



Beneda Károly Tamás

TELJES HATÁSKÖRŰ DIGITÁLIS GÁZTURBINA SZABÁLYZÁS (FADEC¹) FEJLESZTÉSE KISMÉRETŰ SUGÁRHAJTÓMŰVES BERENDEZÉSHEZ

BEVEZETÉS

A BME Repülőgépek és Hajók Tanszékén továbbfejlesztés alatt áll a megépült kisméretű, kísérleti sugárhajtómű. A berendezés oktatási és kutatási célokra történő alkalmazása megköveteli a lehető legmagasabb fokú üzembiztonságot, ezen felül a kevés tapasztalattal rendelkező felhasználók számára a minél egyszerűbb üzemeltetési feltételek megteremtése is fontos. Ezért munkálatok elsősorban a sugárhajtómű rendszerei közül a szabályzórendszer alapvető áttervezésére, továbbfejlesztésére irányulnak. A rendszer a katonai, valamint polgári repülésben széleskörűen elterjedt teljes hatáskörű, digitális szabályzórendszerek (FADEC) alapján készül egy egyedi megoldású, a kísérleti és oktatási jelleg figyelembevételével.

A GÁZTURBINÁK SZABÁLYZÁSÁNAK ALAPJAI

Bevezető gondolatok

A gázturbinák működése alapvetően függ a környezeti paraméterektől, melyeket a matematikai modell bemenő mennyiségei között, illetve megzavarásként definiálhatunk. Bármilyen célra is használjuk a gázturbinát, elengedhetetlen követelmény, hogy a gép a kezelő által beállított üzemmódon működjék, és külső behatásokra a munkapontba való visszatérést meg tudja valósítani. A beállított munkapontbeli üzemelés lényege, hogy a beavatkozó szerv azonos állásánál minden körülmények között (közel) azonos legyen a gázturбина teljesítménye, sugárhajtómű esetén a tolóereje. Ez alapfeltétele az egységes repülőgép-vezetési technikának.

Hidraulikus és hidromechanikus szabályzás

A gázturbinák szabályzása a kezdetekben (az 1930-as évektől az 1950-es évekig) a teljesen hidraulikus, illetőleg hidromechanikus egységeken alapult, amelyek a betáplált tüzelőanyag-mennyiség megfelelő változtatásával voltak képesek az előírt fordulatszámot tartani, és a beállított munkapontot tolórudakon keresztül tudta a repülőgép-vezető befolyásolni. A hidraulikus esetben egy

¹ FADEC – Full Authority Digital Engine Control – Teljes hatáskörű, digitális gázturбина szabályzás

forgó tüzelőanyag-oszlop felszínének fordulatszámfüggő formáját használták fel a szabályzásra, de ez nem volt kielégítő, hiszen a folyadékra ható centrifugális erő függ a folyadék sűrűségétől, vagyis a szabályzó nem tudott korrektül megbirkózni a tüzelőanyag sűrűségének üzem közben bekövetkező változásával. A hidromechanikus szabályzók forgó folyadékoszlop helyett röpsúlyt alkalmaznak, mely (fix súly lévén) kiküszöböli az előző megoldás sűrűségváltozásból adódó problémáját. [2]

Hibrid szabályzórendszerek

Az elektronika térhódításával együtt a gázturbinák szabályzásában is egyre inkább részt vettek különböző áramkörök, melyek a hidromechanikus egységek funkcióit fokozatosan kezdték kibővíteni, majd átvenni. [1]

Tipikus képviselői ennek a generációnak egy teljesen kiépített hidromechanikus szabályzórendszer mellett tartalmazzák az elektronikus beavatkozás lehetőségeit, melyek alapvetően csak finomhangolást képesek elvégezni a hajtómű működésében a környezeti és hajtómű paraméterek figyelembevételével. Meghibásodásuk csupán ennek a finomhangolásnak a kiesését, azaz valamekkora hatásfok-csökkenést, de nem a teljes rendszer működésképtelenségét jelenti, a gázturbina üzeme továbbra is biztosított.

Digitális, elektronikus szabályzórendszerek

Az 1980-as évek közepén jelentek meg – az elektronikai eszközök megbízhatóságának és sokoldalúságának, integráltságának további növekedésével – az angol betűszóval egyszerűen FADEC-ként említett, teljes hatáskörű, digitális alapokra helyezett elektronikus gázturbina szabályzó rendszerek.

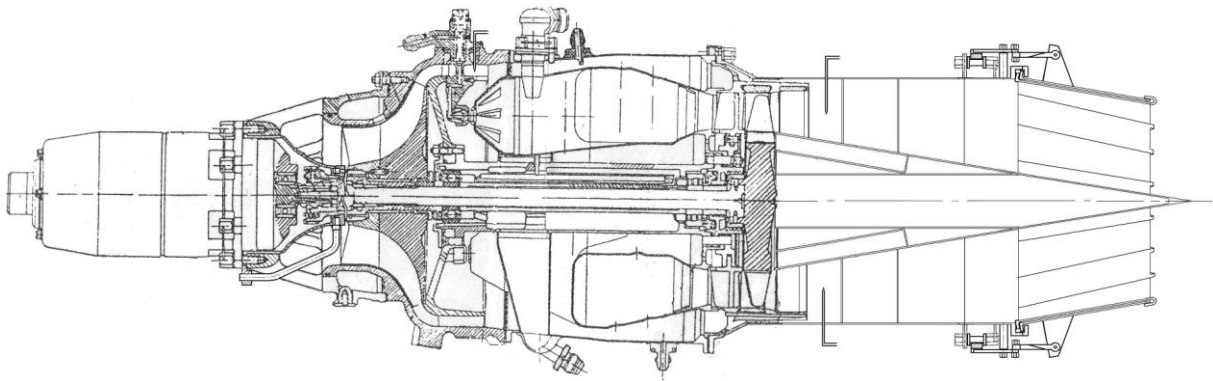
Ezekben a rendszerekben a szabályzás már a számítógépen belül, szoftveres úton történik, minden, a gázturbina körfolyamat szempontjából szükséges paraméter figyelembevételével.

A digitális, elektronikus szabályzással rendelkező gázturbinák esetében figyelembe kell venni, hogy a szabályzórendszer az elektronika működésképtelensége esetén teljesen üzemképtelen, azaz a gázturbina sem működhet tovább. Természetesen ez gyári megoldások esetében nem probléma, hiszen a szigorú engedélyeztetési eljárás része.

Talán túlzásként hat mind a digitális, mind az elektronikus jelző egyidejű említése, de gondoljunk bele, hogy digitális rendszer megoldható nem elektronikus, pl. mechanikus módszerekkel is, illetve elektronikus rendszer elképzelhető volna analóg alapokon is. Érdekessége a számítástechnika fejlődésének, hogy bár a műveleti erősítőkkel felépített analóg számítógépek lényegében valósidőben képesek működni, mégis a digitális processzorok váltak egyeduralmukodóvá, miután sebességük a hasonló feladatok ellátásához kellő mértéket öltött.

