdot \left[1 - \frac{\pi^2}{64} \cdot \left(\frac{\delta_1}{90^\circ} \right)^2 \right]} = \frac{1,0666}{\sqrt[4]{1+3,5831^2} \cdot \left[1 - \frac{\pi^2}{64} \cdot \left(\frac{74,41^\circ}{90^\circ} \right)^2 \right]} = 0,6176 \text{ s}$$

Normované tuhosti N_{-30} a N_{80} a skutečné moduly pružnosti $E_{s,-30}$ a $E_{s,80}$:

Protože $\frac{F_{st,-30}}{A_s} = \frac{950}{8,012 \cdot 10^{-4}} = 1,186 \cdot 10^6 \text{ MPa} \leq 5 \cdot 10^7 \text{ MPa} = \sigma_{fin}$ bude skutečný modul pružnosti pro teplotu -30°C menší, a to

$$E_{s,-30} = E \cdot \left[0,3 + 0,7 \cdot \sin \left(\frac{F_{st,-30}}{A_s \cdot \sigma_{fin}} \cdot 90^\circ \right) \right] = E \cdot \left[0,3 + 0,7 \cdot \sin \left(\frac{950}{8,012 \cdot 10^{-4} \cdot 5 \cdot 10^7} \cdot 90^\circ \right) \right] = 20,314 \text{ GPa}$$

Obdobně $\frac{F_{st,80}}{A_s} = \frac{614}{8,012 \cdot 10^{-4}} = 7,664 \cdot 10^5 \text{ MPa} \leq 5 \cdot 10^7 \text{ MPa} = \sigma_{fin}$ a proto

$$E_{s,80} = E \cdot \left[0,3 + 0,7 \cdot \sin \left(\frac{F_{st,80}}{A_s \cdot \sigma_{fin}} \cdot 90^\circ \right) \right] = E \cdot \left[0,3 + 0,7 \cdot \sin \left(\frac{614}{8,012 \cdot 10^{-4} \cdot 5 \cdot 10^7} \cdot 90^\circ \right) \right] = 19,740 \text{ GPa}$$

Normované tuhosti jsou:

$$N_{-30} = \frac{1}{S \cdot l_{-30}} + \frac{1}{E_{s,-30} \cdot A_s} = \frac{1}{10^5 \cdot 8,507} + \frac{1}{2,0314 \cdot 10^{10} \cdot 8,012 \cdot 10^{-4}} = 1,2369 \cdot 10^{-6} \text{ N}^{-1}$$

$$N_{80} = \frac{1}{S \cdot l_{80}} + \frac{1}{E_{s,80} \cdot A_s} = \frac{1}{10^5 \cdot 8,534} + \frac{1}{1,9740 \cdot 10^{10} \cdot 8,012 \cdot 10^{-4}} = 1,2350 \cdot 10^{-6} \text{ N}^{-1}$$

Součinitelé napjatosti ζ_{-30} a ζ_{80} :

$$\zeta_{-30} = \frac{(m' \cdot g \cdot l_{-30})^2}{24 \cdot F_{st,-30}^3 \cdot N_{-30}} = \frac{(2,4364 \cdot 9,81 \cdot 8,516)^2}{24 \cdot 950^3 \cdot 1,236 \cdot 10^{-6}} = 1,6243$$

$$\zeta_{80} = \frac{(m' \cdot g \cdot l_{80})^2}{24 \cdot F_{st,80}^3 \cdot N_{80}} = \frac{(2,4364 \cdot 9,81 \cdot 8,542)^2}{24 \cdot 614^3 \cdot 1,236 \cdot 10^{-6}} = 6,0274$$

Úhly vychýlení na konci zkratu $\delta_{k,-30}$ a $\delta_{k,80}$:

Protože $\frac{T_{k1,-30}}{T_{res,-30}} = \frac{0,342}{0,4961} = 0,689 > 0,5$, výpočet se provádí následovně:

$$\delta_{k,-30} = 2 \cdot \delta_1 = 2 \cdot 74,41^\circ = 148,82^\circ$$

Protože $\frac{T_{k1,80}}{T_{res,80}} = \frac{0,4266}{0,6176} = 0,6907 > 0,5$:

$$\delta_{k,80} = 2 \cdot \delta_1 = 2 \cdot 74,41^\circ = 148,82^\circ$$

$$\delta_{k,80} = \delta_{k,-30} = \delta_k$$

Určení součinitelů χ_{-30} a χ_{80} :

Protože $\delta_{k,-30} = 148,82^\circ > 90^\circ$ bude

$$\chi_{-30} = 1 - r = 1 - 3,5831 = -2,5831$$

Protože $\delta_{k,80} = 148,82^\circ > 90^\circ$ bude také

$$\chi_{80} = 1 - r = 1 - 3,5831 = -2,5831$$

$$\chi_{80} = \chi_{-30} = \chi$$

Maximální úhly vychýlení $\delta_{m,-30}$ a $\delta_{m,80}$:

Protože $\chi = \chi_{-30} = \chi_{80} = -2,5831 < -0,985$, bude

$$\delta_m = \delta_{m,-30} = \delta_{m,80} = 180^\circ$$

Určení součinitelů φ_{-30} a φ_{80} :

Protože $T_{k1,-30} = 0,342 \geq 0,1240 = \frac{0,4961}{4} = \frac{T_{res,-30}}{4}$ bude

$$\varphi_{-30} = 3 \cdot (\sqrt{1+r^2} - 1) = 3 \cdot (\sqrt{1+3,5831^2} - 1) = 8,1500$$

Protože $T_{k1,80} = 0,4266 \geq 0,1544 = \frac{0,6176}{4} = \frac{T_{res,80}}{4}$ bude

$$\varphi_{80} = 3 \cdot (\sqrt{1+r^2} - 1) = 3 \cdot (\sqrt{1+3,5831^2} - 1) = 8,1500$$

$$\varphi = \varphi_{80} = \varphi_{-30}$$

Určení součinitelů ψ_{-30} a ψ_{80} :

Součinitele ψ mohou být určeny z kubické rovnice

$$\varphi^2 \cdot \psi^3 + \varphi \cdot (2 + \zeta) \cdot \psi^2 + (1 + 2 \cdot \zeta) \cdot \psi - \zeta \cdot (2 + \varphi)$$

nebo odčteny z obrázku 7, normy ČSN EN 60 865-1

pro tento případ vychází: $\psi_{-30} = 0,484$ a $\psi_{80} = 0,685$

Tahová síla během zkratu $F_{t,-30}$ a $F_{t,80}$:

$$F_{t,-30} = 1,1 \cdot F_{st,-30} \cdot (1 + \psi_{-30} \cdot \varphi) = 1,1 \cdot 950 \cdot (1 + 0,484 \cdot 8,15) = 4699 \text{ N}$$

$$F_{t,80} = 1,1 \cdot F_{st,80} \cdot (1 + \psi_{80} \cdot \varphi) = 1,1 \cdot 614 \cdot (1 + 0,685 \cdot 8,15) = 4060 \text{ N}$$

Tahová síla po zkratu $F_{f,-30}$ a $F_{f,80}$ (pád vodiče):

Pro -30°C a pro 80°C jsou splněny obě podmínky pro obě teploty

$$r = 3,5831 \geq 0,6 \text{ a } \delta_m = 180^\circ \geq 70^\circ$$

a proto

$$F_{f,-30} = 1,2 \cdot F_{st,-30} \cdot \sqrt{1 + 8 \cdot \zeta_{-30} \cdot \frac{\delta_m}{180^\circ}} = 1,2 \cdot 950 \cdot \sqrt{1 + 8 \cdot 1,6243 \cdot \frac{180^\circ}{180^\circ}} = 4264 \text{ N}$$

$$F_{f,80} = 1,2 \cdot F_{st,80} \cdot \sqrt{1 + 8 \cdot \zeta_{80} \cdot \frac{\delta_m}{180^\circ}} = 1,2 \cdot 614 \cdot \sqrt{1 + 8 \cdot 6,0274 \cdot \frac{180^\circ}{180^\circ}} = 5171 \text{ N}$$

3. Výpočet minimální vzdušné vzdálenosti

Následující výpočty týkající se minimální vzdušné vzdálenosti berou v úvahu pouze stav při $+80^\circ\text{C}$, při kterém je její hodnota vždy vyšší než při -30°C .

Určení součinitele ε_{ela} :

$$\varepsilon_{ela} = N_{80} \cdot (F_{t,80} - F_{st,80}) = 1,2350 \cdot 10^{-6} \cdot (4060 - 614) = 4,263 \cdot 10^{-3}$$

Určení součinitele ε_{th} :

$$\text{Protože } T_{k1,80} = 0,4266 \geq 0,1544 = \frac{0,6176}{4} = \frac{T_{res,80}}{4}$$

a protože $A_{sAl} / A_{sFe} = A_{sAl} / (A_s - A_{sAl}) = 758,1 / (801,2 - 758,1) = 17,59 > 6$, bude

$$c_{th} = 2,7 \cdot 10^{-19} \text{ m}^4 \cdot \text{A}^{-1} \cdot \text{s}^{-1} \text{ a tedy}$$

$$\varepsilon_{th} = c_{th} \cdot \left(\frac{I_{k3}''}{A_s} \right)^2 \cdot \frac{T_{res,80}}{4} = 2,7 \cdot 10^{-19} \cdot \left(\frac{31,5 \cdot 10^3}{8,012 \cdot 10^{-4}} \right)^2 \cdot \frac{0,6176}{4} = 6,444 \cdot 10^{-5}$$

Určení součinitele C_D :

$$C_D = \sqrt{1 + \frac{3}{8} \cdot \left(\frac{l_{80}}{b_{c,80}} \right)^2} \cdot (\varepsilon_{th} + \varepsilon_{ela}) = \sqrt{1 + \frac{3}{8} \cdot \left(\frac{8,534}{0,3534} \right)^2} \cdot (6,444 \cdot 10^{-5} + 4,263 \cdot 10^{-3}) = 1,395$$

Určení součinitele C_F :

Protože $r = 3,5831 > 1,8$

$$C_F = 1,15$$

Určení horizontální výchylky b_h :

Protože se jedná o rozpětí s volně zavěšenými vodiči na podpěrných izolátorech a $\delta_m = 180^\circ \geq 90^\circ$

$$b_h = C_F \cdot C_D \cdot b_{c,80} = 1,15 \cdot 1,395 \cdot 0,3534 = 0,5667 \text{ m}$$

Určení minimální vzdušné vzdálenosti a_{\min} :

$$a_{\min} = a - 2 \cdot b_h = 1,738 - 2 \cdot 0,5667 = 0,6046 \text{ m}$$

4. Vyhodnocení

stav	-30°C, max. tah	80°C, zákl. tah
síla během zkratu F_t	4,7 kN	4,1 kN
síla po zkratu F_f	4,3 kN	5,2 kN
min. vzdušná vzdálenost a_{\min}	-	605 mm

Protože 605 mm > 550 mm je zavěšení lan z hlediska doskoku vyhovující podle ČSN 33 3201.

