Elektrárny
B1M15ENY

přednáška č. 9

Chladící okruh
Čerpadla, ventilátory
Dynamický model parní elektráry

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

Množství paliva: $\dot{m}_{pal} = \dfrac{P_{net}}{\eta_{net}.Q_i^r} = \dfrac{1000}{0,33.15} = 202 \text{ kg.s}^{-1}$

Množství síry v palivu: $\dot{m}_S = \dot{m}_{pal}.S^r = 202.0,02 = 4,04 \text{ kg.s}^{-1}$

Množství popela v palivu: $\dot{m}_A = \dot{m}_A.A^r = 202.0,15 = 30,3 \text{ kg.s}^{-1}$

Množství vody v palivu: $\dot{m}_W = \dot{m}_W.W^r = 202.0,30 = 60,6 \text{ kg.s}^{-1}$

Množství uhlíku v palivu: $\dot{m}_C = \dot{m}_W.\left(1 - W^r - A^r - S^r\right) = 202.\left(1 - 0,3 - 0,15 - 0,02\right) = 107,1 \text{ kg.s}^{-1}$

Množství přivedeného vzduchu:

$$\dot{V}_{vz} = \lambda.\dot{V}_{vzst} = \lambda.\frac{22,4}{0,21}.\left(\frac{\dot{m}_C}{12} + \frac{\dot{m}_S}{32}\right) = 1,3.\frac{22,4}{0,21}.\left(\frac{107,1}{12} + \frac{4,04}{32}\right) = 1,3.965 = 1255 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$$

což je: $\dfrac{1255}{202} = 6,21 \text{ m}^3/\text{kg paliva}$

Množství suchých spalin bez přebytku vzduchu:

$$\dot{V}_{snst} = \frac{22,3}{12}.\dot{m}_C + \frac{21,9}{32}.\dot{m}_S + 0,79.\dot{V}_{vzst} = 199,02 + 2,76 + 762,35 = 964 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$$

Množství suchých spalin se zadaným přebytkem vzduchu:

$$\dot{V}_{sns} = \frac{22,3}{12}.\dot{m}_C + \frac{21,9}{32}.\dot{m}_S + 0,79.\dot{V}_{vzst} + \left(\lambda - 1\right).\dot{V}_{vzst} = 199,02 + 2,76 + 762,35 + \left(1,3 - 1\right).965 = 1253,6 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$$

Přebytek kyslíku v suchých spalinách na výstupu z kotle za KV bude:

$$\omega_{O_2(KV)} = 0,21.\left(\lambda - 1\right)\frac{\dot{V}_{vzst}}{\dot{V}_{sns}} = 0,21.\left(1,3 - 1\right).\frac{965}{1253,6} = 4,8 \text{ \%}$$

Množství vlhkých spalin se zadaným přebytkem vzduchu:

$$\dot{V}_{sn} = \dot{V}_{sns} + 1,24.\dot{m}_W = 1253,6 + 1,24.60,6 = 1328,7 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$$

Poměry za filtrem:

$$\dot{m}_{pop(F)} = X_{pop}.\left(1-O_c\right).\dot{m}_A = 0,9.\left(1-0,999\right).30,3 = 0,0272 \text{ kg.s}^{-1}$$

Poměry v odsiřovací jednotce:

Látkové množství zreagované síry:

$$\dot{n}_S = \frac{\eta_{ODS}.\dot{m}_S}{M_S} = \frac{0,95.4,04}{0,032} = 199,9 \text{ mol.s}^{-1}$$

Molární hmotnosti reaktantů a produktů:

$$M_{CaCO_3} = \left(40+12+3.16\right)/1000 = 0,1 \text{ kg.mol}^{-1}$$

$$M_{CaSO_4.2H_2O} = \left(40+32+4.16+2.2+2.16\right)/1000 = 0,172 \text{ kg.mol}^{-1}$$

$$M_{CO_2} = \left(12+2.16\right)/1000 = 0,044 \text{ kg.mol}^{-1}$$

Ve výsledné bilanci reakce platí

$$\dot{n}_S = \dot{n}_{CaCO_3} = \dot{n}_{CaSO_4.2H_2O} = 2.\dot{n}_{O_2}$$

Potřebná teoretická hmotnost vápence: $\dot{m}_{CaCO_3} = \dot{n}_{CaCO_3}.M_{CaCO_3} = 199,9.0,1 = \ 19,99 \text{ kg.s}^{-1}$

Množství vzniklého sádrovce: $\dot{m}_{CaSO_4.2H_2O} = \dot{n}_{CaSO_4.2H_2O}.M_{CaSO_4.2H_2O} = 199,9.0,172 = \ 34,38 \text{ kg.s}^{-1}$

Množství oxidu siřičitého: $\dot{m}_{SO_2(ODS)} = \left(1-\eta_{ODS}\right)\dot{n}_S.M_{SO_2} = \left(1-0,95\right).199,9.0,032 = \ 0,319 \text{ kg.s}^{-1}$

Změna bilance suchých spalin za odsířením:

Z původního množství *suchých* spalin ubude: $\Delta\dot{V}_{SO_2} = -\eta_{ODS}.\frac{21,9}{32}.\dot{m}_S = -0,95.\frac{21,9}{32}.4,04 = \ -2,63 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$

přibude CO2: $\Delta\dot{V}_{CO_2} = +22,3.10^{-3}.\dot{n}_{CO_2} = +22,3.10^{-3}.199 = \ +4,45 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$

přibude zbytek z oxid. vzduchu: $\Delta\dot{V}_{vz} = +22,4.10^{-3}.\dot{n}_{O_2}.\frac{0,79}{0,21} = +\frac{22,3.10^{-3}}{2}.199,9 = \ +8,42 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$

