

Působení ventilu v regulačním obvodu

Valve action in control circuit

Prof. Ing. Karel HEMZAL, CSc.
ČVUT v Praze, Fakulta strojní

Příspěvek pojednává o problematice dimenzování vodních regulačních ventilů k řízení výkonu vzduchotechnických výměníků tepla. Pozornost je věnována volbě správného typu charakteristiky ventilu a vyjádření vlivu všech důležitých parametrů ventilu i výměníku a sítě vodních rozvodů na velikost ventilu. Pozornost je věnována určení mezního ohřátí vzduchu při zachování stabilního průběhu regulačního pochodu. Postup je dokumentován na vyřešeném příkladu vodního předehříváče vzduchu vzduchotechnického zařízení.

Klíčová slova: ventily, dimenzování, výměníky tepla, stabilita regulace

Recenzent
Ing. Jiří Bašta, Ph.D.

The contribution deals with problems of water control valves dimensioning for capacity control of ventilation heat exchangers. The attention is paid to the choice of the right valve characteristic type and to the expression of all important valve and heat exchanger and water distribution network parameters influence on the valve size. The attention is also paid to determination of the limit air heating up under observation of stable course of control process. The procedure is documented by worked out example of water air pre-heater of air conditioning equipment.

Key words: valves, dimensioning, heat exchangers, regulation stability

V praxi se často setkáváme s neuspokojivým průběhem regulačního pochodu, kdy na zapnutí nebo na jinou poruchu reaguje regulační obvod nestabilně. Mísíto aby se v krátké době ustálil na nové rovnovážné poloze, kmitá s tlumenou amplitudou při neúnosně dlouhé době ustalování, která nezřídka přesahuje několik hodin. Pokud zapůsobí v době ustalování další porucha, vrátí se obvod znovu do prvotní situace s velkou amplitudou kmitů a výsledkem je zcela nestabilní chod zařízení po celou provozní dobu.

Tento neúspěch regulace je ve značné míře způsoben nesprávným návrhem regulačního ventilu, volbou jeho typu a velikosti. Regulované soustavě je nezbytné přizpůsobit ventil s přihlédnutím k proměnlivým podmínkám zátěže.

Příspěvek se zaměří na ventily určené k řízení průtoku vody ohříváči a chladiči vzduchu ve větracích a klimatizačních zařízeních. Nicméně použitý postup a zásady jsou aplikovatelné i pro jiné regulační armatury (např. přímé cesty trojcestných ventilů) a jiné typy regulovaných zařízení.

Regulační obvod sestává ze sériově propojené regulované soustavy a regulátoru se zpětnovazební informací o výsledku účinku regulačního zásahu na regulovanou soustavu. K nestabilnímu chodu dochází při překročení kritického zesílení v obvodu. Zesílení obvodu je dané součinem zesílení regulátoru a soustavy

$$K_O = K_R \cdot K_S$$

Hodnota kritického zesílení závisí na dynamických vlastnostech regulované soustavy (charakterizovaných např. poměrem dob průtahu a náběhu z přechodové charakteristiky) a také na časové konstantě celého regulátoru.

Zesílení regulátoru je dáno požadovanou přesností, vyjádřenou pásmem proporcionality regulátoru a je možné je zmenšit jen snížením požadavku na přesnost (rozšířením pásma)

$$K_R = 1 / X_p$$

Zesílení soustavy se mění v regulačním rozsahu podle provozních podmínek a vlastností součástí regulované soustavy a k nestabilitě dochází obvykle při $K_S \geq 1,5$. Pro náš případ regulace vodního výměníku je ventil prvním členem regulované soustavy ve smyslu toku informací v obvodu. Dalšími členy jsou

spojovací vodní potrubí, vlastní výměník a případně část vzduchovodu do místa vloženého čidla regulátoru nebo i místnost při regulaci teploty v místnosti. Zesílení soustavy je dáno součinem zesílení těchto navazujících součástí regulované soustavy.

Vzhledem k zakřivení statických charakteristik jednotlivých součástí, se mění zesílení soustavy a tedy i zesílení obvodu v průběhu regulačního rozsahu (v rozsahu od uzavření regulačního ventilu po jeho úplné otevření). Snaha o linearizaci charakteristik jen některých součástí soustavy může být znehodnocena zejména křivočarou výslednou charakteristikou v místech s její velkou strmostí, kdy zesílení v obvodu vzroste nad přípustnou mez.

