

Ing. Miroslav PETRÁK, Ph.D.
Güntner Tschechien

Energetické a hlukové aspekty provozu vzduchem chlazených výměníků při částečném zatížení

Energy Consumption and Noise Level of Air Cooled Heat Exchangers at Part Load

Recenzent
Ing. Marcel Kadlec

Článek pojednává o provozu vzduchem chlazených kondenzátorů a suchých chladičů při regulaci. Jsou porovnány různé typy regulace podle spotřeby energie a dosažitelného útlumu hlučnosti výměníku.

Klíčová slova: kondenzátor, suchý chladič, spotřeba energie, hlučnost

The part load operation of air cooled condensers and dry coolers is discussed. Different methods of control are compared according to the energy consumption and noise reduction of the heat exchanger.

Keyword: condenser, dry cooler, energy consumption, noise

1. ÚVOD

Vzduchem chlazené kondenzátory a suché chladiče slouží k odvodu tepla do okolí. U tohoto typu aparátů se využívá pouze citelného tepla vzduchu, který se sdílením tepla ohřívá. Výměníky se skládají z rozšířené teplosměnné plochy, tvořené zpravidla trubkami s navlékanými lamelami, umístěné v opláštění. Nucený průtok vzduchu zajišťují ventilátory. U chladičů a kondenzátorů určených pro venkovní instalaci se používají převážně axiální ventilátory sající vzduch přes výměník. Ventilátory spotřebovávají elektrickou energii a jejich provozem vzniká hluk. Vlastní spotřeba energie a hlučnost jsou tedy vedle výkonu, rozměrů a hmotnosti dalšími důležitými parametry výměníku.

2. CHARAKTERISTIKA VÝMĚNÍKU

Z teorie sdílení tepla vyplývá jak pro kondenzátor, tak i suchý chladič

$$\dot{Q}_v = A \cdot \Delta t \quad (1)$$

kde pro kondenzátor

$$A = \dot{V}_{vzd} \cdot \rho_{vzd} \cdot c_{vzd} \cdot \left(1 - e^{-\frac{k \cdot S}{\dot{V}_{vzd} \cdot \rho_{vzd} \cdot c_{vzd}}} \right) \quad (1a)$$

resp. pro suchý chladič

$$A = \frac{1 - e^{-\psi \cdot k \cdot S \cdot \left(\frac{1}{\dot{V}_{vzd} \cdot \rho_{vzd} \cdot c_{vzd}} - \frac{1}{\dot{V}_1 \cdot \rho_1 \cdot c_1} \right)}}{1 - \frac{1}{\dot{V}_{vzd} \cdot \rho_{vzd} \cdot c_{vzd}} - \frac{1}{\dot{V}_1 \cdot \rho_1 \cdot c_1}} \quad (1b)$$

a Δt je rozdíl mezi vstupními teplotami chlazené látky a vzduchu (obr. 1)

$$\text{pro kondenzátor } \Delta t = t_k - t_{vzd} \quad (1c)$$

$$\text{resp. suchý chladič } \Delta t = t_1 - t_{vzd} \quad (1d)$$

Ve vztazích (1a) a (1b) znamená:

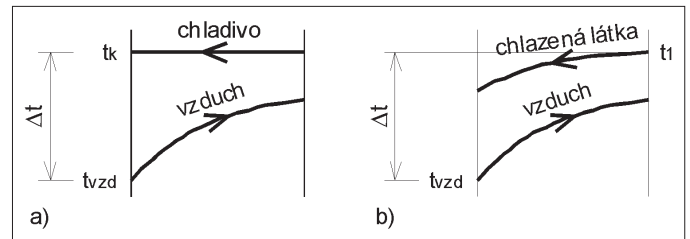
\dot{V}_{vzd} , ρ_{vzd} , c_{vzd} průtok vzduchu výměníkem, jeho hustotu a měrnou tepelnou kapacitu;

\dot{V}_1 , ρ_1 , c_1 průtok chlazené látky, její hustotu a měrnou tepelnou kapacitu;

k součinitel prostupu tepla;

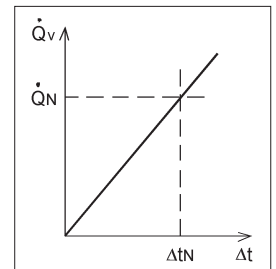
S teplosměnnou plochu;

ψ korekční součinitel na křížový proud.