Celkově bilance: $\dot{V}_{sns(ODS)} = \dot{V}_{sns} + \Delta\dot{V}_{SO_2} + \Delta\dot{V}_{CO_2} + \Delta\dot{V}_{vz} = \ 1253,6-2,63+4,45+8,42=1263,8 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$

Přebytek kyslíku v suchých spalinách na výstupu z odsíření bude:

$$\omega_{O_2(ODS)} = 0,21.(\lambda - 1)\frac{\dot{V}_{vzst}}{\dot{V}_{sns(ODS)}} = 0,21.(1,3-1).\frac{965}{1263,8} = 4,8\ \%$$

Hmotnost emitovaného oxidu uhličitého:

$$\dot{m}_{CO_2} = \dot{m}_C.\frac{M_{CO_2}}{M_C} + \dot{n}_{C(ODS)}.M_{CO_2} = 107,1.\frac{0,044}{0,012} + 199,9.0,044 = 392,7 + 8,79 = 401,5\ \text{kg.s}^{-1}$$

1.A EMISNÍ LIMITY TZL

$$c_{TZLref} = c_{TZL}.\frac{0,21-\omega_{O_2ref}}{0,21-\omega_{O_2(ODS)}} = \frac{\dot{m}_{pop(F)}}{\dot{V}_{sns(ODS)}}.\frac{0,21-\omega_{O_2ref}}{0,21-\omega_{O_2(ODS)}} = \frac{0,0272}{1263,8}.\frac{0,21-0,06}{0,21-0,048} = 19,9\ \text{mg.m}^{-3}$$

Emisní limity TZL splňuje

1.B EMISNÍ LIMITY SO2

$$c_{SO_2ref} = c_{SO_2}.\frac{0,21-\omega_{O_2ref}}{0,21-\omega_{O_2(ODS)}} = \frac{\dot{m}_{SO_2(ODS)}}{\dot{V}_{sns(ODS)}}.\frac{0,21-\omega_{O_2ref}}{0,21-\omega_{O_2(ODS)}} = \frac{0,319}{1263,8}.\frac{0,21-0,06}{0,21-0,048} = 233,7\ \text{mg.m}^{-3}$$

Emisní limity SO2 nesplňuje, příliš sirnaté uhlí a tomu neodpovídající účinnost odsíření

2 HMOTNOSTNÍ TOKY

$$\dot{m}_{pal} = 202\ \text{kg.s}^{-1}$$

$$\dot{m}_{CaCO_3} = 19,99\ \text{kg.s}^{-1}$$

$$\dot{m}_{CaSO_4.2H_2O} = 34,38\ \text{kg.s}^{-1}$$

$$\dot{m}_{CO_2} = 401,5\ \text{kg.s}^{-1}$$

3 EMISNÍ POVOLENKY

Na 1 vyrobenou a prodanou MWh připadá externalita:

$$E_{CO_2/MWh} = \frac{3600.\dot{m}_{CO_2}}{P_{net}}.E_{CO_2/t} = \frac{3600.401,5}{1000}.25 = 1445,4\ \mathrm{kg.MWh^{-1}}\ .\ 0,025\ \mathrm{EUR.kg^{-1}} = 36,1\ \mathrm{EUR.MWh^{-1}}$$

Bude-li tato elektrárna povolenky nakupovat, bude jen toto představovat podíl

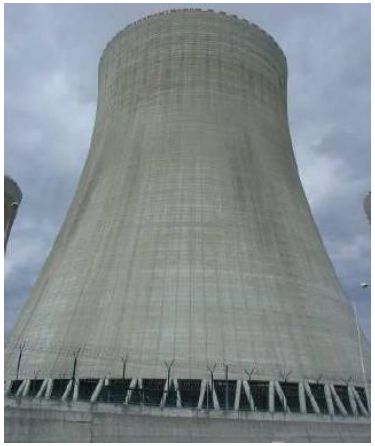
$$\frac{E_{CO_2/MWh}}{V_{/MWh}} = \frac{36,1}{60} = 60\ \%$$

