

14. PAMPREEN, Ronald C.: Compressor Surge and Stall. Concepts ETI, Norwich (Vermont), USA, 1993.
15. SHEHATA, Raef S.; ABDULLAH, Hussein A.; AREED, Fayez F. G.: Variable structure surge control for constant speed centrifugal compressors. Elsevier Control Engineering Practice, Vol. 17 (2009), pp. 815-833. doi:10.1016/j.conengprac.2009.02.002.
16. STEIN, Alexander, NIAZI, Saeid, SANKAR, Lakshmi N: Computational Analysis of Centrifugal Compressor Surge Control Using Air Injection. AIAA Journal of Aircraft, Vol. 38, No. 3 (2001), pp. 513-520. doi: 10.2514/2.2791
17. ZHAO, D.; BLUNIER, B.; DOU, M.; and MIRAOUI, A.: Control of an Ultra High Speed Centrifugal Compressor for the Air Management of Fuel Cell Systems. Industry Applications Society Annual Meeting (IAS), 2012 IEEE, pp.1-8, 7-11 Oct. 2012. doi: 10.1109/IAS.2012.6374007

CENTRIFUGÁLIS KOMPRESSZOROK AKTÍV POMPÁZS SZABÁLYOZÓ ESZKÖZEINEK FEJLESZTÉSE

A Ph.D. disszertáció tézisei

írta

BENEDA KÁROLY

Témavezető:

Prof. Dr. Rohács József

VASÚTI JÁRMŰVEK, REPÜLŐGÉPEK ÉS HAJÓK TANSZÉK

Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem

BUDAPEST

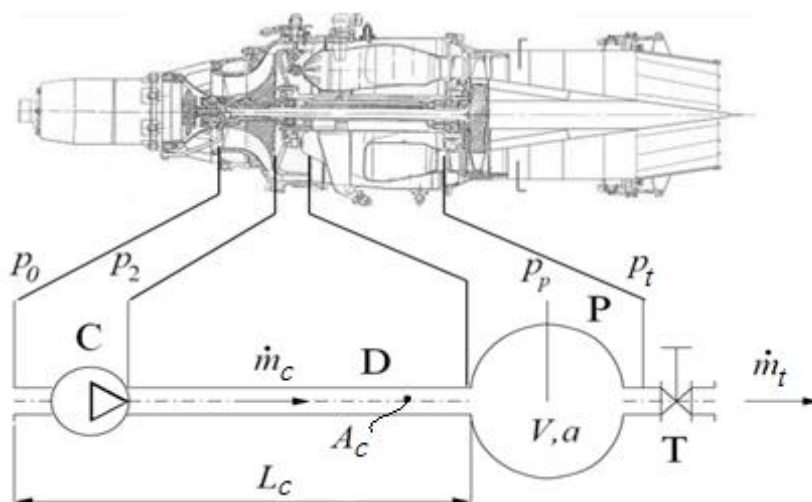
2013

1. Motiváció

A lapátos gépek kihasználtsága, melyek széles körben kerülnek alkalmazásra a közlekedésben és az ipar egyéb területein, egyre növekszik, így ezek tervezése és üzemeltetése folytonos kihívást jelent. Az egyik lehetőség a munkaközeg nyomásának növelésére áramlástanai kompresszor alkalmazása, mely kialakítását tekintve axiális vagy centrifugális lehet, illetve a kettő kombinációja, melyet félaxiálisnak vagy diagonálisnak is neveznek. Összehasonlítva a kétféle konstrukciót, az előbbi nagyobb névleges szállítást biztosít mérsékelt mértékű nyomásnövekedés mellett, míg az utóbbi ezzel ellentétes jellemzőkkel rendelkezik. Erre alapozva kijelenthető, hogy a centrifugális kompresszorok felhasználása döntően belsőégésű motorok turbófeltöltőiben, kisméretű gázturbinás egységekben (a fedélzeti gázturbinától nagy kétáramúsági fokú hajtóművekig, pl. Honeywell ALF502), földgázszállító rendszerekben [3], illetve tüzelőanyag-cellás alkalmazásokban ([2], [17]) valósul meg, a teljesség igénye nélkül.

A kompresszorokat nem önmagukban alkalmazzák, mindig valamilyen rendszer részeként, melynek általános felépítése az 1. ábrán látható. A felhasználói egységek, melyek a kompresszor mögött helyezkednek el, igen széles tartományt igényelhetnek működésük közben, ami kis szállítások esetén a kompresszor instabilitásához vezet. Függgően a rendszer kialakításától, ez a jelenség megnyilvánulhat forgó leválásban, illetve pompázásban, vagy a kettő kombinációjaként, amit az elmúlt évtizedek során beható vizsgálatokkal tártak fel (többek között [4], [6], [7], [13]). Mindkét fajta instabilitás komoly feltételeket szab az elkerülés tekintetében, és amennyiben mégis létrejönnek, akkor súlyos következményekkel járnak. A kettő közül azonban a pompázs tekinthető veszélyesebbnek, tekintettel a kialakuló nagy energiájú tömegáram- és nyomáslengésekre, mert:

- amennyiben a meghajtás független a kompresszortól (pl. aszinkron villamos motorral működtetett kompresszor tüzelőanyag-cellás rendszerben [2]), a pompázs hosszú időn keresztül fennállhat, ami a gépek károsodásához vezethet a fellépő dinamikus változó fárasztó igénybevételek miatt;
- ha a kompresszor gázturbinában kerül alkalmazásra, a periodikus tömegáram-lengések gyorsan az égéstér kialakítását eredményezheti, mely repülőgép-hajtóművek esetén rendkívüli kockázatot jelent.



