

Horváth Ádám¹ – Tóth Vilmos² – Beneda Károly Tamás³

A TKT-1 GÁZTURBINÁS SUGÁRHAJTÓMŰ TÜZELŐANYAG- ÉS SZABÁLYOZÓRENDSZERÉNEK FEJLESZTÉSE⁴

A BME Repülőgépek és Hajók Tanszék sugárhajtóműves próbapadja, a TKT-1 gázturbinával immár negyedik éve áll az oktatás és kutatás szolgálatában. Ez idő alatt a hagyományos képzés egyetemi, illetve az azóta útjára indított BSc/MSc képzés hallgatói közül tucatnyian ismerhették meg a gázturbinás hajtóművek üzemének részleteit ezen berendezés segítségével. Közülük többen tudományos diákköri munkájuk, vagy éppenséggel diplomatervük illetve szakdolgozatuk témájául választották a folyamatos továbbfejlesztések egy-egy kiragadott részletét. Az elmúlt időszak egyik legjelentősebb előrelépése a teljes hatáskörű, digitális szabályozórendszer (Full Authority Digital Electronic Control, FADEC) tervezésének megindítása volt. Ennek első lépcsőfokaként egy egyszerű elektronikus szabályozó egységet alkottunk meg, illetve ennek egyik kapcsolódó feladata volt a rádió távirányítású változat megvalósítása is. Az így kialakított rendszer működési tapasztalatainak nyomán kezdődhetett el a tényleges, moduláris kialakítású FADEC létrehozása. A megújuló szabályozáshoz szorosan kötődik a tüzelőanyag-rendszer is. Itt a kezdetektől fogva tapasztalható korlátok miatt volt szükséges teljesen új alapokra helyezni a segédberendezések meghajtását. Megterveztünk egy kihajtást, mely a szivattyúk eddig alkalmazott elektromos meghajtását lesz hivatott felváltani. Ez azonban a jelenleg alkalmazott tüzelőanyag-szivattyú mélyreható vizsgálatát tette szükségessé, melyet az erre a célra kifejlesztett próbapad segítségével lehetett végrehajtani. Jelen cikk célja, hogy bemutassa mindazt a tervező tevékenységet, mely a szabályozórendszer illetve a kihajtás létrehozásához szükséges volt.

DEVELOPMENT OF FUEL AND CONTROL SYSTEM OF TKT-1 TURBOJET ENGINE

The turbojet engine test bed TKT-1 has already been for four years in service at the Department of Aircraft and Ships of BUTE for research and teaching purposes. Since this time dozens of BSc and MSc students had the opportunity to familiarize oneself with the operation of gas turbine engines using this equipment. Many of them have chosen actual phases of the continuous development for scientific research or diploma thesis. The most important advance of the recent years is the design of a Full Authority Digital Electronic Control (FADEC). As the first step in constructing such a system we have created a simple electronic control unit and the subsequent development contained the realization of the radio controlled version. On the experiments of the achieved system could we start the effective work on the implementation of a modular FADEC. The renewal of the control system of the gas turbine has involved also the interconnected fuel supply system, where the originally given limitations necessitate a complete redesign. We have developed a gearbox that is responsible for providing drive for the supply pumps instead of the original electric drive. Thus the used fuel pump unit has been under deep investigation with the help of the test bench developed especially for this purpose. The goal of the present paper is to introduce the design and development activity that has been indispensable for the improvement of the control system and gearbox.

¹ repülőgépész hallgató, BME Repülőgépek és Hajók Tanszék, adam1h@t-online.hu

² repülőgépész hallgató, BME Repülőgépek és Hajók Tanszék, vilgoci@citromail.hu

³ egyetemi tanársegéd, BME Repülőgépek és Hajók Tanszék, beneda@rht.bme.hu

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

A TKT-1 gázturbinás sugárhajtómű a BME Repülőgépek és Hajók Tanszékén többéves előkészítést követően 2007. december 5-én került beindításra, s az eltelt bő négy év során 148 indítási kísérletből 94 alkalommal sikerült üzemmódra kifuttatva méréseket végrehajtani. A Gázturbinák mérés technikája c. szabadon választható tantárgy pedig már harmadik éve képezi a Tanszék bőséges választékának részét, melynek keretében is megismerkedhetnek a hallgatók a berendezés üzemével. Ezen felül sok érdeklődő hallgató tudományos diákköri munka, valamint diploma, illetve szakdolgozat témája kapcsolódott szorosan a sugárhajtóműves próbapadhoz.

Mindezek során számos tapasztalat gyűlt össze a gázturbina üzemével kapcsolatosan, és 2009 óta világos volt, hogy a továbbfejlesztéseket nem az addig megkezdett úton továbbhaladva kell végezni, hiszen ebben az esetben nagy ráfordítással is csak minimális előrelépéseket lehetett volna elérni. Így született a döntés, hogy az addigiaktól merőben eltérő, az időközben felmerült igényeket nem kompromisszumok árán, részben megvalósító munkák, hanem azok a fejlesztési irányok kapnak támogatást, melyekkel hosszú távon a próbapad korszerűsége fenntartható illetve az általa nyújtott lehetőségek bővülnek.

Ennek tükrében két fontos fejlesztési irányvonal került kijelölésre: az egyik az elektronikus szabályozás, a másik pedig a gázturbina konstrukciójának bővítése a segédberendezések meghajtásával. Jelen cikk célja, hogy az elmúlt időszak fent említett területeken elért eredményeit bemutassa.

AZ ELEKTRONIKUS SZABÁLYOZÓRENDSZER FEJLESZTÉSE

A szabályozás szükségessége és megvalósítási lehetőségei

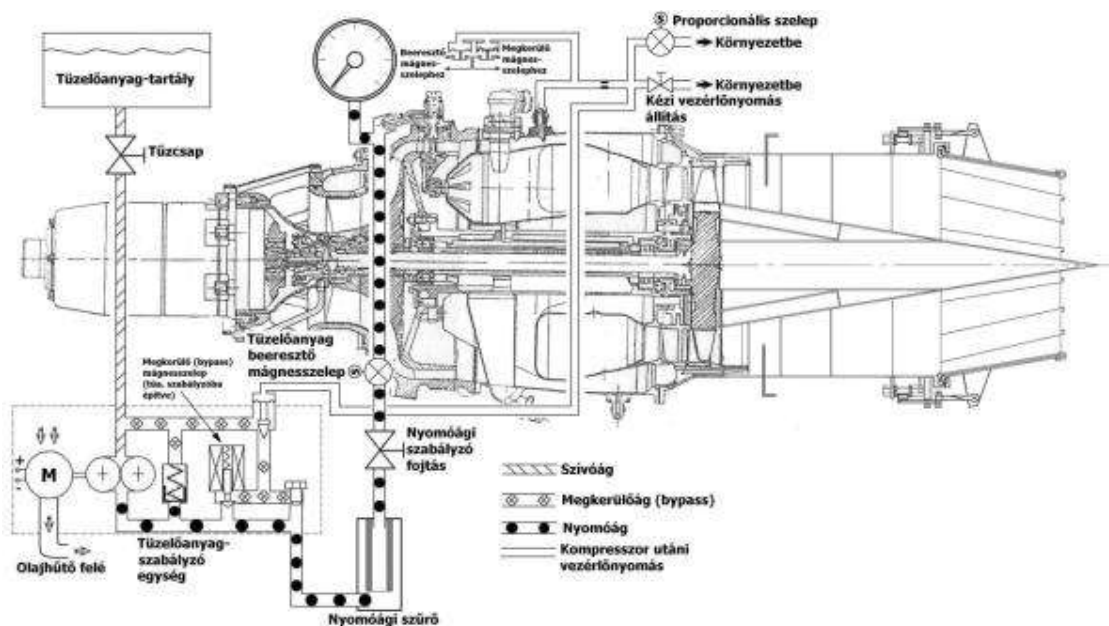
A gázturbinás sugárhajtóművek szabályozása már a legkorábbi konstrukciók tekintetében is döntő kérdés volt. Az anyag- és mechanikai energia megmaradási törvények felírásával és átrendezésével belátható, hogy bármely gázturbinás sugárhajtómű részegységeinek együttműködését eggyel több független változó írja le, mint amennyi megmaradási összefüggés rájuk alkalmazható. Ebből következik, hogy a gázturbina üzemeltetése feltétlenül igényli egy további egyenlet alkalmazását, mely a szabályozási törvényszerűség, mely leggyakrabban a hajtómű valamely forgórészének állandó fordulatszámának, vagy pedig a hajtómű nyomásviszony (EPR⁵) adott értéken tartását jelenti.

A szabályozás tekintetében – kísérleti jellegéből adódóan – a TKT-1 sugárhajtómű eltér a széles körben elterjedt megoldásoktól. Bár a gázturbina rendelkezik egy csak szűkülő (konfúzoros) változtatható gázkiáramlás-sebességfokozó (GSF) redőnyzettel, azaz a fűvócső kilépő keresztmetszete módosítható, ez a körülmény egy repülőgépen alkalmazott gázturbinánál kétparaméteres szabályozást tenne szükségessé, ahol az egyik beavatkozási lehetőség az égéstérbe betáplált tüzelőanyag-mennyiség, míg a másik a GSF keresztmetszet. Azonban a kísérletek során a gázturbina széles üzemmód-tartományának megismerése a cél, így a GSF kézi vezérlés alatt áll, így a szabályozó rendszer egyparaméteresként lett kialakítva.

⁵ EPR: Engine Pressure Ratio, a fűvócső előtti és a kompresszor előtti torlóponyi nyomások aránya, közelítőleg a fűvócső nyomásviszonyával arányos, így a tolóerővel is

Az első kísérletek

A 2010/2011. tanév tavaszi félévében kezdődött el a TKT-1 gázturbinás sugárhajtómű elektronikus szabályozórendszerének fejlesztése, egy diplomaterv keretében. Ennek keretében adott volt a régi kézi vezérlésben alkalmazott, kezelőpulton elhelyezett, lineáris potenciométeres gázkar. Az eredeti konfigurációval való kompatibilitás megőrzése különösen nagy gondot jelentett, tekintettel a szabályozás bonyolultságára, mely a közeljövő egyik sarkalatos továbbfejlesztési lépése lesz. A TKT-1 ugyanis a tüzelőanyag-mennyiséget jelen kiépítésben az át-eresztett (égéstérbe be nem jutó) tüzelőanyag mennyiségével (bypass) szabályozza, mégpedig egy pneumatikusan működtetett tűszeleppel, melynek vezérlőnyomását egy elektromos arányos szeleppel lehet állítani (lásd 1. ábra). E funkció tehát ezidáig kézzel került megvalósításra, s ez jelentősen beszűkítette a hallgatói mérések lehetőségét, tekintettel arra, hogy csak kel-
lő tapasztalattal rendelkező személy végezhetette a hajtóművezést.

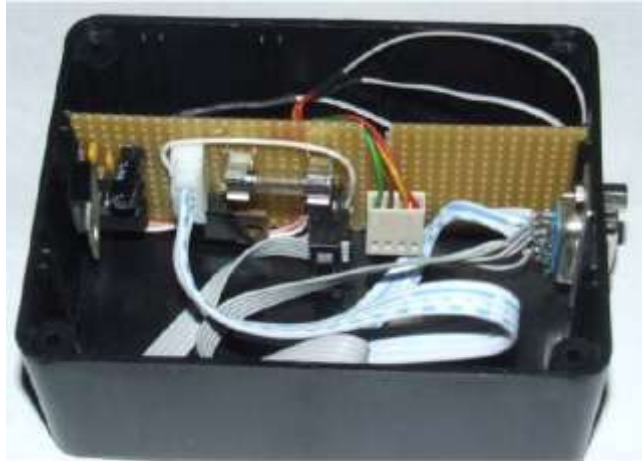


1. ábra A TKT-1 tüzelőanyag-rendszere

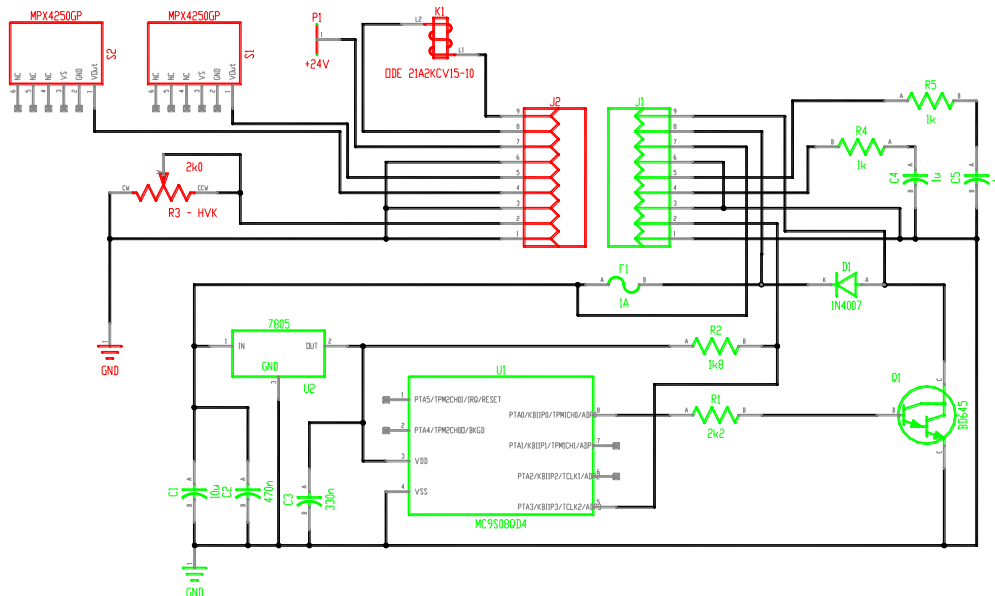
A mérések pontosítása, az üzemmódok stabilabbá tétele, és a hallgatók által is üzemeltethető berendezés igénye vezetett el odáig, hogy a 2008-ban elektronikus indító automatika után a szabályozó rendszer is újjászülessék.

