

BUDAPESTI MŰSZAKI ÉS GAZDASÁGTUDOMÁNYI EGYETEM

Koaxiális Propfan Rotorok Vizsgálata
Mikrofontömbös Nyalábformálási
Technológiával

Horváth Csaba

Témavezető: Dr. Vad János

TÉZISFÜZET

Gépészmérnöki Kar
Áramlástan Tanszék

2015. január 29.

Bevezető

Kutatásom során egy koaxiális propfan repülőgép-hajtóművet vizsgáltam mikrofontömbös nyalábformálási eljárásokkal. A koaxiális propfan rotorokat már az 1980-as években, kisebb mértékben már a 20. század közepén is kutatta a világ több vezető kutatóintézete és hajtómű-gyártója. E hajtóművek jó hatásfoka lehetővé teszi, hogy kevesebb üzemanyag-fogyasztással, ezáltal a környezetet kevésbé terhelve repüljenek az adott kategóriájú repülőgépek. Technológiai nehézségek és a gyártók részéről visszaeső érdeklődés következményeként azonban a korabeli kutatások félbeszakadtak.

A 21. század elején újra felmerült a koaxiális propfan megvalósítása, a fokozott üzemanyag árak és a szigorodó környezetvédelmi előírások eredményeként. A korábbi nehézségek kiküszöbölését lehetővé tették és teszik újabb technológiák, valamint a korszerű szimulációs és méréstechnikai lehetőségek. A környezetvédelmi előírások egyike a zajszint csökkentése. A hajtómű zajforrásainak lokalizálása és tanulmányozása eredményeként csökkenthetőek vagy akár ki is küszöbölhetőek adott zajforrások, csökkentve a zajterhelés mértékét. A zajforrások lokalizálására és tanulmányozására kiemelten alkalmas mérési módszer a mikrofontömbös nyalábformálás, amely egy gyors ütemben fejlődő aeroakusztikai vizsgálati módszer. A mikrofontömbös nyalábformálási eredmények értelmezése, a mérési és kiértékelési eljárás továbbfejlesztése kihívást jelent forgó zajforrások esetén.

A doktori értekezés három részből tevődik össze. Az első részben igazolom, hogy forgó koherens zajforrások esetén a hagyományos eljárás a zajforrásokat miért az úgynevezett Mach rádiusznál lokalizálja és nem a valódi zajforrás helyén, ezáltal megtévesztő eredményeket adva. E fontos megállapítás segítségével érthetővé válnak forgó koherens zajforrások mikrofontömbös nyalábformálási térképei. Ezen eredmény nem csak koaxiális propfan gépekre, hanem bármely forgó koherens zajforrásra általánosan érvényes.

A második részben elemzem egy koaxiális propfan tonális zajforrásait mikrofontömbös nyalábformálási térképek segítségével. A nyalábformálási térképekből összetett, hasznos információ szűrhető le egy általam bevezetett megközelítés segítségével. E módszerrel meghatározható, melyek a domináns tonális zajforrás-családok, és azok mely zajkeltési mechanizmusok miatt jönnek létre.

A harmadik részben mikrofontömbös nyalábformálási térképek segítségével elemzem egy koaxiális propfan szélessávú zajforrásait. Magyarázatot adok olyan esetekre, amelyekben adott tonális zajforrások nem a várt Mach rádiusznál jelennek meg a mikrofontömbös nyalábformálási térképeken.

A forgógépekre alkalmazott mikrofontömbös nyalábformálási módszerek kutatási alkalmazását hatékonyabbá teszik a disszertációban bemutatott módszerek. Az elért eredmények elősegítik a koaxiális propfan hajtóművek továbbfejlesztését.