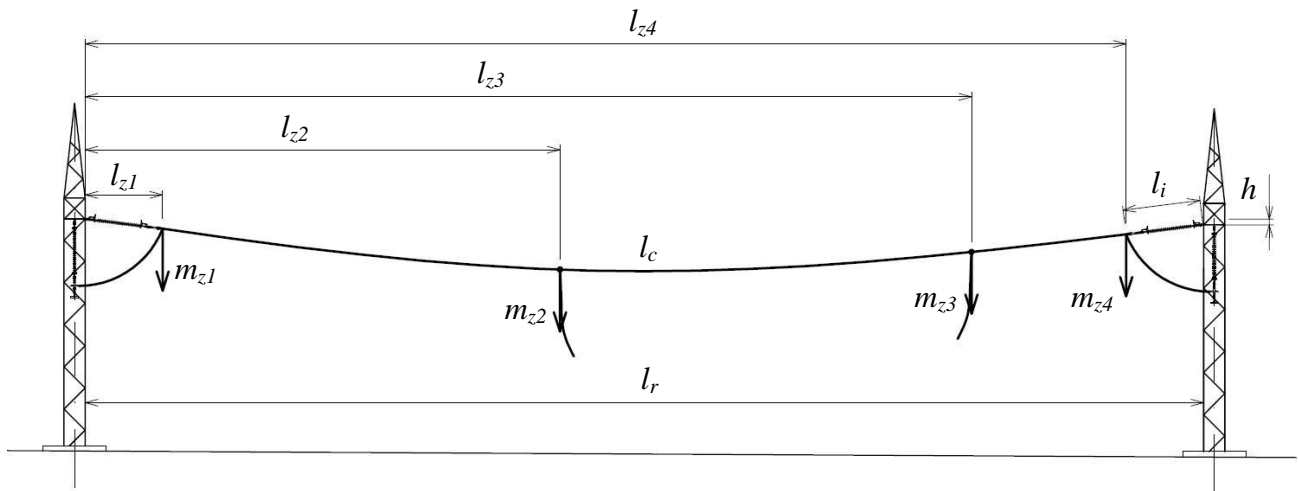
Extrémní silové namáhání *izolátorů a přípojovacích míst vodičů* se odvodí jako maximum z $1,5 \cdot F_t$, $1,0 \cdot F_f$ a $1,0 \cdot F_{pi}$. V tomto případě je toto maximum rovno $1,5 \cdot F_{t,-30} = 1,5 \cdot 4,7 = 7,1$ kN. Součinitel 1,5 bere v úvahu, že energie kmitání je pohlcena hmotou izolátorů. U izolátoru je třeba ještě provést korekci na sílu působící na hlavu izolátoru (podle poznámky č. 1 k příkladu č. 1). Dovolené hodnoty udané výrobcem pak musí být větší než tato síla.

Poznámka č. 1

Není-li pérová konstanta S známa, připouští se podle ČSN EN 60 865-1, čl. 2.3.1, rovnice (25) použít hodnotu $S = 10^5 \text{ N/m} = 100 \text{ N/mm}$.

Příklad 5 – Mechanické účinky na lanové vodiče s izolačními závěsy zařízení 220 kV

Výpočet je proveden pro trojfázové uspořádání přípojnic 220 kV se dvěma lanovými vodiči ve svazku podle obrázku 11. V rozpětí jsou čtyři osamělá zatížení, která představují klesačky a přeponky.



obrázek 11: Řez polem lanového přetahu k příkladu 5

1. Vstupní údaje

System:

Nejvyšší provozovací napětí	245 kV
Jmenovité napětí sítě	220 kV
Jmenovitý kmitočet	50 Hz
Jmenovitá výdržná napětí	460/1050 kV
Jmenovitý zkratový proud	$I''_{k3} = 31,5$ kA
Jmenovitý nárazový proud	$i_{p3} = 80$ kA
Doba zkratu	$T_k = 0,5$ s
Min. vzdušná vzdálenost	2100 mm
Min. vzdušná vzdálenost při zkratu	1050 mm

Rozpětí:

Celková délka rozpětí:	$l_r = 54$ m
Fázová rozteč	$a = 4,6$ m
Převýšení	$h = 0,27$ m
Pérová konstanta na obou koncích upnutí	$S = 500$ N/mm

Vodič:

2 x 362-AL1/59-ST1A	
Modul pružnosti	$E = 74,2$ GPa
Součinitel tepelné roztažnosti	$\alpha = 1,89 \cdot 10^{-5}$ K ⁻¹
Hmotnost dílčího vodiče na metr	$m' = 1,4622$ kg.m ⁻¹
Materiál vodiče	AlFe
Průřez dílčího vodiče	$A_s = 421,1$ mm ²

Průřez Al dílčího vodiče	$A_{sAl} = 361,9 \text{ mm}^2$
Průměr dílčího vodiče	$d_s = 26,7 \text{ mm}$
Počet dílčích vodičů	$n = 2$
Osová vzdálenost dílčích vodičů	$a_s = 0,2 \text{ m}$
Vzdálenost mezi rozpěrkami	$l_s = 16 \text{ m}$
	(průměrná vzdálenost mezi rozpěrnými body)

Izolátorová sestava:

S266099HX00

Délka sestavy	$l_i = 3,562 \text{ m}$
Hmotnost sestavy	$m_i = 70,4 \text{ kg}$

Osamělá zatížení:

Zatížení 1	$l_{z1} = 3,5 \text{ m}$	$m_{z1} = 40 \text{ kg}$
Zatížení 2	$l_{z2} = 22,5 \text{ m}$	$m_{z2} = 21 \text{ kg}$
Zatížení 3	$l_{z3} = 42,0 \text{ m}$	$m_{z3} = 21 \text{ kg}$
Zatížení 4	$l_{z4} = 50,5 \text{ m}$	$m_{z4} = 40 \text{ kg}$

Vstupy ze statických výpočtů rozpětí:

Statické výpočty byly provedeny pro max. osový tah 15 kN s montážní tolerancí 20%. Jako výchozí hodnoty pro výpočet kritických zkratů, které je třeba ověřit výpočtem, poslouží výsledky statických výpočtů pro *maximální výpočtovou teplotu* (+80°C) a *základní hodnotu tahu* (15 kN/1,2 = 12,5 kN) a také pro *minimální výpočtovou teplotu* (-30°C) a *zvýšenou hodnotu tahu* (15 kN). V prvním případě se jako kritický parametr zpravidla projevuje minimální vzdušná vzdálenost, ve druhém pak silové účinky (neplatí to ovšem univerzálně!). Statické výpočty prováděné pro jednotlivé zatěžovací stavy nejsou předmětem této normy.

zatěžovací stav	statický tah ve vodiči F_{st}	délka lana l_c	celková délka řetězce l
maximální výpočtová teplota (+80°C) a základní hodnota tahu (12,5 kN)	6540 N	47,21 m	54,37 m
minimální výpočtová teplota (-30°C) a zvýšená hodnota tahu (15 kN)	9203 N	47,00 m	54,16 m

Pro účely výpočtu bude postupováno dle zadaných hodnot. Norma ČSN EN 60 865-1 připouští stanovení $l_c = l_r - 2 \cdot l_i$ a $l = l_r$.

2. Výpočet tahových sil během a po zkratuElektromagnetická síla na jednotku délky:

$$F'_{-30} = \frac{\mu_0}{2\pi} \cdot 0,75 \cdot \frac{I_{k3}^2}{a} \cdot \frac{l_{c,-30}}{l_{-30}} = \frac{4\pi \cdot 10^{-7}}{2\pi} \cdot 0,75 \cdot \frac{31,5^2 \cdot 10^6}{4,6} \cdot \frac{47,00}{54,16} = 28,08 \text{ N} \cdot \text{m}^{-1}$$

$$F'_{80} = \frac{\mu_0}{2\pi} \cdot 0,75 \cdot \frac{I_{k3}^2}{a} \cdot \frac{l_{c,80}}{l_{80}} = \frac{4\pi \cdot 10^{-7}}{2\pi} \cdot 0,75 \cdot \frac{31,5^2 \cdot 10^6}{4,6} \cdot \frac{47,21}{54,37} = 28,09 \text{ N} \cdot \text{m}^{-1}$$

Výsledná hmotnost na jednotku délky dílčího vodiče:

$$m'_{sc,-30} = m'_c + \frac{m_{z1} + m_{z2} + m_{z3} + m_{z4}}{n.l_{c,-30}} = 1,4622 + \frac{40 + 21 + 21 + 40}{2.47,00} = 2,760 \text{ kg.m}^{-1}$$

$$m'_{sc,80} = m'_c + \frac{m_{z1} + m_{z2} + m_{z3} + m_{z4}}{n.l_{c,80}} = 1,4622 + \frac{40 + 21 + 21 + 40}{2.47,21} = 2,754 \text{ kg.m}^{-1}$$

Parametr r :

$$r_{-30} = \frac{F'_{-30}}{n.m'_{sc,-30} \cdot g} = \frac{28,08}{2.2.760.9,81} = 0,518$$

$$r_{80} = \frac{F'_{80}}{n.m'_{sc,80} \cdot g} = \frac{28,09}{2.2.754.9,81} = 0,520$$

Úhel výsledné síly δ_i :

$$\delta_{1,-30} = \arctg(r_{-30}) = \arctg(0,518) = 27,41^\circ$$

$$\delta_{1,80} = \arctg(r_{80}) = \arctg(0,52) = 27,49^\circ$$

Ekvivalentní statické průhyby $b_{c,-30}$ a $b_{c,80}$:

$$b_{c,-30} = \frac{n.m'_{sc,-30} \cdot g \cdot l_{-30}^2}{8.F_{st,-30}} = \frac{2.2.760.9,81.54,16^2}{8.9203} = 2,157 \text{ m}$$

$$b_{c,80} = \frac{n.m'_{sc,80} \cdot g \cdot l_{80}^2}{8.F_{st,80}} = \frac{2.2.754.9,81.54,37^2}{8.6540} = 3,053 \text{ m}$$

Doby kmitání T_{-30} a T_{80} :

$$T_{-30} = 2.\pi \cdot \sqrt{0,8 \cdot \frac{b_{c,-30}}{g}} = 2.\pi \cdot \sqrt{0,8 \cdot \frac{2,157}{9,81}} = 2,636 \text{ s}$$

$$T_{80} = 2.\pi \cdot \sqrt{0,8 \cdot \frac{b_{c,80}}{g}} = 2.\pi \cdot \sqrt{0,8 \cdot \frac{3,053}{9,81}} = 3,134 \text{ s}$$

Protože $T_k = 0,5 \leq 1,054 = 0,4.2,636 = 0,4.T_{-30}$ i $T_k = 0,5 > 1,254 = 0,4.3,134 = 0,4.T_{80}$ bude dále počítáno s $T_{k1} = T_k = 0,5 \text{ s}$

Výsledné doby kmitání $T_{res,-30}$ a $T_{res,80}$:

$$T_{res,-30} = \frac{T_{-30}}{\sqrt[4]{1+r_{-30}^2} \cdot \left[1 - \frac{\pi^2}{64} \cdot \left(\frac{\delta_{1,-30}}{90^\circ}\right)^2\right]} = \frac{2,636}{\sqrt[4]{1+0,518^2} \cdot \left[1 - \frac{\pi^2}{64} \cdot \left(\frac{27,41^\circ}{90^\circ}\right)^2\right]} = 2,519 \text{ s}$$

$$T_{res,80} = \frac{T_{80}}{\sqrt[4]{1+r_{80}^2} \cdot \left[1 - \frac{\pi^2}{64} \cdot \left(\frac{\delta_{1,80}}{90^\circ}\right)^2\right]} = \frac{3,134}{\sqrt[4]{1+0,520^2} \cdot \left[1 - \frac{\pi^2}{64} \cdot \left(\frac{21,49^\circ}{90^\circ}\right)^2\right]} = 2,995 \text{ s}$$

Normované tuhosti N_{-30} a N_{80} a skutečné moduly pružnosti $E_{s,-30}$ a $E_{s,80}$:

Protože $\frac{F_{st,-30}}{n \cdot A_s} = \frac{9203}{2,4,211 \cdot 10^{-4}} = 1,093 \cdot 10^7 \text{ MPa} \leq 5 \cdot 10^7 \text{ MPa} = \sigma_{fin}$ bude skutečný modul pružnosti pro teplotu -30°C menší, a to

$$E_{s,-30} = E \cdot \left[0,3 + 0,7 \cdot \sin\left(\frac{F_{st,-30}}{n \cdot A_s \cdot \sigma_{fin}} \cdot 90^\circ\right)\right] = E \cdot \left[0,3 + 0,7 \cdot \sin\left(\frac{9203}{2,4,211 \cdot 10^{-4} \cdot 5 \cdot 10^7} \cdot 90^\circ\right)\right] = 39,742 \text{ GPa}$$

Obdobně $\frac{F_{st,80}}{n \cdot A_s} = \frac{6540}{2,4,211 \cdot 10^{-4}} = 7,765 \cdot 10^6 \text{ MPa} \leq 5 \cdot 10^7 \text{ MPa} = \sigma_{fin}$ a proto

$$E_{s,80} = E \cdot \left[0,3 + 0,7 \cdot \sin\left(\frac{F_{st,80}}{n \cdot A_s \cdot \sigma_{fin}} \cdot 90^\circ\right)\right] = E \cdot \left[0,3 + 0,7 \cdot \sin\left(\frac{6540}{2,4,211 \cdot 10^{-4} \cdot 5 \cdot 10^7} \cdot 90^\circ\right)\right] = 34,806 \text{ GPa}$$

Protože počáteční i koncová konstrukce nemá žádné další navazující rozpětí, je výsledná pérová konstanta rovna

$$S_v = \left(\frac{1}{S_1} + \frac{1}{S_2}\right)^{-1} = \frac{S}{2} = \frac{500}{2} = 250 \text{ N} \cdot \text{mm}^{-1}$$

V tomto případě se jedná o konstrukce se stejným S . Výsledná pérová konstanta je potom poloviční. Obě konstrukce tedy přispívají ke kontrakci rozpětí stejným dílem.

