

Ing. Radek ČERVÍN¹⁾
doc. Ing. Tomáš MATUŠKA, Ph.D.²⁾

¹⁾ ČVUT v Praze, Fakulta strojní
²⁾ ČVUT v Praze, Univerzitní
centrum energeticky efektivních
budov

Zpětné získávání tepla z odpadní vody tepelným čerpadlem Část 2: Matematický model

Heat Recovery from Wastewater by Heat Pump Part 2: Mathematical model

Recenzent
prof. Ing. Karel Kabele, CSc.

Na základě experimentálního testování tepelného čerpadla pro zpětné získávání tepla z odpadní vody byl vytvořen matematický model systému a byl simulován jeho denní provoz pro přípravu teplé vody při definovaných odběrových profilech v různých aplikacích. Pro použití v rodinném domě byl stanoven provozní topný faktor systému okolo hodnoty 2,7. Pro jiné zkoumané aplikace s většími odběry teplé vody nebo kontinuálním provozem se ukázala efektivita vyšší. Pro předehřev teplé vody bylo dosaženo topných faktorů systému přesahujících hodnotu 4,0.

Klíčová slova: tepelné čerpadlo, odpadní voda, zpětné získávání tepla

A mathematical model of the heat pump system for wastewater heat recovery was created on the basis of an experimental testing. Its daily operation for hot water preparation was simulated for defined tapping profiles in different applications. The operating coefficient of performance of the system for a use in a family house was assessed to the value of around 2.7. The efficiency has proven to be higher for other investigated applications with higher hot water consumption or with continuous operation. Coefficients of performance of the system exceeding the value of 4.0 were reached for domestic hot water preheating.

Keywords: heat pump, wastewater, heat recovery

ÚVOD

V předchozí části článku [1] byl popsán laboratorní systém zpětného získávání tepla (ZZT) z odpadní vody tepelným čerpadlem (TČ) pro současnou přípravu teplé vody, který byl navržen a postaven pro účely experimentálního měření. Systém, který sestával z tepelného čerpadla, jímky na odpadní vodu a zásobníku teplé vody, byl testován v cyklech vychlazení jímky na odpadní vodu při současném ohřevu vody v zásobníku teplé vody. Cílem bylo ukázat potenciální efektivitu takového systému využití odpadní vody pro energetické účely.

Výsledky experimentálního měření ukázaly relativně slibné hodnoty topného faktoru 4,0, nicméně cykly uvažovaly relativně příznivé teplotní podmínky: ochlazení odpadní vody z počáteční teploty 30 až 33 °C na teplotu 7 až 9 °C a ohřev studené vody z teploty 13 až 20 °C na teplotu cca 48 °C. V případě použití systému v reálných provozních podmínkách bude teplotní úroveň v zásobnících při provozu ovlivňována především průběhem odběru teplé vody.

Experimenty ani simulační analýza neuvažují problematiku zanášení výměníku, kterou by bylo nutné řešit při praktickém nasazení tepelného čerpadla pro zpětné získávání tepla z odpadní vody. Snížení přestupu tepla výměníku v jímce odpadní vody nebylo modelováno ani při experimentálním testování, a nebylo proto součástí modelu z něho vycházejícího. Cílem představené analýzy je především ukázat, pro jaké typy aplikací je systém přečerpávání tepla z odpadní vody pro účely současné přípravy teplé vody vhodný.

MATEMATICKÝ MODEL TEPELNÉHO ČERPADLA

Pro simulaci provozu systému tepelného čerpadla se zpětným získáváním tepla z odpadní vody bylo potřeba vytvořit matematický model samotného tepelného čerpadla a zároveň obou zásobníků (jímka odpadní

