

Beneda Károly Tamás¹

A „MARCEL”² ELEKTRONIKUS SUGÁRHAJTÓMŰ SZABÁLYOZÓ RENDSZER FEJLESZTÉSE³

A gázturbinás sugárhajtóművek automatikus szabályozása kiemelten fontos szerepet játszik a repülőgépek biztonságos üzemeltetésében. A szabályozást leggyakrabban FADEC⁴ rendszer látja el, mivel válaszideje rövidebb, a felügyelt jellemzők száma pedig sokkal több, mint hagyományos, hidromechanikus rendszerek esetén. A szabályozás történhet többféle paraméter alapján, újabban a hajtómű teljesítményviszony (TPR⁵). Ezt jelenleg csak kiegészítő beavatkozásként, nagy kétáramúsági fokú hajtóműveken alkalmazzák. Jelen cikk célja, hogy mérési eredményeken keresztül bemutassa, a TPR paraméter alkalmas egyáramú sugárhajtómű elektronikus szabályozórendszerében alap paraméterként használva a tolóerő közvetett szabályozására, továbbá bemutassa a szerző elmúlt öt évben végzett munkáját és elért eredményeit a távirányítással rendelkező repülőgépek gázturbinás sugárhajtóműveinek szabályozórendszereiben.

DEVELOPMENT OF „MARCEL” ELECTRONIC CONTROL FOR TURBOJET ENGINES

The automatic control of gas turbine engines is essential for the safe operation of aircraft. The control is in most of the cases a FADEC that provides short response times and the number of parameters under the supervision of the system is much higher in comparison with conventional hydromechanic systems. The control can be realized based on different variables, recently, TPR can also be used, which is nowadays utilized as an overriding capability in abnormal situations on large bypass ratio turbofan engines. The goal of this article is to present through measurement data that the TPR is applicable for the normal control of a single stream turbojet engine in the electronic control system as the basic thrust parameter, furthermore introduce the reader into the work done by the author in the past five years in the field of turbojet engine control for radio controlled aircraft.

BEVEZETÉS

A gázturbinás sugárhajtóművek szerepe a repülésben megjelenésük óta töretlen, kimagasló teljesítménysűrűségük, a dugattyús motorokhoz viszonyított egyszerű felépítésük, és sok más, a repülésben fontos tulajdonságuk miatt. A kezdeti konstrukciók egyáramú kialakítással készültek, melyben a beszívott levegő teljes mértékben áthalad az égéstéren, illetve részt vesz a tolóerő létrehozásában. Fontos jellemzőjük, hogy a turbina – leszámítva a segédberendezések hajtásához igényelt teljesítményt – kizárólag a kompresszor hajtását végzi, így a fűvócsőre jelentős nyomásviszony marad, ez pedig nagy kilépő gázsebességet eredményez.

Az egyáramú sugárhajtóművek az 1950-es években tömegesen elterjedtek a polgári repülésben, de hamar bebizonyosodott, hogy a mérsékelt szubszonikus repülési sebesség-tartományban – a

¹ mérnök-tanár, AEROK Repülésműszaki Oktató és Szolgáltató Kft., karoly.beneda@aerok.hu

² MARCEL: Modular Aero Engine Remote Control Electronics, moduláris hajtómű szabályozó rendszer távirányítású repülőgépekhez

³ Lektorálta: Dr. Varga Béla okl. mk. alez., egyetemi docens, NKE Katonai Repülő Tanszék, varga.bela@uni-nke.hu

⁴ FADEC: Full Authority Digital Electronic Control, teljes hatáskörű digitális elektronikus szabályozás

⁵ TPR: Turbofan Power Ratio, hajtómű teljesítményviszony

fűvócsövükben létrehozott igen nagy kilépő gázsebességek okán – rossz propulziós hatásfokkal rendelkeznek, melyet az alábbi képlettel lehet meghatározni:

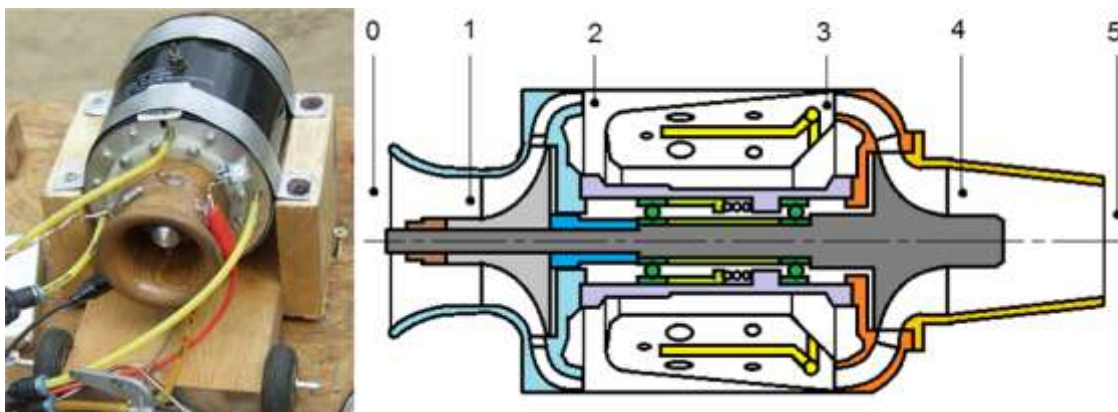
$$\eta_p = \frac{2}{1 + \frac{w}{v}} \quad (1)$$

ahol:

- η_p a propulziós hatásfok (-)
- w a hajtóműből kilépő gáz sugar sebessége (m/s)
- v a repülőgép sebessége (m/s)

Ezért már az 1950-es évek második felében megjelentek a kétáramú konstrukciók, melyek mintegy átmenetet képezve a légcavaros meghajtás és az egyáramú sugárhajtómű között alkalmasak voltak a kellően nagy sebesség elérésére, miközben az egyáramúnál jobb propulziós hatásfokkal rendelkeztek [11]. Ennek fizikai alapja az, hogy a hajtómű által beszívott levegőnek csak egy része jut az égéstéren keresztül a turbinára, az viszont emiatt – kisebb tömegárama révén – nagyobb fajlagos munkát kell szolgáltatson a kompresszor mellett megjelenő ventilátor számára. Így a belső áram kilépő sebessége csökken, ezáltal kedvezőbb propulziós hatásfok érhető el. Az elmúlt évtizedek repülőgép hajtóműveinek fejlesztésében a fentebb említettek okán a kétáramúsági fok növekedése figyelhető meg.

A fent említett okok ellenére több alkalmazásban is találkozhatunk napjainkban egyáramú gáz-turbinás sugárhajtóművel. Leginkább nagy magasságban működő pilóta nélküli légi eszközök használják [1][34], de előfordul vitorlázó repülőgépek segédhajtóműveként [12], valamint távirányítású modellrepülőgépek hajtóműveként is [27]. Ezek tolóereje az említett konfigurációkban néhány 10 N-től 1000 N körüli értékekig terjed. Egy tipikus kialakítást és hosszmetzeti képét mutatja az 1. ábra, melyen a jellegzetes keresztmetszetek jelölése is látható.



1. ábra A vizsgált mikro gázturbinás sugárhajtómű és hosszmetszete a jellegzetes keresztmetszetek jelölésével

Cikkem célja, hogy átfogó képet adjak az elmúlt években végzett munkáról, melynek eredményeképpen egy moduláris, digitális elektronikus szabályozórendszer jöhetett létre. Áttekintést nyújtok a gázturbinás sugárhajtóművek szabályozásának elméleti kérdéseiről, bemutatom a fejlesztés elméleti és gyakorlati lépéseit, ismertetem a megvalósított szabályozóval végzett vizsgálatokat, összegzem az elért eredményeket, továbbá vázolom a lehetséges továbbfejlesztési irányokat.

A hajtóművek szabályozásának elméleti háttere

Mivel jelen cikk témája az egyáramú gázturbinás sugárhajtómű, ezért erre a konfigurációra határozzuk meg a hajtómű működését leíró matematikai modellt, a következő egyszerűsítésekkel élve:

- a hajtómű állandó geometriával rendelkezik, vagyis nincsenek mozgatható állólapátok a kompresszorban, turbinában, illetve a fűvócső keresztmetszete sem változtatható,
- egy forgórészrel rendelkezik a hajtómű;
- nincsen utánégetés;
- a kompresszortól nem történik levegőelvétele;
- a turbinában hűtésből származó levegő nem keveredik az égésgázokkal;
- a szívócsatorna, a kompresszor és a turbina nem rendelkeznek tömeg- és belsőenergia tároló képességgel, valamint elhanyagolható a fűvócső hőtároló képessége.

A fenti feltételek értelmében négy megmaradási egyenletet lehet felírni, melyek rendre az égéster tömeg- és hőtároló képességét, a fűvócső megmaradási egyenletét, és a forgórész mechanikai együttműködését leíró összefüggést fejezik ki.

$$\frac{dm_{\dot{E}}}{dt} = \dot{m}_2 + \dot{m}_t - \dot{m}_3 \quad (2)$$

ahol:

- $\frac{dm_{\dot{E}}}{dt}$ az égésterben tárolt gáztömeg időegység alatti elemi megváltozása (kg/s);
- \dot{m}_2 a kompresszorból kilépő tömegáram (kg/s);
- \dot{m}_t a tüzelőanyag tömegáram (kg/s);
- \dot{m}_3 a turbina belépő tömegárama (kg/s).

A belsőenergia-tároló képesség egy általános esetben az alábbi egyenlettel írható le:

$$\frac{dU^*}{dt} = \dot{m}_{be} \cdot i_{be}^* - \dot{m}_{ki} \cdot i_{ki}^* + \dot{Q} + P \quad (3)$$

ahol:

- $\frac{dU^*}{dt}$ az általános mérlegelési térfogat torlóponthi belső energiájának időegység alatti elemi megváltozása (J/s);
- \dot{m}_{be} a mérlegelési térfogatba belépő tömegáram (kg/s);
- i_{be}^* a mérlegelési térfogatba érkező közeg fajlagos torlóponthi entalpiája (J/kg);
- \dot{m}_{ki} a mérlegelési térfogatot elhagyó tömegáram (kg/s);
- i_{ki}^* a mérlegelési térfogattól távozó közeg fajlagos torlóponthi entalpiája (J/kg);
- \dot{Q} hőáram (J/s);
- P teljesítmény (J/s).

A belső energia definíciója alapján a (3) egyenlet bal oldala felírható a következőképpen:

$$\frac{dU^*}{dt} = \frac{d(m \cdot c_v \cdot T^*)}{dt} \quad (4)$$

ahol:

- m a mérlegelési térfogatban tárolt tömeg (kg)
- c_v a gáz állandó térfogaton vett fajhője a mérlegelési térfogatban (J/kgK)
- T^* a mérlegelési térfogatban tárolt közeg torlópointi hőmérséklete (K)

Amennyiben feltételezzük, hogy a c_v izochor fajhő állandó, valamint T^* a teljes mérlegelési térfogatra vonatkozó átlagos érték, a (4) egyenlet jobb oldalának számlálójában található szorzat derivált tovább írható:

$$\frac{dU^*}{dt} = \frac{d(m \cdot c_v \cdot T^*)}{dt} = c_v \cdot T^* \cdot \frac{dm}{dt} + m \cdot c_v \cdot \frac{dT^*}{dt} \quad (5)$$

A mérlegelési térfogat torlópointi hőmérsékletének megváltozására rendezve az (5) egyenletet a következőt kapjuk:

$$\frac{dT^*}{dt} = \frac{1}{c_v \cdot m} \cdot \frac{dU^*}{dt} + \frac{T^*}{m} \cdot \frac{dm}{dt} \quad (6)$$

A mérlegelési térfogatra vonatkozó tömeg-megmaradási egyenlet a (2)-höz hasonló, viszont forrástagnót nem tartalmazó alakja:

$$\frac{dm}{dt} = \dot{m}_{be} - \dot{m}_{ki} \quad (7)$$

ahol:

- $\frac{dm}{dt}$ az általános mérlegelési térfogatban tárolt gáztömeg időegység alatti elemi megváltozása (kg/s)

A (3) és (7) egyenletek összevonásával a (6) összefüggés:

$$\frac{dT^*}{dt} = \frac{1}{c_v \cdot m} \cdot \frac{\dot{m}_{be} \cdot i_{be}^* - \dot{m}_{ki} \cdot i_{ki}^* + \dot{Q} + P}{dt} + \frac{T^*}{m} \cdot (\dot{m}_{be} - \dot{m}_{ki}) \quad (8)$$

Az ideális gázok állapotegyenletének ismeretében a (8) egyenlet a torlópointi hőmérsékletről a torlópointi nyomásra konvertálható:

$$\frac{dp^*}{dt} = \frac{p^*}{m} \cdot (\dot{m}_{be} - \dot{m}_{ki}) + \frac{p^*}{T^*} \cdot \left(\frac{\dot{m}_{be} \cdot i_{be}^* - \dot{m}_{ki} \cdot i_{ki}^* + \dot{Q} + P - c_v \cdot T^* \cdot (\dot{m}_{be} - \dot{m}_{ki})}{c_v \cdot m} \right) \quad (9)$$

ahol:

- p^* a mérlegelési térfogat átlagos torlópointi nyomása (Pa).