Normované tuhosti jsou:

$$N_{-30} = \frac{1}{S_v \cdot l_{-30}} + \frac{1}{n \cdot E_{s,-30} \cdot A_s} = \frac{1}{2,5 \cdot 10^5 \cdot 54,16} + \frac{1}{2,3,9742 \cdot 10^{10} \cdot 4,211 \cdot 10^{-4}} = 1,037 \cdot 10^{-7} \text{ N}^{-1}$$

$$N_{80} = \frac{1}{S_v \cdot l_{80}} + \frac{1}{n \cdot E_{s,80} \cdot A_s} = \frac{1}{2,5 \cdot 10^5 \cdot 54,37} + \frac{1}{2,3,4806 \cdot 10^{10} \cdot 4,211 \cdot 10^{-4}} = 1,077 \cdot 10^{-7} \text{ N}^{-1}$$

Součinitelé napjatosti ζ_{-30} a ζ_{80} :

$$\zeta_{-30} = \frac{(n \cdot m_{sc,-30} \cdot g \cdot l_{-30})^2}{24 \cdot F_{st,-30}^3 \cdot N_{-30}} = \frac{(2,2,760,9,81,54,16)^2}{24 \cdot 9203^3 \cdot 1,037 \cdot 10^{-7}} = 3,338$$

$$\zeta_{80} = \frac{(n \cdot m_{sc,80} \cdot g \cdot l_{80})^2}{24 \cdot F_{st,80}^3 \cdot N_{80}} = \frac{(2,2,754,9,81,54,37)^2}{24 \cdot 6540^3 \cdot 1,077 \cdot 10^{-7}} = 8,983$$

Úhly vychýlení na konci zkratu $\delta_{k,-30}$ a $\delta_{k,80}$:

Protože $\frac{T_k}{T_{res,-30}} = \frac{0,5}{2,519} = 0,198 \leq 0,5$, výpočet se provádí následovně:

$$\delta_{k,-30} = \delta_{1,-30} \cdot \left[1 - \cos \left(360^\circ \cdot \frac{T_k}{T_{res,-30}} \right) \right] = 27,41^\circ \cdot [1 - \cos(360^\circ \cdot 0,198)] = 18,68^\circ$$

Protože $\frac{T_k}{T_{res,80}} = \frac{0,5}{2,995} = 0,167 \leq 0,5$:

$$\delta_{k,80} = \delta_{1,80} \cdot \left[1 - \cos \left(360^\circ \cdot \frac{T_k}{T_{res,80}} \right) \right] = 27,49^\circ \cdot [1 - \cos(360^\circ \cdot 0,167)] = 13,79^\circ$$

Určení součinitelů χ_{-30} a χ_{80} :

Protože $0^\circ \leq \delta_{k,-30} = 18,68^\circ \leq 90^\circ$ bude

$$\chi_{-30} = 1 - r_{-30} \cdot \sin(\delta_{k,-30}) = 1 - 0,518 \cdot \sin(18,68^\circ) = 0,834$$

Protože $0^\circ \leq \delta_{k,80} = 13,79^\circ \leq 90^\circ$ bude také

$$\chi_{80} = 1 - r_{80} \cdot \sin(\delta_{k,80}) = 1 - 0,520 \cdot \sin(13,79^\circ) = 0,876$$

Maximální úhly vychýlení $\delta_{m,-30}$ a $\delta_{m,80}$:

Protože $0,766 \leq \chi_{-30} = 0,834 \leq 1$, bude

$$\delta_{m,-30} = \frac{180}{\pi} \cdot 1,25 \cdot \arccos \chi_{-30} = \frac{180}{\pi} \cdot 1,25 \cdot \arccos 0,834 = 41,88^\circ$$

Protože $0,766 \leq \chi_{80} = 0,876 \leq 1$, bude také

$$\delta_{m,80} = \frac{180}{\pi} \cdot 1,25 \cdot \arccos \chi_{80} = \frac{180}{\pi} \cdot 1,25 \cdot \arccos 0,876 = 36,06^\circ$$

Určení součinitelů φ_{-30} a φ_{80} :

Protože $T_k = 0,5 < 0,629 = \frac{2,519}{4} = \frac{T_{res,-30}}{4}$ bude

$$\varphi_{-30} = 3 \cdot (r_{-30} \cdot \sin(\delta_{k,-30}) + \cos(\delta_{k,-30}) - 1) = 3 \cdot (0,518 \cdot \sin(18,68^\circ) + \cos(18,68^\circ) - 1) = 0,340$$

Protože $T_k = 0,5 < 0,749 = \frac{2,995}{4} = \frac{T_{res,80}}{4}$ bude

$$\varphi_{80} = 3 \cdot (r_{80} \cdot \sin(\delta_{k,80}) + \cos(\delta_{k,80}) - 1) = 3 \cdot (0,520 \cdot \sin(13,79^\circ) + \cos(13,79^\circ) - 1) = 0,285$$

Určení součinitelů ψ_{-30} a ψ_{80} :

Součinitele ψ mohou být určeny z kubické rovnice

$$\varphi^2 \cdot \psi^3 + \varphi \cdot (2 + \zeta) \cdot \psi^2 + (1 + 2 \cdot \zeta) \cdot \psi - \zeta \cdot (2 + \varphi)$$

nebo odčteny z obrázku 7, normy ČSN EN 60 865-1

pro tento případ vychází: $\psi_{-30} = 0,841$ a $\psi_{80} = 0,935$

Tahová síla během zkratu $F_{t,-30}$ a $F_{t,80}$:

$$F_{t,-30} = 1,1 \cdot F_{st,-30} \cdot (1 + \psi_{-30} \cdot \varphi_{-30}) = 1,1 \cdot 9203 \cdot (1 + 0,841 \cdot 0,340) = 13020 \text{ N}$$

$$F_{t,80} = 1,1 \cdot F_{st,80} \cdot (1 + \psi_{80} \cdot \varphi_{80}) = 1,1 \cdot 6540 \cdot (1 + 0,935 \cdot 0,285) = 9115 \text{ N}$$

Tahová síla po zkratu $F_{f,-30}$ a $F_{f,80}$ (pád vodiče):

Pro -30°C a pro 80°C platí

$$r_{-30} = 0,518 < 0,6 \text{ a } \delta_{m,-30} = 41,88^\circ < 70^\circ$$

$$r_{80} = 0,520 < 0,6 \text{ a } \delta_{m,80} = 36,06^\circ < 70^\circ$$

a tedy není splněna ani jedna z podmínek pro obě teploty a proto tuto sílu pro další výpočty a vyhodnocení neuvažujeme.

3. Výpočet minimální vzdušné vzdálenosti

Následující výpočty týkající se minimální vzdušné vzdálenosti berou v úvahu pouze stav při $+80^\circ\text{C}$, při kterém je její hodnota vždy vyšší než při -30°C .

Určení součinitele ε_{ela} :

$$\varepsilon_{ela} = N_{80} \cdot (F_{t,80} - F_{st,80}) = 1,077 \cdot 10^{-7} \cdot (9115 - 6540) = 2,773 \cdot 10^{-4}$$

Určení součinitele ε_{th} :

$$\text{Protože } T_k = 0,5 < 0,749 = \frac{2,995}{4} = \frac{T_{res,80}}{4}$$

a protože $A_{sAl} / A_{sFe} = A_{sAl} / (A_s - A_{sAl}) = 361,9 / (421,1 - 361,9) = 6,11 > 6$, bude

$$c_{th} = 2,7 \cdot 10^{-19} \text{ m}^4 \cdot \text{A}^{-1} \cdot \text{s}^{-1} \text{ a tedy}$$

$$\varepsilon_{th} = c_{th} \cdot \left(\frac{I_{k3}''}{n \cdot A_s} \right)^2 \cdot T_k = 2,7 \cdot 10^{-19} \cdot \left(\frac{31,5 \cdot 10^3}{2,4 \cdot 211 \cdot 10^{-4}} \right)^2 \cdot 0,5 = 1,889 \cdot 10^{-4}$$

Určení součinitele C_D :

$$C_D = \sqrt{1 + \frac{3}{8} \cdot \left(\frac{l_{80}}{b_{c,80}} \right)^2 \cdot (\varepsilon_{th} + \varepsilon_{ela})} = \sqrt{1 + \frac{3}{8} \cdot \left(\frac{54,37}{3,053} \right)^2 (1,889 \cdot 10^{-4} + 2,773 \cdot 10^{-4})} = 1,027$$

Určení součinitele C_F :

Protože $r_{80} = 0,520 \leq 0,8$

$$C_F = 1,05$$

Určení horizontální výchylky b_h :

Protože se jedná o rozpětí z izolačními závěsy a $\delta_{m,80} = 36,06^\circ \geq 27,49^\circ = \delta_{1,80}$

$$b_h = C_F \cdot C_D \cdot b_{c,80} \cdot \sin \delta_{1,80} = 1,05 \cdot 1,027 \cdot 3,053 \cdot \sin(27,49^\circ) = 1,519 \text{ m}$$

Určení minimální vzdušné vzdálenosti a_{min} :

$$a_{min} = a - 2 \cdot b_h = 4,6 - 2 \cdot 1,519 = 1,562 \text{ m}$$

4. Výpočet kontrakční síly svazku

Určení součinitele ν_l :

$$\nu_{1,-30} = f \cdot \frac{1}{\sin \frac{180^\circ}{n}} \cdot \frac{\sqrt{(a_s - d_s) \cdot m'_{sc,-30}}}{\sqrt{\frac{\mu_0}{2 \cdot \pi} \cdot \left(\frac{I''_{k3}}{n} \right)^2 \cdot \frac{n-1}{a_s}}} = 50 \cdot \frac{1}{\sin \frac{180^\circ}{2}} \cdot \frac{\sqrt{(0,2 - 0,0267) \cdot 2,760}}{\sqrt{\frac{4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}}{2 \cdot \pi} \cdot \left(\frac{31,5 \cdot 10^3}{2} \right)^2 \cdot \frac{2-1}{0,2}}} = 2,196$$

$$\nu_{1,80} = f \cdot \frac{1}{\sin \frac{180^\circ}{n}} \cdot \frac{\sqrt{(a_s - d_s) \cdot m'_{sc,80}}}{\sqrt{\frac{\mu_0}{2 \cdot \pi} \cdot \left(\frac{I''_{k3}}{n} \right)^2 \cdot \frac{n-1}{a_s}}} = 50 \cdot \frac{1}{\sin \frac{180^\circ}{2}} \cdot \frac{\sqrt{(0,2 - 0,0267) \cdot 2,754}}{\sqrt{\frac{4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}}{2 \cdot \pi} \cdot \left(\frac{31,5 \cdot 10^3}{2} \right)^2 \cdot \frac{2-1}{0,2}}} = 2,192$$

Určení součinitele ν_3 :

Součinitel ν_3 lze určit z ČSN EN 60 865-1, obrázku 9 nebo vypočítat analyticky jako:

$$\nu_3 = \frac{d_s / a_s}{\sin \frac{180^\circ}{n}} \cdot \frac{\sqrt{a_s / d_s - 1}}{\arctan \sqrt{a_s / d_s - 1}} = \frac{0,2 / 0,0267}{\sin \frac{180^\circ}{2}} \cdot \frac{\sqrt{0,2 / 0,0267 - 1}}{\arctan \sqrt{0,2 / 0,0267 - 1}} = 0,284$$