Ezen törekvések eredményeképpen jött létre 2011 tavaszán az a verzió, mely a TKT-1-re optimalizált, egyszerű elektronikus szabályozást képviselte, mely egy diplomamunka keretében született [1]. Ehhez – tekintettel arra, hogy a berendezés, mint földi telepítésű gázturбина, nem üzemel tág környezeti nyomás- és hőmérséklettartományban –, a berendezésen sajnálatosan problémákkal küszködő fordulatszám helyett ideiglenesen a kompresszor utáni túlnyomást választottuk a szabályozott paraméternek. Mivel a gázturбина centrifugális kompresszora a jelenlegi kialakítású fúvócsővel csak szűk tömegáram-változást tud létrehozni adott fordulatszám mellett, ezért jó közelítéssel mondható, hogy egy adott nyomásviszony egy adott fordulatszámmal lesz arányos, ebből fakadóan pedig – feltételezve a környezeti nyomás csekély változásait – a kompresszor utáni nyomás is jó közelítéssel arányos a fordulatszámmal. Így tehát egy olcsó és

jelillesztés tekintetében egyszerű, belső jelerősítéssel rendelkező piezorezisztív nyomásérzékelővel meg lehetett valósítani a szabályozó elektronikát (2. ábra és 3. ábra).



2. ábra A TKT-1 első elektronikus szabályozó rendszere, a „PELE”



3. ábra A „PELE” elvi kapcsolási vázlata

A rádió távirányítású változat

2011 nyarán merült fel az igény modell repülőgépekben alkalmazott mikro gázturbinákhoz illeszthető szabályozórendszer fejlesztésére. Modellező boltokban ugyan kaphatóak ilyen rendeltetésű eszközök, azonban ezek ára igen magas. A TKT-1 PELE tapasztalatai alapján megállapítható volt, hogy egy egyszerű digitális szabályozó megalkotása még olyan többletfunkciókkal is kedvezőbb anyagi vonzattal rendelkezik, mint egy készen kapható példány megvásárolása, miközben olyan adatokat is képes szolgáltatni a gázturbina működéséről, amelyek tudományos vizsgálatok alapjait is jelenthetik. Ezen kívül az egység, lévén saját fejlesztés, szükség esetén nem csak a gázturbina, hanem a repülőeszköz üzemével kapcsolatos érzékelőket is magába foglalhat, vagyis egy kiterjedt és szerteágazó fedélzeti elektronikus egység létrehozása is elképzelhető a közeljövőben.

A modell repülőgépben történő alkalmazhatósága miatt szabványos RC modell vevővel való kommunikációra, soros vonalon számítógépes adatletöltésre, valamint belső memóriájában a

legfontosabb adatok eltárolására is képes eszközt szeretnénk megvalósítani. Az elsőként létrehozott áramkörben az utóbbi két funkció nem került még kivitelezésre, ezek a elkövetkező félévek továbbfejlesztései között szerepelnek.



4. ábra A rádió távirányítású változat és képernyőjén megjelenő információk

A követelményeket teljesítő eszközök közül a legfontosabb a mikrokontroller, mely egy Freescale (régebben Motorola) MC9S08QG8 típus, PDIP16⁶ tokozásban, 8 kB FLASH programmemóriával, 512 B RAM-mal, 8 csatornás 10 bites SAR⁷ analóg-digitális átalakítóval, 2 csatornás 16 bites PWM⁸ modullal, SCI⁹ (RS232 szabványú) és I²C¹⁰ kommunikációs interfészekkel.

Kifejezetten a fejlesztést és a tesztek megkönnyítendő a mikrokontroller alapkiépítésben kapcsolatban áll egy 2x16 karakteres LCD¹¹ kijelzőt, melyen megjelennek az aktuális üzemmód információi, illetve négy nyomógomb segítségével beállítások végezhetőek el. Ezek funkcionalitása hasonlóan elven került megvalósításra a repülőgép-fedélzeti beviteli lehetőségeihez, vagyis a gomb lenyomásával a mellette megjelenő szöveg választható ki menüként, vagy mint jelzés, nyilak mutatják a gördítési lehetőségeket (lásd 4. ábra).

A fejlesztés során fontos volt, hogy konkrét gázturbina és távirányítós rendszer nélkül is lehessen a szabályozón munkálatokat végezni, illetve annak eredményét azonnal leellenőrizni, ehhez készült egy szintén saját fejlesztésű RC vevő szimulátor áramkör.

A FADEC FEJLESZTÉSE

A teljes hatáskörű, digitális elektronikus szabályozórendszer gondolata szintén egyidős a TKT-1 sugárhajtóművel. A gázturbina üzembe állítása azonban még hosszú időn keresztül nehézségek elé állította a fejlesztőgárdát, ezért csak később indulhatott meg ennek a tervezése. Az is magától értetődő, hogy egy ilyen volumenű munka igen alapos felkészülést igényel, így tehát az [2]-ben leírtak még csupán az előtervezési fázis kezdeti lépéseit mutatták be, és természetesen kisebb részegységek fejlesztésével kezdődött az érdemi munka (lásd [3]). A fejlesztés jelenlegi állapotát a következőkben mutatjuk be.

⁶ PDIP16: 16 lábú műanyag (Plastic) kétsoros (Dual In-line) IC tokozás (Package)

⁷ SAR: Successive Approximation Register – Szukcesszív approximációs (analóg-digitális átalakító)

⁸ PWM: Pulse Width Modulation – impulzusszélesség moduláció

⁹ SCI: Serial Communication Interface – Soros kommunikációs interfész

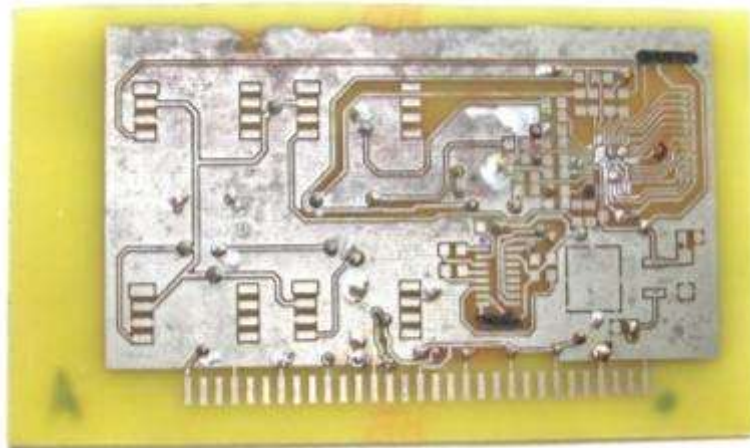
¹⁰ I2C: Inter-Integrated Circuit – integrált áramkörök közötti (soros kommunikációs busz)

¹¹ LCD: Liquid Crystal Display – folyadékkristályos kijelző

Teljes hatáskörű duplikált digitális szabályozórendszer felépítése

A szabályozórendszer moduláris felépítésű, egy alaplap megfelelő foglalataiban a következő modulok foglalnak helyet, melyek egymással a járműiparban széles körben elterjedt (így a repülésben is használt) CAN¹² buszon keresztül kommunikálnak:

- M250B nyomásérzékelő modul (a várható maximális kompresszor utáni torlóponti túlnyomás $p_2^* = 250\text{kPa}$ alapján)
 - A modul feladata a gázturbina körfolyamattal kapcsolatos nyomások villamos jellé, feszültséggé konvertálása, majd a BITE-M¹³ modul jelére CAN buszon a többi controller részére való továbbítása
 - Bemenetei a hajlékony csöveken érkező levegőnyomások, kimeneteit az élcsatlakozókon keresztül adja tovább a CAN buszra
 - A modul tartalmazza a saját tápellátását szolgáló integrált áramköröket is, az alaplapról érkező 24V egyenfeszültségből állítja elő a működéshez szükséges 5V és 3V egyenfeszültségeket
 - A modul diszkrét pillanatokban végez adatküldést illetve mintavétel, ennek ütemezését normál esetben a BITE-M modul végzi, melynek szerepét szükség esetén az AUTO modulok is át tudják venni
 - Az 5. ábrán a nyomásérzékelő modul B oldala látható, melyen néhány nyomásérzékelő, valamint a mikrokontroller és az RS232 IC számára kialakított helyek figyelhetők meg.



5. ábra A nyomásérzékelő modul

- M850B hőmérsékletérzékelő modul (a maximális számított turbina előtti torlóponti hőmérséklet $T_3^* = 850^\circ\text{C}$ alapján)
 - Feladata a hőelemektől érkező jelek erősítése, digitalizálása, és a nyomásadatokkal együtt a CAN buszon történő továbbítása
 - Bemenetei a kártyán kialakított csatlakozókon keresztül a hőelemektől érkező mV nagyságrendű feszültségjelek, kimeneteit az élcsatlakozókon keresztül adja tovább a CAN buszra

¹² CAN: Controller Area Network – Mikrokontrollerek helyi hálózati protokollja (Bosch szabvány)

¹³ BITE-M: Built-In Test Equipment – Manual, a szabályozórendszer önellenőrző és kézi vezérlést lehetővé tevő elektronikus egysége

- Szintén tartalmazza a saját tápellátását szolgáló integrált áramköröket, az alaplapról érkező 24V egyenfeszültségből állítja elő a működéséhez szükséges 5V egyenfeszültséget
- Diszkrét pillanatokban végez adatküldést illetve mintavételt, ennek ütemezését normál esetben a BITE-M modul végzi, melynek szerepét az M250B nyomásérzékelő modulhoz hasonlóan az AUTO modulok is át tudják venni
- BITE-M modul: A szabályozórendszer központi egysége, jelentős ütemező és önellenőrző funkciókat tölt be, ezen kívül kézi vezérlésre is lehetőséget ad szükség esetén. Pontosan ezen sokoldalúsága miatt a cikk egy későbbi részében részletesen foglalkozunk vele.
- AUTO modulok: Ezek végzik a tényleges szabályozási feladatot, fogadják, feldolgozzák és a BITE-M modul részére továbbítják a beérkező digitális adatokat (kapcsolóállások, stb.). Rendkívül fontos részét képezik a rendszernek ezért szerkezetileg teljesen azonos két modult használunk, arra az esetre, ha az egyik meghibásodna. Itt kell megemlíteni, hogy a jelenlegi Hasonlatosan a BITE-M modulhoz összetettségük miatt külön részben foglalkozunk velük.

A működés sorrendje, amint az a felsorolásból is kitűnik, szigorú szabályok szerint jön létre, melynek üzemelője a BITE-M modul. Ennek értelmében először a hőmérsékletjelek, majd ezután a nyomásjelek mintavételezésére és továbbítására kerül sor. Így tehát például az M250B modulnak meg kell várnia az M850B által küldött adatokat. Éppen ezért kialakításra kell kerüljön egy olyan szoftveres védelmi rendszer, amely biztosítani tudja, hogy az egyik modul hibája esetén a működés zavartalanul folytatódhasson tovább.