A (8) egyenlet alapján felírható az égéstér torlópointi nyomásváltozása. Azonban figyelembe kell venni, hogy az égéstér, mint mérlegelési térfogat, a rá jellemző p_3^* torlópointi nyomással, T_3^* torlópointi

hőmérséklettel. Továbbá belépő tömegárama a kompresszorból érkező \dot{m}_2 -vel egyenlő, kilépő tömegárama azonos a turbinába távozó \dot{m}_3 -mal, viszont a tüzelőanyag-betáplálás révén a (7) egyenlethez képest további forrástágot tartalmaz. Emellett nincs munkavégzés az égéstérben, és a tüzelőanyag belépő entalpiája elhanyagolható. Így az égéstér torlópontra felírható dinamikus egyenlet:

$$\frac{dp_3^*}{dt} = \frac{p_3^*}{m_{\dot{E}}} \cdot (\dot{m}_2 + \dot{m}_t - \dot{m}_3) + \frac{p_3^*}{T_3^* \cdot c_{vköz} \cdot m_{\dot{E}}} \cdot \left[\dot{m}_2 \cdot c_{pl} \cdot T_2^* - \dot{m}_3 \cdot c_{pg} \cdot T_3^* + H_a \cdot \eta_{\dot{E}} \cdot \dot{m}_t - c_{vköz} \cdot T_3^* \cdot (\dot{m}_2 + \dot{m}_t - \dot{m}_3) \right] \quad (10)$$

ahol:

- p_3^* az égéstér kilépő torlópontra nyomása (Pa);
- c_{pl} a levegő közepes izobár fajhője a kompresszorban (J/kgK);
- c_{pg} az égéstermék közepes izobár fajhője a turbinában (J/kgK);
- T_3^* az égéstér kilépő torlópontra hőmérséklete (K);
- H_a a tüzelőanyag alsó fűtőértéke (J/kg);
- $\eta_{\dot{E}}$ az égési hatásfok (-)>
- $c_{vköz}$ az égéstérben értelmezett közepes izochor fajhő (J/kgK).

A fűvócső tömegtároló képességét a (2) egyenlethez hasonlóan, forrástágot nélkül fejezhetjük ki:

$$\frac{dm_F}{dt} = \dot{m}_4 - \dot{m}_5 \quad (11)$$

ahol:

- $\frac{dm_F}{dt}$ a fűvócsőben tárolt tömeg időegység alatti megváltozása (kg/s);
- \dot{m}_4 a fűvócső belépő tömegárama (kg/s);
- \dot{m}_5 a fűvócső kilépő tömegárama (kg/s).

Az egyenletrendszer negyedik összefüggése, mellyel a forgórész energiamérlege írható le:

$$\frac{dE_f}{dt} = \dot{m}_3 \cdot (i_3^* - i_4^*) - \dot{m}_2 \cdot (i_2^* - i_1^*) - P_{sb} \quad (12)$$

ahol:

- $\frac{dE_f}{dt}$ a forgórész kinetikai energiájának időegység alatti megváltozása (J/s);
- i_3^* a turbina belépő fajlagos torlópontra entalpiája (J/kg);
- i_4^* a turbina kilépő fajlagos torlópontra entalpiája (J/kg);
- i_2^* a kompresszor belépő fajlagos torlópontra entalpiája (J/kg);
- i_1^* a kompresszor kilépő fajlagos torlópontra entalpiája (J/kg);
- P_{sb} a segédberendezések hajtására fordított teljesítmény (W).

Tekintettel arra, hogy a forgórész nem rendelkezik kihajtással, $P_{sb} = 0$ a vizsgált esetben. Másrészt pedig a forgórész kinetikai energiájának megváltozása felírható, mint:

$$\frac{dE_f}{dt} = \Theta \cdot \varepsilon \cdot \omega \quad (13)$$

ahol:

- Θ a forgórész tehetetlenségi nyomatéka ($\text{kg} \cdot \text{m}^2$);
- ε a forgórész szöggyorsulása (rad/s^2);
- ω a forgórész szögsebessége (rad/s).

Ha figyelembe vesszük a gyakorlatban mért fordulatszám és a szögsebesség közötti összefüggést:

$$n = 2 \cdot \pi \cdot \omega \quad (14)$$

ahol:

- n a forgórész fordulatszáma (1/s).

Illetve a szöggyorsulás szintén meghatározható a fordulatszám megváltozásával:

$$\varepsilon = \frac{d\omega}{dt} = \frac{d(2\pi \cdot n)}{dt} = 2\pi \cdot \frac{dn}{dt} \quad (15)$$

Vagyis a (13) egyenlet átírva a (14) és (15) összefüggésekkel:

$$\frac{dE_f}{dt} = \Theta \cdot 4\pi^2 \cdot n \cdot \frac{dn}{dt} \quad (16)$$

A forgórész energiamérlegének végső alakja a (12) és (16) egyenletek egybevetésével, a fordulatszám idő szerinti differenciálhányadosára rendezve, $P_{sb} = 0$ feltételezéssel:

$$\frac{dn}{dt} = \frac{1}{\Theta \cdot 4\pi^2 \cdot n} \cdot \left[\dot{m}_3 \cdot c_{pg} \cdot (T_3^* - T_4^*) \cdot \eta_{mech} - \dot{m}_2 \cdot c_{pl} \cdot (T_2^* - T_1^*) \right] \quad (17)$$

ahol

- η_{mech} a forgórész mechanikai hatásfoka (-).

A bevezetésben kikötött feltételek mellett tehát az egyáramú sugárhajtómű működését leíró matematikai modell dinamikus egyenleteit a (2), (10), (11) és (17) összefüggések adják.

Amennyiben ezen egyenleteket alkotó tagokat gázdinamikai függvényekkel helyettesítjük, megállapítható, hogy azokban a π_K^* kompresszor torlóponthi nyomásviszony, a π_T^* turbina torlóponthi nyomásviszony, az n fordulatszám, a q_T relatív tüzelőanyag tömegáram és a $\pi_{F,RA}$ fűvócső rendelkezésre álló nyomásviszony független változók találhatóak meg. Következésképpen levonható, hogy négy egyenletben öt független változót azonosíthatunk, tehát kell egy további összefüggés az egyenletrendszer zárásához. Ez lesz a szabályozási törvényszerűség.

A szabályozási törvényszerűség alapvető célja, hogy a hajtómű tolóerejét állandó értéket képviseljen, ha a repülőgép-vezető a hajtómű-vezérlőkart egy adott pozícióban tartja. Célszerű lenne tehát ezt a követelményt implementálni a fent levezetett egyenletrendszerben, azonban nincs lehetőség a tolóerő mérésére repülés közben, így tehát valamilyen közvetett szabályozást kell alkalmazni.

Lehetséges szabályozási törvényszerűségek

Mivel a hajtómű tolóereje a kilépő sebességtől és az áthaladó tömegáramtól függ, értelemszerűen, ahogy a kompresszor nagyobb fordulatszámon több levegőt szállít, valamint nagyobb nyomásviszonyt állít elő, melyből a fűvócsőre is nagyobb kilépő sebességet tud létrehozni, így a tolóerő a fordulatszám függvénye lesz. A kezdeti szabályozórendszerek ezt használták ki, és

hidraulikus [17] vagy hidromechanikus [33] megoldással a forgórész fizikai fordulatszámát tartották állandó értéken a gázkar adott pozíciójának megfelelően.

Ahogy egyre növekedett a repülési sebesség és magasság tartománya, úgy vált egyértelművé, hogy a fizikai fordulatszám nem képes teljes mértékben eleget tenni a tolóerő állandóságát célzó követelményeknek. Sokkal kedvezőbb eredmény érhető el, ha ehelyett az átszámított fordulatszámot vesszük alapul [29]:

$$n_{\text{átsz}} = \frac{n}{\sqrt{T_1^*}} \quad (18)$$

ahol

- $n_{\text{átsz}}$ a forgórész átszámított fordulatszáma
- T_1^* a kompresszor belépő torlóponyi hőmérséklete

Tekintettel arra, hogy a kilépő sebességre lehet következtetni belőle, a hajtómű nyomásviszony (EPR⁶) paraméter is alkalmas a hajtómű tolóerejének kijelzésére és szabályozására, melyet az 1960-as évektől először még csak az előbbi, majd az 1980-as években megjelenő digitális szabályozórendszerekben már az utóbbi feladatra is [36]. Az EPR definíciója az 1. ábra jelöléseivel összhangban:

$$EPR = \frac{p_4^*}{p_1^*} \quad (19)$$

A Rolls-Royce kétáramú sugárhajtóműveinél ennek egy tovább finomított verzióját alkalmazta, mely a külső és belső áramok fűvócsöveiben mért nyomásviszonyt a két áramban szállított közegmennyiséggel súlyozva használta fel, ezt IEPR⁷-nek nevezték [29].

A Rolls-Royce jelenlegi hajtóművei (Trent 900 és 1000) visszatértek az átszámított fordulatszám szerinti szabályozásra, de a normál működés mellett a ventilátor meghibásodása esetén a tolóerő állandóságát biztosító TPR⁸ szerinti korrekciót is alkalmazzák, valamint a TPR a teljesítmény kijelzés alapeleme, mely definíció szerint [25]:

$$TPR = \frac{p_2^*}{p_1^*} \cdot \sqrt{\frac{T_3^*}{T_1^*}} \quad (20)$$

A gyakorlatban a turbina előtti hőmérséklet helyett, annak mérésének problémái miatt általában vagy kilépő gázhőmérsékletet, vagy turbina forgórészek közti értéket használnak fel.

Szabályozási algoritmusok

A gázturbinás sugárhajtóművek mind a mechanikai, mind a termodinamikai viszonyokat tekintve jelentős nemlineáris jellemzőkkel rendelkeznek. A klasszikus irányításelméleti megközelítés során azonban adott munkapont környezetében linearizált modellekkel szokás közelíteni a bonyolult rendszert.

⁶ EPR: Engine Pressure Ratio

⁷ IEPR: Integrated Engine Pressure Ratio

⁸ TPR: Turbofan Power Ratio, (kétáramú sugár-)hajtómű teljesítményviszony



Az iparban leggyakrabban a PID⁹ szabályozókat alkalmazzák, egyszerű felépítésükre és megvalósíthatóságukra való tekintettel [32][35]. Gyakran a deriváló tag kimarad, így PI-szabályozóról beszélhetünk [13]. Tekintettel a hajtómű nemlineáris viselkedésére, különböző munkapontok között a szabályozó alaptagjait változtatva lehet a teljes tartományra kedvező viselkedést létrehozni, ez a gain scheduling technika [18], melyben az erősítési tényezők változtatását lehet pl. fuzzy logikával is meghatározni [24].

