

A folyamatirányítás eszközei

Beavatkozó szervek - 3.

Dr. Telkes Zoltán

A beavatkozó szervek közül a szelepek kiválasztása és méretezése alapos körültekintést igényel, mivel az áramló közegek tulajdonságainak bonyolultsága miatt sokféle hatás egyidejű figyelembevétele szükséges. Ehhez segítséget nyújt a villamos analógia megfelelő korlátok közötti alkalmazása, az áramló közegek speciális tulajdonságait pedig a tervezői gyakorlatban elterjedten használt korrekciókkal lehet figyelembe venni.

A szelep villamos analógiája és szabályozástechnikai értelmezése

A szelepet csőhálózatban alkalmazzák, ahol az ott áramló mennyiséget megváltoztatja, vagyis változtatható áramlási ellenállást képez. A K_v szeleptényező a szelepnek mint szerkezetnek olyan fajlagos áramlási jellemzője, aminek az egyéb paraméterei rögzítve vannak. Ha az áramlási ellenállás villamos analógja a villamos áramkörbe helyezett ellenállás, a nyomáskülönbség megfelel a feszültségekülönbségnek, a térfogatáram analóg mennyisége pedig a villamos áram, akkor a szelep helyettesíthető olyan változtatható villamos ellenállással, amelyen a feszültségekülönbség állandó, az áram (a teljes nyitást jelentő K_{vs} esetén a minimális ellenálláshoz tartozó maximális áram) adott, és így a K_v az ellenállás reciprokával analóg mennyiség. Ezzel az analógiával különösen a soros és párhuzamos kapcsolások eredőinek számítását lehet villamos áramköri szemléletű szakemberek számára egyszerűvé tenni.

A szabályozási körben elhelyezkedő szelep teljes szabályozástechnikai tárgyalásához nem elegendő az egyszerű hatásvázlat. Ennek bemutatásaként az összenyomhatatlan közeg térfogatáramára vonatkozó kifejezést elemezzük. A térfogatáramnak a szeleptényezővel kifejezett egyenletében a függő változó (kimenőjel) a térfogatáram, bemenőjele azonban több is lehet. Ezek: a szeleptényező, a bemeneti és kimeneti nyomás (a nyomáskülönbség összetevői) és a sűrűség. További, pl. szelepleometriai hatások is lehetnek, amelyeket egy F korrekciós tényezővel vagy függvénnyel fejeznek ki, aminek több összetevője is lehet.

A térfogatáram-egyenletbe a részletes vizsgálat céljából a relatív értékek helyett a valódi fizikai mennyiségeket kell vizszo helyettesíteni:

$$Q = K_v F \sqrt{\frac{\Delta p_r}{\rho_r}} = K_v F \sqrt{\frac{\rho_0}{\Delta p_0}} \sqrt{\frac{p_1 - p_2}{\rho}} =$$

$$= K_v F \sqrt{\frac{\rho_0}{\Delta p_0}} f(p_1, p_2, \rho) .$$

A szabályozástechnikai alkalmazásoknál a tagok átviteli függvényeiben célszerű lineáris paramétereket (átviteli tényezőket) használni. A Q függvény nemlineáris, ezért munkaponti linearizálással lehet egy m munkapont környezetében lineáris tényezőket létrehozni és ezzel az egyes hatásokat jellemezni. Az egyes mennyiségek megváltozására a $dQ|_m$ növekmény:

$$dQ|_m = \frac{\partial Q}{\partial K_v} \Big|_m dK_v + \frac{\partial Q}{\partial p_1} \Big|_m dp_1 + \frac{\partial Q}{\partial p_2} \Big|_m dp_2 + \frac{\partial Q}{\partial \rho} \Big|_m d\rho + \frac{\partial Q}{\partial F} \Big|_m dF$$

