

A TKT-1 SUGÁRHAJTÓMŰ FEJLESZTÉSE ÉS ALKALMAZÁSA A BME REPÜLŐGÉPES KÉPZÉSÉBEN

TARTALMI KIVONAT

A BME Repülőgépek és Hajók Tanszékén az elmúlt években megvalósításra került egy TSz-21 indító gázturbina gázgenerátorán alapuló sugárhajtóműves berendezés, a TKT-1. Ez a gázturbina egy próbapadon került felépítésre, mely a működéshez szükséges segédberendezéseket, valamint egy korszerű mérő- és adatgyűjtő rendszert is magába foglalja. Ennek segítségével egy igen sokoldalú, egyszerűen üzemeltethető, kísérleti és oktatási célokra egyaránt felhasználható eszközre tett szert a Tanszék.

A cikk első része a gázturbinával és segédberendezéseivel kapcsolatos eddig megvalósított, valamint a jelenleg is aktuális fejlesztésekkel foglalkozik. Ezen belül bemutatásra kerül az eredeti vezérlést elektronikus eszközökkel megvalósító rendszer, a mérő- és adatgyűjtő eszközök, valamint a vezérlő program, mely lehetővé teszi az üzemeltetésben kevésbé jártas személyek (hallgatók) részére is egyszerű működtetést. Emellett a gázturbina legfontosabb továbbfejlesztési lehetőségéről, a kihajtás létrehozásába és az ehhez kapcsolódó munkákba is betekintést nyújt a cikk. Mivel a TSz-21 speciális működési feltételei miatt annak segédberendezései független villamos meghajtással rendelkeztek.

A második rész a berendezés használatát mutatja be, mely egyrészt kutatási, másrészt pedig igen jelentős oktatási oldallal is rendelkezik. A sugárhajtómű nagy előnye, hogy alkalmazásával a Tanszék különböző repülő képzéseiben részt vevő hallgatók „testközelből” is megismerhetik a repülőgép-hajtóművek egyik legelterjedtebb változatának működését, mérés technikáját, illetve bekapcsolódva a különböző fejlesztési munkákba, igen értékes gyakorlati tapasztalataik mellett elméleti tudásukat is kamatoztathatják. Ennek bemutatására vázlatosan ismertetésre kerülnek az eddigi hallgatói munkák, melyek szemléltetik a berendezés sokrétűségét.

BEVEZETÉS

A Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem Repülőgépek és Hajók Tanszékén az elmúlt években a gázturbinák vizsgálatára alkalmas oktatási-kutatási eszköz került megvalósításra.

A sugárhajtómű alapját a Magyar Honvédségtől kapott, a Légierő MiG-23 és Szu-22 harci repülőgépein alkalmazott TSz-21 indító gázturbina alkotja, mely moduláris felépítésével kiváló lehetőséget nyújtott egy jelentős, de mégis a lehetőségekhez mérten egyszerű átalakítás kivitelezésére.

Eredeti kialakítását tekintve ugyanis a TSz-21 egy szabadturbinás konstrukció, mely tengelyteljesítményt szolgáltat. A gázturbina fő szerelési egységeinek kialakításának köszönhetően azonban, eltávolítva a munkaturbinát a hozzá tartozó áttételházzal együtt, és helyére egy propulziós fúvócsövet szerelve sugárhajtóműként üzemel jelenleg.

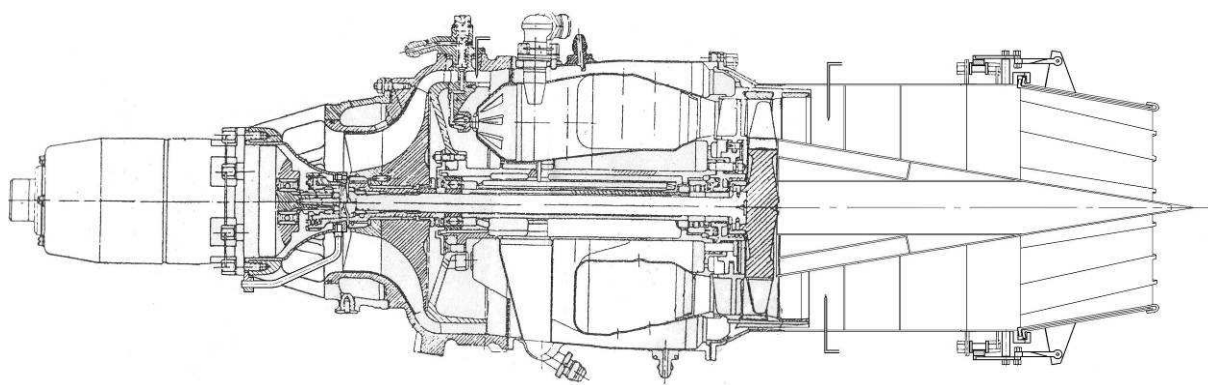
A TSz-21 átalakítása természetesen összetett mérnöki feladat volt, melynek során új komponenseket kellett megtervezni, létrehozni, amelyek közvetlenül a gázturbina működésében vesznek részt, másrészt pedig a szerkezet földi működtetéséhez elengedhetetlen próbapad is megalkotásra került. Ennek a munkának a részleteiről több helyen ([5], [6], [8]) is lehet olvasni. A fejlesztés menetének főbb állomásairól, a használat során, az üzemeltetés során megvalósított módosításokról és a további, jelenleg is folyamatban lévő munkákról a következő fejezet számol be.

A TKT-1 SUGÁRHAJTÓMŰVES BERENDEZÉS FEJLESZTÉSE

A gázturbina

A gázturbinával kapcsolatban – az előzőekben említett moduláris kialakításnak köszönhetően – nagy átalakításra nem volt szükség, a munkaturbina és a hozzá tartozó bolygóműves áttétel eltávolításával lehetőség nyílt azok helyén, a változatlan gázgenerátorhoz egy fúvócső kialakítására.

A berendezés mechanikai oldalának fejlesztése a [5]-ben közölt állapothoz képest csupán minimális mértékben történt az elmúlt időben, lévén, hogy egyrészt az elektronika és a számítógépes adatgyűjtés voltak a figyelem középpontjában, másrészt pedig a nagy előrelépést jelentő kihajtás még csak a cikk írása előtt lépett az előtervezés fázisába, más jellegű fejlesztés pedig nem volt indokolt.



1. ábra: A TKT-1 sugárhajtómű hosszmetsete



2. ábra: A TKT-1 próbapadra építve

A segédberendezések

A TKT-1 segédberendezései – amint arról a [5]–ben megtalálható részletes leírás is tanúskodik – lényegében a TSz-21-en meglévő szivattyúegység, mágnesszelepek és nyomáskapcsolók felhasználásával történt [6].

A speciális üzemelési körülmények miatt két 924-es berendezés található a próbapadon. Az egyik csak a tüzelőanyagot, a másik csak a kenőolajat szállítja eredeti kialakításával ellentétben, ahol egy egység mindkét funkciót egyszerre ellátta. Ezen kívül passzív és aktív hűtési módokról kellett gondoskodni a megnövekedett üzemeltetési időtartamok miatt [8].

Az üzemeltetési tapasztalatok között részletezett indokok miatt a segédberendezéseket két jelentős továbbfejlesztés érinti, a 924-es berendezéshez készülő próbapad, valamint az előtervezés fázisába lépett kihajtás, mely a segédberendezések rendszerének teljes áttervezését foglalja magába a fogaskerekes áttételek létrehozásán kívül.

