

Beneda Károly¹ – Horváth Ádám² – Tóth Vilmos³

A TKT-1 GÁZTURBINÁS SUGÁRHAJTÓMŰ FEJLESZTÉSE⁴

A TKT-1 sugárhajtóműves fékpad kiemelt feladata a repülőműszaki képzésben részt vevők számára a gázturbinák működésének, üzemeltetésének megismerése. Ez természetesen magában foglal egy olyan teljes hatáskörű, redundáns (két csatornás) digitális elektronikus szabályozást (Full Authority Digital Electronic Control – FADEC) is, melyen keresztül a korszerű repülőgép-hajtóművek hasonló funkciójú rendszerei bemutatathatóak a hallgatók számára, akik így nem csupán termodinamikai kérdésekkel foglalkozhatnak tantermi körülmények között, hanem átfogó multidiszciplináris ismeretekkel gyarapíthatják tudásukat a hajtómű üzemeltetése kapcsán. E cikk célja, hogy az elmúlt időszak fejlesztéseit és azok hatásait bemutassa.

DEVELOPMENT OF TKT-1 TURBOJET ENGINE

The TKT-1 turbojet engine has the emphasized role to offer the students the possibility of gathering detailed knowledge about the operation of gas turbines. This includes naturally a sophisticated, redundant dual-channel FADEC system, through which the similar units of up-to-date aircraft powerplants can be demonstrated also during the operation within the aeronautical lectures. Thus not only theoretical but also very impressive practical know-how can be acquired with multidisciplinary fields of mechanical, thermodynamic and electronic aspects. The goal of this paper is to introduce the reader into the work achieved in order to develop the aforementioned system.

BEVEZETÉS

A TKT-1 sugárhajtómű és próbapadja 2005-2007 között került kifejlesztésre a Magyar Honvédség Légieréjében is alkalmazott MiG-23MF szuperszonikus vadászipülőgépek, illetve Szu-22M3 támadó repülőgépek TSz-21 típusú indító gázturbinájából. A berendezés oktatási-kísérleti eszközként ötödik éve áll szolgálatban a BME Vasúti Járművek, Repülőgépek és Hajók Tanszéken, illetve annak elődjén a repülőgépész és légiközlekedési képzésekben, mint a gázturbinás repülőgép hajtóművek alapvető szemléltető eszköze. Működése során nemcsak részletes adatokat lehet szerezni a munkafolyamat termodinamikai oldaláról, hanem a hallgatók a hőerőgép üzemeltetésének aspektusaiban is jártasságot szerezhhetnek.

A 2011/2012 tanév tavaszi féléve során a Budapest Aircraft Service Kft. jóvoltából jelentős mértékű fejlesztések kerültek bevezetésre, melyek a tüzelőanyag-ellenőrző és mérő-adatgyűjtő rendszert érintették. Ezen kívül a gázturbina fűvócsövét is átalakítottuk, tekintettel a megelőző évek tapasztalataira, mi szerint a tolóerő a GSF⁵ redőnyzet túlzottan nagy átmérője miatt elmaradt a

¹ egyetemi tanársegéd, BME Vasúti Járművek, Repülőgépek és Hajók Tanszék, beneda@rht.bme.hu

² repülőgépész hallgató, BME Vasúti Járművek, Repülőgépek és Hajók Tanszék, adam1h@t-online.hu

³ repülőgépész hallgató, BME Vasúti Járművek, Repülőgépek és Hajók Tanszék, vilmoci@citromail.hu

⁴ Lektorálta: Dr. Kavas László okl. mk. alez; egyetemi docens, Nemzeti Közszolgálati Egyetem Katonai Repülő Tanszék, kavas.laszlo@uni.nke.hu

⁵ GSF: gázkiáramlás-sebességfokozó

várt értéktől. Jelentős előrelépés történt az elektronikus szabályozórendszer különböző lépcsőinek fejlesztésében, a jelenleg alkalmazásban lévő elektronikus egységnek egy kibővített funkcionalitással rendelkező változata került megvalósításra, míg a teljes hatáskörű szabályozás tervezése is nagy horderejű változásokat hozott a rendszer felépítését tekintve, emellett pedig értelem-szerűen folytatódott az egyes moduláris elemek tervezése, gyártása.

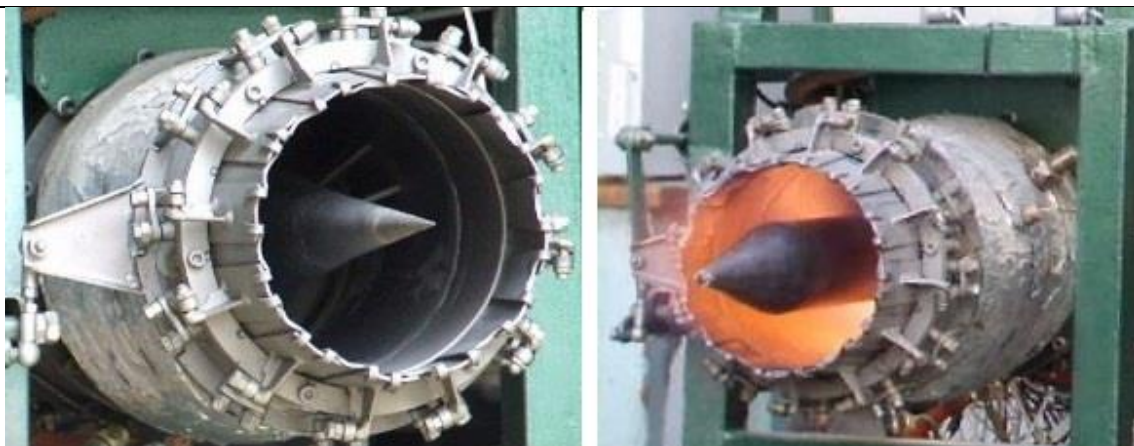
A FÚVÓCSŐ MÓDOSÍTÁSA

A TKT-1 a sugárhajtómű átalakításakor még alapvetően több különböző kúpszögű, üzemszünetekben cserélhető, állandó keresztmetszetű, konfúzoros fúvócsővel került megtervezésre. Mivel a kompresszor névleges nyomásviszonya $\pi_k^* = 3,5$ és a maximális turbina előtti torlóponti gázhőmérséklet mindössze $t_3^* = 850^\circ\text{C}$, a turbina nyomásviszonya megközelítőleg $\pi_t^* \approx 2$, a fúvócső mindenképpen kritikus alatti üzemmódot tud megvalósítani, tehát nem volt szükség Laval-csőves kialakításra. Gyártásra azonban gazdasági okok miatt az első kísérletekig mindössze egyetlen, minimális szűkületet alkalmazó fúvócső került, ezzel zajlottak az első kísérletek 2007 decemberében és 2008 januárjában.

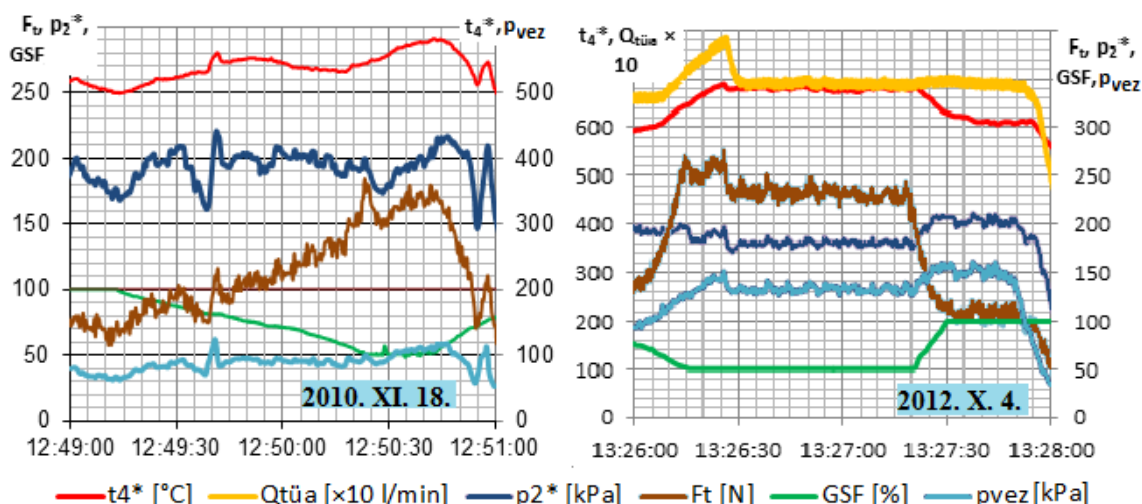
2008 februárjában készült el a szovjet egyáramú sugárhajtóművek (pl. R-29-300, [6]) gázkiáramlás-sebességfokozóinak mintájára a saját tervezésű és gyártású változtatható keresztmetszetű fúvócső valósult meg.

