

Körmendi Géza mk.őrnagy, főiskolai adjunktus:

GÁZTURBINA FORGÓLAPÁT-KOSZORÚ ÉS A TURBINAHÁZ
KÖZÜTTI RADIÁLIS RÉSZ HATÁSA A TURBINAFOKOZAT
HATÁSFOKÁRA

A gázturbina forgórész beékelődésének elkerülése érdekében a turbina lapátvég és az állórész között meghatározott nagyságú radiális résnek kell lennie. A radiális rés szükséges értékét hagyományos gázturbináknál a hajtómű hideg állapotában abból a megfontolásból állapítják meg, hogy sem indításakor, sem a hajtómű leállításakor ne következhesen be a lapátvég és a ház érintkezése.

A hajtómű indításakor a forgólapátok hőmérséklete gyorsabban növekszik, mint a turbinaház hőmérséklete, ugyanakkor a forgólapátok a rájuk ható centrifugális erő miatt rugalmasan meg is nyúlnak. A turbinaház geometriai formája és hőmérsékleti viszonyai kisebb átmérő-növekedést tesznek lehetővé a hajtómű indításakor, mint amilyen mértékű a forgólapátok sugárirányú megnyúlása. Ezáltal hideg hajtóműre rosszul megállapított rés esetén összeérhet a forgólapát vége és a turbinaház. A ház és a lapát érintkezése a turbina sérülését, szélsőséges esetben az álló- és forgórész összeékelődését eredményezi.

A hajtómű leállításakor a forgólapátok hőmérséklete lassabban csökken, mint a turbinaház hőmérséklete, így leállásakor is előfordulhat - helytelen szerelési rész mellett - a turbina sérülése.

A hajtómű állandósult üzemmódján a felmelegedés és a lapátok rugalmas megnyúlása miatt a radiális rés kisebb, mint álló hajtóműnél.

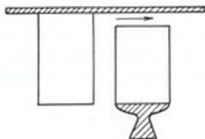
Az eddigiekből látható, hogy a radiális rés értéke a hajtómű üzemmódtól nagymértékben függ. A célszerűség azt diktálja, hogy ez minél kisebb legyen a hajtómű valamennyi üzemmódján, emiatt korszerű gázturbinás hajtóműveknél már alkalmazzák a rés-szabályozó rendszereket.

A radiális rés nagyságának hatása a fokozat működésére

A radiális rést, mint egy vékonyfalú hengergyűrűt lehet elképzelni, ahol a gyűrű belső átmérője a lapátvég-átmérő, külső átmérője a házátmérő, a gyűrű szélessége pedig közelítőleg egyenlő a lapátvégprofil húrjával.

Ebben a hengergyűrűben igen bonyolult áramlási viszonyok alakulnak ki. Magában a résben átáramló gázban is háromdimenziós áramlások jelennek meg, ezzel együtt a résben áramló gáz kölcsönhatásban van a lapátok között kialakuló páros örvényekkel.

A radiális rés kis értéke (0,5 - 1,5 mm) miatt a résben létrejövő sugárirányú áramlás elhanyagolható, így az áramlást síkáramlásként lehet fel-fogni, amely két összetevőből áll.



Tengelyirányú átáramlás

1. Az álló-terelő lapátokból kilépő gáz-áram egy része a gyűrű alakú radiális résen keresztüláramlik a forgólapátok végei felett. A gázáramlás nem tengelyirányú, hanem α_1 -nél nagyobb szögű a gáz viszkozitása és a főáramlással való kölcsönhatása miatt. Az ilyen irányú átáramlást tengelyirányúnak nevezik.



Kerületi irányú átáramlás

2. A lapát homorú és domború oldalán eltérő a gáznyomás, emiatt a homorú oldalról a lapátvég felett a gáz egy része átáramlik a domború oldalra. Az átáramlás hatása ugyanaz, mint véges szárnynál az indukált ellenállás. Ezt az átáramlást feltételesen kerületi irányúnak nevezik.