A 924-es próbapad

Bevezető gondolatok

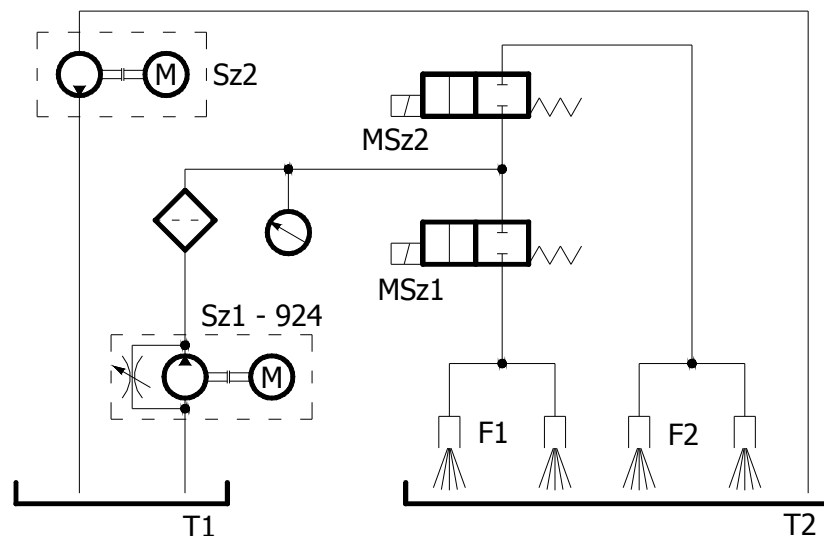
A TKT-1 kihajtással való ellátása és egyéb, üzemeltetés közben fellépett problémák kiküszöbölése érdekében a megvalósítás fázisába lépett a 924-es szivattyúegység tesztelésére szolgáló próbapad,

melyen a kihajtás követelményeinek megfelelően változtatható fordulatszámmal, külön kapcsolható tüzelőanyag-gyűjtőcsövekkel, a nyomás és a szállított mennyiség mérésének lehetőségével kell rendelkezünk.

A próbapad hidraulikus rendszere

A próbapad tehát kettős célt szolgál: egyrészt lehetőséget biztosítani az üzemeltetés során felszínre került rendellenes működéseknek a hibafeltárására, másrészt pedig a szivattyúegység változó fordulatszámmal történő működtetéséről információkat szolgáltatni.

Az első kritérium csak minimális feltételeket szab a kialakítással szemben, a második viszont annál több részletkérdést vet fel. Míg az előbbi követelmény, miszerint a működés során tapasztalt normálistól eltérő jelenségek felderítése mindössze állandó fordulatszámon történő járatást, egyetlen, négy tüzelőanyag-fűvókával ellátott gyűjtőcsövet igényel, addig a kihajtásról mechanikusan üzemeltetett szivattyú a forgórészrel együtt gyorsuló-lassuló állapotait csak egy szabályozható tápegységgel szimulálhatjuk a próbapadon. Ennek a változtatható kimeneti feszültségű tápegységnek a segítségével vizsgálhatóvá válnak az olyan üzemmódok, amikor indítás közben, a tüzelőanyag-betáplálás kezdetekor még kis fordulatszámmal jár a forgórész, és maga a szivattyú is, a tervezett állandó áttételi arány miatt.

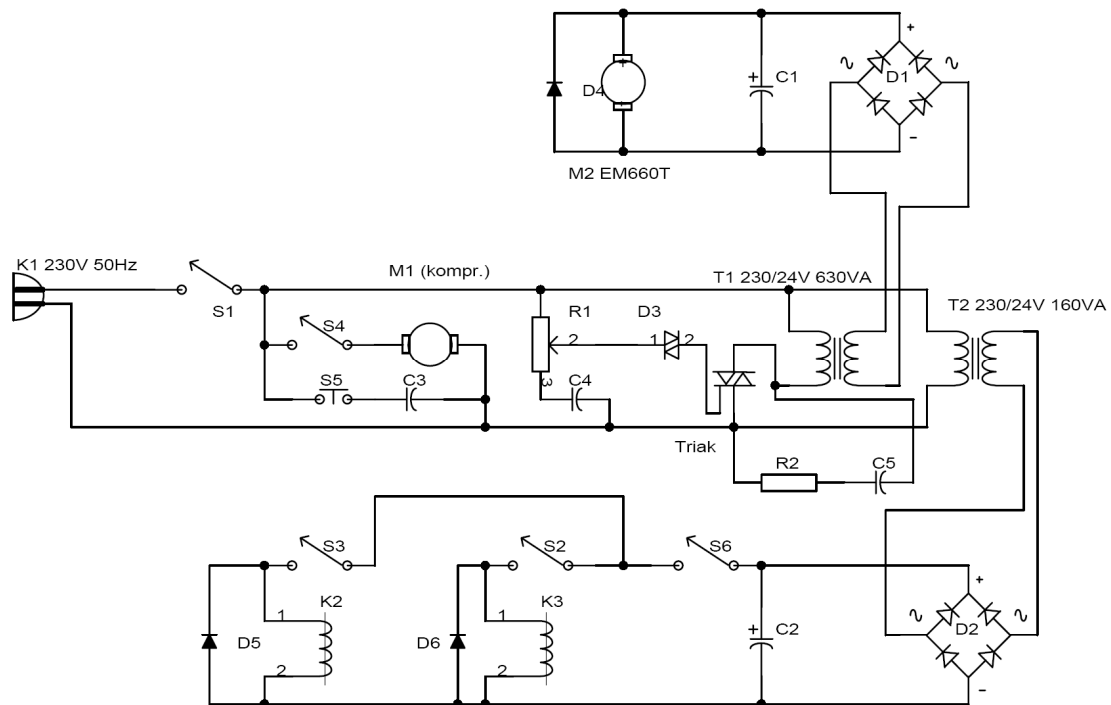


3. ábra: A 924-es próbapad hidraulikus vázlata

Amint azt a 3. ábra mutatja, a 924-es berendezés eredeti EM660T motorjával kerül meghajtásra, a motor azonban változtatható fordulatszámmal üzemel (lásd 4. ábra). A nyomóágban került elhelyezésre a szűrő, mely a fogaskerékes szivattyú kopástermékeinek és egyéb szennyeződéseknek a kiszűrését szolgálja. Ez után ágazik el kétfelé a tüzelőanyag útja, mely ágak külön vezérelhető mágnesszelepekkel rendelkeznek. Mindkét ág két-két fűvókát táplál a négyből. A T2 tartály szolgál a fűvókák által elporlasztott tüzelőanyag összegyűjtésére és ezen keresztül a mennyiség mérésére. A hidraulikus vázlaton a szűrő után található beépítve egy manométer a nyomóági nyomás kijelzésére.

A próbadad elektromos rendszere

A próbadad elektromos vázlatát a 4. ábra mutatja. A tápellátást egyfázisú hálózati váltófeszültségről látja el a rendszer. A berendezés feszültség alá helyezése az S1 főkapcsolóval történik.



4. ábra: A próbadad elektromos vázlata

Balról jobbra a következő fő egységek találhatóak a középső váltófeszültségű blokkban:

- az M1 kompresszor motor és a hozzá tartozó S4 engedélyező kapcsoló és S5 indító nyomógomb, mely egy segédfázissal biztosítja a motor megindítását
- a T1 nagyáramú transzformátor, melyhez egy fázishasítás elvén működő szabályzó kör is tartozik. Ez a trafó látja el árammal az EM660T villanymotort, mely a szivattyút forgatja.
- a T2 közepes teljesítményű transzformátor, mely a mágnesszelepek számára biztosít megáramlást.