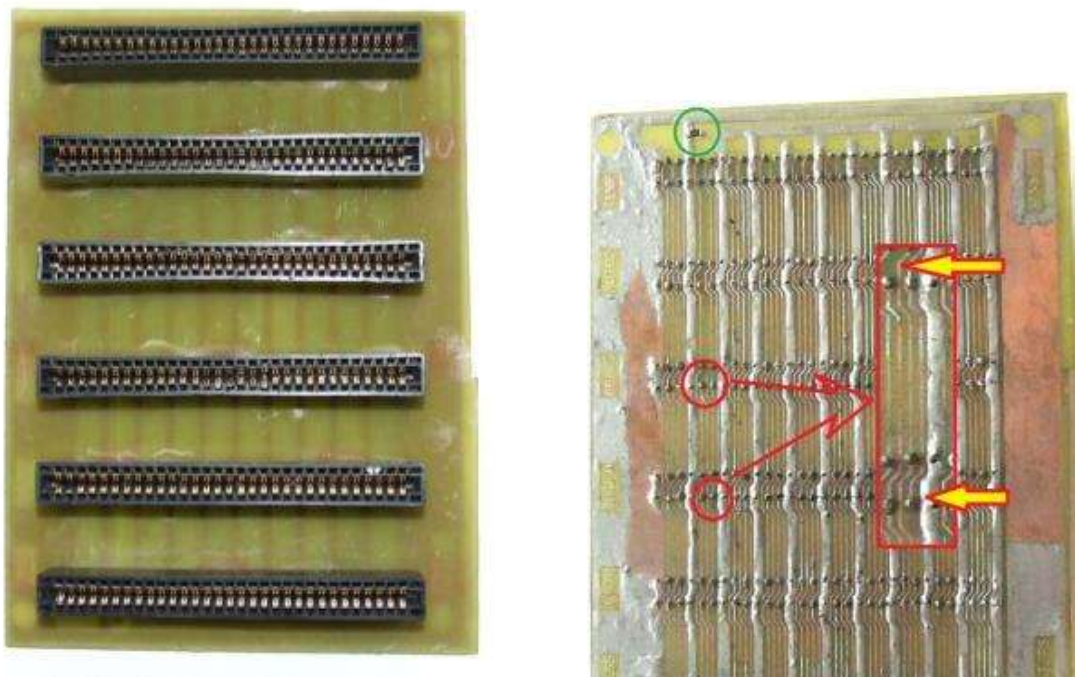
Ez úgy valósítható meg, hogy amennyiben például az M850B üzenete az előzőhöz képest 40ms időn belül nem érkezik meg, akkor ideiglenesen az őt követő M250B a késleltetés lejárta után továbbítja saját üzenetét. Normál működés esetén az M250B az M850B felől két beérkezett üzenet után küldené a sajátját, ennek alapján mikrokontrollerének vezérlőprogramja el tudja tárolni az aktuális állapotot, mely szerint kimaradt az adatküldés az őt megelőző egységtől. Elkülöníthetőnek kell tehát lennie a kétféle szituációnak, mely szerint az adatküldés azért történt, mert az előírt üzenet megérkezett, vagy pedig azért, mert nem. Az utóbbi nyilván valamiféle meghibásodásra utal, ekkor azonban az M250B modul az időkorlát leteltével folytatja a munkát, mintha minden rendben lenne.

A probléma lehet egy végleges meghibásodás is, de akár csak egy pillanatnyi probléma, amikor a modult vezérlő mikrokontroller valami rendellenesség okán alapállapotba hozza magát, de utána tudja folytatni a munkát. Ennek köszönhetően a rendszer nem fogja az első alkalommal hibásként megjelölni és a szabályzásból kizárni az üzenetküldést elmulasztó modult. Azonban ha ez a körülmény 25 cikluson keresztül – rendes működés és más hiba nélkül ez 1 másodpercet jelent – fennmarad, akkor a BITE-M modul kizárja a további működésből. Ez úgy történhet, hogy a hibás egység részére nem küld üzenetet, a többi számára pedig a küldött üzenetben kódolva továbbítja a hibára utaló információt. Ez később kerül bemutatásra az AUTO modulok leírásánál (3. táblázat).

Az alaplap felépítése és működése

Az alaplap feladata az előbb említett modulok befogadása, és a köztük fennálló adatforgalom lebonyolítása. A felső oldalon kerültek elhelyezésre a 2x31 lábú foglalatok, ezekbe kerülnek behelyezésre a modulok illesztőkártya formájában, hogy az élcsatlakozóikon és az alaplap hátoldalán található vezetékezésen keresztül kapcsolatba léphessenek egymással (6. ábra bal oldala). Látható, hogy összesen hat darab foglalat helyezkedik el az alaplapon, az előzőek alapján viszont csak öt darab illesztőkártya kerül majd behelyezésre, ahogy ez az alaplap tú-loldalán egyértelműen feliratozva is van. A hatodik foglalat a SPARE jelzést kapta, jelenlétét biztonsági megfontolás indokolja: továbbfejlesztés esetén olyan többletfunkciókat ellátó kár-tya is integrálható legyen a rendszerbe, amely alkatrészei már nem lennének a meglévő egy-ségekre sűrítethetők, vagyis új modult igényel.

A hátoldalon található vezetékekezést megvizsgálva (6. ábra jobb oldala) észrevehető a külső szegélyen körbefutó földszáv, illetve a tápfeszültséget a modulokhoz eljuttató csatorna a bal oldalon. Ezen kívül látható, hogy a bonyolult vezetékezés kapcsolatot biztosít az összes mo-dul megfelelő lábai között. Emiatt elméletileg a modulok bárhol elhelyezhetőek lettek volna. Van azonban egy kivétel, fent egy-egy vezetősáv a BITE-M modul környékén megszakad (pirossal kiemelve), illetve az alaplap két szélén látható egy-egy ellenállás (zölddel jelölve). Ez a felépítés biztosítja azt, hogy a rendszer feszültség alá helyezésekor és működés közben a BITE-M folyamatosan ellenőrizni tudja a szabályozó modulok üzemképes állapotát. Ha a rendszert bekapcsoljuk, és a szabályozó egységek jól működnek, az előbb említett két ellenál-láson (100 k Ω) keresztül minimális áram indul meg a BITE-M modul felé, amely ezt érzékel-ve tudja, hogy a szabályzó modulok jól működnek. Amennyiben nem érzékel áramot valame-lyik modul felől, azt kiiktatja, és a szabályzási feladatot a jól működő modulnak adja át.



6. ábra Az alaplap elülső oldala a foglalatokkal és hátoldala a vezetékekezéssel

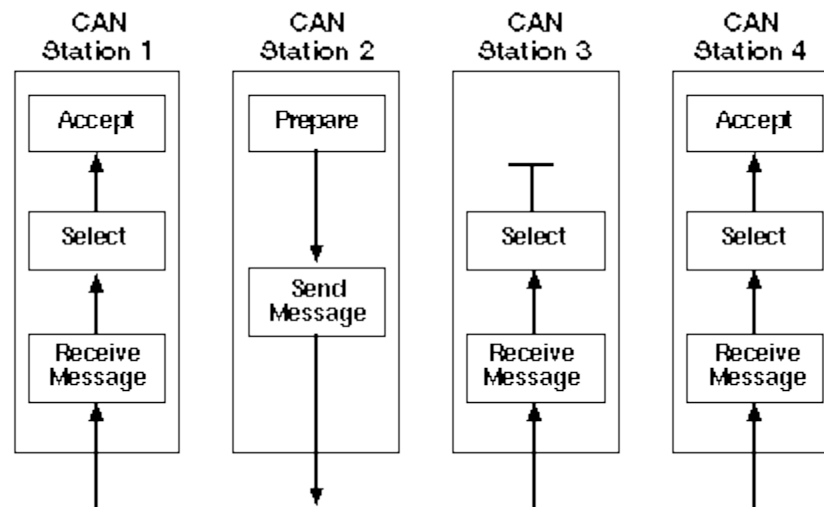
Az alaplap összeépítése során érdekes jelenséggel találtuk szemben magunkat. Látható, hogy a foglalatok lábai forrasztással kapcsolódnak az alaplaphoz, ezzel biztosítva egyben a rögzí-

tést és az elektromos jelek átvitelét. Továbbá megfigyelhető, hogy a vezetékek között a távolság rendkívül kicsi. Emiatt a 372 db forrasztás elkészülte után a szemmel is látható rövidzárat eltüntetve, még mindig több mA nagyságú áram folyt a vezetékek között, amelyek helyes működés esetén teljesen el vannak szigetelve egymástól. Alaposabb vizsgálat után kiderült, hogy a forrasztóanyag részét képező folyasztószer teremt kapcsolatot a vezetékek között, ennek elhelyezkedése azonban nem látható. A probléma megoldását az egész hátfelület aromás hígítóval való áttisztítása jelentette.

A CAN-busz

Az előző részekben többször említésre került, hogy a modulok egymás közötti kommunikációjának alapját a CAN-protokoll képezi. A következőkben ennek rövid fejlődéstörténetét és működésének legfontosabb elemeit tárgyaljuk, felhasználva a [4]-ben és [5]-ben található, ide vonatkozó információkat.

Az autóiparban már a múlt század 90-es éveiben megjelent az igény bonyolult funkciókat ellátó rendszerek közötti adatcsere megvalósítására, elég, ha például a karburátor fojtószelepe és a gyorsítási csúszáságtló vezérlőeszközére gondolunk, illetve az ezek közötti szükségszerű kapcsolatra. Hagyományos rendszerekben az adatcsere dedikált vonalakon keresztül történt, de egyrészt, a vezérlési funkciók bonyolultabbá válásával ezt egyre nehezebb és drágább volt megvalósítani, másrészt az összeköttetések száma egy adott határon túl már nem volt növelhető. Ezen megoldás cseréje csak a rendszer elemeinek egy soros buszrendszert használó hálózatával lehetséges. Ezért fejlesztette ki a Bosch a CAN-t.



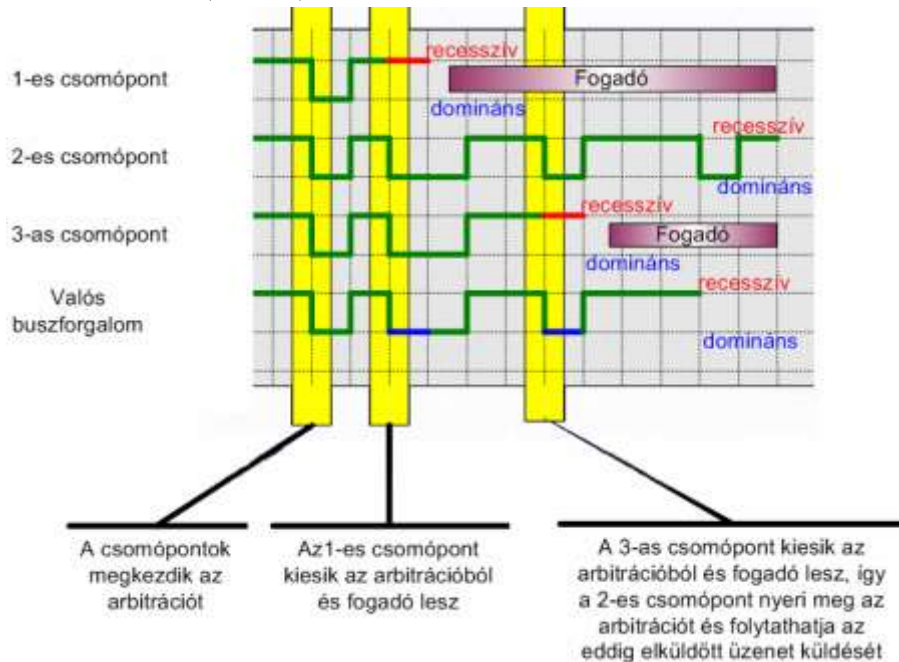
7. ábra A vett adatot vizsgáló rutin működése [4]

Mivel a rendszer elemei soros buszra csatlakoznak, és az adatátvitelkor nincs megcímzett állomás, ezért értesülnek minden kommunikációról, ami a buszon keresztül történik, még akkor is ha az adott elemet ez nem érinti. Az adatcsere a következőképpen történik: Ha egy adott állomás CPU¹⁴-ja egy vagy több állomásnak üzenetet akar küldeni, az átviendő adatokat és azonosítókat a hozzárendelt CAN chipnek továbbítja ("Make ready"). Ennyi a CPU összes feladata. Az üzenet összeállítása és elküldése a CAN chip feladata. Amint a CAN chip megszerzi a buszhozzáférés jogát ("Send Message"), az összes többi állomás veszi az üzenetét

¹⁴ CPU: Central Processing Unit – számítógép központi feldolgozó egysége

("Receive Message"). A CAN hálózat minden állomása, mely helyesen vette az üzenetet, végrehajt egy elfogadási tesztet, hogy eldöntse, a vett adat neki szól-e ("Select"). Ha igen, feldolgozza ("Accept"), különben eldobja. A folyamat az alábbi ábrán látható.

Más a helyzet akkor, amikor az egyes elemek üzenetet próbálnak küldeni a buszon keresztül. Mivel ezen szándékukkal nincsenek egyedül, az ebből adódó ütközésekre megoldást kell találni. Az üzenet tartalmát a hálózaton belül egyedi azonosító jellemzi, amely ezen kívül az üzenet prioritását is meghatározza. Erre akkor van szükség, amikor több állomás verseng a buszhoz való hozzáférés jogáért. A CAN busz ezt bitenkénti versengéssel, idegen szóval arbitrációval küszöböli ki (8. ábra).



