

FOKOZOTT FAJLAGOS TELJESÍTMÉNYŰ, ENERGETIKAILAG KEDVEZŐ ÜZEMŰ AXIÁLIS ÁTÖMLÉSŰ FÜSTGÁZELSZÍVÓ VENTILÁTOROK TERVEZÉSE ÉS MÉRÉSE

DESIGN AND MEASUREMENT OF AXIAL FLOW FLUE GAS EXTRACTOR FANS OF HIGH SPECIFIC PERFORMANCE AND ENERGETICALLY FAVOURABLE OPERATION

Vad, J.*

ABSTRACT

The paper presents the main features and practical advantages of controlled vortex design applied for axial flow fans. The application of such design technique has been demonstrated in the paper in an example of industrial prototype fan with outlet guide vanes, forming the basis of a new, commercially available flue gas extractor axial fan family. For aerodynamic measurements on the new fans, test rigs in „from-duct-to-surroundings” arrangement have been designed and executed. The measurements demonstrate the high specific performance and energetically favourable operation of the new fans, as result of the thorough design technique.

JELÖLÉSJEGYZÉK

u_k	[m/s]	a lapátcsúcs kerületi sebessége
Φ	[-]	mennyiségi szám: térfogatáram osztva az axiális ventilátor gyűrűkeresztmetszetével és a lapátcsúcs kerületi sebességével
Ψ	[-]	össznyomásszám: össznyomás-növekedés osztva a $\rho u_k^2/2$ fiktív dinamikus nyomással
ρ	[kg/m ³]	közegsűrűség
η	[-]	összhatásfok: a térfogatáram és az össznyomás-növekedés szorzata osztva a járókerék tengelyén bevezetett mechanikai teljesítménnyel

BEVEZETÉS

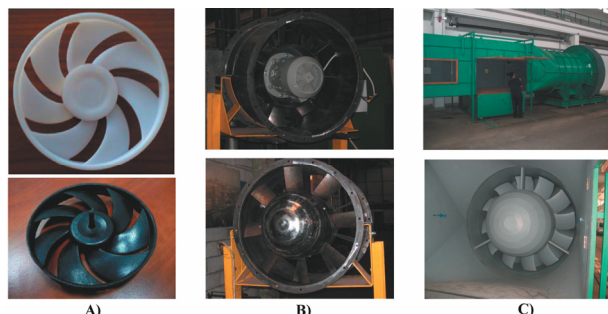
Axiális átömlésű járókerekek „szabályozott örvény” tervezése (controlled vortex design [1]) során az előírt lapátcikláció – és így az ideális össznyomás-növelés – a sugár mentén növekszik a lapátmagasság túlnyomó részén, szemben a klasszikus, sugár mentén állandó ciklációra történő tervezéssel („potenciális örvény” tervezés, free vortex design [2]). A szabályozott örvény tervezés jelentős gyakorlati előnyökkel jár:

- A nagyobb sugarakon lévő lapátmetszetek aerodinamikailag jobban kihasználhatóak, nagyobb mértékben hozzájárulnak a légtechnikai teljesítményhez. Ezáltal fokozott fajlagos teljesítményű járókerekek hozhatók létre, azaz viszonylag nagy térfogatáram és/vagy össznyomás-növekedés valósítható meg mérsékelt gépmérettel, lapátszámmal és fordulatszámmal is.
- A lapátterhelésének csökkentésével az agynál fellépő össznyomás-veszteség mérsékelhető.
- A statikus hatásfok javítható az agy átmérőjének és így a kilépési veszteségnek a csökkentésével.
- Egyszerű, könnyen gyártható lapátvezetés hozható létre, pl. a sugár mentén (közel) állandó lapátszög (mérsékelt elcsavarodás) és/vagy lapáthúrhossz révén. A lapátok kerület menti átfedése elkerülhető, miáltal költségkímélő módon, egyszerű öntő- vagy fröccsöntő szerszámmal megvalósítható, egybeönthető járókerék (kerékagy + lapátok együtt) hozható létre.
- Többfokozatú gépben a járókerékből kilépő közeg áramlási szöge beállítható úgy, hogy a következő lapátrácsra a közeg belépése áramlástanilag kedvező szögben történjen.
- A lapátmagasság túlnyomó része mentén növekvő, de a lapátcsúcs közelében mérsékelt lapátciklációt előírva, a kerületen a kilépő közeg perdülete mérsékelhető. Ezáltal a sugárventilátorok által keltett levegősugár stabilitása, koherenciája javítható.
- A kilépő axiális sebességeloszlás testre szabható az adott alkalmazásban. Például villanymotor-hűtőventilátorok esetén, mivel a hűtőbordák a motor kerületén helyezkednek el, fokozott légáramlást célszerű megvalósítani a nagyobb sugarakon, míg a kisebb sugarakon a légáramlás szerepe másodlagos.