A linearizált rendszer optimális irányítására alkalmas az LQR¹⁰ technika, melynek alapját a rendszer adott munkapont környezetében linearizált állapotter reprezentációja képezi, mely számos alkalmazásban bizonyított [23][13]. Amennyiben a rendszer állapotai nem egyeznek meg a mérhető kimenetekkel (pl. a gázturbinás sugárhajtómű (2)-es egyenletében az égésterben tárolt tömeg nem mérhető), akkor állapotbecslő alkalmazásával lehetséges a feladat megoldása [4][30]. Ez a modell kiegészíthető véletlenszerű zajok hatásával (LQG¹¹) vagy a szabályozott rendszer nem teljes ismerete esetében az LTR¹² metódus használható [28].

Az állapotter modell esetében átmenetet képezhetünk a lineáris közelítés és a nemlineáris valós rendszer között, amennyiben az állapotter reprezentáció mátrixainak elemeit különböző paraméterek függvényében (gázturbinás sugárhajtóművek esetében pl. repülési magasság, Mach-szám stb.) írjuk fel, ez a LPV¹³, mely továbbra is lineáris megközelítést alkalmaz, de a mátrixok tartalmának módosításával jobb közelítést ér el széles üzemmód-tartományban [8][9].

Számos nemlineáris irányítási mód is alkalmazásra került, az ipar más területein is elterjedt fuzzy logika [35][2], a csúszómód szabályozás [21], robusztus H_∞ módszer [6][15] vagy éppen az MPC¹⁴ nemlineáris megvalósítása [26][19]. A repülőgép-hajtóművek területén a Rolls-Royce élen jár az utóbbi, a hagyományostól jelentősen eltérő szabályozásban, a Trent 1000 típusú hajtóműveken 2006 óta alkalmazza ezt a módszert [5].

Újszerű megközelítési módok is megjelentek az elmúlt évtizedek során, melyek a digitális elektronika térhódításával jutottak el a megvalósíthatóságig, mint pl. a szituációs irányítás (angol *situational control*), melyben a hajtómű üzemi jellemzői alapján normál és rendellenes állapotokat lehet megkülönböztetni, mindegyikben akár teljesen különböző szabályozási elv alapján irányítva a működést [16].

A SZABÁLYOZÁS MEGVALÓSÍTÁSA

A hajtómű átviteli függvényének meghatározása

A PID szabályozás tulajdonképpen egy soros kompenzáció, mellyel a zárt szabályozási körrel a visszacsatolt rendszernek biztosíthatjuk az elvárt tulajdonságokat (lásd 2. ábra). Leggyakrabban ez a rendszer stabilizálását is jelenti, azonban a gázturbinás sugárhajtóművek dinamikai

⁹ PID: proporcionális-integráló-deriváló (szabályozás)

¹⁰ LQR: Linear Quadratic Regulator, lineáris kvadratikus szabályozó

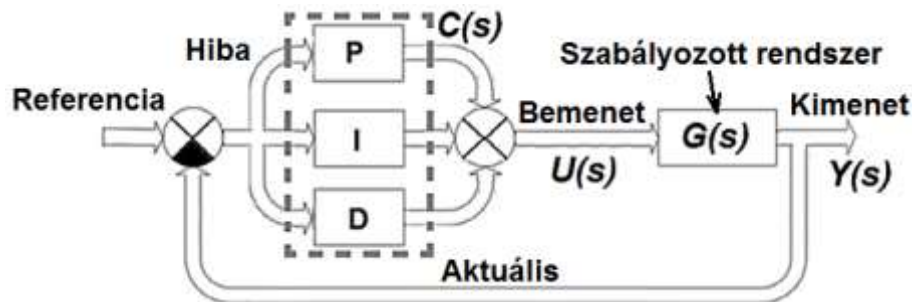
¹¹ LQG: Linear Quadratic Gaussian, lineáris kvadratikus szabályozó Gauss eloszlású zajjal

¹² LTR: Loop Transfer Recovery

¹³ LPV: Linear Parameter Varying, lineáris, paraméter-változtató szabályozás

¹⁴ MPC: Model Predictive Control, modell előrejelzésen alapuló szabályozás

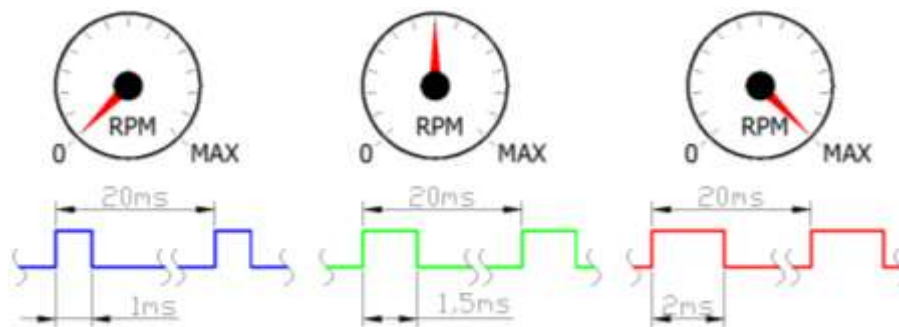
viselkedésének vizsgálatával belátható, hogy leggyakrabban az eredeti rendszer is stabil önma-
gában. Ezért a hajtómű szabályozó rendszerének elsősorban az időtartománybeli minőségi kö-
vetelményeket kell biztosítsa (túllendülés, válaszüidő stb.) [14].



2. ábra A PID szabályozással ellátott rendszer vázlata

A PID típusú szabályozó létrehozásához a szabályozandó rendszer átviteli függvényét kell meg-
határozni először, melyet mérés útján valósítottam meg, miután azonosítottam a rendszer be-
és kimeneti jellemzőit.

Jelen vizsgálat korlátait figyelembe véve, az állandó geometria miatt az egyedüli beavatkozó
jel a tüzelőanyag tömegárama. A bemenő jel tekintetében szükséges egy kicsit kitágítani a rend-
szerbe tartozó komponensek halmazát, ez esetben ugyanis a tüzelőanyagot egy fogaskerekes
szivattyú szállítja, melynek fordulatszám-szabályozásával lehetséges az aktuálisan betáplált
mennyiséget állítani. A fordulatszám változtatásáért egy kereskedelemben kapható kefé-
s motor szabályozó elektronikát alkalmaztam, melynek bemenete egy a rádió távirányítású modellek
terén szabványos, impulzus-szélesség modulált jel [3]. A jel egy 50 Hz-es frekvenciával ismét-
lődő, változó kitöltési tényezőjű négyszögjel, melyben a magas jelszint hossza (1–2 ms) szabja
meg a vezérelt értéket, 1ms minimális jel esetén áll a motor, 2ms esetén maximális fordul-
számmal forog (lásd 3. ábra).



3. ábra Szabványos R/C kefé- motor fordulatszám-szabályozó működése

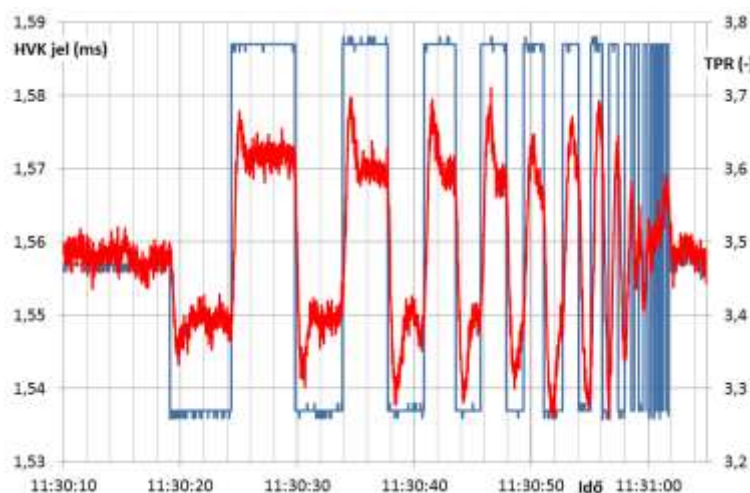
Amennyiben az akkumulátor feszültsége állandónak tekinthető, akkor adott kitöltési tényező-
höz adott szivattyúmotor fordulatszám tartozik. Ilyen feltételek mellett érdemes a rendszer be-
menetéül azt a PWM¹⁵ jelet választani, mely ezen elektronikus áramkörnek a vezérlőjeleként
közvetlenül meghatározza a tüzelőanyag-betáplálást. A gyakorlati tapasztalat azt mutatja
egyébként, hogy egy átlagos képességű 2000 mAh körüli kapacitású akkumulátor 15–20 percen

¹⁵ PWM: Pulse Width Modulation, impulzus-szélesség moduláció

keresztül képes ezt a feltételt biztosítani, miközben a tervezett repülőeszköz kb. 10 percnyi repülésre lesz alkalmas a hasznos tüzelőanyag-készletével.

Kimenetként pedig a vizsgálat tárgyát képező TPR jellemzőt alkalmaztam, amelynek egyáramú sugárhajtóműveknél a tolóerővel való nagyfokú korrelációját tapasztaltam a mérések során, melyet a cikkben később részletesen is bemutatok. Emiatt kifejezetten alkalmas szabályozási törvényszerűségnek, nem csak nagy kétáramúsági fokú sugárhajtóművek esetén.

A következő lépésként megtörténhet a kiválasztott be- és kimenetek közti átviteli függvény meghatározása. Ehhez a megvalósított szabályozóban kialakított „különleges üzemmódot” használtam, ami képes automatikusan, lassan növekvő frekvenciájú négyszögjel képzésére. A négyszögjel 10 másodpercnyi periódusidőtől lassan halad 0,1 s-ig, mely tartomány tulajdonképpen a várható zavarások (beavatkozások) tipikus értékeit fedi le. A részleteket a későbbi fejezetben fogom taglalni, most szorítok az átviteli függvény meghatározására, melyhez számos mérést végeztem ezen speciális üzemmóddal, miközben a szabályozó a mért adatokat RS232 soros kommunikációs csatornán keresztül egy mérő-adatgyűjtő számítógép részére továbbította. Az így keletkezett adatsorok alapján, melyből egy tipikus részletet mutat a 4. ábra, lehetséges az összefüggés meghatározása.