Eredmények

Disszertációmban koaxiális propfan repülőgép-hajtóműveket vizsgáltam mikrofontömbös nyalábformálási eljárásokkal. Bemutattam, hogy hagyományos nyalábformálási eljárásokkal bizonyos látszólagos tonális zajforrások nem a lapátra lokalizálódnak, hanem a lapátcsúcson kívülre vagy az agyra. A félvezető eredményeket megmagyaráztam a Mach rádiusz koncepció segítségével, tovább tisztázva azokat koaxiális propfan szimulációk segítségével. A koaxiális propfan által sugárzott spirális hullámfrontok a mikrofontömbbel úgy találkoznak, hogy normálisukat visszakövetve, a Mach rádiusznál lokalizálódnak a látszólagos zajforrásokat. Ez a magyarázat erősen alátámasztja az adott nyalábformálási térképek sajátosságait. Bemutattam, hogy a forgó koherens zajforrások látszólagos zajforrásai mindig a Mach rádiusznál lokalizálódnak, függetlenül attól, hogy az a lapátcsúcson kívül vagy belül található. Bemutattam, hogy valós lapátok esetén a nyalábformálási térképek a domináns zajforrásokat a Mach rádiusztól eltérő helyre is lokalizálhatják, ha a lapátgeometria lapátról lapátra eltérő, ha az adott jellegű zajforrás nem lett figyelembe véve a szimulációban vagy ha a tonális komponens a szélessávú zajnál halkabb. Az eredmények alátámasztják, hogy a forgó koherens zajforrások a Mach rádiuszuknál lokalizálódnak, míg álló és forgó inkoherens zajforrások a valós zajforrásaikhoz lokalizálódnak.

Bemutattam egy síkbeli mikrofontömb mérési sorozatot az F31/A31 Historical Baseline Blade Set vizsgálatáról a NASA Glenn Research Center Low Speed Wind Tunnel mérőterében. Az eredmények validációs eszközt nyújtanak kutatók számára és adatbázisként szolgálnak koaxiális hajtóművek kutatásához. Egyedi megközelítéssel vizsgáltam a tonális zajforrásokat, névleges felszállási és leszállási üzemiállapotokban. Bár nem a lapát mentén lokalizálódnak a zajforrások, jelentős értékűek az eredmények, mivel információt kapunk a lapátváltási frekvencia (BPF) és tonális egymásrahatás hangok zajforrásaikról, elkülönítve azokat a többi zajforrástól. A zajforrások axiális és radiális elhelyezkedését vizsgáltam, fényt derítve a potenciális áramlás és viszkózus nyom által keltett zaj tulajdonságaira koaxiális propfanok esetén. Ez alapján rendezni tudtam az egymásrahatás zaj zajforrásait. Eredményeim elősegítik a koaxiális propfan méréstechnológia és zajcsökkentés csúcstechnológiájának fejlesztését egy olyan módszerrel, amely segítségével lokalizálni

tudunk zajforrásokat adott lapátsorokhoz és azokat szortírozni zajkeltési mechanizmus szerint. Az eredményeket csoportokba osztottam, kiemelve a jelentős tonális egymásra-hatás zaj csoportokat. Eredményeim elősegítik a koaxiális propfan zajcsökkentés csúcstechnológiájának fejlesztését, néhány csoportra korlátozva a tervezésnél figyelembe veendő tonális komponenseket. Különálló F31/A31 koaxiális propfan esetén a meghatározó zajforrás családok névleges felszállási és leszállási üzemállapotokban $XBPF_F + XBPF_A$, $1BPF_F + YBPF_A$, $2BPF_F + YBPF_A$, és $XBPF_F + 2BPF_A$. Az F és A alsó indexek rendre az első és hátsó lapátsorokat jelölik. X és Y pozitív egész számok. Más lapátsoroknál a domináns zajforrás csoportok kis mértékben eltérhetnek az itt bemutatott csoportoktól (pl. $XBPF_F + XBPF_A$ helyett $(X + 1)BPF_F + XBPF_A$).

Koaxiális propfan szélessávú zajforrásokat is vizsgáltam névleges felszállási és leszállási üzemállapotokban egy egyedi módszer segítségével, amely a szélessávú zajforrásokat az első és hátsó lapátsorok adott részeinél lokalizálta. A módszer elősegíti a koaxiális propfan csúcstechnológia fejlődését egy olyan módszerrel, amely képes koaxiális propfan szélessávú zajforrásokat lokalizálni, azonosítani és csoportosítani zajkeltési mechanizmus szerint. Az F31/A31 Historical Baseline Blade Set rotorokat vizsgáltam, kiemelve a domináns szélessávú zajforrásokat névleges felszállási és leszállási üzemállapotokban. Az eredmények megmagyarázzák azokat a tonális forgásfrekvencia felharmonikusok zajforrásait is, amelyek nem a Mach rádiuszukhoz lokalizálódnak. A tonális forgásfrekvencia felharmonikusok zajforrásainak lokalizálása elősegíti a forgógépes nyalábformálás csúcstechnológia fejlődését, bemutatva hogyan lehet nyalábformálási módszerekkel helyesen azonosítani álló és forgó inkoherens zajforrásokat. E módszer nélkül a valós zajforrásokat nem ismerhetnénk és félrevezetően szélessávú vagy forgó koherens tonális zajforrásokhoz sorolnánk ezeket a koaxiális propfan zajforrásokat.