1. ábra: Tipikus kompresszoros rendszer vázlata ([9] nyomán)

Tekintettel mind a pillanatnyi teljesítményre és a hosszú távú következményekre, a pompázs kialakulásának, viselkedésének és lehetséges elkerülésének vizsgálata mind elméleti, mind gyakorlati oldalról kiemelt fontossággal rendelkezik. Ahogy a kutatások mind részletesebben tártak fel a jelenség hátterét, úgy lehetett egyre jobb hatásfokú és robusztusabb stabilizáló beavatkozásokat

7. Hivatkozások

1. BALAS, Gary: Linear, Parameter-Varying Control and its Application to Aerospace Systems. Proceedings of the ICAS 2002 Congress, <http://www.icas-proceedings.net/ICAS2002/PAPERS/541.PDF>
2. BOINOV, K. O.; LOMONOVA, E. A.; VANDENPUT, A. J. A.; and TYAGUNOV, A.: Surge Control of the Electrically Driven Centrifugal Compressor. Industry Application Conference, 2005. Fourtieth IAS Annual Meeting. Conference Record of the 2005 Vol. 4, pp. 2887-2894. doi: 10.1109/IAS.2005.1518869
3. BOTROS, K. K.: Single Versus Dual Recycle System Dynamics of High Pressure Ratio, Low Inertia Centrifugal Compressor Stations. ASME Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, Vol. 133 (December 2011), doi: 10.1115/1.4004114
4. BULLOCK, Robert O.; WILCOX, Ward W.; MOSES, Jason J.: Experimental and Theoretical Studies of Surging in Continuous Flow Compressors. NACA Technical Report No. 861, Aircraft Engine Research Laboratory, Cleveland, Ohio, 1946.
5. CORTINOVIS, A.; PARESCHI, D.; MERCANGOEZ, M.; and BESSELMANN T.: Model Predictive Anti-Surge Control of Centrifugal Compressors with Variable-Speed Drives. Proceedings of the 2012 IFAC Workshop on Automatic Control in Offshore Oil and Gas Production, Norwegian University of Science and Technology, Trondheim, Norway, May 31 - June 1, 2012. pp. 251-256. DOI: 10.3182/20120531-2-NO-4020.00052
6. EPSTEIN, A. H.; FLOWCS Williams, J. E.; and GREITZER, E. M.: Active suppression of aerodynamic instabilities in turbomachinery. Journal of Propulsion and Power, Vol. 5, pp. 204-211, 1989.
7. GREITZER, Edward M.: Surge and Rotating Stall in Axial Flow Compressors, Part I-II. Journal of Engineering for Power, Vol. 98 (1976), pp. 190-217.
8. HORN, Wolfgang, SCHMIDT, Klaus-Jürgen, STAUDACHER, Stephan: Effects of Compressor Tip Injection on Aircraft Engine Performance and Stability. ASME Journal of Turbomachinery, July 2009, Vol. 131, DOI: 10.1115/1.2988159.
9. HŐS, Csaba, CHAMPNEYS, Alan, KULLMANN, László: Bifurcation Analysis of Surge and Rotating Stall in the Moore-Greitzer Compression System. IMA Journal of Applied Mathematics, April 2003, Vol. 68. pp. 205–228.
10. de JAGER, Bram: Rotating stall and surge control: A survey. Proceedings of the 34th Conference on Decision & Control, New Orleans, LA, December 1995. pp. 1857-1862. <http://alexandria.tue.nl/repository/freearticles/603796.pdf>
11. JAPIKSE, David: Centrifugal Compressor Design and Performance. Concepts ETI, Wilder (Vermont), USA, 1996.
12. MOHAMMED, M. I.; MAKSOUD, R. M. A.; NOUSSIER, Z. B.; and AMER, F. Z.: Surge Avoidance Using Speed and Valve Methodologies Controlled by PID, Fuzzy and Neural Networks Approaches. International Conference on Computer Engineering & Systems (ICCES), 2011, pp. 73-78, Nov. 29 2011-Dec. 1 2011. doi: 10.1109/ICCES.2011.6141015
13. MOORE, F. K.; and GREITZER, E. M.: A Theory of Post-Stall Transients in Multistage Axial Compression Systems: Part I – Development of Equations. ASME Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, Vol. 108 (1986), pp. 68-76, doi: 10.1115/1.3239887.

