

Beneda Károly Tamás,¹ Faltin Zsolt²

Tízéves a teljes hatáskörű digitális elektronikus hajtómű-szabályozó rendszerek fejlesztése a BME VRHT-n

A gázturbinás hajtóművek napjainkban már szinte kizárólagosan digitális elektronikus szabályozó rendszerrel (Full Authority Digital Electronic Control, FADEC) rendelkeznek, jobb pontosságuk, kisebb méretük, tömegük és karbantartásigényük miatt. A BME VRHT jogelődjén 2009-ben indult meg a TKT-1 gázturbinás sugárhajtómű megalkotását és üzembe állítását követően a szabályozórendszer tervezése. A cikk bemutatja a fejlesztés főbb állomásait a kiinduló, valamint további típusokon (Deutz T216, PD-60R), a különféle alkalmazott szabályozási törvényszerűségeket (fordulatszám, hajtómű nyomás- és teljesítményviszony). Továbbá bemutatjuk azokat az algoritmusokat is (PID, lineáris kvadratikus és csúszómód-szabályozások), amelyeket FADEC-rendszereinkben kidolgoztunk. Munkánk egyik legnagyobb eredménye, hogy a gázturbinás sugárhajtómű próbapadján ezeket az algoritmusokat valós körülmények között is le tudjuk ellenőrizni.

Kulcsszavak: gázturbina, hajtómű-szabályozás, PID, LQ szervó, csúszómód-szabályozás

Ten Years of Full Authority Digital Electronic Engine Control Development at the Budapest University of Technology and Economics, Department of Aeronautics, Naval Architecture and Railway Vehicles

Gas turbine power plants are equipped with full authority digital electronic control (FADEC), thanks to their improved accuracy, reduced mass, and dimensions and maintenance requirements. At BME DANAR and its predecessor, the development of electronic control systems has begun in 2009 after TKT-1 turbojet engine test bench entered service. This paper introduces the main steps of the work on the initial and other types (PD-60R and Deutz T216), and the different control laws (rotor speed, Engine Pressure Ratio and Turbofan Power Ratio). Furthermore, the authors present

¹ Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem Közlekedésmérnöki és Járműmérnöki Kar Vasúti Járművek, Repülőgépek és Hajók Tanszék, adjunktus, e-mail: kbeneda@vrht.bme.hu, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1900-7934>

² Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem Közlekedésmérnöki és Járműmérnöki Kar Vasúti Járművek, Repülőgépek és Hajók Tanszék, doktori hallgató, e-mail: zsfaltin@vrht.bme.hu, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8361-1397>

those algorithms (PID, linear quadratic and sliding mode control) which have been implemented in their FADEC systems. Probably the most important advantage of the presented work is that it has been validated in real gas turbine environment.

Keywords: gas turbine, engine control, PID, LQ servo, sliding mode control

1. Bevezetés

A repülőgép-hajtóművek évtizedeken keresztül különböző fejlettségű hidraulikus, majd hidromechanikus szabályozórendszerekkel rendelkeztek.³ Bár igen jó megbízhatóságra tettek szert az 1970-es évekre, továbbá egész bonyolult mechanizmusokat sikerült megvalósítani (például háromdimenziós bűtyökkel vezérelt változtatható állólapátokat), ezen kialakítások nagy hátránya volt, hogy a tolóerőt nem lehetett a repülési üzemmódtartományban állandó értéken tartani, így a hajtóművek kihasználtsága, gazdaságossága nem volt optimális.⁴

Amint az 1960-as években megfelelő fejlettségi szintet értek el az elektronikus berendezések, a hajtóművek szabályozórendszereiben is kezdtek elterjedni. Elsőként a hibrid kialakítások juthattak szerephez, amelyekben az alap hidromechanikus rendszer mellett kiegészítő funkcióval bíró, legtöbbször analóg elektronika biztosítja például az utazó üzemmódon a pontosabb szabályozást, valamint azt, hogy a változó környezeti feltételek ellenére is egy adott gázkarpozícióhoz mindig ugyanaz a tolóerő tartozzék.⁵ Amint ezen eszközök megbízhatósága tovább növekedett, miközben méretük és tömegük párhuzamosan csökkent, úgy váltak lehetővé az első teljes hatáskörű, digitális szabályozórendszerek, amelyek között még találhatunk analóg áramkörökre épülőket is.⁶

Az első polgári repülésben elterjedt digitális technikán alapuló FADEC még egy csatornával rendelkezett, de nem sokkal később már megszülettek a kellő redundanciát és ezzel hibátűrést biztosító, azóta is egyeduralgató kétcsatornás konstrukciók.⁷

A gázturbinás sugárhajtóművekben számos különféle szabályozási törvényszerűséget alkalmaznak. Amennyiben állandó fúvócső-geometriával rendelkezik a hajtómű (ami a polgári repülésben szinte kizárólagosnak tekinthető), akkor egy beavatkozási lehetőségen keresztül lehet az üzemállapotot irányítani.⁸ Mivel a hajtóművek tolóereje beépített állapotban még nem mérhető, napjainkban még csak kísérleti stádiumban vannak ilyen rendszerek,⁹ ezért közvetett úton, más, könnyen mérhető és a tolóerővel arányos jellemzőkön kell alapuljon

³ Fodor Ferenc: *Gázturbinák automatikus szabályozása*. Főiskolai jegyzet, Magyar Néphadsereg Killián György Repülő Műszaki Főiskola, 1984.

⁴ Jackson Lutambo – Jiqiang Wang – Hong Yue – Georgi Dimirovsky: Aircraft turbine engine control systems development: A historical perspective. In *Proceedings of the 34th Chinese Control Conference*. Hangzhou, China, July 28–30, 2015. 5736–5741.

⁵ Andreas Linke–Diesinger: *Systems of Commercial Turbofan Engines*. Springer, 2008.

⁶ R. Kendell: Full-Authority Digital Electronic Controls for Civil Aircraft Engines. In *ASME 1981 International Gas Turbine Conference and Products Show*. Houston, Texas, USA, March 9–12, 1981. 6.

⁷ L. Paddon: Active-Control Engines. *Flight International*, 9 July 1988. 33–34.

⁸ Gennady Kulikov – Haydn A. Thompson: *Dynamic Modeling of Gas Turbines*. Springer, 2004.

⁹ Marc Bauer – Jens Friedrichs – Detlev Wulff – Christian Werner-Spatz: Measurement quality assessment of an on-wing engine thrust measurement system. In *ASME Turbo Expo 2018*. 1. (2018).

a szabályozás. Ilyenek lehetnek a fordulatszám és hajtómű nyomásviszony (Engine Pressure Ratio, EPR)¹⁰ vagy a hajtómű teljesítményviszony (Turbofan Power Ratio, TPR).¹¹

Cikkünk célja, hogy bemutassuk a BME VRHT-n tíz éve végzett fejlesztés aspektusait és eredményeit, a fent említett szempontok (rendszerek, törvényszerűségek, algoritmusok) alapján.

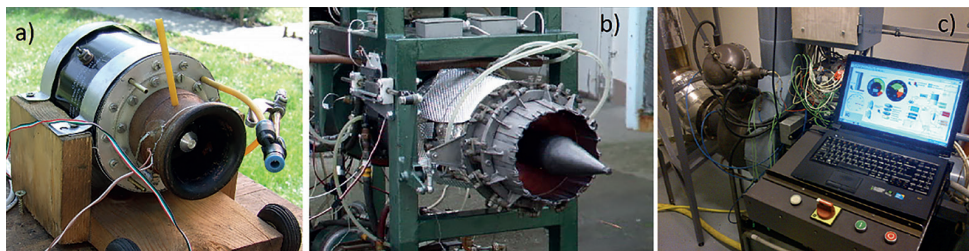
2. A VRHT-n fejlesztett FADEC-rendszerek

A BME VRHT akkori jogelődjén, a Repülőgépek és Hajók Tanszéken az 1990-es évek végén állt üzembe a Deutz T216 típusú tengelyteljesítményt leadó gázturbina próbapadja, majd 2007-ben lépett működésbe a TKT-1 gázturbinás sugárhajtómű. Ezek eredetileg hidromechanikus szabályozással rendelkeztek, amely nagymértékben korlátozta az alkalmazhatóságot. Ez kifejezetten az utóbbi, tolóerőt leadó típusnál volt kritikus, így a fejlesztés a TKT-1-en indult meg.