Zaměříme se na stanovení správné velikosti ventilu a na možnost linearizace výsledné charakteristiky dominantní části regulované soustavy: ventil + výměník, kterou je **závislost výkonu výměníku na otevření ventilu** (v poměrných veličinách)

$$q = \frac{Q}{Q_{100}} = f\left(h = \frac{H}{H_{100}}\right)$$

Při dokonale lineární charakteristice by **zesílení** této části soustavy, dané **změnou teploty vzduchu ve výměníku vyvolanou změnou otevření ventilu**, bylo konstantní a rovno jedné

$$K_S = \frac{dq}{dh} = \frac{dm}{dh} \cdot \frac{dq}{dm} = 1$$

v celém regulačním rozsahu, tj. pro změny zdvihu $h = 0$ až 1. Za oblast s dobrým předpokladem stabilního průběhu regulace budeme považovat část charakteristiky, kde

$$K_S = K_{S_{ven}} \cdot K_{S_{vym}} < 1,5.$$

Na její průběh mají vliv **vlastnosti ventilu** (akční poměr – regulační rozsah S_v , jeho velikost daná průtokovým součinitelem – k_v hodnotou), hydraulické zapojení výměníku, charakterizované **autoritou ventilu** P_v a **způsob regulace výkonu výměníku** (škrcením průtoku nebo míšením vratné vody s vodou ze zdroje při zapojení s vlastním čerpadlem výměníku) a **velikost vychlazení** (u chladiče

ohřátí) vody ve výměníku Δt_{WV} , které je charakterizováno *činitelem vytížení výměníku* b .

Uvedeme nejdříve vyjádření vlastností obou součástí uvažované regulované soustavy, ventilu a výměníku.

REGULAČNÍ VLASTNOSTI VENTILŮ

Uvedeme přehled vztahů, potřebných k sestavení provozní charakteristiky ventilu:

Průtokový součinitel ventilu k_{VS} = **průtok ventilem za referenčních podmínek** (udává výrobce pro odstupňovanou řadu svých výrobků); referenční podmínky jsou $\rho_N = 1000 \text{ kg/m}^3$ – voda při 15°C , $\Delta p_{VN} = 100 \text{ kPa} = 0,1 \text{ MPa}$

k_V = **průtok ventilem za provozních podmínek** (průtok ventilem V_V při tlakové ztrátě ve ventilu Δp_V) prakticky

$$k_V = V_V \sqrt{\frac{\rho}{10 \cdot \Delta p_V}} \quad [\text{m}^3/\text{h} \text{ (l/s, l/min)} = \text{m}^3/\text{h} \text{ (l/s, l/min)}; \text{kg/m}^3, \text{ kPa}].$$

Poměrná průtoková charakteristika ventilu $\Phi = f(h)$ při konst. přetlaku na ventilu.

Poměrný průtokový součinitel ventilu $\Phi = k_V / k_{VS}$ má mezní hodnoty dané mezními hodnotami $k_V = k_{VS}$ při $\Phi = 1$, k_{V100} při otevření ventilu $h = 1$ (často $k_{V100} = k_{VS}$), k_{V0} , $\Phi_0 = k_{V0} / k_{VS}$ při zavřeném ventilu $h = 0$ (podle průběhu teoretické charakteristiky – viz. dále), k_{Vr} při přestoupení tolerance definovaného sklonu charakteristiky blízko zavření ventilu.

Regulační rozsah (*akční poměr*) ($r \equiv \frac{1}{\Phi_r} \equiv$) $S_V = k_{VS} / k_{Vr}$ ($= 15$ až 50 i více –

čím větší hodnota tím kvalitnější ventil). Teoretický regulační rozsah (pro teoretickou charakteristiku) $r_{\text{teor}} = 1 / \Phi_0 = k_{VS} / k_{V0}$ často je $S_V \equiv r_{\text{teor}}$

Ventil *lineární* má charakteristiku $\Phi = \Phi_0 + n \cdot h$. Stejně změně otevření odpovídá *stejná změna* k_V v celém regulačním rozsahu. *Sklon přímky* v kartézských souřadnicích s lineárními stupnicemi $n \approx 0,98$. Pro $h = 1 \rightarrow \Phi = 1$ a $n = 1 - \Phi_0 \rightarrow \Phi_0 = 1 - n \rightarrow \Phi = 1 - n(h - 1)$.