- [B12c] BENEDA Károly: Investigation of Variable Inducer Shroud Bleed as a Possibility of Centrifugal Compressor Surge Suppression. First Scientific Workshop of Faculty Doctoral Schools, Budapest, April 25, 2012. ISBN 978-963-313-062-9.
- [B12d] BENEDA Károly: Advances in CFD Simulation and Measurement System of Variable Inducer Shroud Bleed Centrifugal Compressor Surge Suppression. Second Scientific Workshop of Faculty Doctoral Schools, Budapest, November 20, 2012.
- [B12e] BENEDA Károly: Control of Centrifugal Compressor Surge Using MEMS Devices. Proceedings of the 13th Mini Conference on Vehicle System Dynamics, Identification and Anomalies (VSDIA), Budapest, 2012, *under issue*
- [B12f] BENEDA Károly: Centrifugálkompresszor fali megcsapolás vizsgálata numerikus áramlástanai módszerekkel. Repüléstudományi Konferencia, Szolnok, 2012. HU ISSN 1789-770X, pp. 824-843.
- [B13a] BENEDA Károly: CFD Simulation of Blade Load Distribution Control as Active Centrifugal Compressor Surge Suppression. Acta Avionica, Vol. 15, Issue 25, 2013. ISSN 1335-9479, pp. 13-20.
- [B13b] BENEDA Károly: Aktív belépőél fali megcsapolás dinamikai modellje centrifugálkompresszorok pompázs-szabályozására. Repüléstudományi konferencia, Szolnok, 2013, HU ISSN 1789-770X, pp. 201-223.
- [B13c] BENEDA, Károly: LQ optimal control of variable inducer shroud bleed for centrifugal compressor surge suppression. Third Scientific Workshop of Faculty Doctoral Schools, Budapest, May 28, 2013. ISBN 978-963-313-080-3.
- [B13d] BENEDA, Károly; ROHÁCS, József: Dynamic Model of Variable Inducer Shroud Bleed for Centrifugal Compressor Surge Suppression. International Review of Aerospace Engineering. *megjelenés alatt.*

6. Egyéb publikációk

- [B06] BENEDA Károly: Kisméretű kísérleti sugárhajtómű építése. Új évszázad, új technológia – Gripenek a Magyar Légierőben. Repüléstudományi Konferencia, Szolnok, 2006. HU ISSN 1789-770X
- [B08c] BENEDA Károly: Kisméretű gázturbinás sugárhajtóműves berendezés kísérleti és oktatási célokra. 70 éves a Légierő. Repüléstudományi Konferencia, Szolnok, 2008. HU ISSN 1789-770X
- [B08d] BENEDA Károly: Kisméretű gázturbinás sugárhajtóműves kísérleti berendezés és matematikai modellje. GÉP, 2008/2. ISSN 0016-8572
- [B09] BENEDA Károly: Teljes hatáskörű digitális gázturbina szabályzás (FADEC) fejlesztése kisméretű sugárhajtóműves berendezéshez. 50 év hangsebesség felett a magyar légtérben. Repüléstudományi Konferencia, Szolnok 2009. HU ISSN 1789-770X
- [B10e] BENEDA Károly: A TKT-1 sugárhajtómű fejlesztése és alkalmazása a BME repülőgépes képzésében. 60 éves a szolnoki repülőtisztképzés. Repüléstudományi Konferencia, Szolnok 2010, HU ISSN 1789-770X
- [HTB12] HORVÁTH Ádám – TÓTH Vilmos – BENEDA Károly: A TKT-1 gázturbinás sugárhajtómű tüzelőanyag- és szabályozó rendszerének fejlesztése. Repüléstudományi Konferencia, Szolnok, 2012. HU ISSN 1789-770X, pp. 854-879.

megvalósítani. Az 1980-as évek végétől, amióta az elektronika fejlődésével a hagyományos passzív pompázsgátló megoldások mellett az aktívan szabályozott rendszerek mind jobban elterjedtek [10], mint pl. belépőél lapátvégi befűvés [8], közeli fojtószelepek [15], visszakeringtetés [5], stb. alkalmazásával. Ezek, mivel dinamikusan képesek alkalmazkodni a fennálló körülményekhez, kedvezőbb működési feltételeket biztosítanak a kis szállítások esetén.

A különböző műszaki előírások és egyéb tervezési követelmények ma már elengedhetlenné teszik a gyors beavatkozásra képes, kis energiafelhasználású pompázs-szabályozó rendszereket. Így a meglévő és régóta alkalmazott megoldások finomítása, továbbá új lehetőségek kidolgozása szükséges. Bizonyos körülmények között egy korábbi passzív pompázsgátló elv alapjául szolgálhat egy új aktív rendszernek.

Összefoglalva a fent említett követelményeket, ezek olyan aktív pompázs-szabályozó rendszereket tesznek szükségessé, melyek kellően rövid reakcióidővel rendelkeznek, annak érdekében, hogy a gyorsan változó körülményekhez kellő időben tudjon alkalmazkodni, illetve feladatát kis teljesítményigénnyel tudja megvalósítani az optimális határfok érdekében.