A GÁZTURBINÁS SUGÁRHAJTÓMŰ

A gázturbinás sugárhajtómű a TSz-21 indító gázturbina gázgenerátor egységének felhasználásával jött létre (1. ábra). Ez az indító gázturbina a Magyar Honvédség kötelékében az 1980-as, '90-es években szolgálatot teljesítő MiG-23, valamint a Szu-22 harci repülőgépek fedélzetén volt rendszeresítve.



1. ábra. A sugárhajtómű hosszmetsete, változtatható fűvócsóvel

A TSz-21 a hajtómű forgórészét szabadturbinájának forgási energiájával hajtotta meg egy bolygóműves áttételen és egy tengelykapcsolón keresztül. A szabadturbina és a kihajtásház moduláris egységként eltávolítható volt, így a gázturbina egyszerűen átalakítható volt sugárhajtóművé.

A későbbi, több üzemmódból álló üzemeltetések céljából egy változtatható keresztmetsetű gázsebesség-fokozó (GSF) redőnyzet készült, melynek első üzemi próbái óta tökéletesen működik. Maga a GSF redőnyzet a MiG-21 hajtóművéhez hasonló elven épül fel. A gázszugár kilépő keresztmetsetét 12-12 darab külső, illetve belső lamella szabályozza, amelyek a 2. ábrán látható módon egymáshoz kapcsolódnak.



2. ábra. A GSF redőnyzet nyitott (bal) és csukott (jobb) állapotban



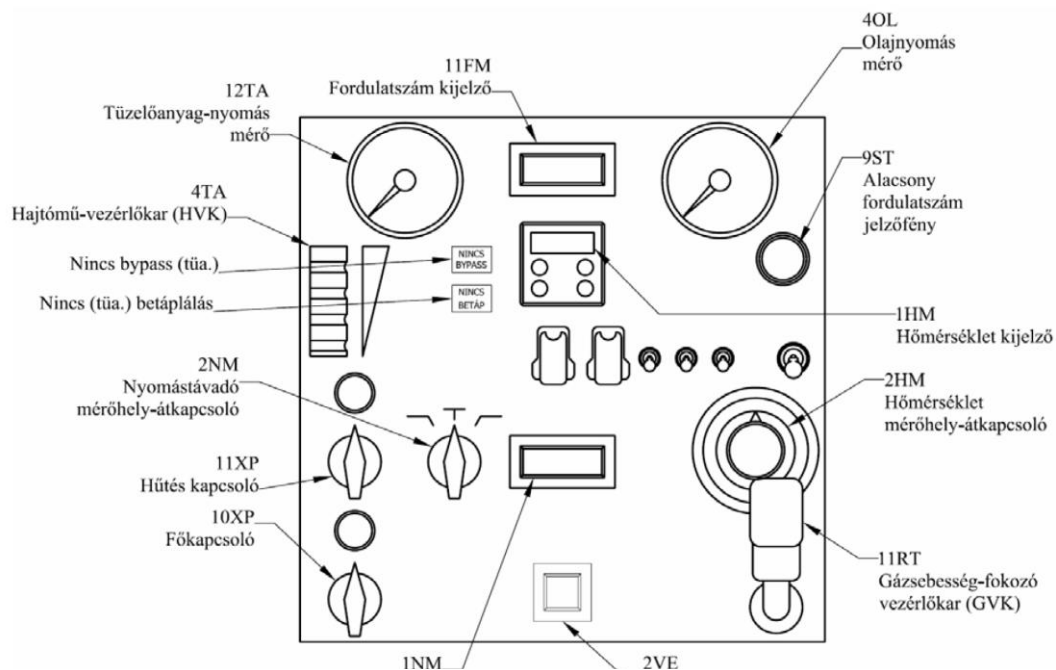
3. ábra. A gázturbinás sugárhajtóműves próbapad a Tanszék laborjában

A MÉRŐRENDSZER

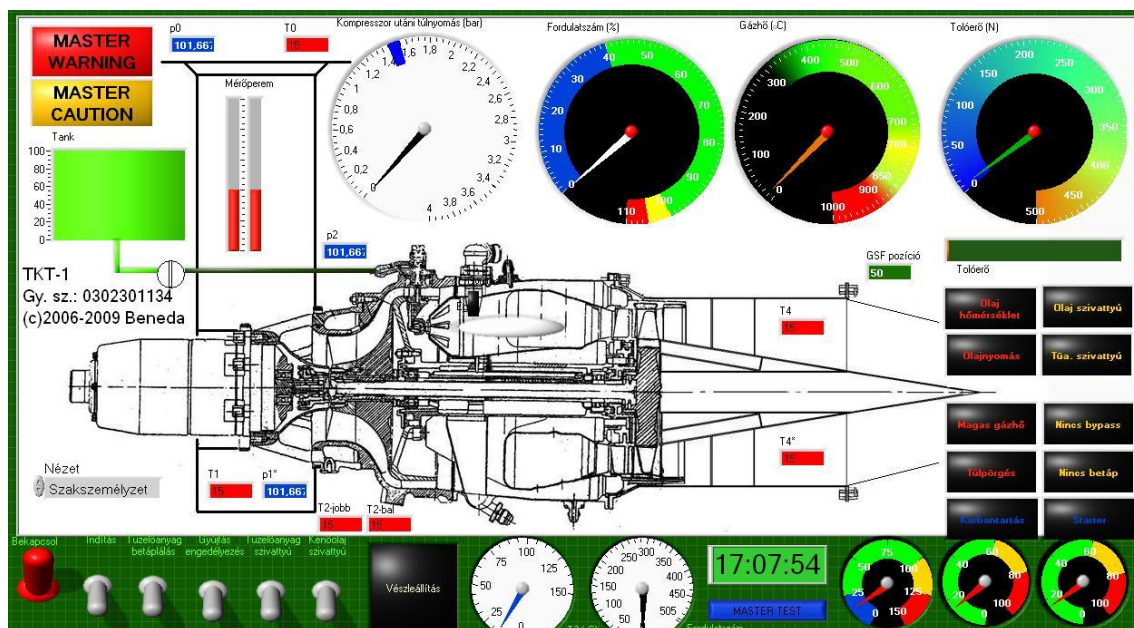
Általános jellemzők

A gázturbinás sugárhajtómű legfontosabb paramétereit automatikus mérő- és adatgyűjtő rendszer érzékeli, dolgozza föl, és jeleníti meg a kezelők részére.

Jelen kiépítésében a kijelzés alrendszere rendelkezik egy elkülönített megjelenítési felülettel, az eredeti vezérlőpulttal. A fejlesztés során megvalósított számítógépes kijelzés pedig emellett párhuzamosan képes a mért adatok megjelenítésére. Ez a rendszer annyiban nyújt többet a hagyományos, vezérlőpulton elhelyezett műszerekkel szemben, hogy míg azok csak egy érték megjelenítését teszik lehetővé egy időben, addig a számítógép egy megfelelően megtervezett felhasználói felületen az adott feladathoz szükséges mennyiségű adat kijelzésére alkalmas. Ez a két rendszer figyelhető meg a 4. és az 5. ábrákon.



