
Elektrárny

Příklady ke cvičením

Ing. Jan Špetlík, Ph.D.

1. Obsah

1. Obsah.....	3
2. Napěťové a zkratové poměry.....	5
Příklad 2.1.....	5
Příklad 2.2.....	5
Příklad 2.3.....	6
Příklad 2.4.....	7
Příklad 2.5.....	8
Příklad 2.6.....	9
Příklad 2.7.....	9
Příklad 2.8.....	10
3. Fázování alternátoru	11
Příklad 3.1.....	11
Příklad 3.2.....	11
Příklad 3.3.....	11
4. Účinky zkratových proudů.....	13
Příklad 4.1.....	13
Příklad 4.2.....	17
Příklad 4.3.....	19
5. Tepelné oběhy v elektrárně	22
Příklad 5.1.....	22
Příklad 5.2.....	22
Příklad 5.3.....	23
Příklad 5.4.....	23
Příklad 5.5.....	24
Příklad 5.6.....	24
Příklad 5.7.....	25
6. Paliva, spalování, čištění spalin	26
Příklad 6.1.....	26
Příklad 6.2.....	26
Příklad 6.3.....	27
Příklad 6.4.....	27
Příklad 6.5.....	28

Příklad 6.6.....	28
7. Dynamické modely elektráren	30
Příklad 7.1.....	30

2. Napět'ové a zkratové poměry

Příklad 2.1

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:

$$S_{kM} = \frac{u_s u_M}{u_s - u_M} \cdot i_{z\Sigma M} \cdot S_{n\Sigma M} = \frac{1 \cdot 0,65}{1 - 0,65} \cdot 5 \cdot 15 = 139,3 \text{ MVA}$$

Příklad 2.2

Vypočítejte 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:

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

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:

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

Úbytek napětí bude:

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

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

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

Příklad 2.3

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

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

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

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

a) nezátíženém $Q_{SVS} = 0 \text{ MVar}$

b) zatíženém při $Q_{SVS} = 8,7 \text{ MVar}$

Řešení:

$$S_V = 16 \text{ MVA}, U_V = 6,3 \text{ kV}$$

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

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

nebo řešíme

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

$$p^2 \cdot (0,15 \cdot 0 + 1) - p \cdot \frac{116,6}{6,3} + \frac{16}{\infty} \cdot \left(\frac{116,6}{6,3} \right)^2 \cdot 0 = 0$$

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

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:

$$u_s = \frac{\frac{1}{p} \cdot U_s}{U_v}$$

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

$$u_s = \frac{U_s}{p \cdot U_v} = u_{svs} + x_T \cdot i_j$$

a tedy

$$p = \frac{U_s}{(u_{svs} + x_T \cdot i_j) \cdot U_v} = \frac{116,6}{(1 + 0,15 \cdot 0,54375) \cdot 6,3} = \frac{107,8}{6,3}$$

nebo řešíme

$$p^2 \cdot (x_T \cdot i_j + u_{svs}) - p \cdot \frac{U_s}{U_v} + \frac{S_v}{S_{ks}} \cdot \left(\frac{U_s}{U_v} \right)^2 \cdot i_j = 0$$

$$p^2 \cdot (0,15 \cdot 0,54375 + 1) - p \cdot \frac{116,6}{6,3} + \frac{16}{\infty} \cdot \left(\frac{116,6}{6,3} \right)^2 \cdot 0,54375 = 0$$

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

Příklad 2.4

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:

$$S_{gn} = 250 \text{ MVA}, U_g = U_{gn} = 13,8 \text{ kV}, x_d'' = 0,12$$

Řešení:

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

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

Příklad 2.5

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 $S''_{kodb} \rightarrow \infty$.

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

$$P_{VS} = 4 \text{ MW}, Q_{VS} = 2,5 \text{ MVar}$$

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

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

Proveďte kontrolu:

- součtového výkonu celé vlastní spotřeby
- napětíových poměrů při spouštění elektronapáječky

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

Řešení:

$$\text{a) Protože } P_{EN} = \beta_{EN} \cdot S_{nEN} \cos \varphi_{nEN} = 1 \cdot 2,5 \cdot 0,8 = 2 \text{ MW}$$

$$\text{a } Q_{EN} = \beta_{EN} \cdot S_{nEN} \sqrt{1 - \cos^2 \varphi_{nEN}} = 1 \cdot 2,5 \cdot 0,6 = 1,5 \text{ MVar}$$

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

- Volíme vztažený výkon:

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

Celková reaktance:

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

protože

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

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

Je tedy nutné vybrat transformátor 10 MVA.

Příklad 2.6

Rozvodna vlastní spotřeby je provozována na hladině $U_s = 6,3 \text{ kV}$. Celková kapacita (každé fáze proti zemi) kabelové sítě napájené oblasti činí $C_0 = 10 \text{ } \mu\text{F}$. Rozvodnu napájí transformátor 110/6,3 kV Yny0, který má v uzlu na straně vn 6,3 kV vyvedený odporník $R = 27,7 \text{ } \Omega$. 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:

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

$$Y_0 = \sqrt{\left(\frac{1}{3 \cdot R}\right)^2 + (\omega \cdot C_0)^2} = \sqrt{\left(\frac{1}{3 \cdot 27,7}\right)^2 + (2 \cdot \pi \cdot 10^{-5})^2} = 1,244 \cdot 10^{-2} \text{ S}$$

Proud sousledné složky bude

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

Protože

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

bude

$$I_A = 3 \cdot Y_0 \cdot \frac{U_s}{\sqrt{3}} = \sqrt{3} \cdot Y_0 \cdot U_s = \sqrt{3} \cdot 1,244 \cdot 10^{-2} \cdot 6300 = 136 \text{ A}$$

Příklad 2.7

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

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

Generátor dodává do sítě výkon

- a) 0 MW
- b) 8 MW

Řešení:

Vztažné hodnoty napětí a výkonu volíme:

$$U_V = 6,3 \text{ kV} \text{ a } S_V = 10 \text{ MVA}$$

Poměrné hodnoty napětí a impedancí budou:

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

Výkon přenášený přes transformátor

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

$$a) \quad \frac{P}{S_V} = \frac{0}{10} = 0 = \frac{1.1,05}{0,1} \sin \delta \text{ a tedy } \delta = 0^\circ$$

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

$$\delta = \arcsin \frac{0,8 \cdot 0,1}{1.1,05} = \arcsin 0,0762 = 4,37^\circ$$

Příklad 2.8

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:

$$S_{nT} = 200 \text{ MVA}, e_k = 0,12, p = 15 \text{ kV} / 420 \text{ kV}, Y_{nd11}$$