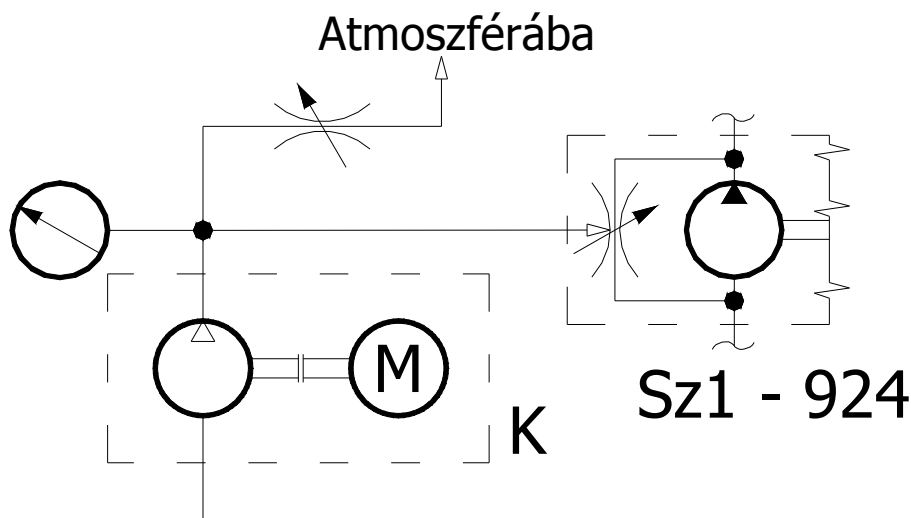
A 4. ábra bal felső részén látható a szivattyúmotor és a hozzá tartozó egyenirányító, valamint simító kondenzátor és védődióda.

Az ábra alján a mágnesszelepek áramköre figyelhető meg. Itt találunk egy S6 engedélyező kapcsolót, mellyel egyszerre lehet a megáramlást biztosítani a két szelep mágnes tekercseinek. Az S2 és S3 kapcsolók feladata, hogy külön is kapcsolhatóak legyenek a szelepek.

A próbadad pneumatikus rendszere

A 5. ábra szerint került megépítésre a próbadad pneumatikus alrendszere, mely a 924-es szivattyú részére szolgáltatja a kompresszor utáni vezérlőnyomás szimulálását. Ez egy vezérelhető megkerülő ágat befolyásol a 924-es berendezés szivattyúeleme körül. A vezérlőnyomás növelésével ez az útvonal

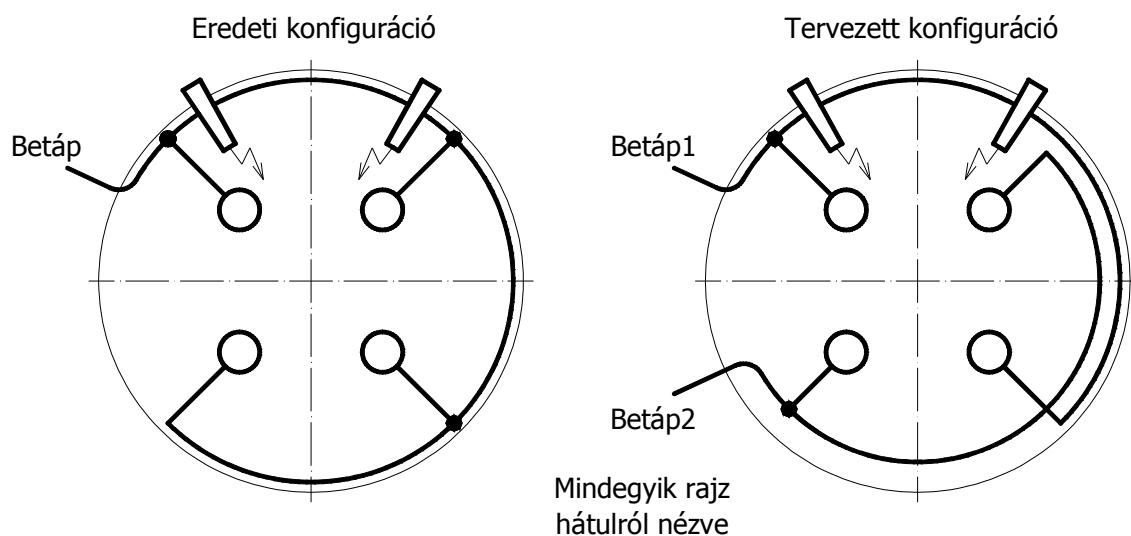
folyamatosan elzárható, ezáltal a fűvókák felé több tüzelőanyag jut. Egy kézi vezérlésű, atmoszférikus kapcsolattal rendelkező megkerülő ág segítségével lehet a konkrét nyomást beállítani, amelyet egy dugattyús kompresszor hoz létre, amit egy manométeren lehet ellenőrizni.



5. ábra: A próbapad pneumatikus vázlata

Mivel a 924-es berendezés tüzelőanyag-szivattyúját viszonylag nagy mennyiségű szállításra optimalizálták, ezért vélhetően szükség lesz a tüzelőanyag-elosztó rendszer áttervezése is. Ez a probléma más hasonló méretű gázturbinák esetében a start közben csökkentett számú fűvóka használatával valósul meg, vagyis amíg a kis fordulatszám miatt kevés betáplálásra van szükség, az égés beindításához elengedhetetlen jó porlasztást a kis kiáramló keresztmetszet biztosítja. A rendszer túlterhelése ellen és az egyenletes hőeloszlás végett az üzem közben a többi fűvóka is bekapcsol. Gyártótól függően a start közben alkalmazott fűvókák kikapcsolhatóak, vagy tovább üzemeltethetőek.

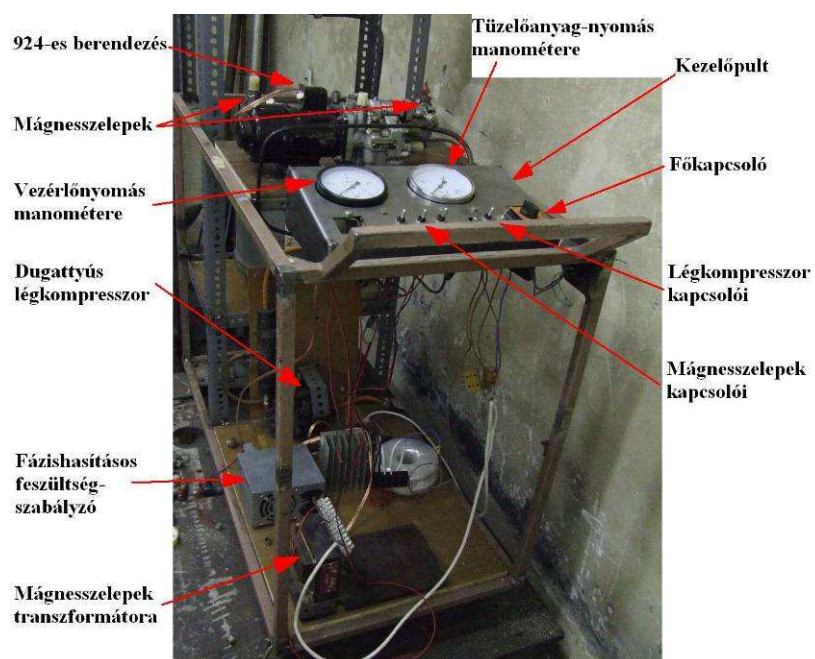
A TKT-1 esetében természetesen előnyben részesülnek a lehető legkisebb konstrukciós változtatást igénylő megoldások, így az égéstér módosítása nélkül lényegében egyetlen megosztás képzelhető el, ez pedig a meglévő négy fűvóka csoportosítása két kettős csoportba, melyekben egy gyertya melletti, és egy vele átellenes (gyertyától távoli) fűvóka szerepel. Az indítás során az egyik párost működtetve kisebb tüzelőanyag-betáplálás mellett is jó porlasztás valósulhat meg, majd mikor a láng már stabil, és a bevitt hőenergia a turbina többlet-teljesítményén keresztül gyorsul a forgórész, bekapcsolható a másik páros is. Csekély mértékű problémát jelent a fűvókák minimális száma, de a gyakorlatban fordul elő, hogy kettő fűvóka működik indítás során (APS1000 [2]).



