

MTA doktori értekezés bírálataira adott válasz

Az értekezés bírálója: Nyíri András

Az értekezés szerzője (jelölt): Vad János

Az értekezés címe magyarul: *Lapátnyílazás alkalmazása sugár mentén növekvő lapátcirkulációra tervezett axiális átömlésű ventilátor-járókerekre*

A bíráló kritikai megjegyzéseit, kérdéseit és a rájuk adott válaszokat sorszámoztam.

Ezúton fejezem ki köszönetemet Nyíri Andrásnak értekezésem bírálataért, a kritikai észrevételekért. Bírálati munkájával segítette szakmai továbbfejlődésemet.

1) Megjegyzés: A bíráló hivatkozik az [N1] könyv bizonyos egyenleteire, valamint a bíráló által írt [N2] folyóiratcikkre. A fentiekhez kapcsolódó szemléletmódok súrlódásmentességet feltételeznek. Közli, hogy természetesen a folyadéksúrlódás is hatást gyakorol az áramlásra.

A bíráló szerint tanulságos lenne a folyadéksúrlódással nem számoló és az azt is figyelembe vevő eredmények összevetése, tekintettel arra, hogy értekezésemben az áramlási veszteséggel is foglalkozom.

Válasz:

Egyetértek a bíráló felvetésével. A folyadéksúrlódással nem számoló és az azt is figyelembe vevő számítási eredményeket az alábbi két reprezentatív esettanulmányban vetem össze. Példaként választom a BUP-29 járókereket, amely egyébként is szerepel az értekezés 4.5. fejezetében az összehasonlító esettanulmányban. (Ott: nyilazatlan, „unswept” – „USW” – lapátozás).

- A) Az áramlás részletei – példa: radiális irányú kiáramlás a szívott oldali határrétegben

Az értekezés 40. old. 2.2. táblázata különféle fizikai hatásoknak megfelelő μ_i^* paramétereket tartalmaz, amely paraméterek a szívott oldali lapát-határréteg közegének radiális irányú kiáramlását jellemzik, a főáramláshoz képest. A táblázatban szereplő μ_i^* paraméterek összege $\sum \mu_i^* \approx 0,4$. E paraméterek közül magukban foglalják a folyadéksúrlódás hatását a μ_1^* , μ_{II}^* , μ_{IV}^* paraméterek (magyarázat az értekezés 35.-36. oldalán). Ezek összege szintén $\approx 0,4$. Az esettanulmány tehát azt a szemléletet erősíti, hogy a folyadéksúrlódás alapvetően befolyásolja a szívott oldali határrétegben a radiális irányú kiáramlást – amely kulcsszerepet játszik az értekezésben.

Az értekezés témájában tehát lényeges a súrlódás figyelembe vétele – annál is inkább, hiszen az értekezésben az áramlási veszteségek alakulását is vizsgálom.

- B) Globális üzemállapot – példa: gépek jelleggörbéinek összehasonlítása

Az [N1] szakkönyv 106. old. 4.11 ábra két, azonos munkapontra tervezett, de különféle lapátsűrűséggel jellemzett axiális ventilátor jelleggörbéit hasonlítja össze – súrlódásmentességet feltételező szemléletmódban. Az ábra szerint a nagyobb lapátsűrűségű gép jelleggörbéje meredekebben emelkedik, amint a gépet a tervezési munkapontból kiindulva fojtjuk.

Az **N1. ábra** az értekezés 4.5. fejezetében szereplő nyilazatlan, „USW” (amely maga a BUP-29), és előrenyílazott, „FSW” gép mért jelleg- és összhatásfok-görbéit mutatja.