2.1. Előzmények, rövid áttekintés

Az már a TKT-1 kifejlesztésének kezdetén világos volt, hogy a TSz-21 eredeti szabályozása nem lesz alkalmas a sugárhajtómű üzemállapotának biztonságos irányítására. Az indító gázturbina működési módjából következően a 924-es tüzelőanyag-olaj szivattyúegysége csak egy, a gyártó által betáplált programot tudott megvalósítani, amely ráadásul magán hordozta a berendezés villanymotorral történő meghajtásának következményeit is.

A TKT-1 azonban nem rendelkezett a TSz-21 esetében állandóan jelen lévő munkaturbina által képviselt terheléssel. A fúvócső a legelső konstrukcióban állandó keresztmetszetű, jelentős diffúzorossággal rendelkező konstrukció volt. A túlzott tüzelőanyag-betáplálás elkerülése végett az eredeti szabályozórendszer módosítása elkerülhetetlen volt.



1. ábra

A PD-60R (a), a TKT-1 (b), és a Deutz T216 (c) gázturbinák. Forrás: a szerzők saját fényképei

¹⁰ J. D. Stevenson – H. I. H. Saravanamuttoo: Simulating Indirect Thrust Measurement Methods for High-Bypass Turbofans. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, 117. (1995), 1. 38–46.

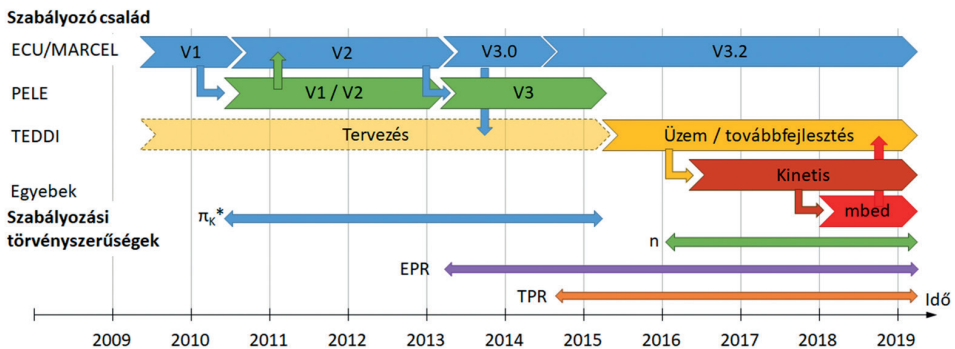
¹¹ Cerith Davies – Jonathan E. Holt – Ian A. Griffin: Benefits of inverse model control of Rolls-Royce civil gas turbines. In *Proceedings of International Control Conference*. Glasgow, Scotland, United Kingdom, 2006.

Később még egy sugárhajtóművel bővült a vizsgálatok köre, az 50 N névleges tolóerővel rendelkező PD-60R mikrogázturbinával, amelyhez egy új szabályozórendszer fejlesztése is megkezdődött, amelynek elsődleges célja a rádió-távírányítású repülőgépekben való alkalmazhatóság volt.

Végül pedig, az utóbbi években megkezdődött a Deutz T216 tengelyteljesítményt leadó turbina FADEC-rendszerűvé való átalakításának folyamata is. Az 1. ábrán a fejlesztéseink három fő típusa látható.

Az alábbi 2. ábra mutatja a különböző elektronikus berendezésének fejlesztési szakaszait, alkalmazásuk időtartamait, valamint azokat a technológiai transzfereket, amelyek során valamely rendszer létrehozásában szerzett tapasztalatokat egy másik alkalmazásban fel tudtuk használni, így építve ki a jelenleg elért képességeket.

Láthatóak továbbá a különböző szabályozási törvényszerűségek, amelyeket a TKT-1, valamint PD-60R gázturbinás sugárhajtóműveken leteszteltünk.



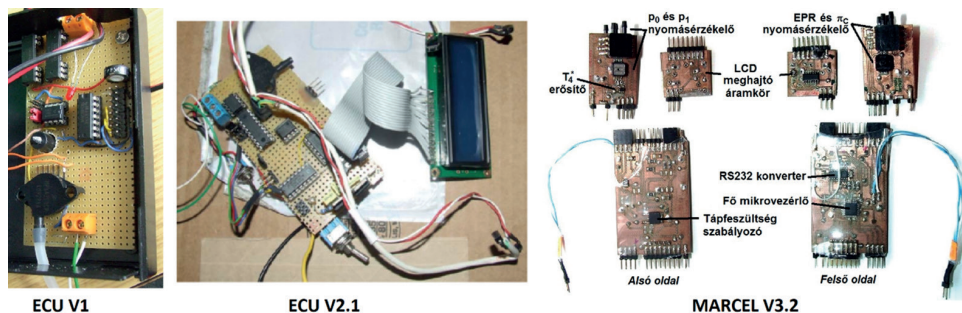
2. ábra

A szabályozórendszerek fejlődése és az alkalmazott szabályozási törvényszerűségek. Forrás: a szerzők saját szerkesztése

2.2. ECU-/MARCEL-sorozat

A tényleges fejlesztés a PD-60R típusú gázturbinához kezdődött még 2009 végén, miután a FADEC tervezésének alapjai vizsgálatra kerültek.¹² Ezt a gázturbinát Paksi Dániel tervezte, és célja, hogy közepes méretű (körülbelül 5–10 kg felszálló tömegű) rádió-távírányítású modellrepülőgépek hajtóműve lehessen. Ez meghatározta a hozzá fejlesztett elektronika kialakítását is. A sorozat három fő képviselőjét a 3. ábra mutatja be. Az eredeti megnevezés az angolban megszokott Electronic Control Unit rövidítéséből adódott, majd a V3.0 utáni továbbfejlesztést követően a V3.2 már a MARCEL nevet viselte, amely a Modular Aero-engine Remote Control Electronics rövidítéseként jött létre.

¹² Beneda Károly Tamás: Teljes hatáskörű digitális gázturbinás szabályozás (FADEC) fejlesztése kisméretű sugárhajtóműves berendezéshez. In *Repüléstudományi Konferencia 2009 – 50 év hangsebesség felett a magyar légtérben*.



3. ábra

Az ECU V1 és V2.1, valamint a MARCEL V3.2 áramkörei. Forrás: a szerzők saját fényképei

2.2.1. ECU V1

A legelső példánynak még nem volt célja a szabályozás, mert a rádió-távírányítással működtetett gázturbina esetében az egyszerű kézi vezérlés is elegendőnek bizonyult, viszont jó alapot nyújtott arra, hogy a későbbi változatokban is használni kívánt megoldásokat kikísérletezzük. Így ez az áramkör mindössze a kompresszor nyomásviszonya, a turbina utáni gázhőmérséklet, valamint a környezeti nyomás és hőmérséklet paramétereit tudta mérni, és folyadékkristályos kijelzőn megjeleníteni.

Az áramkör magja egy akkor Freescale (korábban Motorola, most NXP) MC9S08QD4 típusú, 8 bites architektúrájú mikrokontroller volt 8 lábú PDIP tokozásban. Órajele 16 MHz, a beépített nem felejtő programmemória 4 kB, az adatok tárolására szolgáló RAM pedig 256 bájtos volt. A nyolc lábból kettő természetesen a tápellátásért felel, a maradék haton lehetett a környezettel az adatcserét megvalósítani. A belső analóg-digitális átalakító 10 bit felbontású, amely elegendő pontosságúnak bizonyult a gyakorlatban.

2.2.2. ECU V2

2011 nyarán már a PELE-sorozat tapasztalataira építve kiviteleztek az ECU 2-es változatát. Ez egy nagyobb mikrokontrollert kapott, a 16 lábú PDIP tokozású MC9S08QG8-at, amely kétszer annyi memóriával rendelkezett, mint elődje. Az órajele változatlanul 16 MHz volt. A környezeti nyomás és a gázhőmérséklet mérését I2C buszon kommunikáló 16 bites A/D konverterek oldották meg, ezzel a repülési magasság a 10 Pa-os érzékenység nyomán 0,1 m felbontással megállapítható. A kivitelt egykártyás rendszerű volt, egyetlen áramköri lapon volt megtalálható minden szükséges berendezés.

Ez volt az első berendezés, amelynek célja a szabályozás volt, így a rádió-távírányító vevőegységéről érkező impulzusszélesség-modulált (Pulse Width Modulated, PWM) jelet referenciaként használva, a kimenetén olyan PWM-jelet vezérelt ki, amellyel a kompresszor nyomásviszonyát lehet a kívánt módon irányítani.