Parametry generátoru jsou:

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

Řešení:

Vztažné hodnoty napětí a výkonu volíme:

$$U_V = 15 \text{ kV} \text{ a } S_V = 200 \text{ MVA}$$

Poměrné hodnoty napětí a impedancí budou:

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

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

Příspěvek trojfázového zkratového proudu bude:

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

Příspěvek jednofázového zkratového proudu bude:

$$i''_{k1} = 3 \cdot i_0 = \frac{3 \cdot u_g}{(x_t + x_{g1}) + (x_t + x_{g2}) + x_t} = \frac{3 \cdot 1,133}{3 \cdot 0,12 + 0,15 + 0,18} = \frac{3,4}{0,66} = 5,152, \text{ a tedy}$$

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

3. Fázování alternátoru

Příklad 3.1

Vypočítejte 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:

$$S_n = 63 \text{ MVA}, U_n = 10,5 \text{ kV}, x_d'' = 0,15$$

parametry blokového transformátoru:

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

Řešení:

$$i_k'' = \frac{e'' - u_s}{x_t + x_d''} = \frac{2u \cdot \sin \frac{\psi}{2}}{x_t + x_d''} = \frac{2 \cdot 1 \cdot \sin \frac{5}{2} \cdot \frac{\pi}{180}}{0,1 + 0,15} = \frac{2 \cdot \sin 0,04363}{0,25} = 0,349$$

$$I_k'' = i_k'' \cdot \frac{S_n}{\sqrt{3} \cdot U_n} = 0,349 \cdot \frac{63 \cdot 10^6}{\sqrt{3} \cdot 10,5 \cdot 10^3} = 1,209 \text{ kA}$$

Příklad 3.2

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:

$$i_{kZ}'' = \frac{e''}{x_d''} = \frac{1}{0,15} = 6,66$$

$$i_{kN}'' = \frac{e'' - u_s}{x_t + x_d''} = \frac{2u \cdot \sin \frac{\psi}{2}}{x_t + x_d''} = \frac{2 \cdot 1 \cdot \sin \frac{\pi}{2}}{0,1 + 0,15} = \frac{2}{0,25} = 8$$

Příklad 3.3

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

$$U_G = 23 \text{ kV}, U_s = 410 \text{ kV}$$

Parametry blokového transformátoru jsou:

$$S_{nT} = 1100 \text{ MVA}, e_k = 0,15, p = 24 \text{ kV} / 420 \text{ kV}, Y_{nd11}$$

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:

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

Poměrné hodnoty napětí a impedancí budou:

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

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

Trojfázový symetrický rázový proud bude pro zdrojovou orientaci:

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

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

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

$$Q_G = q_G \cdot S_V = -0,057 \cdot 1100 = -62,7 \text{ MVAr}$$

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.

4. Účinky zkratových proudů

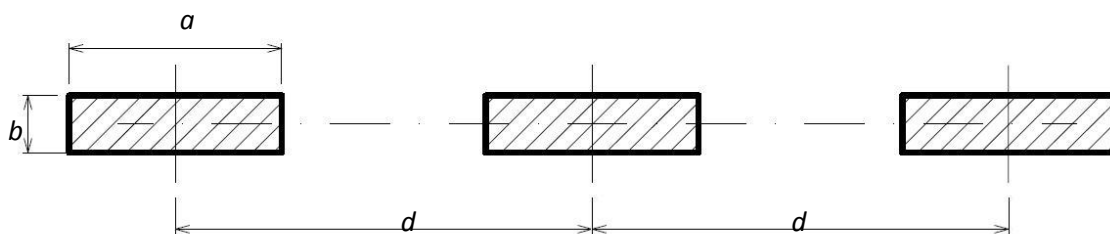
Příklad 4.1

Vypočítejte, zda přípojnice podle obr. 4.1.1 systému 10 kV vyhovují dynamickým účinkům trojpólového zkratového proudu a jaké bude dynamické namáhání podpěrek. Vodiče tvoří spojitý nosník s prostým podepřením o stejném rozpětí. Při výpočtech použijte zjednodušenou metodu neuvažující vliv vlastní frekvence sestavy. Jsou známy následující údaje:

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

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

Rozměry	$a = 0,063 \text{ m}, b = 0,010 \text{ m}$
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:	$R'_{p0,2} = 80 \text{ MPa}$



obrázek 4.1.1: Uspořádání vodičů k příkladu 3.1

Řešení:

Součinitel k_{12} :

Pro obdélníkové vodiče platí obr. 4.1.2.

(ČSN EN 60 865-1)

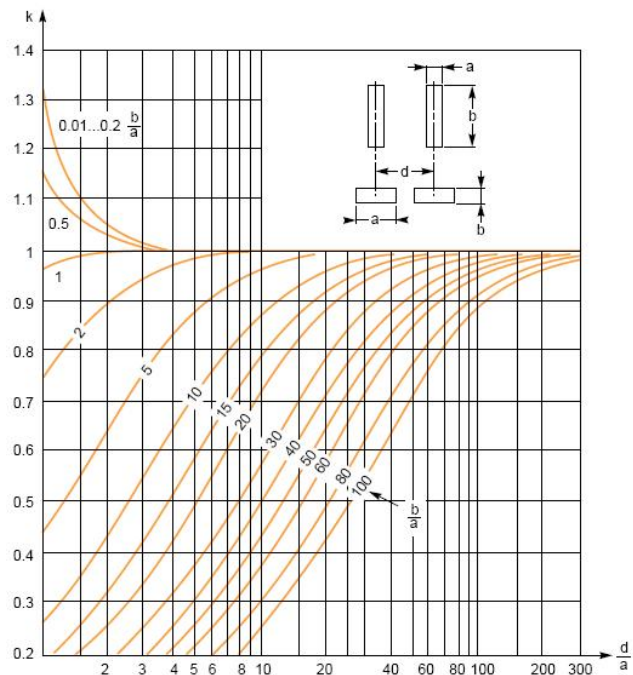
poměr $b/a = 0,16$, poměr $d/a = 5,56$

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 4.1.2: 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:

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

Moment setrvačnosti:

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

tabulka 4.1.1: Momenty setrvačnosti pro různé průřezy vodičů

Pro obdélníkové průřezy platí:

$$I = \frac{b \cdot a^3}{12} = \frac{0,01 \cdot 0,063^3}{12} = 2,084 \cdot 10^{-7} \text{ m}^4$$

Průřezový modul:

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

Pro obdélníkové průřezy platí:

$$Z = \frac{I}{\frac{a}{2}} = \frac{b \cdot a^2}{6} = \frac{2,084 \cdot 10^{-7}}{\frac{0,063}{2}} = 6,615 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3$$