z obratu za vyrobenou elektrickou energii

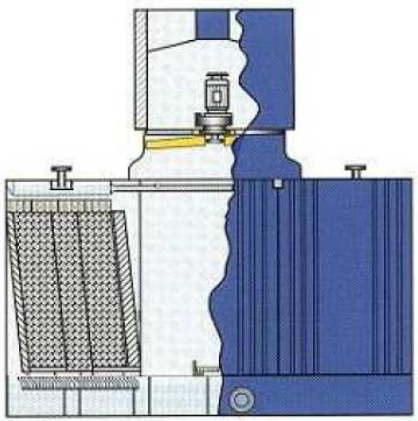
Chladící okruh

Chladící věže

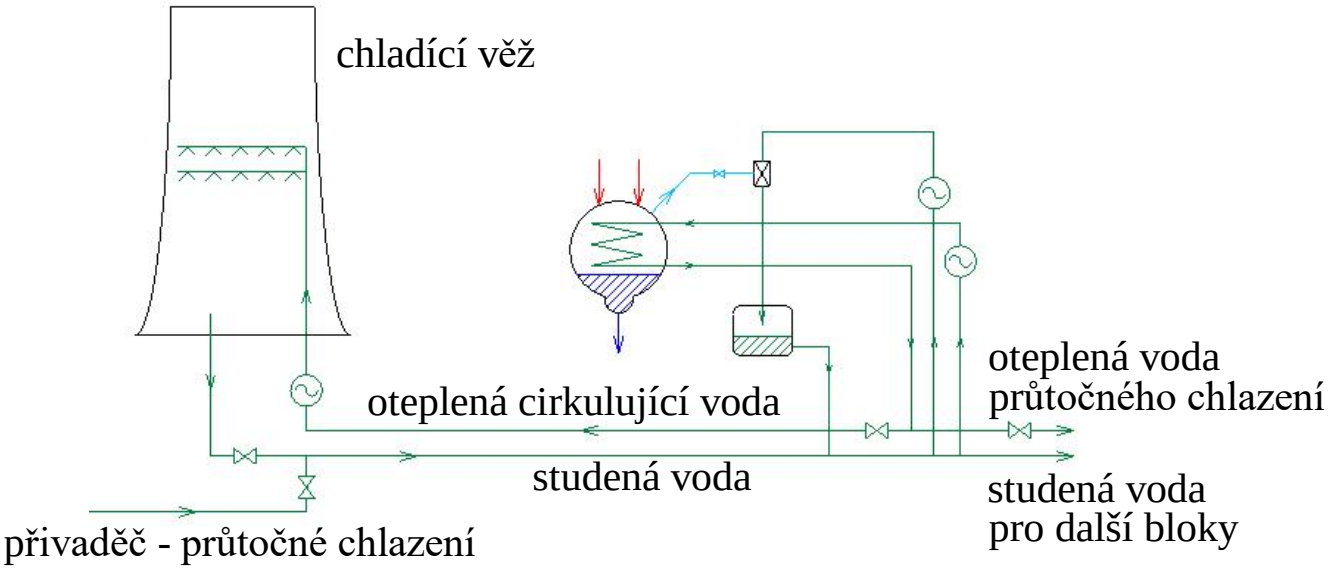
- s přirozeným tahem
- ventilátorové



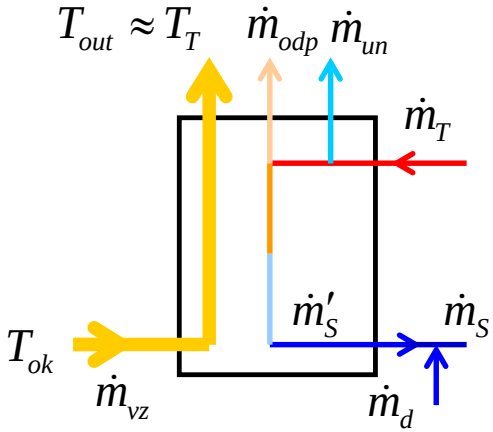
chladící věž
s přirozeným tahem



chladící věž ventilátorová



Bilance chladící věže



$\dot{m}_{un}$ ztráty únosem

$\dot{m}_{odp}$ ztráty odparem

Hmotnostní toky:

$$\dot{m}_T - \dot{m}_{odp} - \dot{m}_{un} - \dot{m}_d = \dot{m}_S$$

Tepelná bilance zjednodušeně:

$$\dot{m}_T . c_v . \left(T_T - T_S\right) = \dot{m}_{odp} . \Delta i_{(p,T)odp}$$

$$+\dot{m}_{vz} . c_{vz} . \left(T_T - T_{ok}\right)$$

Ztráty odparem se zanedbáním přestupu tepla do vzduchu:

$$\frac{\dot{m}_{odp}}{\dot{m}_T} = \frac{c_v . \left(T_T - T_S\right)}{\Delta i_{(p,T)odp}} \approx 1 - 3\%$$

Ztráty únosem:

$$\frac{\dot{m}_{un}}{\dot{m}_T} \approx 0{,}1\%$$

Chladící okruh

Chladící věže s přirozeným tahem

- využívají komínového efektu
- železobetonový monolitický skelet
- výška 30 – 150 m
- rozvody oteplené vody s rozstřikovacími tryskami
- nad nimi umístěny eliminátory pro omezení ztrát únosem
- spodní část - bazén s odtoky ochlazené vody

Chladící věže ventilátorové

- vnitřek tvoří chladící výplň
- nad ní jsou rozstřikovací trysky
- nad nimi eliminátory
- nucený tah zajišťuje ventilátor
- usměrnění toku odváděného vzduchu zajišťuje difuzor

Poznámka:
V případě nedostupnosti potřebného množství vody pro chlazení se někdy používá vzduchové chlazení kondenzátorů, což je provozně i investičně náročnější řešení

chladící věž se zabudovaným odvodem spalin z odsíření (Elektrárna Chvaletice)

ventilátorová chladící věž (Elektrárna Opatovice)

Difuzor (CHVV)

Eliminátory

Rozstřikovací tryska

Chladící výplň

Druhy technologických vod

DEMI voda

- používá se do Rankinova tepelného oběhu (kotelní voda)
- upravuje se v chemické úpravně vod (CHÚV)
- požadavek na čistotu látek, jejichž usazeniny by zvyšovaly tepelný odpor při přestupu tepla (= ***demi***neralizovaná voda)

typické parametry DEMI vody:

ukazatel		max.	∅
Měrná elektrická vodivost	(μS/cm)	0,5	0,2
pH		8 - 9	
obsah SiO_2	(μg/kg)	100	20
obsah železa	(μg/kg)	200	20
obsah Ca^{2+} + Mg^{2+}	(μg/kg)	3	1
CHSK-(Mn)	(mgO_2/kg)	1	0,5

Filtrovaná voda (topná)

- v elektrárnách s teplárenským provozem
- upravuje se v chemické úpravně vod (CHÚV)

Chladící voda (říční)

- Zbavená velkých mechanických nečistot

Čerpadla

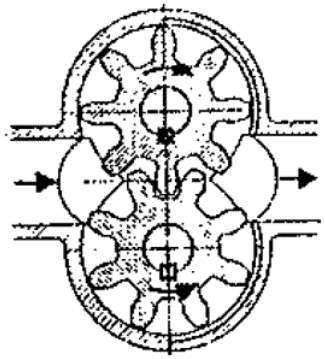
Příkon čerpadla:

$$P = \frac{Q.\rho}{\eta}\left(H.g + \frac{p}{\rho} + \frac{c^2}{2}\right) = \frac{Q.\rho}{\eta}.Y$$