4. ábra Négyszögjel gerjesztés és TPR válaszfüggvénye

Mivel az adatok mind időben, mind értékészletükben diszkrét, így azonnal nem lehet belőlük a folytonos rendszerre következtetni. Először szükséges a diszkrét rendszer átviteli függvényének azonosítása, majd utána lehetséges áttérni a folytonos tartományra. Ennek céljára egy LabVIEW program készült, melyben az Output-Error módszert alkalmaztam a diszkrét átviteli függvény meghatározására. A módszer által alkalmazott összefüggést az ismert be- és kimenetek közötti kapcsolat leírására, valamint az általa meghatározott átviteli függvényt a (21) és (22) egyenletek mutatják.

$$y(k) = G(z) \cdot u(k) + e(k) \quad (21)$$

ahol:

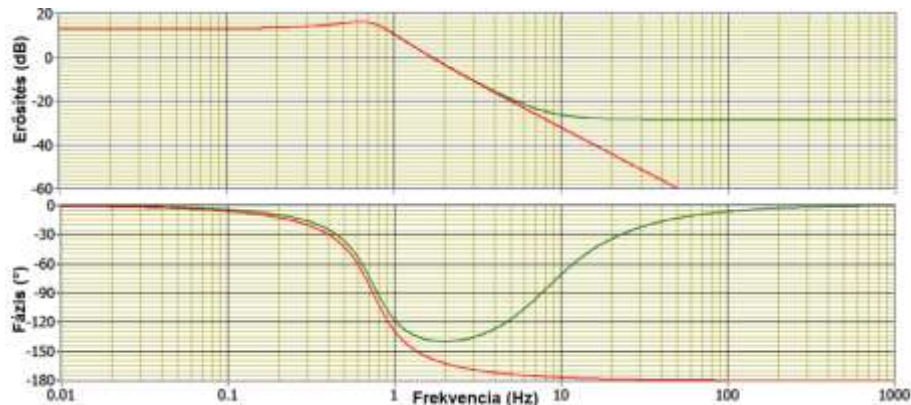
- $y(k)$ a k. időpillanatban mért kimenet;
- $G(z)$ a diszkrét rendszer átviteli függvénye;
- $u(k)$ a k. időpillanatban mért bemenet;
- $e(k)$ a k. időpillanatban hiba.

$$G(z) = \frac{0,00374}{1 - 1,924z^{-1} + 0,9326z^{-2}} \quad (22)$$

A következő lépés a diszkrét rendszernek megfelelő folytonos rendszer átviteli függvényének meghatározására, melyet szintén a fentebb említett számítógépes program valósított meg, és a következő összefüggést eredményezte:

$$G(s) = \frac{0,00374 \cdot s^2 + 10,81 \cdot s + 96,87}{s^2 + 3,49 \cdot s + 21,86} \quad (23)$$

Mivel a tipikus gázturbina modellek [20] szerint mint holtidős egytárolós rendszer írhatóak fel, így a (23) egyenletbeli átviteli függvényt is érdemes redukálni. Az identifikált rendszer Bode-diagramját megvizsgálva (lásd 5. ábra), a rendszer nagy frekvenciákon (10 Hz fölött) állandósuló erősítést mutat, mely minden bizonnyal nem lehetséges a valóságban, minden bizonnyal a mért adatokban fellelhető, mérőrendszerből érkező véletlenszerű zajoknak tudható be. Ilyen frekvenciájú beavatkozás nem várható a gázturbina tekintetében, tehát az egyszerűsítés nem okoz problémát, és a (24) egyenletben leírt alakot ölti:



5. ábra Az identifikált rendszer eredeti (zöld) és egyszerűsített (piros) Bode-diagramja

$$G(s) = \frac{96,87}{s^2 + 3,49 \cdot s + 21,86} \quad (24)$$

PID típusú szabályozás tervezése

Miután a folytonos rendszer átviteli függvénye rendelkezésre áll, következhet a szabályozás megtervezése. Az előző fejezetben említett számítógépes program a zárt hurkú rendszer optimalizálására is alkalmas volt. A többféle leírási módszer közül a PID tagokat külön-külön kezelő párhuzamos formulát választottam, melyben a soros kompenzátor átviteli függvénye a következőképpen adódik, összhangban a 2. ábra jelöléseivel:

$$C(s) = K_p + \frac{K_I}{s} + K_D \cdot s \quad (25)$$

ahol

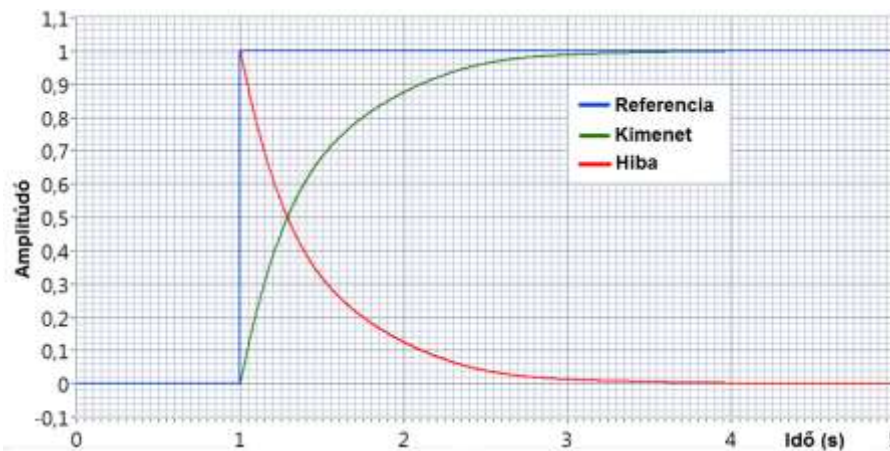
- $C(s)$ a szabályozó átviteli függvénye operátor-tartományban;
- K_p, K_I, K_D rendre az arányos, integráló és deriváló tagok erősítési tényezői.

A program által végrehajtott optimalizálás eredményeképpen a következő értékek adódtak:

$$K_p = 0.090; K_i = 0.500; K_d = 0.025 \quad (26)$$

Ugyan meghatározhatóak a zárt kör erősítési- és fázistartalékai, valamint sávszélessége, de ezek mind jóval nagyobbak, mint a várható üzemelési frekvencia-tartomány.

Ezért a szabályozott rendszerrel szemben támasztott minőségi követelmények elsődlegesen időtartományban értelmezhetőek. Legfontosabb a túllövés mértéke, melynek minél kisebb értéket kell elérnie, hogy egy tranziens folyamat során a hajtómű sem mechanikai, sem hőterheléseknek ne legyen túlzottan kitéve. Ezen kívül még jelentős szempont a válaszidő és beállási idő, azaz ne legyen a rendszernek nagy késleltetése, illetve hamar elérhesse a kijelölt új referenciaértéket. Értelemszerűen a repülés biztonsága megköveteli, hogy a hajtómű minél rövidebb idő alatt reagáljon, de másik oldalról a túl gyors tranziensek általában oszcillációkhoz vezetnek, melyek szintén nem kedvezőek.



6. ábra A zárt hurkú szabályozás válasza egységugrás bemenetre

A 6. ábrán megfigyelhető, hogy a megtervezett szabályozó finom átmenetet biztosít lengésmentes tranziens folyamattal a régi és új referencia között. Megállapítható, hogy zérus mértékű túllövés kifejezetten kedvező, hiszen gyorsítás során nem ér el a referenciánál nagyobb fordulatszám-értékeket, ennek eredményeképpen a mechanikai terhelés az elvárt korlátok között marad. További következmény, hogy a gázhőmérséklet is mérsékelt marad, vagyis a hőterhelések is alacsonyabbak, következésképpen a hajtómű élettartamára kedvező hatása van. Emellett a válaszidő 1,05 másodpercnek adódik, mely megadja, hogy a kimenet 10%-ról 90%-ra növekedéséhez mennyi idő szükséges. A beállási idő sem több, mint 2,15 másodperc, így megfelelő gyorsulóképességet biztosít a hajtóműnek.

A szabályozási törvényszerűség implementálása

A digitális szabályozás érdekessége, hogy egy folytonos rendszert diszkrét időpillanatokban mintavételezve próbálunk meg irányítani, így az előző fejezetben megállapított folytonos átviteli függvényét a PID tagoknak konvertálni kell időtartományra. A (25) összefüggés inverz Laplace transzformálásával a következő időtartománybeli egyenletet kaphatjuk [31]:

$$u(n) = K_p \cdot e(n) + K_i \cdot \sum_{k=1}^n e(k) + K_d \cdot [e(n) - e(n-1)] \quad (27)$$

ahol:

- $u(n)$ a szabályozó által az n . pillanatban kiadott vezérlőjel;



- $e(n)$ az n . pillanatban észlelt eltérés (hiba) a referencia és a rendszer kimenete között;
- $\sum_{k=1}^n e(k)$ az n . időpillanatig felhalmozódó hibák összege;
- $e(n-1)$ az $n-1$. időpillanatban észlelt hiba.

Az időtartományra transzformált tényezők pedig a következőképpen határozhatóak meg:

$$K_p = K_P \quad K_i = K_I \cdot T \quad K_d = \frac{K_D}{T} \quad (28)$$

ahol T a szabályozó ciklusideje (s).

A szabályozó jelen kialakításában 100 ms ciklusidővel dolgozik, bár megállapítható, hogy modern rendszerek ennél közel egy nagyságrenddel kisebb értékekkel rendelkeznek [22]. Mivel a tesztek megmutatták, hogy ez a gyorsaság elégséges, ez mint továbbfejlesztési lehetőség szerepel a távlati tervekben.

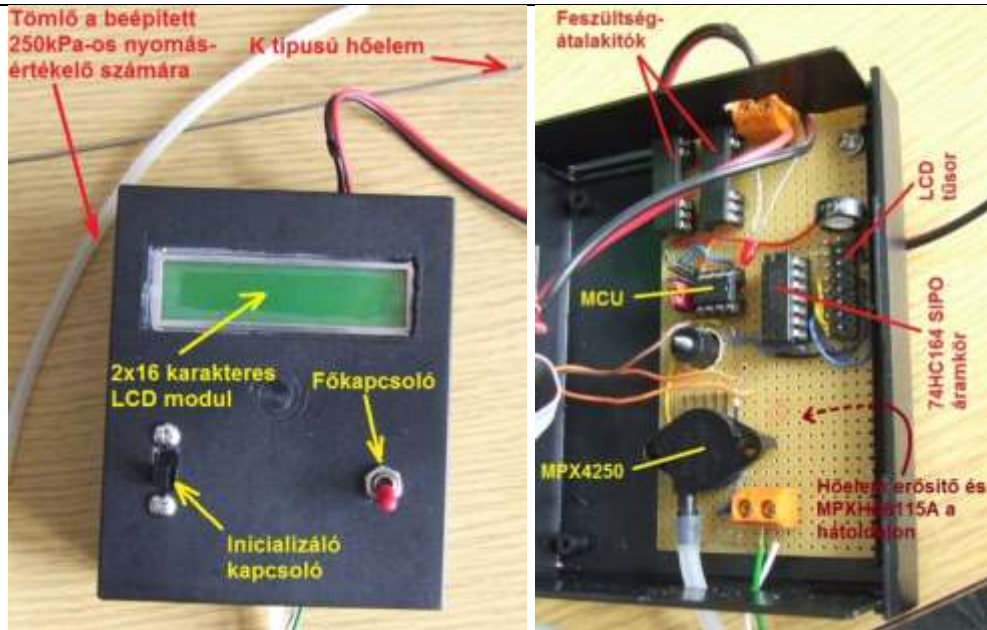
A SZABÁLYOZÓRENDSZER FEJLESZTÉSE

A kezdeti konstrukció

A legelső változat még csak egy előtanulmány volt, 2009 végén került kifejlesztésre, mellyel a gázturbinás sugárhajtómű legalapvetőbb termodinamikai paramétereit lehetett mérni, úgy mint kompresszor nyomásviszony π_K^* , környezeti nyomás p_0 és hőmérséklet T_0 , turbina utáni gáz-hőmérséklet T_4^* . Ezen jellemzőknek a valós idejű megjelenítésére képes egy 2 soros, 16 karakteres kijelzőn, emiatt kísérleti célokra, üzemi paraméterek ellenőrzésére napjainkig alkalmazásban van, hibátlanul működik (lásd 7. ábra). A kompresszor utáni nyomás érzékelését egy 250 kPa méréshatárú MPX4250, a környezeti nyomásét egy 115 kPa tartományban működő MPXHZ6115A Freescale gyártmányú piezorezisztív szenzor valósítja meg. A turbina utáni gázhőmérsékletet K típusú hőelemmel, a környezeti hőmérsékletet pedig a mikrokontroller beépített érzékelőjével mérjük.

Központi egysége egy 8 lábú, 8 bites mikrokontroller (MCU¹⁶), mely már nem tette lehetővé további jelek, mint pl. fordulatszám beolvasását, vagy a szabályozó kimenet definiálását. Visszont értékes tapasztalatokkal gyarapította a fejlesztést, és így létrejöhett a második verzió.