Ohybové napětí vodiče:

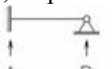
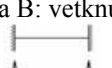
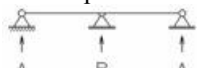
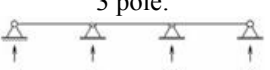
Z tabulek 4.1.1 a 4.1.2 plyne, že $V_\sigma \cdot V_r = 1$ a $\beta = 0,73$

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

$$\sigma_{tot} = \sigma_m = V_\sigma \cdot V_r \cdot \beta \cdot \frac{F_{m3} \cdot I}{8 \cdot Z} = 1,0,73 \cdot \frac{796,1}{8 \cdot 6,615 \cdot 10^{-6}} = 10,98 \text{ MPa}$$

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

tabulka 4.1.2: Konstanty $V_\sigma \cdot V_r, V_F$ pro výpočet ohyb. napětí a síly na podpěrky

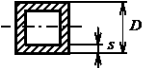
Typ nosníku a způsob upevnění		α	β
nosník o jednom poli	A a B: prosté podepření 	$\alpha_A = 0,5$ $\alpha_B = 0,5$	$\beta = 1$
	A: vetknutí, B: prosté podepření 	$\alpha_A = 0,625$ $\alpha_B = 0,375$	$\beta = 0,73$
	A a B: vetknutí 	$\alpha_A = 0,5$ $\alpha_B = 0,5$	$\beta = 0,5$
nosník o více polích 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 4.1.3: Konstanty α , β pro výpočet ohyb. napětí a síly na podpěrky

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

Pro obdélníkový průřez $q = 1,5$, viz. tabulka 4.1.4. Tedy $q \cdot R_{p0,2} = 1,5 \cdot 40 \text{ MPa} = 60 \text{ MPa}$.

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

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

tabulka 4.1.4: Součinitelé q pro různé průřezy vodičů

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

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

tomu odpovídá $V_F \cdot V_r = 2,7$

Síly na vnější podpěrky:

Pro vnější podpěrky platí podle tabulky 3.1.3 $\alpha_A = 0,4$

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

Síly na vnitřní podpěrky:

Pro vnitřní podpěrky platí podle tabulky 3.1.3 $\alpha_B = 1,1$

$$F_{dB} = V_F \cdot V_r \cdot \alpha_B \cdot F_{m3} = 2,7 \cdot 1,1 \cdot 796 = 2364 \text{ N}$$

Příklad 4.2

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

Řešení:

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

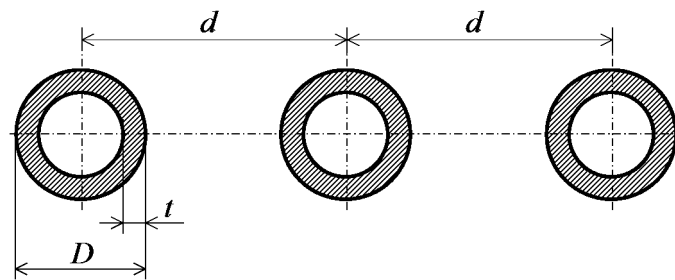
$$F_{m2} = \frac{\mu_0}{2\pi} \cdot i_{p2}^2 \cdot \frac{l}{d_m} = \frac{4\pi \cdot 10^{-7}}{2\pi} \cdot 85^2 \cdot 10^6 \cdot \frac{5}{2} = 3613 \text{ N}$$

Při trojpólovém zkratu:

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

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

Pro další výpočty tedy uvažujeme sílu F_{m2} .



obrázek 4.2.1: Uspořádání vodičů k příkladu 3.2

Moment setrvačnosti:

$$I = \frac{\pi \cdot \left(\left(\frac{D}{2} \right)^4 - \left(\frac{D-s}{2} \right)^4 \right)}{4} = \frac{\pi \cdot \left(\left(\frac{0,07}{2} \right)^4 - \left(\frac{0,07}{2} - 0,003 \right)^4 \right)}{4} = 3,550 \cdot 10^{-7} \text{ m}^4$$

Průřezový modul:

$$Z = \frac{I}{\frac{D}{2}} = \frac{3,550 \cdot 10^{-7}}{\frac{0,07}{2}} = 1,014 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3$$

Ohybové napětí vodiče:

Z tabulek 4.1.1 a 4.1.2 plyne, že $V_\sigma \cdot V_r = 1,8$ a $\beta = 0,73$, a tedy

$$\sigma_{tot} = \sigma_m = V_\sigma \cdot V_r \cdot \beta \cdot \frac{F_{m2} \cdot I}{8 \cdot Z} = 1,8 \cdot 0,73 \cdot \frac{3613,5}{8 \cdot 1,014 \cdot 10^{-5}} = 292,5 \text{ MPa}$$

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

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

Tedy $q \cdot R_{p0,2} = 1,701 \cdot 120 \text{ MPa} = 204,1 \text{ MPa}$.

$$\sigma_{tot} = \sigma_m = 292,5 \text{ MPa} > 204,1 \text{ MPa}$$

přípojnice nevyhovuje

Příklad 4.3

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

Řešení:

Hustotu jmenovitého krátkodobého proudu S_{thr} spočítáme jako

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

$$= \sqrt{\frac{34,8 \cdot 10^6 \cdot 910 \cdot 2700}{0,004} \cdot \ln \left(\frac{1 + 0,004 \cdot (200^\circ\text{C} - 20^\circ\text{C})}{1 + 0,004 \cdot (80^\circ\text{C} - 20^\circ\text{C})} \right)} = 83,6 \text{ A} \cdot \text{mm}^{-2}$$

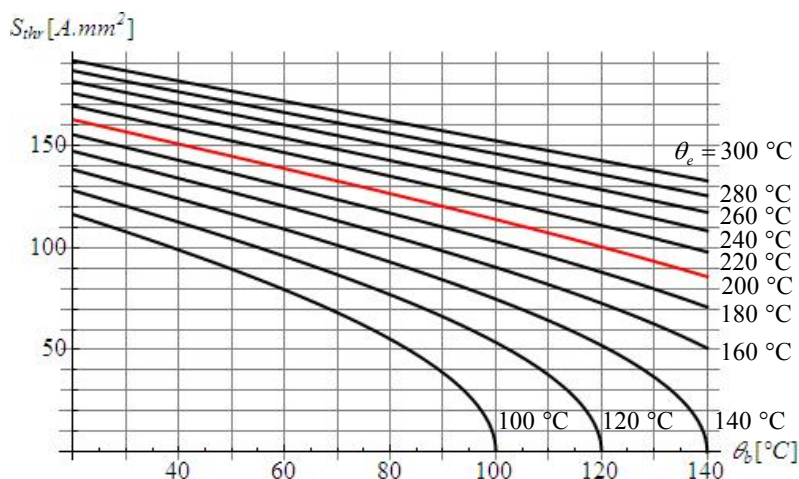
kde parametry pro hliník dosadíme z tabulky 4.3.1. Alternativně je možno S_{thr} odečíst z grafu na obr. 4.3.2, kde je vyznačena i doporučená konečná teplota vodiče (v tomto příkladě i zadaná).