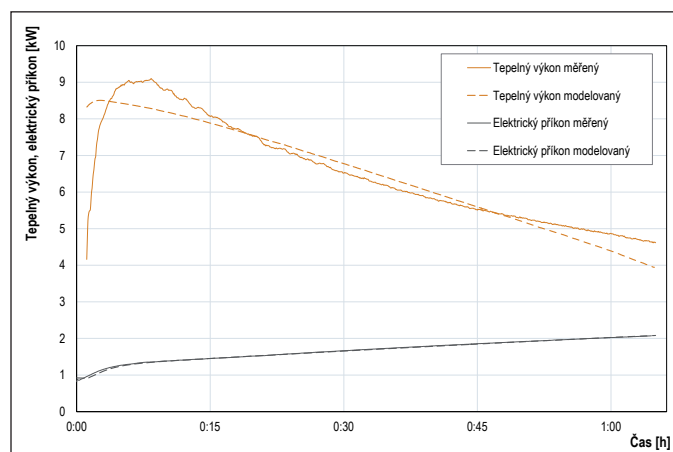
vody, zásobník teplé vody) včetně jejich tepelných výměníků. Pro modelování tepelného čerpadla byly použity polynomy vyhodnocující tepelný výkon tepelného čerpadla a jeho elektrický příkon na základě teploty na vstupu do výparníku t_{v1} a na vstupu do kondenzátoru t_{k1} :

$$P_{TC} = A + B \cdot t_{k1} + C \cdot t_{v1} + D \cdot t_{k1}^2 + E \cdot t_{k1} \cdot t_{v1} + F \cdot t_{v1}^2 \quad (1)$$

$$\Phi_{TC} = G + H \cdot t_{k1} + I \cdot t_{v1} + J \cdot t_{k1}^2 + K \cdot t_{k1} \cdot t_{v1} + L \cdot t_{v1}^2 \quad (2)$$

kde je:

- P_{TC} příkon kompresoru [W],
- Φ_{TC} tepelný výkon tepelného čerpadla [W],
- t_{k1} teplota na vstupu do kondenzátoru [°C],
- t_{v1} teplota na vstupu do výparníku [°C].



Obr. 1 Porovnání modelu tepelného čerpadla s měřenými hodnotami

Fig. 1 Comparison of the heat pump model with measured values

Konstanty polynomů A až L byly zjištěny vícenásobnou regresí ze všech hodnot dostupných z experimentů. Na obr. 1 je znázorněno porovnání průběhů topného výkonu a elektrického příkonu tepelného čerpadla z měření a průběhů stanovených modelem. Modelovaný tepelný výkon relativně dobře kopíruje křivku naměřeného topného výkonu. Na počátku, kdy je skutečný výkon limitován elektronickým expanzním ventilem, polynom nedokáže výkon správně určit. Na konci cyklu se modelovaný tepelný výkon s naměřeným také rozchází, nicméně rozdíl se během cyklu pohybuje nejvýše do 10 %. Na druhou stranu hodnoty modelovaného elektrického příkonu odpovídají naměřeným s vysokou jistotou. Model lze proto pro další analýzu považovat za dostatečně přesný a je možné ho využít pro simulaci provozu za typického dne.

Zásobníky vody (jímka odpadní vody, zásobník teplé vody) byly modelovány zjednodušeně třízlovým modelem (přitékající objem o teplotě přitékající vody, celkový objem o stávající teplotě vody, odtékající objem o stávající teplotě vody). Ani v zásobníku teplé vody, ani v jímce odpadní vody nebylo uvažováno teplotní vrstvení.

Na základě teploty v jímce odpadní vody byla v každém časovém kroku simulace iteračním výpočtem určena teplota na vstupu do výparníku t_{v1}