4. ábra. A sugárhajtóműves berendezés kezelőpultja



5. ábra. A mérő/adatgyűjtő szoftver képernyője

A rendszer egységesítése, és kizárólag digitális alapokra történő felépítése, mely a korábbiakban felmerült, a berendezés használhatósága szempontjából elmaradt, hiszen a számítógépes adatgyűjtő rendszer nélkül, a legszükségesebb paraméterek vezérlőpulton történő megjelenítésével a gázturbina üzemeltetése biztosított, így ezen rendszer megszüntetése nem lett volna megfelelő.

A mérőrendszer magába foglalja a gázturbinás sugárhajtómű vizsgálatához szükséges alapvető érzékelőket, azok jelfeldolgozó egységeit és a megjelenítést végző kijelző műszereket, valamint a számítógépes alrendszert. Mivel kísérleti, illetve oktatási célú berendezésről van szó, értelemszerűen a

mindennapos gyakorlatban elterjedt műszerezettségénél a rendeltetésből adódóan többről van szó, mint egy általános repülőgép-fedélzeti felhasználás esetében.

Hőmérséklet-mérés

A gázturbina működésével kapcsolatos legtöbb hőmérséklet mérését hőelemek teszik lehetővé, melyekből 8 darab került elhelyezésre:

- egy a kompresszor előtt,
- kettő a kompresszor után, melyek egyike statikus, másik pedig torlóponthi hőmérsékletet érzékel,
- kettő a turbina után, a kompresszor utániakhoz hasonlóan egy statikus, egy torlóponthi érzékelő,
- egy a kenőolaj tartályban,
- egy-egy a két szivattyúegység villanymotorján.

Az első öt jel fontos információkat hordoz a gázturbina körfolyamatáról. A magas olaj-, illetve szivattyú hőmérsékletek a gázturbina működésének korlátozója lehetnek, ezért elengedhetetlen ezen mennyiségek ismerete. Az szivattyúmotorok két hőeleme T típusú (réz-konstantán), és a szivattyú elektromotor fémházára lett ragasztás útján rögzítve, a többi K (nikkel-krómnikkel) típusú 1,5 mm átmérőjű köpenyhőelem, melyek a mérendő hőmérsékletű térbe benyúlnak.

A vezérlőpult egy digitális műszert és egy forgatógombot tartalmaz a hőmérsékletjelek egyikének megjelenítésére. Az adatgyűjtő rendszer természetesen mindegyik jelet rögzíti, egy ICP 7018 típusú 8 csatornás analóg/digitális (A/D) konverter segítségével.

Természetesen a gázturbina körfolyamat szempontjából elengedhetetlen a környezeti hőmérséklet ismerete, ezt jelenleg az adatgyűjtő egységben elhelyezett hidegponthi kompenzáló áramkör szolgáltatja, mely nagy stabilitású, félvezetős hőmérséklet-érzékelővel rendelkezik.

Nyomásmérés

A nyomásmérés alrendszere piezoelektromos elven működő nyomásérzékelőkön alapul. Ezek az elektromos jelet szolgáltató eszközök a következő helyekről vett nyomásokat kísérik figyelemmel:

- környezeti nyomás,
- kompresszor előtti nyomás (MPX5010DP),
- kompresszor utáni nyomás (MPX4250DP),
- turbina utáni nyomás (MPX5050DP).

A nyomásmérő rendszer Motorola gyártmányú érzékelők különböző fajtáit alkalmazza. A környezeti nyomást egy abszolút nyomást érzékelő MPX4115A, míg a többi a különböző méréshatárokat figyelembe véve differenciális érzékelők konvertálnak villamos feszültséggé. A differenciális érzékelők egyik nyomásvevő csatlakozása a mérendő térrel, a másik pedig az atmoszférával van összeköttetésben. Ennek megfelelően az adatgyűjtő szoftver az abszolút értékek számításánál a környezeti nyomást is hozzáadja a mért differenciális értékhez.

Az érzékelők a nyomással arányos feszültséget szolgáltatnak, amit az adatgyűjtő rendszer feldolgoz, és Pa mértékegységben rögzít, valamint a kezelőpulton elhelyezett feszültségmérőn üzem közben ellenőrzés céljából megjeleníthető a forgatógombbal kiválasztott jel.

A tömegáram mérése

Szervesen kapcsolódik a nyomásmérés alrendszeréhez a tömegáram mérése is, hiszen a DIN szabvány szerint kialakított kis veszteségű ($\alpha = 0,955$) beszívó mérőszáj által létrehozott, az adott keresztmetszetben áramló közeg tömegáramával arányos nyomáscsökkenést egyszerű mérni, és ez alapján a gázturbina aktuális tömegárama egyszerűen számítható. A viszonylag kis nyomáskülönbségek miatt itt is egy MPX5010DP került beépítésre.

Fordulatszám-érzékelés

A fordulatszám mérése volt a legkritikusabb. Egyrészt, minthogy alapvetően ez a jellemző határozza meg a gázturbina üzemállapotát, másrészt, mert a TSz-21 esetében nem volt adott konstrukciós lehetőség az amúgy hiányzó eszköz megvalósítására.

A legegyszerűbb a kompresszor előtti áramvonalazó burkolaton belülre került fotoelektronikus elven működő érzékelő volt, így ez került kivitelezésre. Az áramvonalazó kúp kompresszor agy felé eső vége eltávolításra került, helyére pedig egy olyan alkatrész került felhegesztésre, amely magában foglalta az érzékelők tartógyűrűjének felső felét, így az addigi műanyag gyűrűkkel végzett kísérletek során tapasztalt hátrányok (igen szűk hely, bonyolult rögzítési lehetőségek) egy csapásra kiküszöbölhetőek voltak. Csak a gyűrű alsó fele különálló alkatrész, amely az érzékelők rögzítését biztosítja. Ez utóbbi alumíniumból készült és három csavarral rögzíthető az áramvonalazó kúphoz.



26. ábra. A fordulatszám-érzékelő elhelyezése az áramvonalazó kúpon belül

Az eszköz működése az érzékelő alatt forgó kétféleképpen festett kompresszoragy által visszavert jel erősségén alapul. A lényeg a jel változása, amelyet egy megfelelően illesztett tranzisztoros erősítőfokozat alakít tápfeszültség és földpotenciál közötti, fordulatonkénti billenésre. Ez a jel egy komparátorra, illetve egy Schmitt-triggerre kerül, amelyeket közvetlenül digitális bemenetként dolgoz fel az USB-4750 digitális I/O² eszköz két számláló áramköre. Ezen kívül egy LM2917 segítségével a frekvenciával arányos feszültségjel is előállításra kerül, melyet a kezelőpulton elhelyezett panelműszeren lehet megjeleníteni, valamint a feszültségjelek között ez is rögzítésre kerül az ICP 7017 7. csatornáján.