Ventil *rovnoprocentní* má charakteristiku $\Phi = \Phi_0 \cdot e^{n \cdot h} \rightarrow \ln \Phi = \ln \Phi_0 + n \cdot h$. Exponent $n = 4$ (nebo $n = 2$). Pro $h = 1 \rightarrow \Phi = 1 \rightarrow \Phi_0 = e^{-n} = 0,0183$ (pro $n = 2$ je $0,135$) a charakteristika může být vyjádřena ve tvaru $\Phi = e^{n \cdot (h-1)} \rightarrow \ln \Phi = n(h-1)$. Stejně změně otevření odpovídá *stejná procentní změna* k_V v celém regulačním rozsahu.

Provozní charakteristika ventilu $m = f(h)$ je závislost průtoku na zdvihu při přetlaku daném spoluprací sítě a ventilu s čerpadlem.

Poměrný průtok ventilem $m = M_W / M_{W100} = [1 + P_V (1/\Phi^2 - 1)]^{-1/2} = f(h)$.

Autorita ventilu $P_V = \Delta p_{V100} / \Delta p_{V0} = 0$ až 1 , kde přetlak působící na ventil Δp_{V100} je při plném otevření $h = 1$ (H_{100}), Δp_{V0} při jeho uzavření $h = 0$.

Zesílení ventilu (nazývané též *zisk* nebo *činitel přenosu*) $K_S = dm/dh = f(h)$.

REGULAČNÍ VLASTNOSTI VÝMĚNÍKŮ

– ohřívачů a chladičů vzduchu závisí na způsobu řízení výkonu, které může být **na vodní straně – škracením průtoku vody** $M_W = \text{var.}$, nebo – **řízením teploty**

ty vody míšením $t_{W1} = \text{var.}$ nebo **na straně vzduchu – obtokem** kolem výměníku.

Statická charakteristika výměníku: Poměrný výkon (= poměr změny teploty vzduchu při stálém průtoku vzduchu k akčnímu účinku výměníku) jako funkce poměrného průtoku vody (podle Würstlina) $q = 1 / [1 + b(1 - m)/m] = f(m)$, kde $q = Q/Q_{100} = \Delta t_L / X_h$.

Akční účinek výměníku $X_h = \Delta t_{L,\text{max}}$ je dán maximálním požadovaným ohřátím vzduchu tj. za výpočtových zimních podmínek – při plně otevřeném regulačním ventilu.

Činitel vytížení výměníku při regulaci změnou teploty vody – míšením

$$b = b_1 = \Delta t_{W1} / (t_{W1} - t_{L1}),$$

kde $t_{L1} = t_{L2}$ u předehřívачů a $t_{L1} = t_{L1}$ u dohřívачů. Při regulaci změnou průtoku vody – škracením $b = b_M = 0,6 \cdot b_1$. Pro parní ohřívачe je $b = 1$.

U výměníků s řízením výkonu změnou teploty vstupní vody je průtok vody výměníkem konstantní a do m se dosazuje průtok primární vody ze sítě, který se mísí se zpětnou vodou.

Zesílení (činitel přenosu) výměníku $K_S = dq/dm = b / \{m^2 [1 + b(1/m - 1)^2]\} = f(m)$.

REGULAČNÍ VLASTNOSTI VÝMĚNÍKU S VENTILEM

Hledanými závislostmi jsou **statická charakteristika** (ventil *rovnoprocentní*) $q = f(h)$ a **zesílení** $K_S = f(h)$

$$q = \frac{1}{1 + b \sqrt{1 + P_V \left[\left(e^{n \cdot h} \cdot k_{VS} / k_{V0} \right) - 1 \right] - 1}}$$

$$K_S = \frac{dq}{dh} = b \cdot P_V \cdot n \frac{q^2 m}{(k_{V0} / k_{VS})^2}$$

Pro volbu typu ventilu podle činitele vytížení výměníku (podle Junkera [2])

$$P_{VVYP} = 0,3 / b^{1,74} \text{ při } S_V = 50 \text{ a } P_{VVYP} = 0,4 / b^{1,53} \text{ při } S_V = 25.$$

Pro $P_V > P_{VVYP}$ volíme lineární ventil, pro $P_V < P_{VVYP}$ volíme rovnoprocentní ventil. V klimatizaci je většinou $b = 0,15$ až $0,35$, proto volíme převážně ventily rovnoprocentní. V okruzích s čerpadlem, kde se P_V blíží jedné, volíme ventily lineární (místo výpočtu viz. také obr. 6).