$$dQ|_m = a_1 dK_v + a_2 dp_1 + a_3 dp_2 + a_4 d\rho + a_5 dF .$$

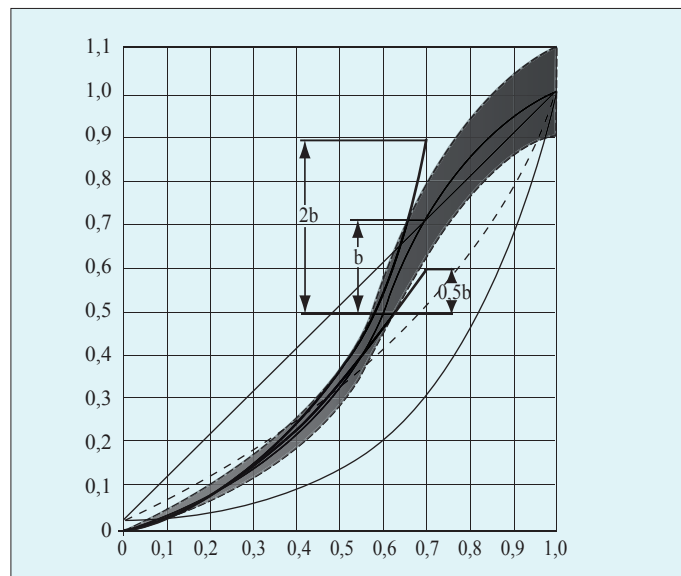
A szeleptényező H -tól való függését kifejező egyenlet különválasztható. Az a_0 -val jelölt H szerinti differenciálhányados lineáris szelepnél állandó, egyenszázalékos szelepnél pedig exponenciális függvény (1. ábra).

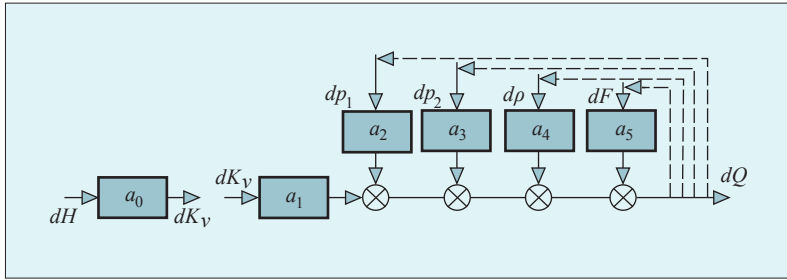
$$a_0 = \frac{dK_v}{dH} = \frac{d}{dH} \left(A(H) \phi \sqrt{2 \frac{\Delta p_0}{\rho_0}} \right) .$$

A parciális differenciálhányadosok indexszel ellátott és a konstansokkal helyettesített munkaponti értékei konkrét m munkapontban kiszámíthatók (a_1, a_2, a_3, a_4 és a_5). Bonyolítja a helyzetet, hogy az esetek többségében a kimenő térfogatáram visszahat a nyomásokra, gyakran a korrekciós tényezőre is. Ezt a visszahatást az egyenleteknek megfelelő hatásvázlatban (2. ábra) lehet feltüntetni, ahol a szelep két hatásvázlatrésre osztva jelenik meg, és a visszahatásokat szaggatott vonalak jelzik.

Ennek a módszernek az az előnye, hogy a 2. ábra jobb oldali hatásvázlatának használatakor csak a munkaponti paraméterek

1. ábra Módosított (a lineáris és egyenszázalékos közötti) karakterisztikájú szelep lehetséges jelleggörbe-tartománya





2. ábra A szelep teljes hatásvázlata

szerepelnek, ezért az a szabályozott szakasszal együtt tárgyalható, míg a bal oldali tag kizárólag a szelep katalógus-karakterisztikáját képviseli, és minden munkaponttól teljesen független, ezáltal a végrehajtó szervvel összevontan kezelhető. Ezzel a módszerrel az egyszerű szelepkiválasztás és a szelepnek a szabályozási körben való alkalmazáskor használható leírasi mód összekapcsolódik. A hatásvázlat alkalmas a szabályozási körben lévő szelepen megjelenő valamennyi külső változás (zavarójel) hatásának a kiszámítására.

A szelep számítása összenyomható közegre

Eddig a számítások összenyomhatatlan, állandó sűrűségű közegre vonatkoztak. Az összenyomható közegek (gázok és gőzök) áramlása során azonban változik a sűrűség, a gőzöknél pedig a nedvességtartalom is. Az áramlástanból átvett pontos áramlási egyenlet G tömegáramra bonyolult. Ráadásul az összenyomható közeg áramlása bizonyos feltételek között eléri a hangsebességet, kritikusan felüli tartományba kerül, és megváltoznak az áramlástan törvényszerűségei.