6. ábra: A fűvókák eredeti és tervezett csoportosítása

Érdekes problémát vet fel ez a megoldás. Nevezetesen ha mindig ugyanaz a páros lenne az indításra kijelölt egység, akkor a turbina állólapátmozása mindig ugyanott kapna nagy hőterhelést. Ennek elkerülése érdekében célszerű már a tervezés fázisában úgy kezelni a két gyűjtőcsövet, hogy nincs közülük kitüntetett indító- és üzemi fűvókapár. Mivel a szabályzórendszer duplikált felépítéssel kerül megtervezésre, így kézenfekvőnek látszik az a megoldás, hogy az egyik áramkör az egyik gyűjtőcsövet használja indítás során, míg a másik pedig értelemszerűen a másikat. Ez a korszerű elektronikai és szoftver lehetőségek mellett már nem jelent akkora kihívást, bár természetesen rejthet magában most még előre nem látható buktatókat.

A 7. ábra mutatja a próbapadot a cikk írásának idején.



7. ábra: A 924-es próbapad

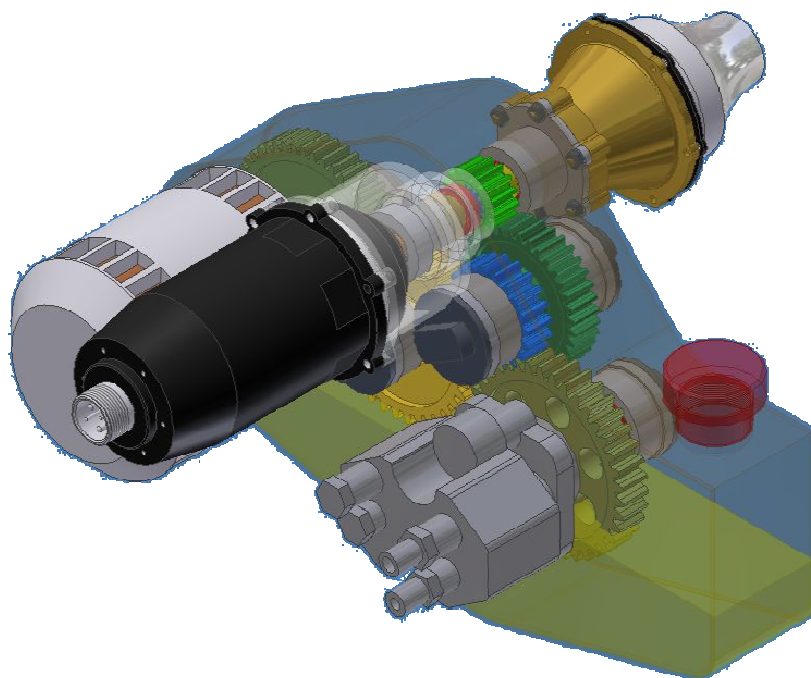
Kihajtás tervezése a TKT-1 sugárhajtóműhöz

Bevezető gondolatok

Szinte minden gázturbinának van egy mechanikus kihajtása valamelyik (vagy értelemszerűen az egyetlen) forgórész tengelyéről. A TSz-21 eredetileg nem rendelkezik ilyen lehetőséggel, mert az üzemeltetési körülményei ezt nem tették szükségessé, az így elvesztett funkciókat (pl. segédberendezések meghajtása, fordulatszám mérése) más úton pótolták. Érdekes, hogy a TSz-21 indító gázturbinát is gyártó tervezővállalat (MKB Granyit¹, Moszkva [1]) későbbi, TSz-21 egyéb jellemző vonásait magán viselő konstrukcióiban már alkalmaz kihajtást.

A TKT-1 eredetileg az indító gázturbina örökségével, kihajtás nélkül került megvalósításra. Ez a konfiguráció működőképes, de az üzemeltetés során olyan tapasztalatokat szereztünk, amelyek ennek a kialakításnak a továbbfejlesztését nem teszik gazdaságossá. A legfontosabb okok:

- a nagyáramú tápellátás nehezen kivédhető elektromágneses interferenciát okoz
- az elektromos tápellátás a berendezés hálózattól való függését vagy nagyméretű akkumulátorok alkalmazását teszi szükségessé



8. ábra: A kihajtás kialakítása

A kihajtás konstrukciója

A kihajtás célszerűen moduláris kialakítással kell rendelkezzen, ami a későbbi fejlesztések esetén a gyors és egyszerű módosítást teszi lehetővé. Figyelembe véve a gázturbina felépítését, a kihajtást mindenképpen a kompresszor előtt kell elhelyezni. Tekintettel arra a körülményre, hogy a

¹ MKB Гранит – Машиностроительское Конструкторское Бюро Гранит – „Gránit” Gépipari Tervező Iroda

kompresszor előtt jelenleg a szívócsatorna levegőgyűjtő háza helyezkedik el, szükséges az áttételházat egy toldó egységgel távolabb pozicionálni. A kihajtás szerkezeti felépítését a 8. ábra mutatja.