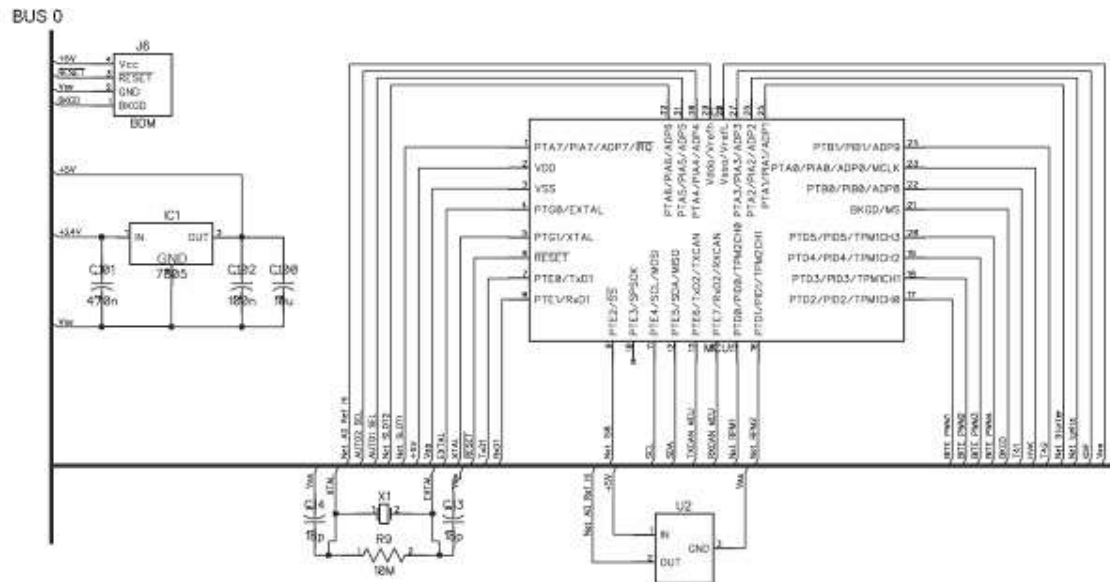
8. ábra: A bitenkénti arbitráció folyamata [5]

Ez azt jelenti, hogy minden csomópont bitről bitre figyeli a buszt. Az arbitráció szabályai a következők: A domináns szint a logikai 0, a recesszív szint a logikai 1, a domináns szint értelemszerűen felülírja a recesszív szintet. Ennek megfelelően az folyamat során minden olyan csomópont, amely recesszív bitet küld, de domináns bitet vesz a buszról, elveszti az versengést. Ennek következménye, hogy ezen csomópontok megszakítják saját üzenetük küldését, és fogadóivá válnak annak az üzenetnek, amelynek a legnagyobb volt a prioritása, és megnyerte az arbitrációt. A folyamat csak akkor indulhat el, ha a busz teljesen szabad, így a vesztes csomópontok megszakított üzeneteik újraküldését is csak ebben az esetben kezdenek meg. Ezen szabályok miatt a prioritásokat már jó előre, a rendszer tervezésekor meg kell határozni, mert ezután már nem lehet őket dinamikusan változtatni.

Röviden összefoglalva a CAN protokoll előnyeit a hagyományos rendszerhez képest, megállapíthatjuk, hogy elsősorban az állomásokra eső alacsony kapcsolati költség jelentős érv a használata mellett. Ezen kívül az adatátvitel megbízhatósága is többszöröse a régebbi megoldásénak, ez költségszinttől függetlenül mindenhol rendkívül fontos. Ahol tehát a költség kritikus tényező, ott kizárólagos létjogosultsága van a CAN protokollnak.

A BITE-M modul

A fentebb említetteknek megfelelően külön alfejezetben foglalkozunk a BITE-M modullal. A rendszer működésének alapját képezi ez a modul, feladata a működés összefogása és ütemezése, az egyes komponensek megfelelő működésének ellenőrzése, valamint lehetőséget biztosít a kézi vezérlésre való áttérésre is.



9. ábra A fő mikrokontroller és tápellátó áramköreinek csatlakozásai

A BITE-M modul a következő egységekből épül fel:

- Alaplapi élcsatlakozó
 - Feladata, hogy az alaplap megfelelő foglatába behelyezve az alaplap hátoldalán található vezetékvezetés segítségével kapcsolatba lépjen a többi modullal, így képes legyen fogadni az általuk vett jeleket, illetve parancsjeleket továbbítani részükre.
- Az elsődleges mikrokontroller (9. ábra)
 - Ez az eszköz a BITE-M modul alapja, egy MC9S08DZ60 mikrokontroller, 8 bites architektúrájú 60kB Flash alapú programmemóriával és 2kB EEPROM¹⁵-mal rendelkező IC. Ezen kívül fel van szerelve integrált 12 bites SAR A/D átalakítóval, CAN kontrollerral és összesen 6 darab 16 bites időzítő csatornával, mindez 32 lábú LQFP¹⁶ tokozásban
- A manuális kimeneteket engedélyező MC9S08QD4 típusú mikrokontroller (11. ábra)
 - Ez az eszköz valósítja meg a manuális üzemmódban aktív digitális és PWM kimenetek szükség szerinti leválasztását, a kapcsolási rajzokon U301 MAN OUTPUT CTL IC¹⁷ néven szerepel
 - Három bemenetet felügyel, a két AUTO SEL¹⁸ vonalat, illetve a BITE FAIL¹⁹ vonal állapotát. Ezek alapján hozza létre egyetlen kimenete értékét, amely két

¹⁵ EEPROM: Electrically Erasable Programmable Read-Only Memory, elektromosan törölhető programozható csak olvasható memória

¹⁶ LQFP: Low profile Quad Flat Package, alacsony négyszögletű integrált áramkör tokozás

¹⁷ MAN OUTPUT CTL IC: manual output control IC, kézi vezérlés kapcsoló áramköre

¹⁸ AUTO SEL: Automatic Controller Select, az automatikus szabályozóegységet kiválasztó integrált áramkör

további IC-t vezérel. (10. és 11. ábra) Egyik az U302 AUTO/MAN PWM SELECT²⁰, ehhez kapcsolódik egy tranzisztoros erősítő fokozat, a PWM OUT blokk, amely azért felel, hogy a bemenetére kapcsolt 5V-os PWM vezérlőjelet 24V-os jellé alakítsa. Az IC alapállapotban automatikus vezérlést valósít meg, azaz valamelyik AUTO modultól érkező PWM jelet továbbítja a tranzisztoros kimenő fokozatra. Kézi vezérlés esetén ugyanezt teszi, csak a BITE-M modultól érkező PWM jeleket használja fel.

- A mikrokontroller kimenete által vezérelt másik IC az U303 MAN DIG OUTPUT SEL²¹ nevű elektronikus kapcsoló. Ennek feladata kézi vezérlés esetén bekapcsolni az U101 MAN DIG OUTPUT²² nevű, I2C buszra illeszkedő port bővítő áramkört. Automatikus üzemmódban ugyanezen áramkör lekapcsolásával pedig garantálja, hogy az esetlegesen hibásan működő manuális üzemmód még véletlenül sem hagy a kimenetein téves és rossz működéshez vezető jel-szintet. Ezen biztonsági szempontból fontos működés megértéséhez vizsgáljuk meg a két IC felépítését.
- Az U302 AUTO/MAN PWM SELECT IC egy Texas Instruments TS5A5018 jelzésű, négy darab elektronikus SPDT²³ kapcsolót tartalmazó áramkör. Egy bemenetével egyszerre lehet mind a négy kapcsolót vezérelni. Magas jelszintet adva a bemenetre a COM²⁴ és a NO²⁵ érintkezőket lehet összekötni, alacsony jelszint esetén pedig a COM és a NC²⁶ érintkezők között van kapcsolat. Az áramkör rendelkezik engedélyező bemenettel, viszont ha valamilyen okból nincs engedélyező jel, akkor semelyik eszköz nem fogja tudni vezérelni a PWM kimeneteket. Mivel ez egy újabb hibalehetőség, ezt kiküszöbölendő, stabilan földre van húzva, így az áramkör minden körülmények között engedélyezésre kerül.
- Az U303 MAN DIG OUTPUT SEL nevű IC Texas Instruments TS5A3160 típusú, és egy darab SPDT kapcsolót tartalmaz. A vezérlő bemenetet magas jelszinttel megtáplálva a COM és NO érintkezők között van kapcsolat, alacsony jelszint esetén a COM és az NC lábak kerülnek összekötésre. Ellentétben az előző esettel itt nincs engedélyező bemenet, így az áramkör valamelyik irányban mindig vezet. Ezért valósítható meg viszonylag egyszerűen az U101 MAN DIG OUTPUT IC feszültség alá helyezése, illetve feszültségmentesítése.
- Az U303 MAN DIG OUTPUT SEL IC csak akkor kerül bekapcsolásra, ha a BITE-M modul kézi vezérlésű üzemmódra tér át, emiatt a fő mikrokontrollernek az IC vezérlő regisztereinek inicializálásáról gondoskodnia kell.

¹⁹ BITE FAIL: Built-In Test Equipment Failed, a beépített önellenőrző egység meghibásodása

²⁰ AUTO/MAN PWM SELECT: Automatic/Manual Control PWM Output Selection IC, az automatikus szabályozók és kézi vezérlés PWM kimeneteit kiválasztó integrált áramkör

²¹ MAN DIG OUTPUT SEL: Manual Digital Output Selection IC, a kézi vezérlés digitális kimeneteit engedélyező integrált áramkör

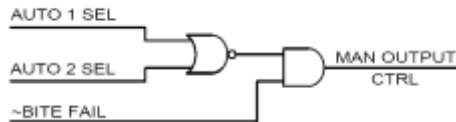
²² MAN DIG OUTPUT: Manual Digital Output IC, a kézi vezérlés digitális kimeneteit vezérlő integrált áramkör

²³ SPDT: Single Pole Double Throw, egy pólusú, két érintkezős (kapcsoló, relé)