Az első kísérletek itt történtek meg arra vonatkozóan, hogy a kijelzést végző képernyőn és a mellette elhelyezett nyomógombokon keresztül a felhasználóval interaktív kommunikáció történhessen. A gázturbina leállítását lehetett nyomógombbal kezdeményezni, majd nyugtázni, illetve a szabályozó maximális nyomásviszonykorlátját lehetett beállítani ilyen módon.

2.2.3. MARCEL V3.2

A sorozat harmadik tagjának tervezése 2013 nyarán kezdődött, és kifejezetten a repülés feltételeinek megfelelően, moduláris kialakítással rendelkezett. Ekkor már javában folytak a TEDDI munkálatai is, azonban az ott alkalmazott CAN busz helyett a „kis testvér” csupán közvetlen analóg vagy digitális csatlakozásokkal rendelkezik a bővítő áramkörök irányába. Emiatt az MC9S08D mikrokontroller-családból a TEDDI-ben használt – DZ60 helyett a CAN kommunikációra nem képes – DN60 típust választottuk. A 32 lábú felületszerelt tokozás jelentős előrelépés volt, az addigi próbapanelek helyett rendes nyomtatott áramköri kártyát terveztünk meg. Ezen túlmenően 60 kB programmemória áll rendelkezésre, amelyből a legutolsó változatok körülbelül 19 kB-nyi területet használnak ki, valamint a RAM mérete is 4 kB, amivel számottevően több adat kezelése lehetséges a korábbi változatokhoz képest.

Az eredeti V3.0 még egyoldalas nyomtatott áramköri kártyával rendelkezett, ezt váltotta nagyjából fél évvel később a kétoldalas technológiával készült V3.2.

A berendezés eredetileg közös szabályozórendszerként született meg, és egy digitális bemenet alacsony vagy magas jelszintje alapján döntötte volna el, hogy a PD-60-nal vagy TKT-val van-e éppen dolga. A PD-60R azonban 2014-ben jelentős fejlesztéseken esett át, így ebbe az irányba tolódott el végül a hangsúly, a szabályozó vezérlőprogramjában az erre vonatkozó kódrészletek maradtak csak meg.

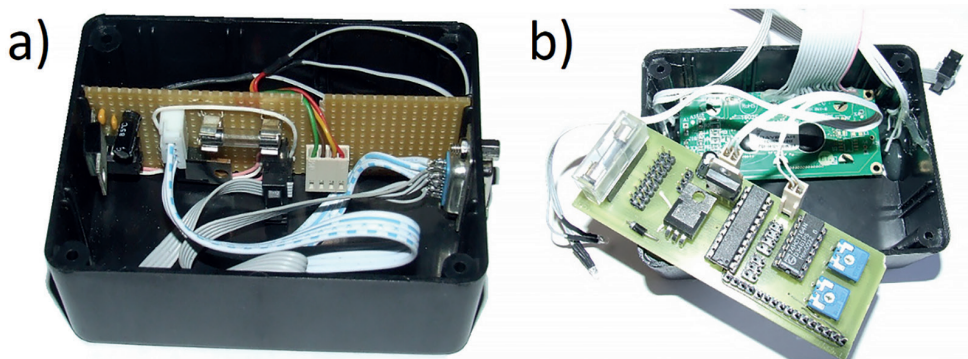
A moduláris kialakítás ellenére egy nagy közös dobozban kapott helyet a teljes rendszer, mivel akkor még távoli cél volt csupán a repülőképes távirányítású modell, így az egyszerűbb kezelhetőség és az egységek védelme érdekében minden komponens egy helyütt található. A doboz előlapján rögzítettük a szokásos 16x2 karakteres LCD-kijelzőt, amelyen keresztül az egységgel végzett kommunikáció hajtható végre. Ennek a megvalósítása egy komplex menürendszeren keresztül lehetséges, körülbelül 60 féle különböző képernyő megjelenítését építettük be. A PELE V3-ból örökölt RS232 rutin továbbfejlesztett változata már megszakításvezérelt kivitelben került a kódba. Megszakításos technikát itt alkalmazott először az analóg-digitális konverzió is, amellyel a főprogram időigényét lehetett csökkenteni, mert nem kellett már az átalakítás befejezésére várni.

Ez az áramkör eleve a TPR szerinti szabályozás megvalósítására készült, és a V3.2 verzió továbbra is képes feladatainak ellátására, sőt, azóta néhány különleges funkcióval is bővült (például a tüzelőanyag-szivattyú tesztelésére kialakított rutinnal, kibővített manuális és automatikus indítási lehetőségekkel stb.).

2.3. PELE-sorozat

Az elnevezés a nagy hajtóművek hibrid szabályozórendszereinél használatos tolóerő-gazdálkodás szabályozása, vagyis Power Management Control (PMC) kiegészítése volt az „elektronikus

egység” megnevezéssel. Az első változat tulajdonképpen a szabályozásra még nem képes változat volt, amikor belekerült az irányítás algoritmus is, onnantól már 2-es verziószámon tartottuk nyilván. A PELE-sorozatból a 3-as volt a befejező lépcső, bár a 4-es változat terve volt véve, a TEDDI fejlesztése miatt ez végül nem valósult meg. A 4. ábra mutatja a két egymást követő fejlesztési fokot.



4. ábra

A a) PELE V2 és a b) PELE V3 belső felépítése. Forrás: a) Horváth Ádám – Tóth Vilmos – Beneda Károly: A TKT-1 gázturbinás sugárhajtómű tüzelőanyag- és szabályozórendszerének fejlesztése. *Repüléstudományi Közlemények*, 24. (2012), 2. 854–879.; b) Horváth Ádám: *Teljes hatáskörű digitális elektronikus szabályozórendszer tervezése kisméretű sugárhajtóműhöz*. Diplomatervezés, BME Vasúti Járművek, Repülőgépek és Hajók Tanszék, 2013.

2.3.1. PELE V2

A PELE első változata a kompresszor utáni túlnyomás, illetve kompresszor nyomásviszonya szerinti szabályozásra lett felkészítve, tekintettel arra, hogy a TSz-21-ből nem állt rendelkezésre fordulatszám-érzékelés, azt csak jóval később, 2016-ban sikerült megvalósítani. Bár a kompresszor nyomásviszonya nem szokásos szabályozási paraméterként, a fent említett kényszerű választás mellett még az szolt mellett, hogy a hajtómű együttműködéséből fakadóan egy adott fúvócső keresztmetszete mellett a nyomásviszony és a fordulatszám összetartoznak.

A berendezés tehát a kompresszor kimenő nyomását mérve állapította meg a kompresszor nyomásviszonyát, figyelemmel kísérte a hajtómű-vezérlőkar állását, és ez alapján határozta meg azt az impulzusszélesség-modulált kimenő jelet, amellyel a beavatkozást végző szelep működtetése lehetővé vált. Mivel a fejlesztés tulajdonképpen az ECU V1.0-val lényegében egyidőben történt, a rendelkezésre álló mikrokontroller az ott alkalmazott MC9S08QD4 volt, annyi különbséggel, hogy kijelző meghajtására nem volt mód. A típus korlátai nem csak a rendelkezésre álló lábszámot érintették, természetesen a csekély belső memória és számítókapacitás is rányomta bélyegét a működtető szoftverre. A program a főbb változókat kétbájtos egész számként tárolta fixpontos számábrázolással, alapvetően 0...1000 tartományban, ahol a maximális érték az adott jellemző névleges értékével egyezett meg, tehát ezrelékpontosággal történt az értékek meghatározása. Ez a mikrokontrollerben alkalmazott belső 10 bites analóg-digitális átalakító tartományával is nagyjából egybeesett.

Mivel a berendezés egy klasszikus „fekete doboz” volt, a tesztelése a hajtómű üzemeltetését igényelte, így már korán felmerült az igény arra, hogy egy, a hajtómű paramétereit dinamikusan szimulálni képes áramkört alkossunk az ellenőrzés céljából. Ez azonban nem valósult meg, mivel a fejlesztés hamar továbblépett ezen a változaton.

2.3.2. PELE V3

A kijelző hiánya igen kedvezőtlenül befolyásolta a hibafeltárás lehetőségeit, így a soron következő elektronikus egység az ECU nyomdokain megkapta a lehetőséget az információk LCD-n történő valós idejű megjelenítésére. Rendelkezésre álltak már az ECU V2 eredményei, így a PELE továbbfejlesztése már ebben az irányban történt.