Obr. 1 Teplotní průběhy na výměníku: a) kondenzátor; b) suchý chladič

Pokud výkon výměníků není regulován ($\dot{V}_{vzd} = \text{konst.}$), lze hodnotu A považovat pro technickou praxi za konstantní (u suchého chladiče se rovněž předpokládá konstantní průtok ochlazované látky $\dot{V}_1 = \text{konst.}$). Jak kondenzátor, tak i suchý chladič mají lineární charakteristiku (obr. 2), kdy výkon je úměrný rozdílu vstupních teplot obou médií. Směrnicí charakteristiky určuje návrhový teplotní rozdíl.

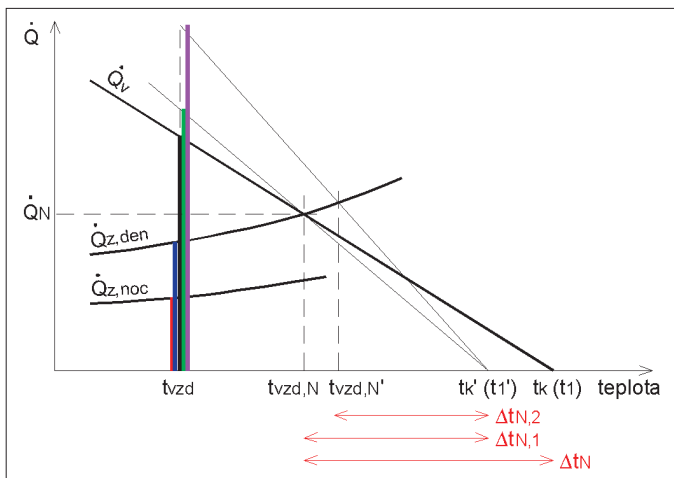


Obr. 2 Charakteristika vzduchem chlazeného výměníku

3. MÍRA REGULACE

Odvod tepla do okolí vzduchem chlazeným výměníkem je znázorněn na obr. 3. Základem jsou charakteristiky zátěže (křivky $\dot{Q}_{z,den}$, $\dot{Q}_{z,noc}$), které popisují produkci tepla během dne a v noci. Nejedná se o chladicí výkon \dot{Q}_0 chladicího zařízení, ale přímo o kondenzační výkon jím produkovaný. Produkce tepla je zpravidla teplotně závislá – minimálně proto, že spotřeba energie chladicího zařízení vzrůstá s kondenzační teplotou. V noci bývá menší požadavek na chladicí výkon, tím je také noční produkce tepla nižší.

Do charakteristiky zátěže je zakreslena charakteristika výměníku (\dot{Q}_v). Ta je podle předchozí kapitoly lineární a její směrnicí určuje návrhový teplotní rozdíl. Při návrhové teplotě vzduchu $t_{vzd,N}$ výměník přenáší požadovaný návrhový výkon \dot{Q}_N , neboť pracuje s návrhovým teplotním rozdílem Δt_N (např. kondenzátor navržený na kondenzační teplotu $t_k = 50$ °C při teplotě vzduchu $t_{vzd,N} = 32$ °C pracuje s návrhovým teplotním rozdílem $\Delta t_N = 50 - 32 = 18$ K). Při poklesu okolní teploty se zvětšuje teplotní rozdíl mezi chlazenou látkou a teplotou vzduchu a úměrně tomu narůstá potenciální výkon výměníku. To je výkon, který by měl aparát při provozu všech instalovaných ventilátorů na plné otáčky (tj. bez regulace). Např. při teplotě vzduchu t_{vzd} odpovídá tento výkon černé úsečce. Při nižší teplotě vzduchu



