ELEKTRÁRNY

PŘÍKLADY
KE CVIČENÍM

JAN ŠPETLÍK, 2012

1. Napěťové a zkratové poměry

Příklad 1.1.

Určete zkratový výkon na blokové rozvodně 6,3 kV dostatečný k samonajíždění bloku, je-li celkový součtový jmenovitý výkon všech spotřebičů $S_{\Sigma M} = 15$ MVA a záběrný proud při jejich hromadném startu $i_{z\Sigma M} = I_{z\Sigma M} / I_{n\Sigma M} = 5$. Napětí sítě, ze které blok napájíme uvažujte $u_s = 1\ p.u.$, vliv převodů transformátorů s nenavazujícími hladinami neuvažujte. Při samonajíždění nesmí napětí na rozvodně klesnout pod $u_M = 0,65\ p.u.$

Řešení:

$$S_{kM} = \frac{u_S . u_M}{u_S - u_M} . i_{z\Sigma M} . S_{n\Sigma M} = \frac{1.0,65}{1-0,65} .5.15 = 139,3 \text{ MVA}$$

Příklad 1.2.

Vypočtěte úbytek napětí na přípojnicích vlastní spotřeby při rozběhu elektronapáječky, je-li vlastní spotřeba 6,3 kV napájena ze soustavy 110 kV přes záskokový transformátor. Jaký je rázový zkratový výkon na přípojnicích rozvodny vlastní spotřeby? Vliv činné složky proudu na úbytku zanedbejte.

parametry záskokového transformátoru: $S_{nT} = 25$ MVA, $e_k = 0,1$, $p = 6,3/121$ kV

parametry elektronapáječky: $S_{nEN} = 2,5$ MVA, $i_{zEN} = I_{zEN} / I_{nEN} = 6$

vlastní spotřeba odebírá jalový výkon: $Q_{VS} = 10$ MVAr

soustava 110 kV je neomezeného zkratového výkonu a je provozována na hladině $U_S = 121$ kV

klesnout pod $u_M = 0,65\ p.u.$

Řešení:

vztažný výkon:

$$S_V = S_{nT} = 25 \text{ MVA}$$

Reaktanční složka vlastní spotřeby:

$$x_{VS} = \frac{S_V}{Q_{VS}} = \frac{25}{10} = 2,5$$

Reaktance elektronapáječky při spuštění:

$$x_{EN} = \frac{1}{i_{zEN}} . \frac{S_V}{S_{nEN}} = \frac{1}{6} . \frac{25}{2,5} = 1,667$$

Celková reaktance:

$$x_c = \left(\frac{1}{x_{VS}} + \frac{1}{x_{EN}} \right)^{-1} = \left(\frac{6}{10} + \frac{2}{5} \right)^{-1} = 1$$

Nebo také:

$$x_c = \frac{S_V}{Q_{tot}} = \frac{S_V}{Q_{VS} + i_z.S_{nEN}} = \frac{25}{10 + 6.2,5} = 1$$

Úbytek napětí bude:

$$\frac{\Delta u}{u_s} = \frac{u_s - u_{VS}}{u_s} = \frac{e_k}{e_k + x_c} = \frac{0,1}{0,1+1} = 9,1\% \qquad \text{tj. } \frac{\Delta u}{u_s}.U_{nVS} = 0,091.6,3 = 0,57 \text{ kV}$$

Rázový zkratový výkon na rozvodně vlastní spotřeby 6,3 kV:

$$S''_{k3VS} = u_s.\frac{u_s}{e_k}.S_V = 1.\frac{1}{0,1}.25 = 250 \text{ MVA}$$

<u>Příklad 1.3.</u>

Společná vlastní spotřeba je provozována na hladině 6,3 kV a je napájena sítě 110 kV přes transformátor o parametrech:

$S_{nT} = 16$ MVA, $e_k = 0,15$, $p = 6,3 \text{ kV} / 110 \pm 8\text{x}2\%$ kV

Napětí sítě 110 kV je $U_S = 116,6$ kV, soustava je neomezeného výkonu $S_{kS} \to \infty$

Napětí na společné vlastní spotřebě má přitom být udržováno na hodnotě $U_{SVS} = 6,3$ kV. Jaká odbočka bude v takovém případě nastavena na transformátoru ve stavu

a) nezatíženém $Q_{SVS} = 0$ MVAr

b) zatíženém při $Q_{SVS} = 8,7$ MVAr

<u>Řešení:</u>

$S_V = 16$ MVA, $U_V = 6,3$ kV

a) úvahou – v nezatíženém stavu se neobjevují úbytky napětí na impedanci transformátoru a proto musí být převod přesně

$$p = 6,3 \text{ kV} / U_S = 6,3 \text{ kV} / 116,6 \text{ kV} = 6,3 \text{ kV} / 110 + \mathbf{3}x2,2 \text{ kV}$$

nebo řešíme

$$p^2.\left(x_T.i_j + u_{SVS}\right) - p.\frac{U_S}{U_V} + \frac{S_V}{S_{kS}}.\left(\frac{U_S}{U_V}\right)^2.i_j = 0$$

$$p^2.\left(0,15.0 + 1\right) - p.\frac{116,6}{6,3} + \frac{16}{\infty}.\left(\frac{116,6}{6,3}\right)^2.0 = 0$$

$$p = \frac{116,6}{6,3} \text{ (tj. odbočka +3)}$$

b) výpočtem

$$q = \frac{8,7}{16} = 0,54375, \; i_j = \frac{q}{u_{SVS}} = 0,54375$$

Nahradíme-li si trf. ideálním transformátorem s převodem p a reaktancí x_T Zdroj napětí ze sítě za tímto ideálním transformátorem bude mít hodnotu:

$$u_S = \frac{\frac{1}{p}.U_S}{U_V}$$

protože na hladině 110 kV je impedance nulová (neuvažuje se), musí platit v p.u.

obvodová rovnice:

$$u_S = \frac{U_S}{p.U_V} = u_{SVS} + x_T.i_j$$

a tedy

$$p = \frac{U_S}{\left(u_{SVS} + x_T.i_j\right).U_V} = \frac{116{,}6}{\left(1 + 0{,}15.0{,}54375\right).6{,}3} = \frac{107{,}8}{6{,}3}$$

nebo řešíme

$$p^2.\left(x_T.i_j + u_{SVS}\right) - p.\frac{U_S}{U_V} + \frac{S_V}{S_{kS}}.\left(\frac{U_S}{U_V}\right)^2.i_j = 0$$

$$p^2.\left(0{,}15.0{,}54375 + 1\right) - p.\frac{116{,}6}{6{,}3} + \frac{16}{\infty}.\left(\frac{116{,}6}{6{,}3}\right)^2.0{,}54375 = 0$$

$$p = \frac{107{,}8}{6{,}3} \text{ (tj. odbočka –1)}$$

Příklad 1.4.

Určete trojfázový rázový symetrický zkratový proud I''_{k3} na svorkách alternátoru, který byl před zkratem ve stavu naprázdno a nabuzen na své jmenovité napětí.

Parametry alternátoru:

$S_{gn} = 250$ MVA, $U_g = U_{gn} = 13{,}8$ kV, $x''_d = 0{,}12$

Řešení:

Zkratový proud v p.u. bude $i_k = \frac{e''}{x''_d} = \frac{u}{x''_d} = \frac{1}{0{,}12} = 8{,}333$

a tedy $I''_{k3} = i_k \frac{S_{gn}}{\sqrt{3}.U_{gn}} = 8{,}3333.\frac{250}{\sqrt{3}.13{,}8} = 87{,}2$ kA

Příklad 1.5.