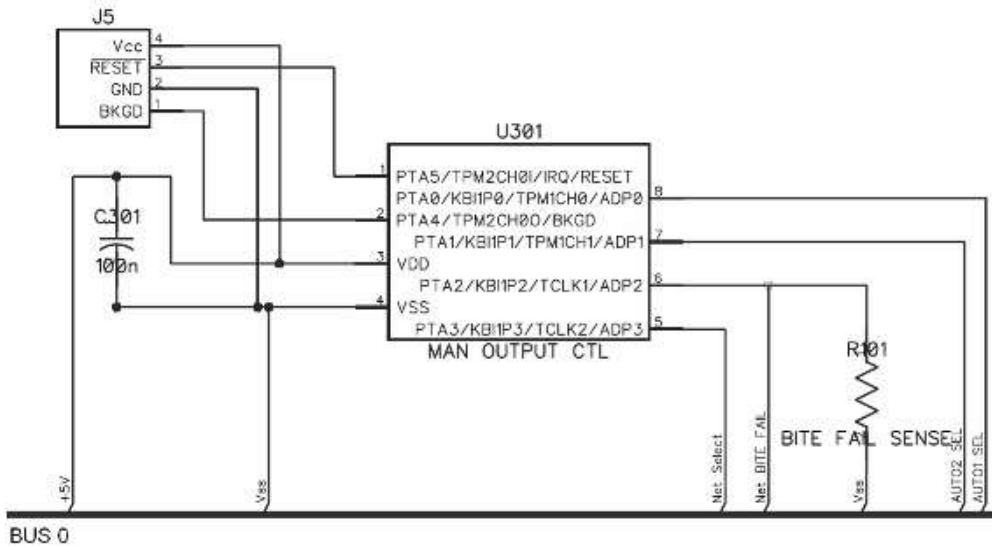
²⁴ COM: common, közös érintkező

²⁵ NO: normally open, alapállapotban nyitott érintkező

²⁶ NC: normally closed, alapállapotban zárt érintkező



10. ábra Az U301 jelű IC működésének elvi vázlatja

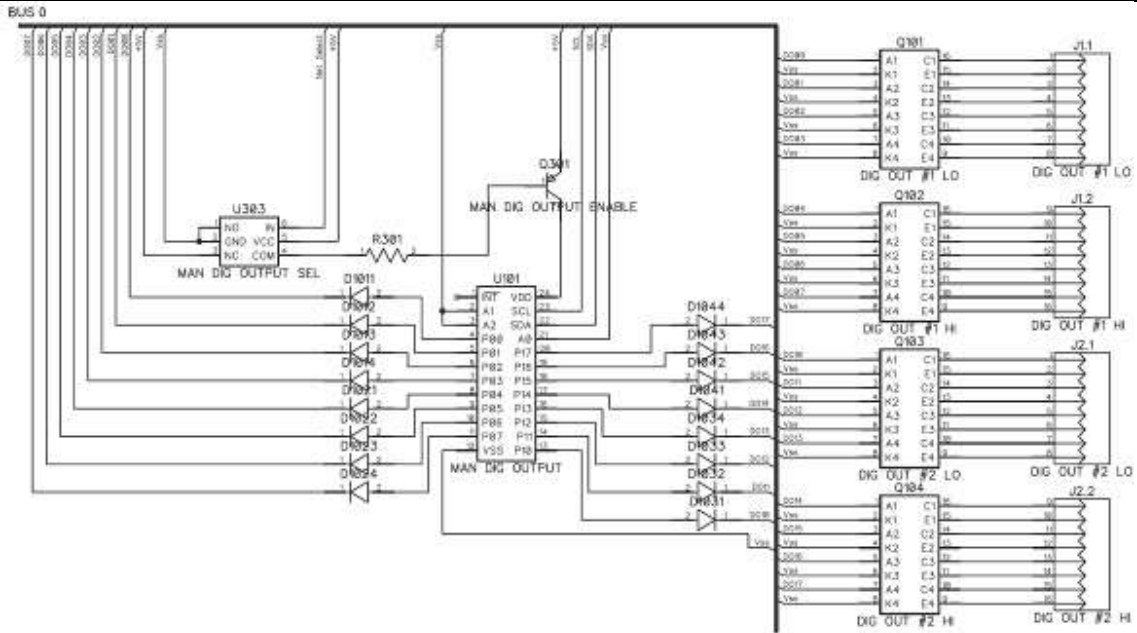


11. ábra A manuális kimeneteket engedélyező mikrokontroller kapcsolási rajza

Eset	~BITE FAIL	AUTO 1 SEL	AUTO 2 SEL	Kimenet	Megjegyzés
1	0	x	x	0	BITE hiba
2	1	0	0	1	Manuális mód
3	1	0	1	0	AUTO 2
4	1	1	0	0	AUTO 1
5	1	1	1	0	Illegális kombináció BITE hiba

1. táblázat Az U301 IC igazságtáblája

- Digitális kimenetek (12. ábra)
 - Feladatuk a külvilággal való digitális kapcsolat létrehozása. A digitális kimeneteket bármelyik modul vezérelheti, vészhelyzet esetén még a nyomásérzékelő illetve a hőmérsékletérzékelő modul is. Emiatt szükség van az egyes helyekről érkező jelek összeütkezésének elkerülésére, ez diódás védelemmel került megoldásra



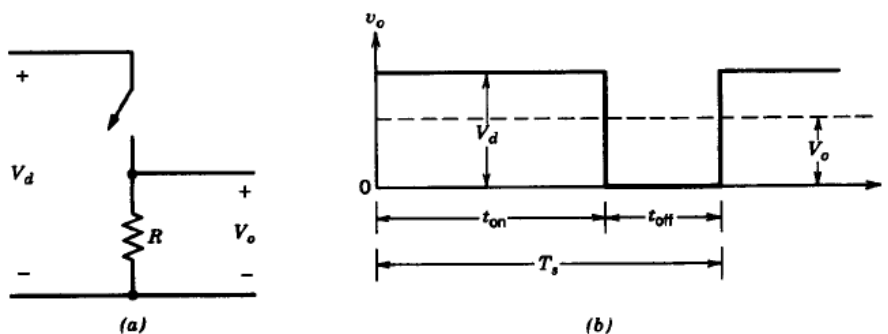
12. ábra A digitális kimenetek csatlakozásai

- PWM kimenetek (14. ábra)
 - Működési elv ([8] nyomán): A szabályozási feladatok kapcsán számos arányos funkció merül fel, melyek során egyenfeszültséget kell folyamatosan vagy fokozatosan kell szabályozni. Ezen analóg feszültségjelek helyettesíthetők digitális impulzussorozat jelekkel, amelyek hosszabb időtartamra vonatkoztatott átlagfeszültsége egyenértékű az analóg feszültségjellel. A digitális impulzussorozat egyébként állandó frekvenciáját úgy kell elegendően nagyra választani, hogy az a megfelelő működést biztosítsa, például egy motor fordulatszám ne ingadozzék. Ennek az egyik lehetséges megvalósítása a PWM, amelynél a szabályozás a jel kitöltési tényezőjének változtatásával történik, melyet az angol „duty factor” alapján d betűvel jelölhetünk, és a 13. ábra jelöléseinek megfelelően a t_{on} időtartam és a T_s periódusidőnek a hányadosa:

$$d = \frac{t_{on}}{T_s} \quad (1)$$

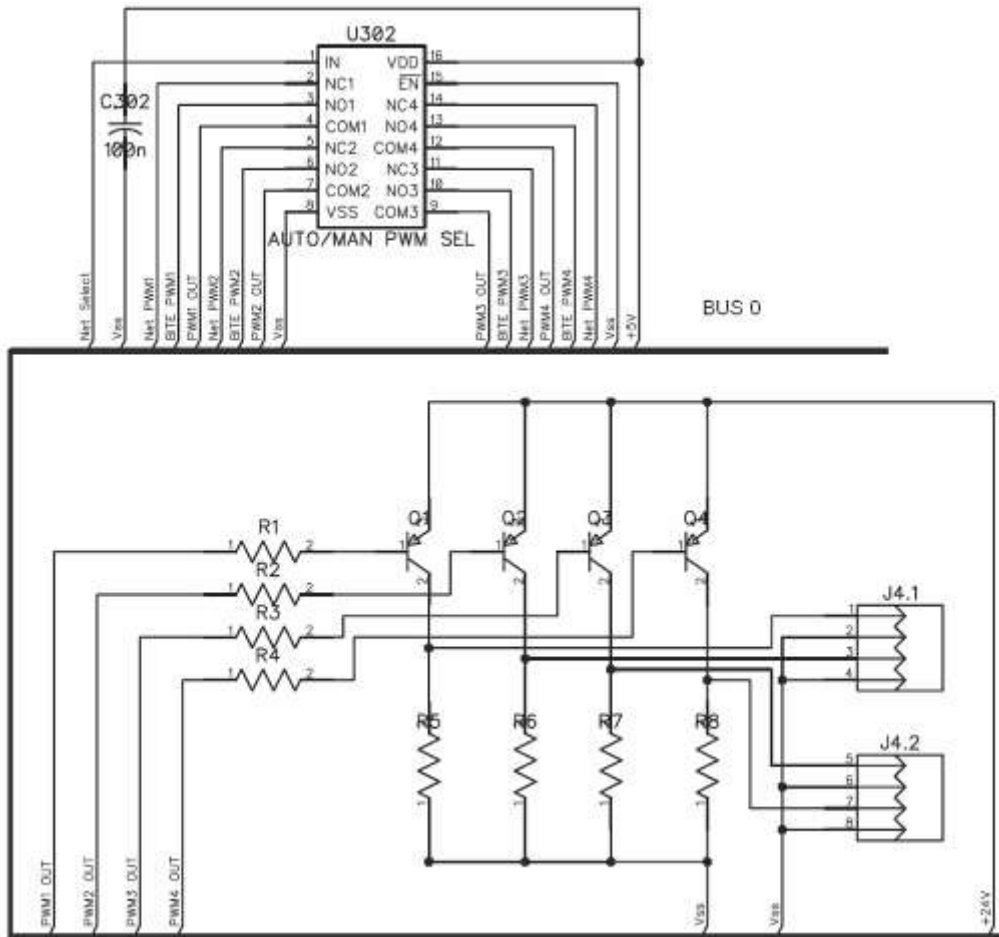
Így a kimenő feszültség (V_o) a V_d tápfeszültség és a kitöltési tényező szorzata:

$$V_o = d \cdot V_d \quad (2)$$



13. ábra A PWM vezérlés működése ([8])

- A PWM kimeneteket a BITE-M modul tartalmazza fizikailag, de ugyanúgy, mint a digitális kimeneteket, a PWM kimeneteket is elérheti több modul, természetesen időben nem egyszerre. Azt, hogy épp melyik modul férjen hozzá a PWM kimenetekhez, az AUTO/MAN PWM SELECT IC dönti el



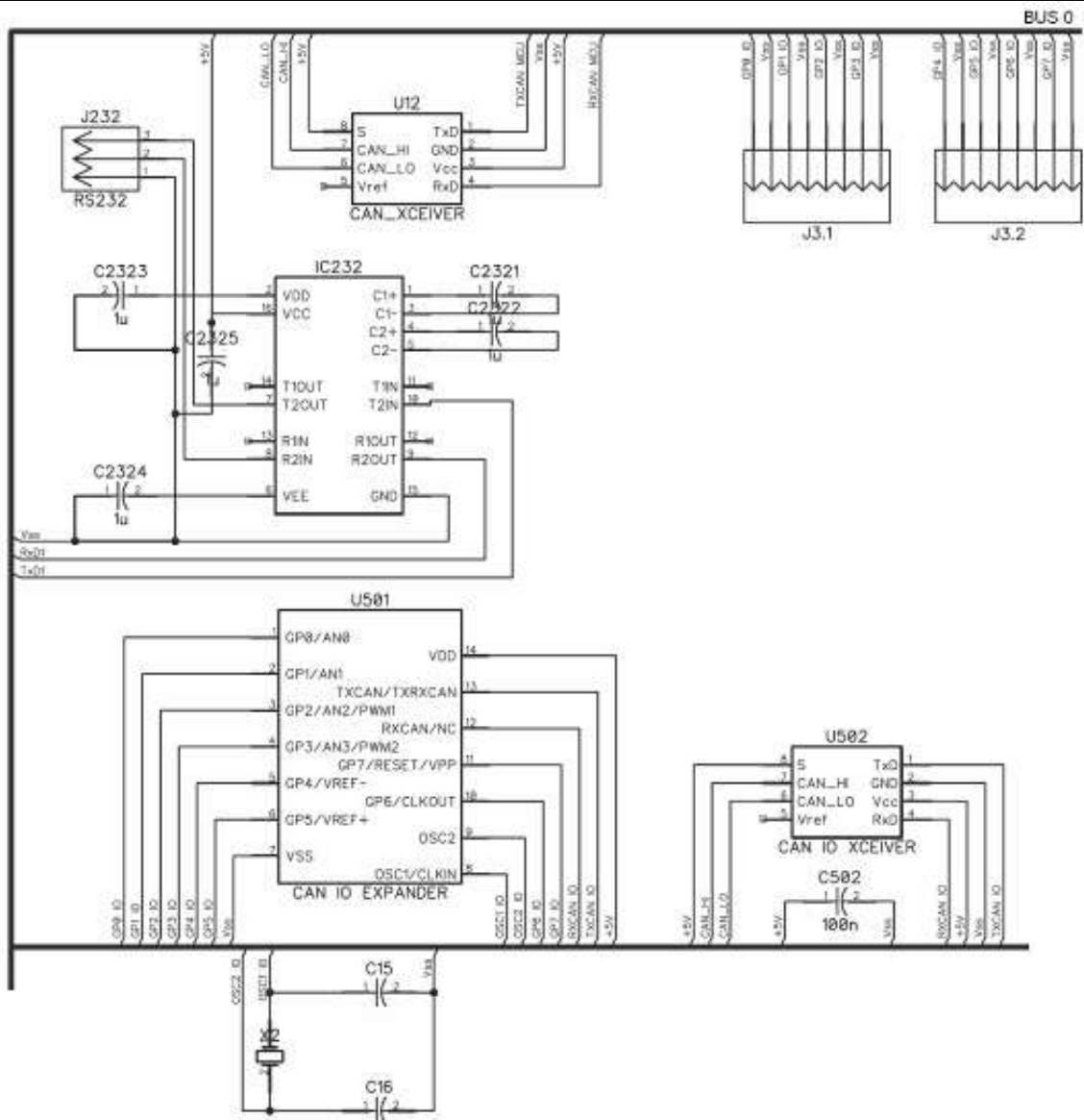
14. ábra A PWM blokk vázlata

- Kommunikációs feladatok (15. ábra)
 - Külső számítógéppel való kommunikáció illetve adatcsere megvalósítására szolgál egy RS232²⁷-TTL²⁸ szabványú soros vonal. Ugyan normál működés esetén az AUTO modul feladata a soros vonali kommunikáció, annak meghibásodása esetén ezt a feladatot a BITE-M modul veszi át
 - A CAN buszon található még egy univerzális I/O²⁹ bővítő egység, amin keresztül bármelyik, a buszon jelen lévő IC képes vészhelyzet esetén a legfontosabb kimenetek vezérlésére
- Ezen kívül a CAN buszon keresztül vezérelt I/O vonalak továbbfejlesztése céljából elhelyezésre került egy CAN I/O EXPANDER³⁰ nevű IC, amely 8 digitális és 4 analóg I/O valamint 2 PWM outputot tartalmaz