Egyéb analóg mennyiségek mérése

A gázturbina munkafolyamat szempontjából van még néhány fontos jellemző, amely mérése 0-5V feszültségtartományban történik, ezek a tolóerő és a GSF rendszer visszacsatoló jelei.

Tolóerő mérése

A tolóerő egy digitális mérleg erőmérő cellájának felhasználásával kerül mérésre, mely egy nagy pontosságú műszererősítőn keresztül kerül felerősítésre, és az ICP 7017 eszköz egyik csatornáján keresztül számítógépen rögzítésre és kijelzésre.

A számítógépes szoftver kezelőfelületén egy szimbolikus műszer és egy oszlopos folyamatjelzőn kerül megjelenítésre.

Gázsebesség-fokozó Vezérlő Kar (GVK) visszacsatolás (fúvócső keresztmetszet)

A sugárhajtómű üzemének nagyon fontos paramétere az aktuális fúvócső kilépő keresztmetszet, mely a GVK állással egyértelmű függvénykapcsolatban áll, így tehát kézenfekvő volt egy lineáris tolópotenciométerrel a fő tolórúd elmozdulását elektromos jellé alakítani, amely az ICP 7017 egyik csatornájára került bekötésre.

A szoftver kezelőfelületén elhelyezett metszeti képen a GVK visszacsatoló jelnek megfelelően a program futás közben változtatja a fúvócsövet szimbolizáló csonka kúp nyílásszögét.

Digitális jelek mérése

A gázturbina működése során fontos lehet különféle digitális jelek figyelemmel kísérése (szivattyúk, mágnesszelepek bekapcsolt állapotai, stb.). Ezeket egy Advantech USB-4750 digitális I/O eszköz gyűjti össze és továbbítja az adatfeldolgozó számítógép felé. A számítógép ezen jelek felhasználásával különböző szimbolikus tablókát, illetve ábrákat (pl. láng az égésterben, tüzelőanyag beeresztő mágnesszelep szimbolikus ábrája) működtet, melyekkel a kezelő személy kap információt a gázturbina működéséről.

² I/O: Input/Output – Ki-/bemenet

A SZABÁLYZÓRENDSZER

Általános jellemzők

Mivel a kísérleti berendezés esetében a környezeti paramétereket tekintve nincs olyan széles üzemmód-tartomány, mint egy repülőgépre épített sugárhajtómű esetében. Másik oldalról viszont jelen van a gázkartól teljesen függetlenül működtethető gázsebesség-fokozó rendszer, amely pedig rugalmasan változtatható terhelés képében billenti a képzeletbeli mérleg nyelvét a bonyolultság irányába.

A szabályzórendszer alapvetően a TSz-21-est kiszolgáló 924-es berendezésre és annak eszközeire alapul. A szivattyúegység ugyanis – fordulatszám-érzékelő híján – a kompresszor utáni nyomás megfelelő értékeire beállított külső nyomáskapcsolók, valamint a beépített szelencés szabályozható fojtás segítségével befolyásolta az égéstérbe juttatott tüzelőanyag mennyiségét. Ez a szabályozás azonban lényegében fordított módon működött, mint a hagyományos gázturbinák esetében, ahol a forgórészsel mechanikai kapcsolatban lévő szivattyú kimenetét kell szabályozni. A TSz-21 esetében ugyanis a fedélzeti hálózatról meghajtott szivattyú szállítását csak a tápfeszültség korlátozta, ez pedig állandónak tekinthető, így tehát a rendelkezésre álló maximumot jelentősen megcsapolva indult a gázturbina, és gyorsítás közben a szabályozható fojtáson egyre kevesebb tüzelőanyagot engedve vissza a szivattyú bemenetére növelte a betüzelést a rendszer.

Ez a megoldás azonban feltételezi a munkaturbinát és a hajtómű forgórészének jelentős tehetetlenségét, mint terhelést.

Jelenlegi kialakítás

Indítás

Az indítórendszer automatizálása volt az első lépcsőfok a teljes hatáskörű elektronikus rendszer megvalósítása irányában. Alapvető célja, hogy helyettesítse a TSz-21-eshez tartozó elektromechanikus programot, amely a repülőgépre építve volt hivatott a gázturbina biztonságos és gyors indítását elősegíteni.

A korszerű elektronika segítségével az újonnan megalkotott indító automatika már integrált (de még analóg) áramkörökön alapuló programvezérlést, és a sugárhajtómű sajátosságait figyelembe vevő beavatkozó szerveket, reléket tartalmaz.

A bemenetek most is még a kompresszor járókerék utáni keresztmetszet torlóponti nyomásával működtetett nyomáskapcsolók, illetve a starter motor röpsúlyos kapcsolója. Az előbbiekre a tüzelőanyag-betáplálás kezdete, valamint a megkerülőág nyitása történik meg, az utóbbi az indítási ciklus végét befolyásolja.

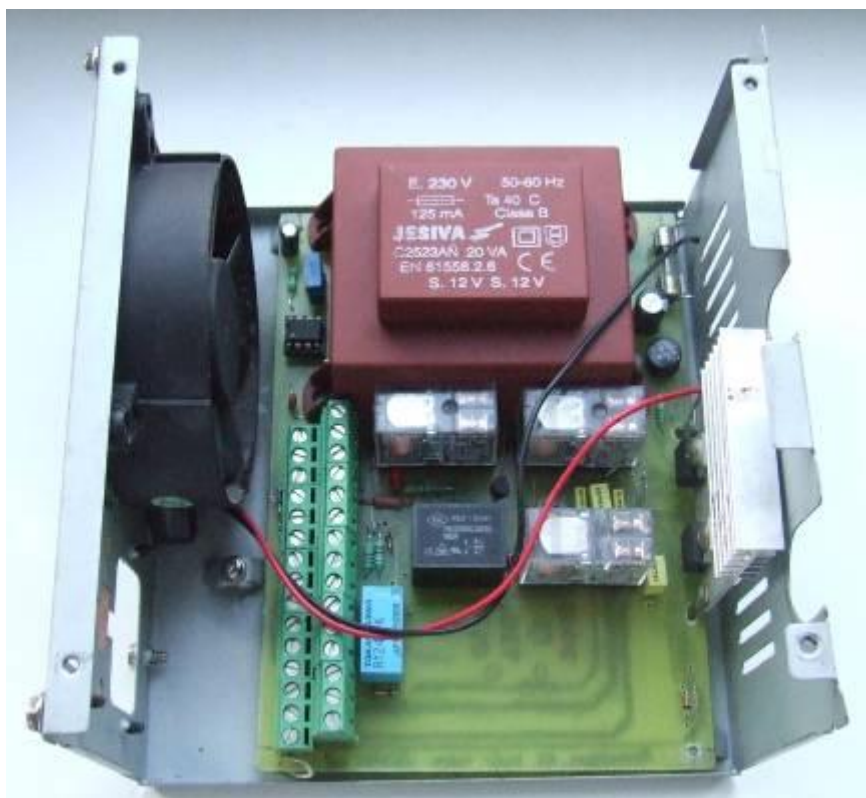
Az indítás a következőképpen zajlik le:

- Az üzemeltetést végző személy elindítja a szivattyúkat, engedélyezi a gyújtást és a tüzelőanyag-betáplálást.