Vyberte vhodný odbočkový transformátor z řady jmenovitých výkonů S_{nT} 6, 8, 10, 12 nebo 16 MVA, všechny o parametrech: $e_k = 0{,}1$, $p = 11\ \text{kV} / 6{,}3\ \ \text{kV}$. Napětí v odbočce je $U_{odb} = 11\ \text{kV}$ a odbočku je možné považovat za zdroj neomezeného výkonu $S''_{kodb} \to \infty$.

Transformátor je určen pro vlastní spotřebu bloku s předběžným zatížením (kromě napáječky)

$P_{VS} = 4$ MW , $Q_{VS} = 2{,}5$ MVAr

Největším spotřebičem je elektronapáječka s koeficientem náročnosti $\beta_{EN} = 1$

$U_{nEN} = 6{,}3$ kV , $S_{nEN} = 2{,}5$ MVA , $\cos\varphi_{nN} = 0{,}8$, $i_{zN} = 5$

Proveďte kontrolu:

a) součtového výkonu celé vlastní spotřeby
b) napěťových poměrů při spouštění elektronapáječky

Napětí na vlastní spotřebě nemá klesnout pod $85\%\ U_{nN}$ .Vliv činného proudu na úbytky napětí zanedbejte.

Řešení:

a) Protože $P_{EN} = \beta_{EN}.S_{nEN}\cos\varphi_{nEN} = 1.2{,}5.0{,}8 = 2\ \text{MW}$

a $Q_{EN} = \beta_{EN}.S_{nEN}\sqrt{1-\cos^2\varphi_{nEN}} = 1.2{,}5.0{,}6 = 1{,}5\ \text{MVAr}$

bude $\sum S_P = \sqrt{\left(P_{VS}+P_{EN}\right)^2 + \left(Q_{VS}+Q_{EN}\right)^2} = \sqrt{\left(4+2\right)^2 + \left(2{,}5+1{,}5\right)^2} = 7{,}21\ \text{MVA}$

b) Volíme vztažný výkon:

$S_V = S_{nEN} = 2{,}5$ MVA

Celková reaktance:

$$x_c = \frac{S_V}{Q_{tot}} = \frac{S_V}{Q_{VS} + i_z.S_{nEN}} = \frac{2{,}5}{2{,}5+5.2{,}5} = \frac{1}{6}$$

protože

$$\frac{u_{VS}}{u_s} = \frac{x_c}{e_k \cdot \dfrac{S_V}{S_{nT\min}} + x_c}$$

$$S_{nT\min} = S_V . \frac{e_k}{x_c} . \left(\frac{u_{VS}}{u_s - u_{VS}}\right) = 2{,}5.\frac{0{,}1}{\frac{1}{6}}.\left(\frac{0{,}85}{1-0{,}85}\right) = 8{,}5\ \text{MVA}$$

Je tedy nutné vybrat transformátor 10 MVA.

Příklad 1.6.

Rozvodna vlastní spotřeby je provozována na hladině $U_s = 6,3$ kV. Celková kapacita (každé fáze proti zemi) kabelové sítě napájené oblasti činí $C_0 = 10\ \mu$F. Rozvodnu napájí transformátor 110/6,3 kV Yny0, který má v uzlu na straně vn 6,3 kV vyvedený odporník $R = 27,7\ \Omega$. Spočítejte proud zemního spojení (podélné impedance transformátoru i kabelové sítě zanedbejte).

Řešení:

Při zanedbání podélných impedancí se uplatní pouze admitance netočivé složky, která bude rovna:

$$\hat{Y}_0 = \frac{1}{3.R} + j.\omega.C_0 \text{ resp.}$$

$$Y_0 = \sqrt{\left(\frac{1}{3.R}\right)^2 + \left(\omega.C_0\right)^2} = \sqrt{\left(\frac{1}{3.27,7}\right)^2 + \left(2.\pi.10^{-5}\right)^2} = 1,244.10^{-2} \text{ S}$$

Proud sousledné složky bude

$$\hat{I}_1 = \hat{Y}_0.\hat{U}_1 = \hat{Y}_0.\hat{U}_A = \hat{Y}_0.\frac{\hat{U}_s}{\sqrt{3}}$$

Protože

$$\hat{I}_A = \hat{I}_1 + \hat{I}_2 + \hat{I}_0 = 3.\hat{I}_1 \text{ resp. } I_A = 3.I_1$$

bude

$$I_A = 3.Y_0.\frac{U_s}{\sqrt{3}} = \sqrt{3}.Y_0.U_s = \sqrt{3}.1,244.10^{-2}.6300 = 136 \text{ A}$$

Příklad 1.7.

Určete fázový rozdíl svorkového napětí na generátoru $U_g = 6,3$ kV a napětí sítě za blokovým transformátorem $U_s = 37,8$ kV. Parametry blokového transformátoru jsou:

$S_{nT} = 10$ MVA, $e_k = 0,1$, $p = 6,3$ kV/36 kV, Yy0

Generátor dodává do sítě výkon

a) 0 MW
b) 8 MW

Řešení:

Vztažné hodnoty napětí a výkonu volíme:

$U_V = 6,3$ kV a $S_V = 10$ MVA

Poměrné hodnoty napětí a impedancí budou:

$$u_g = \frac{U_g}{U_V} = \frac{6,3}{6,3} = 1,\ u_s = \frac{p.U_s}{U_V} = \frac{\frac{6,3}{36}.38}{6,3} = 1,05,\ x_t = e_k.\frac{S_V}{S_{nT}} = 0,1.\frac{10}{10} = 0,1$$

Výkon přenášený přes transformátor

$$p = \frac{u_g . u_s}{x_t} \sin\delta$$

a) $\frac{P}{S_V} = \frac{0}{10} = 0 = \frac{1.1,05}{0,1} \sin\delta$ a tedy $\delta = 0°$

b) $\frac{P}{S_V} = \frac{8}{10} = 0,8 = \frac{1.1,05}{0,1} \sin\delta$

$$\delta = \arcsin\frac{0,8.0,1}{1.1,05} = \arcsin 0,0762 = 4,37°$$

Příklad 1.8.

Určete příspěvek zkratových proudů I''_{k1} a I''_{k3} elektrárenského bloku za blokovým transformátorem (na straně 400 kV). Napětí nezatíženého generátoru před zkratem uvažujte $U_g = 17$ kV (tj. nejvyšší napětí zařízení). Parametry blokového transformátoru jsou:

$S_{nT} = 200$ MVA, $e_k = 0,12$, $p = 15$ kV / 420 kV, Ynd11

Parametry generátoru jsou:

$S_{nG} = 190$ MVA, $U_{nG} = 15$ kV, $x''_d = 0,1425$, $x_2 = 0,171$

Řešení:

Vztažné hodnoty napětí a výkonu volíme:

$U_V = 15$ kV a $S_V = 200$ MVA

Poměrné hodnoty napětí a impedancí budou:

$$u_g = \frac{U_g}{U_V} = \frac{17}{15} = 1,133, \quad x_{g1} = x''_d . \frac{S_V}{S_{nG}} = 0,1425.\frac{200}{190} = 0,15,$$

$$x_{g2} = x_2 . \frac{S_V}{S_{nG}} = 0,171.\frac{200}{190} = 0,18, \quad x_t = e_k . \frac{S_V}{S_{nT}} = 0,12.\frac{200}{200} = 0,12$$

Příspěvek trojfázového zkratového proudu bude:

$$i''_{k3} = \frac{u_g}{x_t + x_{g1}} = \frac{1,133}{0,12 + 0,15} = 4,198, \text{ a tedy } I''_{k3} = i''_{k3} . p . \frac{S_V}{\sqrt{3}.U_V} = 4,198.\frac{15}{420}.\frac{200}{\sqrt{3}.15} = 1,154 \text{ kA}$$

Příspěvek jednofázového zkratového proudu bude:

$$i''_{k1} = 3.i_0 = \frac{3.u_g}{\left(x_t + x_{g1}\right) + \left(x_t + x_{g2}\right) + x_t} = \frac{3.1,133}{3.0,12 + 0,15 + 0,18} = \frac{3,4}{0,66} = 5,152, \text{ a tedy}$$

$$I''_{k1} = i''_{k1} . p . \frac{S_V}{\sqrt{3}.U_V} = 5,152.\frac{15}{420}.\frac{200}{\sqrt{3}.15} = 1,416 \text{ kA}$$

2. Fázování alternátoru

Příklad 2.1.

