

Cvičení 5 – Bilancování provozu tepelných čerpadel

Příklad 1 – Poměrná úspora elektrické energie

Dům o potřebě tepla 10 MWh/rok je vytápěn elektrickými přímotopy. Stanovte úsporu elektrické energie při nasazení tepelného čerpadla s ročním topným faktorem $SCOP = 3.0$ (TC1) a $SCOP = 6.0$ (TC2). O kolik více elektrické energie se ušetří efektivnějším tepelným čerpadlem?

Řešení

potřeba elektrické energie pro vytápění $E_{PT} = 10$ MWh/rok

potřeba elektrické energie pro vytápění méně efektivním tepelným čerpadlem

$$E_{TC1} = E_{PT}/SCOP_1 = 3.33 \text{ MWh/rok}$$

potřeba elektrické energie pro vytápění efektivnějším tepelným čerpadlem

$$E_{TC2} = E_{PT}/SCOP_2 = 1.67 \text{ MWh/rok}$$

úspora elektrické energie nasazení méně efektivního tepelného čerpadla

$$UE_{TC1} = 6.7 \text{ MWh/rok}$$

úspora elektrické energie nasazení efektivnějšího tepelného čerpadla

$$UE_{TC2} = 8.3 \text{ MWh/rok}$$

$$(UE_{TC2} - UE_{TC1})/UE_{TC1} = 0.25$$

$$UE_{TC2}/UE_{TC1} = 1.25$$

Úspora použitím efektivnějšího tepelného čerpadla je o 25 % vyšší než při použití tepelného čerpadla s polovičním topným faktorem.

Příklad 2 – Minimální roční topný faktor

Jaký je minimální roční topný faktor tepelného čerpadla $SCOP$, aby dosáhlo úspory primárního paliva oproti plynovému kondenzačnímu kotli s provozní účinností 95 %. Účinnost výroby a distribuce elektrické energie z primárního paliva je 35 %.

Řešení

$$SCOP > \eta_k / \eta_e$$

$$SCOP > 0.95 / 0.35 = 2.71$$

Příklad 3 – Intervalová metoda

V rodinném domě je tepelné čerpadlo země-voda se zemními vrtly použito pro vytápění a přípravu teplé vody.

Vytápění

Dům o tepelné ztrátě 30 kW pro návrhové podmínky $t_{e,N} = -18\text{ °C}$, $t_{i,N} = 20\text{ °C}$

Otopné období 235 dní, $t_{e,p} = 3.0\text{ °C}$, $t_{i,p} = 20\text{ °C}$

$$Q_{VYT} = Q_z \frac{t_{ip} - t_{ep}}{t_{i,N} - t_{e,N}} \varepsilon \cdot 24 \cdot d = 30 \frac{20 - 3}{20 + 18} 0,8 \cdot 24 \cdot 235 = 60\,556 \text{ kWh/rok}$$

Otopná soustava 50/40 °C, otopná tělesa (teplotní exponent $m = 1.3$)

Oběhové čerpadlo mezi tepelným čerpadlem a zásobníkem otopné vody má pracovní příkon 20 W.

Teplá voda

6 osob, 60 l/os.den, přírážka na tepelné ztráty 30 %

teplota teplé vody 55 °C, teplota studené vody 10 °C

$$Q_{TV} = \frac{365 \cdot V \cdot \rho \cdot c \cdot (t_{TV} - t_{SV}) \cdot (1 + z)}{3.6 \times 10^6} = \frac{365 \cdot 6 \cdot 60 \cdot 4187 \cdot (55 - 10) \cdot (1 + 0.3)}{3.6 \times 10^6} = 8950 \text{ kWh/rok}$$

Oběhové čerpadlo mezi tepelným čerpadlem a zásobníkem otopné vody má pracovní příkon 30 W.

Tepelné čerpadlo

Bylo zvoleno tepelné čerpadlo WPF20 se jmenovitým výkonem $\Phi_{TC} = 21.9\text{ kW}$ a jmenovitým topným faktorem $COP = 4.8$ při podmínkách B0/W35.