Určení ventilu

Výpočtem z definičního vztahu pro zadaný průtok a se zvolenou hodnotou tlakové ztráty otevřeného ventilu stanovíme k_{VN} . Z podkladů výrobce zvolíme ventil s nejbližším průtokem, $k_{VS} > k_{VN}$. Přepočítáme regulační rozsah: $S_V \cdot k_{VS} = S_{VN} \cdot k_{VN} \rightarrow S_V = S_{VN} \cdot k_{VN} / k_{VS}$.

Mez regulovatelnosti výměníku (podle B. Junkera [1]) je dána minimálním ohřátím vzduchu ve výměníku, při kterém je ještě regulace stabilní (s přípustným kolísáním teploty)

$$\Delta t_{L,\text{min}} = \frac{X_h}{1 + b \cdot \sqrt{P_V (S_V^2 - 1) + 1}}$$

Maximální rozkmít teploty vzduchu $X_{\text{max}} = 0,2 \cdot \Delta t_{L,\text{min}}$.

Tab. 1 – Ventily – dimenzování

Zapojení předehříváče s oběhovým čerpadlem - regulace míšením

Zadáni

Teploty vzduchu	t_{L1}	°C	-12
	t_{L2}		5
Teploty vody	t_{W1}	°C	90
	t_{W2}		50
Průtok vody	M_W	kg/s	0.33
Tlaková ztráta výměníku	$\Delta p_{vým}$	kPa	8.8
Tlaková ztráta R-S	Δp_{R-S}		20

Ventil	Sklon	Autorita	Tlak.ztrata	Průtokový součinitel		S_v'		
	n	P_v	Δp_v	k_{vN}	k_{vS}	při S_v		
Rovnoprocentní						25	50	
Akční poměr	%	-	(kPa)	(m ³ /h)				
S_v	25	4	0.5	10	3.8	4	23.5	47.0
	50		0.3	6	4.8	6	20.2	40.4
Vytížení výměníku		0.164	3.27	6.6	6	27.4	54.7	
b_t	0.471	0.1	2	8.4	10	21.0	42.0	

Výpočet

Poměrný zdvih	h	0.05	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1	
Poměrný průtokový součinitel	Φ	0.022	0.027	0.041	0.061	0.091	0.135	0.202	0.301	0.449	0.670	1	
Provozní charakteristika pro ventil v síti $m = f(h)$	P_v	0.5	0.032	0.039	0.058	0.086	0.128	0.190	0.280	0.408	0.580	0.787	1.000
		0.3	0.041	0.050	0.074	0.111	0.164	0.242	0.352	0.500	0.676	0.855	1.000
		0.1	0.071	0.086	0.128	0.189	0.277	0.397	0.546	0.707	0.847	0.944	1.000
		0.164	0.055	0.067	0.100	0.149	0.220	0.320	0.454	0.615	0.779	0.913	1.000
Statická charakteristika výměníku s ventilem $q = f(m)$	P_v	0.5	0.065	0.079	0.115	0.166	0.237	0.332	0.452	0.594	0.746	0.887	1.000
		0.3	0.083	0.100	0.146	0.209	0.294	0.404	0.536	0.680	0.816	0.926	1.000
		0.1	0.139	0.167	0.238	0.331	0.449	0.583	0.719	0.837	0.921	0.973	1.000
		0.164	0.111	0.133	0.192	0.271	0.374	0.500	0.639	0.773	0.882	0.957	1.000
Odchyly od linearity $\Delta q = (q - h)/h * 100$ (%)	P_v	0.5	29.8	-21.3	-42.5	-44.6	-40.7	-33.6	-24.6	-15.1	-6.8	-1.4	0.0
		0.3	65.9	0.3	-27.2	-30.4	-26.4	-19.2	-10.7	-2.9	2.0	2.9	0.0
		0.1	177.9	66.8	18.8	10.5	12.1	16.5	19.8	19.5	15.2	8.1	0.0
		0.164	121.0	33.2	-4.2	-9.6	-6.4	0.0	6.4	10.4	10.3	6.3	0.0
Zesílení soustavy $K_S = \Delta q / \Delta h$	P_v	0.5	1.30	0.28	0.36	0.51	0.71	0.95	1.20	1.42	1.51	1.42	1.13
		0.3	1.66	0.35	0.45	0.63	0.85	1.10	1.32	1.44	1.37	1.10	0.74
		0.1	2.78	0.56	0.71	0.94	1.17	1.34	1.36	1.18	0.85	0.51	0.27
		0.164	2.21	0.45	0.58	0.79	1.03	1.26	1.39	1.34	1.10	0.75	0.43