Vypočtěte nárazový proud při fázování alternátoru na jeho svorkách pracujícího do sítě přes blokový transformátor. Fázování probíhá při jmenovitém napětí a odchylce úhlu 5°.

parametry alternátoru:

S_n = 63 MVA , U_n = 10,5 kV , x''_d =0,15

parametry blokového transformátoru:

S_n = 63 MVA , $x_t = 0{,}1$

Řešení:

$$i''_k = \frac{e'' - u_s}{x_t + x''_d} = \frac{2u.\sin\frac{\psi}{2}}{x_t + x''_d} = \frac{2.1.\sin\frac{5}{2}.\frac{\pi}{180}}{0{,}1 + 0{,}15} = \frac{2.\sin 0{,}04363}{0{,}25} = 0{,}349$$

$$I''_k = i''_k.\frac{S_n}{\sqrt{3}.U_n} = 0{,}349.\frac{63.10^6}{\sqrt{3}.10{,}5.10^3} = 1{,}209 \text{ kA}$$

Příklad 2.2.

Porovnejte zkratový proud na svorkách alternátoru a jeho nárazový proud při jmenovitých napětích a odchylce úhlu 180°, je-li $S_{nT} = S_{nG}$, $u_k = 0{,}1$ a $x''_d = 0{,}15$.

Řešení:

$$i''_{kZ} = \frac{e''}{x''_d} = \frac{1}{0{,}15} = 6{,}66$$

$$i''_{kN} = \frac{e'' - u_s}{x_t + x''_d} = \frac{2u.\sin\frac{\psi}{2}}{x_t + x''_d} = \frac{2.1.\sin\frac{\pi}{2}}{0{,}1 + 0{,}15} = \frac{2}{0{,}25} = 8$$

Příklad 2.3.

Generátor pracující do sítě přes blokový transformátor je přifázován do soustavy neomezeného zkratového výkonu se zanedbatelnou úhlovou odchylkou za následujících podmínek:

U_G = 23 kV , U_s = 410 kV

Parametry blokového transformátoru jsou:

S_{nT} = 1100 MVA , $e_k = 0{,}15$, $p = 24$ kV / 420 kV , Ynd11

Parametry generátoru jsou:

$S_{nG} = 1100 \text{ MVA}$, $U_{nG} = 24 \text{ kV}$, $x_d'' = 0{,}15$

Určete rázový (symetrický) proud a jalový výkon generátoru a rozhodněte, zda-li se generátor bude nacházet při tomto přechodném ději ve stavu přebuzeném nebo podbuzeném.

Řešení:

Vztažné hodnoty napětí a výkonu volíme:

$U_V = 24 \text{ kV}$ a $S_V = 1100 \text{ MVA}$

Poměrné hodnoty napětí a impedancí budou:

$$u_g = e'' = \frac{U_G}{U_V} = \frac{23}{24} = 0{,}9583\,,\; u_s = p.\frac{U_s}{U_V} = \frac{24}{420}.\frac{410}{24} = 0{,}9762\,,$$

$$x_g = x_d''.\frac{S_V}{S_{nG}} = 0{,}15.\frac{1100}{1100} = 0{,}15\,,\; x_t = e_k.\frac{S_V}{S_{nT}} = 0{,}15.\frac{1100}{1100} = 0{,}15$$

Trojfázový symetrický rázový proud bude pro zdrojovou orientaci:

$$\hat{i}_k'' = \frac{e'' - u_s}{j.\left(x_t + x_g\right)} = \frac{0{,}9583 - 0{,}9762}{j.\left(0{,}15 + 0{,}15\right)} = j.0{,}0595\text{, a tedy}$$

$$I_k'' = i_k''.\frac{S_V}{\sqrt{3}.U_V} = 0{,}0179.\frac{1100}{\sqrt{3}.24} = 1{,}575 \text{ kA}$$

$$q_G = \mathrm{Im}\left[e''.\hat{i}_k''^{*}\right] = \mathrm{Im}\left[0{,}9583.\left(j.0{,}0595\right)^{*}\right] = -0{,}057\text{, a tedy}$$

$$Q_G = q_G.S_V = -0{,}057.1100 = -62{,}7 \text{ MVAr}$$

Protože jalový proud generátoru je kladný (pracuje v kapacitním režimu) resp. $e'' < u_s$ resp. jalový výkon záporný (je odebírán ze sítě), nachází se v přechodném ději generátor v podbuzeném stavu.

3. Účinky zkratových proudů

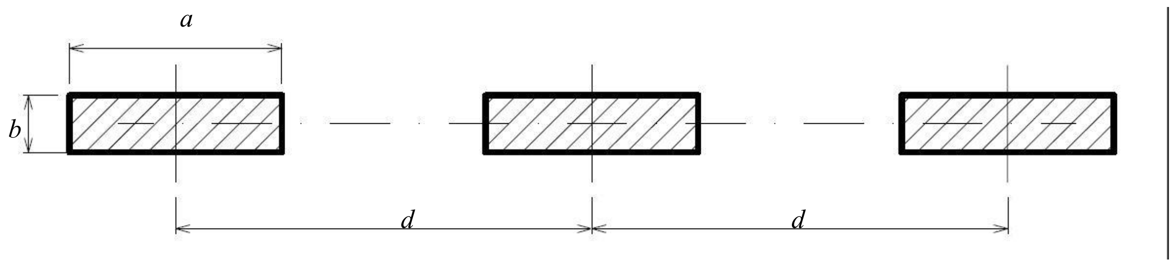
Příklad 3.1.

Vypočítejte, zda přípojnice podle obr. 3.1.1 systému 10 kV vyhovují dynamickým účinkům trojpólového zkratového proudu a jaké bude dynamické namáhání podpěrek. Vodiče tvoří spojité nosníky s prostým podepřením o stejném rozpětí. Při výpočtech použijte zjednodušenou metodu neuvažující vliv vlastní frekvence sestavy. Jsou známy následující údaje:

Jmenovitý zkratový proud	I_{k3} = 16 kA (1 sec)
Jmenovitý nárazový proud	i_{p3} = 40 kA
Trojpólový OZ:	ne
Počet rozpětí:	5
Vzdálenost mezi podpěrkami	l = 1 m
Fázová vzdálenost mezi vodiči	d = 0,35 m

Jsou použity pasové vodiče Al 63x10mm, materiál E-Al 99,5 o parametrech:

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



obrázek 3.1.1: Uspořádání vodičů k příkladu 3.1

Řešení:

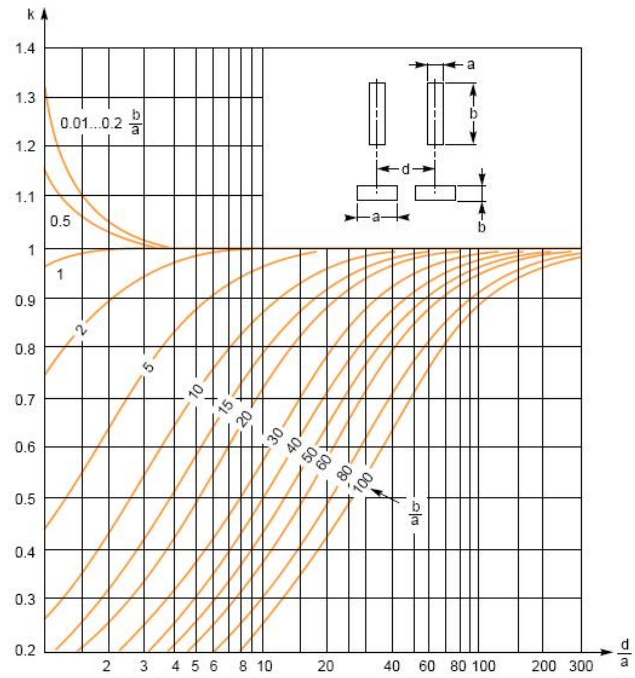
Součinitel k_{12}:

Pro obdélníkové vodiče platí obr. 3.1.2.
(ČSN EN 60 865-1)
poměr $b/a = 0,16$, poměr $d/a = 5,56$
a tedy

$$k_{12} = 1,0053$$

Účinná vzdálenost mezi vodiči:

$$d_m = \frac{d}{k_{12}} = \frac{0,35}{1,0053} = 0,3482 \text{ m}$$



obrázek 3.1.2: Součinitel k_{12} pro obdélníkové vodiče

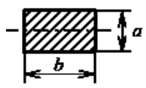
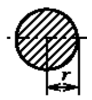
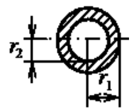
Pozn.: Pro kruhové a trubkové vodiče platí vždy:

$$d_m = d$$

Vrcholová síla mezi hlavními vodiči při trojfázovém zkratu:

$$F_{m3} = \frac{\mu_0}{2.\pi}.\frac{\sqrt{3}}{2}.i_{p3}^2.\frac{l}{d_m} = \frac{4.\pi.10^{-7}}{2.\pi}.\frac{\sqrt{3}}{2}.40^2.10^6.\frac{1}{0,3482} = 796 \text{ N}$$

Moment setrvačnosti:

obdélníkové průřezy	kruhové průřezy	trubkové průřezy
		
$I = \frac{b.a^3}{12}$	$I = \frac{\pi.r^4}{4}$	$I = \frac{\pi.\left(r_1^4 - r_2^4\right)}{4}$

tabulka 3.1.1: Momenty setrvačnosti pro různé průřezy vodičů

Pro obdélníkové průřezy platí:

$$I = \frac{b.a^3}{12} = \frac{0,01.0,063^3}{12} = 2,084.10^{-7} \text{ m}^4$$

Průřezový modul:

$Z = \dfrac{I}{a/2}$ pro obdélníkový nebo $Z = \dfrac{I}{r}$ pro kruhový vodič

Pro obdélníkové průřezy platí:

$$Z = \frac{I}{\frac{a}{2}} = \frac{b.a^2}{6} = \frac{2,084.10^{-7}}{\frac{0,063}{2}} = 6,615.10^{-6} \text{ m}^3$$

Ohybové napětí vodiče:

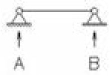
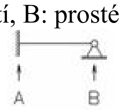
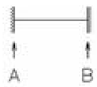
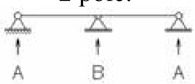
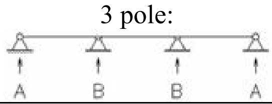
Z tabulek 3.1.1 a 3.1.2 plyne, že $V_\sigma.V_r = 1$ a $\beta = 0,73$

U jednoduchého vodiče (není složen z dílčích vodičů) platí $\sigma_{tot} = \sigma_m$ a tedy

$$\sigma_{tot} = \sigma_m = V_\sigma.V_r.\beta.\frac{F_{m3}.l}{8.Z} = 1.0,73.\frac{796.1}{8.6,615.10^{-6}} = 10,98 \text{ MPa}$$

Druh zkratu	$V_\sigma.V_r$ Bez trojfázového OZ	$V_\sigma.V_r$ S trojfázovým OZ	$V_F.V_r$ S i bez trojfázového OZ
2f	1,0	1,8	Oblast 1: 2,0 pro $\frac{\sigma_{tot}}{0,8.R_{p0,2}} \leq 0,5$ Oblast 2: $\frac{0,8.R_{p0,2}}{\sigma_{tot}}$ pro $0,5 \leq \frac{\sigma_{tot}}{0,8.R_{p0,2}} \leq 1,0$ Oblast 3: 1,0 pro $1,0 \leq \frac{\sigma_{tot}}{0,8.R_{p0,2}}$
3f	1,0	1,8	Oblast 1: 2,7 pro $\frac{\sigma_{tot}}{0,8.R_{p0,2}} \leq 0,370$ Oblast 2: $\frac{0,8.R_{p0,2}}{\sigma_{tot}}$ pro $0,370 \leq \frac{\sigma_{tot}}{0,8.R_{p0,2}} \leq 1,0$ Oblast 3: 1,0 pro $1,0 \leq \frac{\sigma_{tot}}{0,8.R_{p0,2}}$

tabulka 3.1.2: Konstanty $V_\sigma.V_r, V_F$ pro výpočet ohyb. napětí a síly na podpěrky

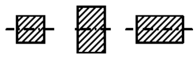
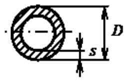
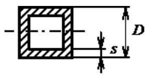
Typ nosníku a způsob upevnění		α	β
nosník o jednom poli	A a B: prosté podepření 	$\alpha_A = 0,5$ $\alpha_B = 0,5$	$\beta = 1$
	A: vetknutí, B: prosté podepření 	$\alpha_A = 0,625$ $\alpha_B = 0,375$	$\beta = 0,73$
	A a B: vetknutí 	$\alpha_A = 0,5$ $\alpha_B = 0,5$	$\beta = 0,5$
nosník o více polích stejných rozměrů	2 pole: 	$\alpha_A = 0,375$ $\alpha_B = 1,25$	$\beta = 0,73$
	3 pole: 	$\alpha_A = 0,4$ $\alpha_B = 1,1$	$\beta = 0,73$

tabulka 3.1.3: Konstanty α , β pro výpočet ohyb. napětí a síly na podpěrky

Přípojnice jsou odolné vůči zkratové síle, jestliže $\sigma_{tot} \leq q.R_{p0,2}$ pro minimální hodnotou $R_{p0,2\min}$ (je-li známa).

Pro obdélníkový průřez q = 1,5, viz. tabulka 3.1.4. Tedy $q.R_{p0,2} = 1,5.40 \text{ MPa} = 60 \text{ MPa}$.