Tab. 1 Odběry teplé vody během dne v rodinném domě

Tab. 1 Hot water consumption during the day in a family house

Čas [min]	Podíl z celkové energie [%]	Spotřebovaná energie [Wh]	Typ odběru	Množství odebrané vody o teplotě 45 °C [l]
7:00	0,9	73,3	malý odběr	1,8
7:05	12,0	977,9	sprcha	24,0
7:30	0,9	73,3	malý odběr	1,8
7:45	0,9	73,3	malý odběr	1,8
8:05	30,9	2518,2	vana	61,9
8:25	0,9	73,3	malý odběr	1,8
8:30	0,9	73,3	malý odběr	1,8
8:45	0,9	73,3	malý odběr	1,8
9:00	0,9	73,3	malý odběr	1,8
9:30	0,9	73,3	malý odběr	1,8
10:30	0,9	73,3	mytí podlahy	1,8
11:30	0,9	73,3	malý odběr	1,8
11:45	0,9	73,3	malý odběr	1,8
12:45	2,7	220,0	krátké mytí nádobí	5,4
14:30	0,9	73,3	malý odběr	1,8
15:30	0,9	73,3	malý odběr	1,8
16:30	0,9	73,3	malý odběr	1,8
18:00	0,9	73,3	malý odběr	1,8
18:15	0,9	73,3	úklid	1,8
18:30	0,9	73,3	úklid	1,8
19:00	0,9	73,3	malý odběr	1,8
20:30	6,3	513,4	dlouhé mytí nádobí	12,6
21:00	30,9	2518,2	vana	61,9
21:30	0,9	73,3	malý odběr	1,8

na základě znalosti hodnoty měrného výkonu UA [W/K] výměníku primárního okruhu z měření [1]. Podobně byla iterací stanovena teplota na vstupu do kondenzátoru t_{k1} tepelného čerpadla na základě měrného výkonu trubkového výměníku tepla v zásobníku teplé vody uvedeného v technickém listu výrobce. Následně byl určen z polynomů tepelný výkon, elektrický příkon a dopočítán chladicí výkon výparníku tepelného čerpadla. Časový krok simulace byl 1 minuta.

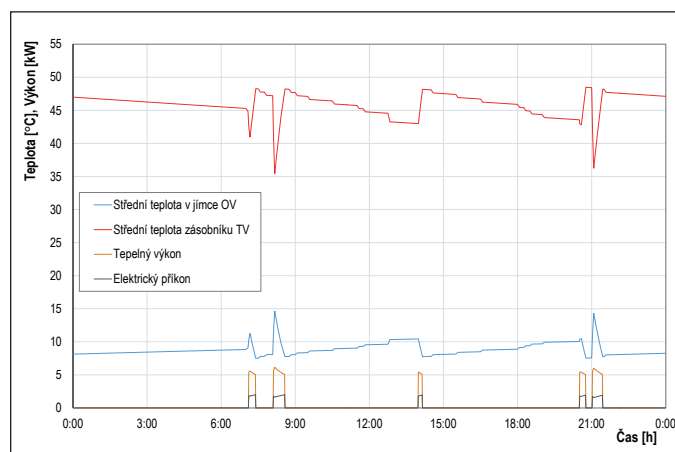
SIMULACE TYPICKÉHO DNE V RODINNÉM DOMĚ

Jednou z možných aplikací systému zpětného získávání tepla tepelným čerpadlem pro přípravu teplé vody je instalace v rodinném domě. Pro simulaci provozu byla uvažována stejná jímka na odpadní vodu o objemu 180 l jako při experimentálním měření v laboratoři. Zásobník teplé vody byl uvažován rovněž stejný jako při experimentálním měření a jeho užitný objem byl 144 l. Byly uvažovány tepelné ztráty zásobníku teplé vody 42 W při teplotě okolí 21 °C a střední teplotě v zásobníku 47 °C. Jímka odpadní vody měla naopak uvažované tepelné zisky 24 W při stejné teplotě okolí a střední teplotě vody v jímce 8 °C.

Pro simulaci a vyhodnocení provozu systému byl uvažován typický den s ustáleným provozem s upraveným odběrovým profilem v souladu s normou pro testování ohřivačů vody (profil M) [2]. V tab. 1 jsou uvedeny odběry v průběhu typického dne. Pro dané časy je v pětiminutovém kroku definováno, jaké množství energie je odebráno, resp. množství odebrané teplé vody o teplotě 45 °C (změna oproti zkušebnímu profilu). Celkové množství odebrané vody je 200 litrů za den, což při požadované teplotě 45 °C odpovídá 8,14 kWh.