Příklad. Stanovíme vliv hodnoty autority ventilu na zakřivení výsledné provozní charakteristiky výměníku s ventilem.

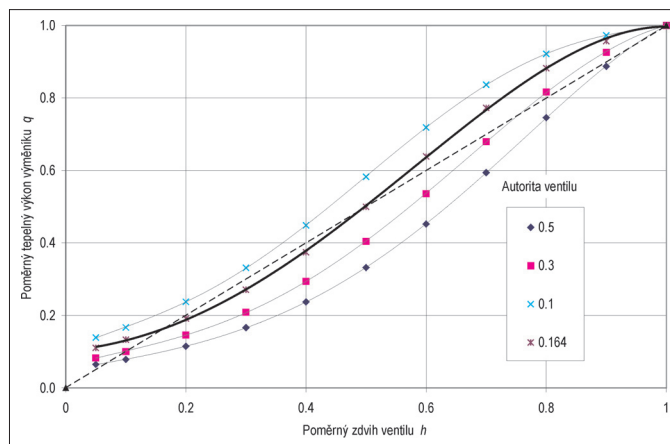
Zadané hodnoty:

Vzduchotechnický předehříváč s oběhovým čerpadlem (regulace míšením), teploty vody 90/50 °C, vzduchu -12/+5 °C, průtok vody 0,33 kg/s, tlaková ztráta výměníku 8,8 kPa, tlaková ztráta mezi rozdělovačem a sběračem 20 kPa.

Řešení. Vypočteme vytížení výměníku $b_t = 40/(90 - (-12)) = 0,471$ a zvolíme ventil rovnoprocentní s $n = 4$. Určíme odchyly od linearity statické charakteristiky a zesílení v závislosti na otevření ventilu při volbě autority ventilu $P_v = 0,1; 0,164$ (pro tuto hodnotu se křivka charakteristiky nejvíce blíží lineární závislosti, hodnota byla zjištěna zkusmo); 0,3; 0,5. Použijeme tabulkový procesor Excel. Záznam s číselnými výsledky jsou v tabulce 1. Výsledky jsou získány postupným řešením závislostí poměrného průtoku vody m , poměrného tepelného výkonu q a odchyly od linearity Δq a zesílení $K = f(h)$ s použitím výše uvedených vztahů, upravených do tvarů: potřebný poměrný průtokový součinitel $\Phi = \exp [4*(h - 1)]$ a postupně $m = [1 + P_v * \Phi^{-2}]^2$, dále $q = 1/[1 + b(1/m - 1)]$, $\Delta q = 100*(q-h)/h$ a $K_S = \Delta q/\Delta h$.

Průběh křivek v obr. 1 ukazuje, že k lineárnímu se nejlépe přibližuje průběh při autoritě ventilu 0,164. Průběh zesílení v obr. 2 potvrzuje blízkost k lineárnímu průběhu provozní charakteristiky hodnotami zesílení, které nedosahují hodnoty $K_S = 1,5$ kromě oblasti blízko zavření ventilu, kdy se překračuje mez regulovatelnosti. Obdobný výpočet s lineárním ventilem dá výsledky uvedené v obr. 3 a 4. K přímkovému průběhu sledované závislosti se nejvíce přiblíží zapojení s lineárním ventilem, jehož autorita je $P_v = 1$.