	měď	hliník, slitina hliníku, AlFe vodiče	ocel
$c [\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}]$	390	910	480
$\rho [\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}]$	8900	2700	7850
$\kappa_{20} [\Omega^{-1} \cdot \text{m}^{-1}]$	$56 \cdot 10^6$	$34,8 \cdot 10^6$	$7,25 \cdot 10^6$
$\alpha_{20} [^\circ\text{C}^{-1}]$	0,0039	0,004	0,0045

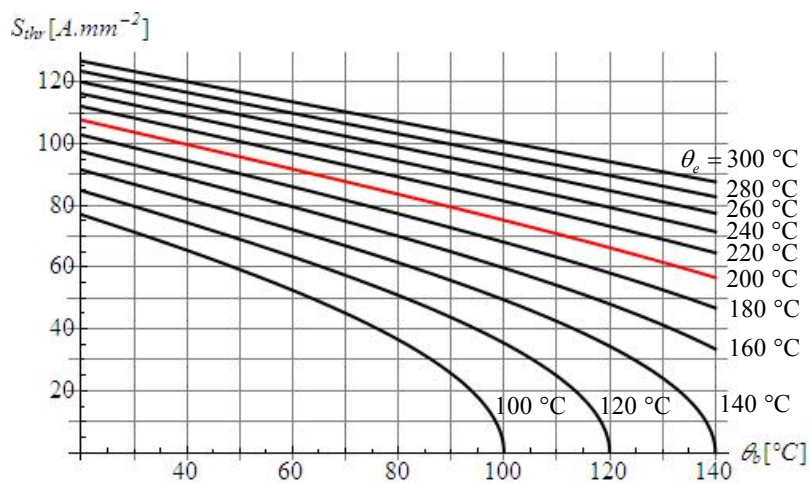
tabulka 4.3.1: Materiálové konstanty pro výpočet S_{thr}

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 4.3.2: Doporučené konečné teploty vodičů pro výpočet zkratů



obrázek 4.3.1: Hustota jmenovitého krátkodobého proudu S_{thr} pro měď (vztažená k jmenovité době zkratu $T_{kr} = 1$ s)



obrázek 4.3.2: Hustota jmenovitého krátkodobého proudu S_{thr} pro hliník (vztažená k jmenovité době zkratu $T_{kr} = 1$ s)

Průřez trubkového vodiče bude

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

Odpovídající proudová hustota

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

Připojnice jsou odolné proti tepelným účinkům pokud

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

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

5. Tepelné oběhy v elektrárně

Příklad 5.1

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

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

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

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

Řešení:

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

Příklad 5.2

Spočítejte termickou účinnost a tlak ve spalovací komoře spalovací turbíny, jsou-li známé tyto parametry:

Před kompresorem: $T_1 = 300\text{ K}$ (27 °C), $p_1 = 100\text{ kPa}$

Před spalovací komorou: $T_2 = 500\text{ K}$ (227 °C), $p_2 = ?$

Před plynovou turbínou: $T_3 = 1500\text{ K}$ (1227 °C), $p_3 = p_2$

Za plynovou turbínou: $T_4 = 900\text{ K}$ (627 °C), $p_4 = 100\text{ kPa}$

Uvažujte ideální plyn s $\kappa = 1,333$.

Řešení:

Jestliže uvažujeme dva izobarické děje $p_1 = p_4$ a $p_2 = p_3$ a dva adiabatické $p_1 \cdot v_1^\kappa = p_2 \cdot v_2^\kappa$ (resp.

$T_1 \cdot p_1^{\frac{1-\kappa}{\kappa}} = T_2 \cdot p_2^{\frac{1-\kappa}{\kappa}}$) a $p_3 \cdot v_3^\kappa = p_4 \cdot v_4^\kappa$ (resp. $T_3 \cdot p_3^{\frac{1-\kappa}{\kappa}} = T_4 \cdot p_4^{\frac{1-\kappa}{\kappa}}$), musí platit

$$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{p_1}{p_2}\right)^{\frac{1-\kappa}{\kappa}} = \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} \text{ a } \frac{T_3}{T_4} = \left(\frac{p_3}{p_4}\right)^{\frac{1-\kappa}{\kappa}} = \left(\frac{p_3}{p_4}\right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}}$$

Zároveň

$$\frac{p_2}{p_1} = \frac{p_3}{p_4} \Rightarrow \left(\frac{p_1}{p_2}\right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} = \left(\frac{p_3}{p_4}\right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} = \frac{T_2}{T_1} = \frac{T_3}{T_4}$$

Tlak ve spalovací komoře je tedy:

$$p_2 = p_1 \cdot \left(\frac{T_2}{T_1}\right)^{\frac{\kappa}{\kappa-1}} = 100 \cdot \left(\frac{500}{300}\right)^{\frac{1,333}{1,333-1}} = 773\text{ kPa}$$

Protože

$$\eta_t = \frac{q_p - q_o}{q_p} = \frac{c_p \cdot (T_3 - T_2) - c_p \cdot (T_4 - T_1)}{c_p \cdot (T_3 - T_2)} = 1 - \frac{T_4 - T_1}{T_3 - T_2} = 1 - \frac{T_1}{T_2} \cdot \frac{\frac{T_4}{T_1} - 1}{\frac{T_3}{T_2} - 1} = 1 - \frac{T_1}{T_2} = 1 - \frac{T_4}{T_3} =$$

$$\eta_t = 1 - \frac{300}{500} = 1 - \frac{900}{1500} = 40 \%$$

Příklad 5.3

Spočítejte celkovou účinnost paroplynového cyklu, je-li použita parní turbína z příkladu 4.1 s účinností $\eta_S = 44,5\%$ a plynová turbína z příkladu 5.2 s účinností $\eta_G = 40\%$. Účinnost kotle využitého pro parní část je $\eta_B = 90\%$.