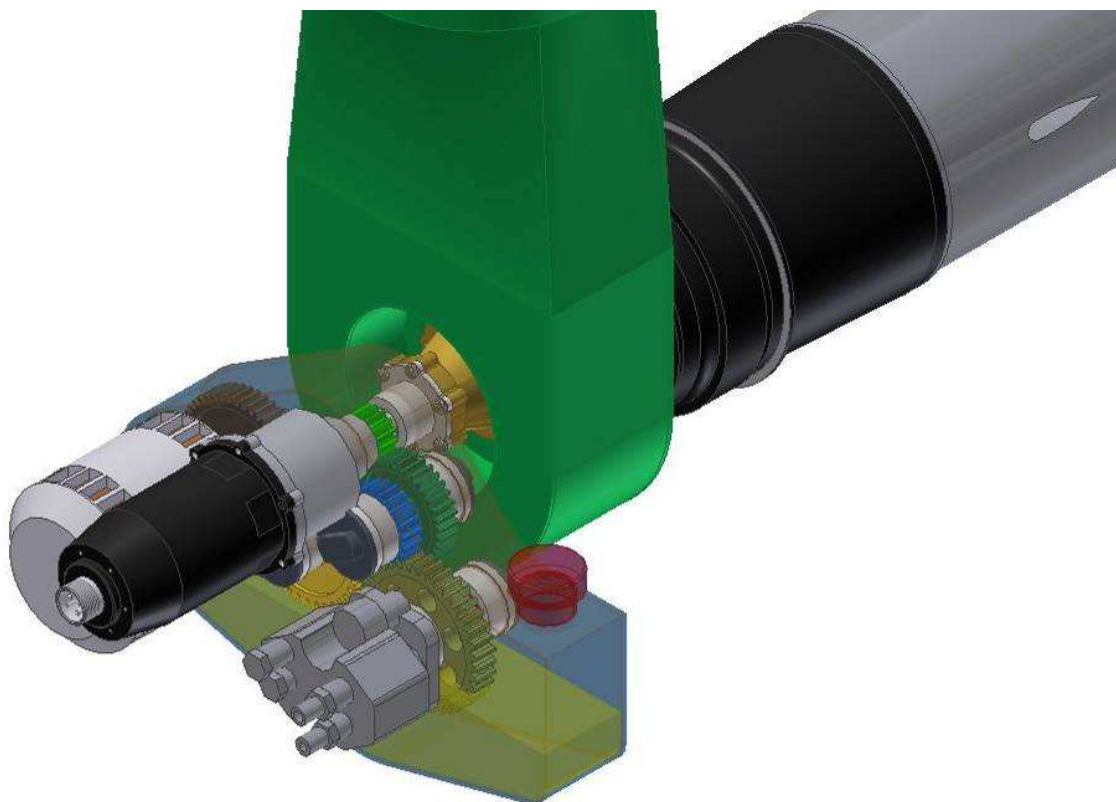
A kihajtás alapvető szerkezeti egységei ezen elgondolás alapján a következők:

- a nagy fordulátú, kis nyomatékkal rendelkező tengelytoldó modul, mely a jelenlegi forgórész indítómotor körmeihez csatlakozva átviszi a szükséges nyomatékot, és ezt a forgómozgást továbbítja a szívócsatorna gyűjtőházon kívülre.
- a lassító áttételeket tartalmazó áttételház, mely egyrészt az egyes fogaskerekek részére csapágyazást biztosít, másrészt az egyes segédberendezések felfogatási pontjait is tartalmazza. Az áttételház a korszerű kisméretű repülőgép segédenergia-forrás gázturbináinál (APU²) alkalmazott megoldás alapján célszerűen egyúttal az olajtartály szerepét is elláthatja.

Az áttételház a következő eszközök részére biztosít meghajtást a fogaskerekes áttételeken keresztül:

- a 924-es berendezés. Itt, mivel az EM660T villanymotor mellőzése tulajdonképpen a kihajtás egyik alapvető célja, okafogyottá válik két szivattyúegység alkalmazása. Tehát eredeti rendeltetésének megfelelően egyszerre láthatja el a tüzelőanyag és a kenőolaj rendszerek kiszolgálását.
- egy kis teljesítményű egyenfeszültségű generátor. Annak érdekében, hogy a TKT-1 minél jobban függetleníthető legyen a külső energiaforrásoktól, célszerűnek mutatkozik egy nagyjából 500÷1000W körüli, 12 vagy 24V-os generátor alkalmazása, mellyel egyrészt működés közben az elektromos és elektronikus eszközök megtáplálhatóak, és csak korlátozott mértékben szorítkozik a rendszer pl. akkumulátor használatára.
- a starter motor. Az indítórendszer első közelítésben az eredeti starter motor felhasználásával kerül integrálásra a TKT-1 kihajtással ellátott változatára. Természetesen a további fejlesztések kitérhetnek pl. a célszerűnek mutatkozó, és széles körben elterjedten alkalmazott sűrített levegős indítórendszer kifejlesztésére, de erre csak akkor kerülhet sor, ha bebizonyosodott, hogy az áttevezett variáns megbízhatóan üzemel, és van értelme a továbbfejlesztésnek.
- egy centrifugális levegő-olaj leválasztó. Feltételezhető, hogy az áttételházban levegő-olaj emulzió alakul ki, amely más konstrukciókban bevált módon szétválasztható, így biztosítva a rendszer számára szükséges mennyiségű olajat, nem engedve számottevő mennyiséget pára formájában az áttételház kellően nagy térfogatú levegőterében megmaradni.

² APU: Auxiliary Power Unit – Fedélzeti Segédenergia-forrás (fedélzeti gázturbina)



9. ábra: A kihajtás látványterve a TKT-1-re építve

Az elektronikus szabályzórendszer fejlesztése

Mint arról a [4] keretében beszámoltam, a TKT-1 gázturbinához teljes hatáskörű, digitális elektronikus szabályzórendszer (FADEC³) fejlesztése van folyamatban. A FADEC szóösszetétel általában csak a szabályzás elvére utal, bár vannak olyan gyártók, akik magát a szabályzást megvalósító berendezést is ezzel a névvel illetik, de ekkor természetesen a „C” a „Controller”, azaz „szabályzó” szót rejti.

A TKT-1 esetében a rendszer a TEDDI fantázianevet viseli, a „Teljes hatáskörű Duplikált DIgitális szabályzás” szavakból alkotva. Ezen elnevezésből kitűnik, hogy a szabályzást nem csak a FADEC elv szerint, hanem a repülésben széleskörűen elterjedt redundáns alapokon kívánjuk megvalósítani. A duplikált elrendezés tehát azt takarja, hogy két, egymással egyenértékű áramkör található meg a rendszerben, amelyek közül mindig csak az egyik végzi a működtetést, míg a másik úgynevezett „Hot Standby” készenléti üzemmódban van. Ez azt jelenti, hogy minden bemenetet figyelemmel kísér, minden szükséges számítást elvégez, éppen csak a kimeneteket nem vezérli. Így, ha az éppen aktív eszköz meghibásodik, minimális késleltetés után (mire a rendszer észreveszi a hibát és átkonfigurálja magát) újra működőképes lesz a rendszer. Ez gyakorlatilag legrosszabb esetekben is csak ezredmásodperc nagyságrendű időt vesz igénybe, vagyis a gázturbina tehetetlenségének köszönhetően lényegében azonnalinak vehető a „hatalom” átvétele a kimenetek felett.

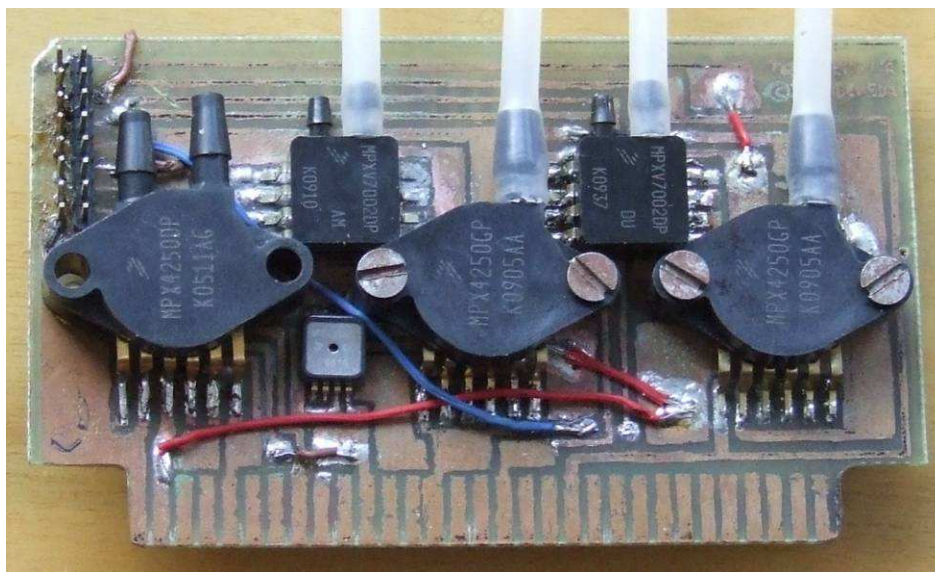
³ FADEC – Full Authority Digital Electronic Control – Teljes hatáskörű, digitális elektronikus szabályzás

