

Regulačné armatúry (3)

V predchádzajúcej časti seriálu sme sa venovali definícii prietokovej charakteristiky a niektorým jej formám – lineárnej, rovnopercentnej, parabolickej. Rozobrali sme aj problematiku regulačného pomeru a autority ventilu. V treťom pokračovaní sa zameriame na vplyv autority na deformáciu prietokovej charakteristiky ventilu, regulačnú charakteristiku procesu, kavitáciu a návrh regulačných ventilov.

Vplyv autority na deformáciu prietokovej charakteristiky sústavy

Jednoduché odvodenie vplyvu autority ventilu na deformáciu prietokovej krivky celej vetvy sa dá vykonať na príklade potrubnej sústavy s jedným potrubným prvkom č. 1 s premenným prietokovým súčiniteľom (regulačný ventil, Kv_1) a celý zvyšok vetvy sa dá charakterizovať ako potrubný prvok č. 2 s pevným prietokovým súčiniteľom Kv_2 . Celá sústava je zaťažená diferenčným tlakom Δp_c .

Pre prietok touto vetvou platí $Q_c = Q_1 = Q_2$, autorita $a = \Delta p_1 / (\Delta p_1 + \Delta p_2)$ – platí len pre plne otvorený ventil 1, teda $Kv_1 = Kv_{1max} = Kvs_1$. Tlaková strata na regulačnom ventilu je potom $\Delta p_1 = a \cdot (\Delta p_1 + \Delta p_2)$. Uvedenú rovnicu vyjadríme pomocou vzťahu medzi objemovým prietokom a Kv ventilu:

$$Kv = \frac{1}{100} \cdot Q \cdot \sqrt{\frac{\rho_1}{\Delta p}}$$

z čoho $\Delta p = N \cdot (Q/Kv)^2$, kde $N = 10\,000/\rho_1$

$$N \cdot \left(\frac{Q}{Kvs_1}\right)^2 = a \cdot N \cdot \left(\frac{Q}{Kvs_1}\right)^2 + a \cdot N \cdot \left(\frac{Q}{Kv_2}\right)^2$$

$$\left(\frac{1}{Kvs_1}\right)^2 = a \cdot \left[\left(\frac{1}{Kvs_1}\right)^2 + \left(\frac{1}{Kv_2}\right)^2\right]$$

z čoho po úprave dostaneme

$$Kv^2 = \frac{a}{1-a} \cdot Kvs^2$$

Pre celkový prietokový súčiniteľ sústavy Kvc platí:

$$\frac{1}{Kvc^2} = \frac{1}{Kv_1^2} + \frac{1}{Kv_2^2}$$

alebo

$$Kvc = \sqrt{\frac{Kv_1^2 \cdot Kv_2^2}{Kv_1^2 + Kv_2^2}}$$

$$Kvc = \sqrt{\frac{Kv_1^2 \cdot \left(\frac{a}{1-a}\right) \cdot Kvs^2}{Kv_1^2 + \left(\frac{a}{1-a}\right) \cdot Kvs^2}}$$

Po zavedení bezrozmerného prietokového súčiniteľa

$$\Phi = \frac{Kv}{Kvs}$$

dostaneme

$$Kvc = \sqrt{\frac{\Phi^2 \cdot \left(\frac{a}{1-a}\right) \cdot Kvs^2}{\Phi^2 + \left(\frac{a}{1-a}\right)}}$$

a po úprave

$$Kvc = Kvs \cdot \sqrt{\frac{a}{1-a + \frac{a}{\Phi^2}}}$$

Maximálne Kvc nastane pri plne otvorenom ventilu, teda $\Phi = 1$, z čoho po dosadení dostaneme

$$Kvc_{max} = Kvs \cdot \sqrt{a}$$

Nás však zaujíma bezrozmerná prietoková charakteristika sústavy

$$\Phi_c = \frac{Kvc}{Kvc_{max}}$$

takže po vydelení Kvc/Kvc_{max} dostávame konečný vzťah pre prietokovú charakteristiku sústavy (deformáciu charakteristiky ventilu) v závislosti od zdvihu ventilu h a autority a :