A szabályozott örvény tervezés magyarországi alkalmazását Somlyódy [3] munkája alapozta meg. A tervezési módszer az elmúlt évtizedekben folyamatosan fejlődött és sokféle termékben hasznosult Magyar-

* egyetemi docens, BME Áramlástan Tanszék

országon. E helyütt csak a legfrissebb, impakt faktoros folyóiratokban megjelent cikkeket idézem, melyek e témában a Szent István Egyetemen [4] valamint a BME-n [5] készültek. Az **1. ábra** példákat mutat az általam magyarországi felhasználók, iparvállalatok számára szabályozott örvény módszerrel tervezett és megvalósult axiálventilátorokra [6-8].



1. ábra: Példák magyarországi felhasználók, ipari vállalatok számára tervezett axiális ventilátorokra, a lapátsúcs-átmérők megadásával.

A) Villamos motor-hűtő ventilátorok, $\varnothing 110$ mm, $\varnothing 124$ mm [6]. B) Nagy vetőtávolságú ventilátor, $\varnothing 710$ mm [7]. C) Szélcsatorna-ventilátor, $\varnothing 2000$ mm [8]

A cikk a szabályozott örvény módszer újabb alkalmazását mutatja be, melynek keretében ventilátor prototípust terveztem az Air-Technik Légtechnikai Kft. számára. E tervezés képezte alapját a jelenleg már piaci forgalomban elérhető, új HV-BVHA füstgázelszívó ventilátor termékcsaládnak [9].

TERVEZÉSI SZEMPONTOK ÉS MÓDSZER; A MEGVALÓSULT VENTILÁTOROK

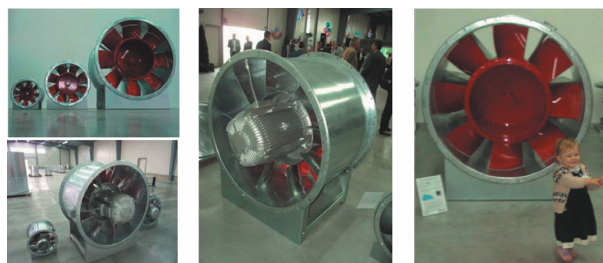
A szabályozott örvény tervezés alkalmazását a következő szempontok tették szükségessé:

- A tüzeset során elvárt gyors és intenzív füstmentesítés érdekében fokozott fajlagos teljesítmény; viszonylag nagy nyomásnövelési igény.
- A forszírozott üzem ellenére a hatásfok legyen kedvező, annak érdekében, hogy az elvárt légtechnikai teljesítményt a lehető legkisebb névleges tengelyteljesítményű hajtó motor biztosítsa, így csökkentve a költséget.
- A versenyképes ár érdekében egyszerűen gyártható lapátgeometria: állandó hűrhossz, mérsékelt elcsavarodás.

A prototípus ventilátor agy/lapátsúcs átmérőviszonyára 0.56, a járókerék lapátszámára 5, az utóterelő lapátszámára 9 értékeket választottam. A kellően nagy utóterelő-lapátszám és így megfelelő szilárdságtani jellemzők által a terelőlapátok egyúttal a motor-tartóborda szerepet is ellátják. Az elemi járókerék- és utóterelő lapátrácsokat szárnyrács-mérési adatok [10] alapján méreteztem. A költségkímélés érdekében a megrendelő instrukciója alapján körív vázvonalt

lemezlapátot vettem alapul. A cirkuláció sugár menti eloszlását [11] nyomán hatványfüggvényként írtam elő. A tervezés során figyelembe vettem, hogy a szabályozott örvény módszer révén a lapátszámokban jelentős radiális sebességkomponens lép fel. Ennek megfelelően az elemi lapátrácsok számítását kúpos áramfelületek feltételezésével végeztem el [11]. A szabályozott örvény tervezésnek megfelelő üzemi állapot a csatornafali határréteg vastagságát fokozza. A megnövekedett kizorítási vastagságot – amely befolyásolja az axiális sebességeloszlást a lapátmagasság mentén – az [5] cikkben bemutatott irányelvek alapján építettem be a tervezési eljárásba. A veszteségek mérséklése érdekében biztosítottam, hogy a Lieblein diffúziós tényező [12] ne lépje túl a [13] szakirodalomban ajánlott 0.6 küszöbértéket – viszont attól ne is maradjon el nagymértékben a külső lapátmetszeteken sem, a lapátmozgás megfelelő kiterheltsége, a fokozott fajlagos teljesítmény megvalósíthatósága érdekében. A megvalósult ventilátorok esetén a lapáthűrhosszból és a kerületi sebességből számítható Reynolds-szám meghaladja a [13] szakkönyvben javasolt $1.5 \cdot 10^5$ értéket, ezzel is hozzájárulva a kedvező hatásfokhoz.