Řešení:

Protože

$$\eta_t = \frac{a_G + a_S}{q_p} = \frac{(q_p - q_o) + \eta_B \cdot (q_o - q_{kond})}{q_p} = \frac{(q_p - q_o)}{q_p} + \eta_B \cdot \frac{(q_o - q_{kond})}{q_p} = \frac{(q_p - q_o)}{q_p} +$$

$$+ \eta_B \cdot \frac{q_o - q_{kond}}{q_o} \cdot \frac{q_o}{q_p} = \eta_G + \eta_B \cdot \eta_S \cdot (1 - \eta_G) = 0,4 + 0,9 \cdot 0,445 \cdot (1 - 0,4) = 64\%$$

Příklad 5.4

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

Parametry emisní páry: $T_e = 40^\circ \text{C}$, $s_e = 8,675 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$, $i_e = 2575 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$

Parametry kondenzátu: $T_k = 40^\circ \text{C}$, $s_k = 0,527 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$, $i_k = 167,5 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$

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

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

Řešení:

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

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

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

Příklad 5.5

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

Řešení:

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

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

$$\Delta p_c = H \cdot \rho_{vz} \cdot g = 15 \cdot 1,188 \cdot 9,81 = 175 \text{ Pa}$$

$$P_{vent} = \frac{\dot{V}_{vz} \cdot \Delta p_c}{\eta} = \frac{3344 \cdot 175}{0,65} = 900 \text{ kW}$$

$$P_{čerp} = \frac{Q \cdot \rho}{\eta} \cdot H \cdot g = \frac{\dot{m}_{chT}}{\eta} \cdot H \cdot g = \frac{960}{0,65} \cdot 15 \cdot 9,81 = 217 \text{ kW}$$

Příklad 5.6

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:

$$P = \frac{Q \cdot \rho}{\eta} \left(H \cdot g + \frac{p_k - p_s}{\rho} \right) = \frac{0,2 \cdot 10^3}{0,8} \left(40 \cdot 9,81 + \frac{8,6 \cdot 10^6 - 1 \cdot 10^6}{10^3} \right) = 2 \cdot 10^6 \text{ W} = 2 \text{ MW}$$

Tlak na výstupu napáječky

$$p_n = p_k + H \cdot \rho \cdot g = 8,6 \cdot 10^6 + 40 \cdot 10^3 \cdot 9,81 = 9 \cdot 10^6 \text{ Pa} = 9 \text{ MPa}$$

Příklad 5.7

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

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

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

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

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:

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

6. Paliva, spalování, čištění spalin

Příklad 6.1

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:

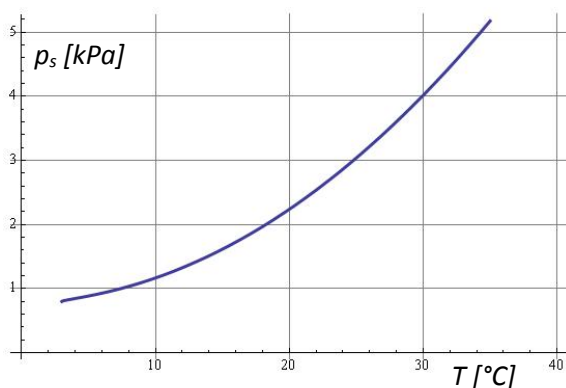
$$\dot{V}_{\text{vzs}} = 1,4 \cdot \frac{22,4}{0,21} \cdot \left(\frac{0,49}{12} + \frac{0,01}{32} \right) \cdot 10 = 61,4 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$$

$$P = \frac{\dot{V}_{\text{vzs}} \cdot \Delta p_c}{\eta} = \frac{61,4 \cdot 3500}{0,6} = 358 \text{ kW}$$

Příklad 6.2

Proveďte korekci příkladu 6.1, je-li nasáván vlhký vzduch o rel. vlhkosti $\varphi = 90\%$ a teplotě $T = 20 \text{ }^\circ\text{C}$ při atm. tlaku $p_c = 101,3 \text{ kPa}$.

Řešení:



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

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

Součinitel vlhkosti vzduchu bude potom:

$$\nu = 1 + \frac{\varphi \cdot p_s}{p_c - \varphi \cdot p_s} = 1 + \frac{0,9 \cdot 2,4}{101,3 - 0,9 \cdot 2,4} = 1,022$$

obrázek 6.2.1: Křivka tlaku syté páry

$$\dot{V}_{\text{vz}} = \nu \cdot \lambda \cdot \frac{22,4}{0,21} \cdot \left(\frac{C^r}{12} + \frac{S^r}{32} \right) \cdot \dot{m} = 1,022 \cdot 1,4 \cdot \frac{22,4}{0,21} \cdot \left(\frac{0,49}{12} + \frac{0,01}{32} \right) \cdot 10 = 62,7 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$$

$$P = \frac{\dot{V}_{vz} \cdot \Delta p_c}{\eta} = \frac{62,7 \cdot 3500}{0,6} = 366 \text{ kW}$$

Příklad 6.3

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

(Molární objem kyslíku uvažujte $22,4 \text{ dm}^3 \cdot \text{mol}^{-1}$ a obsah kyslíku ve vzduchu 21% obj., molární objem CO_2 je $22,3 \text{ dm}^3 \cdot \text{mol}^{-1}$ a SO_2 je $21,9 \text{ dm}^3 \cdot \text{mol}^{-1}$, $M(S) = 0,032 \text{ kg} \cdot \text{mol}^{-1}$, $M(C) = 0,012 \text{ kg} \cdot \text{mol}^{-1}$, voda ve spalínách se vypočítá jako $\dot{V}_{\text{H}_2\text{O}} = 1,24 \cdot W^r \cdot \dot{m} [\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}]$)

Řešení:

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

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

Tomu odpovídající teoretický objem suchých spalín bude:

$$\begin{aligned} \dot{V}_{snst} &= \left(\frac{22,3}{12} \cdot C^r + \frac{21,9}{32} \cdot S^r \right) \cdot \dot{m} + 0,79 \cdot \dot{V}_{vzst} [\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}] = \\ &= \left(\frac{22,3}{12} \cdot 0,7 + \frac{21,9}{32} \cdot 0,01 \right) \cdot 50 + 0,79 \cdot 312,8 = 312,5 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1} \end{aligned}$$

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

$$\begin{aligned} \dot{V}_{sn} &= \dot{V}_{snst} + (\lambda - 1) \cdot \dot{V}_{vzst} + 1,24 \cdot W^r \cdot \dot{m} [\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}] = \\ &= 312,5 + (1,3 - 1) \cdot 312,8 + 1,24 \cdot 0,19 \cdot 50 = 418,1 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1} \end{aligned}$$

Příklad 6.4

Určete spotřebu vápence (CaCO_3) a produkci sádrovce ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) v $\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$ v odsiřovací jednotce, je-li koncentrace SO_2 ve spalínách na vstupu $5000 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ a na výstupu $200 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$. Objemový tok spalín je $\dot{V}_{sn} = 100 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$.