A szelepszámítási gyakorlatban azonban a gázáramlást leíró, meglehetősen bonyolult tömegáramfüggvény helyett kiindulásul az összenyomhatatlan közeg térfogatáram-egyenletét használják, de normál térfogatáramra rendezve (a tömegáramot osztják a közeg normálállapotú sűrűségével), az összenyomhatóságot pedig egy F_E kompresszibilitási tényezővel fejezik ki (lásd a következő képletcsoportot). A kritikus állapoton aluli tartományban ez a következő (ha a tömegárammal egyenértékű Q_N a normál állapotú gáz térfogatárama, Z a valóságos (reális) gáznak az ideális gáztól való eltérését kifejező tényező $-p_1 < 1$ bar esetén $Z=1 -$, valamint $K=$ állandó):

$$G_2 = F_E K_{vs} \sqrt{\frac{\Delta p / \Delta p_0}{\rho / \rho_0} \rho_1^2} ,$$

$$Q_{N \max} = \frac{G_{\max}}{\rho_N} = F_E K_{vs} \sqrt{\frac{\Delta p}{\Delta p_0} \rho_0 \frac{\rho_1}{\rho_N^2}} ,$$

$$\chi = \frac{p_1 - p_2}{p_1} = \frac{\Delta p}{p_1} = 1 - \tau ,$$

$$F_E = 1 - \frac{\chi}{3 \frac{\kappa}{1,4} \chi_t} ,$$

$$\chi_T = \frac{1}{2} \quad \text{ha } \tau_{krit} \cong \tau = 0,5 .$$

Az F_E kompresszibilitási tényező hasonló a szűkítőelemekre alkalmazott tényezőhöz az alábbiak szerint:

$$F_E = 1 - \frac{\chi}{3 \frac{\kappa}{1,4} \chi_t} = 1 - \frac{0,93(1-\tau)}{\kappa} .$$

A normálállapotú térfogatáramok:

- a kritikusan aluli áramlási sebességekre:

$$Q_{N \max} = F_E K_{vs} p_1 K \sqrt{\frac{\chi}{Z T_1 \rho_N}} ,$$

- a kritikusan felüli tartományban (ahol látható, hogy a felső képletben szereplő χ helyébe $1/2$ kerül):

$$Q_{N \max} = F_E K_{vs} p_1 K \sqrt{\frac{1}{2 Z T_1 \rho_N}}$$

A $Q_{N \max}$ -ra így meghatározott képleteket alkalmazzák a gyakorlati számításokban.

Korrekciók a szelepméretezésben

Az áramlási kép megváltozása miatt alkalmazott korrekciók

Az eddig említett áramlási egyenletek alapesetre és turbulens áramlásra vonatkoznak. Az alapesettől való eltérés a méretezésre is hatással van.

A szelepen és a csövezetéken áramló közeg a sebességváltozás következtében kialakult áramlási képtől függően zavaró hangokat, zörejeket, zajokat kelt. Az *áramlási* (aerodinamikai vagy hidrodinamikai) *zaj* az a hanghatás, amit az áramló közeg *turbulenciája*, ill. *a kritikus állapot fellépése* hoz létre. A zajok okozta *hanghatás* számszerű jellemzésére a *hangnyomást* decibelben (dB) adják meg, meghatározott távolságban és szűrővel mérve.

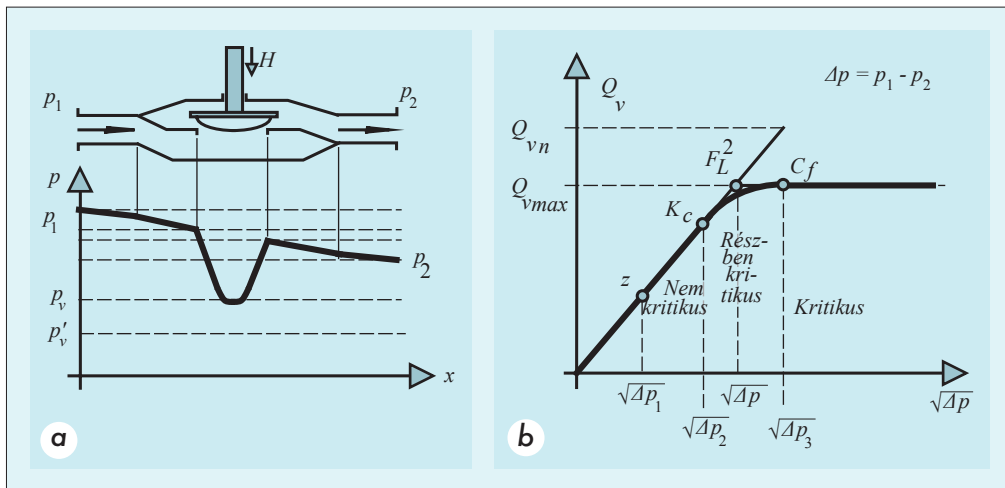
A *mechanikai rezgések* az áramlás útjába eső rugalmas részeket (elsősorban a szelepszárótestet) rezgésbe hozó áramlás révén keletkeznek, és hoznak létre hanghullámokat. A *vizlökés* akkor jön létre, amikor a folyadékáram sebessége lökészerűen csökken, és ez nyomáshullámot kelt, ami rövid idejű zajt okoz.