A prototípus alapján elkészült a HV-BVHA füstgázelszívó ventilátor termékcsalád, melynek néhány tagját a **2. ábra** mutatja be.



2. ábra: Példák a HV-BVHA füstgázelszívó axiálventilátorokra: $\varnothing 400$ mm, $\varnothing 630$ mm, $\varnothing 1250$ mm

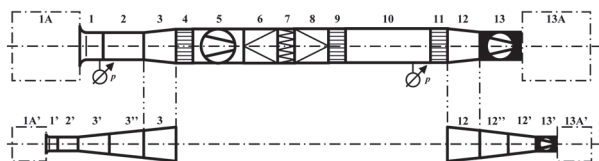
A gépek háza acéllemezből hengerelt; mindkét végén saját anyagából kihajtott, lyukasztott peremmel rendelkezik. Az utóterelő lapátsor és a motortartó konstrukció hegesztett. A járókerék acél agyra hegesztett acéllemezzel készült lapátokkal készül; hőálló villanymotorral szerelt. Az acél felületek utólagos tűzihorganyzott felületvédelmet kapnak. Az MSZ EN-12101-3 szabványban leírt F400-as hőállóság (400 °C / 120 perc) szerinti tesztelés és tanúsítás megtörtént [9].

A cikkben az adat- és információszolgáltatás az ipari titoktartási szempontok figyelembe vételével korlátozott.

MÉRŐBERENDEZÉS ÉS MÉRÉSI ELJÁRÁS

Az Air-Technik Légtechnikai Kft. által gyártott ventilátorok légtechnikai jellemzőinek mérése érdekében a vállalat megbízásából „csőből szívó – szabadba kifúvó” konfigurációnak megfelelő ventilátor-

mérőberendezést terveztem. A mérőberendezés moduláris elemekből épül fel, amelyek révén különféle mérési konfigurációk építhetők össze. Egy lehetséges összeállítás sémáját mutatja – nem méretarányosan – a **3. ábra**.



3. ábra: A csőventilátor-mérőberendezés elvi vázlata

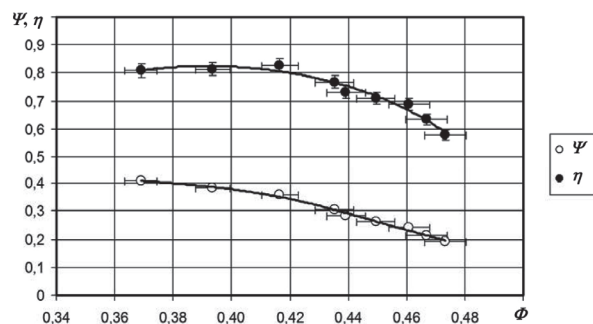
A levegő a környezetből a mérőberendezésbe az (1) beszívó tölcseren keresztül jut, amely manométerrel ellátva a légmennyiség mérésére szolgál. A levegő az igény szerint beépíthető (2) és (3) hengeres valamint diffúzoros átmeneti idomokon halad tovább. Szükség szerint alkalmazható az (5) segédventilátor, melynek előrehatását a (4) áramlásrendezővel küszöböljük ki. A (6) és (8) átmeneti idomok által közrefogva építhető be a (7) légmennyiség-állító elem. A (9) áramlásrendező után következik a (10) mérőcső, amelyben a ventilátor szívóoldalán létesített, atmoszféraküszöb képesti depressziót mérjük. A mérendő (13) ventilátor a (12) közdarabral csatlakozik a mérőcsőhöz. A ventilátor előrehatását a (11) áramlásrendező akadályozza meg. A mérések során megfelelő méretű (1A) és (13A) zavartalan rá- és kiáramlási zónát biztosítunk. Ha kisebb (1') beszívó tölcserét és/vagy (13') mérendő ventilátort kívánunk beiktatni, további közdarabokat (2', 3', 3'', 12', 12'') alkalmazunk. A mérések során a légköri nyomás meghatározására barométert, a nyomáskülönbségek mérésére digitális manométereket, a léghőmérséklet mérésére ellenállás-hőmérőt használtunk. A járókerék fordulatszámát digitális stroboszkóppal mértük. A járókerék-tengelyen bevezetett mechanikai teljesítményt a felvett villamos teljesítmény mérése alapján, a hajtó motor jelleggörbéjének ismeretében határoztuk meg. A mérőberendezés többféle méretben megvalósult. Az egyik konfiguráció néhány részletét a **4. ábra** illusztrálja. A mérések során az ISO 5801 szabvány [14] előírásaihoz alkalmazkodtunk.