Jelen disszertáció fő célja, hogy olyan eszközöket vizsgáljon meg, melyek eddig még nem kerültek alkalmazásra, de teljesíthetik a fentebb támasztott igényeket. A szerző ezzel a problémakörrel és megoldásaival elsőként elméletben a BME-n folytatott (hagyományos egyetemi) repülőgépezés képzés során találkozott, majd gyakorlati oldalról is megismerkedett ezekkel, amikor a Vasúti Járművek, Repülőgépek és Hajók Tanszék elődjén egy sugárhajtómű fejlesztésébe kapcsolódott be. Ezen munka lépéseiről a további publikációk listájában lehet tájékozódni.

A célokat az alábbiakban határozhatjuk meg részletesen:

1. Annak érdekében, hogy kiválaszthatóak legyenek a megfelelő fejlesztendő módszerek, alapos irodalomkutatást kell végezni a széles körben elterjedt passzív pompázsgátló és aktív – szabályozó megoldások tekintetében. Leginkább a passzív lehetőségekre célszerű koncentrálni, tekintettel arra, hogy ezen a területen nagyobb eséllyel lehet olyat találni, mely áttervezve aktív szabályozás megvalósítására alkalmas lehet.
2. A kiválasztott elveket első lépésben egyszerű, egydimenziós matematikai modell segítségével érdemes vizsgálni, amely kifejezetten ezt a célt szolgálja. A felhasznált eljárás alkalmas kell legyen az összehasonlíthatóság végett hagyományos kompresszor számítások elvégzésére is.
3. Az egydimenziós megközelítés kiterjesztendő a problémában adott teljes háromdimenziós áramlási térre, melyet célszerűen kereskedelemben kapható numerikus áramlástan (CFD) szoftverrel lehet megvalósítani.
4. Mind az egyszerűsített matematikai modell, mind pedig a CFD szimulációk eredményeit szükséges ellenőrizni, mely egy kompresszor próbapad segítségével kivitelezhető, így tehát egy korszerű adatgyűjtő rendszerrel felszerelt mérőberendezés megtervezése és megalkotása jelen munkának kiemelt feladata.
5. A validálás után, a vizsgálat végső lépéseként a szabályozó rendszer megtervezése következik, melynek feladata, hogy a megelőző lépésekben vizsgált eszközöket milyen eljárás szerint kell irányítani ahhoz, hogy hatásukra a kompresszor stabilitása biztosított legyen.

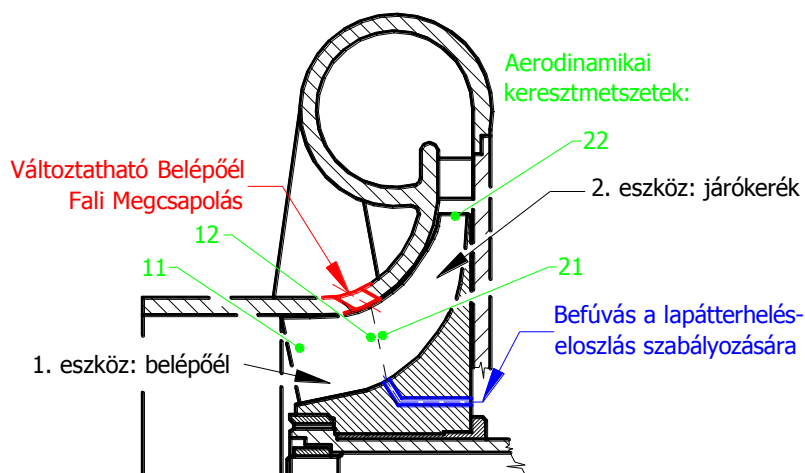
A dolgozat fő hipotézise, hogy aktív pompázs-szabályozó rendszerek létrehozhatóak bizonyos passzív megoldások alapján, melyeket ezelőtt még nem alkalmaztak ilyen körülmények között. További fontos feltételezés, hogy az így létrehozott aktív rendszerek irányítására található lineáris kvadratikus értelemben optimális szabályozás, mely feltételezi, hogy a pompázs közvetlen

közeliében fekvő munkapontban, ahol a szabályozónak be kell avatkoznia, a kompresszor dinamikai egyenletrendszere linearizálható.

A várt eredmények között kiemelendő, hogy a kutatások során olyan megoldásokat lehet megvizsgálni, melyek a kellően gyors beavatkozással rendelkező, kis teljesítményigényű, nagy hatásfokú aktív pompázs-szabályozás céljainak megfelelnek, ezáltal új alternatívát nyújtanak a gépészeti alkalmazásoknak ezen területén. További fontos eredmény lehet annak megmutatása, hogy a fejlesztett eszközök irányítása lineáris eszközökkel, ezen belül LQR eljárással is megvalósítható. Ezen felül, mindenképpen fontos annak meghatározása, hogy az adott eljárások milyen karakterisztikával rendelkeznek, milyen feltételekkel alkalmazhatóak, esetleges korlátaik, megvalósítás milyen kérdéseket vet fel.