Brine | water heat pump WPF 20

Heating output (kW), power consumption (kW) and coefficient of performance ε

Heat source temp. °C	Heating output			Power consumption			COP		
	35 °C	50 °C	60 °C	35 °C	50 °C	60 °C	35 °C	50 °C	60 °C
	kW	kW	kW	kW	kW	kW	ε	ε	ε
-5	19.2	18.3	17.4	4.5	6.4	7.8	4.3	2.9	2.2
0	21.9	20.7	20.0	4.5	6.3	7.8	4.8	3.3	2.6
+5	24.8	23.3	22.4	4.5	6.4	7.8	5.5	3.7	2.9
+10	28.1	26.2	25.0	4.6	6.4	7.8	6.1	4.1	3.2

Oběhové čerpadlo okruhu zemních vrtů má pracovní příkon 60 W.

Pro zjednodušení výpočtu byly body charakteristiky topného výkonu a COP interpolovány a zjištěny následující přibližné lineární charakteristiky

$$\Phi_{TC} = 25,9 + 0,569 \cdot t_{v1} - 0,103 \cdot t_{k2}$$

$$COP = 8,6 + 0,091 \cdot t_{v1} - 0,104 \cdot t_{k2}$$

Řešení a výpočet

Klimatické údaje – interval, viz tabulka

interval	-14 °C až -15 °C	2 °C až 3 °C	22 °C až 23 °C
střední teplota interval $t_{em,j}$	-14.5 °C	2.5 °C	22.5 °C
doba trvání interval τ_j	14 h	433 h	125 h

Rozpočet potřeby tepla na vytápění

$$Q_{VYT,j} = Q_{VYT} \frac{DH_j}{DH} = Q_{VYT} \frac{(t_i - t_{em,j}) \cdot \tau_j}{\sum_j DH_j} = 60556 \frac{(20 - (-14.5)) \cdot 14}{95816} = 60556 \frac{483}{95816} = 305 \text{ kWh}$$

Rozpočet potřeby tepla na přípravu teplé vody

$$Q_{TV,j} = Q_{TV} \frac{H_j}{H} = Q_{TV} \frac{H_j}{8760} = 8950 \frac{14}{8760} = 14 \text{ kWh}$$

interval	-14 °C až -15 °C	2 °C až 3 °C	22 °C až 23 °C
DH_{20}	483	7578	nevytápí se
potřeba tepla Q_{VYT} [kWh]	305	4789	-
potřeba tepla Q_{TV} [kWh]	14	442	128

Provozní podmínky tepelného čerpadla v intervalu t_{v1}

teplota na vstupu do výparníku

$$t_{v1} = \max(0 \text{ °C}; \min(0,15 \cdot t_e + 1,5 \text{ °C}; 4,5 \text{ °C})) = \max(0; \min(0,15 \cdot (-14,5) + 1,5; 4,5)) = 0 \text{ °C}$$

teplota na výstupu z kondenzátoru t_{k2}

$$t_{w1,j} = t_i + \frac{t_{w1,N} - t_{w2,N}}{2} \cdot \frac{t_i - t_{em,j}}{t_i - t_{e,N}} + \left(\frac{t_{w1,N} + t_{w2,N}}{2} - t_i \right) \cdot \left(\frac{t_i - t_{em,j}}{t_i - t_{e,N}} \right)^{1/m}$$

$$t_{k2,j} = t_{w1,j} + \Delta t_w$$

kde $\Delta t_w = 2 \text{ K}$

$$t_{k2,j} = t_{TV} + \Delta t_{TV}$$

kde $\Delta t_{TV} = 0 \text{ K}$

interval	-14 °C až -15 °C	2 °C až 3 °C	22 °C až 23 °C
teplota do výparníku t_{v1}	0 °C	1.9 °C	4.5 °C
teplota z kondenzátoru t_{k2} pro teplou vodu	55	55	55
teplota z kondenzátoru t_{k2} pro vytápění	52	38	-
výkon Φ TČ pro TV [kW]	20.2	21.3	22.8
COP TČ pro TV	2.9	3.1	3.3
výkon Φ TČ pro VYT [kW]	20.8	23.0	-
COP TČ pro VYT	3.4	4.8	-

