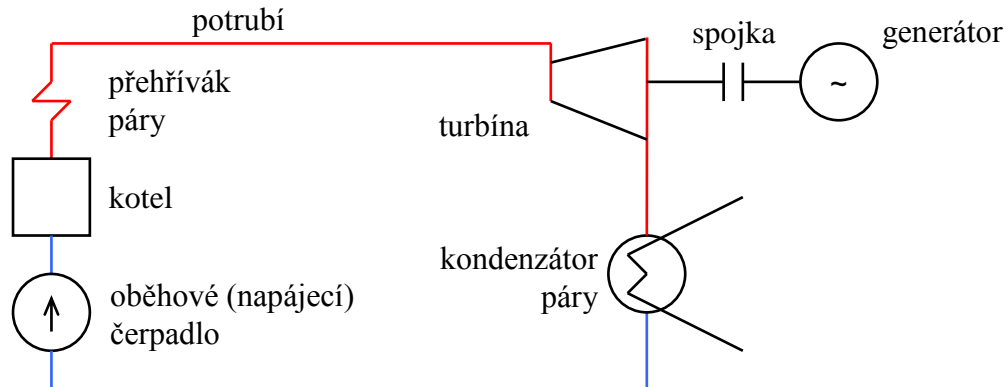


Výroba a užití elektrické energie

Tepelné elektrárny

Příklad 1

Vypočítejte tepelnou bilanci a dílčí účinnosti tepelné elektrárny s kondenzační turbínou dle schématu naznačeného na obr. 1.



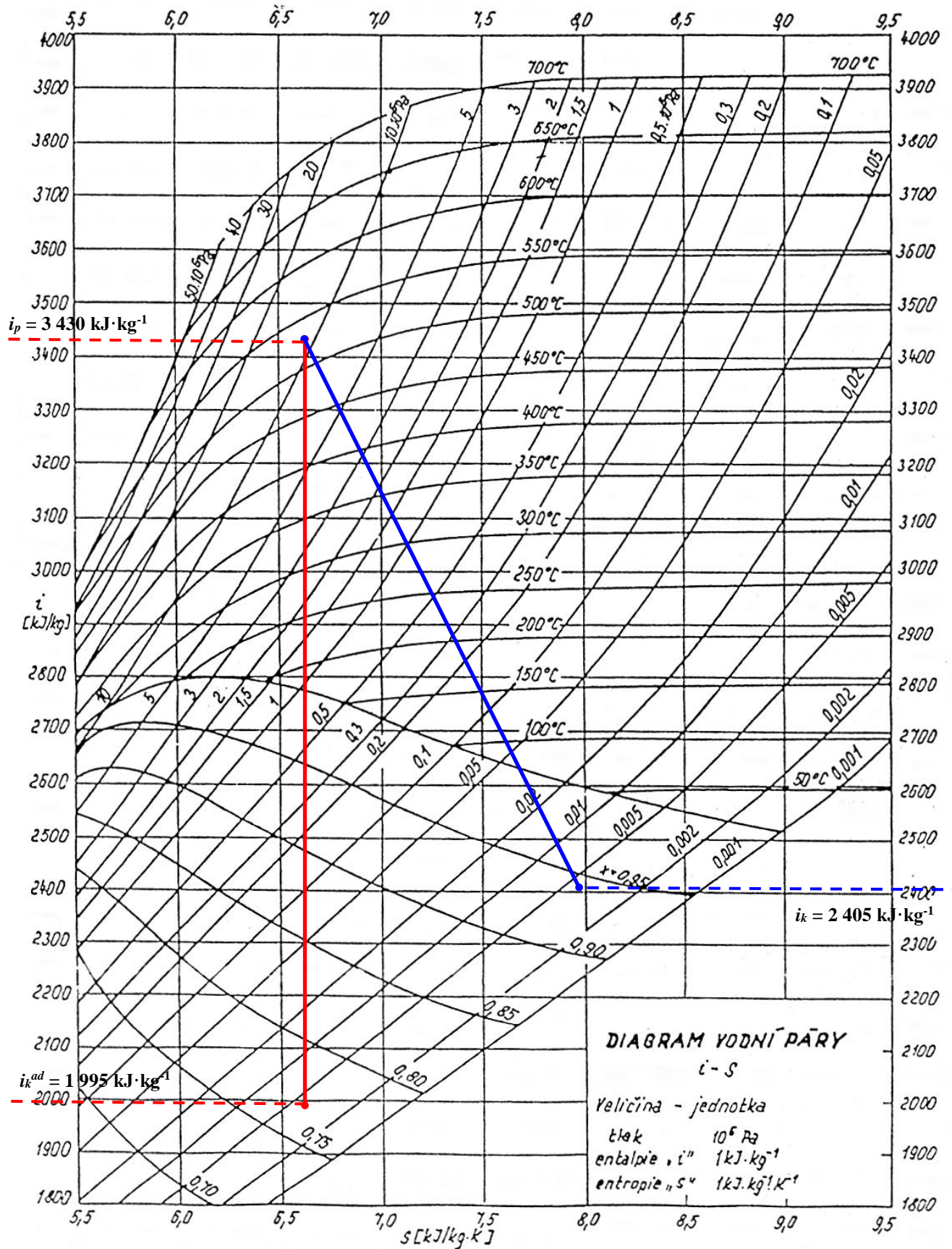
Obr. 1. Zjednodušené blokové schéma tepelné elektrárny s kondenzační (expanzní) turbínou.