A bemutatott módszereket alkalmazni fogom további tanulmányokban, összehasonlítva a teszt mátrix többi elemét a bemutatott névleges üzemállapotokkal. Az új nyalábformálási módszerek más kutatók számára is hasznosak lehetnek abban, hogy saját eredményeiket fel tudják dolgozni. Reményeim szerint a bemutatott módszerek és eredmények elősegítik a koaxiális propfan technológia fejlődését, nem csak a környezetvédelmi elvárások teljesítésében, hanem azok meghaladásában is.

Új tudományos eredmények

1. Forgógépek tonális zajforrásait vizsgáltam és egyedi módszert fejlesztettem ki cső nélküli forgógépek nyalábformálási eredményeinek vizsgálatára tonális zajforrások esetén.
 - a) A módszer a Mach rádiusz koncepciót alkalmazza a valós lapátváltási frekvencia és egymásrahatás tisztahang zajforrások elkülönítésére, azonosítva a valós zajforrásokat az összes közül, amely az adott sáv szélességben található.
 - b) A módszert különálló koaxiális propfanok vizsgálatában alkalmaztam. A zajforrások axiális és radiális elrendezését vizsgáltam, fényt derítve a potenciális áramlás és viszkózus nyom által keltett zaj tulajdonságaira koaxiális propfanok esetén. Ez alapján rendszereztem az egymásrahatás zaj zajforrásait. Ez elősegíti a koaxiális propfan mérés technológia és zajcsökkentés csúcstechnológiájának fejlődését egy olyan módszerrel, amely lokalizálni tudja a domináns tonális zajforrásokat adott lapátsorokhoz és azokat osztályozni tudja zajkeltési mechanizmus szerint.
 - c) Különálló koaxiális propfan tonális zajforrásokat vizsgáltam névleges felszállási és leszállási üzemi állapotokban. Az eredményeket csoportokba rendeztem, kiemelve olyan tonális egymásrahatás zaj csoportokat, amelyek nagy valószínűséggel domináns zajforrások lesznek. Eredményeim elősegítik a koaxiális propfan zajcsökkentés csúcstechnológia fejlődését, néhány csoportra korlátozva a tervezésnél figyelembe veendő tonális zajforrásokat. A meghatározó zajforrás családok különálló F31/A31 koaxiális propfan névleges felszállási és leszállási üzemi állapotokban: A táblázatot elválasztó átló ($XBPF_F + XBPF_A$ vagy $(X + 1)BPF_F + XBPF_A$, a lapátok száma szerint), és azon tonális egymásrahatás zaj csoportok, amelyeknek a terhelési harmonikusa kis harmonikus index értékkel rendelkezik (pl. $1BPF_F + YBPF_A$, $2BPF_F + YBPF_A$, $XBPF_F + 1BPF_A$ és $XBPF_F + 2BPF_A$).

Tézishez kapcsolódó publikációk: [3, 4, 5, 6, 7, 13, 14, 15]

2. Forgógépek szélessávú zajforrásait vizsgáltam és egyedi módszert fejlesztettem ki cső nélküli forgógépek nyalábformálási eredményeinek vizsgálatára szélessávú zajforrások esetén.

- a) A módszer elkülöníti a szélessávú zajforrásokat forgó koherens zajforrásoktól valamint más álló és forgó inkoherens zajforrásoktól, amelyek nem szélessávú zajforrások. Az eredmények elősegítik a cső nélküli forgógép nyalábformálási eljárások csúcstechnológiájának fejlődését egy olyan módszerrel, amely lokalizálja a valós szélessávú zajforrásokat, elkülönítve azokat más zajforrásoktól.
- b) A módszert alkalmaztam egy különálló koaxiális propfanon. A szélessávú zajforrásokat lokalizáltam, azonosítottam és szortíroztam zajkeltési mechanizmus szerint. A módszer elősegíti a koaxiális propfan mérés technika és zajcsökkentés csúcstechnológiájának fejlődését egy olyan módszerrel, amely képes koaxiális propfan szélessávú zajforrásokat lokalizálni, azonosítani és osztályozni zajkeltési mechanizmus szerint.

Tézishez kapcsolódó publikációk: [1, 2, 3, 4, 5, 6, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20]

3. Forgógépek forgásfrekvencia felharmonikusait vizsgáltam és egyedi módszert fejlesztettem ki cső nélküli forgógépek nyalábformálási eredményeinek vizsgálatára forgásfrekvencia felharmonikusok zajforrásai esetén.