2. Alkalmazott módszerek

Annak érdekében, hogy megállapítható legyen a potenciális pompázs-szabályozó eszközök alkalmazhatósága, illetve annak esetleges korlátai, alapos, lehetőség szerint minél több aspektust felölelő vizsgálatra van szükség. A kutatás során érdemes fokozatosan növelni a részletek mélységét, vagyis első megközelítésként egyszerűsített modell megalkotása mutatkozik célszerűnek a rendszer általános tulajdonságainak meghatározására. Ez egy speciálisan a vizsgált pompázs-szabályozó eszközök keresztmetszetében osztott, módosított matematikai modellel megvalósítható, mely a hagyományos módszereken alapul, és MATLAB környezetben került kivitelezésre, azért, hogy az abban kínált matematikai lehetőségek kihasználhatóvá váljanak. Mivel mindkét vizsgált módszer (változtatható belépőél fali megcsapolás, Variable Inducer Shroud Bleed, VISB, és lapátsatolás-szabályozás, Blade Load Distribution Control, BLDC) a belépőél és a radiális lapátsatolás közötti lapátsatolás-szakaszban helyezkedik el, a fentebb említett logikai megosztás mintegy két különálló kompresszorként kezeli a pompázs-szabályozó eszközök előtti és utáni szakaszokat, ahogyan azt a 2. ábra mutatja.



2. ábra: Megosztott kompresszor modell vázlata a pompázs-szabályozó eszközök vizsgálatára

Az egyszerűsített modell eredményei alapján részletes numerikus áramlástan (Computational Fluid Dynamics, CFD) vizsgálat következhet, mely a pompázs-szabályozó eszközök statikus és dinamikus viselkedésére fókuszál. Ezen lépésen belül is fontos a fokozatosság elvét követni. Az előzetes szimulációk során a kompresszor állandósult állapotbeli karakterisztikájára kifejtett hatásokat célszerű elemezni, majd pedig a transziens jelenségek vizsgálatával folytatódik a mélyreható analízis. A Tanszék rendelkezik ANSYS CFX jogosultsággal kutatási célokra, így ez a kereskedelmi szoftvercsomag került alkalmazásra a numerikus áramlástan vizsgálatok során.

5. A disszertációhoz kötődő publikációk

- [BN08] BENEDA Károly, NAGY András: Investigation of Compressor Surge Control Using Nonlinear Mathematical Model and Realizing by MEMS Technology. Seventh International Conference on Mathematical Problems in Engineering, Aerospace and Sciences, ICNPAA 2008. ISBN 978-1-904-86880-4. pp. 732-741.
- [B08a] BENEDA Károly: Dynamic Nonlinear Mathematical Model of Active Compressor Surge Control Devices. Proceedings of the 11th Mini Conference on Vehicle System Dynamics, Identification and Anomalies (VSDIA), Budapest, 2008, pp. 583-591. ISBN 978-963-313-011-7.
- [B08b] BENEDA Károly: Dinamikus matematikai modell centrifugálkompresszorok aktív pompázs-szabályzó rendszereinek vizsgálatára. XV. Repüléstudományi Napok, Budapest, 2008. ISBN 978-963-420-857-0
- [B10a] BENEDA Károly: Experimental Investigation of Variable Inducer Shroud Bleed in Centrifugal Compressors. Proceedings of the 12th Mini Conference on Vehicle System Dynamics, Identification and Anomalies (VSDIA), Budapest, 2010. pp. 419-426, ISBN 978-963-313-058-2.
- [B10b] BENEDA Károly: Mathematical Model of Variable Inducer Shroud Bleed in Centrifugal Compressors for Active Surge Suppression. Proceedings of the 12th Mini Conference on Vehicle System Dynamics, Identification and Anomalies (VSDIA), Budapest, 2010. pp. 411-418, ISBN 978-963-313-058-2.
- [B10c] BENEDA Károly: Automated Data Acquisition and Control for Centrifugal Compressor Test Rig. Magyar Repüléstudományi Napok Konferencia 2010. ISBN 978-963-313-032-2.
- [B10d] BENEDA Károly: Centrifugálkompresszor fali megcsapolásán alapuló aktív pompázs-szabályzásának matematikai modellje. 60 éves a szolnoki repülőtisztképzés. Repüléstudományi Konferencia, Szolnok 2010, HU ISSN 1789-770X
- [B11a] BENEDA Károly: Preliminary Results of Active Centrifugal Compressor Surge Control Using Variable Inducer Shroud Bleed. Periodica Polytechnica, Vol 39/2 (2011), pp. 49-54, ISSN 1587-3811, doi: 10.3311/pp.tr.2011-2.01
- [B11b] BENEDA Károly: Experimental Investigation of Centrifugal Compressor Surge Protection Using Variable Inducer Shroud Bleed. In: MOSATT 2011: Modern Safety Technologies in Transportation: Proceedings of the International Scientific Conference: 20-22 September 2011, Zlata Idka, Slovakia. ISBN 978-80-970772-0-4, ISSN 1338-5232, Vol. 4 (2011), pp. 18-23.
- [B11c] BENEDA Károly: Investigation of Active Compressor Surge Control Devices - Mathematical Analysis and Applications in Engineering, Aerospace and Sciences. Cambridge Scientific Publishers, 2010. ISBN 978-1-904868-79-8
- [B12a] BENEDA Károly: Numerical Simulation of MEMS-based Blade Load Distribution Control in Centrifugal Compressor Surge Suppression. In: 9th International Conference on Mathematical Problems in Engineering, Aerospace and Sciences – AIP Conference Proceedings Vol. 1493 (2012), pp. 116-123; doi: 10.1063/1.4765479.
- [B12b] BENEDA Károly: Measurement System Improvements for Variable Inducer Shroud Bleed Surge Suppression. 10th International Conference on New Technologies in Aviation Development, Košice, Slovakia, 2012. ISBN 978-80-553-1083-1.