Určení součinitele v_2 :

Součinitel v_2 lze určit z ČSN EN 60 865-1, obrázku 8 jako funkce v_1 a κ ($\kappa = \frac{80}{31,5 \cdot \sqrt{2}} = 1,795$)

nebo vypočítat analyticky jako:

$$v_2 = 1 - \frac{\sin(4\pi \cdot f \cdot T_{pi} - 2\gamma) + \sin(2\gamma)}{4\pi \cdot f \cdot T_{pi}} + \frac{f \cdot \tau}{f \cdot T_{pi}} \cdot \left(1 - e^{-\frac{2 \cdot f \cdot T_{pi}}{f \cdot \tau}}\right) \cdot \sin^2(\gamma) -$$

$$\frac{8\pi \cdot f \cdot \tau \cdot \sin(\gamma)}{1 + (2\pi \cdot f \cdot \tau)^2} \cdot \left[\left(\frac{2\pi \cdot f \cdot \tau \cdot \cos(2\pi \cdot f \cdot T_{pi} - \gamma)}{2\pi \cdot f \cdot T_{pi}} + \frac{\sin(2\pi \cdot f \cdot T_{pi} - \gamma)}{2\pi \cdot f \cdot T_{pi}} \right) \cdot e^{-\frac{f \cdot T_{pi}}{f \cdot \tau}} \right] +$$

$$\frac{\sin(\gamma) - 2\pi \cdot f \cdot \tau \cdot \cos(\gamma)}{2\pi \cdot f \cdot T_{pi}}$$

kde τ je časová konstanta sítě a může být vypočítána jako

$$\tau = -\frac{2\pi \cdot f}{3} \cdot \ln \frac{\kappa - 1,02}{0,98}, \quad \kappa \geq 1,1$$

a

$$\gamma = \arctan(2\pi \cdot f \cdot \tau)$$

$f \cdot T_{pi}$ je řešení vztahu $v_1 = f \cdot T_{pi} \cdot \sqrt{v_2}$

Hodnotu v_2 tak obdržíme jako řešení soustavy dvou transcendentních rovnic pro neznámé v_2 a $f \cdot T_{pi}$. Výpočtem bylo zjištěno:

$$v_{2,-30} = 2,077 \quad \text{a} \quad v_{2,80} = 2,075$$

Určení zkratové síly F_v :

$$F_{v,-30} = (n-1) \cdot \frac{\mu_0}{2\pi} \cdot \left(\frac{I''_{k3}}{n}\right)^2 \cdot \frac{l_s}{a_s} \cdot \frac{v_{2,-30}}{v_3} = (2-1) \cdot \frac{4\pi \cdot 10^{-7}}{2\pi} \cdot \left(\frac{31,5 \cdot 10^3}{2}\right)^2 \cdot \frac{16}{0,2} \cdot \frac{2,077}{0,284} = 29004 \text{ N}$$

$$F_{v,80} = (n-1) \cdot \frac{\mu_0}{2\pi} \cdot \left(\frac{I''_{k3}}{n}\right)^2 \cdot \frac{l_s}{a_s} \cdot \frac{v_{2,80}}{v_3} = (2-1) \cdot \frac{4\pi \cdot 10^{-7}}{2\pi} \cdot \left(\frac{31,5 \cdot 10^3}{2}\right)^2 \cdot \frac{16}{0,2} \cdot \frac{2,075}{0,284} = 28973 \text{ N}$$

Určení součinitele napjatosti ε_{st} :

$$\varepsilon_{st,-30} = 1,5 \cdot \frac{F_{st,-30} \cdot I_s^2 \cdot N_{-30}}{(a_s - d_s)^2} \cdot \left[\sin \frac{180^\circ}{n}\right]^2 = 1,5 \cdot \frac{9203 \cdot 16^2 \cdot 1,037 \cdot 10^{-7}}{(0,2 - 0,0267)^2} \cdot \left[\sin \frac{180^\circ}{2}\right]^2 = 12,206$$

$$\varepsilon_{st,80} = 1,5 \cdot \frac{F_{st,80} \cdot I_s^2 \cdot N_{80}}{(a_s - d_s)^2} \cdot \left[\sin \frac{180^\circ}{n}\right]^2 = 1,5 \cdot \frac{6540 \cdot 16^2 \cdot 1,077 \cdot 10^{-7}}{(0,2 - 0,0267)^2} \cdot \left[\sin \frac{180^\circ}{2}\right]^2 = 9,004$$

Určení součinitele napjatosti ε_{pi} :

$$\varepsilon_{pi,-30} = 0,375.n \cdot \frac{F_{v,-30} \cdot I_s^3 \cdot N_{-30}}{(a_s - d_s)^3} \cdot \left[\sin \frac{180^\circ}{n} \right]^3 = 0,375.2 \cdot \frac{29004.16^3 \cdot 1,037.10^{-7}}{(0,2 - 0,0267)^3} \cdot \left[\sin \frac{180^\circ}{2} \right]^3 = 1776$$

$$\varepsilon_{pi,80} = 0,375.n \cdot \frac{F_{v,80} \cdot I_s^3 \cdot N_{80}}{(a_s - d_s)^3} \cdot \left[\sin \frac{180^\circ}{n} \right]^3 = 0,375.2 \cdot \frac{28973.16^3 \cdot 1,077.10^{-7}}{(0,2 - 0,0267)^3} \cdot \left[\sin \frac{180^\circ}{2} \right]^3 = 1841$$

Určení parametru j :

$$j_{-30} = \sqrt{\frac{\varepsilon_{pi,-30}}{1 + \varepsilon_{st,-30}}} = \sqrt{\frac{1776}{1 + 12,206}} = 11,596$$

$$j_{80} = \sqrt{\frac{\varepsilon_{pi,80}}{1 + \varepsilon_{st,80}}} = \sqrt{\frac{1841}{1 + 9,004}} = 13,567$$

V obou případech je $j \geq 1$ a dochází tak k účinnému sevření vodičů. Dále se postupuje podle 2.3.3.2 normy ČSN EN 60 865-1

Určení součinitele ξ :

Součinitel se určí buď z obrázku 10 normy ČSN EN 60 865-1 nebo jako řešení rovnice

$$\xi^3 + \varepsilon_{st} \cdot \xi^2 - \varepsilon_{pi} = 0$$

V tomto případě vycházejí $\xi_{-30} = 9,124$ a $\xi_{80} = 9,876$

Určení součinitele v_4 :

$$v_4 = \frac{a_s - d_s}{d_s} = \frac{0,2 - 0,0267}{0,0267} = 6,491$$

Určení součinitele v_e :

$$v_{e,-30} = \frac{1}{2} + \left[\frac{9}{8} \cdot n \cdot (n-1) \cdot \frac{\mu_0}{2\pi} \cdot N_{-30} \cdot \left(\frac{I_{k3}''}{n} \right)^2 \cdot v_{2,-30} \cdot \left(\frac{l_s}{a_s - d_s} \right)^4 \cdot \frac{\sin \frac{180^\circ}{n}}{\xi_{-30}^3} \cdot \left(1 - \frac{\arctan \sqrt{v_4}}{\sqrt{v_4}} \right) - \frac{1}{4} \right]^{\frac{1}{2}} =$$

$$= \frac{1}{2} + \left[\frac{9}{8} \cdot 2 \cdot (2-1) \cdot \frac{4\pi \cdot 10^{-7}}{2\pi} \cdot 1,037 \cdot 10^{-7} \cdot \left(\frac{31,5 \cdot 10^3}{2} \right)^2 \cdot 2,077 \cdot \left(\frac{16}{0,2 - 0,0267} \right)^4 \cdot \left[\frac{\sin \frac{180^\circ}{2}}{9,124^3} \cdot \left(1 - \frac{\arctan \sqrt{6,491}}{\sqrt{6,491}} \right) - \frac{1}{4} \right] \right]^{\frac{1}{2}} = 1,485$$

$$v_{e,80} = \frac{1}{2} + \left[\frac{9}{8} \cdot n \cdot (n-1) \cdot \frac{\mu_0}{2\pi} \cdot N_{80} \cdot \left(\frac{I_{k3}''}{n} \right)^2 \cdot v_{2,80} \cdot \left(\frac{l_s}{a_s - d_s} \right)^4 \cdot \frac{\sin 180^\circ}{\xi_{80}^3} \cdot \left(1 - \frac{\arctan \sqrt{v_4}}{\sqrt{v_4}} \right) - \frac{1}{4} \right]^{\frac{1}{2}} =$$

$$= \frac{1}{2} + \left[\frac{9}{8} \cdot 2 \cdot (2-1) \cdot \frac{4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}}{2\pi} \cdot 1,077 \cdot 10^{-7} \cdot \left(\frac{31,5 \cdot 10^3}{2} \right)^2 \cdot 2,075 \cdot \left(\frac{16}{0,2 - 0,0267} \right)^4 \cdot \frac{\sin 180^\circ}{9,876^3} \cdot \left(1 - \frac{\arctan \sqrt{6,491}}{\sqrt{6,491}} \right) - \frac{1}{4} \right]^{\frac{1}{2}} = 1,365$$

Určení kontrakční síly F_{pi} :

$$F_{pi,-30} = F_{st,-30} \cdot \left(1 + \frac{v_{e,-30}}{\varepsilon_{st,-30}} \cdot \xi_{-30} \right) = 9203 \cdot \left(1 + \frac{1,485}{12,206} \cdot 9,124 \right) = 19417 \text{ N}$$

$$F_{pi,80} = F_{st,80} \cdot \left(1 + \frac{v_{e,80}}{\varepsilon_{st,80}} \cdot \xi_{80} \right) = 6540 \cdot \left(1 + \frac{1,365}{9,004} \cdot 9,876 \right) = 16328 \text{ N}$$

5. Vyhodnocení

stav	-30°C, max. tah	80°C, zákl. tah
síla během zkratu F_t	13,0 kN	9,1 kN
síla po zkratu F_f	-	-
kontrakční síla F_{pi}	19,4 kN	16,3 kN
min. vzdušná vzdálenost a_{\min}	-	1562 mm

Protože 1562 mm > 1050 mm je zavěšení lana z hlediska doskoku vyhovující podle ČSN 33 3201.

Extrémní silové namáhání je maximum z vypočtených sil F_t , F_f a F_{pi} . V tomto případě maximum nastává při zvýšeném tahu -30°C a kontrakci svazku $F_{pi,-30} = 19,4$ kN.

Pro *izolátory a spojovací armatury* musí být dovolené hodnoty udané výrobcem větší než tato síla.

Pro *konstrukce* se musí počítat s touto hodnotou jako statickým zatížením. Z hlediska statických výpočtů pro konstrukce se však nejedná o statické zatížení trvalé (jako je například statický výpočet napínání lana), ale statické zatížení dočasné, které klade nižší nároky na celkové zatížení konstrukce. Při navrhování konstrukcí pro trojfázové obvody se dovoluje zohlednit fakt, že síly F_t a F_f působí pouze ve dvou fázích a třetí je vystavena pouze statickému tahu F_{st} . Vzhledem k faktu, že kontrakční síla F_{pi} nepůsobí u trojfázových obvodů v jeden okamžik, ale je v každé fázi časově posunuta, povoluje se při návrhu konstrukce počítat se zatížením od F_{pi} pouze ve dvou fázích a třetí je vystavena pouze statickému tahu F_{st} .

Pro *základy konstrukcí* platí podle 73/152/CDV tytéž předpoklady jako pro konstrukce. U monolitických základů se díky jejich setrvačnosti a dynamickému charakteru zkratu při jejich návrhu nemusí tyto síly zohledňovat. Postačí, jestliže se při návrhu základů vycházelo ze zatěžovacích stavů (extrémní teplota, vítr, námrazek apod.).