Zadané hodnoty:

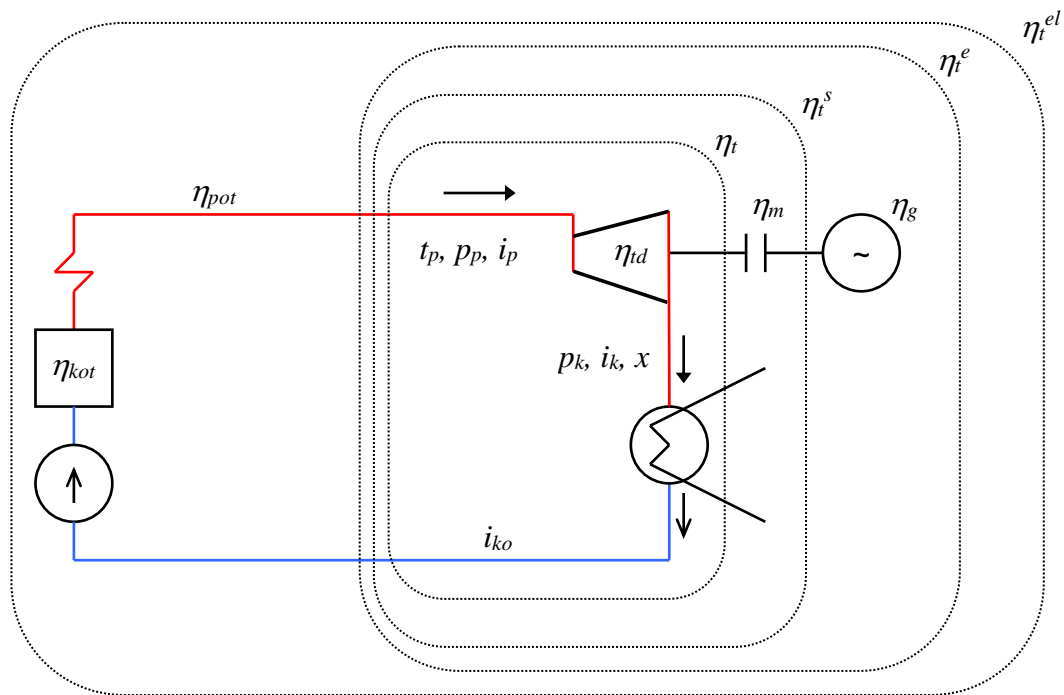
Teplota přehřáté páry na vstupu do turbíny	$t_p = 525 \text{ °C}$
Tlak přehřáté páry na vstupu do turbíny	$p_p = 11 \text{ MPa}$
Suchost páry na výstupu z turbíny	$x = 0,94$
Tlak páry v kondenzátoru	$p_k = 0,004 \text{ MPa}$
Účinnost kotle	$\eta_{kot} = 0,85$
Účinnost potrubí	$\eta_{pot} = 0,98$
Účinnost na spojce (mechanická)	$\eta_m = 0,97$
Účinnost generátoru	$\eta_g = 0,96$
El. výkon (brutto) na svorkách generátoru	$P_{el} = 25 \text{ MW}$
Výhřevnost paliva	$k_v = 19 \text{ MJ} \cdot \text{kg}^{-1}$