- b. A próbapad alkalmas a kompresszor instabilitásainak létrehozására és képes ezek elfojtására az általam létrehozott VISB rendszer segítségével. A forgó leválás és pompázs létrehozása a kompresszortól különböző távolságokban elhelyezett fojtószelepek segítségével lehetséges.
- c. A mérőberendezés alaprendeltetésén felül képes különböző aero-meteorológiai jelenségek vizsgálatára is (pl. kompresszor működése jegesedés során, vagy magas páratartalmú környezetben), melyek szintén a kompresszor instabil működését idézhetik elő.

Az 5. tézishez kapcsolódó publikációk: [B10a], [B10c], [B11b], [B12b], [B12d]

4. Továbbfejlesztési lehetőségek

Mint minden kutatás esetében, jelen disszertáció sem tárta fel minden lehetséges kérdését a vizsgált témakörnek, így több továbbfejlesztési irány is adódik. Ha megvizsgáljuk az elhanyagolásokat, számos ilyen lehetőséget találunk. A fentebb részletezett tézisekre alapozva, a következők állapíthatók meg.

A VISB rendszer viszonylag kis számú relatíve nagy átmérőjű furatot és a hozzá tartozó szelepet tartalmazza. Praktikusabb lehet kisebb méretű, de az azonos áteresztő felület érdekében nagyobb számú, MEMS alapú szelepekkel rendelkező megoldás megvalósítása, amely finomabb szabályozást tehet lehetővé kisebb energiafelhasználás és gyorsabb reakcióidő mellett.

Mivel az irányítás témaköre mindössze érintőlegesen került vizsgálatra, talán a legnagyobb előrelépések ezen a téren tehetőek. Mivel jelen munka csak egyetlen lineáris megközelítésen alapuló szabályozást dolgozott ki, kézenfekvőnek mutatkozik más lineáris módszereknek, pl. a repülőiparban az közelmúltban egyre inkább elterjedő LPV-nek [1] az alkalmazása, valamint, tekintettel a kompresszor és a pompázs nemlineáris aspektusaira, egy nemlineáris szabályozó vizsgálata is lehetséges.

A másik lehetőség, a BLDC szintén sok nyitott kérdést hagyott, főként a rendszer megvalósítása terén. Legfontosabb lenne ténylegesen kivitelezni egy ilyen megoldást egy kompresszoron, és méréseket végezni a működés alaposabb megismerése érdekében. További vizsgálat tárgya lehetne a befűvés optimalizálása, különböző kialakítások összehasonlításával.

Mind a MATLAB egydimenziós matematikai modellt realizáló program, mind pedig a LabVIEW adatgyűjtő szoftver a jelenlegi kutatás igényeinek megfelelően készült, de a jövőben felmerülő igények kielégítése ezek továbbfejlesztésével szintén lehetséges. Mindkettő alkalmazható a szükséges bővítések megvalósítását követően pl. egy gázturbinás sugárhajtómű komplett matematikai modelljében vagy pedig mérőrendszerében.

A kompresszoros próbapad szintén rejt magában továbbfejlesztési lehetőségeket. A fentebb említett BLDC megvalósításán kívül, a leglényegesebb módosítás a jelenlegi statikus karakterisztika mérésére alkalmas VISB szeleprendszer cseréje volna olyan kialakításúra, amely a szükséges rövid reakcióidővel tényleges aktív pompázs-szabályozásra volna képes.

Természetesen minden számítógépes elemzés, így a CFD szimuláció eredményeit is feltétlenül szükséges ellenőrizni, validálni. Ennek érdekében a meglévő tanszéki kompresszoros próbapad továbbfejlesztésére volt szükség, melyet ki kellett egészíteni egyrészt a vizsgálandó jelenség létrehozásához szükséges eszközökkel (gyűjtőtér, távoli fojtószelep, VISB furatrendszer), valamint a tervezett mérések elvégzéséhez nélkülözhetetlen adatgyűjtő- és vezérlőrendszerrel, melyek a gyors fejlesztés érdekében USB alapú A/D átalakító hardvert és LabVIEW fejlesztőkörnyezetben létrehozott szoftvert tartalmaznak.