$\sigma_{tot} = \sigma_m = 10,98 \text{ MPa} \leq 60 \text{ MPa}$ **přípojnice vyhovuje**

	$q = 1{,}5$
	$q = 1{,}7$
	$q = 1{,}7.\dfrac{1-\left(1-\dfrac{2.s}{D}\right)^3}{1-\left(1-\dfrac{2.s}{D}\right)^4}$
	$q = 1{,}5.\dfrac{1-\left(1-\dfrac{2.s}{D}\right)^3}{1-\left(1-\dfrac{2.s}{D}\right)^4}$

tabulka 3.1.4: Součinitelé *q* pro různé průřezy vodičů

<u>Ohybové síly na podpěrky:</u>
Dynamická síla F_d se vypočítá podle vztahu: $F_d = V_F.V_r.\alpha.F_{m3}$

Podle tabulky 3.1.2 pro maximální hodnotu $R'_{p0,2max}$ a trojfázový zkrat

$$\frac{\sigma_{tot}}{0{,}8.R'_{p0,2}} = \frac{10{,}98}{0{,}8.80} = 0{,}172 \le 0{,}37$$

tomu odpovídá $V_F.V_r = 2{,}7$

<u>Síly na vnější podpěrky:</u>
Pro vnější podpěrky platí podle tabulky 3.1.3 $\alpha_A = 0{,}4$

$$F_{dA} = V_F.V_r.\alpha_A.F_{m3} = 2{,}7.0{,}4.796 = 859{,}7 \text{ N}$$

<u>Síly na vnitřní podpěrky:</u>
Pro vnitřní podpěrky platí podle tabulky 3.1.3 $\alpha_B = 1{,}1$

$$F_{dB} = V_F.V_r.\alpha_B.F_{m3} = 2{,}7.1{,}1.796 = 2364 \text{ N}$$

<u>Příklad 3.2.</u>

Vypočítejte, zda přípojnice podle obr. 3.2.2 systému 110 kV vyhovují dynamickým účinkům zkratového proudu. Přípojnice tvoří trubkové vodiče AlMgSi 70x3 mm ($D = 70$ mm, $s = 3$ mm) s fázovou roztečí $d = 2$ m. Minimální mez průtažnosti slitiny AlMgSi je $R_{p0,2} = 120$ MPa. Uvažujte jedno rozpětí o délce $l = 5$ m a uchycení v jednom bodě kluzně a v druhém pevně. K dispozici jsou údaje o dynamických zkratových proudech $i_{p1} = 100$ kA, $i_{p2} = 85$ kA a $i_{p3} = 90$ kA. Přípojnice jsou provozovány v systému trojpólového OZ.

<u>Řešení:</u>

Jednopólový zkratový proud nevyvozuje dynamické síly na přípojnice. Zbývá porovnat silové účinky dvojpólového a trojpólového zkratového proudu. Pro vrcholovou sílu mezi hlavními vodiči při dvojpólovém zkratu platí:

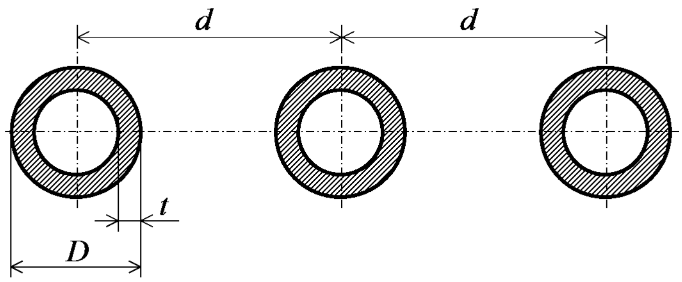
$$F_{m2} = \frac{\mu_0}{2.\pi}.i_{p2}^2.\frac{l}{d_m} = \frac{4.\pi.10^{-7}}{2.\pi}.85^2.10^6.\frac{5}{2} = 3613 \text{ N}$$

Při trojpólovém zkratu:

$$F_{m3} = \frac{\mu_0}{2.\pi}.\frac{\sqrt{3}}{2}.i_{p3}^2.\frac{l}{d_m} = \frac{4.\pi.10^{-7}}{2.\pi}.\frac{\sqrt{3}}{2}.90^2.10^6.\frac{5}{2} = 3507 \text{ N}$$

Pozn.: Pro trubkový vodič uvažujeme $d_m = d$

Pro další výpočty tedy uvažujeme sílu F_{m2}.



obrázek 3.2.1: Uspořádání vodičů k příkladu 3.2

Moment setrvačnosti:

$$I = \frac{\pi.\left(\left(\frac{D}{2}\right)^4 - \left(\frac{D}{2} - s\right)^4\right)}{4} = \frac{\pi.\left(\left(\frac{0,07}{2}\right)^4 - \left(\frac{0,07}{2} - 0,003\right)^4\right)}{4} = 3,550.10^{-7} \text{ m}^4$$

Průřezový modul:

$$Z = \frac{I}{\frac{D}{2}} = \frac{3,550.10^{-7}}{\frac{0,07}{2}} = 1,014.10^{-5} \text{ m}^3$$

Ohybové napětí vodiče:

Z tabulek 3.1.1 a 3.1.2 plyne, že $V_\sigma.V_r = 1,8$ a $\beta = 0,73$, a tedy

$$\sigma_{tot} = \sigma_m = V_\sigma.V_r.\beta.\frac{F_{m2}.l}{8.Z} = 1,8.0,73.\frac{3613.5}{8.1,014.10^{-5}} = 292,5 \text{ MPa}$$

Přípojnice jsou odolné vůči zkratové síle, jestliže $\sigma_{tot} \leq q.R_{p0,2}$ kde

$$q = 1,7.\frac{1-\left(1-\frac{2.s}{D}\right)^3}{1-\left(1-\frac{2.s}{D}\right)^4} = 1,7.\frac{1-\left(1-\frac{2.0,003}{0,07}\right)^3}{1-\left(1-\frac{2.0,003}{0,07}\right)^4} = 1,701 \text{(viz. tabulka 3.1.4)}$$

Tedy $q.R_{p0,2} = 1,701.120$ MPa = 204,1 MPa .

$\sigma_{tot} = \sigma_m = 292,5$ MPa > 204,1 MPa **přípojnice nevyhovuje**

Příklad 3.3.

Určete, zda trubkové přípojnice AlMgSi 70x3 mm vyhoví tepelně účinkům zkratového proudu o parametrech $I_{th} = 40$ kA a $T_k = 3$ s . Počáteční teplotu (= nejvyšší provozní teplotu) uvažujte $\theta_b = 80$ °C a konečnou (= nejvyšší dovolenou teplotu po zkratu) $\theta_e = 200$ °C .

Řešení:

Hustotu jmenovitého krátkodobého proudu S_{thr} spočítáme jako

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

$$= \sqrt{\frac{34,8.10^6.910.2700}{0,004}.\ln\left(\frac{1+0,004.(200°C - 20°C)}{1+0,004.(80°C - 20°C)}\right)} = 83,6 \text{ A.mm}^{-2}$$

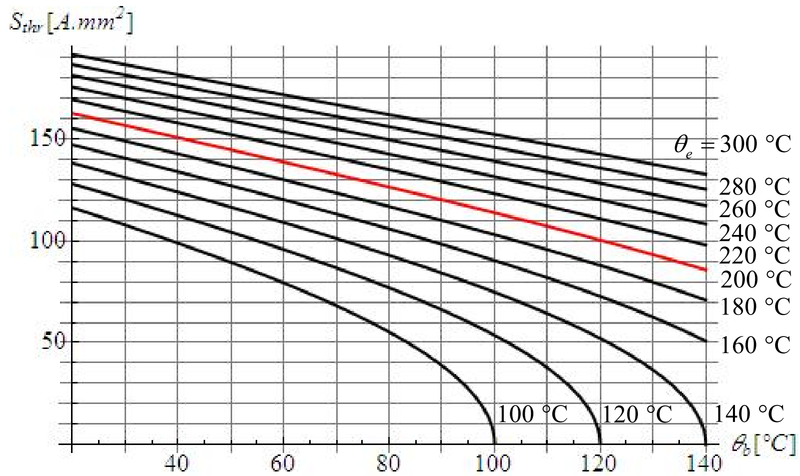
kde parametry pro hliník dosadíme z tabulky 3.3.1. Alternativně je možno S_{thr} odečíst z grafu na obr. 3.3.2, kde je vyznačena i doporučená konečná teplota vodiče (v tomto příkladě i zadaná).