Pro odběr byl uvažován vždy požadavek na teplotu 45 °C. Pokud nebyla dodržena teplota z důvodu nízkého výkonu, byla chybějící energie v časovém kroku uvažována jako dohřev záložním zdrojem – elektrickou energií ($COP = 1$). Současně v době odběru teplé vody přitéká do jímky odpadní voda (zjednodušeně bez dopravního zdržení). Teplota odpadní vody, která přitékla do jímky odpadní vody, byla vždy uvažována 33 °C. Tepelné čerpadlo bylo řízeno dvoupolohově dle spínacích teplot v zásobníku. Pokud klesla teplota pod 43 °C, tepelné čerpadlo bylo zapnuto. Při překročení teploty 47 °C bylo vypnuto.

Graf na obr. 2 ukazuje výsledky simulace provozu systému během dne. Znázorněny jsou průběhy teplot a tepelný výkon společně s elektrickým příkonem tepelného čerpadla. Při odběru teplé vody klesne teplota v zásobníku teplé vody a současně vzroste teplota v jímce odpadní vody (přítokem odpadní vody). Do zásobníku teplé vody je přiváděna studená voda z vodovodního řádu o teplotě 10 °C. V jímce odpadní vody je vždy



Obr. 2 Simulace provozu systému v rodinném domě

Fig. 2 Simulation of operation of the system in a family house

zachováno 180 l odpadní vody; do odpadu odtéká stejné množství odpadní vody jako vody přitékající.

V tab. 2 je uvedena celková energetická bilance systému. Hodnota topného faktoru samotného tepelného čerpadla 3,02 je téměř o třetinu nižší než COP dosažený během experimentů, který se blíží hodnotě 4,0. Důvodem je, že nabíjení zásobníku teplé vody ze studeného stavu je mnohem efektivnější, než jeho udržování na konstantní teplotě 45 °C. Teplota v zásobníku teplé vody v průběhu dne nikdy neklesla pod 36 °C. Teplota v jínce je rovněž nižší než při experimentu a ani jednou během dne nepřesáhla teplotu 15 °C. Obě tyto skutečnosti zhoršují celkový topný faktor systému oproti kontinuálnímu provozu při experimentu. Pro větší účinnost systému zpětného získávání tepla tepelným čerpadlem by bylo potřeba dosáhnout vyšších teplot v jínce odpadní vody. Součástí bilance systému jsou i tepelné ztráty zásobníku teplé vody a tepelné zisky jímkou odpadní vody během dne.

Dále nebyla vždy splněna podmínka dodávky teplé vody o teplotě 45 °C. Celková nedodaná energie za celý den, která musí být doplněna záložním zdrojem tepla (uvažován elektrický odporový ohřev), činí 0,57 kWh. Nutnost použití náhradního zdroje tedy navíc snižuje hodnotu COP_{sys} celého systému pro zpětné získávání tepla (tepelné čerpadlo + záložní zdroj) na úroveň 2,68. Tím se systém efektivitou přibližuje průměrné roční hodnotě COP_{sys} systému přípravy teplé vody s tepelným čerpadlem vzduch-voda nebo země-voda.

Tab. 2 Energetická bilance typického dne

Tab. 2 Energy balance of a typical day

Celková energie spotřebovaná tepelným čerpadlem	2,84 kWh
Celková energie dodaná tepelným čerpadlem	8,57 kWh
Topný faktor tepelného čerpadla COP_{TC}	3,02
Chybějící energie (pro odběr 45 °C)	0,57 kWh
Zisky jímkou odpadní vody	0,49 kWh
Ztráty zásobníku teplé vody	0,98 kWh
Celkový COP_{sys} systému přípravy teplé vody	2,68

SIMULACE PRO MALÉ SPORTOVNÍ ZAŘÍZENÍ

Aplikace zpětného získávání tepla z odpadní vody s několika odběry teplé vody během dne ukazuje jednak na nízkou efektivitu vlivem vysokého

rozdílu teplot (nízká teplota v odpadní jínce, vysoká teplota v zásobníku teplé vody) a jednak na nízký potenciál úspory (nízká potřeba tepla). Jako další případ v rámci simulační analýzy bylo proto prověřeno nasazení uvažovaného systému do malého sportovního zařízení s výrazně vyšším odběrem teplé vody než v běžném rodinném domě.