Φ : mennyiségi szám (térfogatáram osztva a gyűrűkeresztmetszettel és a lapátcsúcs kerületi sebességével)

Ψ : össznyomásszám (össznyomás-növekedés osztva a lapátcsúcs kerületi sebességével számolt dinamikus nyomással)

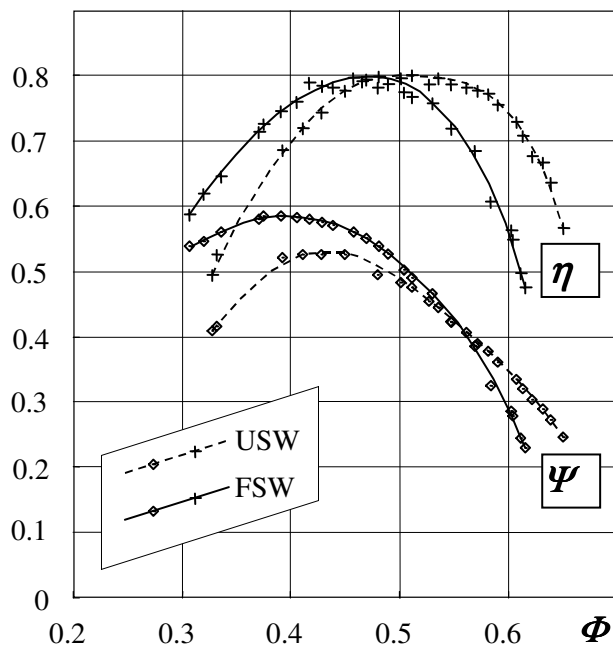
η : összhatásfok (térfogatáram X össznyomás-növekedés osztva a járókerek-tengelyen bevezetett mechanikai teljesítménnyel)

A mérést, amely az FSW gépet az USW géppel összehasonlítja, én magam végeztem. Az ábra közlésre került a [175], majd később a [25-26] cikkekben. Mindkét gépre a [$\Phi = 0,5$; $\Psi = 0,5$] tervezési munkapont jellemző; a lapátózás középsugarán a lapátsűrűségek megegyeznek (v.ö. értekezés 64. old. 3.1. táblázat).

Az alábbiakban a $\Psi(\Phi)$ jelleggörbét értékelem.

Az [N1] könyv – súrlódásmentesség feltételezésével készült – 4.11 ábrája alapján azt várnánk, hogy a két gép jelleggörbéje a tervezési pont környezetében azonos meredekségű (azonos tervezési pont, azonos lapátsűrűség). Látható azonban, hogy az előrenyilazott lapátózású gép mért jelleggörbéje a fojtás során (kisebb térfogatáramok felé haladva) meredekebben emelkedik. E trend folyamánként a jelleggörbe csúcspontja az előrenyilazásnak köszönhetően magasabb Ψ értéket vesz fel, a csúcsponthoz tartozó Φ érték („a leválás határa”) kisebb, és a jelleggörbe a csúcspont közelében laposabb, mint a nyilazatlan esetben. E kedvező trendek többek között annak köszönhetőek, hogy az előrenyilazás a szívott oldali határréteg-áramlást kedvezően módosítja. A szívott oldali határréteg áramlást pedig, a válasz A) pontja szerint, a folyadéksúrlódás alapvetően befolyásolja. Minderről részletes magyarázatot adtam az értekezés 2.4. fejezetében (v.ö. pl. a 2.9. ábrával és a hozzá fűzött ismertetéssel), valamint a [138-139] cikkekben.

Összefoglalóan: az előrenyilazásnak köszönhető, N1 ábra jelleggörbéin megfigyelhető kedvező trendek alapvetően kötődnek a folyadéksúrlódás hatásához, annak befolyásolásához.



N1. ábra. Az értekezés 4.5. fejezetében szereplő nyilazatlan („USW”) és előrenyilazott („FSW”) gép mért jelleg- és összhatásfok-görbéi [25-26][175]

Az N1. ábrához tartozóan az alábbiakban adok becslést a mérési hibára.