Řešení:

Z i - s diagramu, viz. následující strana, určíme pro hodnoty p_p a t_p velikost entalpie $i_p = 3430 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$. Spuštěním svislice z bodu (p_p, t_p) na křivku zadaného tlaku v kondenzátoru p_k určíme velikost teoretické entalpie páry při výstupu z turbíny (vstupu do kondenzátoru) $i_k^{ad} = 1995 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$. Hodnotu skutečné entalpie páry do kondenzátoru i_k najdeme jako průsečík křivky tlaku páry v kondenzátoru p_k a suchosti páry x , $i_k = 2405 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$. Entalpii kondenzátu $i_{ko} = 121 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$ určíme z parních tabulek vody na základě znalosti velikosti tlaku v kondenzátoru p_k .



Obr. 2. Ukázka odečítání provozních bodů pracovního média (voda/pára) z i-s diagramu vodní páry.



Obr. 3. Znázornění dílčích účinností tepelné elektrárny s kondenzační (expanzní) turbínou.

Výpočet jednotlivých účinností

Tepelná účinnost skutečného cyklu (pochodu):

$$\eta_t = \frac{i_p - i_k}{i_p - i_{ko}} \quad (-; \text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}, \text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1})$$

$$\eta_t = \frac{3430 - 2405}{3430 - 121} = 0,3098 \approx 30,98\%$$

Tepelná účinnost na spojce:

$$\eta_t^s = \eta_t \cdot \eta_m \quad (-; -, -)$$

$$\eta_t^s = 0,3098 \cdot 0,97 = 0,3005 \approx 30,05\%$$

Účinnost na svorkách generátoru (alternátoru):

$$\eta_t^e = \eta_t^s \cdot \eta_g \quad (-; -, -)$$

$$\eta_t^e = 0,3005 \cdot 0,96 = 0,2885 \approx 28,85\%$$

Celková účinnost elektrárny:

$$\eta_t^{el} = \eta_t^e \cdot \eta_{kot} \cdot \eta_{pot} \quad (-; -, -, -)$$

$$\eta_t^{el} = 0,2885 \cdot 0,85 \cdot 0,98 = 0,2403 \approx 24,03\%$$

Pro úplnost můžeme ještě stanovit následující účinnosti:

Tepelná účinnost ideálního cyklu (skutečný polytropický děj nahradíme adiabatickým dějem):

$$\eta_t^{ad} = \frac{i_p - i_k^{ad}}{i_p - i_{ko}} \quad (-; \text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}, \text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1})$$

$$\eta_t^{ad} = \frac{3430 - 1995}{3430 - 121} = 0,4337 \approx 43,37\%$$

Termodynamická účinnost (tepelná účinnost turbíny):

$$\eta_{td} = \frac{i_p - i_k}{i_p - i_k^{ad}} \quad (-; \text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}, \text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1})$$

$$\eta_{td} = \frac{3430 - 2405}{3430 - 1995} = 0,7143 \approx 71,43\%$$

Tepelnou účinnost skutečného cyklu můžeme vypočítat i ze vztahu:

$$\eta_t = \eta_t^{ad} \cdot \eta_{td} \quad (-; -, -)$$

Tepelná bilance elektrárny

Spotřeba páry pro turbínu (odpovídá množství tepla odebraného páře turbínou):

$$M = \frac{3600 \cdot P_{el}}{(i_p - i_k) \cdot \eta_m \cdot \eta_g} \quad (\text{t} \cdot \text{h}^{-1}; (\text{s} \cdot \text{h}^{-1}), \text{MW}, \text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}, -)$$

$$M = \frac{3600 \cdot 25}{(3430 - 2405) \cdot 0,96 \cdot 0,97} = 94,29 \text{ t} \cdot \text{h}^{-1}$$