Ez volt az első olyan fejlesztés, amelynél saját nyomtatott áramköri kártya tervezése történt a próbapanelek alkalmazása helyett. A fejlesztés egy diplomaterv keretében zajlott, amelynek célja a hajtómű nyomásviszonya (Engine Pressure Ratio, EPR) szerinti szabályozás megvalósítása volt, de mivel a PELE V2 nem volt képes több bemenetet kezelni, mindenképpen szükség volt az új áramkör megtervezésére.

Beépítettük és számottevően továbbfejlesztettük az ECU V2 többképernyős menürendszerét, itt már lehetőség volt többféle szabályozási algoritmus között választani (kompresszor-nyomásviszony, EPR, különleges üzemmód), valamint több jellemzőnek (leginkább a szabályozott paramétereknek) alsó, illetve felső határait beállító képernyőket definiáltunk.

Ez volt egyébként az első olyan áramkör, amely RS232 kommunikációval rendelkezett, és így a mért adatokat számítógépre eljuttatva menteni is lehetett. A rutin csak egyszerű adással foglalkozott, nem volt felkészítve a kétoldalú kommunikáció végrehajtására, és a főprogram tevékenységei között szerepelt.

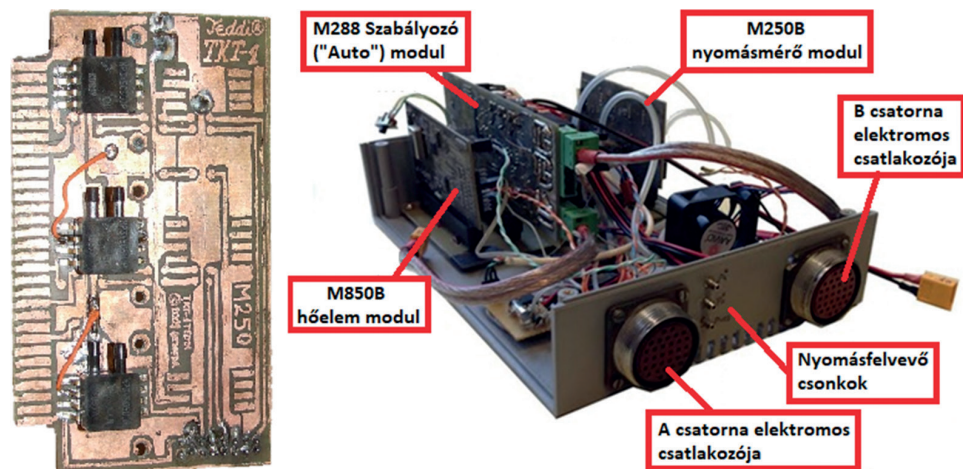
2.4. Teljes hatáskörű, duplikált digitális elektronikus szabályozórendszer (TEDDI)

A komplex, moduláris felépítés hosszú fejlesztési folyamatot eredményezett. Az első modul, a nyomásérzékelőket tartalmazó M250 (amely a számát a maximális kompresszor utáni túlnyomás kPa-ban kifejezett értéke alapján nyerte) már 2009-ben, az alaplap már 2010-ben elkészült. Sajnos a további egységek létrehozása az egykártyás FADEC-rendszerek fejlesztése miatt csúszott, így a további áramkörök (például M850 hőelemmodul, M288 szabályozó kártya) csak 2013-ra lettek készen. Az élesztés, a kezdeti szoftverek létrehozása, finomítása még körülbelül 2 éven keresztül tartott, természetesen más egyéb munkálatok mellett.

Az első üzemi próba 2015-ben történt meg, amikor az EPR szerinti szabályozás PELE V3-ból átültetett változatát teszteltük, teljes sikerrel. Itt alkalmaztunk elsőként automatikus indítást, amelyet még a korai kézi vezérlés időszakában egy 555-ös típusú monostabil IC-vel már megvalósítottunk, most azonban szoftveresen történt a feladatok vezérlése, ütemezése, sőt, már a hibákra való helyes reagálás is részét képezte a rendszernek (vagyis rendellenesség esetén az indítási ciklus megszakítására lehetősége volt). Azóta a berendezés stabilan működik, a szabályozás jelenleg is erről folyik, a 2018-ban beépített nyomóági arányos

szelep vezérlőrutinja pedig 2019 őszén került át a Kinetis-, illetve mbed-rendszerekből, így az új tüzelőanyag-adagolás vezérlése is biztosított immár.

Bár egyelőre még csak egy csatorna készült el teljeskörűen, jelenleg is zajlik a második csatorna fejlesztése, amellyel számottevően bővíülhet majd a berendezés feladatköre, illetve a nevében meghirdetett duplikált redundancia is kialakulhat. A legelső M250A modul és a jelenlegi állapotot az 5. ábra mutatja.



5. ábra

A TEDDI legelső nyomásmérő modulja 2009-ből, valamint a jelenlegi állapot. Forrás: a szerzők saját fényképei

2.5. További szabályozóegységek

Az elmúlt években az egyedi nyomtatott áramköri kártyák helyett elterjedt a dugaszolható próbapanelen történő előzetes tesztelés, így két olyan fejlettebb mikrokontroller vizsgálatra is megvalósulhatott, amelyeket későbbiekben szeretnénk a meglévő rendszerekbe integrálni vagy a régieket teljesen lecserélni velük.

2.5.1. Kinetis

A régi 8 bites architektúra kereteiből való kilépés első próbálkozásaként egy NXP MKE06Z128 típusú, Kinetis családba tartozó ARM Cortex-M0 mikrokontrolleren alapuló áramkör megalkotása következett 2016 nyarán. Mivel a technológiát kísérleti jelleggel szereztük be, emiatt az előző évek saját gyártású kártyáitól eltérően itt csak próbapanelen kiviteleztuk a rendszert.

A mikrokontroller maga maximális 48 MHz-es órajelével közel kétszer olyan gyors, mint a korábbi generációban alkalmazott típusok. Bár eredetileg a TEDDI második csatornájának szántuk, a jelenlegi fejlesztési koncepció szerint a soron következő fejlesztésben a perifériák

(nyomás, hőmérséklet és fordulatszám mérését lehetővé tevő kártyák) esetében építjük be azokat. Jelenleg tervezés alatt áll a régi M250B nyomásérzékelő modul leváltását célzó „C” változat, az üzemeltetési tapasztalatok, az időközben felmerült új mérendő mennyiségek és a mikrokontroller cseréje okán.

Ez a mikrokontroller volt az első fordulatszám mérését lehetővé tevő rendszer, amely minőségi ugrást jelentett ezen a téren is, alkalmazásával elérhetővé vált egy olyan paraméter, amely döntően befolyásolja a gázturbinás sugárhajtómű üzemét, az alárendelt célra való használat miatt azonban az eredeti gyártmányból hiányzott. A Kinetis a mérés mellett – több identifikációs céllal végrehajtott üzemelést követően – a fordulatszám szabályozását is lehetővé teszi. Ezt a funkciót kívánjuk a közeljövőben átültetni a TEDDI jelenleg meglévő elemeire.

Ideiglenesen ezt a rendszert is felkészítettük az új adagolószelep kezelésére, de a próbapaneles kialakítás jellege miatt ez körülményessé teszi az üzemeltetést, ezért ameddig el nem készül az Mbed-fejlesztő cég által kínált LPC1768 mikrokontrolleres rendszeren alapuló új szabályozókártya, addig a TEDDI jelenlegi M288 moduljába is beleépítettük ezt az új funkciót.

2.5.2. Mbed LPC1768

A 2018-as év elején egy újabb 32 bites rendszer gyors prototípus-fejlesztésre alkalmas gyártói készlete került birtokunkba, amellyel igen rugalmasan lehet számos feladatot megoldani, mindemellett a korábbiakhoz képest jóval nagyobb órajellel működtethető (max. 100 MHz), rendelkezik digitális-analóg átalakítóval is, amely a korábbi szériákban még nem volt elérhető. Tartalmaz több CAN, UART, SPI és I2C kommunikációs interfészt, amelyeken keresztül egyrészt a meglévő rendszerrel történő összekapcsolása vált egyszerűen kivitelezhetővé, továbbá olyan érzékelők integrálása is lehetséges, amelyek programozása a korábbi generációk esetében nehézkes volt, vagy a korlátozott lábszám miatt nem állt rendelkezésre.