4. ábra: A kialakított mérőberendezések egyike

MÉRÉSI EREDMÉNYEK

A mért jelleg- és hatásfokgörbékre dimenziótlan formában az **5. ábra** mutat példát. az Air-Technik Légtechnikai Kft. kérésére csak a katalógusban is közreadott üzemi jellemzőknek megfelelő jelleg- és hatásfokgörbe-tartományok kerültek bemutatásra.



5. ábra: Példa a mért jelleg- és hatásfokgörbe-szakaszokra

A hibásávok a mérési bizonytalanságot jelzik. A Ψ és η adatok hibásávjai az alkalmazott jelzőszimbólumok méretének nagyságrendjébe esnek. A legjobb hatásfokú pont közelében megfigyelhető Φ és Ψ értékek az axiálventilátorokra jellemző tartományokon belül – [15], 2.22. ábra adataiból kiindulva $\Phi \approx 0.1 \div 0.6$; $\Psi \approx 0.1 \div 0.4$ – viszonylag magasak, ami a ventilátor fokozott fajlagos teljesítményét jelzi. A háromdimenziós lapátcsatorna-áramlás sajátosságait figyelembe vevő tervezésnek, a határréteg-kiszorítás megfelelő modellezésének, a lapátok túlterhelését elkerülő, de megfelelő kiterheltséget biztosító intézkedéseknek, a lapátszettek összehangolt működésének köszönhetően az összhatásfok jónak mondható. $\eta = 0.83$ maximális értéket sikerült megvalósítani. Ez az érték meghaladja azon hatásfokokat, amelyeket egyszerű geometriájú, egyenes felfűzési vonalú lemezlapátoszással, szabályozott örvény tervezéssel korábban sikerült elérnünk fokozott teljesítményű ventilátorok esetén – pl. $\eta = 0.80$ mért érték a [16] publikációban –, sőt közelíti a profilos lapátoszással korábban elért hatásfok-értékeket. Utóbbira a mért maximális hatásfok $\eta = 0.86$ volt [17].

ÖSSZEFOGLALÁS

A cikk bemutatja az axiális átömlésű ventilátorok „szabályozott örvény” tervezési módszerének fő vonásait, gyakorlati előnyeit. A tervezési módszer alkalmazását ipari utóterelő ventilátor-prototípus tervezésének példáján mutatja be. E tervezés alapját képezte egy új, jelenleg már piaci forgalomban elérhető füstgázelszívó axiálventilátor termékesaládnak. Az új ventilátorok légtechnikai vizsgálata érdekében „csőből-szabadba” elrendezésű mérőhelyek kerültek megtervezésre és kivitelezésre. A mérési eredmények

tanúsága szerint a ventilátorok fokozott fajlagos légtechnikai teljesítményűek, azaz viszonylag nagy térfogatáramot és össznyomás-növekedést képesek megvalósítani mérsékelt átmérő, fordulatszám és lapátszám révén is. A ventilátorok a körültekintő tervezési módszernek köszönhetően – a viszonylag egyszerű geometriájú lemezlapátmozás és a forszírozott üzemet célzó fokozott lapátterhelés ellenére – energetikailag is kedvező tulajdonságúak: 83 %-ot elérő összhatásfokot sikerült kimérni.

SUMMARY

The main features and practical advantages of controlled vortex design applied for axial flow fans have been presented herein. The application of controlled vortex design has been demonstrated in an example of industrial prototype fan with outlet guide vanes. This design formed the basis of a new, commercially available flue gas extractor axial fan family. For aerodynamic measurements on the new fans, test rigs in „from-duct-to-surroundings” arrangement have been designed and executed. As the measurements indicate, the fans are of high specific performance, i.e. they can realize relatively high volume flow rate and total pressure rise even with moderate diameter, rotor speed, and blade count. Due to the thorough design technique, the fans are of energetically favourable operation, in spite of the relatively simple cambered plate blading and the high prescribed blade load: total efficiencies up to 83 % have been measured.

KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

A szerző köszönetét nyilvánítja ki az Air-Technik Légtechnikai Kft.-nek és az együttműködő Hungaro-Ventilátor Kft.-nek, a munka támogatásáért, valamint a publikáció engedélyezéséért. A munka szakmai tartalma kapcsolódik a „Minőségorientált, összehangolt oktatási és K+F+I stratégia, valamint működési modell kidolgozása a Műegyetemen” c. projekt szakmai célkitűzéseinek megvalósításához. A projekt megvalósítását az ÚMFT TÁMOP-4.2.1/B-09/1/KMR-2010-0002 programja támogatja. A cikk hozzájárul a jelenleg elbírálás alatt álló OTKA K 83807 projekt előkészítéséhez.

IRODALOMJEGYZÉK

- [1] GALLIMORE, S. J., BOLGER, J. J., CUMPSTY, N. A., TAYLOR, M. J., WRIGHT, P. I. AND PLACE, J. M. M. The use of sweep and dihedral in multistage axial flow compressor blading – Parts I and II. *ASME J. Turbomachinery*, 2002, **124**, pp. 521-541.
- [2] LAKSHMINARAYANA, B. *Fluid Dynamics and Heat Transfer of Turbomachinery*. John Wiley & Sons, Inc., 1996.
- [3] SOMLYÓDY, L. Axiális ventilátorok tervezése és jelleggörbeszámítása. Egyetemi doktori értekezés, BME, 1971.
- [4] SZLIVKA, F., MOLNÁR, I. Measured and non-free vortex design results of axial flow fans. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 2008, **22**, pp. 1902-1907.
- [5] VAD, J. RADIAL fluid migration and endwall blockage in axial flow rotors. *Proc. Institution of Mechanical Engineers – Part A: Journal of Power and Energy*, 2010, **224**, pp. 399-417.
- [6] VAD, J., HORVÁTH, CS., LOHÁSZ, M. M., JESCH, D., MOLNÁR, L., KOSCSÓ, G., NAGY, L., DÁNIEL, I., GULYÁS, A. Redesign of an electric motor cooling fan for reduction of fan noise and absorbed power. *Proc. 11th European Conference on Turbomachinery Fluid Dynamics and Thermodynamics (ETC'11)*, 2011, Istanbul, Turkey (benyújtva)
- [7] VAD, J. Application of controlled vortex design concept to axial flow industrial fans. *Proc. GÉPÉSZET'2010 Konferencia (Conference on Mechanical Engineering)*, 2010, Budapest, Hungary (CD-ROM) (ISBN 978-963-313-007-0), pp. 875-881.
- [8] VAD, J., KWEDIKHA, A. R. A., HORVÁTH, CS., BALCZÓ, M., LOHÁSZ, M. M., RÉGERT, T. Aerodynamic effects of forward blade skew in axial flow rotors of controlled vortex design. *Proc. Institution of Mechanical Engineers – Part A: Journal of Power and Energy*, 2007, **221**, pp. 1011-1023.
- [9] HUNGARO-VENTILÁTOR Kft. AIRJET sugárventilátorok. Axiálventilátorok. Füstgázelszívó tetőventilátorok. Termékkatalógus, 2010. info@hungaro-ventilator.hu, info@air-technik.hu
- [10] WALLIS, R. A. *Axial Flow Fans and Ducts*. John Wiley & Sons, New York, 1983.
- [11] VAD, J., BENCZE, F. Three-dimensional flow in axial flow fans of non-free vortex design. *Int. J. Heat Fluid Flow*, 1998, **19**, pp. 601-607.
- [12] LIEBLEIN, S. EXPERIMENTAL flow in two-dimensional cascades. Chapter VI in *Aerodynamic design of axial-flow compressors*. 1965, Report NASA SP-36, Washington D. C.
- [13] CAROLUS, T. *VENTILATOREN*. TEUBNER VERLAG, 2003.
- [14] ISO 5801:2007 (E). Industrial fans – Performance testing using standardized airways.
- [15] DR. GRUBER JÓZSEF és szerzőtársai. *Ventilátorok*. Műszaki Könyvkiadó, Budapest, 1978.
- [16] CORSINI, A., RISPOLI, F. Using sweep to extend the stall-free operational range in axial fan rotors. *Proc. Institution of Mechanical Engineers – Part A: Journal of Power and Energy*, 2004, **218**, pp. 129-139.
- [17] VAD, J., BENCZE, F. Nagy áramlási teljesítményű axiális átömlésű forgógépek fejlesztése. *GÉP*, 2000, **51** (1-2), pp. 23-29.