výpočet bilance pro TV

energie z tepelného čerpadla, která je v intervalu k dispozici

$$Q_{TC,dis,TV,j} = \Phi_{TC,TV,j} \cdot \tau_j$$

energie dodaná z tepelného čerpadla pro krytí potřeby TV

$$Q_{TC,dod,j} = \min(Q_{TC,dis}; Q_{TV})_j$$

potřeba elektrické energie pro pohon TČ

$$E_{TC,TV,j} = \frac{Q_{TC,dod,TV,j}}{COP_{TV,j}}$$

energie dodaná záložním zdrojem tepla (elektrokotlem)

$$E_{ZZ,TV,j} = Q_{TV,j} - Q_{TC,dod,TV,j}$$

doba chodu TČ pro TV

$$\tau_{TC,TV,j} = \frac{Q_{TC,dod,TV,j}}{\Phi_{TC,TV,j}}$$

potřeba pomocné energie pro režim TV

$$E_{pom,TV,j} = P_{pom,TV} \cdot \tau_{TC,TV,j}$$

$$P_{pom,TV} = 30 + 60 \text{ W}$$

interval	-14 °C až -15 °C	2 °C až 3 °C	22 °C až 23 °C
disponibilní energie z TČ $Q_{TC,dis,TV}$	283	9224	2849
energie dodaná z TČ $Q_{TC,dod,TV}$	14	442	128
potřeba elektřiny pro TČ $E_{TC,TV}$	5	145	39
doba provozu TČ $t_{TC,TV}$	0.7	20.8	5.6
energie ze záložního zdroje $E_{ZZ,TV}$	0	0	0
potřeba pomocné energie $E_{pom,TV}$	0.1	1.9	0.5

výpočet bilance pro vytápění, analogicky jako TV s hodnotami pro vytápění

disponibilní doba provozu tepelného čerpadla pro režim vytápění

$$\tau_{TC,VYT,dis,j} = \tau_j - \tau_{TC,TV,j}$$

energie z tepelného čerpadla, která je v intervalu k dispozici

$$Q_{TC,VYT,dis,j} = \tau_{TC,VYT,dis,j} \cdot \Phi_{TC,VYT,j}$$

$$P_{pom,VYT} = 20 + 60 \text{ W}$$

interval	-14 °C až -15 °C	2 °C až 3 °C	22 °C až 23 °C
disponibilní doba provozu TČ pro vytápění $\tau_{TC,dis,VYT} \text{ [h]}$	13.3	412.2	-
disponibilní energie z TČ $Q_{TC,dis,VYT} \text{ [kWh]}$	276	9500	-
energie dodaná z TČ $Q_{TC,dod,VYT} \text{ [kWh]}$	276	4789	-
potřeba elektřiny pro TČ $E_{TC,VYT} \text{ [kWh]}$	81	995	-
doba provozu TČ $\tau_{TC,VYT} \text{ [h]}$	13.3	207.8	-
energie ze záložního zdroje $E_{ZZ,VYT} \text{ [kWh]}$	29	0	-
potřeba pomocné energie $E_{pom,VYT} \text{ [kWh]}$	1.1	16.6	-

Sezónní topný faktor SPF

$$SPF = \frac{Q_{TC,dod} + Q_{ZZ}}{E_{TC} + E_{ZZ} + E_{pom}}$$

interval	-14 °C až -15 °C	2 °C až 3 °C	22 °C až 23 °C
energie dodaná tepelným čerpadlem $Q_{TC,dod}$ [kWh]	290	5231	128
energie dodaná záložním zdrojem Q_{ZZ} [kWh]	29	0	0
el. energie pro tepelné čerpadlo E_{TC} [kWh]	86	1140	39
el. energie pro záložní zdroj E_{ZZ} [kWh]	29	0	0
el. energie pomocná E_{pom} [kWh]	1.1	18.5	0.5
sezónní topný faktor <i>SPF</i>	2.8	4.5	3.2