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

Řešení:

Relativní molekulové hmotnosti:

$$M(SO_2) = (0,032 + 2 \cdot 0,016) = 0,064 \text{ kg.mol}^{-1}$$

$$M(CaCO_3) = (0,040 + 0,012 + 3 \cdot 0,016) = 0,100 \text{ kg.mol}^{-1}$$

$$M(CaSO_4 \cdot 2H_2O) = (0,040 + 0,032 + 4 \cdot 0,016 + 4 \cdot 0,001 + 2 \cdot 0,016) = 0,172 \text{ kg.mol}^{-1}$$

$$\text{V odsíření se vyčistí } c_{ASO_2} = 5000 - 200 = 4800 \text{ mg.m}^{-3}$$

$$\text{To odpovídá } \dot{n}_{ASO_2} = \frac{c_{ASO_2}}{M(SO_2)} \cdot \dot{V}_{sn} = \frac{4,8 \cdot 10^{-3}}{0,064} \cdot 100 = 7,5 \text{ mol.s}^{-1} = \dot{n}_{CaCO_3} = \dot{n}_{CaSO_4 \cdot 2H_2O}$$

Hmotnostní tok vápence:

$$\dot{m}_{CaCO_3} = \dot{n}_{CaCO_3} \cdot M(CaCO_3) = 7,5 \cdot 0,100 = 0,75 \text{ kg.s}^{-1}$$

Hmotnostní tok sádrovce:

$$\dot{m}_{CaSO_4 \cdot 2H_2O} = \dot{n}_{CaSO_4 \cdot 2H_2O} \cdot M(CaSO_4 \cdot 2H_2O) = 7,5 \cdot 0,172 = 1,29 \text{ kg.s}^{-1}$$

Příklad 6.5

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: $Q_i^r = 30 \text{ MJ.kg}^{-1}$ a $C^r = 90 \%$.

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

Řešení:

Množství paliva potřebného k výrobě 1 MWh bude:

$$m_{pal} = \frac{1 \text{ MWh} \cdot 3600 \text{ s.h}^{-1}}{\eta \cdot Q_i^r} = \frac{1 \text{ MWh} \cdot 3600 \text{ s.h}^{-1}}{0,4 \cdot 30 \text{ MJ.kg}^{-1}} = 300 \text{ kg}$$

Hmotnost CO_2 z paliva o hmotnosti m_{pal} :

$$m_{CO_2} = C^r \cdot m_{pal} \cdot \frac{M(CO_2)}{M(C)} = 0,9 \cdot 300 \cdot \frac{0,044}{0,012} = 990 \text{ kg} \cong 1 \text{ t}$$

Příklad 6.6

Jaká musí být minimální odlučivost filtru, aby byly splněny emisní limity pro tuhé znečišťující látky (maximální koncentrace je $c_{TZLRef} = 30 \text{ mg.m}^{-3}$ při referenční hodnotě přebytku kyslíku v suchých spalinách $\omega_{O_2Ref} = 6\%$). Spaluje se hnědé uhlí o složení: $Q_i^r = 11 \text{ MJ.kg}^{-1}$, $W^r = 30 \%$,

$A^r = 30 \%$, $C^r = 40 \%$. Na popílek připadá 90% ($X_{pop} = 0,9$) a na strusku 10% z celkové popelnatosti paliva. Spalování probíhá při přebytku vzduchu $\lambda = 1,3$. Sírnatost paliva při výpočtech zanedbejte.

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

Řešení:

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

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

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

$$\begin{aligned} V_{sns/kg} &= \frac{22,3}{12} \cdot C^r + 0,79 \cdot V_{vzst/kg} + (\lambda - 1) \cdot V_{vzst/kg} [\text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}] = \\ &= \frac{22,3}{12} \cdot 0,4 + 0,79 \cdot 3,5556 + (1,3 - 1) \cdot 3,5556 = 4,6189 \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1} \end{aligned}$$

Přebytek kyslíku v suchých spalínách bude

$$\omega_{O_2} = \frac{V_{O_2/kg}}{V_{sns/kg}} = \frac{0,21 \cdot (\lambda - 1) \cdot V_{vzst/kg}}{V_{sns/kg}} = \frac{0,21 \cdot 0,3 \cdot 3,5556}{4,6189} = 0,0485 = 4,85\%$$

Koncentrace tuhých znečišťujících látek v suchých spalínách před filtrem:

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

Protože

$$c_{TZLRef} = (1 - O_c) \cdot c_{TZL} \cdot \frac{0,21 - \omega_{O_2Ref}}{0,21 - \omega_{O_2}}$$

bude hledaná odlučivost

$$O_c = 1 - \frac{0,21 - \omega_{O_2}}{0,21 - \omega_{O_2Ref}} \cdot \frac{c_{TZLRef}}{c_{TZL}} = 1 - \frac{0,21 - 0,0485}{0,21 - 0,06} \cdot \frac{3 \cdot 10^{-5}}{5,8456 \cdot 10^{-2}} = 99,94\%$$

7. Dynamické modely elektráren

Příklad 7.1

Turbína o parametrech

Hrubý spád $H_{HR} = 34 \text{ m}$

Průtok $Q_{tN} = 18 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$

Průměr potrubí přiváděče $d = 2700 \text{ mm}$ (DN 2700)

Délka potrubí přiváděče $L = 300 \text{ m}$

Turbínu považujte za ideální (tj. nepružný vodní sloupec v přiváděči, $\eta = 1$,

$\xi_{\min} = 0 \Rightarrow Q_{t\min} = 0 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, $\xi_{\max} = 1 \Rightarrow Q_{t\max} = Q_{tN} = 18 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, $H_{HR} = \text{konst}$). Ztráty v přiváděči zanedbejte tj. $H_{\Delta} = 0$.

- Určete jmenovitý výkon turbíny P_{tN}
- Určete dobu náběhu vody T_{wN}
- Určete časový průběh průtoku $[\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}]$ a výkonu $[\text{MW}]$ pracuje-li nejprve turbína při svém jmenovitém výkonu $P_t|_{t=0} = P_{tN}$ ($\xi|_{t=0} = 1$) a následně dojde ke skokovému uzavření ventilu o 10 %, tj. $P_t|_{t=T_z} = 0,9 \cdot P_{tN}$ ($\xi|_{t=T_z} = 0,9$)
- Jak se změní výsledky, bude-li změna při uzavírání ventilu trendová s lineárním poklesem během 2 s?