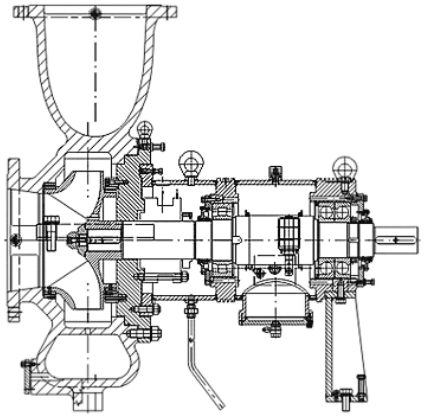
Y [J.kg^{-1}] měrná energie

Rozdělení čerpadel:

- hydrostatická – převažuje tlaková a potenciální energie $Y \approx H.g + \frac{p}{\rho}$
- hydrodynamická – převažuje kinetická složka energie $Y \approx \frac{c^2}{2}$

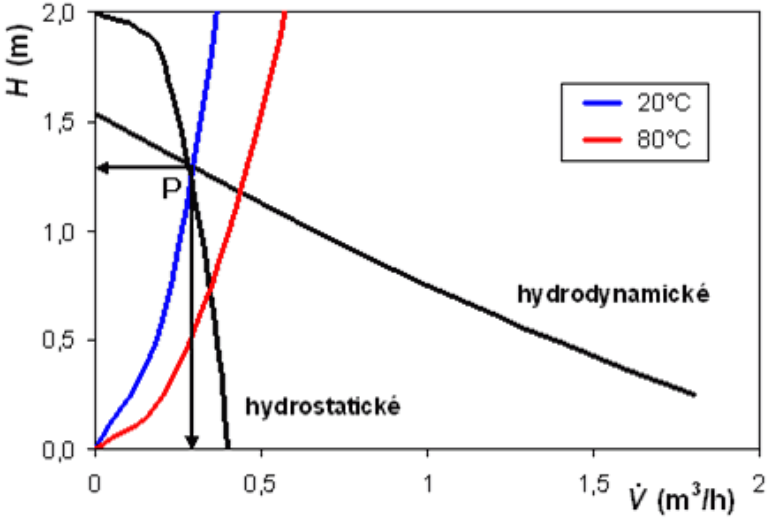


Hydrostatické
zubové čerpadlo



Hydrodynamické
procesní čerpadlo

Q-H charakteristika:



Ventilátory

Dopravní přetlak:

- do 1 kPa – nízkotlaké
- 1 až 3 kPa - středotlaké
- 3 až 10 kPa – vysokotlaké

Pro vyšší přetlaky – dmychadla a kompresory

Celková účinnost ventilátoru:

$$\eta = \eta_m . \eta_i$$

η_m mechanická účinnost (tření ložisek, vibrace)

$$\eta_i = \frac{\Delta p_c}{\Delta p_c + \Delta p_z}$$

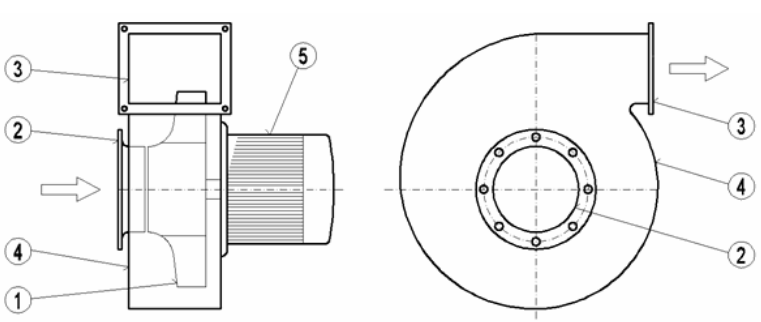
vnitřní účinnost (tlakové ztráty poly-tropického děje)

Příkon ventilátoru na spojce:

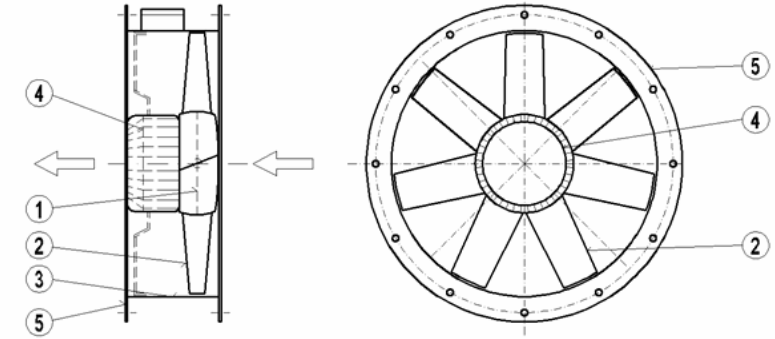
$$P_{mech} = \frac{\dot{V} . \Delta p_c}{\eta}$$

Rozdělení ventilátorů:

Radiální



Axiální

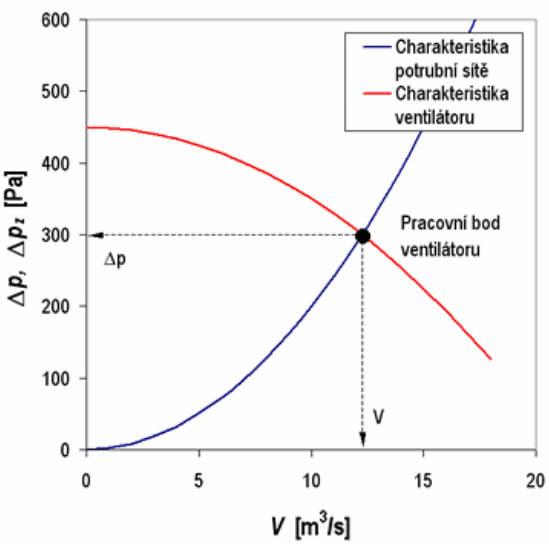


Ventilátory

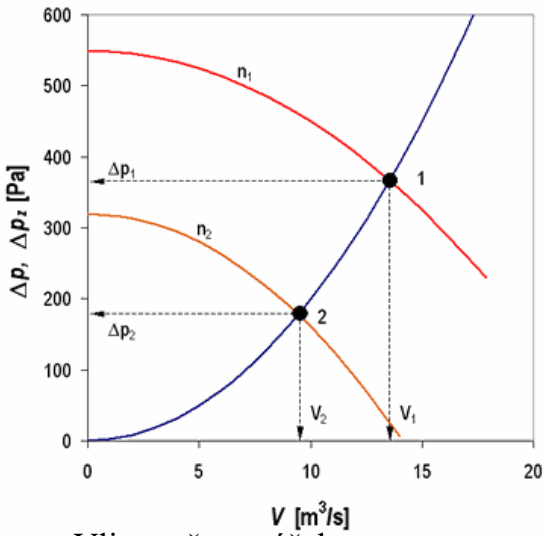
Pracovní charakteristika ventilátoru:

Závislost vyvozeného přetlaku na objemovém průtoku při konstantních otáčkách

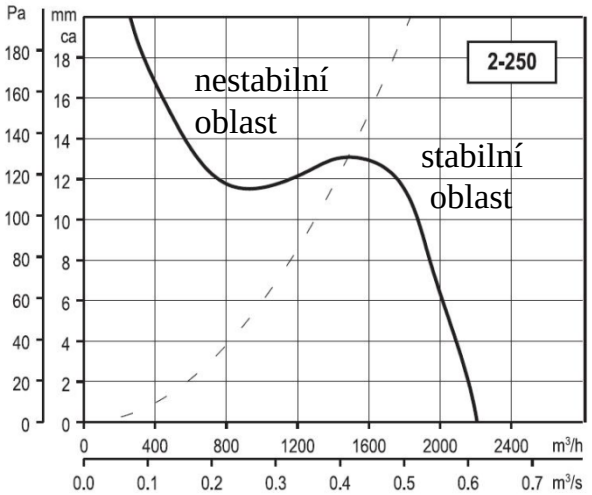
Pracovní bod se nachází v průsečíku pracovní charakteristiky a charakteristiky potrubní sítě



Charakteristika typická pro radiální ventilátor



Vliv změny otáček na novou pracovní charakteristiku

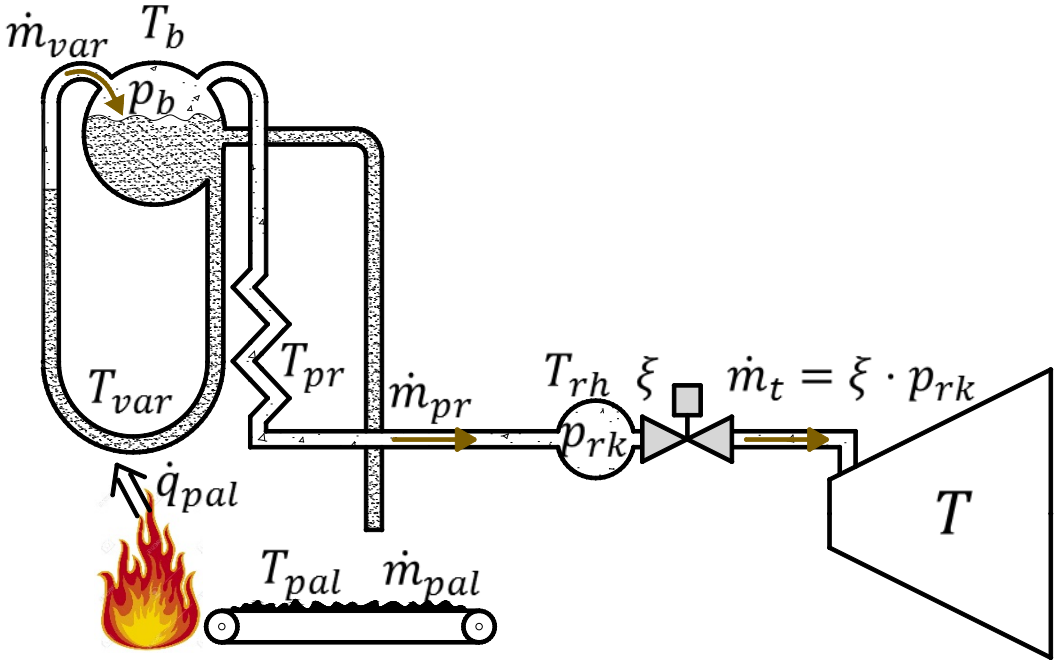


Charakteristika typická pro axiální ventilátor

Parametr	a) změna otáček při ρ = konst.	b) změna hustoty při n = konst.
Objemový průtok vzduchu V [m³/s]	$V_2 = V_1 \frac{n_2}{n_1}$	$V_2 = V_1$
Celkový dopravní tlak Δp [Pa]	$\Delta p_2 = \Delta p_1 \left(\frac{n_2}{n_1}\right)^2$	$\Delta p_2 = \Delta p_1 \frac{\rho_2}{\rho_1}$
Výkon ventilátoru P [W]	$P_2 = P_1 \left(\frac{n_2}{n_1}\right)^3$	$P_2 = P_1 \frac{\rho_2}{\rho_1}$