Obr. 3 Stanovení míry regulace vzduchem chlazeného výměníku

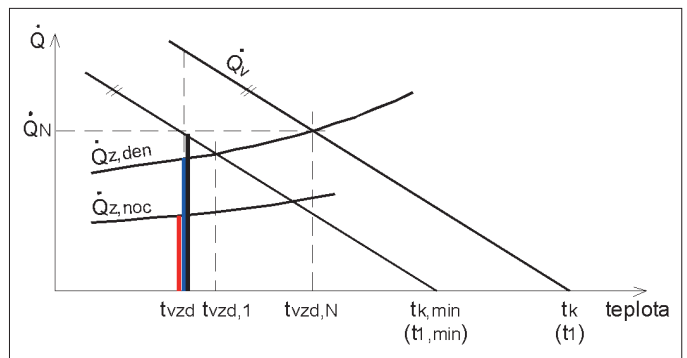
ale klesá produkce tepla, při sledované teplotě vzduchu t_{vzd} na hodnotu reprezentovanou modrou úsečkou ve dne, resp. na hodnotu odpovídající úsečce červené v noci. Tuto disproporci řeší regulace a právě podíl produkce a možnosti výměníku $\dot{Q}_{z,den}/\dot{Q}_v$ (modrá/černá úsečka) pro den, resp. $\dot{Q}_{z,noc}/\dot{Q}_z$ (červená/černá úsečka) pro noc udává její míru.

V obrázku jsou dále slabou čarou zakresleny charakteristiky výměníků navržených na menší teplotní rozdíly. Při snížení návrhové kondenzační teploty, resp. teploty glykolu (např. z $t_k = 50\text{ °C}$ na $t'_k = 47\text{ °C}$) při stejné návrhové teplotě vzduchu, se sníží návrhový teplotní rozdíl (při zvolených číselných hodnotách činí nově $\Delta t_{N,1} = 47 - 32 = 15\text{ K} < \Delta t_N$), čímž se zvětší směrnice charakteristiky výměníku. Potenciální výkon takového aparátu tak bude při sledované teplotě vzduchu t_{vzd} vyšší (zelená úsečka). A v případě, že výměníky budou navrženy na vyšší návrhovou teplotu vzduchu (např. $t'_{vzd,N} = 35\text{ °C}$ místo $t_{vzd,N} = 32\text{ °C}$, potom je $\Delta t_{N,2} = 47 - 35 = 12\text{ K} < \Delta t_{N,1} < \Delta t_N$), bude potenciální výkon ještě vyšší (fialová úsečka).

Je zřejmé, že čím větší je potenciální výkon aparátu oproti produkci tepla, tím více lze aparát zregulovat. Z toho plyne první závěr, že velkoryseji navržené aparáty (na vyšší teplotu vzduchu, na menší teplotní rozdíl) dosahují také větší míry regulace.

Poklesu teploty vzduchu během dne se ale zpravidla nevyužívá ihned k regulaci aparátu, ale nejprve k poklesu teploty ochlazené látky (kondenzační teploty nebo teploty chlazeného glykolu). Tím se např. u chladicího zařízení zvyšuje chladicí faktor a hospodárnost jeho provozu. Výměník je v této fázi provozován na plný výkon bez regulace. Teprve po dosažení určité minimální teploty látky dané konstrukčními požadavky chladicího zařízení se jeho teplota dále nesnižuje a výkon výměníku je regulován. Tato situace je znázorněna na obr. 4. Charakteristika výměníku v nových podmínkách je rovnoběžka s původní charakteristikou (nemění se její sklon) posunutá tak, že vychází z minimální teploty chlazené látky. Té je podle obrázku dosaženo při teplotě vzduchu $t_{vzd,1}$. S dalším poklesem okolní teploty je již aparát regulován, přičemž o její míře opět rozhoduje poměr mezi produkcí tepla (barevné úsečky) a potenciálním výkonem výměníku (černá úsečka) při sledované teplotě vzduchu. I v tomto případě platí, že velkoryseji navrhované aparáty (na vyšší teplotu vzduchu, na menší teplotní rozdíl) dosáhnou vyšší hraniční teploty vzduchu $t_{vzd,1}$, od níž je aparát regulován, a tudíž i většího stupně regulace při sledované teplotě vzduchu.