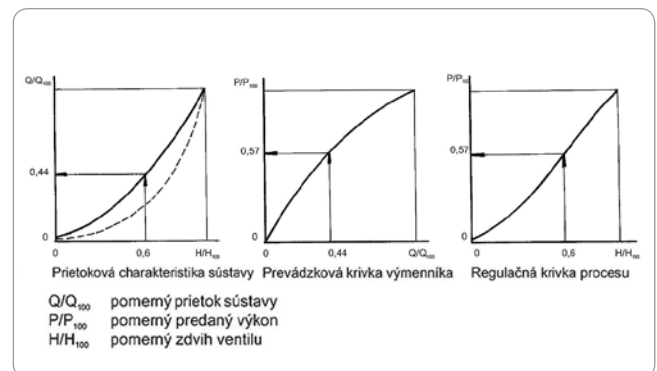
$$\Phi_c(h, a) = \sqrt{\frac{1}{1 + a \cdot \left(\frac{1}{\Phi(h)^2} - 1\right)}}$$

Regulačná charakteristika procesu

V predchádzajúcej časti seriálu bola spomenutá prietoková charakteristika ventilu, ale iba z hľadiska regulácie nás závislosť prietoku média od zdvihu ventilu vôbec nezaujíma. Nás zaujíma práve závislosť regulovanej veličiny od výstupu regulátora.

Máme prietokovú charakteristiku ventilu. Zdvih ventilu je lineárne závislý od výstupu z regulátora. Máme prietokovú charakteristiku sústavy. Ďalej máme ešte závislosť regulovanej veličiny od prietoku média sústavou – prevádzkovú krivku vymenníka alebo iného zariadenia. Súčinom prevádzkovej krivky (napr. výmenníka tepla) a regulačnej charakteristiky potrubnej sústavy potom dostávame závislosť regulovanej veličiny od zdvihu ventilu (obr. 3), teda v prípade lineárnej väzby aj závislosť regulovanej veličiny od výstupu z regulátora – regulačnú charakteristiku procesu.

Pre dobrú reguláciu je dôležité, aby sa výsledná regulačná krivka v celom regulačnom pásme pokiaľ možno čo najviac priblížila priamke. Dôvodom je to, aby sa rovnaké zmeny (prírastky alebo úbytky) výkonu dosahovali pokiaľ možno rovnakými zmenami zdvihu regulačnej armatúry kdekoľvek v celom rozsahu zdvihu, čo výrazne prispieva k stabilite regulácie. Práve na túto skutočnosť má priamy vplyv charakteristika ventilu, kde môže vhodne volená charakteristika regulačnej armatúry výrazne vylepšiť (a naopak) kvalitu aj stabilitu regulačného procesu.



Obr. 3 Regulačná charakteristika procesu

Na obr. 3 je v ľavej časti čiarkovaným priebehom vyznačená ideálna prietoková charakteristika regulačného ventilu a plným priebehom jeho deformovaná krivka (prietoková charakteristika alebo krivka sústavy). Tu je práve veľmi dôležité si uvedomiť, že závislosť prietoku média je určená práve prietokovou charakteristikou celej potrubnej sústavy (vplyv autority), nie iba charakteristikou ventilu, a preto je prakticky nemožné korektne navrhnuť regulačný ventil bez aspoň minimálnych znalostí súvisiacich vplyvov (hlavne autority, ktorá z hydraulického hľadiska popisuje celý regulovaný okruh).