- Az indító nyomógomb megnyomásával kezdetét veszi az indítási ciklus.
- Egy időzítő áramkör 15 másodpercre engedélyezi a starter motor és a gyújtóegységek tápellátását.
- A motor forgatni kezdi a gázturbinát, és ha a fordulatszám eléri az első beállított értéket (kb. 15%), ahol a kompresszor utáni első nyomáskapcsoló működésbe lép, megkezdődik a tüzelőanyag-betáplálás.
- Az égéstérben beindul az égés, a stabilizálódó láng hatására a turbina is gyorsít a forgórészen.
- Egy akkora fordulatszámon, amit a starter motor egymaga nem képes elérni, a második nyomáskapcsoló is működésbe lép (ekkor a fordulatszám kb. 30%-a a névlegesnek), a rendszer megnyitja a tüzelőanyag-visszavezetést (bypass).
- A starter motorba épített röpsúlyos kapcsoló a névleges fordulatszám kb. 40%-ánál bont, ezzel a motor és a gyújtás áramköre kikapcsolásra, az időzítő áramkör pedig alapállapotba kerül.

Megjegyzések:

- Amennyiben az indítási kísérlet 15 másodpercen belül nem ér véget, az időzítő automatikusan megszakítja a folyamatot.
- Ha hideg átforgatást kell végezni, a tüzelőanyag- és gyújtórendszer kikapcsolt állapota mellett ez ugyanúgy az indítás nyomógomb megnyomásával megtörténhet, ekkor az időzítővel beállított 15 másodpercig zajlik az átforgatás.



7. ábra: Az indító automatika

Normál üzem kézi vezérléssel

Mivel a kísérleti sugárhajtómű terhelés nélkül indítandó, ezért a kompresszornyomás odavezetését meg kellett változtatni, létre kellett hozni a szabályozhatóságát.

Először egy kézi vezérlésű csap került a vezérlőpulton elhelyezésre, melynek segítségével, mint változtatható fojtás lehetett a vezérlőnyomást manuálisan állítani a kívánalmaknak megfelelően. Amennyiben a csapot zárjuk, egyre több vezérlőnyomás jut a 924-es berendezés túszelepére, mely csökkenti a bypass mennyiségét, tehát növeli az égéstérbe betáplált tüzelőanyagot. Ez természetesen fokozott figyelmet kívánt, hiszen a terhelés nélküli indítás egyúttal a csap teljesen nyitott állapotát igényli, másrészt a teljesen elzárt csap a teljes terhelés mellett biztosítana elegendő betüzelést, viszont a GSF jelenlegi kivitele csak egy mérsékelt, közel 50%-os terhelést jelent, így a teljes zárás is mindenképpen kerülendő volt.

Összegezve a kézi vezérlés oktatási célra való használhatóságát, jól látszik, hogy egyáltalán nem biztosított, a kezelő képes igen egyszerűen a gázturbina károsodását előidéző veszélyes üzemmódot kiváltani. Ennek fényében a kézi vezérlés kizárólag a gázturbina fejlesztésében játszhatott átmeneti szerepet, amikor még csak a gázturbina üzemeltetésében jártas személyek végezték a kísérleti indításokat.

Normál üzem elektronikus vezérléssel

A számítógépes rendszer bővülésével egy proporcionális szelep egészíti ki a szabályzást. A csappal párhuzamosan került beépítésre, tehát amennyiben a számítógépes rendszer működésképtelen, vagy más okból szeretnénk a beavatkozását elkerülni, a csapot kinyitva felül lehet bírálni a szoftver törekvéseit futás közben is.

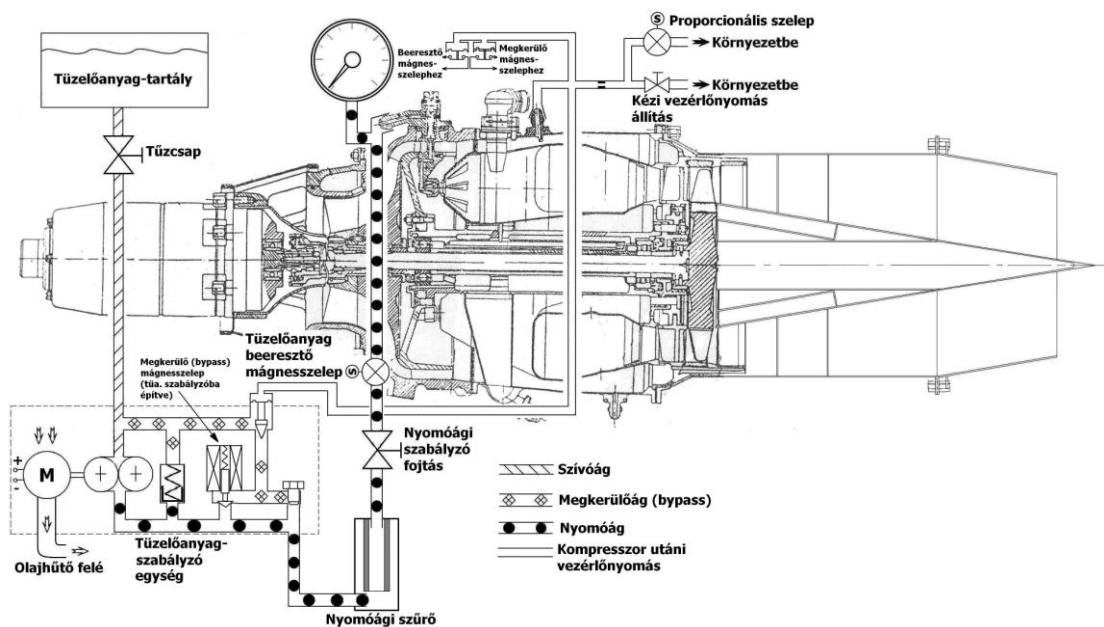
A szelep lényege, hogy segítségével a számítógépes program is közbe tud avatkozni. Például hallgatói gyakorlat alatt vagy kísérlet közben lehet érdekes a fordulatszám állandó értéken tartása, miközben a terhelést a GSF segítségével változtatjuk. Ekkor a proporcionális szelepet fokozatosan zárva egyre több vezérlőnyomást juttatva a szelencés szerkezetre növelhetjük a bejuttatott tüzelőanyag mennyiségét, egészen addig, amíg a fordulatszám az előzőleg beállított értéket tartani tudja.