Poznámka č. 1

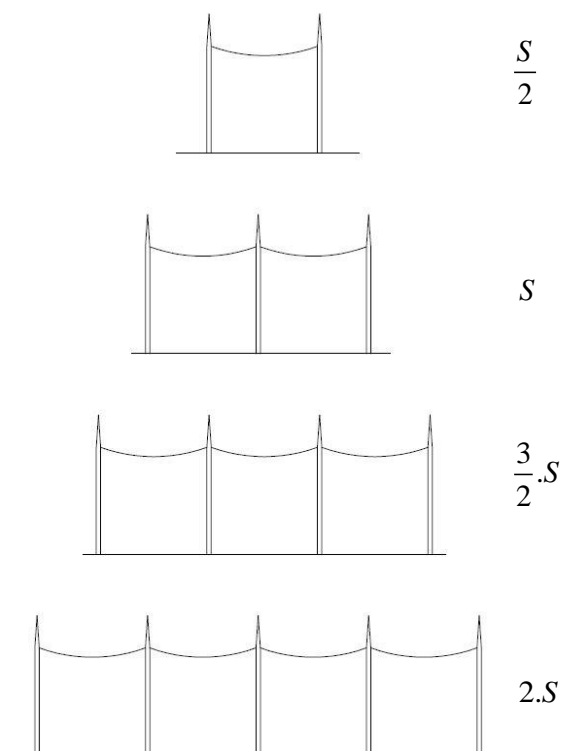
Pérová konstanta S je v těchto výpočtech vztažena na jednu řetězovku, nikoli na celou konstrukci! V případě, že je pérová konstanta vztažena ke konstrukci je nutné ji vydělit počtem upnutých řetězovek (v jednom směru). Dokument 73/152/CDV uvádí typické hodnoty pérových konstant **vztažených na jednu konstrukci** (S_k) podle běžně užívaných konstrukcí na jednotlivých napěťových hladinách.

napěťová hladina	S_k
123 kV	150 – 1300 N/mm
245 kV	400 – 2000 N/mm
420 kV	600 – 3000 N/mm

Dříve používaná pérová konstanta ρ uváděná v [m/N] je převrácenou hodnotou S .

Poznámka č. 2

Pro více stejných rozpětí za sebou je možné uvažovat s pérovou konstantou pro rozpětí dle následujícího obrázku 12.



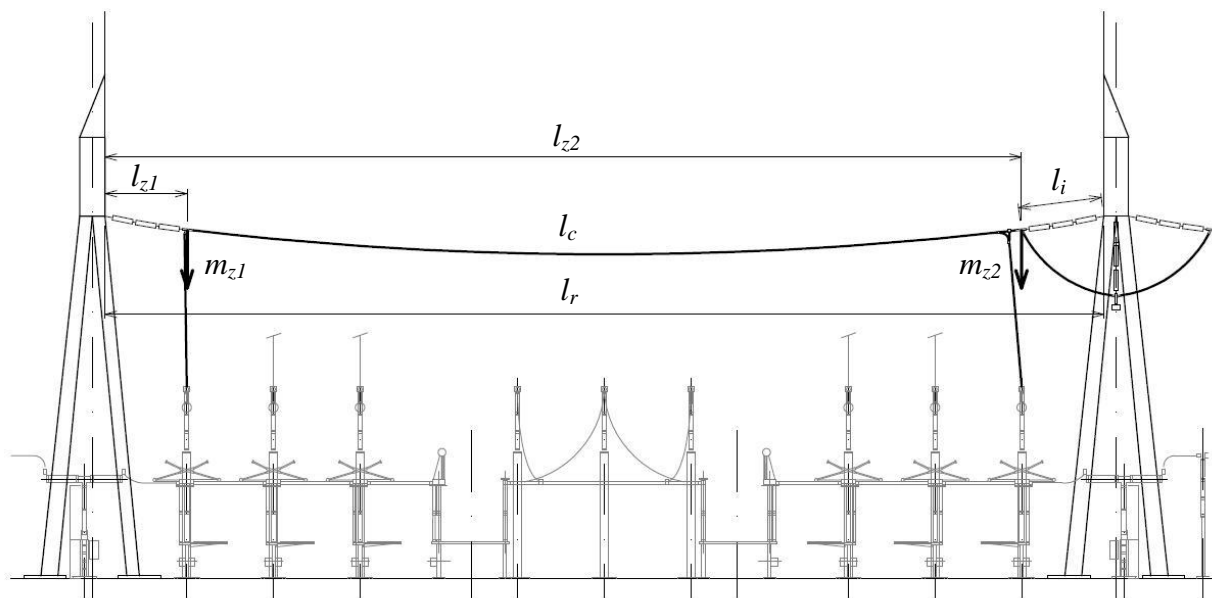
obrázek 12: Pérové konstanty pro více rozpětí

Poznámka č. 3

Výpočty byly provedeny pro obě teploty i v případech, kdy jsou rozdíly vypočtených veličin mezi stavy minimální. Týká se to všech výpočtů, kde se projevuje změna délky lana vlivem teploty. V běžných případech postačí počítat s jednou (teplotně nezávislou) vstupní hodnotou l_c . Postup uvedený výše je vhodnější pro programové zpracování.

Příklad 6 – Mechanické účinky na lanové vodiče s izolačními závěsy zařízení 420 kV

Výpočet je proveden pro trojfázové uspořádání přípojníc 420 kV se třemi lanovými vodiči ve svazku podle obrázku 13. V rozpětí jsou dvě osamělá zatížení, která představují klesačky a přeponky.



obrázek 13: Řez polem lanového přetahu k příkladu 6

1. Vstupní údaje

System:

Nejvyšší provozovací napětí	420 kV
Jmenovité napětí sítě	400 kV
Jmenovitý kmitočet	50 Hz
Jmenovitá výdržná napětí	1050 kV (spínací impuls, fáze-země) 1550 kV (spínací impuls, fáze-fáze) 1425 kV (atmosférický impuls, fáze-země) 1665 kV (atmosférický impuls, fáze-fáze)
Jmenovitý zkratový proud	$I''_{k3} = 63 \text{ kA}$
Jmenovitý nárazový proud	$i_{p3} = 160 \text{ kA}$
Doba zkratu	$T_k = 0,5 \text{ s}$
Min. vzdušná vzdálenost	2600 mm (vodič-konstrukce) 3600 mm (vodič-vodič)
Min. vzdušná vzdálenost při zkratu	1300 mm (vodič-konstrukce) 1800 mm (vodič-vodič)

Rozpětí:

Počet fázových vodičů v rozpětí	$n_f = 3$
Počet stejných rozpětí za sebou	$n_r = 2$
Celková délka rozpětí:	$l_r = 63 \text{ m}$
Fázová rozteč	$a = 6,5 \text{ m}$

Převýšení	$h = 0 \text{ m}$
Pérové konstanty konstrukcí	$S_k = 3000 \text{ N/mm}$
Ekvivalentní pérová konstanta na obou koncích upnutí	$S = \frac{n_r \cdot S_k}{n_f} = \frac{2 \cdot 3000}{3} = 2000 \text{ N/mm}$

Vodič:

3 x 758-AL1/43-ST1A	
Modul pružnosti	$E = 62,3 \text{ GPa}$
Součinitel tepelné roztažnosti	$\alpha = 2,11 \cdot 10^{-5} \text{ K}^{-1}$
Hmotnost dílčího vodiče na metr	$m' = 2,4364 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-1}$
Materiál vodiče	AlFe
Průřez dílčího vodiče	$A_s = 801,2 \text{ mm}^2$
Průřez Al dílčího vodiče	$A_{sAl} = 758,1 \text{ mm}^2$
Průměr dílčího vodiče	$d_s = 36,5 \text{ mm}$

Počet dílčích vodičů	$n = 3$
Osová vzdálenost dílčích vodičů	rovinné uspořádání s roztečemi $a_{12} = 0,2 \text{ m}$ $a_{23} = 0,2 \text{ m}$ $a_{13} = 0,4 \text{ m}$
Ekviv. osová vzdálenost dílčích vodičů	$a_s = \sqrt[3]{a_{12} \cdot a_{23} \cdot a_{13}} = \sqrt[3]{0,2 \cdot 0,2 \cdot 0,4} = 0,25 \text{ m}$
Vzdálenost mezi rozpěrkami	$l_s = 25 \text{ m}$ (jedna rozpěrka umístěná v polovině rozpětí)

Izolátorová sestava:

(2 články paralelně x 3 články sériově)

Délka sestavy	$l_i = 6,128 \text{ m}$
Hmotnost sestavy	$m_i = 211,8 \text{ kg}$

Osamělá zatížení:

Zatížení 1	$l_{z1} = 6,2 \text{ m}$	$m_{z1} = 30 \text{ kg}$
Zatížení 2	$l_{z2} = 56,8 \text{ m}$	$m_{z2} = 60 \text{ kg}$

Vstupy ze statických výpočtů rozpětí:

Obdobě jako v předchozím příkladě byly statické výpočty provedeny pro max. osový tah 40 kN s montážní tolerancí 10%. Jako výchozí hodnoty pro výpočet kritických zkratů, které je třeba ověřit výpočtem, poslouží výsledky statických výpočtů pro *maximální výpočtovou teplotu* (+80°C) a *základní hodnotu tahu* ($F_{stMAX} = 40 \text{ kN}/1,1 = 36,364 \text{ kN}$) a také pro *minimální výpočtovou teplotu* (-30°C) a *zvýšenou hodnotu tahu* (40 kN).

zatěžovací stav	statický tah ve vodiči F_{st}	délka lana l_c	celková délka řetězce l
maximální výpočtová teplota (+80°C) a základní hodnota tahu (36,364 kN)	19576 N	50,939 m	63,195 m
minimální výpočtová teplota (-30°C) a zvýšená hodnota tahu (40 kN)	31677 N	50,793 m	63,049 m

Pro účely výpočtu bude postupováno dle zadaných hodnot. Norma ČSN EN 60 865-1 připouští stanovení $l_c = l_r - 2 \cdot l_i$ a $l = l_r$.

2. Výpočet tahových sil během a po zkratu

Elektromagnetická síla na jednotku délky:

$$F'_{-30} = \frac{\mu_0}{2\pi} \cdot 0,75 \cdot \frac{I_{k3}^2}{a} \cdot \frac{l_{c,-30}}{l_{-30}} = \frac{4\pi \cdot 10^{-7}}{2\pi} \cdot 0,75 \cdot \frac{63^2 \cdot 10^6}{6,5} \cdot \frac{50,793}{63,049} = 73,79 \text{ N.m}^{-1}$$

$$F'_{80} = \frac{\mu_0}{2\pi} \cdot 0,75 \cdot \frac{I_{k3}^2}{a} \cdot \frac{l_{c,80}}{l_{80}} = \frac{4\pi \cdot 10^{-7}}{2\pi} \cdot 0,75 \cdot \frac{63^2 \cdot 10^6}{6,5} \cdot \frac{50,939}{63,195} = 73,83 \text{ N.m}^{-1}$$

Výsledná hmotnost na jednotku délky dílčího vodiče:

$$m'_{sc,-30} = m'_c + \frac{m_{z1} + m_{z2}}{n \cdot l_{c,-30}} = 2,4364 + \frac{30 + 60}{3,50,793} = 3,027 \text{ kg.m}^{-1}$$

$$m'_{sc,80} = m'_c + \frac{m_{z1} + m_{z2}}{n \cdot l_{c,80}} = 2,4364 + \frac{30 + 60}{3,50,939} = 3,019 \text{ kg.m}^{-1}$$

Parametr r :

$$r_{-30} = \frac{F'_{-30}}{n \cdot m'_{sc,-30} \cdot g} = \frac{73,79}{3,3,027 \cdot 9,81} = 0,828$$

$$r_{80} = \frac{F'_{80}}{n \cdot m'_{sc,80} \cdot g} = \frac{73,83}{3,3,025 \cdot 9,81} = 0,831$$