Ez a rendszer először 2018 tavaszán bizonyította a gyors fejlesztés előnyeit, amikor a régebbi rendszerek esetében szükséges ráfordított idő töredéke alatt létre tudtuk hozni az újonnan átalakított tüzelőanyag-adagoló rendszer kézi vezérléséhez, identifikálásához, majd pedig szabályozásához szükséges hardver-, illetve szoftverelemeket. Itt alkalmaztunk a rendszeridentifikáció során változó frekvenciájú szinuszos gerjesztő jelet, amelyet a digitális-analóg átalakítón keresztül tudtunk kivezérelni. A szinuszhullám kedvezőbb tulajdonságokkal rendelkezik a korábban alkalmazott négyszögjellel szemben, de számítása sokkal nagyobb számítási igényteliséggel jelentkezik. Nem véletlen tehát, hogy a régebbi fejlesztésű rendszerekben négyszögjelen alapuló különleges üzemmódot valósítottunk meg, itt pedig sikeresen áttértünk a szinuszos beavatkozásra.¹³

Azóta több ízben is lehetőség nyílt rugalmasságának kiaknázására. Egy másik diplomaterv¹⁴ keretén belül egy teljesen eltérő gázturbinarendszer hidromechanikus szabályozásának leváltása volt a cél, amikor a TKT-n alkalmazott adagolószelep-megkerülőági szelep párost beszereltük a Deutz T216 tengelyteljesítményt leadó gázturбина tüzelőanyag-rendszerébe.

¹³ Beneda Károly – Ladislav Főző: Embedded Development System for Gas Turbine Identification Process. *Acta Avionica*, 20. (2018), 1.

¹⁴ Simon Dávid: *Elektronikus tüzelőanyag-szabályozó rendszer megvalósítása Deutz T216 tengelyteljesítményt leadó gázturbinán*. Diplomaterv, BME Vasúti Járművek, Repülőgépek és Hajók Tanszék, 2018.

A kísérlet sikerrel zárult, az elektronika sokkal rugalmasabban, nagyobb dinamikával volt képes a fordulatszám változtatására, mint a korábban alkalmazott motoros vezérlésű gázkar, köszönhetően az *mbed*-rendszer könnyű illeszthetőségének, egyszerű és hatékony programozási lehetőségeinek.

Sokoldalúságának ékes példája, hogy olyan feladatok megoldása vált a közelmúltban lehetővé, amelyek sokáig csak a továbbfejlesztések listáján szerepeltek. Talán a legfontosabb közülük a mért adatok tárolása SD-kártyán, ami lehetővé teszi, hogy a jelenlegi másodpercenkénti tíz mérés helyett többet lehessen végrehajtani, ugyanis a mostani rendszer a mért adatokat rögtön el is küldi UART kommunikáción keresztül. Hiába emeltük azonban a bitrátát egészen 500 000 kbps-ig, az egyre nagyobb adattömeg elküldése természetesen hátráltatja az egyéb folyamatokat. A most fejlesztés alatt álló kialakításban a cél a másodpercenként 50 fő ciklus végrehajtása, amelyből csak minden tizedik szolgáltat valós idejű adatot, a többit a háttértárolóra menti, és az üzemelést követően további értékelésre ad lehetőséget. A kijelzés esetén ugyanis nincs szükség ennél nagyobb ütemű frissítésre, a kezelő személyzet úgysem tudna rá megfelelően reagálni. Ha viszont minden mért adatot rögzítünk, akkor a működés befejezését követően a legfinomabb részletet is vissza lehet kapni az adatsorokból.

3. Szabályozási törvényszerűségek

Szabályozási törvényszerűsége a szabályozás célfüggvényét értjük, amely szerint a hajtómű irányítását végzi. Ez leggyakrabban fordulatszám vagy hajtómű nyomásviszony (Engine Pressure Ratio, *EPR*) szokott lenni a gázturbinás sugárhajtóművek többségénél. Ezeken túl több más törvényszerűséget vizsgáltunk, amelyeket az alábbiakban részletezünk.

3.1. Kompresszor-nyomásviszony

Bár éveken keresztül számos kísérlet történt a fordulatszám mérésének megvalósítására, a megfelelő érzékelő híján sokáig nem volt működőképes megoldás. Emiatt az első szabályozórendszer a kompresszor-nyomásviszony szabályozásán alapult, egyszerűen a gázkar 1,5...2,5 tartományban lineárisan képezte le ezt a paramétert. Bár ennek a paraméternek a szerepe a repülőiparban alkalmazott szabályozórendszerek esetén marginális, a TKT-1 szempontjából nagyon fontos előrelépés volt, hogy a gázturbina nem egy kézzel beállított üzemmód környékén ingadozott, hanem korrekt szabályozással rendelkezett.

3.2. Hajtómű nyomásviszonya (*Engine Pressure Ratio, EPR*)

Ez a paraméter, amely a turbina utáni p_4^* és a kompresszor előtti torlópontri p_1^* nyomások hányadosa, amint az az (1) egyenletben is látható, adott repülési üzemmódot feltételezve arányos a tolóerő nagyságával, így a közvetett szabályozás megvalósítására alkalmas.

$$EPR = \frac{p_4^*}{p_1^*} \quad (1)$$

Előszeregettel alkalmazzák nagy hajtóműgyárak, mint például Pratt & Whitney, illetve Rolls-Royce. Bevezetése mellett szintén az szólt, hogy nem rendelkezünk fordulatszámmerési lehetőséggel, valamint már a gázturbina átalakításakor tervbe volt véve a turbina utáni nyomás mérésének lehetősége, ami azonban az első években feledésbe merült. Ennek a szabályozásnak a megvalósításával ezt is beépítettük.

A polgári repülőgépek-hajtóművekkel ellentétben a TKT-1 rendelkezik változtatható fúvócső-geometriával, amelynek hatására jelentős mértékben változik az adott fordulatszám mellett jelentkező EPR is. Emiatt a szabályozást két paraméterre építettük, a gázkar adta alapvetően a fordulatszám változásának jellegét (a kompresszor-nyomásviszonyon keresztül), a gázkiáramlás-sebességfokozó redőnyzetpozíció segítségével pedig a referencia-EPR meghatározása történt.

Nagy hátránya a rendszernek, hogy alapgázüzemmód esetén nincs váltás, az EPR a teljes üzemmódtartományban megmarad szabályozott paraméternek. Polgári utasszállító repülőgépek hajtóművein az alapjárat során mindig fordulatszám tartása történik. Ez leginkább azon érhető tetten, hogy az EPR ezen az üzemmódon csaknem „eltűnik”, a névleges 1,185 értékhez képest mindössze 1,038 mérhető. Itt már jelentősek a mérő és beavatkozó rendszer hibái, tehát az alapgázüzemmód pontos megtartására nem lesz tökéletesen alkalmas az EPR szerinti irányítás.

3.3. Hajtómű-teljesítményviszony (Turbofan Power Ratio, TPR)

A hajtómű-teljesítményviszony a kompresszor nyomásviszonya és az átszámított turbina előtti hőmérséklet négyzetgyökének szorzataként definiálható, ahogy a (2) egyenletben látható. Az előbbi paraméter a kompresszor kilépő p_2^* és belépő torlóponti nyomásainak hányadosa, az utóbbi pedig a turbina előtti T_3^* és a kompresszor előtti T_1^* torlóponti hőmérsékletek aránya.