Spotřeba tepla pro turbínu (množství tepla neseného pracovním médiem na vstupu turbíny):

$$Q^e = M \cdot (i_p - i_{ko}) \quad (\text{MJ} \cdot \text{h}^{-1}; \text{t} \cdot \text{h}^{-1}, \text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1})$$

$$Q^e = 94,29 \cdot (3430 - 121) = 312\,010 \text{ MJ} \cdot \text{h}^{-1} \approx 312,01 \text{ GJ} \cdot \text{h}^{-1}$$

Spotřeba tepla celková (množství tepla dodávané systému v palivu):

$$Q^{el} = \frac{Q^e}{\eta_{kot} \cdot \eta_{pot}} \quad (\text{GJ} \cdot \text{h}^{-1}; \text{GJ} \cdot \text{h}^{-1}, -)$$

$$Q^{el} = \frac{312,01}{0,85 \cdot 0,98} = 374,56 \text{ GJ} \cdot \text{h}^{-1}$$

Spotřeba paliva:

$$M_u = \frac{Q^{el}}{k_v} \quad (\text{t} \cdot \text{h}^{-1}; \text{GJ} \cdot \text{h}^{-1}, \text{MJ} \cdot \text{kg}^{-1})$$

$$M_u = \frac{374,56}{19} = 19,71 \text{ t} \cdot \text{h}^{-1}$$

Pozn.: vagón uhlí s bočními výsypkami 55 t.

Pokud výše uvedené hodnoty vztáhneme k elektrickému výkonu elektrárny, získáme měrné hodnoty spotřeby tepla, páry a paliva.

Měrná spotřeba páry pro turbínu:

$$m = \frac{M}{P_{el}} \quad (\text{t} \cdot (\text{MWh})^{-1}; \text{t} \cdot \text{h}^{-1}, \text{MW})$$

$$m = \frac{94,29}{25} = 3,77 \text{t} \cdot (\text{MWh})^{-1}$$

Měrná spotřeba tepla pro turbínu:

$$q^e = \frac{Q^e}{P_{el}} \quad (\text{GJ} \cdot (\text{MWh})^{-1}; \text{GJ} \cdot \text{h}^{-1}, \text{MW})$$

$$q^e = \frac{312,01}{25} = 12,48 \text{GJ} \cdot (\text{MWh})^{-1}$$

Měrná spotřeba tepla celková:

$$q^{el} = \frac{Q^{el}}{P_{el}} \quad (\text{GJ} \cdot (\text{MWh})^{-1}; \text{GJ} \cdot \text{h}^{-1}, \text{MW})$$

$$q^{el} = \frac{374,56}{25} = 14,98 \text{GJ} \cdot (\text{MWh})^{-1}$$

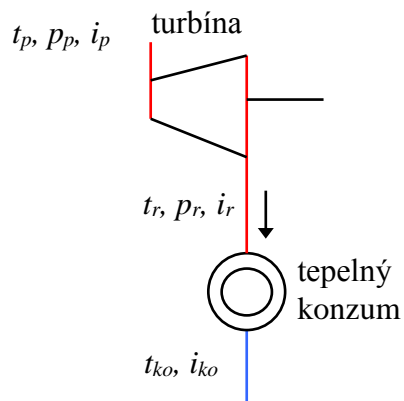
Měrná spotřeba paliva:

$$m_u = \frac{M_u}{P_{el}} \quad (\text{t} \cdot (\text{MWh})^{-1}; \text{t} \cdot \text{h}^{-1}, \text{MW})$$

$$m_u = \frac{19,71}{25} = 0,79 \text{t} \cdot (\text{MWh})^{-1}$$

Příklad 2

Jak se změní tepelná bilance a celková účinnost z příkladu 1 pokud se bude jednat o teplárnu s protitlakým soustrojím dle schématu naznačeného na Obr. 5. Teplota kondenzátu je 29 °C.



Obr. 5. Zjednodušené blokové schéma tepelné elektrárny s protitlakou turbínou.