Úhel výsledné síly δ_j :

$$\delta_{1,-30} = \arctg(r_{-30}) = \arctg(0,828) = 39,64^\circ$$

$$\delta_{1,80} = \arctg(r_{80}) = \arctg(0,831) = 39,72^\circ$$

Ekvivalentní statické průhyby $b_{c,-30}$ a $b_{c,80}$:

$$b_{c,-30} = \frac{n \cdot m'_{sc,-30} \cdot g \cdot l_{-30}^2}{8 \cdot F_{st,-30}} = \frac{3,3,027 \cdot 9,81 \cdot 63,049^2}{8 \cdot 31677} = 1,397 \text{ m}$$

$$b_{c,80} = \frac{n \cdot m'_{sc,80} \cdot g \cdot l_{80}^2}{8 \cdot F_{st,80}} = \frac{2,3,019 \cdot 9,81 \cdot 63,195^2}{8 \cdot 19576} = 2,266 \text{ m}$$

Doby kmitání T_{-30} a T_{80} :

$$T_{-30} = 2\pi \cdot \sqrt{0,8 \cdot \frac{b_{c,-30}}{g}} = 2\pi \cdot \sqrt{0,8 \cdot \frac{1,397}{9,81}} = 2,121 \text{ s}$$

$$T_{80} = 2\pi \cdot \sqrt{0,8 \cdot \frac{b_{c,80}}{g}} = 2\pi \cdot \sqrt{0,8 \cdot \frac{2,266}{9,81}} = 2,701 \text{ s}$$

Protože $T_k = 0,5 \leq 0,848 = 0,4 \cdot T_{-30}$ i $T_k = 0,5 > 1,080 = 0,4 \cdot T_{80}$ bude dále počítáno s $T_{k1} = T_k = 0,5$ s

Výsledné doby kmitání $T_{res,-30}$ a $T_{res,80}$:

$$T_{res,-30} = \frac{T_{-30}}{\sqrt[4]{1+r_{-30}^2} \cdot \left[1 - \frac{\pi^2}{64} \cdot \left(\frac{\delta_{1,-30}}{90^\circ}\right)^2\right]} = \frac{2,121}{\sqrt[4]{1+0,828^2} \cdot \left[1 - \frac{\pi^2}{64} \cdot \left(\frac{39,64^\circ}{90^\circ}\right)^2\right]} = 1,919 \text{ s}$$

$$T_{res,80} = \frac{T_{80}}{\sqrt[4]{1+r_{80}^2} \cdot \left[1 - \frac{\pi^2}{64} \cdot \left(\frac{\delta_{1,80}}{90^\circ}\right)^2\right]} = \frac{2,701}{\sqrt[4]{1+0,831^2} \cdot \left[1 - \frac{\pi^2}{64} \cdot \left(\frac{39,72^\circ}{90^\circ}\right)^2\right]} = 2,442 \text{ s}$$

Normované tuhosti N_{-30} a N_{80} a skutečné moduly pružnosti $E_{s,-30}$ a $E_{s,80}$:

Protože $\frac{F_{st,-30}}{n \cdot A_s} = \frac{31677}{3,8,012 \cdot 10^{-4}} = 1,318 \cdot 10^7 \text{ MPa} \leq 5 \cdot 10^7 \text{ MPa} = \sigma_{fin}$ bude skutečný modul pružnosti pro teplotu -30°C menší, a to

$$E_{s,-30} = E \cdot \left[0,3 + 0,7 \cdot \sin\left(\frac{F_{st,-30}}{n \cdot A_s \cdot \sigma_{fin}} \cdot 90^\circ\right)\right] = E \cdot \left[0,3 + 0,7 \cdot \sin\left(\frac{31677}{3,8,012 \cdot 10^{-4} \cdot 5 \cdot 10^7} \cdot 90^\circ\right)\right] = 36,232 \text{ GPa}$$

Obdobně $\frac{F_{st,80}}{n \cdot A_s} = \frac{19576}{3,8,012 \cdot 10^{-4}} = 8,144 \cdot 10^6 \text{ MPa} \leq 5 \cdot 10^7 \text{ MPa} = \sigma_{fin}$ a proto

$$E_{s,80} = E \cdot \left[0,3 + 0,7 \cdot \sin\left(\frac{F_{st,80}}{n \cdot A_s \cdot \sigma_{fin}} \cdot 90^\circ\right)\right] = E \cdot \left[0,3 + 0,7 \cdot \sin\left(\frac{19540}{3,8,012 \cdot 10^{-4} \cdot 5 \cdot 10^7} \cdot 90^\circ\right)\right] = 29,727 \text{ GPa}$$

Protože se jedná o dvě stejná navazující rozpětí, je možné pérovou konstantu jedné řetězovky vypočítat (viz. obrázek 12) jako

$$S_v = \frac{S_k}{n_f} = \frac{3000}{3} = 1000 \text{ N} \cdot \text{mm}^{-1}$$

nebo z ekvivalentního rozpětí (tj. jako jedno osamocené nenavazující rozpětí)

$$S_v = \left(\frac{1}{S_1} + \frac{1}{S_2}\right)^{-1} = \frac{S}{2} = \frac{2000}{2} = 1000 \text{ N} \cdot \text{mm}^{-1}$$

Normované tuhosti jsou:

$$N_{-30} = \frac{1}{S_v \cdot l_{-30}} + \frac{1}{n \cdot E_{s,-30} \cdot A_s} = \frac{1}{1 \cdot 10^6 \cdot 63,049} + \frac{1}{3,3,6232 \cdot 10^{10} \cdot 8,012 \cdot 10^{-4}} = 2,734 \cdot 10^{-8} \text{ N}^{-1}$$

$$N_{80} = \frac{1}{S_v \cdot l_{80}} + \frac{1}{n \cdot E_{s,80} \cdot A_s} = \frac{1}{1.10^6 \cdot 63,195} + \frac{1}{3.2,9727 \cdot 10^{10} \cdot 8,012 \cdot 10^{-4}} = 2,982 \cdot 10^{-8} \text{ N}^{-1}$$

Součinitelé napjatosti ζ_{-30} a ζ_{80} :

$$\zeta_{-30} = \frac{(n \cdot m_{sc,-30} \cdot g \cdot l_{-30})^2}{24 \cdot F_{st,-30}^3 \cdot N_{-30}} = \frac{(3.3,027.9,81.63,049)^2}{24 \cdot 31677^3 \cdot 2,734 \cdot 10^{-8}} = 0,9813$$

$$\zeta_{80} = \frac{(n \cdot m_{sc,80} \cdot g \cdot l_{80})^2}{24 \cdot F_{st,80}^3 \cdot N_{80}} = \frac{(3.3,019.9,81.63,195)^2}{24 \cdot 19576^3 \cdot 2,982 \cdot 10^{-8}} = 3,816$$

Úhly vychýlení na konci zkratu $\delta_{k,-30}$ a $\delta_{k,80}$:

Protože $\frac{T_k}{T_{res,-30}} = \frac{0,5}{1,919} = 0,261 \leq 0,5$, výpočet se provádí následovně:

$$\delta_{k,-30} = \delta_{1,-30} \cdot \left[1 - \cos \left(360^\circ \cdot \frac{T_k}{T_{res,-30}} \right) \right] = 39,64^\circ \cdot [1 - \cos(360^\circ \cdot 0,261)] = 42,28^\circ$$

Protože $\frac{T_k}{T_{res,80}} = \frac{0,5}{2,442} = 0,205 \leq 0,5$:

$$\delta_{k,80} = \delta_{1,80} \cdot \left[1 - \cos \left(360^\circ \cdot \frac{T_k}{T_{res,80}} \right) \right] = 39,72^\circ \cdot [1 - \cos(360^\circ \cdot 0,205)] = 28,58^\circ$$

Určení součinitelů χ_{-30} a χ_{80} :

Protože $0^\circ \leq \delta_{k,-30} = 42,28^\circ \leq 90^\circ$ bude

$$\chi_{-30} = 1 - r_{-30} \cdot \sin(\delta_{k,-30}) = 1 - 0,828 \cdot \sin(42,28^\circ) = 0,4427$$

Protože $0^\circ \leq \delta_{k,80} = 27,58^\circ \leq 90^\circ$ bude také

$$\chi_{80} = 1 - r_{80} \cdot \sin(\delta_{k,80}) = 1 - 0,831 \cdot \sin(27,58^\circ) = 0,6026$$

Maximální úhly vychýlení $\delta_{m,-30}$ a $\delta_{m,80}$:

Protože $-0,985 \leq \chi_{-30} = 0,4427 < 0,766$, bude

$$\delta_{m,-30} = 10^\circ + \frac{180}{\pi} \cdot \arccos \chi_{-30} = 10^\circ + \frac{180}{\pi} \cdot \arccos 0,4427 = 73,72^\circ$$

Protože $-0,985 \leq \chi_{80} = 0,6026 < 0,766$, bude také

$$\delta_{m,80} = 10^\circ + \frac{180}{\pi} \cdot \arccos \chi_{80} = 10^\circ + \frac{180}{\pi} \cdot \arccos 0,6026 = 62,94^\circ$$

Určení součinitelů φ_{-30} a φ_{80} :

Protože $T_k = 0,5 \geq 0,478 = \frac{1,919}{4} = \frac{T_{res,-30}}{4}$ bude

$$\varphi_{-30} = 3 \cdot \left(\sqrt{1 + r_{-30}^2} - 1 \right) = 3 \cdot \left(\sqrt{1 + 0,828^2} - 1 \right) = 0,8957$$

Protože $T_k = 0,5 < 0,611 = \frac{2,442}{4} = \frac{T_{res,80}}{4}$ bude

$$\varphi_{80} = 3 \cdot \left(r_{80} \cdot \sin(\delta_{k,80}) + \cos(\delta_{k,80}) - 1 \right) = 3 \cdot \left(0,831 \cdot \sin(28,58^\circ) + \cos(28,58^\circ) - 1 \right) = 0,8268$$

Určení součinitelů ψ_{-30} a ψ_{80} :

Součinitele ψ mohou být určeny z kubické rovnice

$$\varphi^2 \cdot \psi^3 + \varphi \cdot (2 + \zeta) \cdot \psi^2 + (1 + 2 \cdot \zeta) \cdot \psi - \zeta \cdot (2 + \varphi)$$

nebo odčteny z obrázku 7, normy ČSN EN 60 865-1

pro tento případ vychází: $\psi_{-30} = 0,5899$ a $\psi_{80} = 0,8255$

Tahová síla během zkratu $F_{t,-30}$ a $F_{t,80}$:

$$F_{t,-30} = 1,1 \cdot F_{st,-30} \cdot (1 + \psi_{-30} \cdot \varphi_{-30}) = 1,1 \cdot 31677 \cdot (1 + 0,5899 \cdot 0,8949) = 53256 \text{ N}$$

$$F_{t,80} = 1,1 \cdot F_{st,80} \cdot (1 + \psi_{80} \cdot \varphi_{80}) = 1,1 \cdot 19576 \cdot (1 + 0,8255 \cdot 0,8268) = 36231 \text{ N}$$

Tahová síla po zkratu $F_{f,-30}$ a $F_{f,80}$ (pád vodiče):

Pro -30°C je splněno $r_{-30} = 0,828 \geq 0,6$ i $\delta_{m,-30} = 73,72^\circ \geq 70^\circ$ a proto

$$F_{f,-30} = 1,2 \cdot F_{st,-30} \cdot \sqrt{1 + 8 \cdot \zeta_{-30} \cdot \frac{\delta_{m,-30}}{180^\circ}} = 1,2 \cdot 31677 \cdot \sqrt{1 + 8 \cdot 0,9813 \cdot \frac{73,72^\circ}{180^\circ}} = 78044 \text{ N}$$

Pro 80°C je splněno $r_{80} = 0,831 \geq 0,6$, ale $\delta_{m,80} = 62,94^\circ < 70^\circ$ a proto tuto sílu pro další výpočty a vyhodnocení neuvažujeme.

3. Výpočet minimální vzdušné vzdálenosti

Následující výpočty týkající se minimální vzdušné vzdálenosti berou v úvahu pouze stav při $+80^\circ\text{C}$, při kterém je její hodnota vždy vyšší než při -30°C .