A hibákat a $\Phi = 0,5$; $\Psi = 0,5$; $\eta = 0,8$ névleges adatokra vetítve (relatív hibák):

- Φ relatív hibája: $\varepsilon_{\Phi} = \pm 1,5 \%$
- Ψ relatív hibája: $\varepsilon_{\Psi} = \pm 0,5 \%$
- η relatív hibája: $\varepsilon_{\eta} = \pm 1,6 \%$

A $\Phi = 0,5$ tervezési üzemállapotra vonatkozóan, a két ventilátor mért X jellemzői közti ΔX különbség relatív bizonytalansága:

- $\Delta\Phi$ jellemzőre: $u_{\Delta\Phi} = \pm 0,5 \%$
- $\Delta\Psi$ jellemzőre: $u_{\Delta\Psi} = \pm 0,4 \%$
- $\Delta\eta$ jellemzőre: $u_{\Delta\eta} = \pm 0,6 \%$

Az A) és B) vizsgálat összefoglalásaként megállapítható, hogy a folyadéksúrlódás figyelembe vétele az értekezés témájában elengedhetetlenül fontos, a lapátcsatornában kialakuló áramlás finomszerkezete szempontjából, és – ennek folyamányaként – a gép globális üzemvitele szempontjából egyaránt.

2) Megjegyzés: A bíráló megállapítja, hogy a lapátmetszetek kialakítására – tervezésére – vonatkozóan számos szerzőre utalok. Észrevételezi, hogy ezek között Czibere Tibor eljárásának egyikére sem hivatkozom.

Válasz:

Czibere Tibor vitathatatlan érdemeket szerzett az áramlástechnikai forgógépek tématerületén, a műszaki felsőoktatás és ipar szolgálatában. Munkássága igen kiterjedt.

Ahelyett, hogy e munkásságból kiragadtam volna részleteket, értekezésemben Czibere Tibor áttekintő [192] munkájára hivatkoztam, amelyet a bírálóval és további társszerzőkkel – Füzy Olivér, Hajdú Sándor, Vajna Zoltán – közösen írt.

Ebben a közleményben a szerzők megállapítják, hogy különösen axiális gépek esetén jellemző a szárnyrács-mérési eredmények tervezési felhasználása, aminek az előnye a veszteségek becsülhetősége, szemben a súrlódásmentességet feltételező elméleti számításokkal. Ezt a megállapítást erősíti Somlyódy, [59] értekezésében arra utalva, hogy – szemben a radiális és félaxiális gépekkel – az axiális átömlésű lassító lapátrácsoknál a súrlódásmentességet feltételező elméleti számítások kevésbé terjedtek el.

E megállapításokkal összhangban szerkesztettem értekezésemet. Az igen bőséges szakirodalomból főként azokra a közleményekre hivatkoztam, amelyek az

- *axiális átömlésű*
- *lassító lapátrácsokban – elsősorban ventilátor-járókerekében – kialakuló*
- *súrlódásos áramlást* tárgyalják.

A folyadéksúrlódás hatásának fontosságát az 1) bírálói megjegyzésre adott válaszomban már hangsúlyoztam. Megjegyzem, hogy Füzy Olivér, Gruber József, Somlyódy László és Vajna Zoltán munkásságából is olyan szakirodalmi közleményeket idéztem, amelyek a ventilátorokban kialakuló súrlódásos áramlással foglalkoznak – ideértve a mérést is –, vagy ventilátorok üzemvitelét tárgyalják.

Ha a bíráló fenntartja, hogy fenti korlátozások figyelembe vételével is szükséges lett volna hivatkozni Czibere Tibor további közleményeire, készséggel igazat adok neki a nyilvános vitán. Ez esetben kérem, okulásomra szíveskedjék e közlemények bibliográfiai adatait megadni.

E témát a Baranyi László bírálatára adott [B1] válaszomban is tárgyaltam.

3) Megjegyzés: A bíráló megjegyzi, hogy az [N1] szakkönyv számos – nemcsak az axiális átömlésű és összenyomhatatlan közeggel működő gépekre vonatkozó – tervezési adatot, diagramot tartalmaz. A bíráló kéri, hogy vessem össze saját eredményeimet a szakkönyvben szereplő információval.