Pro malé sportovní zařízení byl uvažován celkový denní počet tréninků 8, z toho 3 byly dopoledne a 5 odpoledne. Tréninků se zúčastnilo v průměru 20 lidí, kteří se vždy po skončení postupně sprchovali ve 4 sprchách po dobu 15 minut. Celkem by tak po každém tréninku bylo spotřebováno 360 l. Systém pro zpětné získávání tepla slouží pouze pro předehřev vody z důvodu nízkého výkonu tepelného čerpadla. Objem zásobníku byl uvažován 200 l a objem jímkou 500 l. Z obr. 3 je patrné, že před bezprostředně následujícími sprchovacími cykly není v zásobníku teplé vody dosažena požadovaná teplota 45 °C. Z celkové denní potřeby 125 kWh je tepelným čerpadlem dodáno 59,5 kWh. Při tomto provozu bylo možné dosáhnout topného faktoru tepelného čerpadla na úrovni 4,83.

Tepelné čerpadlo pracuje v ustáleném provozu (úseky dopoledne, odpoledne). Ustálená teplota v zásobníku odpadní vody po skončení cyklu je na úrovni 14 °C a v době odběru se zvýší až na 23 °C, což příznivě ovlivňuje efektivitu provozu systému. Je to dáno mimo jiné výkonem systému vzhledem k objemu přitékající vody. Podobně vysoké odběry ze zásobníku teplé vody jsou příčinou poklesu teploty v zásobníku až pod 20 °C, což příznivě ovlivňuje efektivitu provozu tepelného čerpadla. Na druhou stranu, nízký výkon tepelného čerpadla neumožňuje mezi cykly sprchování dosáhnout požadovanou teplotu 45 °C, ale pouze 40 °C. Pokud by byl záložním zdrojem elektrický dohřev, potom by celkový COP_{sys} systému klesl až na hodnotu 1,6.

V tab. 3 je uvedena celková bilance provozu. V aplikaci předehřevu teplé vody by tepelné čerpadlo dodalo 47 % energie s vysokým topným faktorem a při celoročním provozování by tak mohlo být dosaženo zajímavých úspor.

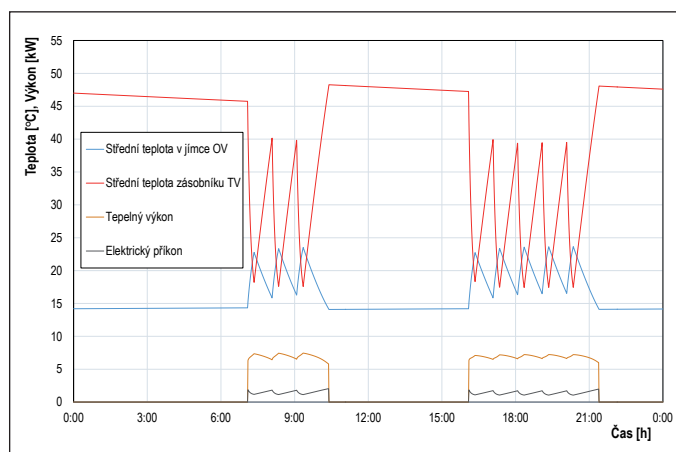
Tab. 3 Energetická bilance provozu TČ se ZT v malém sportovním zařízení

Tab. 3 Energy balance of HP operation with HR in a small sports facility

Celková energie spotřebovaná tepelným čerpadlem	12,33 kWh
Celková energie dodaná tepelným čerpadlem	59,53 kWh
Topný faktor tepelného čerpadla COP_{TC}	4,83
Chybějící energie (pro odběr 45 °C)	65,54 kWh
Zisky jímkou odpadní vody	0,20 kWh
Ztráty zásobníku teplé vody	0,79 kWh