Zjednodušený model parní elektrárny

Principielní schéma:



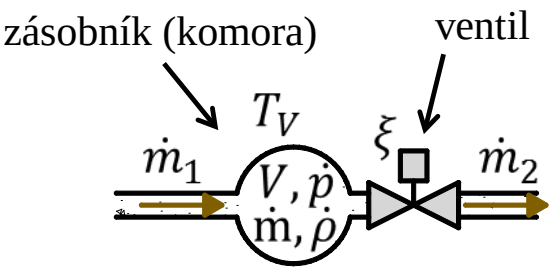
Použité symboly:

Označení veličiny	rozměr	název
$\dot{M}, \dot{m}$	[kg/s], [p.u.]	hmotnostní průtokové množství
V	[m^3]	objem
ρ	[kg/m^3]	objemová hustota
P, p	[Pa], [p.u.]	tlak
ξ	[p.u.]	Poloha ventilu (0-zavřeno, 1-otevřeno)
s		Laplaceův operátor pro čas
T	[s]	časová konstanta

B – označení vztažné (bázové) veličiny
b – buben
var – várnice
pal – palivo
pr – přehřívák
rh – přihřívák
t – turbína
rk – regulační komora

Zjednodušený model parní elektrárny

Časová konstanta zásobníku s párou:



1) Rozdíl vstupního a výstupního průtoku znamená:

$$\dot{M}_1 - \dot{M}_2 = \dot{M} = V.\frac{d\rho}{dt} \qquad \frac{d\rho}{dt} = \frac{\partial\rho}{\partial P}.\frac{dP}{dt}$$

$$\Downarrow \qquad\qquad \Downarrow$$

$$\dot{M}_1 - \dot{M}_2 = V.\left(\frac{\partial\rho}{\partial P}\right).\frac{dP}{dt}$$

v p.u. $\dot{m}_1 - \dot{m}_2 = \underbrace{\frac{P_B}{\dot{M}_B}.V.\left(\frac{\partial\rho}{\partial p}\right)}_{T_v}.\frac{dp}{dt}$ nebo jako L-obraz: $\boxed{\dot{\mathrm{m}}_1 - \dot{\mathrm{m}}_2 = T_v.s.\mathrm{p}}$

T_v ← časová konstnata zásobníku

2) Předpokladáme, že výstupní průtok je úměrný tlaku v zásobníku:

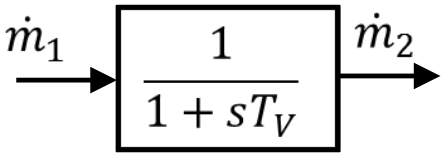
$$\frac{\dot{M}_2}{\dot{M}_B} = \xi.\frac{P}{P_B}$$ a tedy $\dot{m}_2 = \xi.p$ nebo jako L-obraz: $\boxed{\dot{\mathrm{m}}_2 = \xi.\mathrm{p}}$

Zjednodušený model parní elektrárny

Přenosová funkce průtoků pro zásobník:

pro ξ = 1 (bez ventilu):

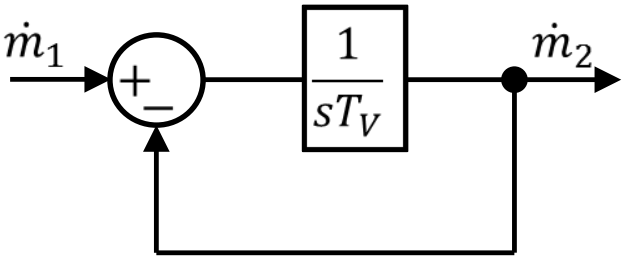
$$\frac{\dot{m}_2}{\dot{m}_1} = \frac{\dot{m}_2}{\dot{m}_2 + T_v.s.\dot{m}_2} = \frac{1}{1 + T_v.s} \Rightarrow$$



nebo:

$$\left(\dot{m}_1 - \dot{m}_2\right).\frac{1}{T_v.s} = \dot{m}_2$$

$$\frac{1}{T_v.s} = \frac{\dot{m}_2}{\dot{m}_1 - \dot{m}_2} \Rightarrow$$

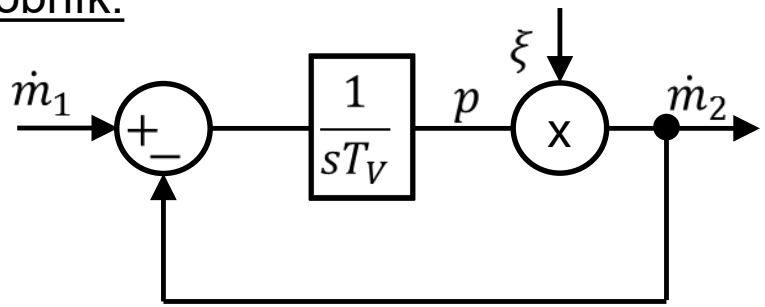


Zjednodušený model parní elektrárny

Přenosová funkce průtoků pro zásobník:

pro $\xi \neq 1$ (s ventilem):

dodáme ještě $\dot{m}_2 = \xi . p$



Tvorba rovnic:

$$\dot{m}_{pal} - \dot{q}_{pal} = s \cdot T_{pal} \cdot \dot{q}_{pal} \quad \Longrightarrow \quad \frac{\dot{q}_{pal}}{\dot{m}_{var}} = \frac{1}{1 + s \cdot T_{pal}}$$