A tengelyirányban átáramló gáz viszonyított mennyisége állandó cirkulációs fokozatnál ($C_{1a} = \text{const.}$)

$$\Delta \bar{m}_t = \frac{\Delta m_t}{m} = \sigma_k \frac{\rho''}{\rho_{\text{köz}}} \quad 1.1.$$

Δm_t - a radiális résen 1 sec alatt tengelyirányban átáramló gáztömeg,

m - a turbinafokozat gázfogyasztása,

$$\sigma_k = \frac{A_{\text{rés}}}{A} = \frac{\sigma D''}{h D_{\text{köz}}} \quad 1.2. - \text{ a radiális rés viszonyított keresztmetszet területe,}$$

$A_{\text{rés}}$ - a radiális rés keresztmetszet területe,

A - a turbina áramlási csatorna keresztmetszet területe,

σ - a lapátvég és turbinaház közötti távolság,

D'' - a turbinaház belső átmérője,

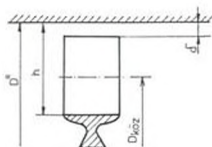
h - a lapát és a ház közötti radiális távolság,

$D_{\text{köz}}$ - a fokozat közepes átmérője,

ρ'' - a résen átáramló gáz sűrűsége,

$\rho_{\text{köz}}$ - a gáz sűrűsége a fokozat közepes átmérőjénél.

Az alkalmazott jelölések a mellékelt ábra alapján értelmezhetők:



Az 1.2. kifejezés abban az esetben igaz, ha az áramlási keresztmetszeteket kiterítjük és $\sigma \cdot D''$, valamint $h \cdot D_{köz}$ oldalhosszúságú téglalapokként fogjuk fel.

Turbinafokozat geometriai méretei

A kerületi irányban átáramló viszonyított gázmennyiség értéke az alábbi összefüggéssel határozható meg:

$$\Delta m_K = \frac{\Delta m_K}{m} = \frac{\mu \cdot b \cdot \sigma \cdot z}{\sigma \cdot D_{köz} \cdot h} \cdot \frac{g''}{g_{köz}} \cdot \frac{w_K}{w_{2a}} \quad 1.3.$$

Δm_K - a radiális résen 1 sec alatt kerületi irányban átáramló gáztömeg,

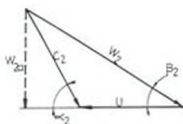
μ - átömlési tényező ($\mu \approx 0,6$),

b - lapátvég profil húr hossza,

z - lapátok száma a fokozatban,

w_K - gáz kerületi irányú lapátvég feletti átáramlási sebessége (egyszerűsítő feltételként elfogadható, hogy $w_K \approx w_2$),

w_2 - a fokozatból kilépő gáz relatív sebessége.



Turbinafokozat sebességi
háromszöge

A kilépő keresztmetszet sebességi háromszögéből látható, hogy

$$\frac{W_K}{W_{2a}} = \frac{1}{\sin \beta_2} \quad 1.4.$$

Az 1.3. és 1.4., valamint a $\mu \approx 0,6$ és $W_K \approx W_2$ feltételek figyelembevételével

$$\Delta \bar{m}_K \approx 0,6 \cdot \bar{\sigma}_K \left(\frac{b}{t} \right)^H \frac{g''}{g_{köz}} \frac{1}{\sin \beta_2} \quad 1.5.$$

Az 1.5. kifejezésben szereplő t a lapátosztás. Az 1.1. és 1.5. kifejezéseket összeadva meghatározható a radiális résen másodpercenként átáramló teljes gáztömeg:

$$\Delta \bar{m} = \Delta \bar{m}_t + \Delta \bar{m}_K = \bar{\sigma}_K \cdot \frac{g''}{g_{köz}} \left[1 + \frac{0,6}{\sin \beta_2} \left(\frac{b}{t} \right)^H \right] \quad 1.6.$$

A radiális résen átáramló gáz csökkenti a turbina nyomatékát és a hatásfok csökkenését okozza.