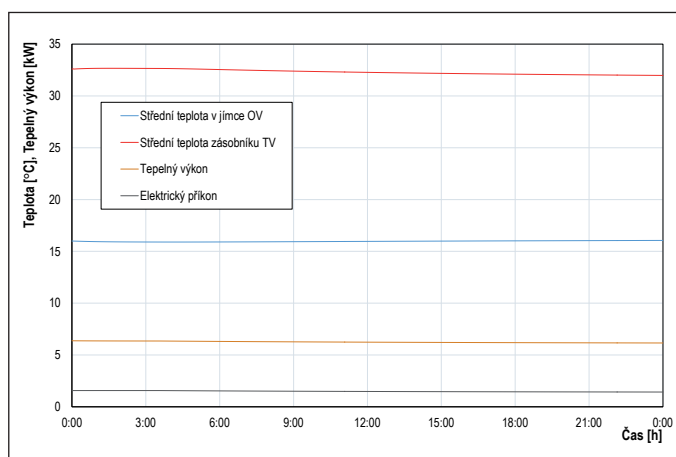
SIMULACE OBJEKTU S NEPŘETRŽITÝM PROVOZEM

Další možnou aplikací, kde lze systém pro získávání tepla z odpadní vody použít pro předehřev teplé vody, jsou lázeňská centra, velká hotelová wellness centra nebo aquaparky s nepřetržitým provozem. Objem zásobníku teplé vody byl uvažován 200 l a objem v jínce odpadní vody 500 l, stejně jako v případě malého sportovního centra. Při kontinuálním provozu se teploty v zásobníku teplé vody i jínce odpadní vody, tepelný výkon a příkon tepelného čerpadla ustálí na určité hodnotě. Na obr. 4 je zobrazen graf průběhu těchto veličin během dne. Kontinuální odběrový průtok teplé vody (a tedy i přitékající odpadní vody) byl uvažován 4 l/min. Teplota teplé vody a přitékající odpadní vody byly uvažovány stejné jako v předchozích aplikacích. Je zřejmé, že pro nepřetržitý provoz s kontinuálním průtokem je pro zabezpečení teplé vody nutný větší výkon tepelného čerpadla, než má uvažovaný



Obr. 3 Simulace provozu TČ se ZT pro malé sportovní zařízení

Fig. 3 Simulation of HP operation with HR for small sports facility



Obr. 4 Simulace provozu TČ se ZT pro objekt s kontinuálním provozem

Fig. 4 Simulation of HP operation with HR for a building with continuous operation

Tab. 4 Energetická bilance provozu TČ se ZT pro objekt s kontinuálním provozem

Tab. 4 Energy balance of HP operation with HR for a building with continuous operation

Celková energie spotřebovaná tepelným čerpadlem	35,75 kWh
Celková energie dodaná tepelným čerpadlem	150,09 kWh
Topný faktor tepelného čerpadla COP_{TC}	4,20
Chybějící energie (pro odběr 45 °C)	85,04 kWh
Zisky jímky odpadní vody	0,20 kWh
Ztráty zásobníku teplé vody	0,63 kWh

systém. Při použití zkoumaného systému se teplota v zásobníku teplé vody ustálí na hodnotě kolem 33 °C a teplota v jímce kolem hodnoty 16 °C. Ustálený tepelný výkon tepelného čerpadla je 6,5 kW a příkon kompresoru 1,6 kW, z čehož vyplývá topný faktor samotného tepelného čerpadla 4,2. Celková energetická bilance objektu s nepřetržitým provozem využívajícím TČ se ZT je uvedena v tab. 4. Ačkoli je topný faktor tepelného čerpadla nižší než v předchozím příkladu, tepelné čerpadlo dodá více než 64 % z požadované energie na teplou vodu, a bylo by tak možné dosáhnout ještě zajímavějších úspor. V případě dohřevu vody záložním elektrickým ohřevem by celkový systémový topný faktor COP_{sys} byl 1,95.

ZÁVĚR

Z hodnot získaných experimentálním testováním popsaným v předchozí části článku byl sestaven matematický model tepelného čerpadla pro zpětné získávání tepla z odpadní vody. Tento model byl následně použit pro simulace v aplikacích s různými odběrovými charakteristikami (odběr teplé vody, přítok odpadní vody). Výsledky simulací ukázaly, že tento systém v rodinných domech nepřináší výraznou změnu efektiv-

ty oproti konvenčnímu řešení přípravy teplé vody tepelným čerpadlem vzduch-voda nebo země-voda. V případě aplikací s trvalejším provozem, jako jsou sportovní zařízení nebo lázeňská centra, může systém o dané velikosti (výkonu, objemu zásobníků) sloužit pro předehřev vody a tak dosáhnout výrazné úspory (hodnota topného faktoru tepelného čerpadla je nad hodnotou 4,0).