Zadané hodnoty:

Teplota přehřáté páry na vstupu do odběru	$t_r = 220 \text{ }^\circ\text{C}$
Tlak přehřáté páry na vstupu do odběru	$p_r = 0,9 \text{ MPa}$
Měrná tepelná kapacita prac. média (vody)	$c_{\text{H}_2\text{O}} = 4,18 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$
Teplota kondenzátu	$t_{\text{ko}} = 29 \text{ }^\circ\text{C}$
Účinnost na spojení (mechanická)	$\eta_m = 0,97$
El. výkon (brutto) na svorkách generátoru	$P_{el} = 25 \text{ MW}$

Řešení:

Z i - s diagramu určíme entalpii $i_r = 2890 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$ jako průsečík křivek s parametrem t_r a p_r , entalpii kondenzátu i_{ko} se vypočítá z měrné tepelné kapacity vody:

$$i_{ko} = c_{ko} \cdot t_{ko} = 4,18 \cdot 10^3 \cdot 29 = 121 \cdot 10^3 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} = 121 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}.$$

Tepelná bilance teplárny

Spotřeba páry pro turbínu:

$$M = \frac{3600 \cdot P_{el}}{(i_p - i_r) \cdot \eta_m \cdot \eta_g} \quad (\text{t} \cdot \text{h}^{-1}; \text{s} \cdot \text{h}^{-1}, \text{MW}, \text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}, -)$$

$$M = \frac{3600 \cdot 25}{(3430 - 2890) \cdot 0,97 \cdot 0,96} = 179 \text{ t} \cdot \text{h}^{-1}$$

Spotřeba tepla pro turbínu:

$$Q = M \cdot (i_p - i_{ko}) \quad (\text{MJ} \cdot \text{h}^{-1}; \text{t} \cdot \text{h}^{-1}, \text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1})$$

$$Q = 179 \cdot (3430 - 121) = 529,3 \cdot 10^3 \text{ MJ} \cdot \text{h}^{-1} \approx 529,3 \text{ GJ} \cdot \text{h}^{-1}$$

Celková spotřeba tepla v teplárně (v elektrárně s protitlakem turbínou):

$$Q_{iep} = \frac{Q}{\eta_{kot} \cdot \eta_{pot}} \quad (\text{GJ} \cdot \text{h}^{-1}; \text{GJ} \cdot \text{h}^{-1}, -, -)$$

$$Q_{iep} = \frac{529,3}{0,85 \cdot 0,98} = 635,4 \text{ GJ} \cdot \text{h}^{-1}$$

Spotřeba paliva:

$$M_u = \frac{Q_{iep}}{k_v} \quad (\text{t} \cdot \text{h}^{-1}; \text{GJ} \cdot \text{h}^{-1}, \text{MJ} \cdot \text{kg}^{-1})$$

$$M_u = \frac{635,4}{19} = 33,44 \text{ t} \cdot \text{h}^{-1}$$

Množství tepla vstupujícího do konzumního odběru:

$$Q_{dod} = M \cdot (i_r - i_{ko}) \quad (\text{GJ} \cdot \text{h}^{-1}; \text{t} \cdot \text{h}^{-1}, \text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1})$$

$$Q_{dod} = 179 \cdot (2890 - 121) = 495,7 \cdot 10^3 \text{ MJ} \cdot \text{h}^{-1} = 495,7 \text{ GJ} \cdot \text{h}^{-1}$$

Tepelná účinnost cyklu:

$$\eta_t = \frac{i_p - i_r}{i_p - i_{ko}} \quad (-; \text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}, \text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1})$$

$$\eta_t = \frac{3430 - 2890}{3430 - 121} = 0,1632 \approx 16,32\%$$

Celková účinnost teplárny:

$$\eta_t^{tep} = \frac{3600 \cdot P_{el} + Q_{dod}}{Q_{tep}} \quad (-; \text{s} \cdot \text{h}^{-1}, \text{MW}, \text{MJ} \cdot \text{h}^{-1}, \text{MJ} \cdot \text{h}^{-1})$$

$$\eta_t^{tep} = \frac{3600 \cdot 25 + 495,7 \cdot 10^3}{635,4 \cdot 10^3} = 0,9218 \approx 92,18\%$$