Z obr. 4 je patrné, že nižší teploty chlazené látky omezují míru regulace výměníku, čímž limitují dosažitelný hlukový útlum. V noci je ale prvořadým úkolem splnění zákonných limitů hlukovosti. Aby se dosáhlo potřebného útlumu, bývají špatně navržené systémy provozovány v noci se zvýšenými teplotami chlazené látky na úkor hospodárnosti provozu chladicího zařízení.



Obr. 4 Provoz soustavy při nižší teplotě chlazené látky

4. ZPŮSOBY REGULACE

Disproporci mezi produkcí tepla a možnostmi výměníku řeší regulace jeho výkonu. Přehled různých způsobů je uveden na obr. 5.

4.1. Skoková regulace odpínáním ventilátorů

Odpínání ventilátorů je nejjednodušší a nejlevnější způsob regulace výkonu výměníku. Ventilátory mohou být odpínány jednotlivě, po dvojicích nebo i větších skupinách. Jednotlivé ventilátorové komory bývají odděleny dělicími stěnami, takže vypnutím ventilátoru přestane příslušnou sekci nuceně proudit vzduch. Malá rozteč lamel klade odpor samovolnému proudění vzduchu a i při velkém teplotním rozdílu mezi chlazenou látkou a vzduchem je volná konvekce pro technickou praxi zanedbatelná. Výkon výměníku je tak úměrný počtu ventilátorů, které jsou v provozu. Pokud by výměník měl při obecném teplotním rozdílu Δt potenciální výkon \dot{Q}_v (tj. při provozu všech ventilátorů N_N), bude mít při tomto teplotním rozdílu a provozu pouze N ventilátorů výkon

$$\dot{Q}'_v = \frac{N}{N_N} \cdot \dot{Q}_v = \frac{N_N - \Delta N}{N_N} \cdot \dot{Q}_v \quad (2)$$

kde

$\Delta N = N_N - N$ je počet odepnutých ventilátorů.

Příklad, a to jak mechanický ventilátorů (na hřídeli), tak i elektrický elektromotorů je samozřejmě úměrný počtu ventilátorů v provozu

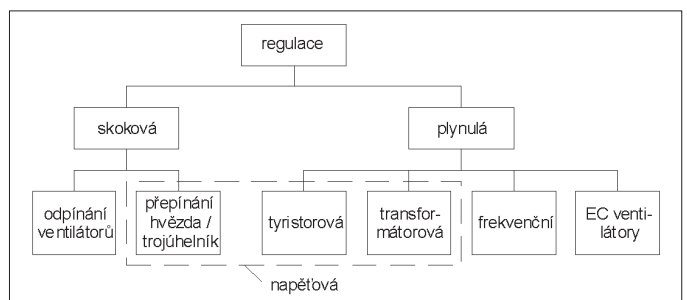
$$P = \frac{N}{N_N} \cdot P_N = \frac{N_N - \Delta N}{N_N} \cdot P_N \quad (3)$$

kde

P_N je celkový příkon všech ventilátorů.

Pro pokles hlukovosti při odpínání ventilátorů platí principiálně stejný vztah jako pro sčítání několika stejných zdrojů hluku, pouze logaritmovaná hodnota je v tomto případě menší než 1

$$\Delta L = 10 \cdot \log \frac{N}{N_N} = 10 \cdot \log \frac{N_N - \Delta N}{N_N} \quad (4)$$



Obr. 5 Způsoby regulace vzduchem chlazených výměníků

a pro různé případy je vyčíslen v tab. 1. Např. při odepnutí poloviny ventilátorů poklesne hlučnost o -3 dB (zcela obráceně při jejich připínání, kdy dva stejné zdroje hluku mají celkovou hlučnost o +3 dB vyšší).