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

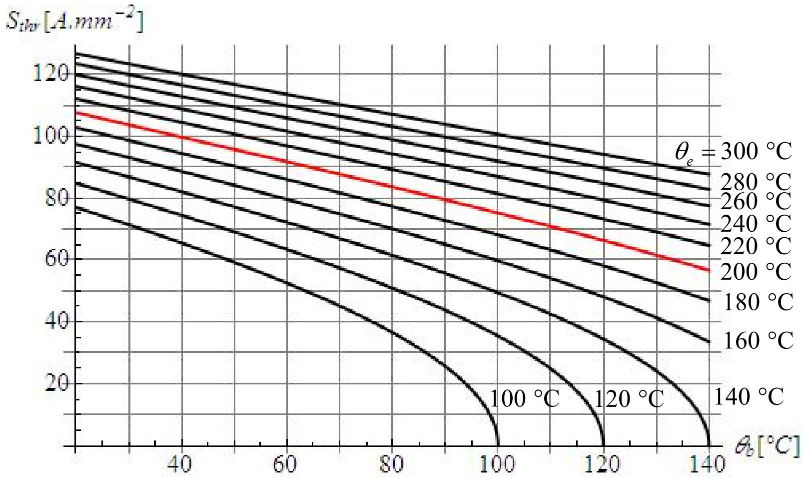
tabulka 3.3.1: Materiálové konstanty pro výpočet S_{thr}

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

tabulka 3.3.2: Doporučené konečné teploty vodičů pro výpočet zkratů



obrázek 3.3.1: Hustota jmenovitého krátkodobého proudu S_{thr} pro měď (vztažená k jmenovité době zkratu T_{kr} = 1 s)



obrázek 3.3.2: Hustota jmenovitého krátkodobého proudu S_{thr} pro hliník (vztažená k jmenovité době zkratu T_{kr} = 1 s)

Průřez trubkového vodiče bude

$$A = \frac{\pi}{4}.\left(D^2 - \left(D - 2.s\right)^2\right) = \frac{\pi}{4}.\left(70^2 - \left(70 - 2.3\right)^2\right) = 631 \text{ mm}^2$$

Odpovídající proudová hustota

$$S_{th} = \frac{I_{th}}{A} = \frac{40000}{631} = 63,39 \text{ A.mm}^{-2}$$

Přípojnice jsou odolné proti tepelným účinkům pokud

$$S_{th} \le S_{th}.\sqrt{\frac{T_{kr}}{T_k}} \text{, v tomto případě } S_{th}.\sqrt{\frac{T_{kr}}{T_k}} = 83,6.\sqrt{\frac{1}{3}} = 48,3 \text{ A.mm}^{-2}$$

Protože $63,39 \text{ A.mm}^{-2} > 48,3 \text{ A.mm}^{-2}$, přípojnice nevyhovují.

4. Tepelné oběhy v elektrárně

Příklad 4.1.

Spočítejte termodynamickou účinnost turbíny, jsou-li známé tyto parametry:

Kondenzátor (voda): $T_1 = 30$ °C, $p_1 = 4$ kPa, $s_1 = 0{,}437$ kJ.kg^{-1}.K^{-1}, $i_1 = 125{,}7$ kJ.kg^{-1}

Vstup do turbíny: $T_2 = 550$ °C, $p_2 = 15$ MPa, $s_2 = 6{,}523$ kJ.kg^{-1}.K^{-1}, $i_2 = 3450{,}4$ kJ.kg^{-1}

Kondenzátor (pára): $T_3 = 30$ °C, $p_3 = 4$ kPa, $s_3 = 6{,}523$ kJ.kg^{-1}.K^{-1}, $i_3 = 1970{,}7$ kJ.kg^{-1}

Řešení:

$$\eta_{td} = \frac{i_2 - i_3}{i_2 - i_1} = \frac{3450{,}4 - 1970{,}7}{3450{,}4 - 125{,}7} = 44{,}5\%$$

Příklad 4.2.

Spočítejte průtok chladící vody pro cirkulační chlazení kondenzátoru. Do kondenzátoru vstupuje emisní pára na mezi suchosti o průtoku $\dot{m}_e = 25$ kg.s^{-1}, kde kondenzuje při teplotě 40 °C. Chladící voda má na vstupu do kondenzátoru $T_{chS} = 20$ °C a na výstupu $T_{chT} = 35$ °C. Jaké množství vody je potřeba do okruhu doplňovat, je-li teplota páry unikající z chladící věže $T_{pCHV} = 25$ °C a ztráty únosem jsou 0,1%? Měrná tepelná kapacita vody je $c_v = 4{,}18$ kJ.kg^{-1}.K^{-1}.

Parametry emisní páry: $T_e = 40$ °C, $s_e = 8{,}675$ kJ.kg^{-1}.K^{-1}, $i_e = 2575$ kJ.kg^{-1}

Parametry kondenzátu: $T_k = 40$ °C, $s_k = 0{,}527$ kJ.kg^{-1}.K^{-1}, $i_k = 167{,}5$ kJ.kg^{-1}

Voda má při teplotě 25 °C: $s_{v25} = 0{,}367$ kJ.kg^{-1}.K^{-1}, $i_{v25} = 104{,}8$ kJ.kg^{-1}

Pára má při teplotě 25 °C: $s_{p25} = 8{,}556$ kJ.kg^{-1}.K^{-1}, $i_{p25} = 2547$ kJ.kg^{-1}

Řešení:

$$\dot{m}_{chT} = \frac{\dot{m}_e.\left(i_e - i_k\right)}{c_v.\left(T_{chT} - T_{chS}\right)} = \frac{25.\left(2575 - 167{,}5\right)}{4{,}18.\left(35 - 20\right)} = 960 \text{ kg.s}^{-1}$$

$$\dot{m}_{chd} = \dot{m}_{chun} + \dot{m}_{chodp} = \left(0{,}001 + \frac{c_v.\left(T_{chT} - T_{chS}\right)}{i_{p25} - i_{v25}}\right).\dot{m}_{chT} = \left(0{,}001 + \frac{4{,}18.\left(35 - 20\right)}{2547 - 104{,}8}\right).960 =$$

$$= \left(0{,}001 + 0{,}0256\right).960 = 25{,}6 \text{ kg.s}^{-1}$$

Příklad 4.3.

Spočítejte množství vzduchu v m^3.s^{-1} potřebného k uchlazení kondenzátoru z předchozího příkladu. Srovnejte příkony čerpadla u vodního chlazení a ventilátoru u vzduchového chlazení, budou-li muset dopravovat chladící médium do výšky 15 m. Čerpadlo i ventilátor mají účinnost η = 0,65. Měrná tepelná kapacita vzduchu je při teplotě 20 °C a tlaku 100 kPa c_{vz} = 1,01 kJ.kg^{-1}.K^{-1} a ρ_{vz} = 1,188 kg.m^{-3}.

Řešení:

$$\dot{m}_{vz} = \frac{\dot{m}_e.(i_e - i_k)}{c_{vz}.(T_{chT} - T_{chS})} = \frac{25.(2575-167,5)}{1,01.(35-20)} = 3973 \text{ kg.s}^{-1}$$

$$\dot{V}_{vz} = \frac{\dot{m}_{vz}}{\rho_{vz}} = \frac{3973}{1,18} = 3344 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$$

$$\Delta p_c = H.\rho_{vz}.g = 15.1,188.9,81 = 175 \text{ Pa}$$

$$P_{vent} = \frac{\dot{V}_{vz}.\Delta p_c}{\eta} = \frac{3344.175}{0,65} = 900 \text{ kW}$$

$$P_{čerp} = \frac{Q.\rho}{\eta}.H.g = \frac{\dot{m}_{chT}}{\eta}.H.g = \frac{960}{0,65}.15.9,81 = 217 \text{ kW}$$

Příklad 4.4.