Jelen állapotában a szoftver csak egy potenciométerről vett értékkel képes a beavatkozásra, tehát lényegében a biztonság szempontjából ebben a konfigurációban nem érzékelhető még jelentős előrelépés, ami azonban a szelep megléte már lehetővé tesz. Természetesen a szoftver továbbfejlesztésével ez megoldható, melyről a következő fejezet tartalmaz részleteket.

Az arányos szelep elhelyezését a 8., a rendszer elvi felépítését a 9. ábra mutatja.



8. ábra. Az arányos szelep elhelyezése



9. ábra. A tüzelőanyag-rendszer a szabályzás eszközeivel

Továbbfejlesztés a teljes hatáskörű szabályzórendszer kialakítása érdekében

Alapvető koncepciók

A FADEC rendszer megvalósítására számos út kínálkozik, mindegyike rendelkezik különféle előnyökkel, illetve hátrányokkal. Ezek közül két lehetőség, mint példa:

- Legkézenfekvőbb megoldásként kínálkozik a jelenlegi számítógépes konfiguráció ilyen irányú továbbfejlesztése, azaz PC-alapú, elosztott rendszer valósítaná meg a feladatokat, ahol az érzékelés, jelfeldolgozás, digitalizálás, elég jelentősen elkülönülne a tényleges programot futtató hardvertől.

- Ettől teljesen eltér, egy új célhardver megalkotása, mely önmaga egy mikrovezérlővel ellátott egységként képes lenne a gázturbina jeleit fogadni, kondicionálni, feldolgozni, és a szükséges beavatkozásokat elvégezni.

Közös hátrányként lehet felhozni, hogy mindkét esetben a számítástechnikai eszköz (legyen az akár egy hagyományos PC, akár egy 8051, vagy PIC mikrovezérlő) a Neumann-, illetve Harvard-struktúrákon alapulnak [3], és ennek megfelelően a soros parancsvégrehajtás és adatkezelés jellemző rá, tehát egy nagysebességű, sok jelen alapuló kifinomult szabályzás valósidejű megvalósítására nem a legalkalmasabbak. Figyelembe véve azonban azt, hogy egy ilyen fejlettségű párhuzamos feldolgozást megvalósító elektronikát igénylő korszerű gázturbina általában sokfokozatú, állítható terelőlapátsorokkal felszerelt kompresszort, aktív részvezérléssel ellátott turbinát és sok más olyan megoldást alkalmaz, amelyek a TSz-21 és a belőle készült sugárhajtóműnél nincsenek jelen, tehát kijelenthető, hogy egy ilyen egyszerű gázturbinás berendezés teljes hatáskörű szabályzására a fent említett megoldások minden bizonnyal alkalmasak lehetnek.

A szabályzás a kísérleti sugárhajtóműnél jelentős eltérést fog mutatni hagyományos, repülőgép-fedélzeti rendszerekkel szemben:

- elsőként a környezeti paraméterek jelen esetben csak atmoszférikus jellemzők lehetnek, így tehát az ezek változásából adódó szabályzási feladatokat nem lehet jelen körülmények között tanulmányozni. Ennek ellenére célszerű a szabályzási törvényszerűséget a programban megvalósítani, hiszen más tanszékekkel, intézetekkel való együttműködés esetén akár erre is lehetőség nyílhat a későbbiekben.
- a hallgatók annél szélesebb körű tudást gyűjthetnek, minél többféle szabályzási törvényszerűséget lehet a gázturbinával megvalósítani. Ennek megfelelően a programnak a lehetőséghez mérten több szabályzási törvényszerűséget is tartalmaznia kell, amelyek közül azután kiválasztható az aktuálisan vizsgálni kívánt. Egy ilyen megvalósítás esetén pl. egy GVK beavatkozás vizsgálhatóvá válik állandó fordulatszám, állandó T_3^* , stb. törvényszerűségek mellett, és összehasonlíthatóvá válnak, mellyel a hallgatók értékes tapasztalatot nyerhetnek.

Mivel a digitális elektronikus rendszer a sugárhajtómű összes fontos paraméterét figyelemmel kíséri, ebből fakadóan nemcsak szabályzási funkciói lehetnek, hanem a kiterjesztett adatfeldolgozás a következő új, hibakezelési feladatköröket teszi lehetővé a hagyományos hidromechanikus rendszerekkel szemben:

- Érzékelés – az figyelemmel kísért jelek nem megengedett tartományba való esésekor detektálni tudja a hibát,
- Tűrés – megfelelő válaszlépésekkel a hiba ellenére is (bizonyos hibák esetében) biztonságos működést tud garantálni (ellenkező esetben vészleállítást kell kezdeményezni),
- Behatárolás – segít a karbantartásnál a hibát okozó lehetséges komponens megtalálásában, rövidítve ezzel az állásidőt,

- Rögzítés – a hiba tényének és körülményeinek rögzítése nagyon fontos, hogy a gázturbina üzemeléséről visszakereshető adatokkal rendelkezünk, ennek ismeretében trendeket állíthatunk fel, melyekkel előre is jelezhetők a parametrikus meghibásodások nagy része,
- Kijelzés – az üzemeltetést végző személy részére biztosítja a hiba egyértelmű jelzését, illetve a szükséges lépéseket a hiba elhárítására, vagy pedig a hibával való üzemelés folytatására.

A PC-alapú megoldás továbbfejlesztése

A rendszer jelen kiépítettségében tartalmaz analóg áramköröket, melyek igen jelentős funkciókat valósítanak meg (pl. indító automatika), melyek egy FADEC rendszerbe a digitális kritérium okán nem tartozhatnak bele. A számítógépnek kellene ezeket a funkciókat átvenni, hiszen például a starter motor röpsúlyos kapcsolója jelen állapotban a motor és gyújtás bekapcsolását végző relé áramkört szakítja, ezzel szüntette meg a motor és a gyújtás tápellátását. Teljes hatáskörű digitális szabályzó esetében a kapcsoló állapotát a számítógép felügyeli, és a megfelelő jelre az előírt szubrutint hajtja végre.

A PC-alapú rendszer aránylag gyorsan továbbfejleszthető a rendszer teljes kézbentartására, így ennek megfelelően kis befektetéssel rövid idő alatt üzemképes rendszer hozható létre ezzel a megoldással.

Lehetőség van még az analóg áramkörök meghagyásával egy elektronikus, de nem teljes hatáskörű szabályzórendszer megvalósítására, ez tulajdonképpen csak annyi továbbfejlesztést igényel, hogy hardver oldalon kiépítésre kerüljön az arányos szelep PWM³ áramköre, valamint a szoftvert ki kell egészíteni ennek megfelelően.