Vodní elektrárny

Základní pojmy

1. *Stálé nadržení* (stálá zásoba; V_{st}) - nejnižší stav (napuštění) vodní hladiny v nádrži, při tomto stavu nelze dále odebírat vodu z vodní nádrže.
2. *Užitný obsah* (objem; V_u): objem vodní nádrže mezi stálou zásobou a nejvyšším provozním stavem, tedy nejvyšší provozní stav hladiny.
3. *Retenční obsah* (objem; V_r): objem vodní nádrže nad užitným obsahem sloužící k zachycení povodňových vln.
4. *Energetický ekvivalent* (E_o): zásoba potenciální energie užitného obsahu vodní nádrže

Příklad 1

Akumulační vodní elektrárna Slapy s instalovaným výkonem 144 MW vyrobí v průběhu jednoho roku 359 GWh elektrické energie. Průměrný spád elektrárny je 56 m, hltnost celé elektrárny činí $330 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. Určete střední hodnotu výkonu, dobu využití instalovaného výkonu, zatěžovatel a účinnost celé elektrárny.

Instalovaný výkon vodní elektrárny	$P_i = 144 \text{ MW}$
Množství energie vyrobené za 1 rok	$A = 359 \text{ GWh}$
Průměrný spád vodní elektrárny	$H_{str} = 56 \text{ m}$
Hltnost vodní elektrárny	$Q = 330 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$
Zemské tíhové zrychlení	$g = 9,81 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$
Měrná objemová hmotnost (hustota) vody	$\rho = 1000 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$

Střední hodnota výkonu činí:

$$P_{str} = \frac{A}{T} \quad (\text{W}; \text{Wh}, \text{h})$$

$$P_{str} = \frac{359 \cdot 10^9}{8760} = 40,98 \text{ MW}$$

Doba využití instalovaného výkonu se vypočítá pomocí vztahu:

$$\tau_i = \frac{A}{P_i} \quad (\text{h}; \text{Wh}, \text{W})$$

$$\tau_i = \frac{359 \cdot 10^9}{144 \cdot 10^6} = 2\,493,06 \text{ h}$$

Zatěžovatel:

$$\xi = \frac{P_{str}}{P_i} = \frac{\tau_i}{T} \quad (-; W, W, h, h)$$

$$\xi = \frac{40,98}{144} = 0,2846$$

Účinnost elektrárny:

$$\eta = \frac{P_i}{g \cdot \rho \cdot Q \cdot H_{str}} \quad (-; W, m \cdot s^{-2}, kg \cdot m^{-3}, m^3 \cdot s^{-1}, m)$$

$$\eta = \frac{144 \cdot 10^6}{9,81 \cdot 1000 \cdot 330 \cdot 56} = 0,7943 \approx 79,43 \%$$

Příklad 2

Akumulační vodní elektrárna má instalovaný výkon $P_i = 2 \times 12 \text{ MW}$ s průměrným spádem $H_{str} = 120 \text{ m}$ a s průtokem jednou turbínou $Q = 12 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. Určete účinnost turbín (včetně generátoru), dobu špičkového provozu vodní elektrárny, je-li průměrný přítok do nádrže $Q_p = 3 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ($t_p = 24 \text{ h}$), čas plnění prázdné nádrže, je-li její objem $V = 45 \cdot 10^6 \text{ m}^3$, a energetický ekvivalent, je-li užitečný objem nádrže $V_u = 25 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ při jednodenní akumulaci.