Válasz:

A bíráló nem adott támpontot arra vonatkozóan, hogy az [N1] szakkönyv mely részleteit látja szükségesnek összevetni az értekezésben szereplő eredményekkel. Figyelembe véve a 2)

megjegyzésre adott válaszomban szereplő téma-szűkítést, továbbá azt, hogy az értekezés a lapátnyilazással foglalkozik – amelyre vonatkozóan az [N1] szakkönyv nem ad információt –, összevetésre az [N1] könyv alábbi részleteit választottam ki.

- 106. old. 4.11 ábra. Részletes magyarázat az 1) megjegyzésre adott B) válaszban.
- 17. old. 1.10. ábra: Cordier-diagram. Összhangban ezzel az ábrával, a magyarországi ventilátoros szakma alapvető szakkönyvéből, Gruber József és szerzőtársai [87] könyvéből vettem alapul a Cordier-diagramot. A [87] szakkönyvben a Cordier-diagram kifejezetten ventilátorokra vonatkozó változata szerepel. Számításokat végeztem az értekezés 4.5. fejezetében összehasonlított USW és FSW gépekre, és az értekezésben szereplő további, sugár mentén növekvő cirkulációra tervezett gépekre [144] vonatkozóan. Kimutattam, hogy e gépek mindegyike olyan optimális [átmérőtényező; fordulatszám-tényező] adatképpel rendelkezik, amely a jó hatásfokkal jellemzett szórási sávon belül van. Ez arra utal, hogy a növekvő cirkulációra történő axiálventilátor-tervezés koncepciója beilleszkedik a jó hatásfokot adó ventilátortervezési módszerek „családjába”. E vizsgálataimat a [176] cikkben publikáltam.

4) Megjegyzés: A bíráló szerint az általam javasolt előtervezési módszer érdemi megítéléséhez szükséges egy általam e módszerrel tervezett gép valamint egy hagyományos módon tervezett referencia-gép jelleggörbéinek összevetése, összehasonlítása.

Válasz:

Az N1. ábrán szerepeltettem az USW és FSW gépek mért jelleg- és összhatásfok-görbéit. A $\Psi(\Phi)$ jelleggörbéket, és az előrenyilazásnak köszönhető kedvező trendeket az 1) megjegyzésre adott válaszban kommentáltam.

Az alábbiakban a mért összhatásfokokat értékelem.

Ahogy arra felhívtam a figyelmet az értekezés 4.5. fejezetének végén, a FSW járókereket mechanikai okból nagyobb légrés-mérettel kellett legyártatnom és mérnem. Az USW járókerék-lapátok légrés-mérete a lapátmagasság 2,9 %-a, a FSW lapátoké a lapátmagasság 4 %-a volt. Alapul véve Gruber és szerzőtársai [87] instrukcióit, és az ezt megerősítő [184] számításokat, kijelenthető, hogy a FSW gép összhatásfoka mintegy 3 %-kal nagyobb lenne, ha azt is sikerült volna 2,9 % légrésmérettel tesztelni. E kijelentéssel összhangban áll Corsini és Rispoli CFD vizsgálata [26], amelyben a szerzők kimutatták, hogy azonos rés méret mellett a FSW gép összhatásfoka 2 %-kal haladja meg az USW gépét.

Az N1. ábrán látható, hogy a két gép mért összhatásfoka azonos a tervezési pontban.

Az előző kommentek figyelembe vételével, azonos rés méretek esetén, a tervezési munkapontban mintegy $\Delta\eta = 2\div3$ % összhatásfok-javulást tulajdoníthatunk az általam javasolt, előrenyilazást magában foglaló tervezési módszernek, az esettanulmányra vonatkozóan.

Fentieket részletesen megtaláljuk az értekezés 4.5. fejezetének végén.