Egészen 2011 decemberéig ezzel zajlottak az üzemelések, azonban az előállítható tolóerő nem közelítette meg a számításokat, mivel a fúvócső kilépő keresztmetszete nagyobb volt a TSz-21 névleges üzemmódjával ekvivalens fúvócső keresztmetszetnél. Ez utóbbi értelemszerűen eddig csak számítások szintjén volt ismert. Mivel a GSF konstrukciója nem tette lehetővé a további szűkítés megvalósítását, vagy új szerkezet létrehozása, vagy a központi kúp átmérőjének növelésével lehetett megoldást találni a problémára. A kivitelezés egyszerűsége okán az utóbbi megoldás gyártására született döntés, melynek első próbája 2012 áprilisában zajlott le.

A korábbi konstrukció és a jelenlegi összehasonlítását szolgálja az 1. ábra, illetve a 2. ábrán látható adatsorok segítségével képet alkothatunk a fúvócsövek különbözőségéből adódó termodinamikai eltérésekről. A 2. ábra diagramjai hozzávetőlegesen azonos, $\pi_k^* \approx 3$ körüli kompresszor nyomásviszony mellett kerültek rögzítésre (ez a fent említett 95%-os névleges fordulatszámnak, megközelítőleg 45000 fordulat/percnek felel meg). Mindkét grafikon egy terhelés felfutást mutat, melyen a zöld folytonos vonallal ábrázolt GSF pozíció segítségével követhető a terhelés növelése. A 100%-os érték a teljesen nyitott, az 50% pedig a teljesen zárt GSF pozícióra utal. A piros görbével jelzett turbina utáni gázhőmérsékletben számottevő eltérés mutatkozik, megfigyelhető a mérsékelt szűkítés mellett elért maximális 580°C -ról 680°C környékre emelkedett, mindeközben a tolóerő csúcsértéke az addig mért 160N-ről 230N-ra, közel 40%-kal nőtt. Érdekes még megjegyezni, hogy a jobb oldali diagramon a paraméterek stabilizálása már számottevően javult, köszönhetően a PELE elektronikus szabályozónak. Az összehasonlítás tételezen az 1. táblázat adatai alapján tehető meg.



1. ábra A TKT-1 korábbi és jelenlegi változtatható keresztmetszetű, konfúzoros gázkiáramlás-sebességfokozó redőnyzetei



2. ábra A TKT-1 korábbi és jelenlegi fűvócsőveivel mért tolóerő és gázhőmérséklet alakulása

Paraméter	Érték régi GSF-fel	Érték új GSF-fel
Tolóerő	167,2N	233,2N
Turbina utáni gáz hő	582,8°C	684,5°C
924 vezérlőnyomás	107,8kPa	132,7kPa
Tüzelőanyag térfogat- áram	66,2 l/min*	69,2 l/min

1. táblázat A TKT-1 jellemzői üzemi paramétereit a régi és új GSF-fel (* mért adat híján a 924-es karakterisztikája alapján becsült érték)

A 2. ábra kiértékelésekor fontos kiemelni, hogy az új fűvócső esetén már számottevő szerepe van a redőnyzet mozgásáért felelős rudazat holtjátékának. Amikor a kezelő a GSF zárása során stabilan fogja a GSF vezérlő kart, a tolóerő pillanatnyilag 260N fölé is felszalad. Amint a kart elengedi, a tolóerő a már említett mintegy 230N értékre esik vissza. Ez egyébként a GSF visszacsatolásban, mint egy a teljes mozgástartományhoz képesti 0,5%-os elmozdulásként mutatkozik. Ekkor a fűvócsőn belül uralkodó túlnyomás a holtjátékkal rendelkező redőnyzetet kis mértékben kitágítja, ezzel pedig csökken a tolóerő.

A központi kúp módosítása úgy került kialakításra, hogy a teljesen nyitott GSF esetén a fűvócső kilépő keresztmetszete ne legyen kisebb a turbina utáni keresztmetszetenél.

A PELE korlátozott hatáskörű, digitális elektronikus szabályozó fejlesztése

Az egyre növekvő igény a hallgatói mérések lefolytatására eredményezte az első, még korlátozott hatáskörrel rendelkező elektronikus szabályozó egység kifejlesztését 2011-ben. Ennek bázisán hoztuk létre a rádió távirányítású változatot, mely a modell repülőgépekben, illetve pilóta nélküli repülőeszközökben is alkalmazható mikrogázturbinák szabályozását tűzte ki célul.

A szabályozóval kellő számú üzemelést végrehajtva megállapíthatjuk, hogy célját elérte, a hajtómű üzemmódjának megtartására alkalmas algoritmust valósít meg, egyszerűsége ellenére. A nehézséget a beavatkozás áttételes mivolta rejti magában, ugyanis a PELE egy arányos levegőszelepet működtet, ami a kompresszor utáni nyomásból az aktuális igényeknek megfelelő vezérlőnyomást állít elő a 924-es berendezés tüzelőanyag-áteresztő szelepének mozgatására. A szabályozás robusztusabbá tételéhez azonban szükség lenne a levegős kör kiiktatására, a tüzelőanyag-adagolásra történő közvetlen ráhatás, mint ahogyan ez más TSz-21-es bázisán kialakított rendszereknél már megvalósult és üzembiztosan működik (pl. MPM-20, a Kassai Műszaki Egyetemen [4]).

A szabályozó tesztelése során került felszínre, hogy az esetleges rendellenességek felderítése nehézkes, tekintetve, hogy az elektronika egyszerűsége okán a külvilággal csak a szükséges minimális kapcsolatban áll, mely kimerül a gázkar és kompresszor utáni nyomás analóg jelek feldolgozásában és a levegős arányos szelep részére PWM vezérlőjelek kiadásában. Leginkább az üzem közben a szabályozókör különböző paramétereibe történő beavatkozás lehetősége volt az a körülmény, amely az eredeti helyett egy továbbfejlesztett változat tervezését eredményezte. Az eddig alkalmazott 2-es verziót a 3-as sorozat követi tehát.

Az új verzió már egy sokkal több képességgel rendelkező, Freescale (volt Motorola) MC9S08SH8 típusú mikrokontrolleren alapul. Ez az integrált áramkör 8kB programmemóriával és 512B RAM-mal rendelkezik, amely duplája a korábbi elektronika MC9S08QD4 központi egységének. Az eredeti szabályozóban meg kellett tartani a még korábbi kézi vezérlésből örökölt gázkar potenciométerrel való kompatibilitást, ezért a változtatható ellenállás nemlineáris karakterisztikáját szoftveresen kellett kiküszöbölni. Az ezt a célt szolgáló rutin a lebegőpontos számbábrázolás megkerülhetetlensége okán a programmemória közel felét foglalta el. Az elmúlt két év tapasztalatai alapján kijelenthető, hogy az arányos szelep kézi vezérlésére nem lesz szükség, azzal egyenértékű beavatkozás szükség esetén mechanikusan egy párhuzamosan kötött kézi csappal megvalósítható. Így tehát a gázkar elmozdulásával egyenesen arányos jelet szolgáltató lineáris potenciométer is alkalmazhatóvá válik, jelentős memóriát megtakarítva ezzel további feladatok ellátására.