$$TPR = \frac{p_2^*}{p_1^*} \sqrt{\frac{T_3^*}{T_1^*}} \quad (2)$$

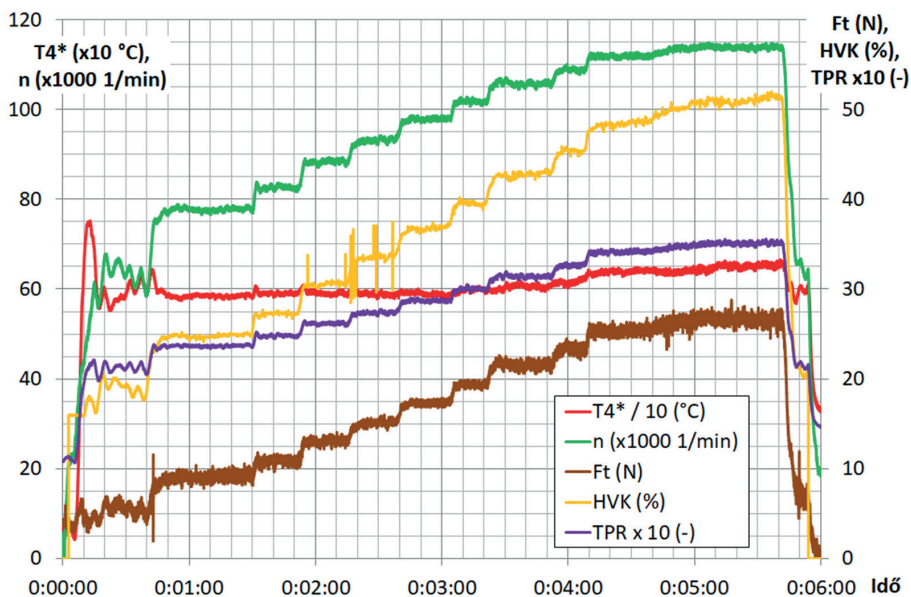
A TPR-paraméter a Rolls-Royce hajtóművein jelent meg a 2000-es évek elején,¹⁵ amelynek előnye, hogy állandó geometria esetén egyenes arányosságot mutat a kifejtett tolóerővel. Bár a megnevezés szerint kétáramú sugárhajtóművekre vonatkozó jellemzőről van szó, a definíciót megvizsgálva belátható, hogy tisztán olyan paraméterekből áll, amelyek egyáramú sugárhajtóműveken is mérhetőek, tehát kézenfekvőnek látszott a bevezetése a fejlesztett FADEC-rendszerekbe.

A MARCEL V3.2 volt az az elektronikus egység, amely kifejezetten a TPR szerinti szabályozásra épült, és a 2.2.3. fejezetben bemutatottak alapján először a TKT-1-en történtek olyan mérések, amelyek alapján ez megvalósíthatóvá vált volna. Az ottani fejlesztések azonban más irányt vettek, végül pedig a MARCEL-rendszer és a TKT-1 együttes alkalmazására nem is került sor, így ez a hajtómű, bár a szükséges referenciákat megalkottuk, a szabályozást

¹⁵ Arthur L. Rowe – Nikolaus Kurz: *Control System for a Ducted Fan Gas Turbine Engine*. US Patent No. 5,887,419, 1999.

MATLAB-környezetben kiviteleztek és leteszteltük, a cikk megírásának idejéig mégsem üzemelt TPR-alapon.

A PD-60R eddigi üzemeléseiben azonban, miután a MARCEL V3.2 elkészült, teljességgel erre a szabályozási törvényszerűségekre épültek. Miután ezen a hajtóművön is elvégeztük a szükséges identifikációs méréseket, megalkotásra került a szabályozás algoritmus, végül pedig ezt beprogramozva a szabályozórendszerbe, azóta is töretlen sikerrel működik. A 6. ábra egy olyan üzemelés diagramja, amelyben a TPR szerinti szabályozót teszteltük a teljes üzemmód-tartományban. Látható, hogy az alapjárat közelében már akkora az eltérés a névleges üzemmódon meghatározott lineáris modell és a hajtómű tényleges dinamikus viselkedése között, hogy a szabályozó nem képes stabilizálni a működést. Amint azonban az első gyorsítás bekövetkezik, onnan már gond nélkül zajlik az irányítás.



6. ábra

PD-60R szabályozása TPR szerint a MARCEL V3.2-vel. Forrás: Beneda Károly: Modular electronic turbojet control system based on TPR. *Acta Avionica*, 17. (2015), 1.

3.4. Fordulatszám

A repülésben alkalmazott gázturbinás hajtóművek tekintetében a fordulatszám elsőrendű fontossággal bír, itt mégis utolsó a sorrendben, hiszen megfelelő érzékelő nélkül nem lehetett erre alapuló szabályozást megvalósítani.

Miután egy turbófeltöltőben alkalmazott érzékelőt beszereztünk, érzékelőt beszereztünk, megindulhatott ennek a rendszernek a kidolgozása is. A TEDDI megvalósított moduljainak terheltsége és a továbbfejlesztés igénye miatt a Kinetis-rendszerben integráltuk. Elsőként a mérés hardverelemeit és rutinjait hoztuk létre, amelyek 2016 végére érték el az üzemérettiséget, majd

a szabályozás is megvalósult 2017 tavaszára, még a régi megkerülőági arányos levegőszelepre hangolva.¹⁶

A jelenlegi állásban a mérés természetesen továbbra is működik, pillanatnyilag a mikrovezérlő CAN buszhoz történő illesztése folyik, amellyel teljes értékű tagjává válhat a TEDDI-rendszernek. Az új adagolószeleppel történő identifikálás ugyan már megtörtént, de ez a szabályozás egyelőre nem aktív, várhatóan a közeljövőben megvalósulnak ezen irányú törekvéseink is.

4. Szabályozási algoritmusok

A szabályozás algoritmusai között az iparban leginkább a proporcionális-integráló-deriváló (PID) soros kompenzáció terjedt el. Jelenlegi rendszereinkben ezen klasszikus irányítási módszer mellett lineáris kvadratikus és csúszómód-szabályozást is vizsgáltunk.

4.1. Klasszikus, proporcionális-integráló-deriváló (PID) szabályozások

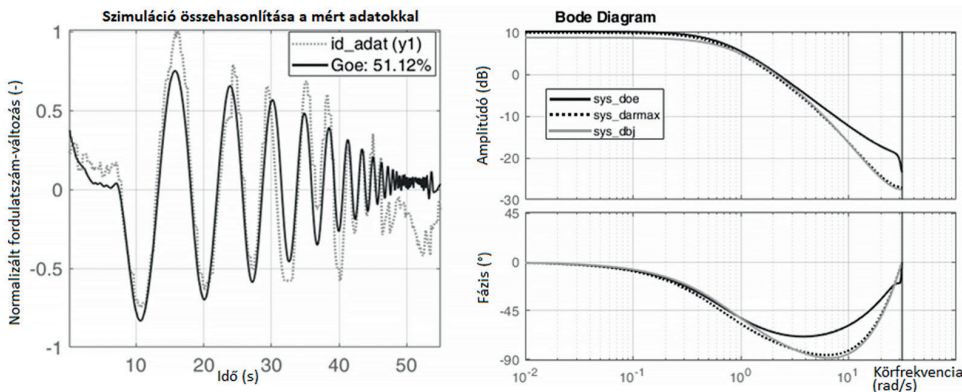
A klasszikus irányításmélet egyik legtöbbször alkalmazott módszere egyszerű, a szabályozandó rendszert egyetlen lineáris átviteli függvénnyel közelíti, ami a gázturbinás hajtóművek természetes nem lineáris jellegét figyelembe véve veszélyeket rejt magában, de megvalósítása talán az egyik legkevesebb ráfordítást igényli, ezért a fejlesztett szabályozórendszerek jelenleg mindegyike ezen a megközelítésen alapuló algoritmust alkalmaz.

A proporcionális-integráló-deriváló beavatkozás soros kompenzációként kerül be a szabályozási körbe, amely egy referenciajelet hasonlít össze a rendszer irányítandó kimenetével, majd olyan bemenetet hoz létre, amely a rendszert a kívánt állapotba juttatja. Mivel az irányítandó berendezést egyetlen átviteli függvénnyel modellezzük, emiatt a modell meghatározása és az identifikáció ilyen jellegűt kell öltson. A mért adatok alapján a gyakorlatban leginkább bevált módszer a kimeneti hiba (Output-Error) módszer volt, de természetesen próbálkoztunk más modellekkel is, mint például ARMAX, illetve Boks–Jenkins megközelítésekkel. Minden esetben a diszkrét időben mintavételezett adatok alapján először egy diszkrét rendszermodellt kapunk, és erre lehetséges a szabályozás megtervezése, például Ziegler–Nichols módszerrel vagy éppen a MATLAB Simulink beépített automatikus PID hangoló algoritmusával.

Az identifikáció a korábbi években az egyszerűbb mikrovezérlők miatt csak változó frekvenciájú négyszögjelre történő gerjesztést jelentett, csak az utolsó két évben nyílt mód szinuszhullám-kimenet alkalmazására, amellyel kedvezőbben lehet az azonosítani kívánt rendszer jellemzőire következtetni.