Az előrenyilazásnak köszönhetően a tervezési pontnál kisebb térfogatáramokon a FSW gép jelentősen nagyobb összhatásfokon dolgozik, mint az USW gép. Kétségtelen viszont, hogy $\Phi > 0,5$ értékek esetén az USW gép hatásfoka nagyobb. Ez utóbbi jelenség további vizsgálatokat igényel, amelyek túlmutatnak az értekezés célkitűzésén. Az értekezés ugyanis a tervezési munkapontot tárgyalja.

IRODALMI HIVATKOZÁSOK

Az értekezésben nem szereplő szakirodalom:

- [N1] Lewis, R. I. (1996), *Turbomachinery Performance Analysis*, Butterworth-Heinemann.
- [N2] Nyíri, A. (1964), Computation of the meridional flow pattern of hydraulic machines. *Acta Techn. Hung.*, **45** (1-2), pp. 179-212.
- [N3] Vad, J., MTA doktori értekezés bírálata adott válasz. Bíráló: Baranyi László. Budapest, 2013. február 1.

Az értekezésben szereplő, e dokumentumban is hivatkozott szakirodalom:

- [25] Corsini, A., Rispoli, F. (2003), The role of forward sweep in subsonic axial fan rotor aerodynamics at design and off-design operating conditions. *ASME Paper No. GT2003-38671*.
- [26] Corsini, A., Rispoli, F. (2004), Using sweep to extend the stall-free operational range in axial fan rotors. *Proc. Instn Mech. Engrs, Part A, J. Power and Energy*, **218**, pp. 129-139.
- [59] Somlyódy, L. (1971), Axiálventilátorok tervezése és jelleggörbeszámítása. *Műszaki doktori értekezés*, Budapesti Műszaki Egyetem.
- [87] Gruber, J. és szerzőtársai: Blahó, M., Herzog, P., Kurutz, I., Preszler, L., Szentmártony, T., Vajna, Z. (1978), *Ventilátorok*. Műszaki Könyvkiadó, Budapest, 4. kiadás.
- [138] Vad, J., Horváth, Cs. The impact of the vortex design method on the stall behavior of axial flow fan and compressor rotors. *ASME TURBO EXPO*, Berlin, 2008, ASME Paper GT2008-50333, CD-ROM Proceedings (ISBN 0-7918-3824-2)
- [139] Vad, J. Radial fluid migration and endwall blockage in axial flow rotors. *Proc. Instn Mech. Engrs, Part A, J. Power and Energy*, **224**, pp. 399-417.
- [144] Vad, J., Bencze, F. (1998), Three-dimensional flow in axial flow fans of non-free vortex design. *Int. J. Heat Fluid Flow*, **19**, pp. 601-607.
- [175] Vad, J., Corsini, A. (2002), Comparative investigation on axial flow industrial fans of high specific performance with unswept and forward swept blades at design and off-design conditions. 9th International Symposium on *Transport Phenomena and Dynamics of Rotating Machinery (ISROMAC9)*, Honolulu, CD-ROM Proceedings, Paper No. FD-ABS-016. Proc. Abstracts p. 301.
- [176] Vad, J. (2002), Iterative design of high performance axial flow rotors with forward-swept blades. *GÉPÉSZET'2002 Konferencia (Conference on Mechanical Engineering)*, Budapest, Proceedings Vol. 2, pp. 679-683.
- [184] Lakshminarayana, B. (1970), Methods of predicting the tip clearance effects in axial flow turbomachinery. *ASME J. Basic Engineering*, September 1970, pp. 467-482.
- [192] Czibere, T., Fűzy, O., Hajdú, S., Nyíri, A., Vajna, Z. (1970), Nemzetközi tudományos helyzetkép az áramlástechnikai gépekkel kapcsolatos kutatásokról. *Műszaki Tudomány*, **42**, pp. 221-231.

Budapest, 2013. február 1.

Vad János