¹⁶ MCU: MicroController Unit, mikrovezérlő



7. ábra Az első, még csak mérésre és paraméterek kijelzésére alkalmas áramkör

Az első szabályozó

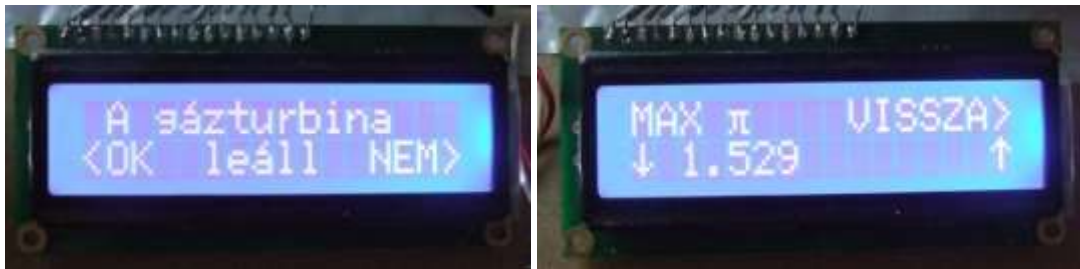
A második áramkör 2011-ben készült el, melyet jelentős részben lehetett az első megvalósításakor, programozásakor szerzett tapasztalatokra építeni, már a szabályozás megvalósítását tűzte ki célul, emiatt a központi egység egy 16 lábú mikrokontroller lett, ugyanabból a családból (Freescale MC9S08QG), de már a belső memóriája is 8 kB-ra növekedett.

Legjelentősebb változás, hogy egy kétcsatornás, 16 bites számlálót alkalmaz a rádió távirányító vevőegységéből érkező gázkar jelek vételére, illetve az az alapján történő PWM kimenet beállítására. Lehetőség volt egyszerű vezérlésnek a megvalósítására, azaz a bemeneten érzékelt jelet változtatás nélkül a kimenetre továbbítja, illetve szabályozásra, mely a fordulatszám-érzékelés problémái miatt a kompresszor nyomásviszonyt használta szabályozott paraméterként. Algoritmusként egy kezdetleges PI szabályozás került implementálásra (lásd 8. ábra). Mivel az adatokat még nem tudta sem tárolni, sem továbbítani, a kijelzőn valós időben megjelenő értékek csak az üzemelés során készített videó felvételtől voltak helytel-közzel visszanyerhetőek.



8. ábra A szabályozó és a sugárhajtómű üzem közben, illetve a teljes áramkör

Az első változat kezdetleges szövegkezelése helyett itt már hatékonyabb rutinok látták el ezt a feladatot, a programmemória felső, nem használt részén szöveges konstansok kerültek elhelyezésre, melyek a képernyőn megjelenő információkat továbbították a felhasználó számára. Megjelentek az LCD¹⁷ mellett a nyomógombok, melyekkel a képernyőn megjelenő üzenetekre lehet reagálni. A későbbi menürendszer kezdeménye is itt alakult ki: már be lehetett állítani a maximálisan megengedett kompresszor nyomásviszonyt, illetve pl. a indítás és leállítás is innen zajlott, amint az a 9. ábrán látható.



9. ábra Jellegzetes képernyők a működés közben

Módosult az analóg-digitális átalakítás is, külső, I²C¹⁸ soros buszon kommunikáló 16 bites mikro méretű A/D¹⁹ integrált áramkörök látják el ezt a feladatot. Az alkalmazott Texas Instruments ADS1100 IC²⁰ SOT²¹23-6 tokozásban készül, melynek mindössze 3×1,45mm a mérete, és egy komplett adatgyűjtő rendszert tartalmaz öntesztel és kalibrálási lehetőséggel. Ennek segítségével pl. a p₀ környezeti nyomás felbontása és pontossága megközelítette az 1 Pa értéket, ami valamivel kisebb, mint 10 cm-es magasság-különbségnek felel meg.

A szabályozó a gyakorlatban csak néhány alkalommal működött együtt a sugárhajtóművel, abban az időben még a gázturbina tervezése is folyamatban volt.

A moduláris elektronika fejlesztése

Az első sikeres szabályozó megalkotását és a kiforrott gázturbina megjelenését követte annak a koncepciónak a létrehozása, mely a néhány kilogramm felszálló tömegű, rádió távirányítású modell repülőgépek számára is alkalmas rendszert eredményezett. A harmadik verzió tervezése 2013 tavaszán kezdődött, és a teljes rendszer első éles üzemi próbájára 2014 őszén került sor.

Először is természetesen azokat a korlátozó feltételeket kellett meghatározni, melyek ebben az új környezetben elengedhetetlenek:

- legyen a tényleges szabályozást végző áramkör mérete és tömege minél kisebb, hogy ne jelentsen akadályt a repülőgépre történő beszerelésé;
- az előző pontnak megfelelően rendelkezzen a minimális működéshez feltétlenül szükséges eszközökkel, de legyen alkalmas a bővítésre;
- legyen képes kommunikálni külső elektronikus eszközökkel, számítógéppel.

¹⁷ LCD: Liquid Crystal Display, folyadékkristályos kijelző

¹⁸ I²C: Inter-Integrated Circuit, integrált áramkörök közötti (soros kommunikációs szabvány)

¹⁹ A/D: analóg-digitális (jelátalakítás)

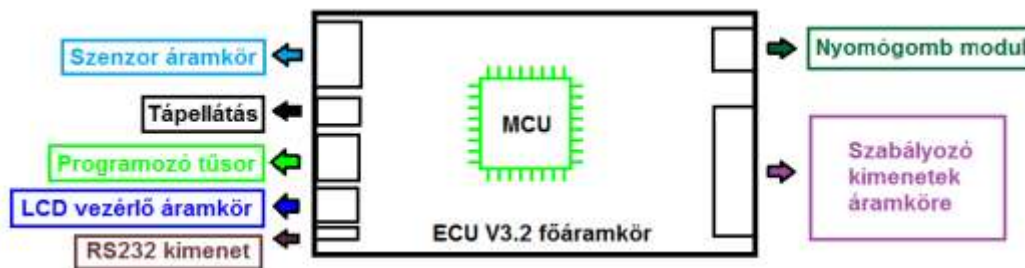
²⁰ IC: Integrated Circuit, integrált áramkör

²¹ SOT: Small Outline Transistor, kisméretű (felületszerelt, eredetileg) tranzisztor tokozás

Ezekon felül, annak érdekében, hogy a berendezést (hajtóművet) a gázturbinák üzemeltetésében járhatóan is tudják kellő biztonsággal működtetni, olyan jellemzőkkel is bírnia kell, mint:

- legyen képes önellenőrzést végrehajtani, a hajtómű indítása előtt és normál üzem közben is, hogy a meghibásodások időben felismerhetőek és behatárolhatóak legyenek;
- legyen hibatűrő, azaz a működés lehetőség szerint a hiba vagy hibák fellépését követően is folytatható legyen;
- legyen képes szükség szerint a hajtómű vészleállítására;
- legyen alkalmas a gázturbina automatikus indítására.

Mindezen feltételek alapvetően meghatározták a hardver, majd a firmware fejlesztésének irányait. A szabályozó koncepcionális felépítését a 10. ábra mutatja.



10. ábra A MARCEL rendszer elvi vázlata

A hardver jellemzői

Az előző verzió tapasztalatai alapján kijelenthető, hogy a 16 lábú mikrokontrollerrel szükség szerint megvalósítható a szabályozás (sőt, kijelző nélküli konfigurációban az első változat 8 lábú vezérlője is alkalmas, lásd [10]), de a többlet követelmények miatt már sokoldalúbb megoldásra volt szükség. A Freescale 8 bites mikrovezérlői közül az MC9S08DN60 típus 32 lábú variációját választottam, mert ennek a képességei álltak legközelebb az elvártakhoz, úgy mint [7]:

- 60 kB programmemória;
- 2kB SRAM²²;
- 12 bites SAR²³ A/D átalakító tíz csatornával;
- két független, 16 bites számláló 4+2 csatornával;
- RS232 kompatibilis soros kommunikációs vonal;
- él- és szintvezérelt, megszakítás generálására alkalmas digitális I/O²⁴ vonalak;
- 2 kB belső EEPROM²⁵.

A feladatok ellátására három áramkör készült, melyek a következők:

- fő áramkör, melyen megtalálható a mikrovezérlő, a tápellátásért felelős áramköri elemek, valamint azok a csatlakozók, melyekkel a többi modullal és a külvilággal tartja a kapcsolatot;

²² SRAM: Static Random Access Memory, statikus (frissítést nem igénylő) írható-olvasható memória

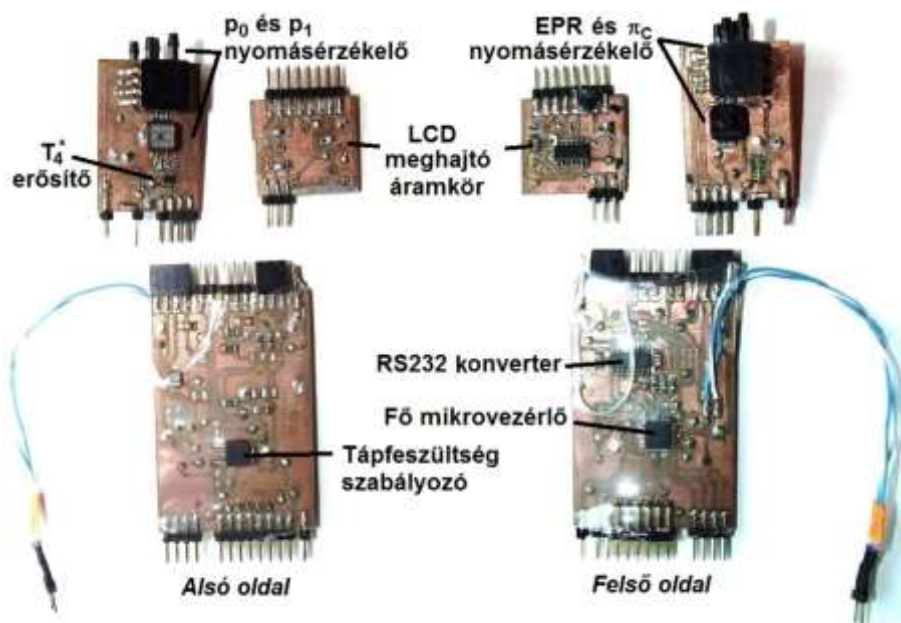
²³ SAR: Successive Approximation Register, szukcesszív approximáció

²⁴ I/O: input-output, kimenet-bemenet

²⁵ EEPROM: Electrically Erasable Programmable Read Only Memory, elektronikusan törölhető, programozható csak olvasható memória

- érzékelők modulja: a nyomás- és hőmérsékletérzékeléssel kapcsolatos áramkörök kerültek elhelyezésre rajta;
- LCD modul: amennyiben nincs lehetőség RS232 kommunikációra (pl. nincs hordozható számítógép), akkor a kétsoros, 16 karakteres LCD-n jeleníthetők meg az üzemeléssel kapcsolatos információk, valamint az itt elhelyezett nyomógombokkal lehetséges a szabályozó kiterjedt menürendszerében való navigáció is.

A moduláris kialakítás nagy előnye, hogy pl. a súlyos LCD modult, amire repülés közben úgyszincs szükség, el lehet távolítani, vagy ha nincs szükség a gázturbina működésének részletes információira, akkor a szenzor modul is leválasztható, a maximális súlycsökkentés érdekében. Természetesen a földi próbák során mindegyik áramkör együtt dolgozott. Az áramköröket főbb egységeikkel az 11. ábra mutatja.



11. ábra A moduláris szabályozó áramkörei

A szabályozó firmware

A moduláris elektronika központi mikrokontrollere az eddigieknél jóval bonyolultabb vezérlőprogramot kapott. Számos újdonság először itt jelent meg, szerves folytatásaként a megelőző fejlesztéseknek.