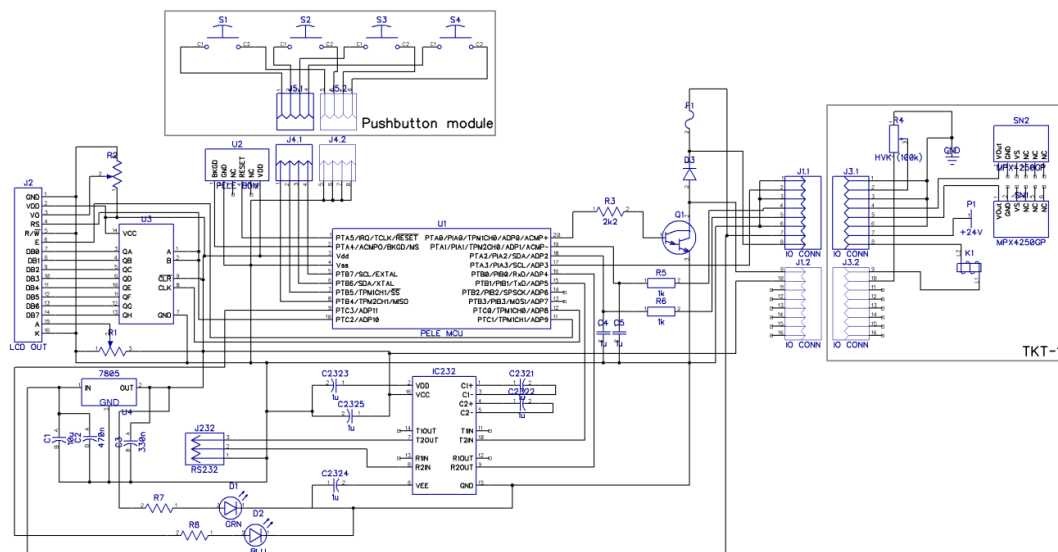
Az egyes fejlesztések között itt található meg a következő visszacsatolás, ugyanis a PELE V2 szabályozó algoritmusára épült a rádió távirányítású változat, aminek az új PELE 3-as verzió a külvilággal történő kapcsolattartás oldaláról nyer értékes lehetőségeket.

A rádió távirányítású szabályozónál került kifejlesztésre az LCD⁶ kijelzőn történő kommunikáció a felhasználóval, amely a kijelző mellett elhelyezett nyomógombokkal választási lehetőségeket is képes biztosítani, így kétoldalú kapcsolat valósítható meg. Ez a rendszer került beépítésre a PELE V3-as változatába.

A külvilággal való kapcsolattartás egyik lehetséges eszköze a számítástechnikában elterjedt RS232 szabvány alapján zajló soros kommunikáció, melynek segítségével a berendezés működése akár számítógéppel is befolyásolhatóvá válik. Amennyiben a program biztosítja a mért és számított adatok automatikus küldését, úgy a jelenleg alkalmazott számítógépes mérő-és adatgyűjtő rendszer értékes információkkal gazdagodhat a szabályozás működését illetően.

Az új V3-as változatú PELE az előzőhöz hasonlóan két nyomásérzékelő jelét is képes feldolgozni, bár a korábbi változat szabályozási algoritmusából a végül felhasznált kompresszor utáni nyomás mellett a vezérlőnyomás értéke kimaradt. Ennek az oka az volt, hogy elhagyásával jelentősen egyszerűsödött az algoritmus, ellenben minőségi jellemzői nem romlottak számottevően. Az új változat esetében azonban felmerült annak a lehetősége, hogy a két nyomásjel a több helyütt (pl. az International Aero Engines V2500 hajtóműcsaládon [1]) alkalmazott EPR⁷ szerinti szabályozás megvalósítása érdekében a turbina utáni és kompresszor előtti torlóponthoz nyomások mérését lenne célszerű megvalósítani.

A PELE V3 elvi kapcsolási rajza, illetve áramköri kártyája a 3. és 4. ábrán figyelhető meg.



3. ábra A PELE V3 elvi kapcsolási rajza

⁶ LCD: Liquid Crystal Display, folyadékkristályos kijelző

⁷ EPR: Engine Pressure Ratio, hajtómű nyomásviszony, a turbina kilépő és a kompresszor előtti torlóponthoz nyomások hányadosa



4. ábra A PELE V3 beszerelés előtt

A teljes hatáskörű, digitális, elektronikus szabályozórendszer fejlesztése

Bevezető gondolatok

A TKT-1 sugárhajtómű oktatási feladatából adódóan nem csupán a gázturbina termodinamikai jellemzőinek megismerésére kell fókuszáljon, hanem olyan interdiszciplináris tudást is biztosítania kell, amelyek a korszerű repülőműszaki ismeretek közül nem hiányozhatnak. Ilyen többek között a jelenleg már széleskörűen elterjedt, a hajtóművek biztonságos és gazdaságos üzemeltetését nagymértékben elősegítő FADE(E)C⁸ [2]. Fontos megjegyezni, hogy ez a megnevezés egy teljes rendszerre utal, nem csak a központi végrehajtó egységére, amely természetesen kiemelkedően fontos, de korántsem egyedüli szereplője a szabályozásnak.

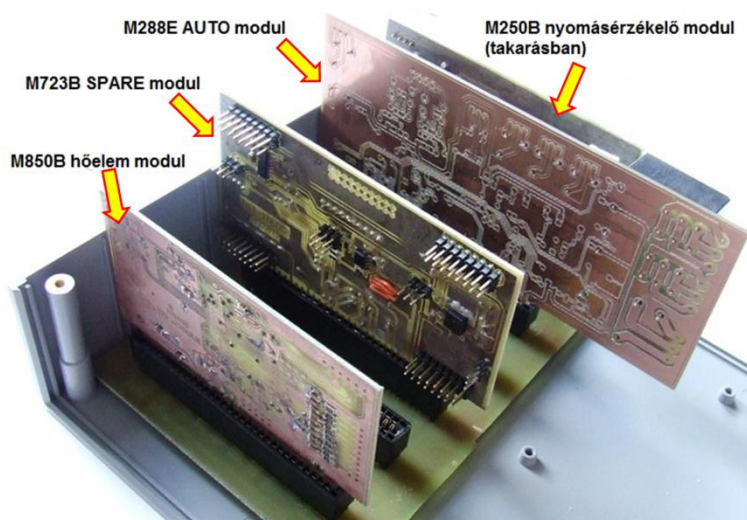
A moduláris áramkörök előzetesen kialakított listája módosult, mert a tervezés során fény derült az egyes komponensek nem optimális elosztására, és ennek ismeretében bizonyos funkciókat át kellett csoportosítani a kártyák között, valamint egy új kártya is megjelent. A modulokat és rövid jellemzésüket az 2. táblázat tartalmazza.

⁸ FADE(E)C: Full Authority Digital Electronic (Engine) Control, teljes hatáskörű digitális elektronikus (hajtómű) szabályozás

Modul jele	Verzió / darab-szám	Megnevezés	Rövid leírás
M250	B / 1	Nyomásmérő modul	Saját nyomásérzékelők jeleinek digitalizálása, továbbítása az alaplap CAN ⁹ buszon
M850	B / 1	Hőelem modul	Hőelemek jeleinek erősítése, digitalizálása, továbbítása az alaplap CAN buszon
M723	B / 1	Digitális modul	Diszkrét jelek feldolgozása, továbbítása az alaplap CAN buszon
M288	E / 2	Auto modul	Az automatikus szabályozást megvalósító egység
M248	- / 1	BITE-M modul	Beépített önellenőrzés és kézi vezérlés modulja

2. táblázat A TKT-1 moduláris szabályozórendszerének elemei

Az elmúlt év során felvetődött újfajta követelmények alapján tehát az addigi koncepció nem alapvető, de mindenképpen számottevő változásokon ment keresztül. Az 5. ábrán a moduláris szabályozó eddig elkészült áramkörei láthatóak a műszerdobozba szerelés során.