Mikrovezérlőn alapuló megoldás

Az utóbbi években igen elterjedté váltak a különböző egyszerű, gyors hardver és szoftver fejlesztés révén üzembe helyezhető mikrokontrollerek, melyek őse az Intel 8051 típusú, 8 bites, csökkentett utasításkészletű (RISC⁴) processzor volt. Mára ezek a digitális integrált áramkörök könnyen kezelhető Flash programmemóriával, az eredeti 256 bájtól képest már több kilobájt RAM-mal, programozható A/D konverterrel, PWM kimenettel rendelkeznek. Ezen tulajdonságaik és kedvező áruk (pár ezer Ft) közkedvelté tette ezeket az eszközöket az egyszerű elektronikus egységekben, ahol viszonylag bonyolult problémákat kell megoldani. Analóg áramkörökkel ezeket a feladatokat már igen körülményesen lehetne csak megvalósítani, a PC-k és a hozzájuk kapható professzionális megoldások viszont túlzottan költségesek volnának.

A mikrokontrolleres megoldás esetében a következő alapkövetelményeket kell tudnia teljesíteni a kiválasztott integrált áramkör:

- a gázturbina digitális jeleinek száma legalább 16 bemeneti vonalat tesz szükségessé
- a gázturbina analóg jeleinek száma legalább 12 bemeneti vonalat tesz szükségessé

³ PWM: Pulse Width Modulation = Impulzusszélesség-moduláció

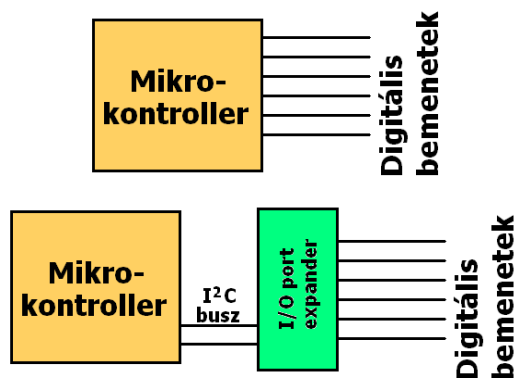
⁴ RISC: Reduced Instruction Set Computer

- a gázturbinán ki-/bekapcsolandó rendszerek legalább 8 digitális kimeneti vonalat igényelnek
- a gázturbina szabályzása a tüzelőanyag-betáplálás speciális kialakítása miatt az arányos szelep részére PWM jelet előállító kimenetet igényel.

A mikrokontrollerekben található A/D konverterek legnagyobb hátránya a jelen alkalmazás számára alacsony felbontás, valamint a multiplexeléses technológia. Egy átlagos mikrovezérlő mindössze 10 bites A/D-vel rendelkezik, ez már sajnos nem megengedhető, %-os nagyságrendbe eső hibát képes bevinni a mért eredmény digitalizált értékébe. A másik probléma, hogy az összes bemenet egyetlen áramkörön osztozik, amely így csak időben eltolva képes az analóg jelek digitalizálására. Ez a két tulajdonság nem megfelelő a kritikus analóg jel, a turbina utáni gáz hő digitalizálására, így egy mikrokontrolleres szabályzóegység esetén mindenképpen különválasztva kell a bejövő analóg jeleket átalakítani:

- az időben lassan, vagy egyáltalán nem változó jelek kerülhetnek feldolgozásra a mikrokontroller saját, legalább 12 bites A/D eszközén keresztül.
- az időben gyorsan változó jelek közül a legkritikusabb, a gáz hő különálló A/D konverterre kerül, mely legalább 16 bites felbontással, valamint a mikrovezérlővel való kommunikációra korszerű soros buszos kapcsolattal (SPI⁵, I²C⁶) rendelkezik.

A mikrokontrollerek lábainak nagyfokú multiplexelése okán célszerűnek mutatkozik a digitális ki- és bemenő jelek esetében úgynevezett I/O port expander áramkör alkalmazása, amely szintén SPI, vagy I²C buszon keresztül kommunikál a szabályzásért felelős mikrokontrollerrel. Ezek az áramkörök a digitális ki- és bemeneteik állapotát soros kommunikáción keresztül továbbítják a vezérlő integrált áramkörnek, amelynek ily módon csupán a kommunikációt kell lefolytatnia, cserébe viszont jelentős számú bemenet egyszerű kezelése válik lehetővé, amint azt a 10. ábra is mutatja.



10. ábra. Digitális bemenetek illesztése közvetlenül (főnt),
illetve port expander áramkörön keresztül (lent)

A digitális jelek közül is ki kell emelni egy kritikus fontosságút, ez pedig a fordulatszám. Bár jelenlegi formájában a rendszer előállít a négyszögjelből egy, annak frekvenciájával egyenesen

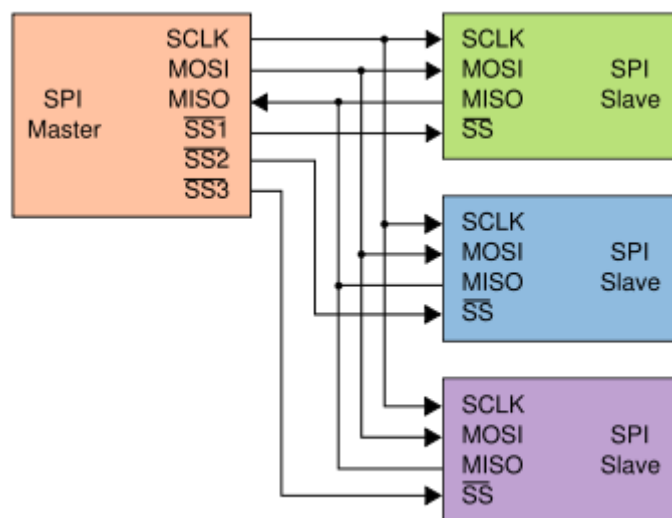
⁵ SPI: Serial Peripheral Interface Bus – Soros Periféria Interfészbusz

⁶ I²C: Inter-Integrated Circuit: Kétvezetékes soros kommunikációs szabvány

arányos feszültségeket is, de ez a kétszeres konverzió (négyesjegy, mint digitális forrás → analóg villamos feszültség → digitalizálás A/D konverterrel) olyan hibahalmozó hatással rendelkezik, hogy ez a jel mindössze kiegészítő funkcióval rendelkezik, ez nem lehet alapja a szabályzásnak. A fordulatszámot tehát eredeti négyesjegy formájában kell egy különálló, kizárólag ezt a célt szolgáló mikrokontrollerrel feldolgozni, és a nyert számértéket soros kommunikációval a szabályzást végző egységnek továbbítani.

A mikrovezérlős megoldás esetében tehát mindenképpen szükség van valamilyen soros protokollon keresztül az adatfolyam kontrollálására. Ezért szükséges néhány szót ejteni a lehetséges megvalósításokról.