Ahogy a fentebb említett részfeladatok megvalósultak, az elért eredmények alapján a tervezett pompázs-szabályozó rendszer irányítástechnikai vizsgálata is elvégezhető, melynek segítségével biztosítható a stabil működés, robusztusság és hatékonyság. A rendszer dinamikai modellje MATLAB Simulink környezetben került megvalósításra, mely biztosítja a szabályozórendszer egyszerű fejlesztését. Bár a pompázs erőteljes nemlineáris hatásokat foglal magába, a rendszer működése a munkapont környezetében – beleértve a stabilizált tartományt is – lineárisnak feltételezhető. Ezen megfontoláson alapulva, lineáris kvadratikus értelemben optimális szabályozó is létrehozható.

3. Új tudományos eredmények

A belépőél fali megcsapolás (VISB) eljárás kifejlesztése

Belsőégésű motorok turbófeltöltőin, illetve indító gázturbinákon gyakran alkalmazott passzív pompázsgátló rendszer a belépőél fali megcsapolás, mely az atmoszférába, vagy egy zárt kamrába történő áteresztést jelenthet. Az előbbi számottevő hatáskromlást eredményez nagy szállításoknál, az utóbbi hosszútávon nem képes a kívánt hatás kifejtésére. Következésképpen, a változtatható belépőél fali megcsapolás megvalósítása kellően rugalmas működést biztosít, vagyis szelepek nyitásával kis szállításnál stabilizálható a kompresszor, nagy tömegáramnál bezárva biztosítható a kellő hatáskrom.

1. Tézis *Kidolgoztam a változtatható belépőél fali megcsapolás módszerére (Variable Inducer Shroud Bleed, VISB) épülő aktív centrifugálkompresszor pompázs-szabályozó rendszert, mely a széles körben elterjedt passzív, fix fali megcsapoláson alapul.*

- a. A VISB rendszerben az eredetileg fix furatok helyett állítható szelepeket alkalmaztam, melyek vezérlésével aktív pompázs-szabályozás valósítható meg a kompresszor üzemi tartományában.
- b. A VISB a stabil működési tartományt a kompresszor karakterisztikán megközelítőleg 10%-kal mozdítja el a kisebb szállítások irányába a szabályozás nélküli minimális tömegáramra vonatkoztatva, melyet matematikai modellel és szimulációkkal is mutattak, valamint kompresszor próbapadon mért eredményeim is alátámasztják.
- c. A VISB legjelentősebb előnye az állandó geometriájú passzív kiindulási rendszerhez képest, hogy nagyobb hatáskrom érhető el vele a pompázshatártól távol, nagy szállítások esetén, mert a VISB bezárható, illetve az áteresztett közeg sűrítésére kisebb teljesítményt fordít a kompresszor a VISB esetén más elterjedt megoldásokkal szemben, melyet ANSYS CFX szoftverrel is megvizsgáltam.

Az 1. tézishez kapcsolódó publikációk: [BN08], [B08a], [B10b], [B11a], [B12f]

A VISB LQ optimális irányításának megalapozása

Egy pompázs-szabályozó rendszer tervezése során elkerülhetetlen az irányítástechnikai vizsgálat. Habár maga a pompázs nemlineáris jelenség [14], az ehhez közeli stabil üzemi tartomány, melyben a szabályozásnak működnie kell, még lineáris módszerekkel is közelíthető, amit gyakran alkalmaznak is [12]. Jelen disszertációban egy lineáris kvadratikus értelemben optimális szabályozó került kidolgozásra a VISB rendszer irányítására.

2. Tézis *Kidolgoztam egy lineáris kvadratikus szabályozót (LQR) mely a VISB rendszer optimális irányítását hivatott megvalósítani, Greitzer dinamikai modellje alapján, melyet a forgórész dinamikai egyenletével egészítettem ki, hogy tetszőleges, változó fordulatszámú üzemi viszonyok is vizsgálhatóak legyenek.*

- Az szabályozó bemenőjelének a VISB dimenzióatlan nyitását, γ_{VISB} -t választottam, ellentétben a hagyományos tömegáram illetve kompresszor kilépő nyomás paraméterekkel. Létrehoztam a kompresszor linearizált állapotter modelljét, melyet MATLAB Simulink szoftverrel valósítottam meg. Az általam vizsgált kompresszor azonban elhanyagolható fordulatszám-változást mutatott a pompázs során, így végül állandó fordulatszámú közelítéssel éltem.
- Jelen szabályozórendszer képes működését a hagyományos fordulatszám, tömegáram és kompresszor kilépő nyomás mérésére alapozva megvalósítani, melyek napjainkban elterjedt lehetőségek, de ezen kívül alkalmazhatja olyan szenzorok adatait is, melyek a VISB rendszerrel azonos helyen kerülnek beépítésre, és a gyors működés, valamint csekély energiafelhasználás érdekében MEMS technológiára épülnek.
- Jelen szabályozórendszer, szemben a napjainkban széles körben alkalmazott rendszerekkel, jelentősen mérsékelt energiafelhasználást biztosít, ezáltal tranziens folyamatok során 7,5%-nyi hatásfok növekedést eredményez. Ez Boeing 737NG utasszállító repülőgépek fedélzeti gázturbináin elvégzett mérésekkel támasztottam alá.