Určení součinitele ε_{ela} :

$$\varepsilon_{ela} = N_{80} \cdot (F_{t,80} - F_{st,80}) = 2,982 \cdot 10^{-8} \cdot (36231 - 19576) = 4,966 \cdot 10^{-4}$$

Určení součinitele ε_{th} :

$$\text{Protože } T_k = 0,5 < 0,611 = \frac{2,442}{4} = \frac{T_{res,80}}{4}$$

a protože $A_{sAl} / A_{sFe} = A_{sAl} / (A_s - A_{sAl}) = 758,1 / (801,2 - 758,1) = 17,6 > 6$, bude

$$c_{th} = 2,7 \cdot 10^{-19} \text{ m}^4 \cdot \text{A}^{-1} \cdot \text{s}^{-1} \text{ a tedy}$$

$$\varepsilon_{th} = c_{th} \cdot \left(\frac{I''_{k3}}{n \cdot A_s} \right)^2 \cdot T_k = 2,7 \cdot 10^{-19} \cdot \left(\frac{63 \cdot 10^3}{3,8 \cdot 012 \cdot 10^{-4}} \right)^2 \cdot 0,5 = 9,275 \cdot 10^{-5}$$

Určení součinitele C_D :

$$C_D = \sqrt{1 + \frac{3}{8} \cdot \left(\frac{l_{80}}{b_{c,80}} \right)^2 \cdot (\varepsilon_{th} + \varepsilon_{ela})} = \sqrt{1 + \frac{3}{8} \cdot \left(\frac{63,195}{2,266} \right)^2 (9,275 \cdot 10^{-5} + 4,966 \cdot 10^{-4})} = 1,083$$

Určení součinitele C_F :

Protože $0,8 < r_{80} = 0,831 < 1,8$

$$C_F = 0,97 + 0,1 \cdot r_{80} = 0,97 + 0,1 \cdot 0,831 = 1,053$$

Určení horizontální výchylky b_h :

Protože se jedná o rozpětí z izolačními závěsy a $\delta_{m,80} = 62,94^\circ \geq 39,72^\circ = \delta_{1,80}$

$$b_h = C_F \cdot C_D \cdot b_{c,80} \cdot \sin \delta_{1,80} = 1,053 \cdot 1,083 \cdot 2,266 \cdot \sin(39,72^\circ) = 1,651 \text{ m}$$

Určení minimální vzdušné vzdálenosti a_{min} :

$$a_{min} = a - 2 \cdot b_h = 6,5 - 2 \cdot 1,651 = 3,198 \text{ m}$$

4. Výpočet kontrakční síly svazkuUrčení součinitele v_I :

$$v_{1,-30} = f \cdot \frac{1}{\sin \frac{180^\circ}{n}} \cdot \frac{(a_s - d_s) \cdot m'_{sc,-30}}{\sqrt{\frac{\mu_0}{2 \cdot \pi} \cdot \left(\frac{I''_{k3}}{n} \right)^2 \cdot \frac{n-1}{a_s}}} = 50 \cdot \frac{1}{\sin \frac{180^\circ}{3}} \cdot \frac{(0,25 - 0,0365) \cdot 3,027}{\sqrt{\frac{4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}}{2 \cdot \pi} \cdot \left(\frac{63 \cdot 10^3}{3} \right)^2 \cdot \frac{3-1}{0,25}}} = 1,747$$

$$v_{1,80} = f \cdot \frac{1}{\sin \frac{180^\circ}{n}} \cdot \frac{(a_s - d_s) \cdot m'_{sc,80}}{\sqrt{\frac{\mu_0}{2 \cdot \pi} \cdot \left(\frac{I''_{k3}}{n} \right)^2 \cdot \frac{n-1}{a_s}}} = 50 \cdot \frac{1}{\sin \frac{180^\circ}{3}} \cdot \frac{(0,25 - 0,0365) \cdot 3,019}{\sqrt{\frac{4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}}{2 \cdot \pi} \cdot \left(\frac{63 \cdot 10^3}{3} \right)^2 \cdot \frac{3-1}{0,25}}} = 1,745$$

Určení součinitele v_3 :

Součinitel v_3 lze určit z ČSN EN 60 865-1, obrázku 9 nebo vypočítat analyticky jako:

$$v_3 = \frac{d_s / a_s}{\sin \frac{180^\circ}{n}} \cdot \frac{\sqrt{a_s / d_s - 1}}{\arctan \sqrt{a_s / d_s - 1}} = \frac{0,25 / 0,0365}{\sin \frac{180^\circ}{3}} \cdot \frac{\sqrt{0,25 / 0,0365 - 1}}{\arctan \sqrt{0,25 / 0,0365 - 1}} = 0,346$$

Určení součinitele v_2 :

Součinitel v_2 lze určit z ČSN EN 60 865-1, obrázku 8 jako funkce v_1 a κ ($\kappa = \frac{160}{63 \cdot \sqrt{2}} = 1,801$)

nebo vypočítat shodně jako v předchozím příkladě jako:

$$v_2 = 1 - \frac{\sin(4\pi \cdot f \cdot T_{pi} - 2\gamma) + \sin(2\gamma)}{4\pi \cdot f \cdot T_{pi}} + \frac{f \cdot \tau}{f \cdot T_{pi}} \cdot \left(1 - e^{-\frac{2 \cdot f \cdot T_{pi}}{f \cdot \tau}}\right) \cdot \sin^2(\gamma) -$$

$$\frac{8\pi \cdot f \cdot \tau \cdot \sin(\gamma)}{1 + (2\pi \cdot f \cdot \tau)^2} \cdot \left[\left(\frac{2\pi \cdot f \cdot \tau \cdot \cos(2\pi \cdot f \cdot T_{pi} - \gamma)}{2\pi \cdot f \cdot T_{pi}} + \frac{\sin(2\pi \cdot f \cdot T_{pi} - \gamma)}{2\pi \cdot f \cdot T_{pi}} \right) \cdot e^{-\frac{f \cdot T_{pi}}{f \cdot \tau}} \right] +$$

$$\frac{\sin(\gamma) - 2\pi \cdot f \cdot \tau \cdot \cos(\gamma)}{2\pi \cdot f \cdot T_{pi}}$$

kde τ je časová konstanta sítě a může být vypočítána jako

$$\tau = -\frac{2\pi \cdot f}{3} \cdot \ln \frac{\kappa - 1,02}{0,98}, \quad \kappa \geq 1,1$$

a

$$\gamma = \arctan(2\pi \cdot f \cdot \tau)$$

$f \cdot T_{pi}$ je řešení vztahu $v_1 = f \cdot T_{pi} \cdot \sqrt{v_2}$

Hodnotu v_2 tak obdržíme jako řešení soustavy dvou transcendentních rovnic pro neznámé v_2 a $f \cdot T_{pi}$. Výpočetem bylo zjištěno:

$$v_{2,-30} = 0,900 \quad \text{a} \quad v_{2,80} = 1,829$$

Určení zkratové síly F_v :

$$F_{v,-30} = (n-1) \cdot \frac{\mu_0}{2\pi} \cdot \left(\frac{I_{k3}''}{n}\right)^2 \cdot \frac{l_s}{a_s} \cdot \frac{v_{2,-30}}{v_3} = (3-1) \cdot \frac{4\pi \cdot 10^{-7}}{2\pi} \cdot \left(\frac{63 \cdot 10^3}{3}\right)^2 \cdot \frac{25}{0,25} \cdot \frac{0,900}{0,346} = 45878 \text{ N}$$

$$F_{v,80} = (n-1) \cdot \frac{\mu_0}{2\pi} \cdot \left(\frac{I_{k3}''}{n}\right)^2 \cdot \frac{l_s}{a_s} \cdot \frac{v_{2,80}}{v_3} = (3-1) \cdot \frac{4\pi \cdot 10^{-7}}{2\pi} \cdot \left(\frac{63 \cdot 10^3}{3}\right)^2 \cdot \frac{25}{0,25} \cdot \frac{1,829}{0,284} = 93272 \text{ N}$$

Určení součinitele napjatosti ε_{st} :

$$\varepsilon_{st,-30} = 1,5 \cdot \frac{F_{st,-30} \cdot I_s^2 \cdot N_{-30}}{(a_s - d_s)^2} \cdot \left[\sin \frac{180^\circ}{n} \right]^2 = 1,5 \cdot \frac{31677 \cdot 25^2 \cdot 2,734 \cdot 10^{-8}}{(0,25 - 0,0365)^2} \cdot \left[\sin \frac{180^\circ}{3} \right]^2 = 13,360$$

$$\varepsilon_{st,80} = 1,5 \cdot \frac{F_{st,80} \cdot I_s^2 \cdot N_{80}}{(a_s - d_s)^2} \cdot \left[\sin \frac{180^\circ}{n} \right]^2 = 1,5 \cdot \frac{19576 \cdot 25^2 \cdot 2,982 \cdot 10^{-8}}{(0,25 - 0,0365)^2} \cdot \left[\sin \frac{180^\circ}{3} \right]^2 = 9,005$$

Určení součinitele napjatosti ε_{pi} :

$$\varepsilon_{pi,-30} = 0,375 \cdot n \cdot \frac{F_{v,-30} \cdot I_s^3 \cdot N_{-30}}{(a_s - d_s)^3} \cdot \left[\sin \frac{180^\circ}{n} \right]^3 = 0,375 \cdot 3 \cdot \frac{45878 \cdot 25^3 \cdot 2,734 \cdot 10^{-8}}{(0,25 - 0,0365)^3} \cdot \left[\sin \frac{180^\circ}{3} \right]^3 = 1471,7$$

$$\varepsilon_{pi,80} = 0,375 \cdot n \cdot \frac{F_{v,80} \cdot I_s^3 \cdot N_{80}}{(a_s - d_s)^3} \cdot \left[\sin \frac{180^\circ}{n} \right]^3 = 0,375 \cdot 3 \cdot \frac{93272 \cdot 25^3 \cdot 2,982 \cdot 10^{-8}}{(0,25 - 0,0365)^3} \cdot \left[\sin \frac{180^\circ}{3} \right]^3 = 3263$$

Určení parametru j :

$$j_{-30} = \sqrt{\frac{\varepsilon_{pi,-30}}{1 + \varepsilon_{st,-30}}} = \sqrt{\frac{1471,7}{1 + 13,360}} = 10,123$$

$$j_{80} = \sqrt{\frac{\varepsilon_{pi,80}}{1 + \varepsilon_{st,80}}} = \sqrt{\frac{3263}{1 + 9,005}} = 18,06$$

V obou případech je $j \geq 1$ a dochází tak k účinnému sevření vodičů. Dále se postupuje podle 2.3.3.2 normy ČSN EN 60 865-1

Určení součinitele ξ :