A TEDDI a korszerű repülőgép-fedélzeti elektronikus eszközökhöz hasonlóan moduláris kialakítással rendelkezik. Az áramkörök egy alaplapra csatlakoznak, melyen az összes szükséges jel megtalálható, így a rendszer rugalmas, bővítése jelentősen leegyszerűsödik. Az áramkörök között a következők találhatóak meg:

- nyomásmérő modul
- hőelem modul
- kézi vezérlés
- automatikus vezérlés (1 és 2, külön áramkörtön)
- BITE⁴ modul (tápellátással és szintillesztő áramkörökkel egybekötve)

A legelsőként elkészült egység a nyomásérzékelőket tartalmazó modul, amely összefoglalja az ezen feladattal kapcsolatos célhardvereket, és egy közös áramköri kártyára integrálva biztosítja a többi áramkör részére a szükséges jeleket.

A nyomásmérő modul tulajdonképpen a régi konstrukcióknál ([5], [8]) is meglévő piezorezisztív elven működő érzékelőket tartalmazza. Annyi kivétel tapasztalható, hogy az új áramköri kártyán csak az érzékelők helyezkednek el, más áramköri elem (pl. erősítő) nem található rajta, ezek azokon a kártyákon lesznek megtalálhatóak, ahol éppen a kívánt funkciót meg kell valósítani. A nyomásmérő modult mutatja a 10. ábra és a 11. ábra.

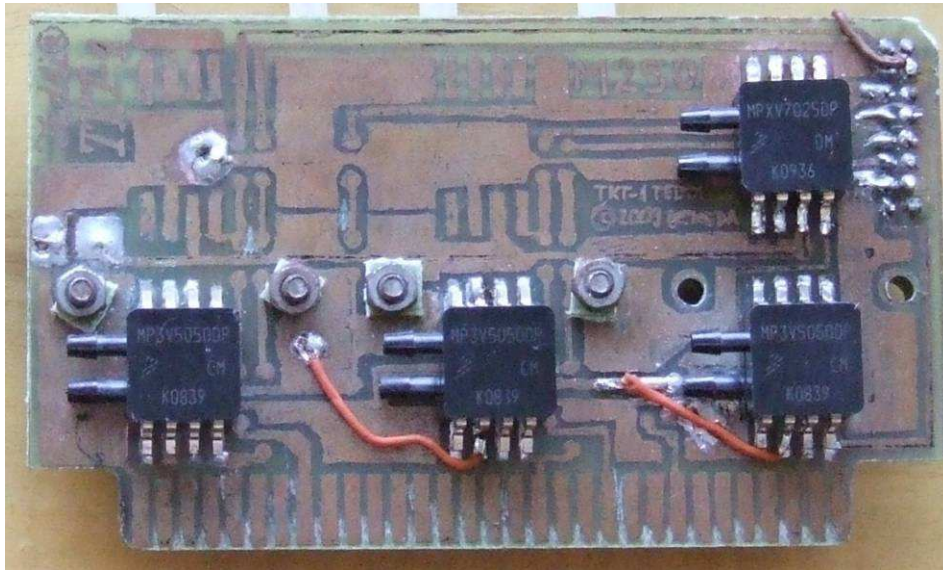


10. ábra: A TKT-1 nyomásmérő moduljának felső oldala

A modul felső oldalán a következő komponensek találhatóak (zárójelben a méréstartomány):

- 2 db MPXV7002DP ($\pm 2\text{kPa}$ különbségi nyomás) – Δp_{mp} , Δp_1
- 3 db MPX4250GP ($0\div 250\text{kPa}$ túlnyomás) – p_2^* , p_2 , p_{vez}
- 1 db MPXH6115A ($15\div 115\text{kPa}$ abszolút nyomás) – p_0

⁴ BITE – Built-In Test Equipment – Beépített Önellenőrző Egység



11. ábra: A TKT-1 nyomásmérő moduljának alsó oldala

A modul alsó oldalán a következő komponensek láthatók:

- 3 db MP3V5050DP (0÷50kPa különbségi nyomás) – p_4 , p_4^* , p_{PG}
- 1 db MPXV7025DP (± 25 kPa különbségi nyomás) – p_4 irány
- 2 hely későbbi fejlesztésre fenntartva

A hőelem modul a gyenge feszültségjelek megerősítését, ezzel együtt a rendszerben párhuzamosan kötött A/D⁵ átalakítók zavartalan működéséhez szükséges impedancia illesztést is el kell végezze. A megfelelő erősítés az összes hőelem esetében a célszerűnek mutatkozó 100-szoros érték lehet, ez elegendőnek mutatkozik, hiszen egy K hőelem jele ilyen mértékű erősítés után megközelítőleg 4mV/°C mértékű, egy 5V referenciával működő, általánosságban elterjedt 12 bites A/D átalakító felbontása pedig 1,22mV, tehát a zajok és egyéb zavartényezők elhanyagolása mellett elvben körülbelül 1/3°C felbontással rendelkezünk. Természetesen a gyakorlatban ez nem érhető el, de az 1 fokos felbontás még speciális eszközök nélkül is megvalósíthatónak tűnik. A hőelem modul egyik további fontos feladata a hőelemek megfelelő működésének ellenőrzése, szükség esetén hibajelzés küldése az egyes szabályzásban és önellenőrzésben feladatot teljesítő mikrokontrollereknek.

A BITE modul célja az összetett elektronikus szabályzórendszer összehangolása, felügyelete, az esetleges meghibásodások felismerése és a rendszer átkonfigurálása a működés további fenntarthatóságának érdekében. A modul tulajdonképpen nem más, mint egy mikrokontroller alapú áramkör, mely minden analóg és digitális jelet figyelemmel kísér, rendelkezik az egyes szabályzó áramkörök aktivitásáról, kiválasztja az éppen szabályzásra kijelölt áramkört, figyelemmel kíséri annak működését, valamint önellenőrzési funkciókat valósít meg. Az áramkör egyúttal kapcsolatban kell legyen az adatgyűjtő PC-vel, mely célszerűen egy nagy sebességű USB⁶ kommunikációt jelent. A

⁵ A/D – analóg/digitális (átalakító)

⁶ USB – Universal Serial Bus – Univerzális Soros Adatbusz

modul egyik kiemelkedő feladata, hogy lehetőséget biztosítson a repülőgépes képzés hallgatóinak a légijárművek különböző rendszereiben alkalmazott önellenőrző eszközök kialakításának, működésének és használatából fakadó előnyök megismerésére. Vagyis nagy szerep hárul rá az oktatás területén amellet, hogy a rendszer zavartalan működőképessége felett kell őrködni.

A TKT-1 HASZNÁLATA, ÜZEMELTETÉSI TAPASZTALATAI

Oktatás

A Repülőgépek és Hajók Tanszék a 2009/2010 tanév őszi félévétől meghirdette a Gázturbinák mérés technikája című választható tárgyat, melynek célja, hogy a repülőgépes képzésben részt vevő hallgatóknak legyen lehetősége egyrészt betekintést nyerni a korszerű mérő- és adatgyűjtő rendszerek kialakításába, az alkalmazott eszközök működési elveit, használati módjait megismerhessék, és nem utolsósorban a Tanszék gázturbinás berendezéseinek működtetésével tapasztalatot szerezzenek a repülőgép hajtóművek üzemeltetéséről, működéséről.