Kavitácia

Kavitácia je jav, keď v kvapaline rázovo vznikajú a zanikajú parné bublinky, ktoré sa v regulačných ventiloch objavujú pri škrtení vplyvom miestneho poklesu tlaku. Tento stav výrazne znižuje životnosť exponovaných súčastí a je sprevádzaný hlukom a vibráciami, pričom kavitácia pri ventiloch vzniká vtedy, keď sa statický tlak média dostane pri prietoku ventilom pod hodnotu parciálneho tlaku sýtych pár média. Býva to pravidelne v oblasti najužšieho prierezu, kde má prúdenie najvyššiu rýchlosť. Podrobnejšie budeme o vzniku a účinkoch kavitácie písať v nasledujúcich častiach seriálu, tu sa obmedzíme iba na kontrolu vzniku kavitácie, ktorá by mala byť v prípade pochybností súčasťou návrhu každej regulačnej armatúry.

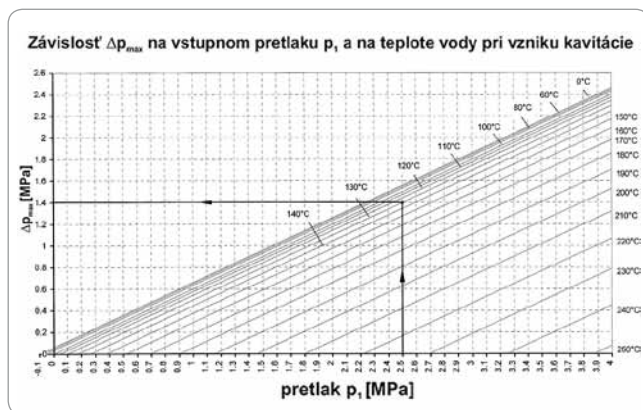
Pri regulačných ventiloch s jednostupňovou redukciou (prakticky každý prípad v komerčnej oblasti vykurovania a chladenia) sa kavitácia môže rozvinúť, ak je splnená podmienka:

$$(p_1 - p_2) \geq 0,6 \cdot (p_1 - p_s)$$

kde p_1 je vstupný pretlak [MPa],
 p_2 – tlak za ventilom [MPa],
 p_s – tlak sýtych pár média pri konkrétnej teplote [MPa].

V prípade pravdepodobnosti vzniku rozvinutej kavitácie treba pri regulačných ventiloch voliť škrtiaci systém so zvýšenou odolnosťou proti jej účinkom, tzn. použiť dierovanú kuželku alebo kuželku a sedlo s návarom tesniacich plôch z tvrdokovu (stelit). Tiež možno navrhnuť viacstupňovú redukciu, použitie takýchto ventilov však spadá viac-menej do oblasti teplárenských zdrojov a energetiky.

Na rýchlu kontrolu vzniku kavitácie pri regulačných ventiloch s jednostupňovou redukciónou možno použiť diagram uvedený na obr. 4, kde Δp_{\max} je maximálnym povoleným tlakovým spádom z hľadiska kavitácie pri daných podmienkach.



Obr. 4 Diagram závislosti vzniku kavitácie

2.8. Návrh regulačných ventilov

Pri návrhu ventilu treba prejsť všetky základné charakteristiky a vlastnosti ventilu. To sa týka základných otázok voľby materiálu telesa, voľby materiálu upchávky a určenia jeho menovitého tlaku a pripájacích rozmerov. Tieto základné voľby sú rovnaké ako pri bežných uzatváracích ventiloch.

Pri regulačných armatúrach navyše nasleduje voľba vhodného škrtiaceho systému vzhľadom na spracúvaný tlakový spád a ďalšie podmienky prietoku média ventilom (kavitácia, odparovanie média, abrazívne súčasti, prúdenie stlačiteľných médií pri nadkritickom tlakovom spáde a pod.) a tak isto typ pohonu, ktorý tiež určuje vyhotovenie ventilu (tlakovo vyvážený – tlakovo nevyvážený, priamy – reverzný). Tieto aspekty môžeme zahrnúť medzi hlavné kritériá výberu konštrukčného vyhotovenia ventilu.