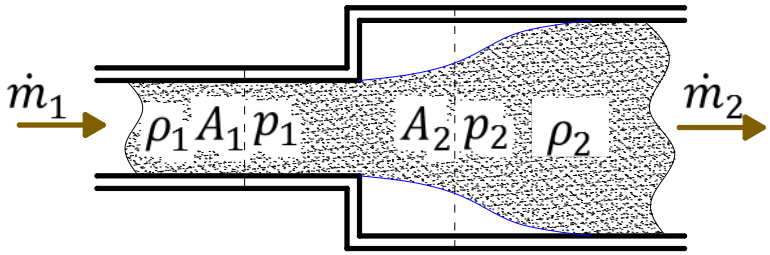
$$\dot{q}_{pal} - \dot{m}_{var} = s \cdot T_{var} \cdot \dot{m}_{var} \quad \Longrightarrow \quad \frac{\dot{m}_{var}}{\dot{q}_{pal}} = \frac{1}{1 + s \cdot T_{var}}$$

$$\dot{m}_{var} - \dot{m}_{pr} = s \cdot T_b \cdot p_b \quad \Longrightarrow \quad p_b = \frac{1}{s \cdot T_b} \cdot \left(\dot{m}_{var} - \dot{m}_{pr}\right)$$

$$\dot{m}_t = \xi \cdot p_{rk} \qquad p_{rk} = \frac{1}{s \cdot T_{pr}} \cdot \left(\dot{m}_{pr} - \dot{m}_t\right)$$

Zjednodušený model parní elektrárny

Tlakové ztráty:



Rovnice kontinuity:

$$\dot{m}_1 = \dot{m}_2$$
$$\rho_1 c_1 A_1 = \rho_2 c_2 A_2$$

pro $\rho = \rho_1 = \rho_2$:

$$c_1 A_1 = c_2 A_2$$

Bernoulliho rovnice:

$$\Delta p = p_1 - p_2 = \frac{1}{2}\rho_2 c_2^2 - \frac{1}{2}\rho_1 c_1^2$$

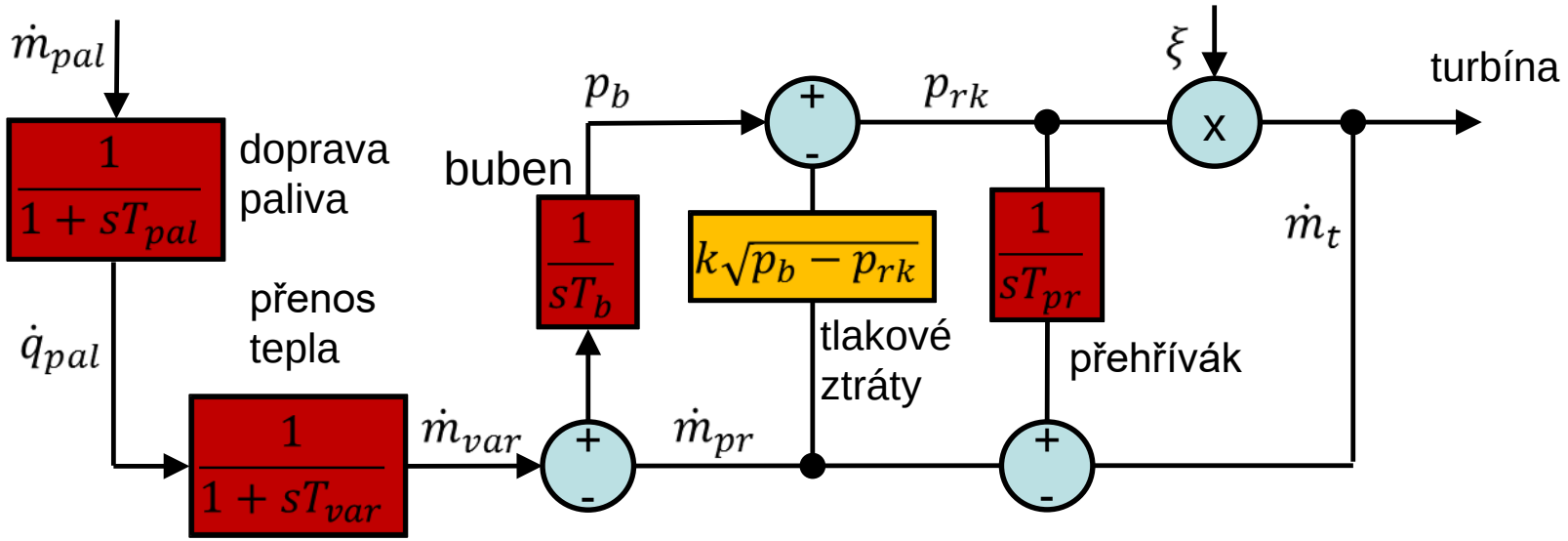
Kombinací obou rovnic získáme:

$$\dot{m} = \rho C_f A_1 \sqrt{\frac{2\Delta \mathrm{p}}{\rho}} \quad \Longrightarrow \quad \dot{m}_{pr} = k \cdot \sqrt{p_b - p_{rk}}$$

C_f – flow coefficient - zohledňuje neznámý průřez A_2, viskozitu, turbulenci a přeměnu části energie na teplo.