Nepříznivé strmé stoupání charakteristiky sledovaného zapojení blízko zavření ventilu posoudíme podle meze regulovatelnosti, která je v obr. 5 vypočtena pro

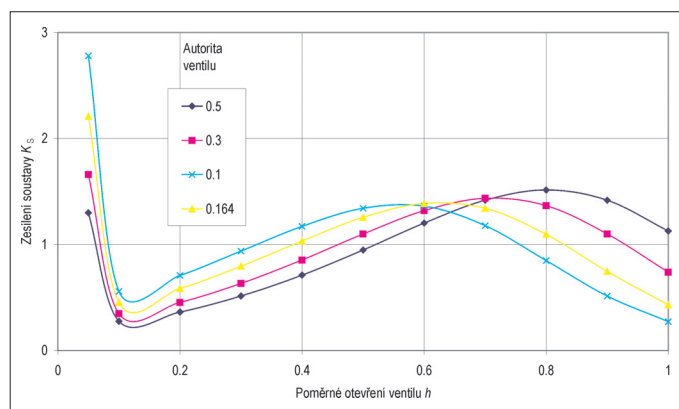


Obr. 1 – Výkon výměníku v závislosti na otevření ventilu při různé autoritě čtyřprocentního ventilu

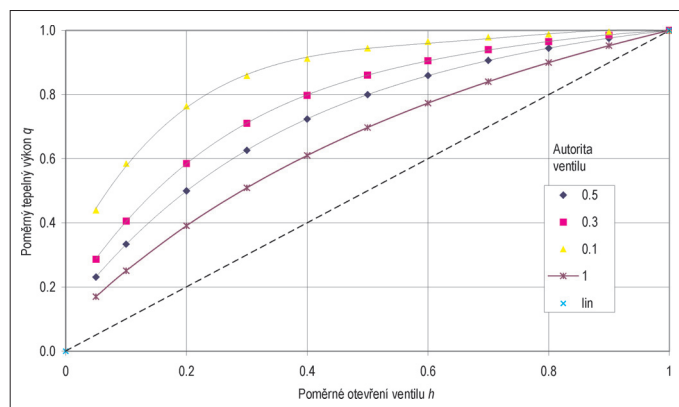
akční poměr $S_v = 25$ (horší ventil) a 50 (lepší ventil) a pro vybrané k_{vS} hodnoty, uvedené v tabulce výpočtů (s korigovanými hodnotami S_v'). Průběh ukazuje, že přijatelných hodnot se dosáhne s co největší autoritou, v zobrazení s $P_v = 0,5$. Tomuto závěru odpovídá také seřazení křivek v obr. 1 blízko zavření ventilu. Zdá se tedy, že ventil s touto hodnotou autority bude nejhodnější, i když mohou nastat potíže se stabilitou v oblasti otevření kolem $h = 0,8$ (viz. obr. 2).

ZÁVĚR

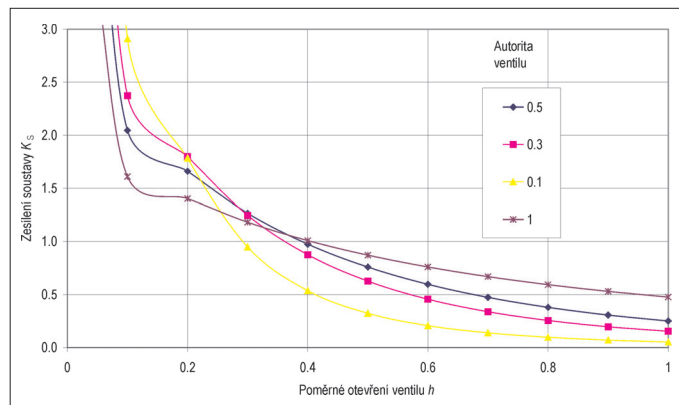
Výsledky ukazují, že rozhodující pro stabilní regulační pochod jsou poměry při regulaci malého výkonu, blízko k uzavření ventilu. Na potížích se podílí tři



Obr. 2 – Zesílení v zapojení ventil + výměník pro různou autoritu čtyřiprocentního ventilu



Obr. 3 – Výkon výměníku v závislosti na otevření ventilu při různé autoritě lineárního ventilu