²⁷ RS232: Recommended Standard 232, a soros kommunikáció egyik számítástechnikában széleskörűen elterjedt szabványa

²⁸ TTL: Tranzisztor-tranzisztor logika, a digitális integrált áramkörök elterjedt felépítése

²⁹ I/O: Input/Output, bemenet-kimenet



15. ábra A kommunikációs blokk vázlata

Az AUTO modulok

Mint ahogyan korábban említésre került, az AUTO modulok hajtják végre magát a szabályozást, a BITE-M modul által kiadott és ütemezett parancsjelek alapján. A biztonság érdekében két, felépítésében teljesen azonos modult használ a rendszer, így a meghibásodás nem jár a teljes szabályzás azonnali elvesztésével. A két modul közül azonban egyszerre csak egy dolgozik, így szükségessé vált eldönteni, hogy a kettő közül melyik került az 1-es illetve 2-es foglalatba, hogy melyik működőképes, és egy adott alkalommal melyiket alkalmazzuk. Ezekre a kérdésekre az AUTO és a BITE-M modulok közösen adnak választ. A két AUTO controller az alaplappal két meghatározott foglalatába kerülhet. Az alaplappal foglalkozó fejezetben megemlítésre került a hátoldalon két vezetékszakas, amely ellentétben a többivel nem fut végig. Az egyik a SLOT1³¹, másik a SLOT2 jelet továbbítja az alaplap buszhoz. Az alaplap ellenállások segítségével az egyes foglalatban a SLOT1, a kettes foglalatban a SLOT2 vonal

³⁰ CAN I/O EXPANDER: CAN buszra illeszthető bemenet-kimenet bővítő integrált áramkör

³¹ SLOTx: a két automatikus szabályozó áramkör részére fenntartott foglalatok elnevezése

van alacsony jelszintre lehúzva, míg az egyes foglalatban a SLOT2, a kettes foglalatban a SLOT1 vonal a kontroller áramkörön elhelyezett külső ellenállással kerül magas szintre. Ez a két kiválasztó vonal szolgál az AUTO modulok elhelyezésének megállapítására, mivel ezen jelszintek alapján egy egyszerű, külön erre a célra elhelyezett mikrokontroller az önteszt során megállapítja az egyes SLOT vonalak állapotát, és létrehoz egy kimenetet amely az egyik foglalat esetén alacsony (SLOT1) a másik foglalat esetén magas (SLOT2), így mindkét AUTO modul elhelyezése ismert. A kiválasztás igazságtábláját a 2. táblázat mutatja. Ezek után szintén a sikeres önellenőrzés befejezésekor az AUTO mikrokontrollerek magasra húzzák az eddig alacsony szinten lévő saját vonalaikat (SLOT1-nél a SLOT1 vonalat), és így már mindkét kiválasztó vonal magas, ez a BITE-M modul számára az AUTO kontroller működőképességét jelzi. A folyamatos üzemképességet és az esetleges hibák mihamarabbi felszínre jutását úgy biztosíthatjuk, hogy mindkét AUTO kontrollert a lehető legtöbbet üzemeltetjük. Ezt úgy érhetjük el, hogy alkalmanként felváltva végeztetjük el velük a szabályozási feladatot. Ehhez azonban tudni kell hogy egy adott alkalmat megelőzően éppen melyik működött. Ezt az információt mindkét AUTO kontroller saját memóriájában tárolja, és feszültség alá helyezéskor a BITE-M modul rendelkezésére bocsátja, amely így meg tudja állapítani, hogy az adott alkalommal éppen melyik modulnak kell működnie. Ha valamelyik kontroller olyan mértékben hibásodik meg, hogy az kizárja a további működtetés lehetőségét, akkor az AUTO mikrokontroller elengedi a magasra húzott kiválasztó vonalat, így jelzi a BITE-M modul részére a hibát. A folyamatot az U5051 SLOT SELECT MCU³² vezérli, amely egy Freescale MC9S08QD4 mikrokontroller, feladatai közé tartozik egyebek mellett, az AUTO kontrollerek fő IC-i kimeneteinek engedélyezése a megfelelő bemenetek alapján.

Eset	SLOT1	SLOT2	RPM IN/OUT SEL	Megjegyzés
1	0	0	0	Nem definiált
2	0	1	0	AUTO 2 foglalatban
3	1	0	1	AUTO 1 foglalatban
4	1	1	0	Nem definiált

2. táblázat A kiválasztás igazságtáblája

A szabályozás megvalósítása

Miután megismerkedtünk a rendszert felépítő modulok felépítésével, és a szabályozási feladatban betöltött szerepükkel, működésükkel, nézzük meg, mi is történik a szabályzás egy ciklusa alatt.

A BITE-M modul az automatikus illetve kézi vezérlés aktuális állapotától függetlenül másodpercenként 50-szer vezérli a rendszert az adatcserére és a szükséges szabályozások megtételére, így egy ciklus maximálisan 20 ms időtartam alatt be kell, hogy fejeződjön. A CAN busz sebessége a mikrokontrollerek 20MHz-es buszfrekvenciája következtében 950kbit/s. Egy üzenet, amely a CAN szabványban megengedett maximális 8 adatbájtot, azaz 64 adatbitet kihasználja és standard formátumú azonosítót alkalmaz, illetve tartalmazza az üzenet egyéb kötelező keretinformációit, összesen 111 bitből áll, ennyit kell a buszon továbbítani. 950kbit/s sebesség mellett 1ms alatt 950 bit továbbítódik, egy üzenet 111 bitje pedig 0,1168 ms alatt, így ennyi az egy üzenetre jutó idő. Mivel egy ciklusban összesen 9 üzenet található, így az

³² SLOT SELECT MCU: Az automatikus szabályozó áramkör mikrokontrollere, mely meghatározza, hogy melyik foglalatba helyezték az egységet.

egy ciklusban a kommunikációra fordított idő legalább 1,05ms a rendelkezésre álló 20ms-ból, az üzenetek közötti feldolgozási időt nem számolva (ez az egyes modulok szoftverének kialakításától fog függni az elvégzendő feladaton kívül). A ciklus a következőképpen épül fel:

1. A BITE-M modul beolvassa az analóg és digitális parancsjeleket (gázkar pozíció, kapcsoló állások), és a CAN buszon keresztül elküldi az információkat. Ezeket az információkat a két automatikus controller eltárolja memóriájában későbbi felhasználásra.
2. Erre az üzenetre az AUTO1, majd ennek hatására az AUTO2 controller az általa mért fordulatszámok és digitális bemenetek (AUTO1: hőbiztosítékok állapota, AUTO2: komponensek megtáplálása) CAN buszra való elküldésével válaszol.
3. Ez az üzenet az M850 hőelem modulban aktiválja azt a rutint, amely a legfontosabb hőmérséklet értékeket (T_{4^*-1} , T_{4^*-2} , T_2^* , T_{olaj}) küldi el digitalizált formában, majd ennek hatására az M250-B modul küldi el a legfontosabb nyomásértékeket (p_2^* , Δp_m , p_{vez} , p_0) a CAN buszon keresztül.
4. Válaszként az előző üzenetre, az M850 modul két újabb üzenetben küldi el a kevésbé fontos hőmérsékleteket (T_1 , T_2 , $T_{tűa924}$, $T_{olaj924}$), majd ezt észlelve az M250 modul is küld két üzenetet a kevésbé fontos nyomásokról (p_1 , p_2 , p_4 , p_4^* , Δp_4 , p_{scm}). Ezek a szabályzás szempontjából nem kritikus információk, hiányuk nem igényli a gázturbina vészleállítását, azonban a számítógépes adatgyűjtő rendszer irányába a BITE-M modul nem tud jelzést küldeni az esetleges rendellenességekről. Idáig tartott az adatcserék folyamata. Láthattuk, hogy a BITE-M modul elsőként kiküldött üzenete volt egyedül olyan ebben a fázisban, amelyiket nem előzte meg egy másik üzenet. Az összes többi üzenetet az előtte lévő váltotta ki egyfajta időzítő jelként szolgálva. Ennek oka, hogy a CAN buszon keresztül minden modul kapcsolatban van az összes többivel, így minden modul értesül a környezetében folyó üzenetváltásokról, és az, hogy ez melyik modulból mit vált ki, már a szoftver kérdése. Ez a fázis nagyjából 1...2 ms időt vesz igénybe, ezután kerülhet sor a tényleges szabályozás megvalósítására.
5. A kapcsolók állásától illetve az egyes modulok működőképességétől függően alapvetően automatikus szabályozás, illetve kézi vezérlés jöhet szóba, mint irányítási mód. Amennyiben a következő feltételek egyike teljesül, a BITE-M modul automatikus szabályozást tesz lehetővé:
 - A szabályozók közül legalább egy működőképes. Ennek feltételei:
 - A kijelölt szabályozó (AUTO1 vagy AUTO2) nem érzékelt meghibásodást
 - A kijelölt szabályozó jelezte a meghibásodást, de a másik szabályozó még működőképes
 - Az üzemmód választó kapcsoló AUTOMATIKUS állásban van.
1. Amennyiben a következő feltételek egyike teljesül, a BITE-M modul kézi vezérlésre tér át:
 2. A szabályozók közül (AUTO1 vagy AUTO2) egyik sem működőképes,
 3. Az üzemmód választó kapcsoló automatikus állásban van
 4. A táblázatban növekvő sorrendben kerültek feltüntetésre a CAN busz üzenetei (3. táblázat). Ezen sorrend oka a korábban már részletezett, CAN szabvány szerinti, controllerek közti versengésben keresendő. A versenyt a busz használatáért ugyanis az a vezérlő nyeri, amelyik előbb küld egy domináns jelszintű bitet, amely a CAN busz speci-

fikációja szerint a 0. Az egyes vezérlők egyes üzeneteihez társított CAN azonosító gondos megtervezésével biztosítható, hogy a fontosabb üzeneteknek elsőbbsége legyen a kevésbé fontos üzenetekkel szemben. Ha a táblázatot összehasonlítjuk a fejezet elején taglalt adatgyűjtés fázis lépéseivel, azt tapasztaljuk, hogy az ott a lista elején szereplő magas prioritású üzenet CAN azonosítója a táblázat elején helyezkedik el, így biztosítható az előre megtervezett sorrendiség a gyakorlatban.

CAN azonosító		Üzenet küldője	Üzenet tartalma	Üzenet vevője
Hexa	Bináris			
0x02x 0x03x	0 0 0 0 0 1 x x x x x	BITE-M	Analóg és digitális parancsjelek	Mindenki
0x04x 0x05x	0 0 0 0 1 0 x x x x x	AUTO #1	Fordulatszám 1 és hőbiztosítók állapota	AUTO #2 és BITE-M
0x06x 0x07x	0 0 0 0 1 1 x x x x x	AUTO #2	Fordulatszám 2 és komponensek tápfeszültsége	AUTO #1 és BITE-M
0x08x 0x09x	0 0 0 1 0 0 x x x x x	M850	Legfontosabb hőmérsékletek	AUTO #1 #2 és BITE-M
0x0Ax 0x0Bx	0 0 0 1 0 1 x x x x x	M250	Legfontosabb nyomások	AUTO #1 #2 és BITE-M
0x78x 0x79x	1 1 1 1 0 0 x x x x x	M850	$T_1, T_{olaj}, T_{tűa924}, T_{olaj924}$	AUTO #1 #2 és BITE-M
0x7Ax 0x7Bx	1 1 1 1 0 1 x x x x x	M850	Egyéb hőmérsékletek	AUTO #1 #2 és BITE-M
0x7Cx 0x7Dx	1 1 1 1 1 0 x x x x x	M250	P_1, P_2, P_4, P_4^*	AUTO #1 #2 és BITE-M
0x7Ex 0x7Fx	1 1 1 1 1 1 x x x x x	M250	Egyéb nyomások	AUTO #1 #2 és BITE-M

3. táblázat A CAN busz üzenetei

A táblázatban észrevehetjük, hogy a bináris CAN azonosító az utolsó 5 bitet bizonytalan állapotban mutatja. Erre egy adott egység működőképességének ellenőrzése céljából van szükség. Az utolsó 5 bit mindegyike egy modulnak felel meg: amennyiben működőképes, akkor a CAN üzenetben a megfelelő bithelyen 0, ellenkező esetben 1 szerepel, így jelzi a rendszer a többi modulnak, hogy melyik hibásodott meg (lásd 4. táblázat). Kieértékkelni és felhasználni az üzenetnek ezt a részét csak a BITE-M modul fogja, ugyanis az ő feladata eldönteni, hogy egy egység működőképes-e vagy nem. Ennek ellenére mégis eljut az összes modulhoz ez az információ. Erre azért van szükség, mert a BITE-M modulnak is adódhat olyan hibája, amely miatt nem képes az egyéb eszközök meghibásodását a külvilág felé jelezni. Erre az esetre az AUTO modulok vezérlő programja fog tartalmazni olyan részt, amely kideríti a BITE-M meghibásodását és átkonfigurálja a rendszert a BITE-M nélküli üzemre. Ilyenkor nyilvánvalóan más modultól fogja megtudni a rendszer, hogy egy controller meghibásodott, tehát az információra minden modulnak szüksége van.