Pokiaľ máme hotový tento základný výber, môžeme sa venovať návrhu regulačných vlastností ventilu. Základnou funkciou regulačnej armatúry je regulovať prietok alebo tlakovú stratu v potrubnej sústave na žiadanú hodnotu. Na to má regulačná armatúra k dispozícii iba jedinú vlastnosť – premenlivý prietokový súčiniteľ. Regulačná armatúra v zaregulovanej sústave nemá v skutočnosti hodnotu prietokového súčiniteľa Kvs , na ktorý bola navrhovaná,

ale vykazuje takú okamžitú hodnotu prietokového alebo stratového súčiniteľa, akú nastavil regulátor na dosiahnutie požadovanej regulovanej hodnoty. To znamená, že v konkrétnom okamihu leží hodnota prietokového súčiniteľa medzi nulou (poloha zatvorené) a menovitou hodnotou (úplné otvorenie). To, aká plynulá a jemná je táto regulácia, je dané polohou pracovného bodu na regulačnej charakteristike riadeného procesu a je teda, ako bolo uvedené vyššie, do značnej miery ovplyvnená okamžitou polohou pracovného bodu na prietokovej charakteristike regulačnej armatúry a celej sústavy (významný vplyv autority).

Prevádzková krivka média pretekajúceho spotrebičom, teda závislosť regulovanej veličiny od prietoku média spotrebičom určuje polohu pracovného bodu na prietokovej charakteristike sústavy. Ak neexistujú exaktné závislosti, treba určiť minimálne tri základné prevádzkové stavy – pri maximálnom, nominálnom a minimálnom prietoku média. Hydraulické tlakové straty celého potrubného okruhu odpočítané od okamžitého dostupného rozdielu tlaku na zdroji určujú pri danom odbere dispozičný tlak na regulačnom ventile, ktorý bude týmto ventilom spracovaný. Treba podotknúť, že hydraulická strata potrubného systému nie je konštantná, ale je kvadraticky závislá od prietoku média týmto systémom. Súčasne treba mať na zreteli, že ani charakteristika zdroja nie je konštantná, ale vďaka vnútornému odporu zdroja klesá dostupný tlakový rozdiel na zdroji (výtláčna výška čerpadla a pod.). Preto treba určovať dispozičný tlak p na regulačnom ventile veľmi svedomite, aby skreslením tejto hodnoty neprišlo následne k návrhu zlej hodnoty Kvs .

Pri každom z týchto stavov bude takmer s istotou k dispozícii iný tlakový rozdiel na ventile. Pre každý tento stav preto musíme zvlášť spočítať Kv súčiniteľ ventilu. Až po dôkladnom zvážení všetkých výsledkov týchto výpočtov môžeme zvoliť Kvs súčiniteľ ventilu. Mali by sme sa však predovšetkým zaoberať nasledujúcimi otázkami:

- Je skutočne potrebný spočítaný maximálny prietok ventilom?
- Musíme pri tomto stave ešte regulovať (požadovať eventuálne zvýšenie prietoku v závislosti od iných regulačných parametrov)?
- Čo sa stane, keď tento prietok nebude možné dosiahnuť?
- Kde leží pracovný bod (zdvih pri zvolenej charakteristike) ventilu pri regulácii menovitého prietoku?
- Kde leží pracovný bod pri regulácii minimálneho množstva?
- Je reálne regulovať jedným ventilom maximálny aj minimálny prietok?
- Čo sa stane, keď nebudem schopný minimálne množstvo regulovať?
- Čo je horšie, nedosiahnutie maximálneho alebo minimálneho prietoku?

Napriek tomu, že predchádzajúce otázky môžu byť pre skúseneho projektanta samozrejmé, predsa sa vyplatí položiť si ich vždy, pretože obsahujú nielen návrh pri menovitých podmienkach, ale hlavne reálny prevádzkový stav pri čiastočnom zaťažení, ktorý spôsobuje práve v praxi problémy s kvalitou regulácie hlavne tepelných zariadení.