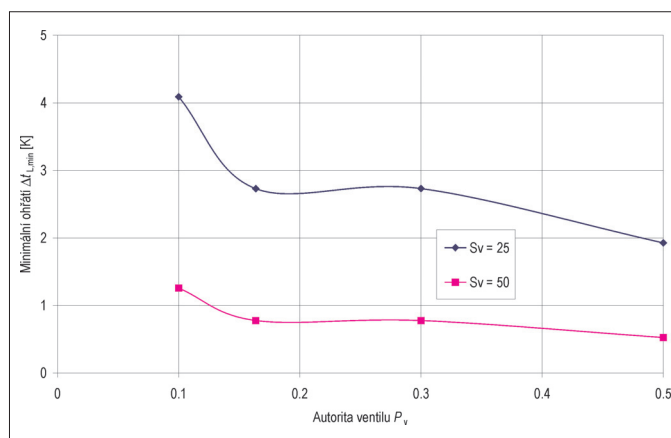
Obr. 4 – Zesílení v zapojení ventil + výměník pro různou autoritu lineárního ventilu

společně působící vlivy. Tepelná charakteristika výměníku má blízko nulového výkonu největší stoupání, kdy malá změna průtoku vody vyvolá velkou změnu ohřátí vzduchu.

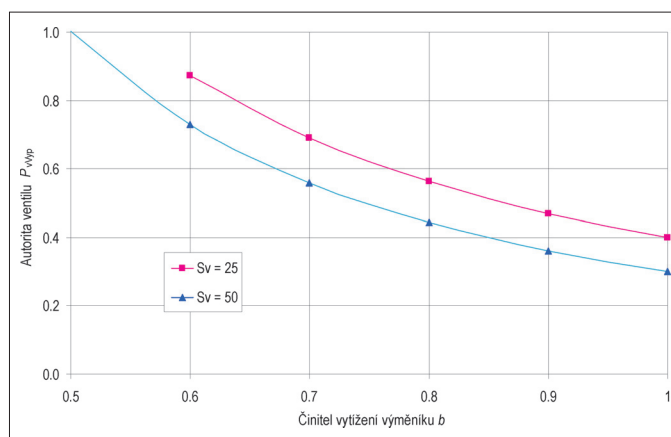
Přetlak na ventilu má největší hodnotu v okamžiku uzavírání ventilu. Charakteristika ventilu má blízko zavření strmý průběh, který neodpovídá definované závislosti (s potřebnou hodnotou $k_v < k_{vr}$). Při podkročení meze regulovatelnosti musí být ventil zvláštním zapojením regulátoru zcela uzavřen.

Použité zdroje:

- [1] JUNKER B.: *Regulovatelnost ohřivačů vzduchu, vytápěných vodou*. ZTV 20 (1977), s. 193-201
- [2] JUNKER B.: *Klimaregelung*. R. Oldenbourg Verlag, München, 1974



Obr. 5 – Mez regulovatelnosti (upraveno podle B. Junkera [2]) pro ventily s akčním poměrem $S_v = 25$ a 50 v závislosti na autoritě ventilu P_v



Obr. 6 – Pomocný graf pro volbu typu ventilu rovno procentního nebo lineárního (podle B. Junkera [2])

Ze zahraniční literatury

- HYTTINEN, M. a kol.: **Reactions of Ozone on Ventilation filters.** (Reakce ozónu na filtrech při větrání).

Indoor Built Environ, 12, 2003, č. 3, s. 151–158.

Když vzduch při nuceném větrání prochází filtrem, může ozón a jiné oxidanty v něm obsažené reagovat s prachem a jinými škodlivinami, zachycenými na filtru za vzniku oxidačních produktů, charakteristických nepříjemným oděrem.

V experimentu bylo vyzkoušeno devět různých použitých filtrů na bázi skelných vláken. Byly postupně umístěny v malé klimatizační jednotce v měřicím tunelu, kterým procházel vzduch o rychlosti 0,1 až 0,2 m.s⁻¹ obsahující ozón v postupně se zvyšující koncentraci od 20 do 60 ppm. Na výstupu byla koncentrace ozónu měřena. Určitý úbytek ozónu byl zjištěn u všech filtrů, pokles byl o 8 až 26 %. Největší úbytek ozónu byl u klimatizační jednotky s třístupňovou filtrací. Změny v koncentraci jednotlivých organických látek, které procházely filtrem, byly zanedbatelné, kromě formaldehydu, který se tvořil.

Senzorické hodnocení pokusnými osobami ukázalo, že největší emise oděrů byla způsobena předfiltrem. Při zvýšené koncentraci ozónu nepoznaly pokusné osoby čichem rozdíl na vstupu a na výstupu tunelu. Oproti očekávání vyšší koncentrace ozónu neměla významně koncentraci těkavých organických uhlovodíků (VOC) v ovzduší.

(Laj)