Bit száma	Modul
0	BITE-M
1	AUTO #1
2	AUTO #2
3	M850
4	M250

4. táblázat A meghibásodás bitek megfeleltetése

A KIHAJTÁS TERVEZÉSE

Rendeltetés

A gázturbina körfolyamat termodinamikai szempontból vizsgálva csak az áramlási térre korlátozza a kérdéses objektumot. Ezt szokás az angol terminológia szerint ([6]) a „bare engine”, vagyis nyers hajtómű. Ahhoz, hogy ez a gépegység valóban működhessen és elláthassa feladatát, számos segédberendezésre van szükség. Szinte mindegyik gázturbinás berendezés, legyen az repülőgép hajtómű vagy földi egység, saját turbinájától származó tengelyteljesítménnyel valósítja meg ezt a feladatot. A kevés kivételek egyike a TSz-21 és a belőle kifejlesztett TKT-1, melyek elektromos meghajtással rendelkező szivattyúkat alkalmaznak. Ez már a fejlesztés kezdetén súlyos problémákat okozott, melyeket többé-kevésbé sikerült leküzdeni, bár sok olyan kérdés merült fel, melyekre csak kompromisszumos válasz született. Ezek olyan korlátokat jelentenek, melyek bár a rendeltetésszerű használatban nem akadályozzák a gázturbina működését, a további fejlesztéseknek azonban mindenképpen gátat szabnak. Így tehát előbb-utóbb mindenképpen bele kellett vágni abba a fejlesztésbe, mely már nem hordozza magán a kezdetekben kitűzött minimális konstrukciós változtatás követelményeit, és ezzel egy sokkal rugalmasabb, széleskörűen alkalmazható sugárhajtóművet fog eredményezni.

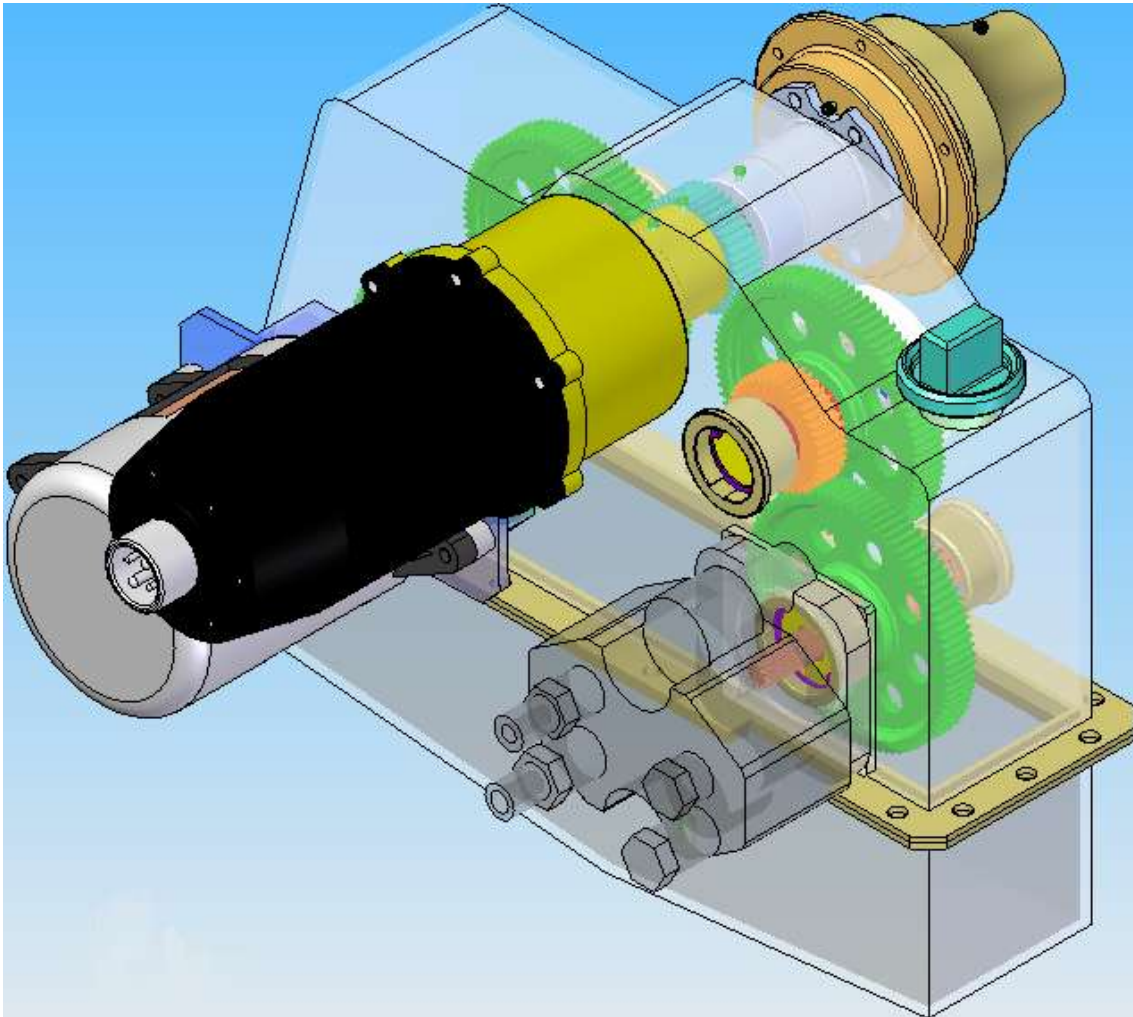
A kihajtás ismertetése

A kihajtás tervezésekor két lehetőség merült fel, mint egymástól gyökeresen eltérő konstrukciók, és így már rögtön az első lépésként választani kellett, melyik kerüljön kidolgozásra. Az egyik lehetőség egy messzebbre tekintő gondolat eredménye, mely szerint a végleges cél a TKT-1 sugárhajtómű repülő eszközön történő alkalmazása, és mint ilyen, célszerűen axiális szívócsatornával kellene rendelkezzen. Ez azonban a tervezendő kihajtás irányába mutatott olyan messzemenő követelményeket, melyek rövidtávon nem tűntek arányosnak a befektetendő munkával. Így választottuk a második lehetőséget, mely a jelenlegi szívócsatorna elé illesztett kihajtásházzal számolt.

A kihajtás maga lényegében nem más, mint egy fogaskerekes hajtómű, mely az áttételei segítségével meghajtást biztosít a gázturbina segédberendezései számára. A TKT-1 kapcsán három segédberendezés jött szóba:

- a tüzelőanyag és olaj szivattyúegység, mely a 924-es berendezés elnevezést viseli,
- a villamos indítómotor
- és az elektromos fogyasztók megtáplálását célzó generátor, mely jelenlegi kialakításban még nem része a TKT-1 próbapadnak, lévén, hogy hálózatról nyerjük a szükséges elektromos energiát.

Megvizsgálva a lehetőségeket, melyek szivattyúk és generátorok tekintetében számításba jöhettek, kiderült, hogy célszerű lenne a feladatot a gázturbina eredetileg is használt 924-es szivattyúegységével megvalósítani, emellett pedig egy gépjárműiparban használt, 24V-os generátor beépítése volna megfelelő.



16. ábra A tervezett kihajtás axonometrikus nézete a segédberendezésekkel [9]

A kiválasztást követően meg kellett határozni az áttételi viszonyokat, melyeket a 924-es szivattyúegység, valamint a kiválasztott ISKRA generátor üzemi tartományának figyelembe vételével 5,05:1 arányra választottunk. A TKT-1 maximálisan megengedett fordulatszáma ugyanis 50500 fordulat percenként, így a két állandóan működő segédberendezés ebben az esetben éppen 10000-es fordulatszámmal működne. Emellett az is fontos szempont volt, hogy lehetőség szerint a generátor és a szivattyúk áttételei azonosak legyenek, így mind a tervezés, mind pedig a gyártás során csak egyféle fogaskerék pár szükséges, ezzel a gyártási költségek mérsékelhetőek valamelyest. A kihajtás részletes számítását egy repülőgépesz hallgató végezte el szakdolgozatának keretében ([9]), mely a fogaskerekek, csapágyak és tengelyek méretezésén kívül a teljes szerkezet térbeli elrendezésének megtervezését is magába foglalta, aminek eredményét mutatja a 16. ábra.

Az így megválasztott kimenő fordulatszám azonban az indításkori viszonyok tüzetesebb megismerését, illetve a tüzelőanyag rendszer átalakítását foglalja magában. Ebből a célból kifo-

lyólag került megvalósításra a 924-es szivattyú próbapadja [3], mely már az ott ismertetett elvek alapján felépülő tüzelőanyag elosztórendszert is ötvözi.

Az áttételeken keresztül történő meghajtása a 924-es berendezésnek azt is jelenti ugyanis, hogy a gázturbina indítási folyamata során, amikor a maximális fordulatszám kb. 15%-ánál a tüzelőanyag kezdeti betáplálása megindul, az előírások szerint a felugrási nyomásnak (lásd [7]) 6 és 12 bar közé kell esnie. A gyakorlat szerint a TKT-1 esetében a 6 bar nyomás megfelelőnek mutatkozik, ezt kellene tehát a jelentősen lecsökkent fordulatszám mellett is létrehoznia a tüzelőanyag szivattyúnak.

Ha megvizsgáljuk a fogaskerekes szivattyú működését, tapasztalhatjuk, hogy a létrehozott nyomás a szivattyú utáni ág ellennyomásától, fojtásától függ, miközben a szállított térfogat-áram – eltekintve a nyomás hatására változó résveszteségtől és egyéb kisebb mértékben módosuló tényezőktől – számottevően nem változik, jó közelítéssel állandó. Ha pedig a tüzelőanyag fúvókákra fókuszálunk, ezek lényegében nem mások, mint párhuzamosan kapcsolt fojtások, melyekre érvényes a jól ismert képlet:

$$\dot{m} = \alpha \cdot A \cdot \sqrt{2 \cdot \rho \cdot \Delta p} \quad (3)$$

ahol

- \dot{m} a fojtásokon egységnyi idő alatt átáramló közeg mennyisége
- α a fojtórés átömlési (kontrakciós) tényezője
- A a teljes geometriai keresztmetszet
- ρ a közeg sűrűsége
- Δp a fojtás két oldala között fennálló nyomáskülönbség

Levonható tehát a következtetés, hogy amennyiben a szivattyú mögötti átáramló keresztmetszetet megfelezzük, akkor az azonos viszonyok mellett létrehozott nyomásban közelítőleg négyszeres növekményre lehet számítani. Ez indokolja végső soron azt, hogy miért szükséges indítás közben csak két fúvókát alkalmazni. Ez azonban a 924-es berendezés mélyreható vizsgálatát teszi nélkülözhetetlenné.

A tüzelőanyag-olaj szivattyúegységet érintő vizsgálatok

Ahogy a TKT-1 sugárhajtómű 2009 őszén a Tanszék oktatási munkáiba bekapcsolódott, és ennek következtében megemelkedett az üzemelések száma és hossza, érdekes anomáliákra derült fény, melyek a tüzelőanyag-ellátás rendszerét érintették. Ezek feltárása, valamint az előző pontban is részletezett fejlesztési igények miatt kezdtünk bele a 924-es tüzelőanyag-olaj szivattyúegység próbapadjának megépítésébe (lásd [3], 17. ábra). Az előzőekben említett céloknak megfelelő kialakítás hidraulikus vázlatát mutatja a 18. ábra.