Instalovaný výkon vodní elektrárny	$P_i = 2 \times 12 \text{ MW}$
Průměrný spád vodní elektrárny	$H_{str} = 120 \text{ m}$
Hltnost (průtok) turbíny vodní elektrárny	$Q = 12 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1} \Rightarrow Q_s = 2 \times 12 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$
Průměrný přítok do nádrže	$Q_p = 3 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ($t_p = 24 \text{ h}$)
Celkový objem nádrže vodní elektrárny	$V = 45 \cdot 10^6 \text{ m}^3$
Užitečný objem nádrže	$V_u = 25 \cdot 10^6 \text{ m}^3$
Zemské tíhové zrychlení	$g = 9,81 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$
Měrná objemová hmotnost (hustota) vody	$\rho = 1000 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$

Účinnost turbín:

$$\eta = \frac{P_i}{g \cdot \rho \cdot Q \cdot H_{str}} = \frac{12 \cdot 10^6}{9,81 \cdot 1000 \cdot 12 \cdot 120} = 0,8495 \approx 84,95 \%$$

$$(-; W, m \cdot s^{-2}, kg \cdot m^{-3}, m^3 \cdot s^{-1}, m)$$

Doba špičkového provozu:

$$t_s = \frac{t_p \cdot Q_p}{Q_s} \quad (h; h, m^3 \cdot s^{-1}, m^3 \cdot s^{-1})$$

$$t_s = \frac{24 \cdot 3}{2 \cdot 12} = 3 \text{ h}$$

Doba plnění nádrže:

$$t = \frac{V}{3600 \cdot Q_p} \quad (h; m^3, m^3 \cdot s^{-1})$$

$$t = \frac{45 \cdot 10^6}{3600 \cdot 3} = 4166,67 \text{ h}$$

Energetický ekvivalent (energie odpovídající potenciální energii vody v užitém obsahu nádrže násobená celkovou účinností vodní elektrárny):

$$E_o = \frac{g \cdot \rho \cdot V_u \cdot H_{str} \cdot \eta}{3600} \quad (\text{Wh}; \text{m} \cdot \text{s}^{-2}, \text{kg} \cdot \text{m}^{-3}, \text{m}^3, \text{m}, -)$$

$$E_o = \frac{9,81 \cdot 1000 \cdot 25 \cdot 10^6 \cdot 120 \cdot 0,85}{3600} = 6,95 \cdot 10^9 \text{ Wh} = 6,95 \text{ GWh}$$

Příklad 3

Vypočítejte, jak se změní velikost užitého objemu vodní elektrárny, je-li průměrný přítok do nádrže $5 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, průtok turbínou $20 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, nepřerušovaná špička 6 h a přerušovaná špička - špička 4 h, přestávka 5 h a špička 2 h! (např. 5., 9., 14. a 16. h)

Hltnost (průtok) turbíny vodní elektrárny	$Q = 20 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$
Průměrný přítok do nádrže	$Q_p = 5 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ($t_p = 24 \text{ h}$)
a) nepřerušovaná špička	$t_{\xi} = 6 \text{ h}$
b) přerušovaná špička	$t_{\xi 1} = 4 \text{ h}, t_{přes} = 5 \text{ h}, t_{\xi 2} = 2 \text{ h}.$

a) Pro nepřerušovanou špičku:

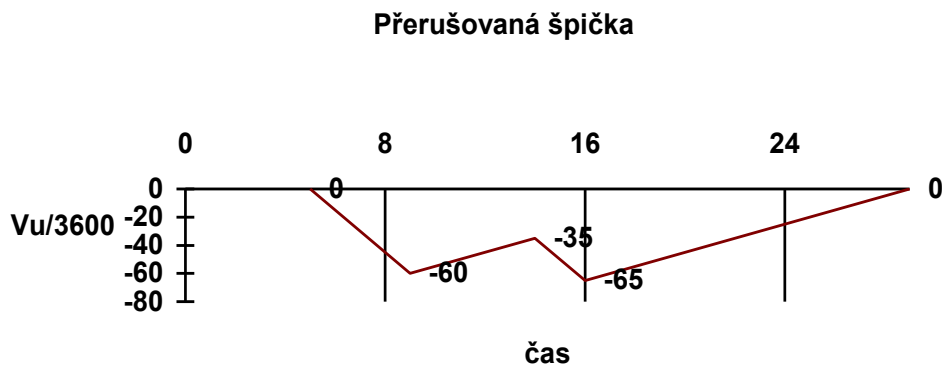
$$V_u = 3600 \cdot (24 - t_{\xi}) \cdot Q_p \quad (\text{m}^3; \text{s (h)}, \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1})$$

$$V_u = 3600 \cdot (24 - 6) \cdot 5 = 324 \cdot 10^3 \text{ m}^3$$

b) Pro přerušovanou špičku:

$$V_u = 3600 \cdot [24 - (t_{\xi 1} + t_{\xi 2})] \cdot Q_p - 3600 \cdot t_{přes} \cdot Q_p \quad (\text{m}^3; \text{s (h)}, \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1})$$

$$V_u = 3600 \cdot [24 - (4 + 2)] \cdot 5 - 3600 \cdot 5 \cdot 5 = 234 \cdot 10^3 \text{ m}^3$$