5. ábra A teljes hatáskörű szabályozó az összeszerelés során

Analóg jellemzők mérése

Az analóg jellemzők mérése két egymástól jelentősen eltérő nagyságrendbe eső jelcsoportot foglal magába. Az első csoport tagjai a hőelemek, melyek a sugárhajtómű jellegzetes keresztmetszeteiben, valamint segédberendezéseiben kialakuló hőmérsékleteket millivolt nagyságrendű kimenő feszültség formájában állítják elő. Ez a jelszint értelemszerűen csekély, közvetlen feldolgozásra csak igen különleges körülmények között alkalmas, ezért az analóg-digitális átalakítást megelőzően erősítés válik szükségessé. A másik csoport az erősítést nem igénylő nyomásérzékelők, valamint különböző visszacsatolások feszültségjelei, melyek a 0-5V tartományba esnek, így külön erősítés nélkül is digitalizálhatóak.

A két jelcsoport tehát egyértelműen elkülöníthető egymástól, ezért a moduláris, kártyás kialakítás tervezésénél ez a tény figyelembe vételre került. A nyomásérzékelő modul, mely az M250B jelet viseli, áramköri kártyája az alaplappal együtt már 2012-ben elkészült, erről az [3] is beszámolt.

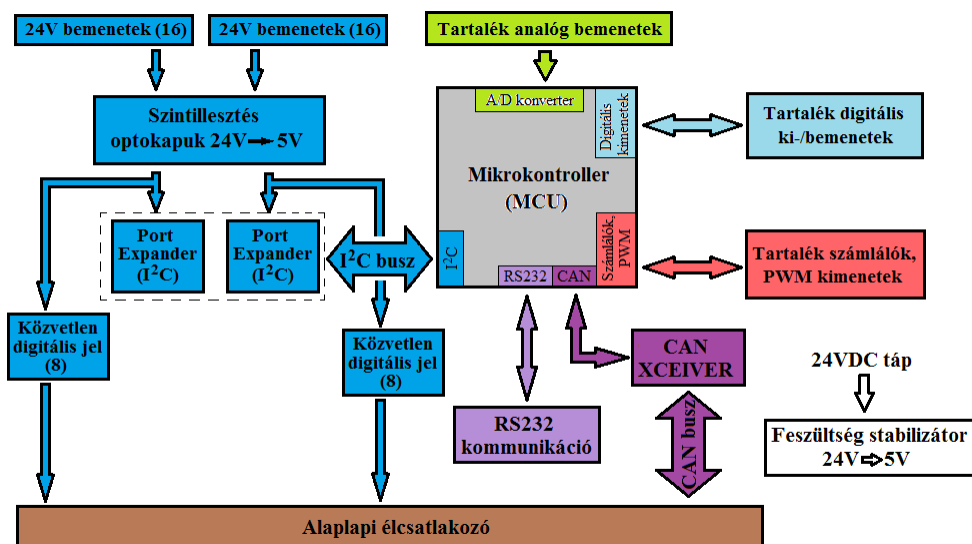
⁹ CAN: Controller Area Network, mikrokontrollerek közötti lokális hálózat

Az M850B jelű hőelem modul megvalósítása elhúzódott, de a cikk írásának idején a nyomtatott áramköri kártya már készen állt. Az alkatrészek beültetése és az elkészült áramkör élesztése a közeljövő feladatai közé tartozik.

Diszkrét jelek feldolgozása

A legnagyobb hiányosság ezen a téren mutatkozott. Az eredeti tervek szerint ugyanis az automatikus szabályozást megvalósító modulok végezték volna ezen jeleknek a feldolgozását, azonban a rendszer biztonsága érdekében, a redundancia és robusztusság kívánalmainak megfelelően ez a feladat kikerült az Auto modulok hatásköréből.

Egy teljesen új áramkör került megtervezésre, aminek elvi felépítését a 6. ábra mutatja. Ez az áramkör egyrészt begyűjti a maximálisan 32 helyről származó diszkrét (igen-nem jelállapottal rendelkező) információt, majd azok közül 16-ot az alaplapi buszon továbbít vészhelyzet esetére, normál működés során azonban a kártya saját mikrokontrollere dolgozza fel, majd a CAN buszon bocsátja a többi modul rendelkezésére.



6. ábra Az M723B digitális modul elvi felépítése

Fontos megjegyezni azt, hogy a diszkrét jelek java a különböző 24V-os tápfeszültséggel működő egységektől történő visszacsatolás (szivattyúk, mágnesszelepek, stb.), ezért a gyengeáramú rész kiemelt védelme érdekében ezek a külvilágból érkező jelek optokapuk segítségével galvanikusan el vannak választva. A mikrokontrollerhez feldolgozásra kerülő, illetve az alaplapra továbbított jelek már az 5V-os tartományba esnek.

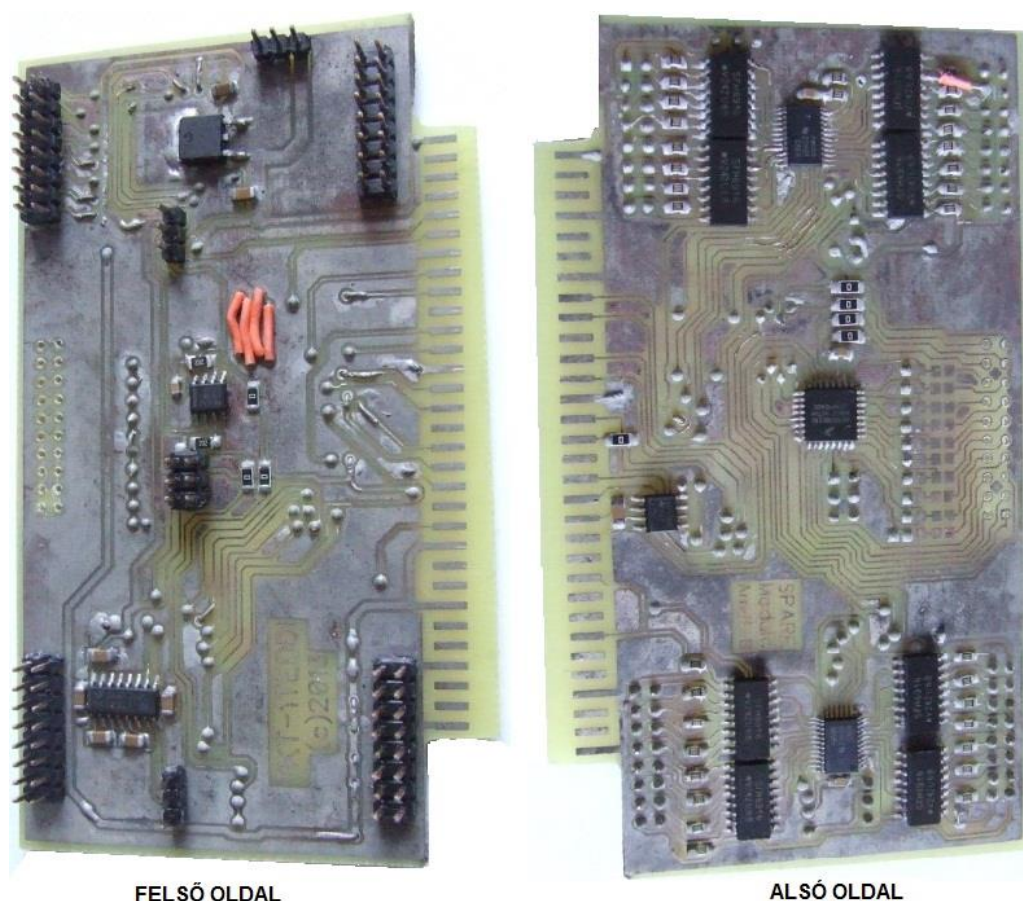
A modul központi mikrokontrollere a 2×16 jelet, melyek minden esetben redundánsak, két I²C¹⁰ buszon elhelyezett port bővítő áramkörön keresztül felügyeli. Ezen kívül annak érdekében, hogy a mikrokontroller meghibásodása vagy rendellenes működése esetén is legyen a többi modulnak (elsődlegesen az automatikus szabályozást megvalósítóknak) információja az egyes berendezések működéséről, az optokapuk kimenetei közül 8-8 vezeték az alaplapi buszra, mint egyedi jel is továbbításra kerül. Onnan a csatlakozó modulok szükség esetén – amennyiben a

¹⁰ I²C: Inter Integrated Circuit, integrált áramkörök közti kétvezetékes soros kommunikációs szabvány

CAN buszon keresztül nem érkezik információ – részesülhetnek ezekből.