A 2. tézishez kapcsolódó publikációk: [BN08], [B11b], [B12c], [B12e], [B13b], [B13c], [B13d]

A lapátterhelés megoszlás szabályozásán alapuló módszer kidolgozása

A kompresszor belépőélén a lapátvégeken alkalmazott levegőbefúvást napjainkban is kiterjedten kutatják [16], de a belépőél-radiális lapátcsatorna átmenetben történő megvalósítás is a pompázshatár alatt stabilizáló hatással rendelkezhet. Ez a megoldás eredetileg mint speciális lapátgeometria került kivitelezésre, melyben egy rövid konfúzoros szakaszt helyeztek el a radiális lapátcsatornában. Bár számottevő eredményt értek el vele, a járókerék nagy inerciája miatt nem terjedt el. Amennyiben a fix geometriát változtatható befúvással helyettesítjük, úgy kellően rugalmas rendszert kapunk, mely kedvezőbb hatásfokot és stabilitást biztosít a kompresszornak.

3. Tézis *A VISB-n kívül kidolgoztam az aktív lapátterhelés megoszlás változtatásán alapuló Blade Load Distribution Control (BLDC) módszert, melyet alapos CFD vizsgálatnak is alávettem. A módszer Flynn és Weber [11] kísérletén alapul, ahol egy passzív megoldást dolgoztak ki a belépőél és a radiális lapátcsatorna leválási zónáinak elkülönítésére.*

- A BLDC esetében a kompresszor agyból történő merőleges befúvást feltételeztem, a belépőél-radiális lapátcsatorna átmenetben, minden egyes lapátcsatornában. Az így bejuttatott levegő dinamikusan módosítható áramlási csatornát hoz létre mely alkalmas a leválási zónák szétválasztására, ezáltal a kompresszor pompázs megakadályozására.

- b. Alapos CFD szimulációkat hajtottam végre az ANSYS CFX szoftverrel; a numerikus számítások validációját – kísérleti berendezés híján – hasonló jellegű problémák alapján végeztem. Ezen kívül létrehoztam a módszer egyszerűsített matematikai modeljét.
- c. Mivel a BLDC is, a VISB-hez hasonlóan, dinamikusan adaptálja a kompresszor belső áramlását az aktuális viszonyokhoz, hatása a kompresszor karakterisztikára hasonló módon írható le, következésképpen a 2. tézisben bemutatott LQ optimális szabályozás erre a módszerre is biztosítható.

A 3. tézishez kapcsolódó publikációk: [BN08], [B11c], [B12a], [B13a]

A matematikai modell és adatgyűjtés szoftvercsomagjának fejlesztése

Napjainkban a mérnöki munka elképzelhetetlen számítógépek nélkül. Akár új tervezésről, akár meglévőnek az elemzéséről van szó, a lehetőségek a megfelelő szoftverek alkalmazásával jelentősen megnőnek. Ezért mind az elméleti számítások, mind pedig a kísérleti munka során a rendelkezésre álló korszerű megoldásokat széles körűen alkalmaztam.

4. Tézis *Készítettem egy szoftvercsomagot Split Compression Model néven, mely a kutatásnak mind a számítási, mind pedig a mérő-adatgyűjtő feladatait támogatja.*

- a. A VISB illetve BLDC módszerek egyszerűsített egydimenziós modelljét MATLAB környezetben írtam, mely meghatározza a kompresszor statikus karakterisztikáját. Ez a számítás a hagyományos modellektől eltérően a centrifugális kompresszort két, sorba kapcsolt kompresszorként kezeli, célszerűen abban a keresztmetszetben kettéosztva, ahol a pompázs-szabályozó elemek elhelyezkednek.
- b. Az így kifejlesztett egydimenziós matematikai modell a 2. tézisben részletezett szabályozórendszer alapját is képezi.
- c. Az adatgyűjtő modult LabVIEW szoftverrel írtam, mely magába foglalja a részletes mérések elvégzéséhez szükséges komponenseket, és biztosítja az adatok automatikus mentését a mérőrendszer számítógépének háttértárolójára, a későbbi kiértékelhetőség érdekében.

A 4. tézishez kapcsolódó publikációk: [B08a], [B10b], [B12b]

A modellek ellenőrzését szolgáló mérőberendezés kifejlesztése

Annak érdekében, hogy a különböző részletességű matematikai megközelítések eredményeit elfogadhassuk, kiemelten fontos méréseket végezni egy olyan berendezésen, amely a vizsgálttal azonos rendszert foglal magába. Mivel a BLDC kivitelezése nehézségekbe ütközött, ezért csak a VISB megvalósítása történt meg.

5. Tézis *Kidolgoztam egy mérési eljárást, és megvalósítottam egy erre alapuló kompresszor próbapadot, amely a VISB rendszer gyakorlati vizsgálatát teszi lehetővé, melyet az elméleti számítások eredményeinek igazolására használtam fel.*

- a. Létrehoztam a VISB rendszert a kompresszor próbapadon, melyhez elektronikus mérő-adatgyűjtő rendszert készítettem. Így meg tudtam határozni a VISB-vel felszerelt kompresszor statikus karakterisztikáját, és ezzel validáltam az erre a módszerre vonatkozó számításaim eredményét.