Az áramlási kép által alkalmazott korrekciót az összenyomhatatlan és összenyomható közegre külön tárgyalják.

Az **összenyomhatatlan** közeg áramlásában előforduló nagysebességű pontokban hidrodinamikai zaj (*turbulens zaj*, *kavitáció*) keletkezik. A szelepen a Q áramlás x irányban a $\Delta p = p_1 - p_2$ nyomáskülönbség hatására jön létre (3.a ábra). A kavitáció, ill. a befojtott áramlás (angolul *choked flow*) a szelepen az x tengely irányában végbemenő áramlás esetén akkor alakul ki, ha a sebességnövekedés miatt jelentős nyomásesés áll elő, és az így kialakult p_v nyomás az adott közeg p_v telített gőznyomása alatt van ($p_v < p_v$). Ekkor gőzbuborékok keletkeznek, melyek csökkentik az átlagsűrűséget és ezzel a tömegáramot, összeroppanásuk pedig jelentős zajjal, sőt erózióval is jár. A térfogatáramot a nyomáskülönbség négyzetgyökének függvényében ábrázolják (3.b ábra). A jelleggörbén a jelölések a következők: z -nél Δp_1 , a turbulens szelepszaj kezdete, K_c -nél Δp_2 , a kavitáció kezdete, F_L^2 a nyomás-visszanyerési tényező, C_f a befojtott áramlás határesetét jellemzi.

A befojtott áramlás hatását a képletekben jelölt F korrekciós tényező összetevőjeként az F_B tényezővel fejezik ki. Ennek összetevőit, számítási képletét és a határesetben érvényes kritikus nyomást a következő képletcsoportban adjuk meg, ahol F_F az áramló közegre jellemző szám, p_v a közeg (pl. a víz) telítettgőznyomása az adott hőmérsékleten, p_{krit} a telített gőz termodinamikai kritikus állapotának nyomása (vízre $p_{krit} = 221,2 \text{ bar}_{absz}$). A jellegzetes pontok számítási képletei:

$$F_B = F_L \sqrt{\frac{p_1 - F_F p_v}{\Delta p}} \quad \text{a befojtott áramlás hatása,}$$



3. ábra Összenyomhatatlan közeg befajtott áramlásának keletkezése a szelepen az x tengely irányában végbemenő áramlás esetén (a) és a térfogatáram változása a nyomáskülönbség négyzetgyökének függvényében (b) a jellegzetes pontok feltüntetésével

F_L értékét a szelepkatalógusok rendszerint feltüntetik, egyes szelepekre a teljes tartományban megadják. Tájékoztató értékek: elmozduló záró elemű szelep esetén a mérettel fordítva arányosan 0,65-0,95, pillangószelep és gömbszelep esetén 0,55-0,65.

A szelepek méretezésekor célszerű elkerülni a kavitáció létrejöttét. Ezt a nyomáskülönbség megfelelő megválasztásával – vagy ha ez nem lehetséges – furatos henger záró testű (4.a ábra, a furatok 5-15 mm-esek, állandó átmérőjűek vagy az áramlás irányában bővülők) vagy lépcsős forgástestű szelep alkalmazásával érik el (4.b ábra). Alkalmaznak még hengeres, dróthálószerű zajcsökkentőt, vagy

$F_F = 0,96 - 0,28 \sqrt{\frac{p'_v}{p_{krit}}}$ az áramló közegre jellemző szám,