A központi mikrokontroller a port bővítő alkalmazása miatt számos fel nem használt kivezéttessel rendelkezik, ezek az áramköri kártyán digitális, PWM¹¹ ki- és bemenetként, illetve analóg bemenetként szabadon felhasználható blokkot alkotnak a későbbi bővíthetőség érdekében.

A cikk írásakor a modul már az alkatrészek beültetésének fázisában volt, amit a 7. ábra mutat.



7. ábra Az M723B digitális modul

Az automatikus szabályozás áramkörei

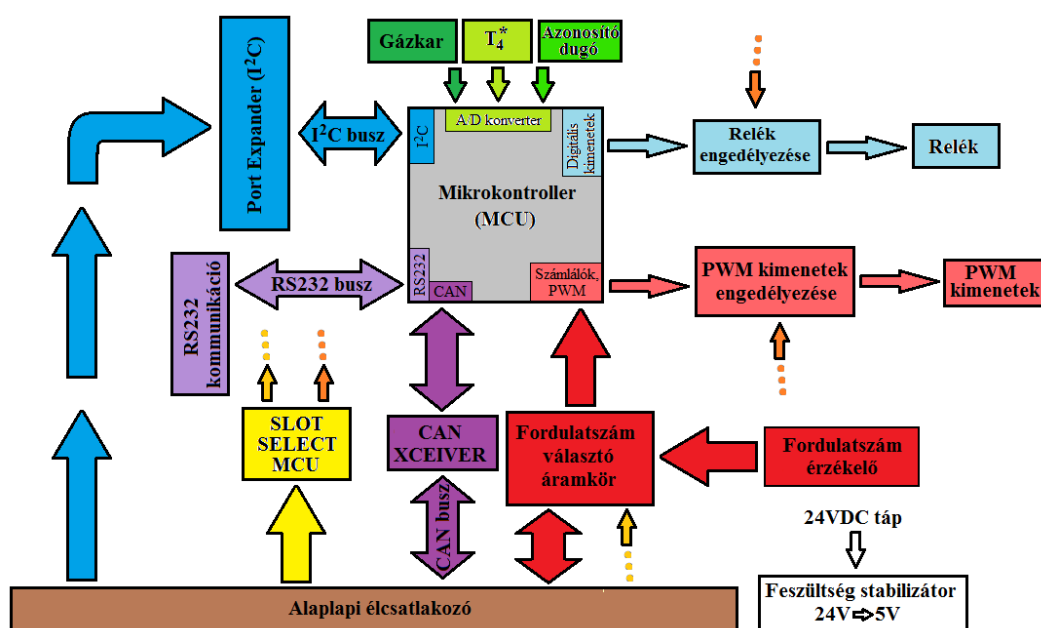
Az automatikus szabályozás moduljai is számottevő változáson mentek keresztül. Elsődlegesen megszűnt a kizárólagos felügyelete a diszkrét jeleknek, a fentebb részletezett M723 digitális modul látja el a továbbiakban ezt a szerepet. A szabályozás tényleges megvalósításához pedig szükséges az egyes beavatkozó jelek megfelelő kapcsolatainak létrehozása.

Mivel a hajtómű körül számos berendezés (szivattyúk, mágnesszelepek, stb.) mindössze ki-be kapcsolást igényel, számos relé került elhelyezésre a modulon. Az üzemmód megtartása érdekében a beavatkozáshoz analóg jelre van szükség, ezért itt PWM jelekkel zajlik a rendelkező jelek kiadása. Annak érdekében, hogy a későbbiekben egy redundáns, kétcsatornás szabályozórendszer épülhessen ki, szükséges biztosítani az egyes komponensek vezérlését mindkét

¹¹ PWM: Pulse Width Modulation, impulzus-szélesség moduláció

M288 Auto modulról, ezek tulajdonképpen párhuzamosan kapcsolt relékkel könnyen megoldhatóak. Az arányos jeleket igénylő PWM kimeneteknél kell különös figyelmet fordítani a nem aktív modul esetleges kimeneteinek leválasztására. Ezt a feladatot a foglalktíkválasztó logikai áramkör végzi, mely abban az esetben, ha az adott szabályozó aktív, engedélyezi ezen kimeneteket, melegtartalék üzemmódban azonban leválasztja ezeket a végrehajtó szervekről.

Az Auto modul végzi tehát a szabályozást, melyhez teljes körű rálátással kell lennie minden analóg és digitális jelre, mely a sugárhajtómű üzemállapotával kapcsolatos. Ezek a jelek elsődlegesen az alaplapi CAN busz kommunikációjával érkeznek, de a legfontosabb információk eredeti formájukban párhuzamosan is rendelkezésre állnak, hogy az adott modul kommunikációs egységének kiesése esetén is eljuthasson a szabályozáshoz nélkülözhetetlen adat rendeltési helyére. Az Auto modul elvi vázlatát a 8., míg kialakítását a 9. ábra mutatja.



8. ábra Az M288 Auto modul elvi felépítése



9. ábra Az M288 Auto modul

A cél egy kettős redundancia megvalósítása a két teljesen azonos Auto modul áramköri kártyával. A működés tekintetében mindig csak az egyik vezérli a kimeneteket, a másik melegtartalékként elvégez minden szükséges számítást, éppen csak a kimenetei inaktívak. Ennek a kialakításnak a lényege, hogy folyamatosan képesek ellenőrizni egymást a modulok, illetve az aktív meghibásodása esetén azonnali vezérlés átadás valósulhat meg.

A szabályozórendszer programjának mindenképpen képesnek kell lennie a normál kétcsatornás üzemmód mellett egyetlen áramkörrel történő működésre. Az alapvető konfigurációban mindkét csatorna hibátlan, és a rendszer többi eleme sem mutat rendellenességet. Ekkor a rendszert feszültség alá helyezve a két Auto modul közül az fogja megkezdeni a szabályozást, amelyik az előző üzem során melegtartalék volt. Ezt az információt elsődlegesen a beépített öntesztelés moduljának nem felejtő memóriájában tárolja a rendszer, és a BITE-M modul adja ki az alaplap megfelelő csatornáin keresztül az adott áramkör kiválasztására szolgáló jelet. Az Auto modulok rendelkeznek egy, a szabályozást megvalósító mikrokontrollertől független áramkörrel, amely a kiválasztó jelek és a saját oldali mikrokontroller működőképessége alapján engedélyezi a PWM kimeneteket. Ezt a 8. ábrán a Slot Select MCU¹² szimbolizálja, mely egy MC9S08SG8 típusú, 8kB programmemóriával rendelkező, 16 lábú TSSOP¹³ tokozású mikrokontroller.

A meghibásodások első lépcsőjeként elképzelhető az, hogy ezen kiválasztó jelek nem értelmezett kombinációban jelennek meg, a Slot Select MCU ilyen esetben saját nem felejtő memóriájában tárolt adatot használ annak eldöntésére, hogy az aktuális üzem során a hozzá tartozó kártya lesz az aktív, vagy a másik, és eszerint kapcsolja a PWM kimenetek reléit. Ehhez is szükséges természetesen a saját oldali mikrokontroller működőképességére utaló jel.