Ebben a szellemben került megvalósításra az első félév során is a kifutó, hagyományos ötéves egyetemi képzésben, illetve a BSc. képzésben részt vevő hallgatók által végzett hajtóművezések, ahol a szükséges, a gázturbina működtetésére vonatkozó speciális biztonsági-munkavédelmi előírások ismerete és betartása mellett, oktatói felügyelettel a TKT-1 sugárhajtómű üzemállapotait is vizsgálták.

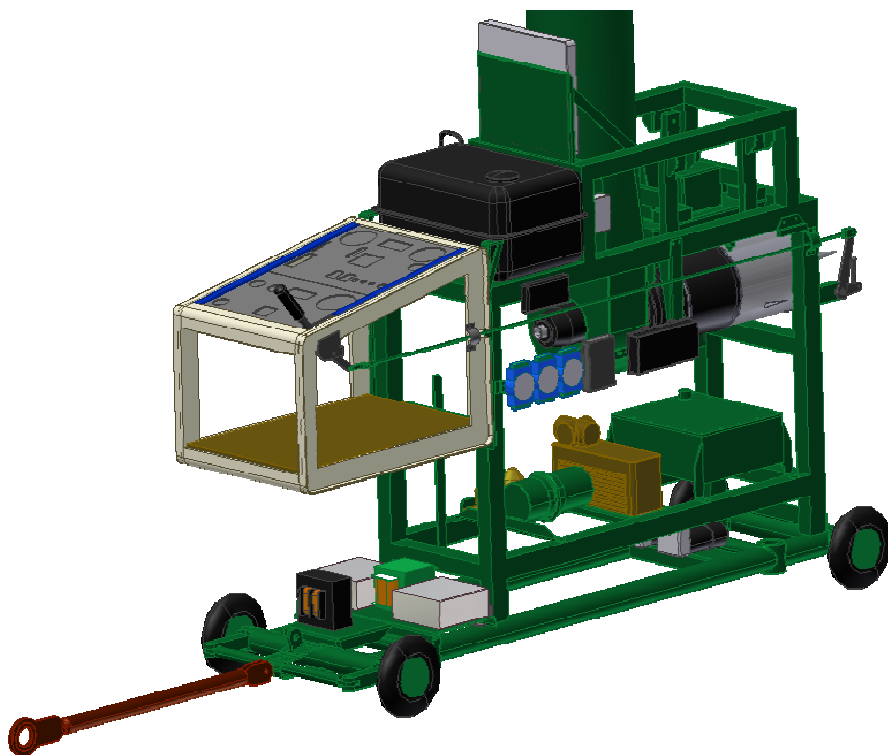
Diplomák, szakdolgozatok, TDK és egyéb hallgatói munkák

A TKT-1 számtalan lehetőséget kínál a gázturbinákkal, sugárhajtóművekkel foglalkozni kívánó hallgatóknak. Ebből szerencsére már voltak szép számmal az elmúlt félévekben, akik szép eredményeket tudtak felmutatni a hajtómű különböző jellegű vizsgálataival, továbbfejlesztési lehetőségeinek kutatásával.

Az első diplomamunka a berendezés mérőrendszerének kialakításával foglalkozott, mely megalapozta a most használt eszközökkel megvalósított, korszerű adatgyűjtést.

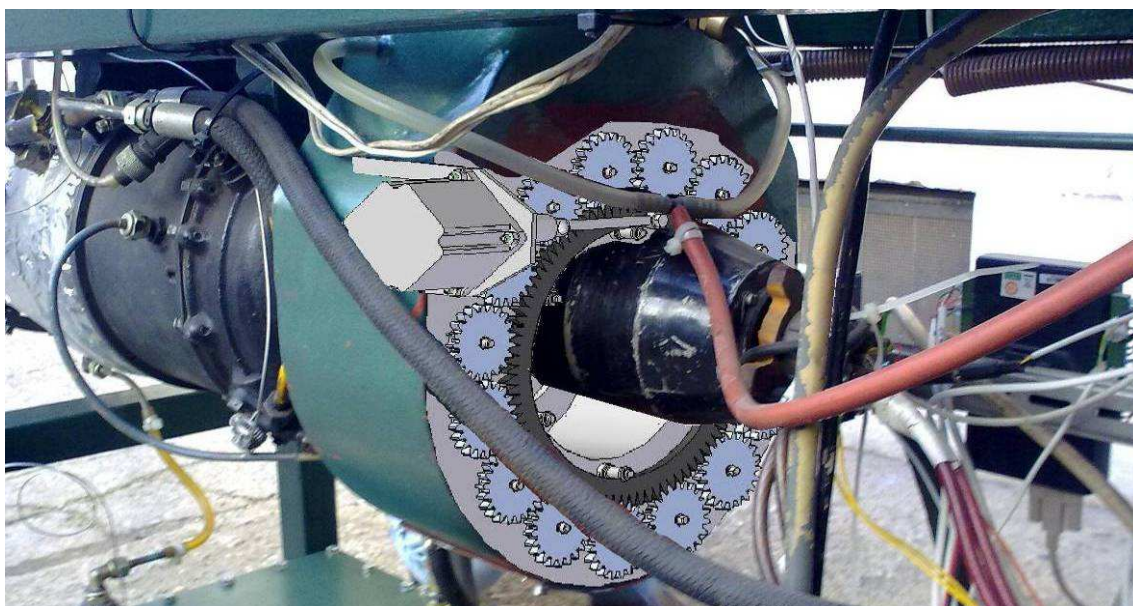
Egy négyfős hallgatói csoport féléves feladatterv keretében sugárfordító és tolóerő vektorálásra alkalmas kombinált fűvócső terveinek alapjait fektette le.

Egy hallgató létrehozta a próbapad három dimenziós modelljét, amely nagy előnyt jelent a későbbi fejlesztések esetében, illetve az oktatásban is kiemelt szerepet kap a berendezés bemutatásának fázisában.



12. ábra: A TKT-1 sugárhajtóműves próbapad 3D képe

A 2006-ban elindult BSc képzésben a 2009/2010 őszi félévben jutottak el az első hallgatók a szakdolgozat írásáig. Közülük egy a tolóerő vektorálás kérdéskörében folytatta a mások által megkezdett munkát, míg egy másik a TKT-1 kompresszorának változtatható bevezető terelő-lapátsorát (VIGV⁷) tervezte meg (13. ábra).