Hodnota Kvs by sa mala zvoliť až po skutočne serióznom zamyslení sa nad predchádzajúcimi otázkami. Ak treba skutočne dosiahnuť maximálny prietok, mala by byť vyššia ako Kv . Preto sa odporúča navýšenie tejto hodnoty o 25 až 30 %. Toto navýšenie zahŕňa možnú mínusovú odchýlku maximálnej Kv hodnoty od Kvs (–10 %) aj deformáciu prietokovej charakteristiky (hydraulické straty a pokles tlaku zdroja, zanesenie filtra, autorita ventilu). Navýšenie hodnoty Kvs je tiež nutné hlavne v technologických procesoch, kde sa požaduje určitá preťažiteľnosť zariadení. V reálnej praxi vo vykurovaní sa naopak odporúča väčšinou voliť Kvs hodnotu najbližšiu nižšiu. Dôvod je ten, že sa často nerobia kompletné tepelné ani hydraulické výpočty a tlakové a prietokové pomery sa, bohužiaľ, iba odhadujú, pričom sa v týchto odhadoch prejavujú tendencie istenia. Ak uvažujeme, že prvé predimenzovanie vykurovacej sústavy sa začína pri výpočte tepelných strát, pokračuje voľbou vykurovacej plochy, potrubnej siete až k zdroju tepla, nie je prekvapením, že percento predimenzovaných vykurovacích sústav býva veľké. Navyše väčší vplyv na zmenu výkonu má teplota prívodu, resp. teplotný spád, než prietok. Preto je istenie pri návrhu z hľadiska dosiahnutia prietoku v aplikáciách pre vykurovanie zbytočné.

Po voľbe K_{vs} je žiaduce skontrolovať regulačný rozsah ventilu. Pokiaľ sa pomer

$$\frac{K_{vs}}{K_{v \min}}$$

blíži hodnote teoretického regulačného pomeru ventilu alebo ju dokonca prevyšuje, treba sa zamyslieť nad možnosťou, ako sa vyhnúť problémom s reguláciou minimálneho množstva. Najprv je vhodné zistiť, či nemožno zvýšiť autoritu ventilu. To je možné buď navýšením tlaku zdroja v oblasti plného výkonu, alebo znížením hydraulických strát na potrubnej trase. Pokiaľ táto možnosť neexistuje, možno buď použiť kvalitnejší ventil s vyšším regulačným pomerom (pokiaľ taký existuje), alebo riešiť reguláciu minimálneho množstva menším, paralelne k hlavnému ventilu pripojeným ventilom (paralelne radené ventily). Kritériá voľby prietokovej charakteristiky boli už spomenuté skôr. Prvoradá je snaha, aby regulácia pracovala dobre a v celom rozsahu. Inými slovami to znamená, aby sa regulačná charakteristika celého riadeného procesu blížila k ideálnej lineárnej závislosti. Ak tejto požiadavke nemožno vyhovieť, treba zvážiť, na ktorý prevádzkový stav sa kladú vyššie nároky a ktorý je prvoradý. Lineárna charakteristika lepšie vyhovuje v oblasti vyšších pomerných prietokov a pri vysokej autorite ventilu, rovnopercentná charakteristika naopak veľmi dobre poslúži pri dôraze na dobrú citlivosť regulácie pri malých pomerných prietokoch a pri nižšej autorite ventilu. Parabolická závislosť je kompromisom medzi oboma uvedenými charakteristikami. Charakteristika LDMspline® je potom optimalizovaným variantom (priebeh zodpovedá štatisticky najčastejšej charakteristike výmenníkov tepla voda – voda) odvodeným z rovnopercentnej charakteristiky s tým rozdielom, že obsahuje deformáciu prietokovej krivky a oproti rovnopercentnej charakteristike má vyššiu citlivosť na začiatku a na konci zdvihu.

V ďalšom pokračovaní sa budeme zaoberať škrtiacimi systémami regulačných armatúr.

Zdroj textu a obrázkov: Doubrava, J. – Dytrt, V. – Klimeš, M. – Marek, V. – Novotný, O. – Suchánek, T.: Regulačné armatúry. 5. upravené a doplnené vydanie. LDM spol. s r. o., 2009.

-tog-