Állandó cirkulációs turbinafokozatoknál a nyomaték, illetve mechanikai hatásfok-csökkenés arányos a tengelyirányban átáramló gáz viszonyított tömegével.

A kerületi irányban átáramló gáz energiáját a turbina nem tudja teljes egészében hasznosítani, mivel a belépőnél közelében a gáz munkavégzés nélkül áramlik át a lapát homorú oldaláról a domború oldalára. A kilépőnél közelében kialakuló kerületi irányú átáramlás lényegesen kisebb veszteséget

okoz, mivel itt már a gáz energiájának nagyobb részét a turbina felhasználta. A kilépőnél átáramló gáz már veszteséget nem okoz, mivel energiáját átadta a turbinának. Így feltételezhető, hogy a kerületi irányban átáramló gáz energiájának fele nem veszteségként fog jelentkezni, hanem a turbina munkájává alakul át.

A radiális résen fellépő veszteségeket a rés hatásfokával lehet figyelembe venni.

$$\eta_r = 1 - \Delta\eta_r = 1 - \bar{\sigma}_k \frac{S''}{S_{\text{köz}}} \left[1 + \frac{0,3}{\sin 2} \left(\frac{b}{t} \right)^{11} \right] \quad 1.7.$$

$$\Delta\eta_r = \Delta\bar{m}_t + \frac{\Delta\bar{m}_k}{2} \quad 1.8.$$

A turbina hatásfokának számításakor a résnélküli turbina hatásfokát meg kell szorozni a rés hatásfokkal, ami azt jelenti, hogy az így meghatározott hatásfok már tartalmazza a radiális rés okozta veszteségeket is.

Az 1.8. kifejezés felhasználásával megállapítható, hogy a viszonyított radiális rés 1 %-os növekedése a turbina hatásfok 1,5 - 2,3 %-os csökkenését okozza.

A radiális rés okozta veszteség csökkentésének lehetséges módjai

A gázturbinák hőmérsékleti viszonyait a hajtómű üzemmódja határozza meg, így adott szerelési rés esetén üzem közben a radiális rés nagysága minden üzemmódon más és más. Az eltérő nagyságú radiális rés eltérő hatásfokokat eredményez az üzemmód függvényében. A tervező irodák arra törekedtek, hogy egyrészt csökkentsék a radiális rés nagyságát, ami csak egy bizonyos határig lehetséges, másrészt arra, hogy a rés értéke lehetőleg ne legyen üzemmód-függő mennyiség.

A réscsökkentés eredményei már megtalálhatók az üzemelő hajtóműveken mint a lapátvégek bandázs-gyűrűvel való egyesítése. Ez a kialakítás teljes mértékben megakadályozza a kerületi irányú átáramlást. A bandázs-gyűrű külső hengeres felületén általában kialakítanak egy 2-3 fogú labirint-fésűt, amely a turbinához erősített könnyen koptatható betét alatt fut. Ez a megoldás nagymértékben képes csökkenteni a tengelyirányú átáramlás okozta veszteséget is.



Bandázs-gyűrűvel ellátott
turbinalapát

Amennyiben a bandázs-gyűrűn nem alakítanak ki labirint-fésűt, úgy a hatásfok-növekedés lényegesen kisebb mértékű lesz.

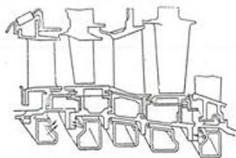
A bandázs-gyűrű kialakítása csökkenti a lapátok kisfrekvenciás vibrációs terhelését is. Meg kell azonban jegyezni, hogy a lapátvég tömegének növekedése a lapátra ható húzóigénybevétel jelentős növekedését okozza. A házhoz erősített, könnyen koptatható betét általában 0,1 - 0,15 mm vastagságú fóliából kialakított méhsejt szerkezet, amelynek magassága 2-3 mm. A méhsejt-szerkezetet a veszteségek csökkentésére töltőanyaggal töltik ki.