S ohledem na možné problémy reálného provozu je třeba upozornit, že ochlazení odpadních vod může mít vliv na chod biologických čistíren a současně může způsobovat vyšší zanášení potrubí (tuhnutí tuků obsažených v odpadních vodách).

Kontakt na autora: radek.cervin@fs.cvut.cz

Tato práce vznikla za finanční podpory MŠMT v rámci programu NPU I č. L01605 a SGS16/212/OHK2/3T/12 – Modelování, řízení a navrhování zařízení techniky prostředí.

Použité zdroje:

- ČERVÍN, R., MATUŠKA, T. Zpětné získávání tepla z odpadní vody tepelným čerpadlem – 1. část: Experimentální měření. *Vytápění, větrání, instalace*. 2018, roč. 27, č. 5, s. 284 – 289. ISSN 1210-1389.
- ČSN EN 16147. Tepelná čerpadla s elektricky poháněnými kompresory – Zkoušení a požadavky na značení jednotek pro teplou užitkovou vodu. ÚNMZ 2011.

Klimatické změny jsou problémem i pro energetiku

Globální oteplování, které se mimo jiné projevuje také dlouhými obdobími bez deště, začíná působit problémy i světové energetice. Nejzranitelnější jsou podle očekávání vodní elektrárny, které pokrývají asi 17 % celosvětové výroby elektřiny a přes nárůst solárních a větrných zdrojů jsou stále nejvýznamnějším obnovitelným zdrojem energie (zcela rozhodující jsou pro čtrnáct ze sedmácti nejchudších zemí světa). Zkušenosti z posledních několika let ukazují, že klimatické změny mohou ovlivnit výrobu elektřiny i v uhelných, jaderných i ve větrných elektrárnách. Potvrzuje se tak důležitost energetického mixu.

Loňský suchý rok ukázal v některých evropských zemích, jaké to je spoléhat se na jeden dominantní zdroj energie. V Rakousku, které i v létě obvykle získá 60 % elektrické energie z vodních elektráren, vyráběly malé zdroje sotva 30 % své kapacity, produkci omezila i velká díla na Dunaji. Plně využitě byly v té době jen přečerpávací vodní elektrárny v Alpách, které měly nadbytek vody z rychle tajících ledovců. Hladiny vody v nádržích Norska a Švédska, jejichž energetiky jsou z 99 %, resp. 47 % založeny na vodních elektrárnách, byly na začátku loňského léta jen na 62 % obvyklého stavu a dále klesaly i v době, kdy se obvykle zvyšují díky vodě z tajícího sněhu. Norská energetická společnost Statskraft vyrobila v důsledku sucha ve 2. čtvrtletí loňského roku o 22 % méně elektrické energie, což se projevilo na její ceně na trhu. Paradoxně se problémy týkají i uhelných elektráren. Rekordně nízké hladiny řek způsobily problémy německým uhelným elektrárnám, jejichž podstatná část je zásobována uhlím dováženým z celého světa do severoněmeckých přístavů, odkud putuje po Rýnu do místa určení. V srpnu se obvyklá přepravní kapacita rýnské lodní přepravy snížila na méně než jednu třetinu. V důsledku změny počasí zaznamenaly omezení i některé francouzské a německé jaderné elektrárny, zejména ty, které leží v blízkosti velkých vodních toků. Problém tentokrát nezpůsobila nízká hladina řek, ale poměrně vysoká teplota vody, která dosáhla až 25 °C, což je horní mez pro možnost využití vody pro chlazení.

Zdroj: Technický týdeník 5/2019

(VZ)

Nejlepší portály
o stavebnictví



 **tzbinfo**
www.tzb-info.cz

Největší stavební portál
pro odborníky v ČR

ESTAV.cz
Portál pro širokou
stavební veřejnost