- a) Az eredmények elősegítik a cső nélküli forgógép nyalábformálási eljárások csúcstechnológiájának fejlődését egy olyan módszerrel, amely lokalizálja a forgásfrekvencia felharmonikusainak valódi zajforrásait, elkülönítve azokat más zajforrásoktól.
- b) A módszert különálló koaxiális propfanon alkalmaztam. Mivel a zajforrások sem nem forgó koherensek sem nem szélessávúak, jelentős hogy a módszer tisztázza az eredményeket, lokalizálva a forgásfrekvencia felharmonikusokat valódi zajforrásaikhoz, amelyek a lapátokon található geometriai eltérésekkel vannak kapcsolatban. A módszer elősegíti a koaxiális propfan mérés technika és zajcsökkentés csúcstechnológiájának fejlődését, kapcsolatot teremtve a forgásfrekvencia felharmonikusok és azon valódi zajforrásai között, ahelyett hogy a szélessávú vagy forgó koherens tonális zajforrásokkal társítaná.

Tézishez kapcsolódó publikációk: [2, 3, 13]

4. A Mach rádiusz irodalmat kiegészítettem és tisztáztam néhány kérdést.

- a) Koaxiális propfan nyalábformálási eredményeket és koaxiális propfan által sugárzott spirális hullámfrontok szimulációját vizsgálva bemutattam, hogy a

koaxiális propfan zajforrások azért lokalizálódnak a Mach rádiusznál, mivel a hullámok mintája ugyanúgy találkozik a mikrofontömbbel, mint egy másik zajforrás hullámfrontja tenné, ha a Mach rádiusznál lenne elhelyezve.

- b) Bemutattam, hogy a forgó koherens zajforrások mindig a Mach rádiusznál lokalizálódnak, függetlenül attól, hogy az a lapát mentén, az agyon, vagy a lapátcsúcson kívül található.

Tézishez kapcsolódó publikációk: [4, 5, 6, 7]

5. A cső nélküli forgógépek nyalábformálási irodalmát kiegészítettem és tisztáztam néhány kérdést.

- a) Bemutattam, hogy nyalábformálási eljárások a forgó koherens zajforrásokat a Mach rádiuszhoz lokalizálják.
- b) Publikáltam arról, hogy nyalábformálási eljárások a forgásfrekvencia felharmonikusait a valós zajforrásaikhoz lokalizálják. Túlmutatva a cső nélküli forgógépek nyalábformálási irodalmán, eredményeim bemutatják, hogy nemcsak álló inkoherens zajforrások, álló szélessávú zajforrások, és forgó szélessávú zajforrások, hanem minden álló és forgó inkoherens zajforrás a valós zajforrásához lokalizálódik nyalábformálási eljárások által.

Tézishez kapcsolódó publikációk: [2, 3, 4, 5, 6, 7, 13]

6. A szabadon hozzáférhető irodalmat kiegészítettem egy síkbeli mikrofontömb által vizsgált különálló koaxiális propfan alapvető, feldolgozott nyalábformálási eredményeivel. Hozzáférhetővé vált egy teljes adatbázis koaxiális propfan zajforrások kutatására és kutatási eszközök validálására.

Tézishez kapcsolódó publikációk: [2, 3, 4, 5, 6]

Publikációk

- [1] T. Benedek and Cs. Horváth. Különböző Turbulenciamodellek Összehasonlítása Axiális Átömlésű Ventilátor CFD Vizsgálatában. In *Nemzetközi Gépészeti Találkozó*, pages 64–67. Erdélyi Magyar Műszaki Tudományos Társaság, April 2010.
- [2] Cs. Horváth. Investigating Counter-Rotating Open Rotor Noise Sources from a Broadband Point of View. In *Berlin Beamforming Conference*, number BeBeC-2014-13, pages 1–14, February 2014.
- [3] Cs. Horváth. Beamforming Investigation of Dominant Counter-Rotating Open Rotor Tonal and Broadband Noise Sources (Accepted for publication). *AIAA Journal*, (-(-):-, 2015.
- [4] Cs. Horváth, E. Envia, and G. G. Podboy. Limitations of Phased Array Beamforming in Open Rotor Noise Source Imaging. In *AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference*, number AIAA 2013-2098. AIAA, May 2013.
- [5] Cs. Horváth, E. Envia, and G. G. Podboy. Limitations of Phased Array Beamforming in Open Rotor Noise Source Imaging. Technical Report NASA TM-2013-217902, 2013.
- [6] Cs. Horváth, E. Envia, and G. G. Podboy. Limitations of Phased Array Beamforming in Open Rotor Noise Source Imaging. *AIAA Journal*, 52(8):1810–1817, August 2014.
- [7] Cs. Horváth, B. Tóth, P. Tóth, T. Benedek, and J. Vad. Reevaluating Noise Sources Appearing on the Axis for Beamform Maps of Rotating Sources (Accepted for publication). In *International Conference on Fan Noise, Technology and Numerical Methods*, April 2015.
- [8] Cs. Horváth and J. Vad. Development and Application of a Multi-Component Hot Wire Measuring System. In *Országos Gépészeti Konferencia*. Budapest University of Technology and Economics, May 2006.