4.2. Přepínání hvězda/trojúhelník

Jsou-li motory ventilátorů v trojúhelníku a umožňuje-li jejich konstrukce i trvalý provoz ve hvězdě, lze pro regulaci výkonu výměníku využít přepínání hvězda/trojúhelník. Tuto vlastnost nemají všechny elektromotory, ale pouze napěťově regulovatelné. Příkladem jsou motory axiálních ventilátorů německé firmy Ziehl-Abegg, velmi často používané u kondenzátorů a suchých chladičů různých výrobců. Běžné elektromotory povolují přepínání hvězda/trojúhelník pouze při rozběhu, nikoliv však pro dlouhodobý provoz.

Pro přepnutí hvězda/trojúhelník je zapotřebí většího počtu stykačů než při pouhém odepnutí ventilátoru, proto je tato regulace dražší. Sama o sobě je hrubá (pouze jeden regulační stupeň), a proto se kombinuje s odpínáním ventilátorů. Zpravidla se nejprve všechny ventilátory přepnou do hvězdy a teprve poté se postupně odpínají. Oproti samotnému odpínání je tak k dispozici o jeden regulační stupeň více.

Protože se jedná o regulaci prostřednictvím změny otáček, sice skokové, platí i pro tento způsob všechny vztahy uvedené v následující části o plynulé regulaci otáček. V závislosti na konstrukci motoru dochází k poklesu otáček na 60 až 80 %, nejčastěji však v rozsahu 71 až 77 %. Pro přibližný pokles otáček na 75 % vychází pokles výkonu chladiče podle vztahu (5) na cca. 79 %, elektrického příkonu na cca. 61 % (vztah (6)) a hlučnosti o cca. -6 dB (vztah (7)). Ve srovnání se samotným odpínáním ventilátorů se tak dosáhne výraznějšího poklesu hlučnosti a při daleko vyšším výkonu výměníku. To je mj. dáno i tím, že se ke sdílení tepla využívá celá teplosměnná plocha. Pro fázi následného odpínání platí vztahy uváděné v části o skokové regulaci.

4.3. Plynulá regulace otáček ventilátorů

K plynulé regulaci otáček ventilátorů jsou v zásadě dva přístupy:

- většina ventilátorů výměníku je regulována odpínáním a plynulá regulace je instalována pouze u 1 až 2 ventilátorů;
- všechny ventilátory výměníku jsou plynule regulovány.

První varianta se vlastně stále chová jako skoková regulace, pouze s jemnějším udržováním regulované veličiny (kondenzačního tlaku nebo teploty chlazeného média). Oproti skokové regulaci je výhodná snad jen v zimních měsících, kdy výměník by i při provozu jednoho ventilátoru mohl mít nepotřebně velký výkon. Z hlediska hlučnosti odpovídá ale zcela skokové regulaci (kromě spodní části regulačního rozsahu) a rovněž se nedosáhne příliš velkých úspor pohonné energie ventilátorů.

Daleko zajímavější je druhá varianta, kdy všechny ventilátory výměníku jsou současně plynule regulovány (točí se současně stejnými otáčkami). Cenový rozdíl mezi regulátorem pro jeden nebo všechny ventilátory již není zpravidla příliš výrazný. Protože se přenosu tepla účastní celá teplosměnná plocha a nikoliv pouze část jako při skokové regulaci, není výkon výměníku lineárně úměrný otáčkám, ale přibližně podle vztahu

$$\dot{Q}'_v \approx \left(\frac{n}{n_N}\right)^{0,8} \cdot \dot{Q}_v \quad (5)$$

Pro příkon se při plynulé regulaci otáček všeobecně používá mocninová závislost

$$P = \left(\frac{n}{n_N}\right)^x \cdot P_N \quad (6)$$

s exponentem $x = 3$. Ten však přesně platí pouze pro mechanický příkon na hřídeli ventilátorů, pro elektrický