Egy tipikus identifikációs adatsor látható a 7. ábrán, amely a fordulatszám kimenőjel és a tüzelőanyag-adagoló szelep vezérlőfeszültség bemenőjel közötti összefüggést mutatja.

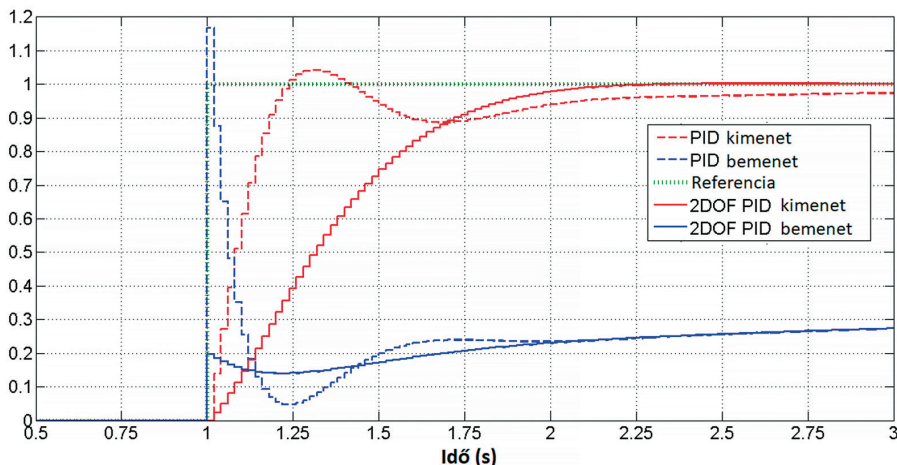
¹⁶ Beneda Károly – Nagy Arnold: Introduction, Identification and Control of a New Fuel Metering System on a Micro Turbojet Engine. In I. Zobory (ed.): *Proceedings of the 16th MINI Conference on Vehicle System Dynamics, Identification and Anomalies (VSDIA 2018)*. Budapest, BME ITS Zrt. 2019. 65–74.



7. ábra

Fordulatszám identifikáció szinuszhullámmal és az eredő rendszer Bode-diagramja. Forrás: Beneda-Nagy (2019) i. m. 71.

A PID esetén megemlítenőd az is, hogy az elmúlt két évben további speciális, kétszabadságfokú szabályozást is kipróbáltunk a PD-60R és a Deutz T216 esetében is. Mindkettőnél jól nyomon követhető volt a nagyobb rugalmasság, amellyel a tranziens folyamat gyorsabb lefutást eredményezett túllendülés nélkül, amely a hagyományos PID esetén nem lett volna lehetséges. Egy ilyen összehasonlítást mutat a 8. ábra.



8. ábra

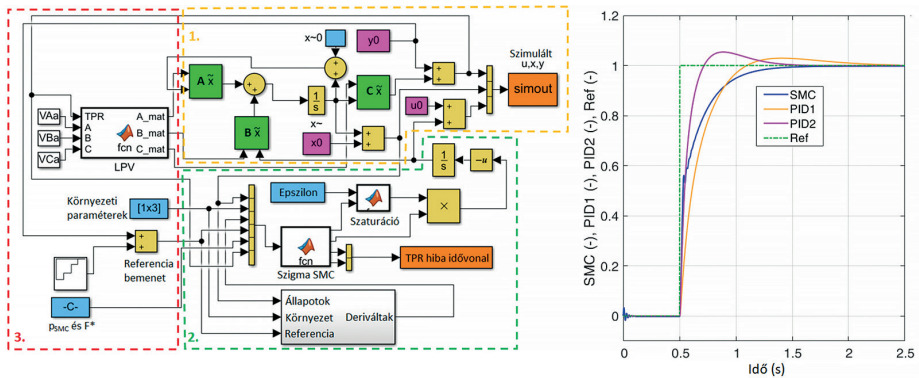
A hagyományos egy- és fejlettebb kétszabadságfokú PID-rendszerek kimeneteinek, valamint beavatkozó jeleinek összehasonlítása. Forrás: Beneda, Károly – Khaoula Derbel: Design of Two Degree of Freedom Turbofan-Power-Ratio Control System for Micro Turbojet Engine. In 2019 IEEE 17th World Symposium on Applied Machine Intelligence and Informatics (SAMI)

4.2. Lineáris kvadratikus szervó szabályozás

A lineáris kvadratikus szabályozás megalapozása az előzőekhez képest teljesen új matematikai modell megalkotásával kezdődött, amely mind a TKT-1-re, mind pedig a PD-60R típusra megvalósult.¹⁷ Ezt követhette mindkét gázturbinán az identifikáció, majd a szabályozó megtervezése. Ezeket a rendszereket még nem valósítottuk meg mikrovezérlőben, egyelőre még csak MATLAB Simulink szimulációkon keresztül tudtunk hatékonyságukról meggyőződni. Jelenleg a lineáris modell több üzemmódra történő kibővítése folyik, amelyet lineáris, változó paraméterű (Linear Parameter-Varying, LPV) modellel kívánunk megvalósítani.¹⁸

4.3. Csúszómód-szabályozás

Legújabb fejlesztéseink között a teljesen nemlineáris alapon nyugvó csúszómód-szabályozások jelentik a legösszetettebb megoldásokat, amelyek szintén a két sugárhajtóműves berendezésre lettek kifejlesztve. Egyelőre a hajtóművek nemlineáris modellezése a fentebb említett LPV-módszerrel történik, vagyis a modell maga lineáris struktúrájú, de a rendszer viselkedését leíró mátrix tagjai például a fordulatszám vagy TPR függvényében változnak, ezzel hozható létre a különböző üzemmódok közötti eltérés. A PD-60R rendszert szimuláló program és a vizsgálat eredményei a 9. ábrán figyelhetők meg, amelyben két különbözően hangolt PID szabályozóval történő összehasonlítás is látható.



9. ábra

Csúszómód-szabályozás szimulációs blokkvázlata, illetve viselkedésének összehasonlítása különbözőképpen hangolt PID szabályozókkal. Forrás: a szerzők MATLAB Simulink szoftvere és annak kimenete

¹⁷ Beneda, Károly – Rudolf Andoga – Ladislav Főző: Linear Mathematical Model for State-Space Representation of Small Scale Turbojet Engine with Variable Exhaust Nozzle. *Periodica Polytechnica Transportation Engineering*, 46. (2018), 1. 1–10.; Beneda, Károly – Khaoula Derbel: Identification of single spool micro turbojet engine with fixed exhaust nozzle at multiple operating points for linear parameter varying control. In I. Zobory (ed.): *Proceedings of the 16th MINI Conference on Vehicle System Dynamics, Identification and Anomalies (VSDIA 2018)*. Budapest, BME ITS Zrt. 2019.

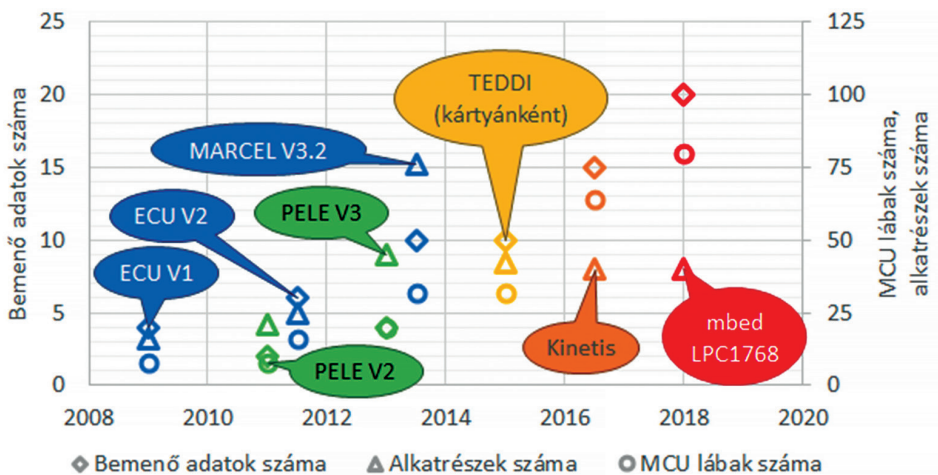
¹⁸ Beneda Károly: Egyáramú, egytengelyes gázturbinás sugárhajtómű lineáris, változó paraméterű modelleje hajtómű teljesítményviszony alapján. In Szabó András (szerk.): *Tanulmányok a vasúti járművek és a járműrendszer-analízis témaköreiből*. Budapest, BME ITS Nonprofit Zrt., 2019. 164–171.