Amennyiben a Slot Select MCU-hoz tartozó nem felejtő memória is meghibásodik, akkor az alapértelmezés szerint az Auto modul fő mikrokontrollerébe épített Flash EEPROM-ban rögzített adat dönt, hogy a saját oldali vagy ellenkező oldali kártya kaphassa a vezérlést. Ekkor a két Auto modul CAN buszon keresztül zajló adatcsere során megállapítja az üzemképességet, és az a kontroller, amelyik melegtartalék üzemmódba kell kerülnön, a saját működőképességét jelző vonalat alacsonyra állítva olyan helyzetet imitál, mintha meghibásodás történt volna, így a saját kimenet-vezérlő áramköre tiltani fog. Utána visszaállítja a jelet magas szintre, amennyiben a másik kontroller működés közben hibásodna meg, akkor visszakaphassa a vezérlés lehetőségét.

Ha a CAN buszos kommunikáció nem valósítható meg, akkor alapértelmezés szerint az 1-es foglalatba helyezett Auto modul kapja a vezérlés lehetőségét egészen addig, amíg valamilyen meghibásodás ezt nem akadályozza. A 2-es foglalatban lévő modul csak ekkor jut érvényre.

A beépített öntesztelés modulja

A rendszer épségét felügyelő, központi önellenőrzést végrehajtó egysége az M248 jelű BITE-M¹⁴ modul, amely korlátozott manuális beavatkozást is lehetővé tesz.

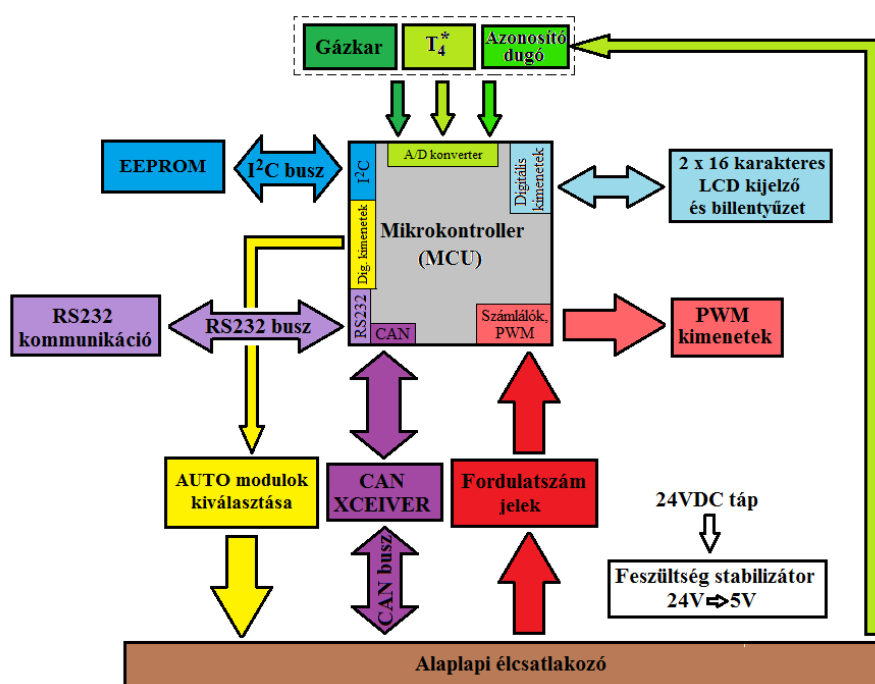
¹² MCU: Microcontroller Unit, mikrokontroller

¹³ TSSOP: Thin-Shrink Small Outline Package, kisméretű felületszerelt integrált áramköri tokozás

¹⁴ BITE-M: Built-In Test Equipment - Manual, beépített ellenőrző és manuális modul

Ez a modul felelős elsődlegesen az éppen sorra kerülő Auto modul kiválasztásáért, a CAN buszon küldött üzenetek alapján az egyes egységek működőképességének felügyeletéért, az esetleges meghibásodások során a rendszer szükség szerinti újrakonfigurálásáért. Egy 2×16 karakteres LCD kijelzőn és 6 nyomógombos billentyűzeten keresztül a kezelőszemélyzet számára megfelelő kapcsolatot biztosít a rendszer egyes elemeivel, illetve a memóriájában tárolt adatokhoz történő hozzáférést nyújt. A sugárhajtómű normál működése közben pedig RS232 adatcsatornán keresztül számítógépes mérő-adatgyűjtő rendszer számára képes az összes többi modul által begyűjtött adat továbbítására. Ez utóbbi funkció az eredeti koncepció szerint az Auto modulok közül az éppen melegtartalékként működőé lett volna, azonban nehezen lett volna kivitelezhető olyan kapcsolás, mely biztosítja a két modul csatlakozását egy közös RS232 kimenetre, miközben garantálja az éppen nem működő áramkör leválasztását, az elektromos zárlat elkerülése érdekében. Egyszerűbbnek tűnik tehát, hogy a BITE-M modul végezze ezt a feladatot, míg a többi kártya esetében a soros kommunikáció mindössze a fejlesztés céljait szolgálja, mert ezen interfészen keresztül – átgondoltan programozott firmware esetén – egyszerűen lehet elvégezni az egyes áramkörök funkcionális tesztelését.

A BITE-M modul elvi felépítését a 10. ábra mutatja.



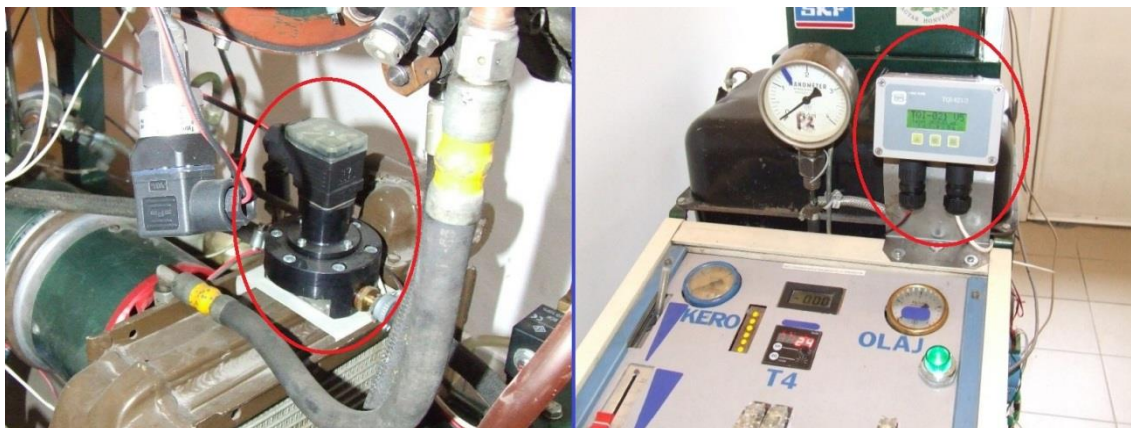
10. ábra: A BITE-M modul elvi felépítése

A PRÓBAPAD FEJLESZTÉSE

Tüzelőanyag térfogatáram mérése

A 2012-ben még rendelkezésre álló, felsőoktatási intézményeknek biztosítható szakképzési támogatás keretében a Budapest Aircraft Service Kft. jóvoltából a tüzelőanyag-ellenőrző rendszer gyarapodott egy, az MMG Flow Kft. által gyártott, nagy értékű TQT-2 Pelton-turbinás térfogat-

áram-mérő berendezéssel. Emellett lehetőség volt a hozzá tartozó TQI-021/2 elektronikus jelfeldolgozó egységgel, mely az impulzus-sorozat formájában beérkező, az impulzusok frekvenciájával arányos térfogatáramot 4-20mA szabványos analóg jellé konvertálja, melynek digitalizálása könnyűszerrel elvégezhető volt a meglévő mérő-adatgyűjtő rendszer feltételei mellett. Ezen berendezések segítségével az üzemelések során valós időben megállapítható a pillanatnyi tüzelőanyag-fogyasztás, igaz, hogy nem tömeg-, hanem térfogatárama, a tömegáram a tüzelőanyag sűrűségének közelítésével határozható meg. A tüzelőanyag térfogatáram-mérője, valamint a jelfeldolgozó elektronikus egysége a 11. ábrán tekinthető meg.