Tab. 1 Pokles hlučnosti (dB) výměníku při odpínání ventilátorů

N_N	Počet odepnutých ventilátorů ΔN										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
2	-3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
3	-2	-5	-	-	-	-	-	-	-	-	-
4	-1	-3	-6	-	-	-	-	-	-	-	-
5	-1	-2	-4	-7	-	-	-	-	-	-	-
6	-1	-2	-3	-5	-8	-	-	-	-	-	-
8	-1	-1	-2	-3	-4	-6	-9	-	-	-	-
10	0	-1	-2	-2	-3	-4	-5	-7	-10	-	-
12	0	-1	-1	-2	-2	-3	-4	-5	-6	-8	-11

příkon elektromotoru odpovídá vlivem měnící se účinnosti spíše $x = 1,7$ u napěťové regulace, resp. $x = 2,2$ až $2,4$ u ostatních typů.

Pro pokles hlučnosti se podle [2] používá vztah

$$\Delta L \approx 50 \cdot \log \frac{n}{n_N} \quad (7)$$

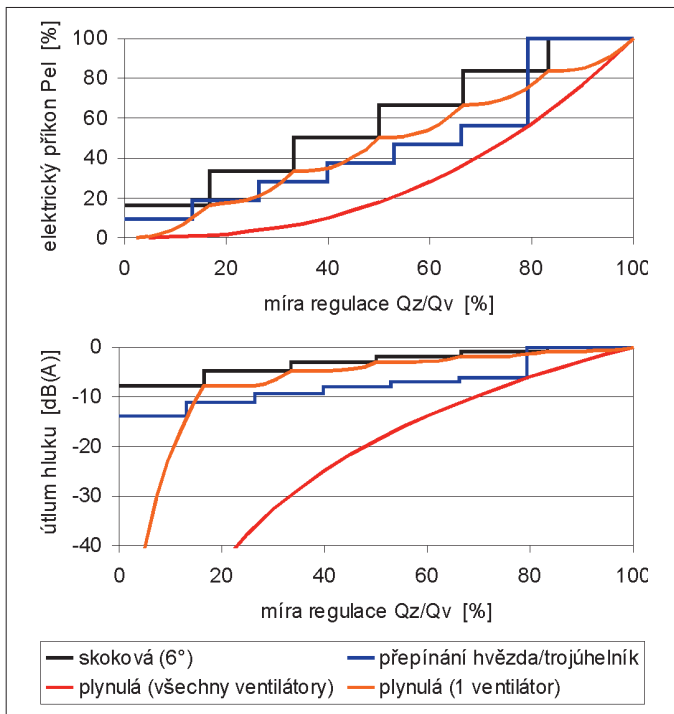
5. PROVOZ VÝMĚNÍKU PŘI ČÁSTEČNÉM ZATÍŽENÍ

Použitím uvedených vztahů je sestavena tab. 2 popisující energetické a hlukové parametry vzduchem chlazených výměníků při jednotlivých způsobech regulace. Určujícím parametrem je poměr \dot{Q}_z / \dot{Q}_v udávající disproporci mezi produkovaným teplem a potenciálním (maximálním) výkonem výměníku při sledované teplotě, a tedy míru jeho regulace. Tab. je u skokové regulace sestavena za předpokladu, že je k dispozici dostatečný počet regulačních stupňů. V opačném případě by hlučnost odpovídala nejbližšímu vyššímu realizovatelnému regulačnímu stupni. U plynulé regulace je pro výpočet elektrického příkonu použit exponent $x = 2$.

Protože grafické znázornění je názornější, jsou hodnoty navíc znázorněny v grafech na obr. 6. Ten je sestaven pro případ, že ventilátory lze u skokové regulace odpínat v šesti stupních (např. chladič má 6 ventilátorů regulovaných samostatně nebo 12 ventilátorů regulovaných po dvojicích, 18 po trojicích apod.). Větší počet regulačních stupňů u skokové regulace zjemní dělení, ale z hlukového hlediska nemá příliš velký význam, neboť pro 50% výkon je potřeba vždy provoz poloviny ventilátorů (ať tři ze šesti, pěti z deseti apod.) a s tím je spojen hlukový útlum pouze -3 dB.