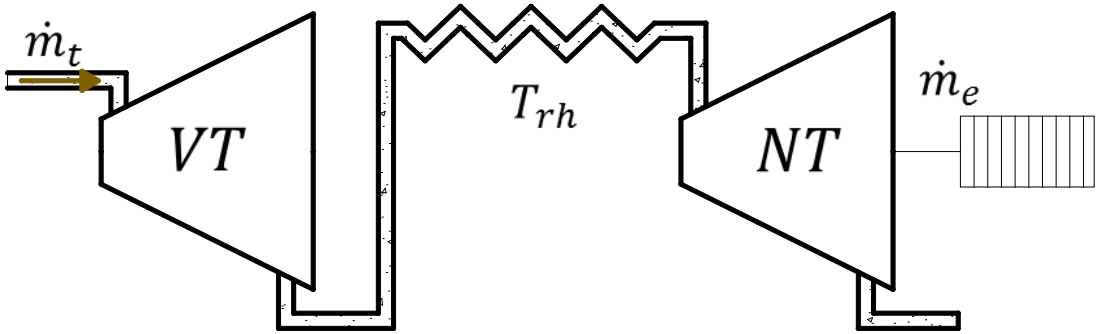
Zjednodušený model parní elektrárny

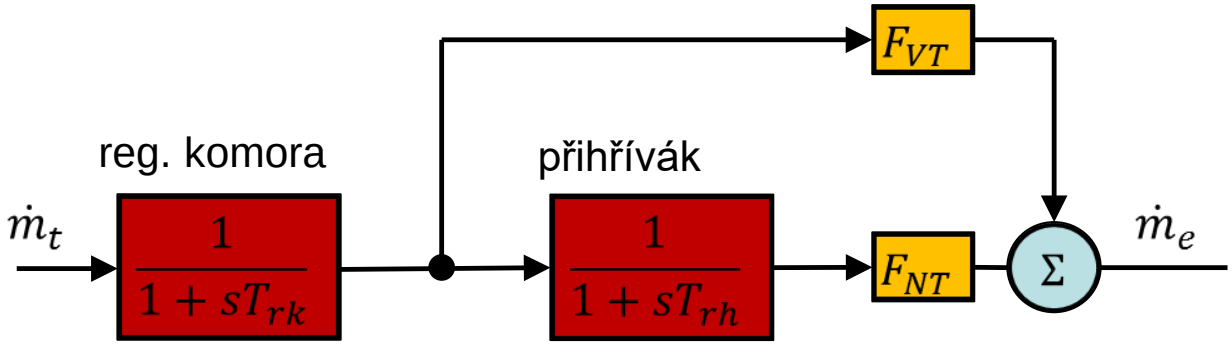
model:



Zjednodušený model parní elektrárny

turbína:





Fragmenty výkonu:

F_{VT} – poměrná část výkonu VT stupně turbíny

F_{NT} – poměrná část výkonu NT stupně turbíny

Zjednodušený model parní elektrárny

typické hodnoty časových konstant:

označení	prvek	typická hodnota [s]
T_b	buben	100
T_{rh}	přihřívák	7
T_{var}	várnice	5
T_{rk}	regulační komora	1
T_{pr}	přehřívák	10

Zjednodušený model parní elektrárny

<u>stanovení časové konstanty přihříváku:</u>

$\dot{m}_B = 230\ kg/s$ $\qquad T = 620\ K$

$V = 115\ m^3$ $\qquad r = 461.5\ J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$

$P_B = 4140\ kPa$

$$\frac{\partial \rho}{\partial P} = 0.0035 \qquad T_{rh} = V \cdot \left(\frac{\partial \rho}{\partial P}\right) \cdot \frac{P_B}{M_B} = 115 \cdot 0.0035 \cdot \frac{4140}{230} = 7.25\ s$$

<u>Pokud není znám poměr</u> $\boldsymbol{\frac{\partial \rho}{\partial P}}$:

Pro m kg ideálního plynu můžeme napsat: $\qquad P \cdot V = m \cdot r \cdot T$

$$\frac{\partial \rho}{\partial P} = \frac{\partial \left(\frac{m}{V}\right)}{\partial P} = \frac{\partial \left(\frac{P}{rT}\right)}{\partial P} = \frac{1}{rT} = \frac{1}{416.5 \cdot 10^{-3} \cdot 620} \approx 0.0035$$

Přehled největších TE v ČR

Elektrárna	Celkový instalovaný výkon [MW]	bloků	Rok uvedení do provozu	palivo	provozovatel
Prunéřov II	1 050	5	1981 - 82	hnědé uhlí	ČEZ
Počerady	1 000	5	1970 - 77	hnědé uhlí	ČEZ
Chvaletice	800	4	1977 - 78	hnědé uhlí	ČEZ
Dětmarovice	800	4	1975 - 76	černé uhlí	ČEZ
Tušimice II	800	4	1974 - 75	hnědé uhlí	ČEZ
Mělník III	500	1	1981	hnědé uhlí	ČEZ
Prunéřov I	440	4	1967 - 68	hnědé uhlí	ČEZ
Vřesová	370	2	1996	zemné plyn, energoplyn	Sokolovská uhelná
Opatovice	363	6	1960 - 97	hnědé uhlí	Elektrárny Opatovice
Mělník I	352	6	1961 - 95	hnědé uhlí	ENERGOTRANS
Kladno - Dubská	306	4	1976 - 99	hnědé uhlí, černé uhlí, biomasa	Alpiq Generation (CZ)
Ostrava-Kunčice	254	11	1957 - 2000	černé uhlí, hutné plyn	Arcelor Mittal
Komořany	239	8	1959 - 98	hnědé uhlí, zemní plyn	United Energy
Mělník II	220	2	1971	hnědé uhlí	ČEZ
Ledvice 2	220	2	1967	hnědé uhlí	ČEZ
Vřesová (teplárna)	220	4	1967 - 91	hnědé uhlí, zemní plyn	Sokolovská uhelná
Tisová I	184	4	1959 - 60	hnědé uhlí, biomasa	ČEZ
Třebovice	174	2	1961	černé uhlí, lehký topný olej	Dalkia
Litvínov T200	166	8	1942 - 55	hnědé uhlí	Unipetrol
Poříčí	165	3	1957	hnědé uhlí, černé uhlí, biomasa	ČEZ