11. ábra A TQT-2 átfolyásmérő és a TQI-021/2 jelfeldolgozó egység a TKT-1 próbapadra építve

A tüzelőanyag nyomás mérése

A 924-es berendezés rendellenes működése számos esetben az indítás sikertelenségéhez vezetett. A turbinás térfogatáram-mérési lehetőség ellenére a probléma nem oldható egyszerűen, mert a szivattyúegység ilyen alapos ismerete nem biztosított alárendelt szerepének köszönhetően. A rendelkezésre álló adatok mindössze a kimenő tüzelőanyag nyomást, mint a vezérlő levegőnyomás függvényét tartalmazzák, ezzel történő összehasonlításra kellett tehát törekedni. Ennek eredményeképpen egy 4-20mA, a mért nyomással arányos áramjelet kibocsátó, 25 bar méréshatárú nyomástávadó került beépítésre közvetlenül a tüzelőanyag-fűvókák elé, melyet beépítési környezetében a 12. ábra mutat.



12. ábra A tüzelőanyag nyomástávadó a fűvókakoszorú előtt

Habár szorosan nem a mérés témaköréhez tartozik, de számottevő mértékben érinti a kialakuló tüzelőanyag-nyomást, a vezérlőpultra szerelt a nyomóági fojtószelep eltávolítása nagymértékben segítette a rendszer egyszerűsítését, hatékonyabb működését. Kiépítésével minden üzemmódon legalább 2bar többlet jelentkezett a rendelkezésre álló tüzelőanyag-nyomásban. Helyére az addig külön műszerdobozban helyet foglaló potenciométeres gázkar került.

A mérő- és adatgyűjtő rendszer

A tüzelőanyag-rendszert érintő fejlesztések mellett a rendelkezésre álló források lehetővé tették egy korszerű, nagy sebességű, többfunkciós mérő-adatgyűjtő modul beszerzését, mely a sugárhajtómű üzemének tranziens folyamatainak kellő részletességű feltérképezését is meg tudja valósítani.

A National Instruments által gyártott, NI USB-6218 típusú egység rendelkezik számos bemenettel és kimenettel, mind digitális, mind analóg oldalon [5].

Az eszköz összesen 32 darab analóg bemenettel rendelkezik, melyek maximálisan $\pm 10V$ tartományba eső feszültségek mérését teszik lehetővé, szükség szerint belső erősítéssel is rendelkezik. Az analóg csatornák multiplexeren keresztül csatlakoznak a 16 bites A/D¹⁵ konverterhez, mely másodpercenként maximálisan 200 000 minta vételére alkalmas. Jelen konfigurációban 18 analóg jel mérése történik, mellyel megközelítőleg 10 kHz gyakoriság az elméleti maximum.

Az analóg kimenetek száma kettő, ezek szintén 16 bites felbontást tesznek lehetővé.

A digitális jelek két nyolcbites egységbe szervezve találhatók meg, az egyik csoport a kimenet, a másik a bemenet. A diszkrét jelszintek megkülönböztetésén kívül beépített számlálóval is

¹⁵ A/D: analóg-digitális

rendelkezik, melynek 1 MHz-es időalapja még a nagy fordulatszámok pontos mérését is lehetővé teszi.

A berendezés illesztését a meglévő mérőrendszerbe mind a hardver, mind pedig a szoftver oldaláról MSc képzésben részt vevő hallgatók végzik, részint évfolyamfeladat, részben pedig diplomaterv keretében.



13. ábra: Az NI USB-6218 a tanszéki kompresszoros próbapadhoz illesztve

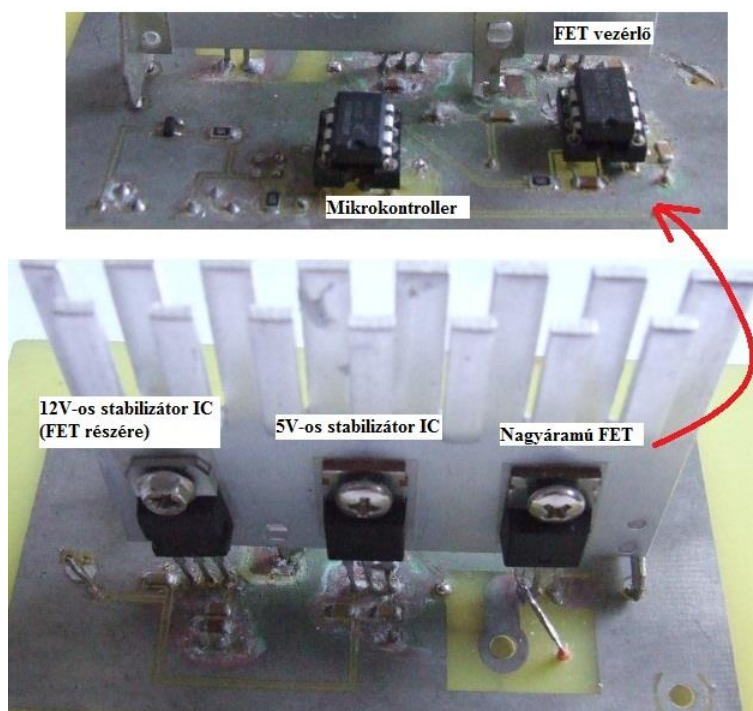
Az USB buszos kialakítás abban a tekintetben is kedvező, hogy az eszköznek nincsen szüksége külső tápellátásra, a működéséhez szükséges elektromos teljesítményt a gazda számítógéptől kapja. Ezzel egy rugalmas és könnyen mozgatható berendezéshez jutottunk, amely egyszeri nagy beruházás mellett képes lehet a tanszék laborjában található különböző gázturbinás és kompresszoros próbapadok mérő-adatgyűjtő feladatait ellátni, értelemszerűen nem párhuzamosan, hanem kialakításából adódóan, mint hordozható műszer az éppen vizsgálat alatt álló berendezésnél üzembe helyezve. Első alkalmazása is a tanszéken a centrifugális kompresszorok pompázsjelenségeinek és azok szabályozási lehetőségeit vizsgáló próbapadon valósult meg (lásd 13. ábra).

A 924-es próbapad alkalmazása

Az elmúlt év során kiemelt fontosságú előrelépés volt a régóta építés alatt álló 924-es szivattyúegység próbapadjának üzembe helyezése, és az azzal végrehajtott különféle mérések megvalósítása.

Elsőként a rendelkezésre álló harmadik 924-es berendezés került felépítésre a próbapadra, mellyel előzetesen a tervezett kihajtás [3] esetén tervezett körülmények között hajtottunk végre méréseket, megállapítandó az ehhez szükséges beállítási értékeket. Ekkor azonban nehézséget okozott a mérés kivitelezésében a szivattyút hajtó villanymotor kézi vezérlése, amely a szivattyú-

tyú változó terhelési viszonyai mellett nem tette lehetővé a fordulatszám pontos és állandó értékre történő szabályozását. Annak érdekében, hogy a cikk írásának időpontjában már gyártás alatt lévő áttételház alkalmazása esetén kialakuló, kizárólag a gázturbina aktuális fordulatszámától függő meghajtás szimulálható legyen a későbbiekben, megterveztünk egy szabályozó áramkört, amely azonban nem a nagyáramú transzformátor primer tekercsén folyó áram triakos szaggatásával, hanem a szekunderről érkező egyenirányított feszültség FET¹⁶-es PWM vezérlésével valósítaná meg a fordulatszám állandó értéken tartását, egy mikrokontrolleres PID¹⁷ szabályozó segítségével. Az elkészült, de jelenleg még a programozás fázisában lévő áramkört a 14. ábra mutatja.