Tab. 2 Hlukové a energetické parametry výměníku při regulaci (Δ) – ventilátory v trojúhelníku, Y – ventilátory ve hvězdě

$\frac{\dot{Q}_z}{\dot{Q}_v}$	Odpínání ventilátorů			Přepínání hvězda/trojúhelník (s následným odpínáním)			Plynulá regulace (regulace všech ventilátorů současně)		
	Počet ventilátorů v provozu [%]	Příkon [%]	Pokles hlučnosti [dB]	Počet ventilátorů v provozu [%]	Příkon [%]	Pokles hlučnosti [dB]	Otáčky ventilátorů [%]	El. příkon [%]	Pokles hlučnosti [dB]
80	80	80	-1	100 Δ	100	0	76	57	-6
75	75	75	-1	100 Y	61	-6	70	49	-8
70	70	70	-2	88 Y	54	-6	64	41	-10
60	60	60	-2	76 Y	46	-7	53	29	-14
50	50	50	-3	63 Y	38	-8	42	18	-19
40	40	40	-4	50 Y	31	-9	32	10	-25
30	30	30	-5	38 Y	23	-10	22	5	-33
25	25	25	-6	32 Y	20	-11	18	3	-38
20	20	20	-7	25 Y	15	-12	13	2	-44



Obr. 6 Příkon ventilátorů a útlum hluku během regulace vzduchem chlazených výměníků (skoková regulace v šesti regulačních stupních)

Zajímavější je regulace přepínání hvězda/trojúhelník, která je téměř v celém regulačním rozsahu (přesněji pod 80 %) o cca. 5 dB tišší, a má i menší příkon. Největšího hlukového útlumu a úspor energie pro pohon ventilátorů je ale dosaženo u plynulé regulace, pokud je aplikována na všechny ventilátory současně. Pro zajímavost je do grafů znázorněna i varianta, kdy plynulá regulace je použita pouze na 1 ventilátor, zatímco 5 ventilátorů je regulováno skokově odpínáním. V souladu s předpokla-

dy není tato varianta hlukově a dokonce i energeticky nijak výhodná. Hluk víceméně kopíruje skokovou regulaci a výrazného hlukového útlumu je dosaženo až v poslední regulační fázi při velmi nízkém výkonovém zatížení. A z energetického hlediska je dokonce přepínání hvězda/trojúhelník minimálně srovnatelné a v určité fázi regulačního rozsahu dokonce zajímavější.

ZÁVĚR

Skoková regulace poskytuje minimální hlukový útlum a příkon úměrný počtu ventilátorů v provozu. Přepínání hvězda/trojúhelník je téměř v celém regulačním rozsahu (přesněji pod 80 %) o cca. 5 dB tišší a vykazuje i menší příkon. Z hlukového i energetického hlediska je nejvýhodnější plynulá regulace aplikovaná na všechny ventilátory. Její použití pouze na část ventilátorů, zatímco zbytek je regulován skokově odpínáním, vykazuje chování obdobné skokové regulaci a nevyužívá se tak potenciál plynulé regulace.

Nelze ani mluvit o podstatné úspoře investičních nákladů, neboť cenový rozdíl mezi regulátorem pro část a pro všechny ventilátory je relativně malý a navíc je kompenzován úsporou provozních nákladů při menší spotřebě energie u plynulé regulace všech ventilátorů.

Příspěvek vychází z poznatků získaných při řešení projektu SP/3g3/148/07 s názvem „Energetické a environmentální hodnocení provozu chladicích zařízení a tepelných čerpadel“ podpořeného MŽP ČR.