Analóg-digitális konverzió

Bár a 2-es verzió 16 bites külső IC-éhez képest félig-meddig visszalépést jelent a mikrokontrollerbe épített 12 bites A/D alkalmazása, de mindent egybevéve kedvezőbb eredmény érhető el ezzel a megoldással. A pontosság így is megfelel az elvártaknak, a csatornaszám pedig mindenképpen kielégíti még a részletes vizsgálatok igényeit is. Ugyanez külső egységek esetén jelentősen növelné az egyedi IC-k számát, emelné az I²C busz leterheltségét, ami jelalak torzuláshoz vezetne további jelregeneráló áramkörök híján.

A beépített A/D ugyan kisebb felbontással rendelkezik, de SAR architektúrájának köszönhetően maximum 10 MHz-es ütemjellel képes működni. Jelen konfigurációban 16 MHz-es busz



órajel felezésével 8 MHz került beállításra. A mikrokontroller kézikönyve [7] alapján egy 12 bites konverzió időigénye a következő képlettel számítható:

$$T_{AD} = 5\mu s + \frac{43}{f_{ADCLK}} + \frac{5}{f_{busz}} \quad (29)$$

ahol

- T_{AD} az A/D konverzió ideje (s);
- f_{ADCLK} az A/D modul órajele (Hz);
- f_{busz} a mikrokontroller fő rendszerbuszának órajel frekvenciája (Hz).

A fenti adatokkal $T_{AD} = 5,69\mu s$ -ra adódik, vagyis számos mérést lehet végezni egyetlen ciklus során. A program emiatt a következőképpen lett kialakítva: az A/D modul megszakítást generál, amikor végez egy konverzióval. A megszakítás rutin egy belső regiszterben számolja, hogy az adott csatornán elérte-e már a 16. átalakítást, ha nem, akkor az adott csatorna kétféle adatregiszterének aktuális értékét az éppen beolvasottal növeli. Egyszerűen kiszámítható, hogy a 12 bites felbontás maximálisan a 4095 értéket adhatja vissza, ha az analóg jel éppen a referenciával (tápfeszültség) egyenlő. Ilyen körülmények között 16 konverzió során maximum 65520 lehet a legnagyobb érték, ami lényegében a 16 bites számábrázolás felső korlátjával egyezik meg, vagyis mintegy 16 bitesre bővíthető ezzel a módszerrel a felbontás. Másik oldalról nézve a 16 mérés átlagát vesszük figyelembe ilyen módon, így szűrjük az előforduló zajokat.

Nyomógombok kezelése

A második verziójú szabályozónál jelent meg a nyomógombos vezérlés lehetősége, itt azonban jelentős mértékben bővült, mélyült a program. Kihhasználva az MCU adottságait, számos digitális bemenetével képes él- vagy szintvezérelt megszakítás létrehozására, így a nyomógombok kezelése is megszakításos technikára épül.

Ez a megoldás lehetővé teszi, hogy ne a főprogram futása közben, lekérdezés alapján lehessen eldönteni, hogy egy adott nyomógombot megnyomott-e a felhasználó, hanem az esemény bekövetkeztekor a vezérlés átadódik a megszakítást kiszolgáló szubrutinnak (ISR²⁶) és azonnal kiértékelődik a nyomógombok állapota. Ezt egyrészt a menürendszerben való navigálásra, másrészt pedig a beállítások esetén az aktuálisan mutatott értékek megváltoztatására szolgál.

RS232 soros kommunikáció

A számítógéppel való adatsere az MCU RS232 kompatibilis moduljával történik. A megszakításos technika itt is kedvező eredményt hozott. Jelenleg ugyan még csak a számítógép felé történő adattovábbítás működik, a szabályozó nincs felkészítve az onnan érkező adatok fogadására, de ez eddig elegendőnek bizonyult az üzem közben történő adatgyűjtésre. A program egy puffert alkalmaz a memóriában, amit a főprogram feltölt, majd ezután jelzi az RS232 modulnak, hogy indulhat az adatküldés.

Az MCU RS232 modulja akkor kezdi meg a kommunikációt, amikor adatot írunk annak adóregiszterébe. Innentől kezdve a modul ellátja a szükséges teendőket, a felhasználónak az adás

²⁶ ISR: Interrupt Service Routine, megszakítás kiszolgáló (szub)rutin



befejezésekor van lehetősége a következő adatbájt küldésére. Ezt lehet lekérdezővel vagy megszakítással megvalósítani, jelen konstrukcióban az utóbbit alkalmaztam. Ennek lényege, hogy a modul küld értesítést arról, hogy elkészült az adatátvitellel. Ekkor a program belép a megszakítás-kezelő rutinba, ahol beállításra kerül a következő küldendő bájt címe, és folytatódhat a kommunikáció, egészen az utolsó küldendő adatig. Ekkor törli a puffert, és jelzi a főprogramnak, hogy az kész az új adatok fogadására.

Az eljárás előnye, hogy nem kell a relatíve lassú (16 MHz órajel \leftrightarrow 38,4 kbps²⁷) soros kommunikáció befejeződésére várni, a főprogram haladhat tovább, lehet a beolvasott értékeket konvertálni, üzemmódra vonatkozó számításokat végezni, stb. A megszakításrutin mindössze annyi időt vesz igénybe, hogy beolvassa a következő adatot, indítsa a küldést, és a puffermutatót egygel növelve visszaadja a vezérlést a főprogramnak.

Az LCD modul kezelése

Tulajdonképpen ez a legrégebbi rutin, mely már az első verzióban is megtalálható volt, természetesen számos fejlesztésen ment keresztül.

Az első variációban a program tartalmazta a kiírandó szöveget, majd a második lépésben készült el az a szöveg-konstans táblázat, mely a programmemória felső részén elhelyezett értékekből dolgozott. Emellett még a számábrázolás is megoldott, a jobb memória kihasználás miatt fixpontos számábrázolást alkalmaztam, mivel a lebegőpontos jelentős számítás- és memóriaigénye ebben a kategóriában nem versenyképes. Természetesen gyorsabb órajel és nagyobb RAM esetén, mint továbbfejlesztés, megvalósítható.

A SZABÁLYOZÓRENDSZER MŰKÖDÉSÉNEK VIZSGÁLATA

A működés ellenőrzése nagy bemenő jelek esetén

Mivel a szabályozó egyik célja, hogy a sugárhajtómű üzemeltetésében kevésbé jártas személyek is tudják biztonsággal használni a berendezést, ezért meg kellett győződni, hogy a hajtómű nemlinearitása okoz-e rendellenes viselkedést.

A hajtóművet a beépített automatikus indítási ciklussal alapjáratra kifuttatva, onnan hirtelen mozdulattal a gázkart maximális állásba helyezvén megmutatkozott a probléma, nevezetesen az alapjáraton másképpen viselkedő hajtóműnek a szabályozó túlzott tüzelőanyag-betáplálást adott, így az égéstérben a jelentősen feldúsult keverék lángkialváshoz vezetett.

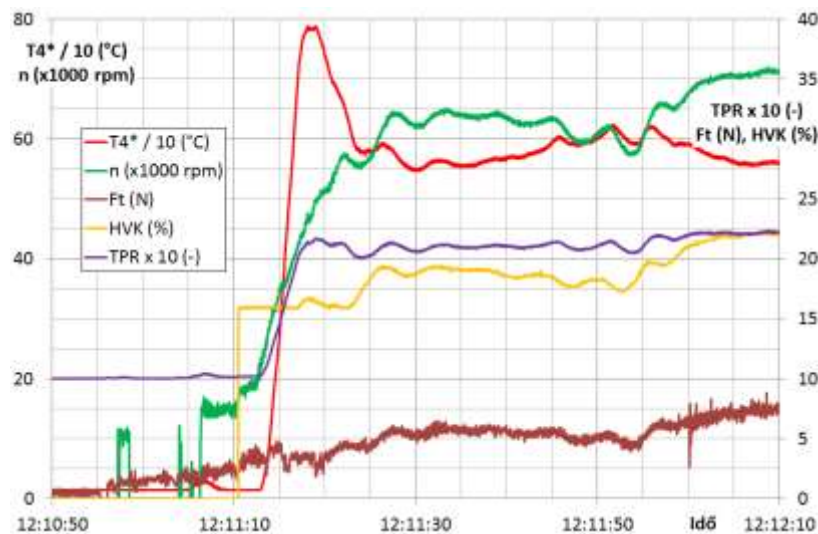
Ennek folyamányaként, használva a szabályozó menürendszerét csökkentettük az arányos tag értékét, melynek hatására sikerült olyan feltételeket biztosítani, ami kielégítő működést eredményez minden üzemmódon, de egyúttal a biztonságos üzemelést is garantálja. Természetesen a továbbfejlesztés során a gain scheduling módszerrel ez a megoldás tovább finomítható.

A szabályozó részletes vizsgálata

Ez a kísérlet a hajtómű teljes üzemmód-tartományát lefedő mérésorozatot jelentett. Amiatt, hogy megállapítható legyen egy esetleges zavarás hatására alapjárat alá csökkenő fordulatszám

²⁷ kbps: kilobits per second, másodpercenként elküldött ezer bit

esetén is képes-e a szabályozó a gázturbina elvárt módon történő irányítására, az általam választott tartomány is kissé alpjárat alól indult.



12. ábra Indítás és üzemmódra kifizés

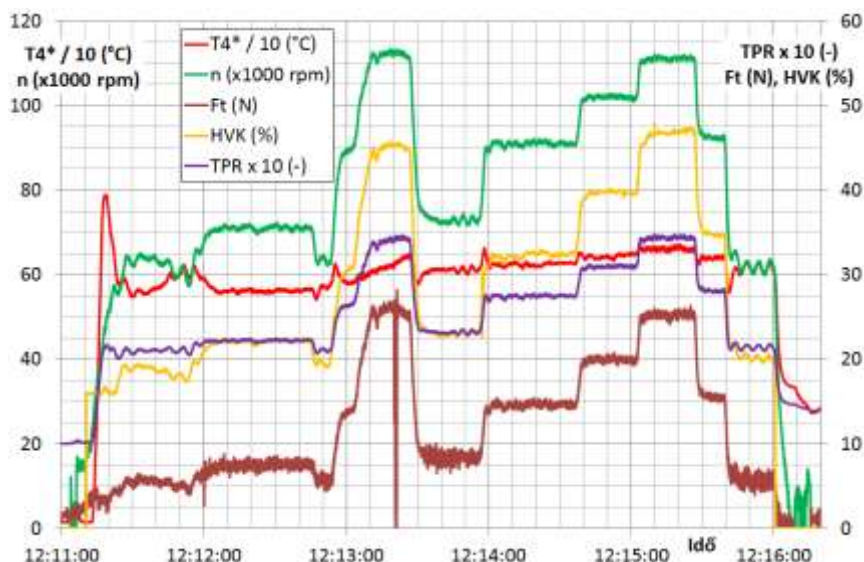
Először tekintsük meg az indítás és a szándékosan, fenti elvek alapján csökkentett alpjáratra történő kifizés, illetve ottani üzemelés jellemzőit. Ezt a 12. ábrán követhetjük. A kezdeti pillanatokban meg-megjelenik a fordulatszám-jel, ez természetesen amiatt van, hogy a 100-150 ezer fordulat/perc tartományra optimalizált eszköz ilyen lassú forgást nem tud még kielégítően érzékelni. Megfigyelhető 12:11:05 után egy emelkedés, majd süllyedés a turbina utáni gázhőmérsékletben, ez az előgyújtás hatása, melynek célja a párologtatós elrendezésű égéstérben a minimális hőfok biztosítása. A hőmérséklet csökkenése pedig annak köszönhető, hogy az előmelegítést végző gáz belobbanását követően a fordulatszámot növeli a szabályozó annak érdekében, hogy a betüzelés már kedvezőbb viszonyok között kezdődhessen (az itt látható 15000 fordulat/perc közeli érték a névlegesnek mintegy 10% csupán). Kevésbé 12:11:10 után látható a HVK jel megugrása, mely huzamosabb ideig, közel 7 másodpercen keresztül állandó marad. Ez a jelenlegi program szerinti alapgázra való kifizéshez szükséges tüzelőanyag-mennyiség, mellyel nagyjából 10 másodperc alatt éri el a kijelölt üzemmódot, de ott lengések jönnek létre, az üzemállapot nem tud állandósulni. 12:11:25 előtt beavatkozás történik a gázkaron keresztül, kissé emelvén a fordulatszámot, 55000-ről közel 65000 fordulat/percre (a névleges 153000 percenkénti fordulatszámhoz ezek hozzávetőlegesen 36 és 42,5%-ai), ezáltal a lengések csillapodnak, de még így is észrevehetőek. Amint a gázkár kezd ismét enyhén csökkenő tendenciát mutatni, az oszcilláció ismételen erősödik. Megállapítható tehát, hogy a szabályozó jelenlegi beállításával ilyen alacsony fordulatszámon állandó üzemi viszonyokat nem képes ugyan tartani, de az ábra tanúsága szerint az onnan normál tartományba való visszatérés gond nélkül megvalósítható, ahol viszont már kedvező tulajdonságokat mutat a rendszer.