Töltőanyag nélküli méhsejt-szerkezet helytelen méretkiválasztása a fellépő intenzív turbulencia miatt a turbinafokozat hatásfokának csökkenését okozhatja.

A radiális rés csökkentésének másik, az előzőnél hatásosabb módszere a rés üzem módtól függő szabályozása. A hajtómű állandósult üzem módjain - elsősorban utazó üzem módon - a szabályozó rendszer mindig kisebb részt állít be, mint átmeneti üzem módokon.

A rés értékének szabályozása a turbinaház egyes alkatrészei szabályozott hűtésével valósítható meg. Például az JT9D-59/70 típusú kétáramú gázturbinás sugárhajtómű turbinájának házát levegővezető csatornák veszik körül, amelyekbe beáramló levegő mennyiségének változtatásával szabályozható a forgólapátok felett lévő házrész hőmérséklete, így geometriai méretének szabályozása biztosítja a mindenkor legkisebb radiális rés fenntartását, így a turbina hatásfokának maximális értéken tartását.

A házrész geometriai méretének szabályozása biztosítja a mindenkor legkisebb radiális rés fenntartását, így a turbina hatásfokának maximális értéken tartását.

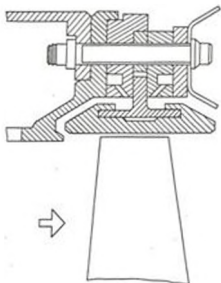


Az ábrán látható aktív rés-szabályozó-rendszer lehetővé tette utazó üzemmódon a hajtómű tüzelőanyag-fogyasztásának 0,6-0,9 %-os csökkentését.

JT9D-59/70 hajtómű turbinaház
hűtőrendszere

Egy másik alkalmazott megoldás a forgólapátok felett elhelyezkedő úszó bandázsgyűrű.

A gyűrűt szegmensek alkotják, amelyek az úszó tartógyűrűre vannak sajtolva. Az úszógyűrű tengelyirányú elmozdulását a csavarokkal rögzített támasztó betétek akadályozzák meg. A támasztó betétek hornyaiban áramló hűtőlevegőt



furatokon keresztül vezetik az úszó bandázsgyűrűre, így a levegőmennyiség változtatásával bármilyen üzemmódon biztosítható a gyűrű szükséges átmérője, ezzel pedig a minimális radiális rés.

Radiális rés aktív szabályozása úszógyűrűvel

A gyűrű radiális irányú elmozdulása excentrikus forgórész beépítés mellett is biztosítja a teljes kerület mentén a minimális rést, így a maximális turbinahatásfokot.

Az aktív résszabályozó-rendszer alkalmazását megnehezíti, hogy a rés nagysága igen sok tényezőtől függ.

A teljesség igénye nélkül a rést befolyásoló néhány ilyen tényező, a hajtómű munkaközegének hőmérséklete, fordulatszama, vibráció mértéke, a hajtómű elemeinek rugalmassága.

A sok befolyásoló tényező figyelembevétele csak számítógép alkalmazásával lehetséges, amely minden időpillanatra meghatározza a minimális rés fenntartásához szükséges hűtőlevegő mennyiségét.

Az aktív résszabályozó-rendszer bonyolultsága és ráfordítási költségei miatt jelenleg még kevés, csak igen nagy szériában gyártott gázturbinás hajtóműveknél lehet ezt a rendszert megtalálni.

FELHASZNÁLT IRODALOM

1. P.K.Kazandzsán - N.O.Tihonov - A.K.Janko: Repülőgép hajtóművek elmélete
Masinosztroenie Moszka 1983.
2. V.H. Abianc: Repülőgép gázturbinák elmélete
Masinosztroenie Moszkva 1979.
3. Sz.I. Lovinszkij - G.I. Linko - G.R. Anucskik: Repülőgép gázturbinás
hajtóművek szerkezete, tervezésének alapjai
Masinosztroenie Moszkva 1977.
4. Warren, Davis: Floating expansion control ring