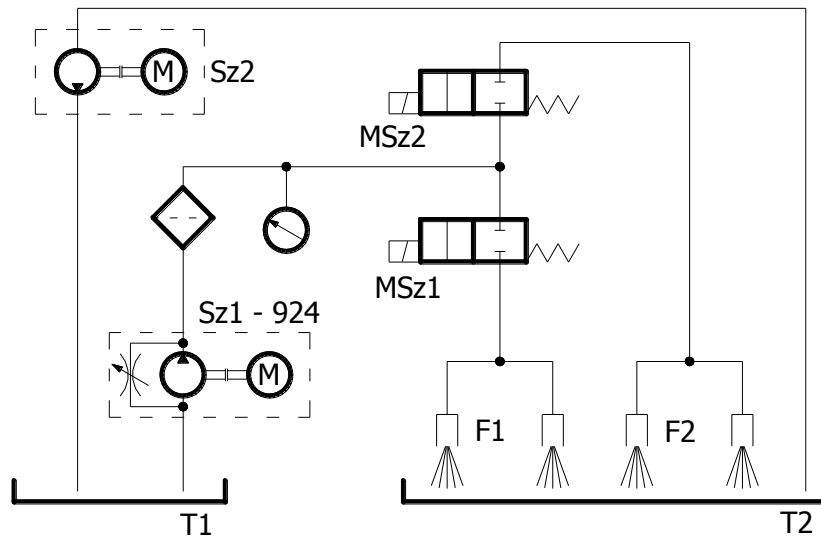
17. ábra A 924-es próbapad kezelőpultja és a vizsgált szivattyú

A próbapadnak tehát kettős célja van: egyrészt a TKT-1-en jelenleg alkalmazott konfigurációban képes kell legyen a berendezés vizsgálatára, másik oldalról viszont változtatható fordulatszámmal több fűvókacsoportot is biztosítani kell, hogy a kihajtás tervezett viszonyait is szimulálni lehessen.

A próbapad részletes leírása megtalálható a [3]-ben, melyhez képest számottevő változás az elmúlt időszakban mindössze a vezérlőnyomás ágában történt, ahol beépítésre került egy változtatható nyomásállandósító szelep, melynek segítségével a dugattyús légkompresszor kimenő nyomása korlátozható a berendezés biztonsága érdekében. A 924-es egység ugyanis, ahogyan a [7]-ben található kalibráló táblázat is tanúsítja, a maximális TSz-21 kompresszor utáni túlnyomás értékéhez (2,5bar) képest 3,0bar túlnyomásig kell tudja biztosítani a megfelelő működést, így tehát ekkora értékre korlátoztunk mi is.

Ahogy az az előző fejezetekben olvasható volt, 2011 során elkészült az első elektronikus szabályozó, a 924 működés közbeni ingadozásait ez képes kompenzálni, miközben természetesen tudatában vagyunk annak, hogy ez nem küszöböli ki a szivattyú hibáját, csupán olyan beavatkozást végez, mellyel ezen lengések csillapíthatóak. Jelenlegi vizsgálataink tehát a szivattyúegység változó fordulatszámmal történő üzemelésének részleteire fókuszálnak, ezen belül leginkább az indításkori kis fordulatszámmal történő működésre. Ahogy az az előző pontban megemlítésre került, a 924-es áttételezése a tervek szerint 5,05:1 lenne, ami a tüzelőanyag betáplálás kezdetén, a gázturbina forgórész névlegeshez képesti 15%-os fordulatszáma mellett 1500 percnkénti fordulatot jelent a 924-es behajtó tengelyén. Ezt az állapotot, mint legkisebb fordulatszámot kellett tehát ellenőriznünk, hogy a berendezés képes-e az előírt nyomásértékeket teljesíteni. Azonban ehhez szorosan hozzátartozott a fordulatszám mérése is, melyet a jelenlegi viszo-

nyok mellett egy kézi műszer alkalmazásával oldottunk meg, az EM660T villanymotor ([3], [7]) fedelének eltávolításával pedig hozzáfértünk a tengelycsonkhoz.



18. ábra A 924-es próbapad hidraulikus vázlat (3)

Ahogy az a hidraulikus vázlaton (18. ábra) látható, a várható kis fordulatszám-tartományban a megfelelő működés biztosítása érdekében ketté kellett bontani a TKT-1 eredeti elosztócsövet, és két párból álló fűvókacsoportot építettünk fel a 924-es próbapadra. Mivel jelenlegi vizsgálataink kifejezetten az indításkori üzemi viszonyok megismerését tűzte ki célul, az egyik páros le lett választva, és csak két fűvókával zajlottak a mérések.

A tényleges kísérletek előtt a teljes berendezés minden alrendszere még tüzelőanyag-feltöltés nélkül ki lett próbálva, hogy meggyőződjünk működőképességükről, és csak ezek után következhetek a tényleges feladatok.

Az első feltöltés során a berendezés rövid ideig az elvárásoknak megfelelően működött, rövid idő alatt a szivattyúhoz eljutott a folyadék, amit a körülményeknek megfelelő túlnyomással továbbított az általunk alkalmazott két fűvóka felé. Bár egy rövidzárlat miatt az elektromos tápellátásban hamar félbeszakadt a munka, annyi már bizonyosan látszott, hogy a várakozásainkkal ellentétben a szivattyú által létrehozott nyomás elmaradt a [7]-ben rögzített minimális 6 bar előírt értéktől. Az elektromos hiba miatt nem tudtuk ezt a mérést folytatni, így nem tudtunk egyúttal a 924-es állítócsavarjainak változtatásával módosítani az üzemi feltételeken.

Ezt a lehetőséget a villamos megtáplálás javítása után tudtuk csak kihasználni, amikor is több fordulatszámon próbálkoztunk, miközben az állítócsavarok minimális áteresztési keresztmetszetre történő becsavarása következett. A 924-es 1500 1/min fordulatszámon számunkra legkedvezőbb körülmények között is mindössze 3 bar nyomást képes előállítani, ami jelentősen kisebb a [7] által megadott tartomány alsó határához képest. Ennek okán még két fordulatszámot vizsgáltunk, melyekről az összesített adatokat az 5. táblázat mutatja, melyek az elért tüzelőanyag nyomások a fordulatszám függvényében a légkompresszor által biztosított vezérlőnyomás (atmoszférushoz képesti túlnyomás) mellett.



Fordulatszám [1/min]	Tüzelőanyag nyomás [bar] ($p_K = 2,5\text{bar}$)	Tüzelőanyag nyomás [bar] ($p_K = 0\text{bar}$)
1500	3	–
1800	4	–
2100	5	3

5. táblázat A mért tüzelőanyag-nyomás értékek

A 924 próbapad kísérleteinek eredményei

A mérések során egyértelműen kiderült, hogy a kihajtásban eredetileg tervezett áttételi arány mellett a 924-es szivattyúegység nagyon kis tüzelőanyag-nyomást képes csak előállítani az indítás körülményei mellett. Ez nagy valószínűséggel igényelni fogja a későbbiekben a tervek pontosítását, az áttétel módosítását.

Azt azonban nem lehet ennyi kísérlet után kijelenteni, hogy az általunk mért nyomásokkal a gázturbina (bár az előírásoknál jóval alacsonyabb értékekről van szó) ne lenne képes beindulni. Ehhez azonban összetett vizsgálatokra van szükség, amely a 924-es próbapad és a TKT-1 egymáshoz való csatlakoztatását, a gázturbinának a próbapadi szivattyúval történő megtáplálásával volna megvalósítható. A közeljövőben tehát arra kell törekednünk, hogy az összekapcsolással a későbbi kihajtás viszonyai között működő szivattyú és a sugárhajtómű indításkori együttműködését feltárhassuk.

ELÉRT EREDMÉNYEK, TOVÁBBI FEJLESZTÉSEK

Az elektronikus szabályozó rendszer folyamatos fejlesztés alatt áll. Mivel azonban a teljes hatáskörű szabályozás üzeméretté válása egy-két éven belül várható, a „PELE” rendszer további finomítása is fontos, melynek létrehozása során az első lépés a régi kézi vezérlésből örökölt toló potenciométeres gázkar kimenetének linearizálása volt. Ez a szoftverrészlet a jelenleg alkalmazott 4kB programmemória közel felét kitölti, mivel lebegőpontos számábrázolással került kivitelezésre. Megfontolandó, hogy a szabályozás rutinjaihoz hasonlóan fix-pontos műveletekkel kerüljön megvalósításra, avagy a régi kézi vezérlés lehetősége kerüljön felszámolásra, miközben kialakítunk egy olyan gázkart, mely lineáris potenciométerrel rendelkezik. Mindkettő megoldás közel azonos ráfordítást igényel, egyik szoftver, másik hardver oldalról, ezért az utóbbi létrehozása lenne célszerű, mivel a tapasztalatok alapján az eredeti kézi vezérlésre nem lesz szükség, illetve mechanikusan a jelenlegi konstrukcióban biztonsági szelepként alkalmazott eszköz mindig lehetővé teszi a kézi beavatkozást.

A távirányítóval rendelkező verzió is rendelkezik számos lehetőséggel, melyet igyekszünk kihasználni. A jelenleg beépített mikrokontroller helyett egy vele lábkiosztásban teljesen megegyező, de képességekben fejlettebb alkalmazása már a közeljövőben megvalósulhat, számottevően bővítve az eszköz által nyújtott szolgáltatásokat. Tervezés alatt áll egy olyan integrált fedélzeti számítógép, mely az aktuális gázturbina szabályozó kibővített változata volna, a repülés jellemző adatait is rögzíteni képes elektronika formájában, amivel modell repülőgépek mélyreható vizsgálata volna megvalósítható.

A 924-es próbapaddal kapcsolatban mindenképpen meg kell említeni, hogy a jelenleg alkalmazott fordulatszám állítási lehetőség (kézzel történő fázishasításos megoldás) messze nem alkalmas az állandó érték tartására. Ezért a továbbfejlesztési lehetőségek között elsőként egy olyan

elektronikus szabályozás megvalósítása volna célszerű, mely garantálni tudja a villanymotor és ezáltal a szivattyú állandó fordulatszámát olyan dinamikus változó viszonyok mellett is, mint például a beeresztő mágnesszelep nyitása, amikor a zárt szelep -mellett felépülő nyomás hirtelen lecsökken, a szivattyú fordulatszáma pedig a kisebb terhelés miatt növekszik. Ezt kézzel lehetetlen volt kompenzálni, viszont egy elektronikus egységgel, mely fordulatonként akár többször is képes az aktuális körülmények megállapítására, kellőképpen gyorsan be tud avatkozni. A beavatkozás azonban mindenképpen teljesen új elven működő nagyáramú elektronikát is igényel, vagyis a jelenleg alkalmazott rendszer (triak) cseréjére lesz szükség (PWM-re).

Ha ezt a fordulatszám szabályozót létre tudjuk hozni, akkor következhet a TKT-1 megtáplálása a próbapadi szivattyúval, és állapíthatjuk meg, hogy a gázturbina vajon tolerálja-e a jelentősen megváltozott üzemi viszonyokat indítás során. Ha nem, akkor következhet a kihajtás áttételezésének módosítása.

KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

A szerzők ezúton szeretnék kifejezni köszönetüket GÖZSE ISTVÁNNAK, aki a BME Közlekedésautomatika Tanszék PhD hallgatója, és az áramkörök tervezésében, kivitelezésében a hasznos tanácsoktól a megvalósításig felbecsülhetetlen segítséget nyújtott.

FELHASZNÁLT IRODALOM

- [1] BALÁSHÁZY János: A TKT-1 mérő, adatgyűjtő és vezérlő rendszereinek fejlesztése. Diplomaterv. Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem Repülőgépek És Hajók Tanszék, 2011.
- [2] BENEDA Károly: Teljes hatáskörű digitális gázturbina szabályzás (FADEC) fejlesztése kisméretű sugárhajtóműves berendezéshez. Repüléstudományi Konferencia Szolnok, 2009 – 50 év hangsebesség felett a magyar légtérben. HU ISSN 1789-770X
- [3] BENEDA Károly: A TKT-1 sugárhajtómű fejlesztése és alkalmazása a BME repülőgépes képzésében. Repüléstudományi Konferencia Szolnok, 2010 – 60 éves a szolnoki repülőtisztképzés., HU ISSN 1789-770X
- [4] Controller Area Network. Magyarországi Terepbusz Tudásközpont – Tudásbázis, <http://fsz.bme.hu/traficc/can/can.html>
- [5] FODOR Attila, Dr. FODOR Dénes, Dr. BÍRÓ Károly, Dr. SZABÓ Loránd: A CAN mint ipari kommunikációs protokoll. International Conference on Power Systems and Electrical Engineering ENELKO 2006, Cluj (Romania), 2006, pp. 23-28. ISSN 1842-4546.
- [6] LINKE-DIESINGER, Andreas: Systems of Commercial Turbofan Engines. Springer, Berlin, 2008. ISBN 978-3-540-73618-9
- [7] A 924-es tüzelőanyag-olaj szivattyúegység formulárja: Насос Маслотопливный 924 – Паспорт 924ПГ r1987.
- [8] MOHAN, Ned, UNDELAND, Tore M., ROBBINS, William P.: Power Electronics – Converters, Applications, and Design. John Wiley and Sons, Hoboken, New Jersey, 2003. ISBN 0-471-22693-9
- [9] RÁCZ Gábor: Kihajtástervezés. Szakdolgozat. Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem Repülőgépek és Hajók Tanszék, 2011.