A PID1 rendszerben a beállási idő, a PID2 esetében pedig a reakcióidő volt azonos a csúszómód-szabályozásával. A hagyományos eljárásokon látható, hogy vagy nagyon lassan avatkoznak be, esetleg túllendülés nélkül (bár a PID1 még csekély túlfutást mutat), vagy gyors reakcióidővel rendelkeznek, de akkor veszélyes túllendülést hoznak létre (PID2). Ezzel szemben a csúszómód-szabályozás egyszerre teljesíti mindkét követelményt.

5. Összefoglalás

Elmondható, hogy a teljes hatáskörű elektronikus szabályozórendszerek fejlesztése az elmúlt tíz évben igen jelentős pályát futott be, az egyszerű kísérletektől kezdve komoly feladatkörrel felruházott berendezésekig sikerült eljutni. Ezek mindegyike teljesen saját fejlesztésű, vagyis kifejezetten az adott gázturbinához lettek optimalizálva, mindeközben természetesen a főbb alapelemek különböző projektek közötti átemelésével jelentősen gyorsítani lehetett a további előrelépést.

Az elméleti fejlesztés mellett nagyon fontosnak érezzük, hogy a hardveres megvalósítás is jelentős hangsúlyt kapott, vagyis nem csupán számítógépes szimulációk, hanem valódi áramkörök is elkészültek, amelyek a valóságos gázturbinák mellett is kiváló teljesítményt nyújtanak. A fejlesztés összefoglalása a 10. ábrán látható, amely az alkatrészek, feldolgozott adatok, valamint a mikrovezérlő lábak számán keresztül ismerteti a fejlődés irányvonalát.



10. ábra

A szabályozórendszerek fejlődésének állomásai. Forrás: a szerzők saját szerkesztése

Természetesen nem szabad megfélekedni arról sem, hogy ezek a berendezések nem csupán a szabályozás tényszerű megvalósítása végett születtek, hanem nagy hangsúlyt kell fektetnünk a következő mérnökgeneráció oktatására is, amely ezen eszközökkel további ismeretek átadását teszi lehetővé.

Hozzá kell tennünk azt is, ami világosan kiderül a cikkből, a fejlesztés nem állt meg, folyamatos és az elkövetkező időkre is jelentős munkát fog adni. Azonban az így létrehozott hozzáadott érték folyamatosan bővül, és rendszereink remélhetőleg nem csak hazai fórumokon mutathatják be az elért eredményeket.

Felhasznált irodalom

- Bauer, Marc – Jens Friedrichs – Detlev Wulff – Christian Werner-Spatz: Measurement quality assessment of an on-wing engine thrust measurement system. *ASME Turbo Expo 2018*, 1. (2018). DOI: <https://doi.org/10.1115/GT2018-76496>
- Beneda Károly: Egyáramú, egytengelyes gázturbinás sugárhajtómű lineáris, változó paraméterű modellje hajtómű teljesítményviszony alapján. In Szabó András (szerk.): *Tanulmányok a vasúti járművek és a járműrendszer-analízis témaköreiből*. Budapest, BME ITS Nonprofit Zrt., 2019. 164–171.
- Beneda Károly Tamás: Teljes hatáskörű digitális gázturбина szabályzás (FADEC) fejlesztése kisméretű sugárhajtóműves berendezéshez. In *Repüléstudományi Konferencia 2009 – 50 év hangsebesség felett a magyar légtérben*. Elérhető: www.repulestudomany.hu/kulonszamok/2009_cikkek/Beneda_Karoly_Tamas.pdf (A letöltés dátuma: 2021. 01. 14.)
- Beneda, Károly: Modular electronic turbojet control system based on TPR. *Acta Avionica*, 17. (2015), 1. Elérhető: <https://acta-avionica.tuke.sk/ojs/index.php/aavionica/article/view/893/891> (A letöltés dátuma: 2021. 01. 14.)
- Beneda, Károly – Khaoula Derbel: Design of Two Degree of Freedom Turbofan-Power-Ratio Control System for Micro Turbojet Engine. In *2019 IEEE 17th World Symposium on Applied Machine Intelligence and Informatics (SAMI)*. DOI: <https://doi.org/10.1109/SAMI.2019.8782788>
- Beneda, Károly – Khaoula Derbel: Identification of single spool micro turbojet engine with fixed exhaust nozzle at multiple operating points for linear parameter varying control. In I. Zobory (ed.): *Proceedings of the 16th MINI Conference on Vehicle System Dynamics, Identification and Anomalies (VSDIA 2018)*. Budapest, BME ITS Zrt. 2019.
- Beneda, Károly – Ladislav Főző: Embedded Development System for Gas Turbine Identification Process. *Acta Avionica*, 20. (2018), 1. Elérhető: <https://acta-avionica.tuke.sk/ojs/index.php/aavionica/article/view/1028/1029> (A letöltés dátuma: 2021. 01. 14.)
- Beneda Károly – Nagy Arnold: Introduction, Identification and Control of a New Fuel Metering System on a Micro Turbojet Engine. In I. Zobory (ed.): *Proceedings of the 16th MINI Conference on Vehicle System Dynamics, Identification and Anomalies (VSDIA 2018)*. Budapest, BME ITS Zrt. 2019. 65–74.
- Beneda, Károly – Rudolf Andoga – Ladislav Főző: Linear Mathematical Model for State-Space Representation of Small Scale Turbojet Engine with Variable Exhaust Nozzle. *Periodica Polytechnica Transportation Engineering*, 46. (2018), 1. 1–10. DOI: <https://doi.org/10.3311/PPtr.10605>
- Davies, Cerith – Jonathan E. Holt – Ian A. Griffin: Benefits of inverse model control of Rolls-Royce civil gas turbines. In *Proceedings of International Control Conference*. Glasgow, Scotland, United Kingdom, 2006. Elérhető: <http://ukacc.group.shef.ac.uk/proceedings/control2006/papers/f70.pdf> (A letöltés dátuma: 2021. 01. 14.)

- Fodor Ferenc: *Gázturbinák automatikus szabályozása*. Főiskolai jegyzet, Magyar Néphadsereg Killián György Repülő Műszaki Főiskola, 1984.
- Horváth Ádám: *Teljes hatáskörű digitális elektronikus szabályozórendszer tervezése kisméretű sugárhajtóműhöz*. Diplomaterv, BME Vasúti Járművek, Repülőgépek és Hajók Tanszék, 2013.
- Horváth Ádám – Tóth Vilmos – Beneda Károly: A TKT-1 gázturbinás sugárhajtómű tüzelőanyag- és szabályozórendszerének fejlesztése. *Repüléstudományi Közlemények*, 24. (2012), 2. 854–879.
- Kendell, R.: Full-Authority Digital Electronic Controls for Civil Aircraft Engines. In *ASME 1981 International Gas Turbine Conference and Products Show*. Houston, Texas, USA, March 9–12, 1981. 6. DOI: <https://doi.org/10.1115/81-GT-139>
- Kulikov, Gennady – Haydn A. Thompson: *Dynamic Modeling of Gas Turbines*. Springer, 2004. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-1-4471-3796-2>
- Linke-Diesinger, Andreas: *Systems of Commercial Turbofan Engines*. Springer, 2008. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-540-73619-6>
- Lutambo, Jackson – Jiqiang Wang – Hong Yue – Georgi Dimirovsky: Aircraft turbine engine control systems development: A historical perspective. In *Proceedings of the 34th Chinese Control Conference*. Hangzhou, China, July 28–30, 2015. 5736–5741. DOI: <https://doi.org/10.1109/ChiCC.2015.7260534>
- Paddon, L.: Active-Control Engines. *Flight International*, 9 July 1988. 33–34.
- Rowe, Arthur L. – Nikolaus Kurz: *Control System for a Ducted Fan Gas Turbine Engine*. US Patent No. 5,887,419, 1999.
- Simon Dávid: *Elektronikus tüzelőanyag-szabályozó rendszer megvalósítása Deutz T216 tengelyteljesítményt leadó gázturbinán*. Diplomaterv, BME Vasúti Járművek, Repülőgépek és Hajók Tanszék, 2018.
- Stevenson, J. D. – H. I. H. Saravanamuttoo: Simulating Indirect Thrust Measurement Methods for High-Bypass Turbofans. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, 117. (1995), 1. 38–46. DOI: <https://doi.org/10.1115/1.2812779>