Kontakt na autora: m.petrak@guentner.cz

Použité zdroje:

- [1] Dvořák, Z., Červenka, O. Průmyslová chladicí zařízení. Praha: SNTL, 1962, 604 s., 1. vyd.
- [2] Nový, R. Hluk a chvění. Praha: ČVUT, 2000, 389 s., 2. vyd. ISBN 80-01-022246-3
- [3] Podklady firmy Güntner AG & Co. KG, SRN.

Ze zahraniční literatury

- Rumchev, K., Jamrozik, K., Stick, S., Spickett, J.: **How free of tobacco smoke are „smoke-free“ homes?** (Jak moc jsou nekuřácká obydlí bez tabákového dýmu?)

Indoor Air, 18, 2008, č. 3, s. 202–208

V souvislosti s průkazem škodlivého vlivu kouření na zdraví bylo v mnoha budovách zakázáno kouření a kuřáci vykázáni ven mimo budovu. Tento zvyk – kouření venku – přenáší mnoho kuřáků i do obytného prostředí. Autoři oslovili v australském Perthu 150 nekuřáckých rodin, z nich 92 souhlasilo se zařazením do experimentu. V každé domácnosti byla monitorována koncentrace nikotinu a pevných látek v ovzduší. Kouření venku mimo byt však přiznalo 42 % domácností, 4 % přiznaly občasné kouření uvnitř bytu. Z výsledků vyplývá statisticky významný rozdíl mezi naprosto nekuřáckými a kuřáckými domácnostmi. Avšak mezi nekuřáckými domy a těmi, jejichž obyvatelé kouří venku, ani mezi těmi, kteří kouří venku a uvnitř významný rozdíl nebyl. Autoři uzavírají, že kouření venku vnitřní prostředí zcela nechrání (kuřáci často stojí před dveřmi a dým je nasáván do vnitřního prostředí). Při kouření uvnitř dosahovaly hodnoty nikotin/PM₁₀ (μg/m³) v nekuřáckém prostředí 0,4/28,5, při kouření venku 0,5/30,0 a při kouření uvnitř 0,75/48,9. Autoři vyvozují, že zdravotnická osvěta, která kuřáky vyhání z domu nestačí, měla by nabídnout vhodnou odvykací léčbu.

(Laj)

- Norbäck, D., Nordström, K.: **An experimental study on effects of increased ventilation flow on students' perception of indoor environment in computer classroom.** (Studie vlivu zvýšeného větrání na vnímavost studentů v počítačové učebně).

Indoor Air, 18, 2008, č. 4, s. 293–300

Experimentu se podrobilo 355 studentů (31 % dívky, 3,8 % astmatici) z university v Uppsale. Ve dvou počítačových třídách byla výměna vzduchu 4,1 až 5,2 . h⁻¹, ve druhých dvou 2,3 až 2,6 . h⁻¹. Po týdnu se větrání obrátilo, ale studenti chodili stále do stejné učebny. Hodnotili subjektivní vnímání charakteristik vnitřního prostředí vždy v poslední hodině experimentu. Vybrané charakteristiky prostředí byly kontinuálně po celou dobu měřeny (teplota, rel. vlhkost vzduchu, CO₂, PM₁₀ a ultrajemné částice). Při nižší výměně vzduchu dosahovala koncentrace CO₂ 1185 ppm a průměrná teplota vzduchu 23,2 °C. Při vyšší výměně vzduchu byla koncentrace CO₂ 922 ppm a průměrná teplota 22,1 °C. Zdrojem zátěže ve vnitřním prostředí byli jednak studenti, jednak zapnuté počítače. V subjektivním hodnocení dominovala jako výrazně negativní faktor vysoká teplota, vedoucí k únavě a nižší vnímavosti.

Autoři uzavírají, že v počítačové učebně by koncentrace CO₂ neměla překročit limitní hodnotu 1000 ppm a teplota by neměla být vyšší než 22 °C. Doporučují osobní větrání s minimálním příívodem vzduchu 10 l . s⁻¹ . os⁻¹.

(Laj)