Célszerű megemlíteni, hogy a repülőgép-hajtóműként alkalmazott egyáramú sugárhajtóművek esetén 60% közelébe szokott esni az alpjárat értéke, az itt vizsgált tartomány tehát jócskán a szokásos alatt helyezkedik el.

Másrészt pedig az indításkori tüzelőanyag-adagolás kérdése egy lehetséges továbbfejlesztési irány: a jelenleg állandó betáplálás helyett egy előre meghatározott program (pl. konstans dn/dt) szerint módosítható volna.

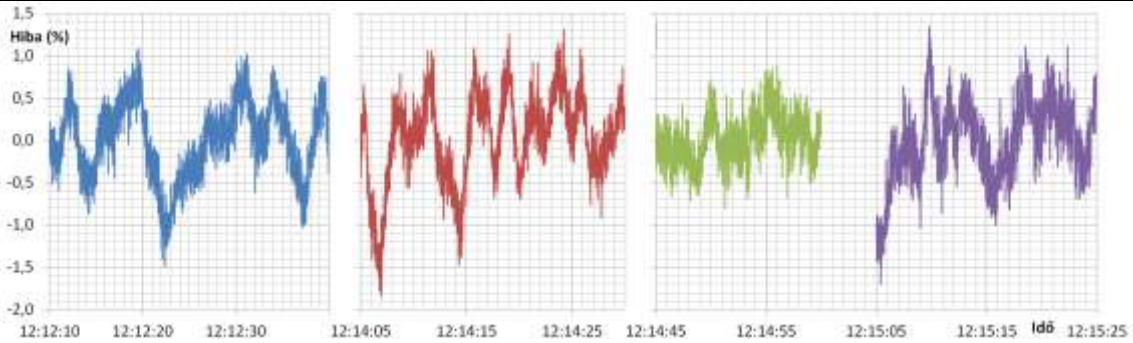
A 13. ábra a teljes üzemelést mutatja, melyben látható, hogy az indítást követő oszcillációk az üzemmód 12:12:00 körüli emelésével, a fordulatszám a 70000 (45,8%) értéket kissé meghaladva már megszűntek. Ennek a szakasznak a részletes elemzését később a 14. ábra fogja megmutatni. 12:13:00 körül hamar egymás után két lépcsőben, viszonylag lassan történt a gyorsítás, hiszen a két szélső állapot között majdnem húsz másodperc telt el. Itt nagyjából egynegyed percnyi stabil üzem után hirtelen lassítás következett, majd három lépcsőben hirtelen fordulatszám-növelések következtek, melyekhez mindegyiknél számottevő állandósult üzemelés tartozott, annak érdekében, hogy a szabályozó tulajdonságai kiértékelhetőek legyenek. Mint látható, a 12:14:00-tól 12:15:30-ig terjedő szakaszban minden gázkarállás esetén ki rövid beállási idővel kialakult az új stabil üzemiállapot. Minthogy jelen vizsgálat során a minimális gázkar pozícióhoz a normál alapjárat alatti 40% fordulatszám volt beállítva, a leállítást közvetlenül megelőző közel húsz másodpercben ismételt megjelent a lengés, melynek eredményeképpen a gázhőmérséklet sem tudott kellő mértékben lecsökkenni (összevetve a 12:12:00-tól közel egy percen keresztül tartó állandósult állapottal, amikor jelentősen nagyobb fordulatszám mellett is jó 50°C-kal alacsonyabb turbina utáni hőmérséklet volt mérhető).

Az adatsor még néhány megmagyarázandó jelenséget tartalmaz. Egyike ezeknek a leállítást utáni fordulatszám-növekedések: az indítórendszer alkalmazásával a gázturbina hűtését segítettük elő ezzel a megoldással. A másik pedig a tolóerőben jelentkező „tüske” körülbelül a mérés felénél, amikor hirtelen nullára csökken a jellemző, majd visszatér eredeti értékéhez. Ez az erőmérő cella kézzel történő megmozdításának tudható be, melyre a helyes kijelzésről való meggyőződés miatt tartottunk szükségesnek abban a pillanatban.



13. ábra A teljes üzemelés főbb paraméterei

A 14. ábra az állandósult állapotbeli hiba eloszlást mutatja a 13. ábrán látható üzemelés konstans szakaszairól. Az egyértelműen látható, hogy az esetek döntő többségében a hiba a referenciához képest $\pm 1\%$ -on belül marad, csak néha ugrik 1–1,5% közé abszolút értékben.



14. ábra Állandósult állapotbeli relatív eltérés a referenciához képest

A tolóerő és TPR összefüggése

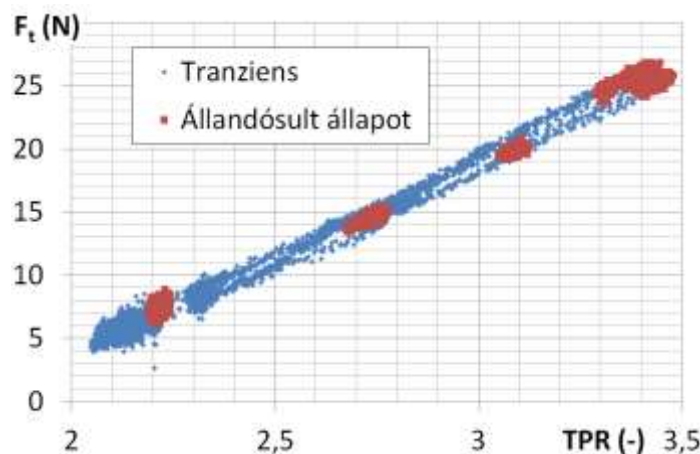
Jelen vizsgálat egy további fontos célkitűzése, hogy információt szolgáltatson a tolóerő és TPR összefüggésére egyáramú sugárhajtóművek esetén.

Mivel definíció szerint a TPR nem tartalmaz olyan tagot, mely kifejezetten korlátozná alkalmazhatóságát a kétáramú sugárhajtóművek körére, kézenfekvőnek tűnik a gondolat, hogy egyáramú gázturbinás egységek esetén is kell lennie egzakt összefüggésnek a tolóerő és TPR között.

Mivel a mérések során számos állandósult állapot létrehozására lehetőség volt, így a két paraméter közti kapcsolatot kellő pontossággal vizsgálhatjuk. A 15. ábrán azt figyelhetjük meg, hogy az állandósult állapotokhoz tartozó értékekre fektetett lineáris trendvonal alatt húzódnak azok a mérési pontok, melyek tranzien্স folyamatokat írnak le. Ennek a magyarázata abban keresendő, hogy gyorsítás során a TPR a hirtelen megugró gázhő miatt nagyobb értéket vesz fel, de mindeközben a tolóerő növekedése lassabb ütemben zajlik.

A 15. ábrával kapcsolatosan meg kell említeni, hogy kizárólag földi, statikus körülmények között történt a vizsgálat, tehát később mindenképpen szükséges folytatni a vizsgálatokat a repülési sebesség és magasság hatásának felderítésére.

Megállapítható tehát, hogy a tolóerő és a TPR között egyáramú sugárhajtómű esetén is egyértelmű összefüggés áll fenn, mely egyszerre alkalmas teljesítmény kijelzésre, és amint azt jelen vizsgálat is bemutatta, a hajtómű irányítására is.



15. ábra A tolóerő és TPR összefüggése állandósult és tranzien্স üzemmódokon



ÉRTÉKELES

Elért eredmények

Jelen cikk részletesen bemutatta a MARCEL fantázianevű elektronikus szabályozórendszer fejlesztését a kezdetektől napjainkig, amikorra már teljes értékű FADEC rendszert alkot, mely kifejezetten mikro sugárhajtóművekhez készült. Kitért a hajtómű működését leíró átviteli függvény meghatározására, a PID szabályozás kivitelezésére, a megvalósított hardver és firmware egyes tulajdonságaira, melyek relevánsak voltak a fejlesztés szempontjából.

Rávilágított arra, hogy egyszerűbb körülmények között, amikor bonyolultabb rendszerek nem vagy csak kompromisszumok árán volnának alkalmazhatóak, a PID szabályozás is alkalmas lehet olyan nemlineáris rendszerek irányítására is, mint pl. egy gázturbinás sugárhajtómű.

A szabályozót megtervezése és megépítése, valamint fölprogramozása után széleskörű vizsgálatoknak vettem alá, mellyel meggyőződtem a vele szemben támasztott követelményeket maradéktalanul képes teljesíteni. Egyedül alapjárat alatt akadnak lengések, de mivel ezek nem tartoznak bele a normál üzemi viszonyokba, ezért a fejlesztés jelen állapotában a szabályozóról alkotott pozitív képet nem befolyásolják.

A TPR paraméter eredetileg nagy kétáramúsági fokú sugárhajtóművek kiegészítő teljesítményszabályozására, a fordulatszám szerinti irányítás pl. lapát sérülés miatti alkalmatlansága esetén kerül alkalmazására. Ebben a cikkben az elkészült szabályozó mérési adataival is alátámasztottam, hogy egyrészt a TPR és a tolóerő között egyáramú sugárhajtómű esetén is egyértelmű korreláció áll fenn, tehát teljesítménykijelzésre a repülőgép-hajtóművek ezen válfajánál is alkalmazható, másrészt a TPR a hajtómű irányításának alapparamétereként is kezelhető, nem csak mint másodlagos felülbírálnak egy prioritást élvező törvényszerűségnek. Ezen felül a megvalósított elektronika a gyakorlatban is bizonyította ennek a feltevésnek a helyességét.

Továbbfejlesztési lehetőségek

Minden vizsgálat szükségszerűen tartalmaz olyan területeket, melyek vagy eredendően nem lettek kijelölve, mint elérendő cél, vagy a munka során merültek fel olyan nehézségek, melyek miatt megvalósításuk megghiúsult. Az ismertetett rendszer az alábbiakban vázolt irányokban mutat továbbfejlesztési lehetőségeket.

A cikkben bemutatott irányítási algoritmus a fix erősítési tényezőkkel megalkotott PID volt, messze a legegyszerűbb módszer. Legkisebb ráfordítással feltehetően a változó erősítésű PID megalkotása lehet, mint a közeljövő egyik legkézenfekvőbb fejlesztése, mely vélhetően az alapjárat környéki anomáliákra is hatékony lépés volna.