Určete příkon napáječky a tlak na výstupu z napáječky. Napáječka dodává do kotle 200 l/s napájecí vody, která má na sání tlak 1 MPa. Tlak páry na výstupu z kotle je 8,6 MPa. Napáječka má účinnost 80% a pracuje do výtlaku 40 m.

Řešení:

Příkon napáječky bude:

$$P = \frac{Q.\rho}{\eta}\left(H.g + \frac{p_k - p_s}{\rho}\right) = \frac{0,2.10^3}{0,8}\left(40.9,81 + \frac{8,6.10^6 - 1.10^6}{10^3}\right) = 2.10^6 \text{ W } = 2 \text{ MW}$$ Tlak na výstupu napáječky

$$p_n = p_k + H.\rho.g = 8,6.10^6 + 40.10^3.9,81 = 9.10^6 \text{ Pa} = 9 \text{ MPa}$$

Příklad 4.5.

Kolik procent z celkového výkonu turbíny generuje VT a NT díl, když

VT-díl: T_{VT} = 530 °C, p_{VT} = 13 MPa, s_{VT} = 6,54 kJ.kg^{-1}.K^{-1}, i_{VT} = 3420 kJ.kg^{-1}

NT-díl: T_{NT} = 120 °C, p_{NT} = 200 kPa, s_{NT} = 6,54 kJ.kg^{-1}.K^{-1}, i_{NT} = 2480 kJ.kg^{-1}

Kondenzátor: T_K = 30 °C, p_K = 4 kPa, s_K = 6,54 kJ.kg^{-1}.K^{-1}, i_K = 1980 kJ.kg^{-1}

Řešení:

VT-díl generuje:

$$p_{VT} = \frac{i_{VT} - i_{NT}}{i_{VT} - i_K} = \frac{3420-2480}{3420-1980} = \frac{940}{1440} = 65,3\%$$

NT-díl generuje:

$$p_{NT} = \frac{i_{NT} - i_K}{i_{VT} - i_K} = \frac{2480 - 1980}{3420 - 1980} = \frac{700}{1640} = 34,7\%$$

5. Paliva, spalování a čištění spalin

Příklad 5.1.

Určete spotřebu suchého vzduchu vháněného do kotle potřebného pro spalování uhlí o $\dot{m} = 10\ \text{kg.s}^{-1}$ a parametrech: $Q_i^r = 11\ \text{MJ.kg}^{-1}$, $W^r = 30\ \%$, $A^r = 20\ \%$, $C^r = 49\ \%$, $S^r = 1\ \%$. Spalování probíhá při přebytku vzduchu $\lambda = 1{,}4$. Jaký je příkon vzduchového ventilátoru, pracuje-li do přetlaku $\Delta p_c = 3500\ \text{Pa}$ s účinností $\eta = 0{,}6$.

(Molární objem kyslíku uvažujte $22{,}4\ \text{dm}^3.\text{mol}^{-1}$ a obsah kyslíku ve vzduchu 21% obj., $M(S) = 0{,}032\ \text{kg.mol}^{-1}$, $M(C) = 0{,}012\ \text{kg.mol}^{-1}$)

Řešení:

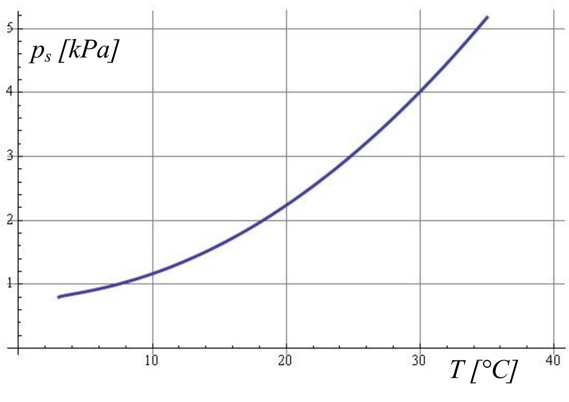
$$\dot{V}_{vzs} = 1{,}4.\frac{22{,}4}{0{,}21}.\left(\frac{0{,}49}{12} + \frac{0{,}01}{32}\right).10 = 61{,}4\ \text{m}^3.\text{s}^{-1}$$

$$P = \frac{\dot{V}_{vzs}.\Delta p_c}{\eta} = \frac{61{,}4.3500}{0{,}6} = 358\ \text{kW}$$

Příklad 5.2.

Proveďte korekci příkladu 5.1, je-li nasáván vlhký vzduch o rel. vlhkosti $\varphi = 90\%$ a teplotě $T = 20\ °\text{C}$ při atm. tlaku $p_c = 101{,}3\ \text{kPa}$.

Řešení:



Z obrázku 5.2.1 odečteme tlak syté páry pro teplotu $T = 20\ °\text{C}$:

$$p_s = 2{,}4\ \text{kPa}$$

Součinitel vlhkosti vzduchu bude potom:

$$\nu = 1 + \frac{\varphi.p_s}{p_c - \varphi.p_s} = 1 + \frac{0{,}9.2{,}4}{101{,}3 - 0{,}9.2{,}4} = $$
$$= 1{,}022$$

obrázek 5.2.1: Křivka tlaku syté páry

$$\dot{V}_{vz} = \nu.\lambda.\frac{22{,}4}{0{,}21}.\left(\frac{C^r}{12} + \frac{S^r}{32}\right).\dot{m} = 1{,}022.1{,}4.\frac{22{,}4}{0{,}21}.\left(\frac{0{,}49}{12} + \frac{0{,}01}{32}\right).10 = 62{,}7\ \text{m}^3.\text{s}^{-1}$$

$$P = \frac{\dot{V}_{vz}.\Delta p_c}{\eta} = \frac{62,7.3500}{0,6} = 366 \text{ kW}$$

Příklad 5.3.

Spočítejte objemový průtok vlhkých spalin (v $\text{m}^3.\text{s}^{-1}$) při spalování černého uhlí o $\dot{m} = 50 \text{ kg.s}^{-1}$ a parametrech: $Q_i^r = 27 \text{ MJ.kg}^{-1}$, $W^r = 19\ \%$, $A^r = 10\ \%$, $C^r = 70\ \%$, $S^r = 1\ \%$. Spalování probíhá při přebytku vzduchu $\lambda = 1{,}3$. Vzdušnou vlhkost a vázanou vodu v palivu při výpočtech zanedbejte.

(Molární objem kyslíku uvažujte $22,4 \text{ dm}^3.\text{mol}^{-1}$ a obsah kyslíku ve vzduchu 21% obj., molární objem CO_2 je $22,3 \text{ dm}^3.\text{mol}^{-1}$ a SO_2 je $21,9 \text{ dm}^3.\text{mol}^{-1}$, $M(S) = 0,032 \text{ kg.mol}^{-1}$, $M(C) = 0,012 \text{ kg.mol}^{-1}$, voda ve spalinách se vypočítá jako $\dot{V}_{H_2O} = 1,24.W^r.\dot{m}$ [$\text{m}^3.\text{s}^{-1}$])

Řešení:

Teoretický objem vzduchu potřebný pro spalování (bez přebytku, $\lambda = 1$) bude:

$$\dot{V}_{vzst} = \frac{22,4}{0,21}.\left(\frac{C^r}{12} + \frac{S^r}{32}\right).\dot{m}\ [\text{m}^3.\text{s}^{-1}] = \frac{22,4}{0,21}.\left(\frac{0,7}{12} + \frac{0,01}{32}\right).50 = 312,8 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$$

Tomu odpovídající teoretický objem suchých spalin bude:

$$\dot{V}_{snst} = \left(\frac{22,3}{12}.C^r + \frac{21,9}{32}.S^r\right).\dot{m} + 0,79.\dot{V}_{vzst}\ [\text{m}^3.\text{s}^{-1}] =$$

$$= \left(\frac{22,3}{12}.0,7 + \frac{21,9}{32}.0,01\right).50 + 0,79.312,8 = 312,5 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$$

Objem vlhkých spalin získáme započtením přebytkového vzduchu a vodní páry vzniklé z paliva:

$$\dot{V}_{sn} = \dot{V}_{snst} + (\lambda - 1).\dot{V}_{vzst} + 1,24.W^r.\dot{m}\ [\text{m}^3.\text{s}^{-1}] =$$

$$= 312,5 + (1,3 - 1).312,8 + 1,24.0,19.50 = 418,1 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$$

Příklad 5.4.