Součinitel se určí buď z obrázku 10 normy ČSN EN 60 865-1 nebo jako řešení rovnice

$$\xi^3 + \varepsilon_{st} \cdot \xi^2 - \varepsilon_{pi} = 0$$

V tomto případě vycházejí $\xi_{-30} = 8,252$ a $\xi_{80} = 12,359$

Určení součinitele v_4 :

$$v_4 = \frac{a_s - d_s}{d_s} = \frac{0,25 - 0,0365}{0,0365} = 5,849$$

Určení součinitele v_e :

$$v_{e,-30} = \frac{1}{2} + \left[\frac{9}{8} \cdot n \cdot (n-1) \cdot \frac{\mu_0}{2\pi} \cdot N_{-30} \cdot \left(\frac{I''_{k3}}{n} \right)^2 \cdot v_{2,-30} \cdot \left(\frac{l_s}{a_s - d_s} \right)^4 \cdot \frac{\sin \frac{180^\circ}{n}}{\xi_{-30}^3} \cdot \left(1 - \frac{\arctan \sqrt{v_4}}{\sqrt{v_4}} \right) - \frac{1}{4} \right]^{\frac{1}{2}} =$$

$$= \frac{1}{2} + \left[\frac{9}{8} \cdot 3 \cdot (3-1) \cdot \frac{4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}}{2\pi} \cdot 2,734 \cdot 10^{-8} \cdot \left(\frac{63 \cdot 10^3}{3} \right)^2 \cdot 0,900 \cdot \left(\frac{25}{0,25 - 0,0365} \right)^4 \cdot \frac{\sin \frac{180^\circ}{3}}{8,252^3} \cdot \left(1 - \frac{\arctan \sqrt{5,849}}{\sqrt{5,849}} \right) - \frac{1}{4} \right]^{\frac{1}{2}} = 1,578$$

$$v_{e,80} = \frac{1}{2} + \left[\frac{9}{8} \cdot n \cdot (n-1) \cdot \frac{\mu_0}{2\pi} \cdot N_{80} \cdot \left(\frac{I''_{k3}}{n} \right)^2 \cdot v_{2,80} \cdot \left(\frac{l_s}{a_s - d_s} \right)^4 \cdot \frac{\sin \frac{180^\circ}{n}}{\xi_{80}^3} \cdot \left(1 - \frac{\arctan \sqrt{v_4}}{\sqrt{v_4}} \right) - \frac{1}{4} \right]^{\frac{1}{2}} =$$

$$= \frac{1}{2} + \left[\frac{9}{8} \cdot 3 \cdot (3-1) \cdot \frac{4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}}{2\pi} \cdot 2,982 \cdot 10^{-8} \cdot \left(\frac{63 \cdot 10^3}{3} \right)^2 \cdot 1,829 \cdot \left(\frac{25}{0,25 - 0,0365} \right)^4 \cdot \frac{\sin \frac{180^\circ}{3}}{12,359^3} \cdot \left(1 - \frac{\arctan \sqrt{5,849}}{\sqrt{5,849}} \right) - \frac{1}{4} \right]^{\frac{1}{2}} = 1,326$$

Určení kontrakční síly F_{pi} :

$$F_{pi,-30} = F_{st,-30} \cdot \left(1 + \frac{v_{e,-30}}{\varepsilon_{st,-30}} \cdot \xi_{-30} \right) = 31677 \cdot \left(1 + \frac{1,578}{13,360} \cdot 8,252 \right) = 62558 \text{ N}$$

$$F_{pi,80} = F_{st,80} \cdot \left(1 + \frac{v_{e,80}}{\varepsilon_{st,80}} \cdot \xi_{80} \right) = 19576 \cdot \left(1 + \frac{1,326}{9,005} \cdot 12,329 \right) = 55207 \text{ N}$$

5. Vyhodnocení

stav	-30°C, max. tah	80°C, zákl. tah
síla během zkratu F_t	53,3 kN	36,2 kN
síla po zkratu F_f	78,0 kN	-
kontrakční síla F_{pi}	62,6 kN	55,2 kN
min. vzdušná vzdálenost a_{\min}	-	3198 mm

Protože 3198 mm > 1800 mm je zavěšení lana z hlediska doskoku vyhovující podle ČSN 33 3201.

Extrémní silové namáhání je maximum z vypočtených sil F_t , F_f a F_{pi} . V tomto případě maximum nastává při zvýšeném tahu -30°C a pádu vodiče $F_{f,-30} = 78,0$ kN. Zásady vyplývající pro dimenzování izolátorů a konstrukcí jsou stejné jako v předchozím příkladu.

6. Cilivostní analýza úlohy

Pro dokreslení představy o vlivech jednotlivých vstupních parametrů je zde uvedeno několik příkladů změny parametrů.

1) Změna zkratového proudu

S poklesem zkratového proudu klesá většina dynamických účinků (ale např. u kontrakční síly to obecně neplatí). V tomto případě se již při nižších zkratových proudech neprojeví pád vodiče.

Parametr I''_{k3} / i_{p3}		F_t	F_f	F_{pi}	a_{min}
50 kA / 125 kA	-30°C, max. tah	43,2 kN	-	66,1 kN	4,96 m
	80°C, zákl. tah	27,8 kN	-	51,3 kN	4,20 m
40 kA / 100 kA	-30°C, max. tah	38,5 kN	-	60,3 kN	5,49 m
	80°C, zákl. tah	24,2 kN	-	45,9 kN	4,95 m

2) Změna maximálního statického tahu

Statické napnutí řetězovky ovlivňuje všechny parametry výpočtu a má velký vliv na všechny působící síly. Obecně lze říci, že se zvyšujícím se statickým tahem roste doskoková vzdálenost a síla během zkratu. U zbylých tahových sil mohou vznikat lokální extrémy v určité oblasti tahů.

Při návrhu statického napnutí řetězovky je však nutné kromě dynamických účinků zkratových proudů zohlednit řadu dalších faktorů (např. klimatické podmínky – vítr a námraza, prostorová omezení na průhyb, montážní tolerance apod.).

Parametr F_{stMAX}		F_t	F_f	F_{pi}	a_{min}
50 kN	-30°C, max. tah	62,3 kN	82,3 kN	86,4 kN	4,65 m
	80°C, zákl. tah	42,4 kN	-	59,9 kN	3,62 m
30 kN	-30°C, max. tah	39,2 kN	-	57,4 kN	3,42 m
	80°C, zákl. tah	28,6 kN	-	50,1 kN	2,48 m
20 kN ^{*)}	-30°C, max. tah	24,2 kN	-	40,2 kN	1,9 m
	80°C, zákl. tah	19,5 kN	-	44,3 kN	0,99 m

*) Nevyhovuje minimální vzdušná vzdálenost

3) Změna vzdálenosti mezi rozpěrkami

Tento parametr ovlivňuje pouze kontrakční sílu. Se zkracující se vzdáleností kontrakční síla roste.

Parametr l_s		F_t	F_f	F_{pi}	a_{min}
50 m (není rozpěrka)	-30°C, max. tah	53,3 kN	78,0 kN	51,8 kN	4,19 m
	80°C, zákl. tah	36,2 kN	-	42,5 kN	3,20 m
16,6 m (2 rozpěrky)	-30°C, max. tah	53,3 kN	78,0 kN	71,6 kN	4,19 m
	80°C, zákl. tah	36,2 kN	-	65,9 kN	3,20 m
12,5 m (3 rozpěrky)	-30°C, max. tah	53,3 kN	78,0 kN	79,4 kN	4,19 m
	80°C, zákl. tah	36,2 kN	-	75,1 kN	3,20 m

Příklad 7 – Tepelné účinky zkratového proudu na holé vodiče systému 22 kV

Výpočet je proveden pro trojfázové přípojnice systému 22 kV s jedním vodičem na fázi.

1. Vstupní údaje

System:

Nejvyšší provozovací napětí	25 kV
Jmenovité napětí sítě	22 kV
Jmenovitý kmitočet	50 Hz
Jmenovitá výdržná napětí	125/50 kV
Počáteční zkratový proud	$I''_{k3} = 25$ kA
Ustálený zkratový proud	$I_{k3} = 20$ kA
Jmenovitý nárazový proud	$i_{p3} = 63$ kA
Doba zkratu	$T_k = 1$ s
Min. vzdušná vzdálenost	290 mm

Vodič:

Pasové vodiče Al 63x10mm, materiál AlMgSi 0,5	
Jmenovitý průřez	$A = 630$ mm ²
Počáteční teplota vodiče	$\theta_b = 80$ °C
Konečná teplota vodiče (po zkratu)	$\theta_e = 200$ °C

2. Výpočty

Hustota jmenovitého krátkodobého proudu S_{thr} :

Hodnotu S_{thr} je možno odečíst z ČSN EN 60 865-1, obrázku 13b nebo vypočítat jako

$$S_{thr} = \sqrt{\frac{\kappa_{20} \cdot c \cdot \rho}{\alpha_{20}} \cdot \ln\left(\frac{1 + \alpha_{20} \cdot (\theta_e - 20^\circ\text{C})}{1 + \alpha_{20} \cdot (\theta_b - 20^\circ\text{C})}\right)} = \sqrt{\frac{34,8 \cdot 10^6 \cdot 910 \cdot 2700}{0,004} \cdot \ln\left(\frac{1 + 0,004 \cdot (180^\circ\text{C} - 20^\circ\text{C})}{1 + 0,004 \cdot (60^\circ\text{C} - 20^\circ\text{C})}\right)}$$

$$= 8,3633 \cdot 10^6 \text{ A} \cdot \text{m}^{-1} = 83,633 \text{ A} \cdot \text{mm}^{-1}$$

Příslušné konstanty jsou uvedeny v ČSN EN 60 865-1, příloha A.9

	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]	$56 \cdot 10^6$	$34,8 \cdot 10^6$	$7,25 \cdot 10^6$
α_{20} [°C ⁻¹]	0,0039	0,004	0,0045

Hustota jmenovitého krátkodobého proudu S_{thr} je vztažena k hodnotě jmenovité doby zkratu $T_{kr} = 1$.

Poznámka: Doporučené konečné teploty vodiče jsou uvedeny v ČSN EN 60 865-1, tabulka 6

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

Ekvivalentní oteplovací proud I_{th} :

Hodnota I_{th} se vypočítá podle ČSN EN 60 865-1, 3.2.2. jako

$$I_{th} = I''_{k3} \cdot \sqrt{m+n}$$

kde

$$m = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot T_k \cdot \ln(\kappa - 1)} \cdot \left[e^{4 \cdot \pi \cdot f \cdot T_k \cdot \ln(\kappa - 1)} - 1 \right]$$

a

$$\frac{I''_{k3}}{I_{k3}} = 1; \quad n = 1$$

$$\frac{I''_{k3}}{I_{k3}} \geq 1,25$$

$$n = \frac{1}{\left(\frac{I''_{k3}}{I_{k3}} \right)^2} \cdot \left[1 + \frac{T'_d}{20 \cdot T_k} \cdot \left(1 - e^{-20 \cdot T_k / T'_d} \right) \cdot \left(\frac{I''_{k3}}{I_{k3}} - \frac{I'_{k3}}{I_{k3}} \right)^2 + \frac{T'_d}{2 \cdot T_k} \cdot \left(1 - e^{-2 \cdot T_k / T'_d} \right) \cdot \left(\frac{I'_{k3}}{I_{k3}} - 1 \right)^2 \right. \\ \left. + \frac{T'_d}{5 \cdot T_k} \cdot \left(1 - e^{-10 \cdot T_k / T'_d} \right) \cdot \left(\frac{I''_{k3}}{I_{k3}} - \frac{I'_{k3}}{I_{k3}} \right) + \frac{2 \cdot T'_d}{T_k} \cdot \left(1 - e^{-T_k / T'_d} \right) \cdot \left(\frac{I'_{k3}}{I_{k3}} - 1 \right) \right. \\ \left. + \frac{T'_d}{5,051 \cdot T_k} \cdot \left(1 - e^{-10,1 \cdot T_k / T'_d} \right) \cdot \left(\frac{I''_{k3}}{I_{k3}} - \frac{I'_{k3}}{I_{k3}} \right) \cdot \left(\frac{I'_{k3}}{I_{k3}} - 1 \right) \right]$$

$$\frac{I'_{k3}}{I_{k3}} = \frac{I''_{k3} / I_{k3}}{0,88 + 0,17 \cdot I''_{k3} / I_{k3}}$$

$$T'_d = \frac{3,1 \text{ s}}{I'_{k3} / I_{k3}}$$

Pro tento stav vychází $m = 0,0129$ a $n = 0,7840$ a tedy

$$I_{th} = I''_{k3} \cdot \sqrt{m+n} = 25 \cdot \sqrt{0,0129 + 0,7840} = 22,32 \text{ kA}$$

Hustota krátkodobého proudu S_{th} :

$$S_{th} = \frac{I_{th}}{A} = \frac{22,32 \cdot 10^3}{630 \cdot 10^{-6}} = 3,5424 \cdot 10^7 \text{ A} \cdot \text{m}^{-2} = 35,424 \text{ A} \cdot \text{mm}^{-2}$$

Protože

$$S_{th} = 35,424 \text{ A} \cdot \text{mm}^{-2} \leq 83,633 \text{ A} \cdot \text{mm}^{-1} = 83,633 \cdot \sqrt{\frac{1}{1}} = S_{th} \cdot \sqrt{\frac{T_{kr}}{T_k}}$$

vodič vyhovuje.

3. Vyhodnocení

Přípojnice vyhovují tepelnému namáhání zkratového proudu.