Řešení

- Jmenovitý výkon určíme z maximálního průtoku a hrubého spádu jako

$$P_{tN} = \eta \cdot \rho \cdot Q_{tN} \cdot H \cdot g = \eta \cdot \rho \cdot Q_{tN} \cdot (H_{HR} - H_{\Delta}) \cdot g = 1 \cdot 10^3 \cdot 18 \cdot (34 - 0) \cdot 9,81 = 6 \text{ MW}$$

- Průřez potrubí

$$A = \pi \cdot \frac{D^2}{4} = \pi \cdot \frac{2,7^2}{4} = 5,726 \text{ m}^2$$

Doba náběhu vody

$$T_{wN} = \frac{L \cdot Q_{tN}}{g \cdot A \cdot H_N} = \frac{300 \cdot 10^3 \cdot 18}{9,81 \cdot 5,726 \cdot 34} = 2,827 \text{ s}$$

- Stanovíme vztažné proměnné jako:

$$H_N = H_{HR} = 34 \text{ m}, Q_N = 18 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$$

Pro lineární model lze řešit analyticky jako

$$\Delta \xi = \frac{\Delta q_t + T_{wN} \cdot \left(\frac{\partial v_t}{\partial h} \right)_0 \cdot \frac{d\Delta q_t}{dt}}{\left(\frac{\partial v_t}{\partial \xi} \right)_0} = \frac{\Delta q_t + T_{wN} \cdot \frac{\xi_0}{2 \cdot \sqrt{h_0}} \cdot \frac{d\Delta q_t}{dt}}{\sqrt{h_0}} = \frac{\Delta q_t}{\sqrt{h_0}} + T_{wN} \cdot \frac{\xi_0}{2 \cdot h_0} \cdot \frac{d\Delta q_t}{dt}$$

protože $H_0 = H_{HR} \rightarrow h_0 = 1$ a $\xi_0 = 1$, přejde rovnice na tvar

$$\Delta \xi = \Delta q_t + \frac{T_{wN}}{2} \cdot \frac{d\Delta q_t}{dt}$$

Řešení bude

$$\Delta q_t(t) = (\Delta q_{t0} - \Delta q_{t\infty}) \cdot e^{-\frac{2}{T_{wN}} \cdot t} + \Delta q_{t\infty} = 0,1 \cdot e^{-\frac{2}{T_{wN}} \cdot t} - 0,1 = 0,1 \cdot e^{-\frac{t}{1,414}} - 0,1$$

$$q_t(t) = q_t(0) + \Delta q_t(t) = 1 + 0,1 \cdot e^{-\frac{2}{T_{wN}} \cdot t} - 0,1 = 0,9 + 0,1 \cdot e^{-\frac{t}{1,414}} \text{ [p.u.]}$$

$$Q_t(t) = Q_N \cdot (q_t(0) + \Delta q_t(t)) = 16,2 - 1,8 \cdot e^{-\frac{t}{1,414}} \text{ [m}^3 \cdot \text{s}^{-1}]$$

Rovnice pro výkon

$$\Delta p_t = \left(\frac{\partial p_t}{\partial v_t} \right)_0 \cdot \Delta q_t - T_{wN} \cdot \left(\frac{\partial p_t}{\partial h} \right)_0 \cdot \frac{d\Delta q_t}{dt} = h_0 \cdot \Delta q_t + T_{wN} \cdot \xi_0 \cdot \sqrt{h_0} \cdot \frac{d\Delta q_t}{dt}$$

protože $H_0 = H_{HR} \rightarrow h_0 = 1$ a $\xi_0 = 1$, přejde rovnice na tvar

$$\Delta p_t = \Delta q_t - T_{wN} \cdot \frac{d\Delta q_t}{dt}$$

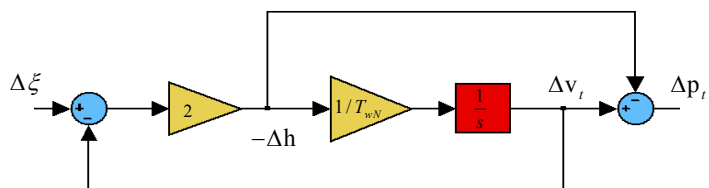
Řešení bude

$$\begin{aligned} \Delta p_t(t) &= (\Delta q_{t0} - \Delta q_{t\infty}) \cdot e^{-\frac{2}{T_{wN}} \cdot t} + \Delta q_{t\infty} + 2 \cdot (\Delta q_{t0} - \Delta q_{t\infty}) \cdot e^{-\frac{2}{T_{wN}} \cdot t} = \\ &= \Delta q_{t\infty} + 3 \cdot (\Delta q_{t0} - \Delta q_{t\infty}) \cdot e^{-\frac{2}{T_{wN}} \cdot t} = -0,1 + 0,3 \cdot e^{-\frac{2}{T_{wN}} \cdot t} = -0,1 + 0,3 \cdot e^{-\frac{t}{1,414}} \end{aligned}$$

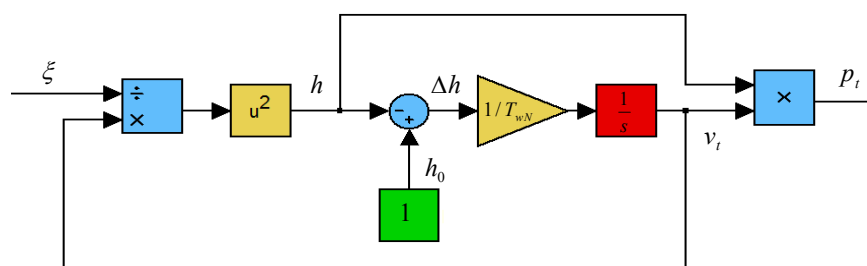
$$p_t(t) = p_t(0) + \Delta p_t(t) = 0,9 + 0,3 \cdot e^{-\frac{2}{T_{wN}} \cdot t} = 0,9 + 0,3 \cdot e^{-\frac{t}{1,414}} \text{ [p.u.]}$$

$$P_t(t) = P_N \cdot (p_t(0) + \Delta p_t(t)) = 5,4 + 1,8 \cdot e^{-\frac{t}{1,414}} \text{ [MW]}$$