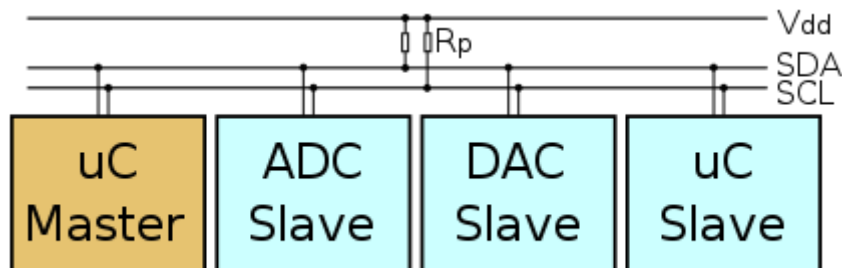
Az SPI busz egy mester (pl. mikrovezérlő) és egy vagy több szolga (pl. A/D konverter) közötti szinkron soros kommunikációt lehetővé tévő szabvány. A buszon történő kommunikáció szabvány szerint négy vezetékkel igényel, egy órajel (SCLK), két adatvezeték (MOSI – Master Output Slave Input és MISO – Master Input Slave Output) és egy, a szolga kiválasztását végző jel (SS – Slave Select) szükséges. A mikrovezérlőkben megvalósított SPI interfész általában ez utóbbit nélkülözi, így ezt valamilyen mesterséges módon (pl. I/O kimenet felhasználásával) kell előállítani. A busz logikai felépítése a 11. ábrán látható.



11. ábra. Az SPI protokoll kialakítása [4]

Az I²C soros busz szintén szinkron soros kommunikációs szabvány, de több mester és több szolga is jelen lehet a rendszerben. Ez abban az esetben lehet érdekes, ha duplikált rendszert kívánunk felépíteni, ahol azonos eszközökön osztozik a két számítógépes egység. Az I²C busz két vezetékkel tartalmaz, melyeket alapállapotban ellenállásokon keresztül tápfeszültségre húzunk. Az egyik a soros adatvezeték (SDA – Serial DATA), a másik a soros órajelvezeték (SCL – Serial CLock). Az I²C szabvány az SPI protokollal ellentétben különálló vezetékeken keresztül, hanem az adatvonalon elküldött 7 bites címdekódolást alkalmaz, azaz egy buszon maximálisan 128 egység helyezhető el. Ez

messze több mint amennyi a sugárhajtómű kapcsán várható lesz. A busz architektúrája a 12. ábrán figyelhető meg.



12. ábra. Az I²C kommunikáció vázlata [5]

Összefoglalva a két kommunikációs protokoll által kínált lehetőségeket, a rugalmasabb továbbfejleszthetőség érdekében célszerű az I²C buszt előnyben részesíteni, mert itt tulajdonképpen szoftver kérdése csupán a bővítés, míg SPI busz esetében újabb kiválasztó vonalakat kellene (hardveresen) létrehozni, illetőleg fenntartani a későbbi fejlesztés okán.

Összegzés

Amint ebből a fejezetből kiderült, számos megoldási lehetőség kínálkozik a rendszer továbbfejlesztésére, melyekből összefoglalva a következők megvalósítása tűnik reálisnak:

- elsőként a PC-alapú rendszer kibővítése tűnik célszerűnek, hiszen a mérő- és adatgyűjtő rendszerhez a sugárhajtóműves kísérleti berendezés esetében mindössze a tüzelőanyag-betáplálás változtatását kellene, mint szabályzási lehetőséget hozzáadni. A rendszer így elesik ugyan a teljes hatáskörű jelzőtől, de már olyan biztonsági elemeket hordozhat, melyek a hallgatói mérések esetén igen fontosak lehetnek.
- másodsorban egy duplikált mikrokontrolleres FADEC elven működő szabályzórendszer létrehozása a cél. Ennek előnye, hogy a hallgatók megismerkedhetnek a repülésben igen széleskörűen alkalmazott duplikált rendszerek működési elvével, egy lehetséges gyakorlati kialakítással, illetve annak üzem közbeni viselkedésével.

ELÉRT EREDMÉNYEK

Megvalósult a mérő- és adatgyűjtő rendszer digitalizálása, valamint ennek továbbfejlesztése gyanánt a számítógép a gázturbina üzemeltetésének egyszerűbbé és biztonságosabbá tétele érdekében beavatkozó szerveken keresztül a szükséges változtatást létre tudja hozni a körfolyamatban.

Kibővült tehát mind hardver, mind pedig szoftver oldalról a rendszer, jelen formájában tulajdonképpen a számítógépes vezérlés teljes körűen, a szabályzás pedig részlegesen kidolgozásra került.

Jelen formájában a berendezéssel néhány hallgatói mérésre is sor került, a gázturbina üzemeléseivel jelen lévő repülőgépezés hallgatók a számítógépes adatgyűjtés segítségével igen fontos tapasztalatokat szerezhettek a gázturbina üzemállapotairól, valamint a működés műszaki vonatkozásairól.

TOVÁBBFEJLESZTÉSI LEHETŐSÉGEK

Lévén, hogy megállapításra került, hogy a legkisebb befektetéssel a PC alapú rendszer alakítható át teljes hatáskörű szabályzórendszerre, így a közeljövőben ennek a megvalósítása kerül előtérbe.

A szoftver és hardver környezet távlati továbbfejlesztése alapvetően a mikrovezérlő által felügyelt különálló elektronikus szabályzás irányába célszerű folytatódjon. A PC alapú rendszer pedig ebben az esetben kizárólag az adatgyűjtés feladataival lenne felruházva.

A sugárhajtóműves kísérleti berendezés egyik lehetséges felhasználási területe az oktatás. A biztonságos, és kevés tapasztalattal rendelkező üzemeltetők számára egyszerű üzemeltetést biztosító szoftver mind a felső-, mind pedig a szakmai középfokú oktatásban kiemelt szerephez juttathatja a berendezést, mint bemutató eszköz, amelyen a hallgatók tapasztalatot szerezhetnek a korszerű repülőgép-hajtóművek működéséről, felépítéséről, üzemeltetéséről. Ezzel igen nagy jelentősége lesz a repülőgépszerelők és –mérnökök szakmai ismereteinek megalapozásában.

A közeljövőben egy „Gázturbinák mérés technikája” című, választható tantárgy kerül bevezetésre a Repülőgépek és Hajók Tanszék kínálatába, amelynek keretében a hallgatók a korszerű mérések kivitelezésének alapjai mellett a sugárhajtómű üzemeltetésével is megismerkedhetnek.

FELHASZNÁLT IRODALOM

- [1] ROLLS-ROYCE Plc.: The Jet Engine. Derby, 1996.
- [2] MANGHAM, E. és PEACE, A.: Jet Engine Manual. London, 1961.
- [3] THOMPSON, Haydn A.: Parallel Processing for Jet Engine Control. Springer, London, 1992.
- [4] WIKIPEDIA cikk az SPI buszról: http://en.wikipedia.org/wiki/Serial_Peripheral_Interface_Bus
- [5] WIKIPEDIA cikk az I²C buszról: <http://en.wikipedia.org/wiki/I2c>
- [6] WIKIPEDIA cikk a Harvard architektúráról: http://en.wikipedia.org/wiki/Harvard_architecture