$z = \frac{\Delta p_1}{p_1 - p_v}$ a turbulens szelepszaj kezdete,

$K_C = \frac{\Delta p_2}{p_1 - p_v}$ a kavitáció kezdete,

$F_L^2 = \frac{\Delta p}{p_1 - p_v}$ a nyomás-visszanyerési tényező,

$C_f = \frac{\Delta p_3}{p_1 - p_v}$ a befajtott áramlás határeset,

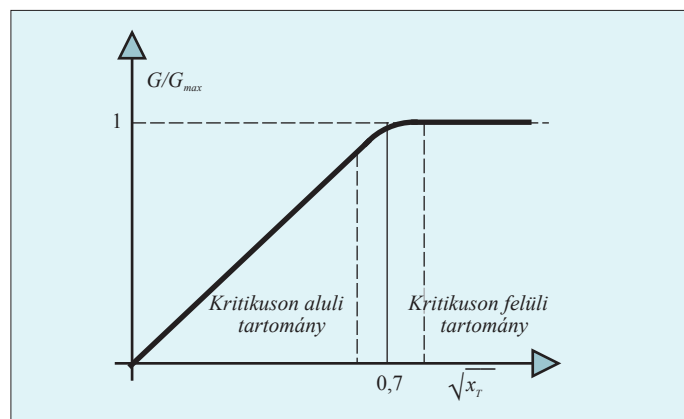
$\Delta p_{krit} = F_L^2 (p_1 - F_F p_v)$ a kritikus nyomáskülönbség.

A szeleptényezőt ekkor a következő képlettel határozzák meg:

$$K_{vs} = \frac{Q_{max}}{F_B \sqrt{\frac{\Delta p_{r,max}}{\rho_r}}}$$

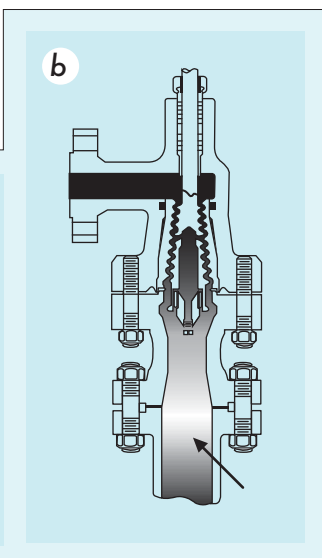
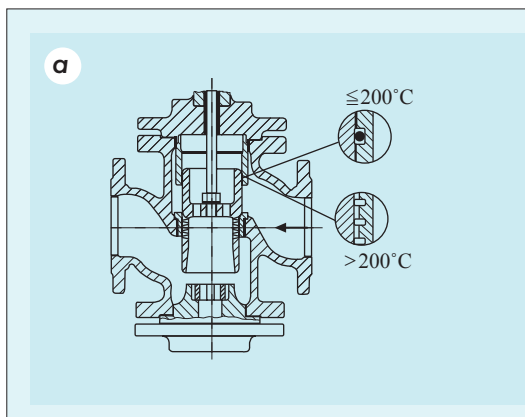
közvetlenül a szelep után beszerelt furatos tárcsát.

Összenyomható közeg esetén az áramlási zaj a kritikus nyomásviszony túllépése után, a szuperszonikus áramlás tartományában jelentős. A hangsebesség elérése után a közeg tömegáramát a nyomásviszony csökkentése nem növeli tovább, amint azt az 5. ábra a relatív nyomáskülönbség függvényében



5. ábra Összenyomható közeg áramlási függvénye: a relatív tömegáram (vagy normálállapotú Q_N térfogatáram) változása a relatív nyomáskülönbség függvényében

4. ábra Szelepek zajcsökkentési megoldásai: a) furatos henger záró-elemű szelep felül nyomáskiegyenlítő kamrával tehermentesítve, b) lépcsős forgástestű elmozduló záró-elemű szelep



mutatja. Összenyomható közegnél is alkalmazzák erre az esetre a befajtott áramlás elnevezést. (Összenyomható közegek csőben végbemenő áramlására épületen belül például 60 dB(A) megengedett környezeti zaj esetén 30 m/s az ajánlott határérték, 90 dB(A) megengedett zaj (ez már igen magas!) esetén pedig 50 m/s. A csővezetékbe kilépő közegnél a hangsebesség elkerülése rendkívül fontos. Erre hangtompítót alkalmaznak.)

A befejező részben további korrekciókat ismerünk meg, majd a bonyolult tervezési folyamatra kidolgozott számítógépes programok egyikének az alkalmazását mutatjuk be.

(Folytatjuk!)