-
- [9] Cs. Horváth and J. Vad. Validation of a CFD Simulation Using a Multi-Component Hot Wire Measurement. In *MicroCAD- International Scientific Conference*, pages 61–66. Miskolci Egyetem Innovációs és Technológia Transzfer Centruma, March 2007.
- [10] Cs. Horváth and J. Vad. High Resolution Velocity Measurements Upstream and Downstream of an Axial Flow Fan Rotor. In *Országos Gépészeti Konferencia*, number G-2008-E-10. Budapest University of Technology and Economics, May 2008.
- [11] Cs. Horváth and J. Vad. Broadband Noise Source Model Acoustical Investigation on Unskewed and Skewed Axial Flow Fan Cascades. In *Conference on Modelling Fluid Flow*, pages 682–689. Department of Fluid Mechanics, Budapest University of Technology and Economics, 2009.
- [12] Cs. Horváth and O. Vasilio. Különböző Numerikus Háló Topológiai Átmenetek Összehasonlítása CFD Vizsgálattal. In *Nemzetközi Gépészeti Találkozó*, pages 182–185. Erdélyi Magyar Műszaki Tudományos Társaság, April 2010.
- [13] G. G. Podboy and Cs. Horváth. Phased Array Noise Source Localization Measurements Made on a Williams International FJ44 Engine. In *AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference*, number AIAA 2009-3183. AIAA, May 2009.
- [14] G. G. Podboy, M. J. Krupar, D. L. Sutliff, and Cs. Horváth. Shock Characteristics Measured Upstream of Both a Forward-Swept and and an Aft-Swept Fan. In *ASME Turbo Expo*, number GT2007-27338, pages 1455–1478. ASME, 2007.
- [15] G. G. Podboy, M. J. Krupar, D. L. Sutliff, and Cs. Horváth. Shock Characteristics Measured Upstream of Both a Forward-Swept and and an Aft-Swept Fan. Technical Report NASA-TM-2007-214935, 2007.
- [16] J. Vad and Cs. Horváth. Study on the Effect of Axial Clearance Size on the Operation of an Axial Flow Electric Motor Cooling Fan. In *European Turbomachinery Conference*, April 2013.
- [17] J. Vad, Cs. Horváth, and J. G. Kovács. Aerodynamic and Aero-acoustic Improvement of Electric Motor Cooling Equipment. *Proceedings of Institute of Mechanical Engineers, Part A: Journal of Power and Energy*, 228(3):300–316, May 2014.
- [18] J. Vad, Cs. Horváth, M. M. Lohász, D. Jesch, L. Molnár, G. Koscsó, L. Nagy, I. Dániel, and A. Gulyás. Redesign of an Electric Motor Cooling Fan for Reduction of Fan Noise and Absorbed Power. In *European Turbomachinery Conference*, number 55, pages 69–79, April 2011.

- [19] J. Vad, A. R. A. Kwedikha, and Cs. Horváth. Combined Effects of Controlled Vortex Design and Forward Blade Skew on the Three-Dimensional Flow in Axial Flow Rotors. In *Conference on Modelling Fluid Flow*, pages 1139–1146. Department of Fluid Mechanics, Budapest University of Technology and Economics, September 2006.
- [20] J. Vad, A. R. A. Kwedikha, Cs. Horváth, M. Balczó, M. M. Lohász, and T. Rékert. Aerodynamic Effects of Forward Blade Skew in Axial Flow Rotors of Controlled Vortex Design. *Proceedings of Institute of Mechanical Engineers, Part A: Journal of Power and Energy*, 221(7):1011–1023, November 2007.