Určete spotřebu vápence ($CaCO_3$) a produkci sádrovce ($CaSO_4.2H_2O$) v kg.s^{-1} v odsiřovací jednotce, je-li koncentrace SO_2 ve spalinách na vstupu 5000 mg.m^{-3} a na výstupu 200 mg.m^{-3}. Objemový tok spalin je $\dot{V}_{sn} = 100 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$.

($M(Ca) = 0,040 \text{ kg.mol}^{-1}$, $M(S) = 0,032 \text{ kg.mol}^{-1}$, $M(O) = 0,016 \text{ kg.mol}^{-1}$, $M(C) = 0,012 \text{ kg.mol}^{-1}$, $M(H) = 0,001 \text{ kg.mol}^{-1}$)

Řešení:

Relativní molekulové hmotnosti:

$M(SO_2) = (0,032 + 2.0,016) = 0,064$ kg.mol^{-1}

$M(CaCO_3) = (0,040 + 0,012 + 3.0,016) = 0,100$ kg.mol^{-1}

$M(CaSO_4.2H_2O) = (0,040 + 0,032 + 4.0,016 + 4.0,001 + 2.0,016) = 0,172$ kg.mol^{-1}

V odsíření se vyčistí $c_{\Delta SO_2} = 5000 - 200 = 4800$ mg.m^{-3}

To odpovídá $\dot{n}_{\Delta SO_2} = \dfrac{c_{\Delta SO_2}}{M(SO_2)}.\dot{V}_{sn} = \dfrac{4,8.10^{-3}}{0,064}.100 = 7,5$ mol.s^{-1} $= \dot{n}_{CaCO_3} = \dot{n}_{CaSO_4.2H_2O}$

Hmotnostní tok vápence:

$$\dot{m}_{CaCO_3} = \dot{n}_{CaCO_3}.M(CaCO_3) = 7,5.0,100 = 0,75 \text{ kg.s}^{-1}$$

Hmotnostní tok sádrovce:

$$\dot{m}_{CaSO_4.2H_2O} = \dot{n}_{CaSO_4.2H_2O}.M(CaSO_4.2H_2O) = 7,5.0,172 = 1,29 \text{ kg.s}^{-1}$$

<u>Příklad 5.5.</u>

Spočítejte kolik tun CO_2 připadne na výrobu 1 MWh elektrické energie v kondenzační elektrárně s čistou účinností $\eta = 40$ % spalující černé uhlí o složení: $Q_i^r = 30$ MJ.kg^{-1} a $C^r = 90$ %.

($M(CO_2) = 0,044$ kg.mol^{-1}, $M(C) = 0,012$ kg.mol^{-1})

<u>Řešení:</u>

Množství paliva potřebného k výrobě 1 MWh bude:

$$m_{pal} = \frac{1 \text{ MWh . } 3600 \text{ s.h}^{-1}}{\eta.Q_i^r} = \frac{1 \text{ MWh . } 3600 \text{ s.h}^{-1}}{0,4.30 \text{ MJ.kg}^{-1}} = 300 \text{ kg}$$

Hmotnost CO_2 z paliva o hmotnosti m_{pal}:

$$m_{CO_2} = C^r.m_{pal}\frac{M(CO_2)}{M(C)} = 0,9.300.\frac{0,044}{0,012} = 990 \text{ kg} \cong 1 \text{ t}$$

<u>Příklad 5.6.</u>

Jaká musí být minimální odlučivost filtru, aby byly splněny emisní limity pro tuhé znečišťující látky (maximální koncentrace je $c_{TZL\mathrm{Ref}} = 30$ mg.m^{-3} při referenční hodnotě přebytku kyslíku v suchých spalinách $\omega_{O_2\mathrm{Ref}} = 6\%$). Spaluje se hnědé uhlí o složení: $Q_i^r = 11$ MJ.kg^{-1}, $W^r = 30$ %, $A^r = 30$ %, $C^r = 40$ %. Na popílek připadá 90% ($X_{pop} = 0,9$) a na strusku 10% z celkové popelnatosti paliva. Spalování probíhá při přebytku vzduchu $\lambda = 1,3$. Sirnatost paliva při výpočtech zanedbejte.

(Molární objem kyslíku uvažujte $22,4$ dm^3.mol^{-1} a obsah kyslíku ve vzduchu 21% obj., molární objem CO_2 je $22,3$ dm^3.mol^{-1}, $M(C) = 0,012$ kg.mol^{-1})

Řešení:

Teoretický objem vzduchu potřebný pro spalování 1 kg paliva (bez přebytku, $\lambda = 1$) bude:

$$V_{vzst/kg} = \frac{22,4}{0,21} \cdot \frac{C^r}{12} \ [\mathrm{m^3.kg^{-1}}] = \frac{22,4}{0,21} \cdot \frac{0,4}{12} = 3,5556 \ \mathrm{m^3.kg^{-1}}$$

Objem suchých spalin (spalovaných se zadaným přebytkem, $\lambda = 1,3$) bude:

$$V_{sns/kg} = \frac{22,3}{12}.C^r + 0,79.V_{vzst/kg} + (\lambda - 1).V_{vzst/kg} \ [\mathrm{m^3.kg^{-1}}] =$$

$$= \frac{22,3}{12}.0,4 + 0,79.3,5556 + (1,3-1).3,5556 = 4,6189 \ \mathrm{m^3.kg^{-1}}$$

Přebytek kyslíku v suchých spalinách bude

$$\omega_{O_2} = \frac{V_{O_2/kg}}{V_{sns/kg}} = \frac{0,21.(\lambda-1).V_{vzst/kg}}{V_{sns/kg}} = \frac{0,21.0,3.3,5556}{4,6189} = 0,0485 = 4,85\%$$

Koncentrace tuhých znečišťujících látek v suchých spalinách před filtrem:

$$c_{TZL} = \frac{A^r.X_{pop}}{V_{sns/kg}} \ [1.1/(\mathrm{m^3.kg^{-1}})] = \frac{0,3.0,9}{4,6189} = 0,058456 \ \mathrm{kg.m^{-3}}$$

Protože

$$c_{TZL\mathrm{Ref}} = (1 - O_c).c_{TZL}.\frac{0,21 - \omega_{O_2\mathrm{Ref}}}{0,21 - \omega_{O_2}}$$

bude hledaná odlučivost

$$O_c = 1 - \frac{0,21 - \omega_{O_2}}{0,21 - \omega_{O_2\mathrm{Ref}}} \cdot \frac{c_{TZL\mathrm{Ref}}}{c_{TZL}} = 1 - \frac{0,21 - 0,0485}{0,21 - 0,06} \cdot \frac{3.10^{-5}}{5,8456.10^{-2}} = 99,94\%$$