Řešení v programu MATLAB Simulink

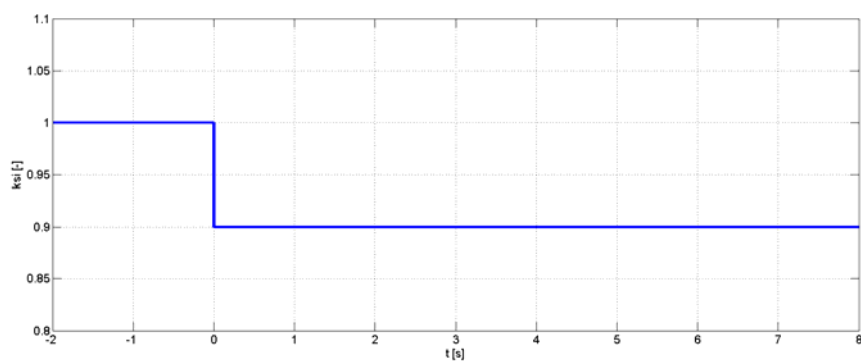


obrázek 7.1.1 Lineární model

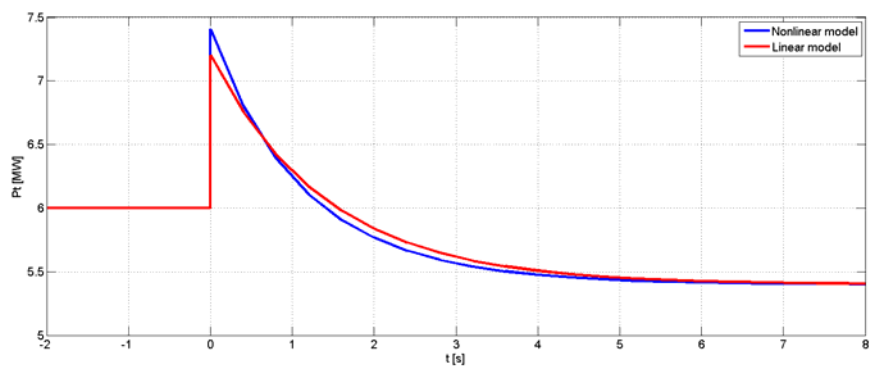


obrázek 7.1.2 Nelineární model

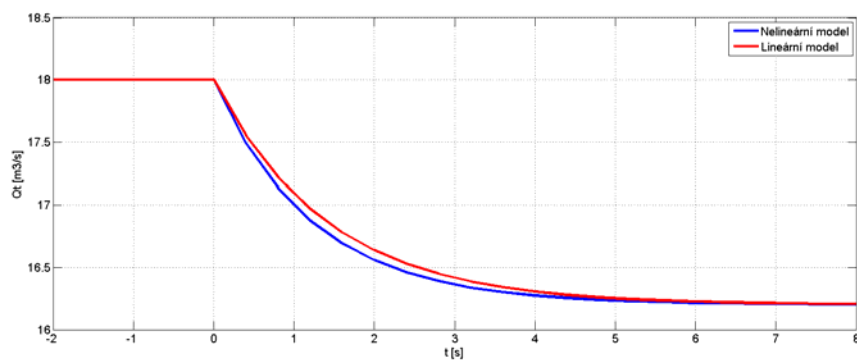
Výsledky:



obrázek 7.1.3 Průběh uzavírání ventilu



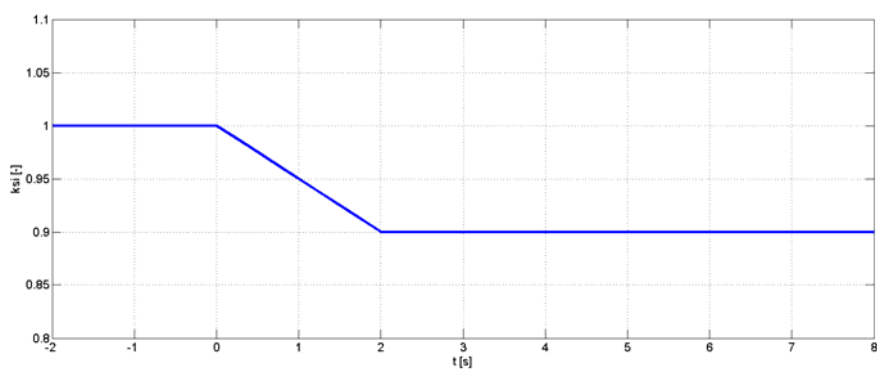
obrázek 7.1.4 Průběh výkonu na turbíně



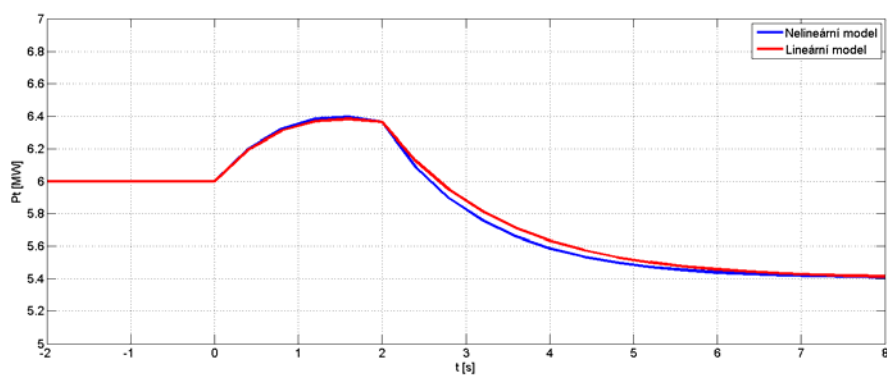
obrázek 7.1.5 Průtok na turbíně

d) Řešíme programem MATLAB Simulink obdobně jako v c)

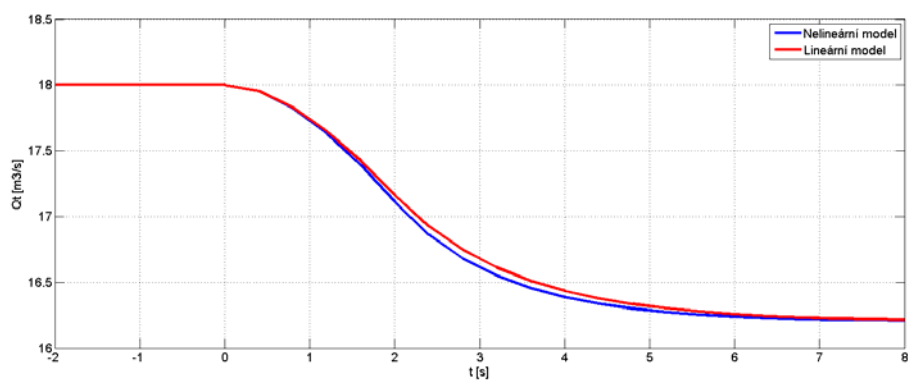
Výsledky:



obrázek 7.1.6 Průběh uzavírání ventilu



obrázek 7.1.7 Průběh výkonu na turbíně



obrázek 7.1.8 Průtok na turbíně