Az elektronikus rendszer építése során fény derült néhány olyan lehetőségre, mellyel a befoglaló méret és üzemkész tömeg további csökkentése volna elérhető, ez a célba vett alkalmazásban természetesen mindenképpen előnyös volna. A firmware esetében már több olyan megoldatlan probléma mutatkozik, ami számottevő előrelépést jelentene. Első és talán legfontosabb, hogy bár a jelenleg alkalmazott MCU rendelkezik saját belső nem felejtő memóriával, a program még nem képes azt használni, pedig a hajtómű üzemidejének számlálására, hibák tárolá-



sára, szenzorok kalibrálási adatainak rögzítésére kimondottan hasznos volna, a konstrukció jelenlegi értékét és flexibilitását erőteljesen növelné. Effajta lehetőségként említendő meg az RS232 modul vevő részének használatba vétele, mert ekkor a kétoldalú kommunikáció a számítógéppel szintén emelné a rugalmasságot.

Mivel jelen körülmények között csak földi próbapadon történő tesztelésre volt lehetőség, az egész rendszert szükséges lenne a lehető legszélesebb repülési sebesség- és magasságtartományban vizsgálat alá vonni, így a környezeti paraméterek változásával bekövetkező hatások is felderíthetők lennének. Végül pedig meg kell említeni, hogy a fenti vizsgálatok elvégzését követően mód nyílhat a rendszer tolóerő-automata üzemmódú továbbfejlesztésére.

FELHASZNÁLT IRODALOM

- [1] AMIRANTE, R., et al. Design optimization of the intake of a small-scale turbojet engine. *Computer Modelling in Engineering and Sciences*, 2007, vol. 18, no. 1, pp. 17-30. ISSN: 1526-1492, doi: 10.3970/cmcs.2007.018.017
- [2] ANDOGA, R., FŐZŐ, L., MADARÁSZ, L., KAROL T.: A Digital Diagnostic System for a Small Turbojet Engine. *Acta Polytechnica Hungarica*, Vol. 10, No. 4, 2013, pp. 45-58. DOI: 10.12700/APH.10.04.2013.4.3
- [3] BEHNKE, S. and SCHREIBER, M.: Digital Position Control for Analog Servos. In: *Proceedings of the Workshop on Humanoid Soccer Robots of the 2006 IEEE-RAS International Conference on Humanoid Robots*, 2006, ISBN 88-900426-2-1, pp. 56-61. (online) url: <http://www.dei.unipd.it/~emg/whs2006/papers/HSR-111.pdf> (2015.03.09)
- [4] BRUNELL, B. J., BITMEAD, R. R., CONNOLLY, A. J.: Nonlinear Model Predictive Control of an Aircraft Gas Turbine Engine. *Proceedings of the 41st IEEE Conference on Decision and Control*, 2002, ISBN 0-7803-7516-5, Vol. 4., pp. 4649-4651, doi: 10.1109/CDC.2002.1185111
- [5] DAVIES, C., HOLT, J. E., GRIFFIN, I. A. Benefits of inverse model control of Rolls-Royce civil gas turbines. In: *International Control Conference*. Glasgow: University of Strathclyde, 2006. pp. 70-76. ISBN 0 974649549 (online) url: <http://ukacc.group.shef.ac.uk/proceedings/control2006/papers/f70.pdf> (2015. 03. 09)
- [6] FREDERICK, DEAN K., GARG, SANJAY, ADIBHATLA, S.: Turbofan engine control design using robust multivariable control technologies. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, Vol. 8 (2000), No.6, pp.961-970, doi: 10.1109/87.880600
- [7] FREESCALE MC9S08DN60 Microcontroller Data Sheet. (online) url: http://cache.freescale.com/files/microcontrollers/doc/data_sheet/MC9S08DN60.pdf (2015. 03. 05)
- [8] GILBERT, W., HENRION, D., BERNUSSOU, J., BOYER, D. Polynomial LPV Synthesis Applied to Turbofan Engines. In: *Control Engineering Practice*, 2010, Vol. 18, No. 9, pp. 1077-1083. ISSN: 0967-0661, DOI: 10.1016/j.conengprac.2008.10.019
- [9] HAN, X., LI, H.: Controller Design for Polynomial Linear Parameter Varying Model of Turbofan Engine. *International Conference on Electronics, Communications and Control (ICECC)*, 2011, ISBN 978-1-4577-0320-1, pp. 1961 – 1964, doi: 10.1109/ICECC.2011.6067890
- [10] HORVÁTH Á., TÓTH V., BENEDA K. T.: A TKT-1 gázturbinás sugárhajtómű tüzelőanyag- és szabályozó rendszerének fejlesztése. *Repüléstudományi Konferencia, Szolnok*, 2012. HU ISSN 1789-770X, pp. 854-879.
- [11] HÜNECKE, KLAUS: *Jet Engines. Fundamentals of Theory, Design and Operation*. Motorbooks International Publishers, Osceola, USA, 2003.
- [12] KATOLICKÝ, Z.; BUŠOV, B.; BARTLOVÁ, M., Turbojet engine innovation and TRIZ. 16th International Conference on Mechatronic, pp.16-23, 3-5 Dec. 2014. doi: 10.1109/MECHATRONIKA.2014.7018230
- [13] KONG, C., CHUNG, S: Real Time Linear Simulation and Control for Small Aircraft Turbojet Engine. *KSME International Journal*; Vol. 13. No.9, pp. 656- 666; 1999.
- [14] KREINER, A., LIETZAU, K.: *The Use of Onboard Real-Time Models for Jet Engine Control*. MTU Aero Engine Germany, 2004.
- [15] LIN, C. F., GE, J.: H-infinity control for turbofan engines. *American Institute of Aeronautics and Astronautics, Guidance, Navigation, and Control Conference and Exhibit*, 1998. doi:10.2514/6.1998-4296
- [16] MADARÁSZ, L., ANDOGA, R., FŐZŐ, L.: Intelligent Technologies in Modeling and Control of Turbojet Engines. In: *New Trends in Technologies: Control, Management, Computational Intelligence and Network Systems*, Meng Joo Er (Ed.), Sciyo, pp.

- 17-38, ISBN: 978-953-307-213-5, (2010) DOI: 10.5772/10420 (online) url: <http://www.intechopen.com/articles/show/title/intelligent-technologies-in-modeling-and-control-of-turbojet-engines> (2015.03.09)
- [17] MANGHAN, E.: Jet Engine Manual. London, 1961.
- [18] MU, J., REES, D., CHIRAS, N. Optimum Gain-Scheduling PID Controllers for Gas Turbine Engines Based on NARMAX and Neural Network Models. In: Proceedings of ASME Turbo Expo, Atlanta: ASME, 2003. pp. 509-515, ISBN: 0-7918-3684-3, doi:10.1115/GT2003-38667
- [19] MU, J., REES, D. Approximate Model Predictive Control for Gas Turbine Engines. In: Proceedings of the American Control Conference, Boston: American Automatic Control Council, 2004. pp. 5704-5709. ISBN 0-7803-8335-4.
- [20] POZZANI, D., et al.: Gas Turbine Identification with Linear and Non-Linear Techniques. Proceedings of 18th International Congress of Mechanical Engineering (COBEM 2005), 2005, Brazil, p. 1-8. (online) url: <http://www.abcm.org.br/pt/wp-content/anais/cobem/2005/PDF/COBEM2005-2531.pdf> (2015. 03. 09.)
- [21] RICHTER, H., LITT, J. S.: Novel Controller for Gas Turbine Engines with Aggressive Limit Management. 47th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit, 2011. doi: 10.2514/6.2011-5857
- [22] RICHTER, H. Advanced Control of Turbofan Engines. New York: Springer, 2012. p. 266. ISBN 978-1-4614-1170-3. DOI 10.1007/978-1-4614-1171-0
- [23] RICHMAN, M., GORDON, V. Improved gas turbine response using LQR control. In: Symp. Design Principles and Methods for Aircraft Gas Turbine Engines, RTO MP-8, Toulouse, France. 1998. p. 11-15. (online) url: [http://ftp.rta.nato.int/Public/PubFullText/RTO/MP/RTO-MP-008/\\$MP-008-16.pdf](http://ftp.rta.nato.int/Public/PubFullText/RTO/MP/RTO-MP-008/$MP-008-16.pdf) (2015.03.05)
- [24] RODRIGUEZ-MARTINEZ, A., GARDUNO-RAMIREZ, R., VELA-VALDES, L. G.: PI Fuzzy Gain-Scheduling Speed Control at Startup of a Gas-Turbine Power Plant. IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 26 (2011), No. 1. pp. 310-317. ISSN 0885-8969, doi: 10.1109/TEC.2010.2081991
- [25] ROWE, A. L., KURZ, N., Control System for a Ducted Fan Gas Turbine Engine. United States Patent No. 5887419, 1999, (online) url: <http://patentimages.storage.googleapis.com/pdfs/US5887419.pdf> (2015. 03. 05)
- [26] SALURU, D. C.; YEDAVALLI, R. K, BELAPURKAR, R. K.: Fault Tolerant Model Predictive Control of a Turbofan Engine Using C-MAPSS40k. 5th Annual ASME Dynamic Systems and Control Conference (DSCC) 2012, pp. 349-358, doi:10.1115/DSCC2012-MOVIC2012-8730
- [27] SCHRECKLING, KURT: Gas Turbine Engines for Model Aircraft. Traplet Publications Ltd., 2004. ISBN 1 9510589 1 6
- [28] SHABANINIA, F., and JAFARI, K.: Using LQG/LTR Optimal Control Method to Improve Stability and Performance of Industrial Gas Turbine System. In: International Scholarly Research Network (ISRNElectronics), Volume 2012, pp. 8, doi:10.5402/2012/134580
- [29] SPANG, H. A., BROWN, H.: Control of Jet Engines. Control Engineering Practice, ISSN 0967-0661, Vol. 7 (1999), No. 9., pp. 1043-1059. doi:10.1016/S0967-0661(99)00078-7
- [30] SUGIYAMA, NANAHISA: System Identification of Jet Engines. International Gas Turbine and Aeroengine Congress and Exhibition Stockholm, 1998, 98-GT-99
- [31] SZÚCS ZOLTÁN: A digitális PID szabályozó. Oktatási segédanyag, BME Elektronikus Eszközök Tanszéke, 2008. (online) url: http://www.eet.bme.hu/~nagyg/elektronika/A_digitalis_PID_szabalyozo.pdf (2015. 03. 09)
- [32] TAVAKOLI, S., et al.: Tuning of decentralised PI (PID) controllers for TITO processes. Control Engineering Practice, ISSN 0967-0661, Vol. 14 (2006), No. 9, pp. 1069-1080, doi:10.1016/j.conengprac.2005.06.006
- [33] TUDOSIE, ALEXANDRU-NICOLAE: Aircraft Gas-Turbine Engine's Control Based on the Fuel Injection Control. Aeronautics and Astronautics 2011, szerk.: Prof. Max Mulder, ISBN: 978-953-307-473-3, InTech, DOI: 10.5772/17986. url: <http://www.intechopen.com/books/aeronautics-and-astronautics/aircraft-gas-turbine-engine-s-control-based-on-the-fuel-injection-control> (2015.03.05.)
- [34] VERSTRAETE, Dries, et al. Micro propulsion activities at the University of Sydney. In: Proceedings of the PowerMEMS 2010 Conference. 2010, pp. 255-258. (online) url: http://cap.ee.ic.ac.uk/~pdm97/powermems/2010/poster-pdfs/255_Verstraete_41.pdf (2015.02.28)
- [35] WATANABE, A., et al.: Soft Computing Applications on SR-30 Turbojet Engine. 1st AIAA Intelligent Systems AIAA Technical Conference. Paper Number 2004-6444, (online), url: http://www.turbinetechnologies.com/portals/0/pdfs/gas_turbine_tech_sheets/nasa-marshall.pdf (2015.03.09)
- [36] WATTS, S. R., GARG, S.: An Optimized Integrator Windup Protection Technique Applied to a Turbofan Engine Control. NASA Technical Memorandum 107035. (online) url: <http://ntrs.nasa.gov/archive/nasa/casi.ntrs.nasa.gov/19960008161.pdf> (2015.03.05)