Obr. Průběh vyprazdňování užitého obsahu během jednoho cyklu (dne) při přerušované provozní špičce.

Příklad 4

Přečerpávací vodní elektrárna se soustrojím s instalovaným výkonem 2 x 35 MW ve třístrojovém uspořádání má umělou horní nádrž s užitečným obsahem $6 \cdot 10^5 \text{ m}^3$ ve výšce 220 m nad hladinou spodní nádrže. Určete teoretický energetický ekvivalent, skutečnou elektrickou energii vyrobenou a spotřebovanou v elektrárně, celkovou dobu špičkového provozu a dobu čerpání vody, celkovou účinnost a dobu využití elektrárny!

Instalovaný výkon přeč. vodní elektrárny	$P_i = 2 \times 35 \text{ MW}$
Průměrný spád vodní elektrárny	$H_{str} = 220 \text{ m}$
Užitný objem horní nádrže	$V_u = 6 \cdot 10^5 \text{ m}^3$
Zemské tíhové zrychlení	$g = 9,81 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$
Měrná objemová hmotnost (hustota) vody	$\rho = 1000 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$
Účinnost motor-generátoru – generátorický chod	$\eta_g = 0,97$
Účinnost motor-generátoru – motorický chod	$\eta_m = 0,96$
Účinnost turbíny	$\eta_t = 0,88$
Účinnost čerpadla	$\eta_c = 0,86$
Účinnost potrubí v generátorickém chodu	$\eta_{pg} = 0,97$
Účinnost potrubí v motorickém chodu	$\eta_{pm} = 0,99$

Teoretický energetický ekvivalent:

$$E_t = \frac{g \cdot \rho \cdot V_u \cdot H_{str}}{3600} \quad (\text{Wh; m} \cdot \text{s}^{-2}, \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}, \text{ m}^3, \text{ m}, -)$$
$$E_t = \frac{9,81 \cdot 1000 \cdot 6 \cdot 10^5 \cdot 220}{3600} = 3,597 \cdot 10^8 \text{ Wh} = 359,7 \text{ MWh}$$

Skutečně vyrobená elektrická energie (skutečný energetický ekvivalent):

$$E_s = E_t \cdot \eta_g \cdot \eta_t \cdot \eta_{pg} = 359,7 \cdot 10^6 \cdot 0,97 \cdot 0,88 \cdot 0,97 = 297,8 \cdot 10^6 \text{ Wh} = 297,8 \text{ MWh}$$

Spotřebovaná elektrická energie:

$$A = E_t / (\eta_m \cdot \eta_c \cdot \eta_{pm}) = 360 / (0,96 \cdot 0,86 \cdot 0,99) = 440,1 \text{ MWh}$$

Celková doba špičkového provozu:

$$t_s = E_s / P_i = 297,8 / (2 \cdot 35) = 4,25 \text{ h} \quad (\text{h; MWh, MW})$$

Doba čerpání vody ze spodní nádrže do horní:

$$t_c = A / P_i = 440,1 / (2 \cdot 35) = 6,29 \text{ h} \quad (\text{h; MWh, MW})$$

Celková účinnost elektrárny:

$$\eta = \eta_g \cdot \eta_t \cdot \eta_{pg} \cdot \eta_m \cdot \eta_c \cdot \eta_{pm} = E_s / A = 297,8 / 440,1 = 0,677 \approx 67,7 \%$$

Roční využití elektrárny při čerpání v noci:

$$\tau = t_s \cdot 365 = 4,25 \cdot 365 = 1551,3 \text{ h}$$