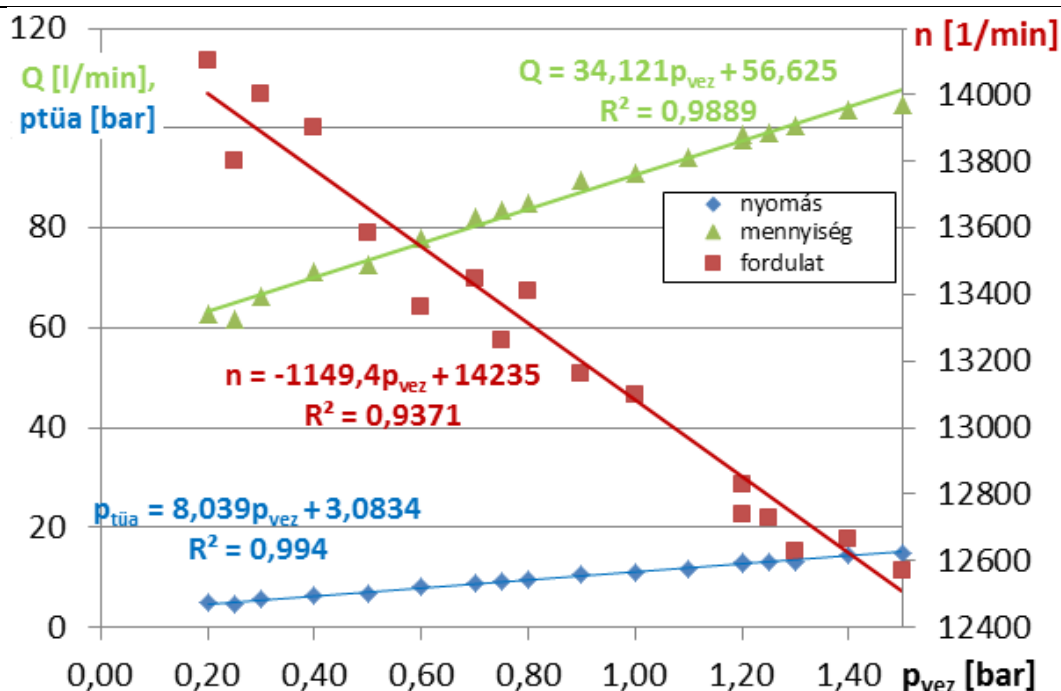


14. ábra A 924-es próbapad fordulatszám-szabályozó áramköre

A továbbiakban tüzelőanyag-szivattyú adatlapján [7] közölt vezérlőnyomás-tüzelőanyag nyomás karakterisztikát mértük ki (lásd 15. ábra), majd pedig, felkészülve az esetleges szivattyúcsere végrehajtására, a jelenleg a próbapadra épített szivattyú olyan értékekre történő beszabályozása történt meg, amelyekkel a TKT-1-en található példány rendelkezik.

¹⁶ FET: Field Effect Transistor, térvezérlésű tranzisztor

¹⁷ PID: Proporcionális (arányos) – integráló – differenciáló (szabályozó)



15. ábra A 924-es mért karakterisztikája

A 924-es próbapad egyik legnagyobb előnye, hogy a TKT-1 rendszere minimális – mintegy tízpercnnyi munkát igénylő – szerelési munkával csatlakoztatható, így az ott beépített szivattyú ellenőrzése, besabályozása is lehetővé vált a sugárhajtómű beindítása nélkül. Mivel ebben a konfigurációban a 924-es próbapad ejtő- és gyűjtőtartályai vesznek részt a működésben, a felhasznált tüzelőanyag megfelelő szűrés után a továbbiakban felhasználható marad.

ELÉRT EREDMÉNYEK, TOVÁBBFEJLESZTÉSI LEHETŐSÉGEK

Az elmúlt év során nagy horderejű előrelépések történtek a TKT-1 fejlesztése területén. Beszerzésre kerültek olyan eszközök a tüzelőanyag-, illetve mérő-adatgyűjtő rendszer részére, melyek nemcsak az oktatási jelleget erősítik, hanem nagyban elősegítik a fékpád tudományos kutatásokra történő alkalmazhatóságát. Emellett pedig jelentősen egyszerűsíthetők az üzemeltetés során előforduló kisebb-nagyobb hibák, rendellenességek felderítését, mert sokkal szerteágazóbb és részletgazdagabb információt bocsátanak rendelkezésre.

Számottevő haladást sikerült felmutatni az elektronikus szabályozó rendszerek fejlesztése terén is. Az egyszerűbb, részleges hatáskörű szabályozó egység, a PELE új verziója került kivitelezésre, mely fokozatos átmenetet biztosít egyre bővülő eszköztárával a teljes hatáskörű, duplikált rendszer irányába. Míg a PELE alapvetően egy kártyás kialakítású, addig a számos funkciót magába integráló, a közforgalmi repülésben széleskörűen elterjedt rendszerek sajátosságait alapul vevő TEDDI már moduláris felépítésű, és az egyes áramkörüi kártyák megtervezése, kivitelezése és élesztése terén döntő előrelépés történt az elmúlt időszakban.

Jelentős siker, hogy a 924-es próbapadot üzembe helyezve részletes méréseket, illetve a szivattyúk besabályozását végre tudtuk hajtani. Kiemelt fontosságú a rendszer rugalmassága is,



mellyel rövid szereléssel nemcsak a próbapadra éppen felépített, hanem a TKT-1 saját szivattyújának az ellenőrzése is megvalósítható. Jelenleg még hátrány azonban, hogy a szivattyú villanymotorjához eredetileg tervezett elektromos tápellátás, mely triakos fázisszög-vezérlésen és kézi beavatkozáson alapul, körülményesen volna elektronikus úton szabályozható, ami viszont a fordulatszám állandó értéken tartása miatt alapvető követelmény lesz a közeljövőben, hogy a kihajtással adódó körülmények előzetes szimulációja érdekében.

Összegezve az elért eredményeket, kijelenthető, hogy a TKT-1 fennállásának 5. évében minden addigit meghaladó fejlesztéseken esett át, melyek természetesen még nem fejeződtek be, így a közeljövőben ezen rendszerek befejezése, majd pedig tökéletesítése, további finomítása természetesen adódik.

KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

A szerzők ezúton szeretnék kifejezni köszönetüket a Budapest Aircraft Service (BAsE) Kft.-nek nagylelkű hozzájárulásukért, amellyel a sugárhajtómű fejlesztésének eddigi legnagyobb horderejű előrelépését valósíthattuk meg.

Ezen kívül köszönet illeti GÖZSE ISTVÁNT, aki a BME Közlekedés- és Járműirányítási Tanszék PhD hallgatója, és az áramkörök tervezésében, kivitelezésében nyújtott segítséget, valamint NAGY ANDRÁS tanársegédet (BME Vasúti Járművek, Repülőgépek és Hajók Tanszék), aki a megvalósításhoz járult hozzá nagymértékben.

FELHASZNÁLT IRODALOM

- [1] Airbus A320 Aircraft Maintenance Manual.
- [2] FÖZŐ, Ladislav, ANDOGA, Rudolf, és MADARÁSZ, Ladislav: Digital Control System for MPM 20 Engine. 5th IEEE International Conference on Computational Cybernetics, ICC3 2007, pp. 281-284.
- [3] HORVÁTH Ádám – TÓTH Vilmos – BENEDA Károly Tamás: A TKT-1 gázturbinás sugárhajtómű tüzelőanyag- és szabályozó rendszerének fejlesztése. Repüléstudományi Konferencia, Szolnok, 2012. HU ISSN 1789-770X, pp. 854-879.
- [4] MADARÁSZ, L.; KAROL', T.; GASPAR, V.; ANDOGA, R.; FÖZŐ, L.; and JUDICAK, J.: Digital start-up control of the small turbojet engine MPM-20. IEEE 10th International Symposium on Applied Machine Intelligence and Informatics (SAMI), 2012, pp. 277-281, doi: 10.1109/SAMI.2012.6208973.
- [5] National Instruments USB-6218 Data Sheet. <http://sine.ni.com/ds/app/doc/p/id/ds-9/lang/hu> (letöltés ideje: 2013. február 1.)
- [6] Re/872. Az 55 típusú hajtómű műszaki üzemeltetési szakutasítás 2. könyv. Honvédelmi Minisztérium, 1980.
- [7] A 924-es tüzelőanyag-olaj szivattyúegység formulárja: Насос Маслотопливный 924 – Паспорт 924ПС r1987.