13. ábra: A VIGV látványterve [9]

⁷ VIGV: Variable Inlet Guide Vane – változtatható belépő terelő-lapátsor

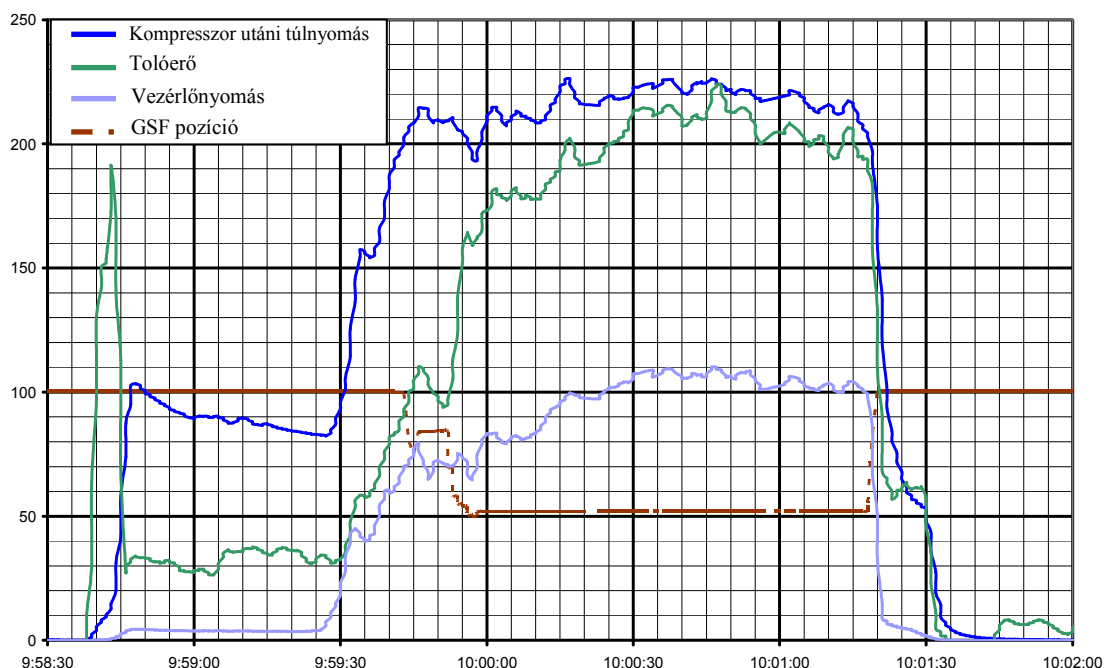
A 2009/2010 tavaszi félévben egy hallgató a sugárhajtómű turbinatárcsájának élettartam vizsgálatát végzi a terhelések időben változó jellegére való tekintettel [3][1].

Üzemeltetési tapasztalatok

A TKT-1 az első indítási kísérlet óta, melyre 2007. december 5-én került sor, összesen 63 sikeres indítást végeztünk, ami 105 kísérlet során jött létre. Ez 60%-os megbízhatóságnak felel meg, de természetesen nem szabad elfeledkezni arról, hogy a gázturbina a Honvédségtől „bizonytalan működés” miatt került selejtezésre. Természetesen ez az egyetemi gyakorlatban kiemelkedő üzemeltetési szám a gyakorlat szempontjából még teljességgel a bejáratás idejének számít, azaz végleges következtetéseket ennyi működés alapján még nem szabad levonni, bár a tendenciák az elégséges mennyiségű mérés során már kezdenek világosan látszódni. Ennek alapján kerültek meghatározásra az ebben a cikkben is rögzített fejlesztési irányok.

Amint látható volt, a berendezés elérte jelen kialakításában azt a fejlettségi szintet, ahonnan csak nagy erőfeszítések árán volna továbbfejleszthető, és egyáltalán nem biztos, hogy a befektetett energia megtérülne, a jelenlegi üzemeltetési tapasztalatok alapján.

Tehát célszerű volt a fejlesztésnek új irányt szabni, mely ugyan teljességében átalakítja a jelenlegi rendszer felépítését, ennek nyomán jelentős ráfordításokat igényel mind szellemi, mind anyagi téren, de a későbbiekben csak ezzel az iránnyal lehet további bővítést, fejlődést elérni. A 14. ábra bemutatja egy működés tipikus menetét a kompresszor utáni túlnyomás (~fordulatszám), a vezérlőnyomás (~tüzelőanyag betáplálás), GSF pozíció (~terhelés) és tolóerő görbéin keresztül.



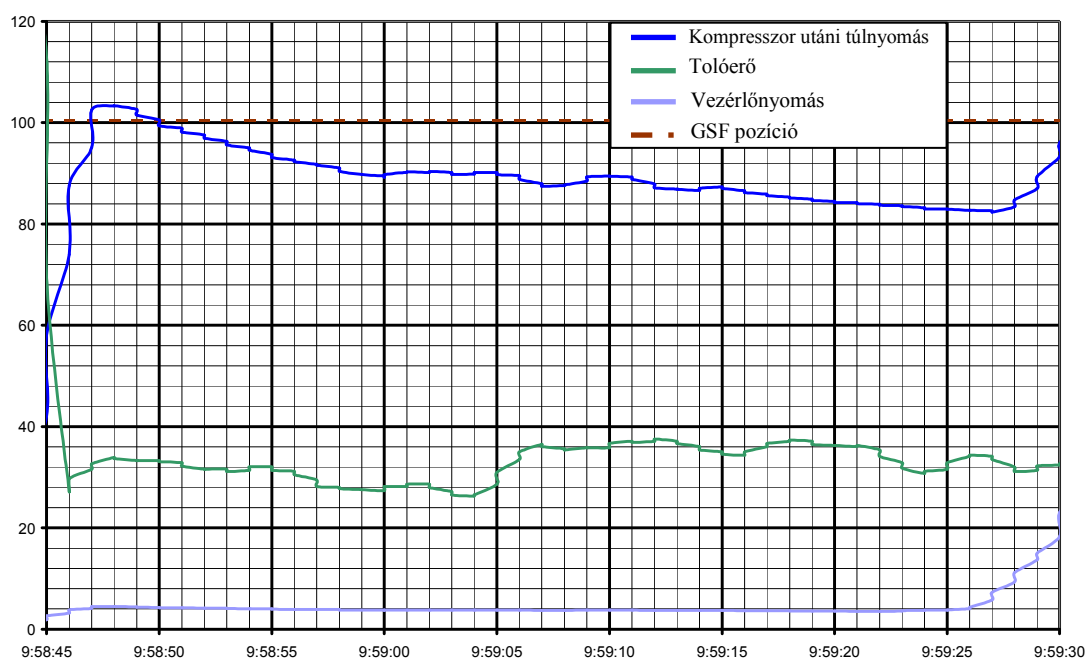
14. ábra: Egy jellemző működés kompresszor túlnyomás és tolóerő regisztrátuma

A segédberendezések

A segédberendezésekkel kapcsolatban voltak egyaránt pozitív és negatív tapasztalatok is. Az előbbiek között kell megemlíteni, hogy az eredeti konfiguráció, mely szerint a 924-es szivattyú egységből kettőt kell üzemeltetni az őket hajtó villanymotorok kímélése érdekében, működőképesnek bizonyult. Sőt, a TSz-21 működési idejéhez mérten hosszú távú működés (6 perc $\rightarrow$ 40 másodperc helyett) során sem melegednek fel a motorok számottevően (mindössze 80°C a megengedett 200°C [7] helyett), így az aktív hűtésre nincs is szükség. Az eddigiéknél ezt a lehetőséget mindössze egy alkalommal, a többi üzemeléssel történő összehasonlítás kedvéért használtuk.

Jól megfigyelhető az ábrán (14. ábra), hogy indítás során (9:58:35 $\rightarrow$ 9:58:45) igen magas tolóerőt regisztrált a rendszer. Ez nem más, mint az indítómotor közel 100A-es áramának mágneses teréből és a szénkefék szikrázásából adódó zavar. Ez a probléma nem oldódna meg abban az esetben, ha a tervezett kihajtás a jelenlegi starter motoron alapuló indító rendszert alkalmaz, mint ahogy az előtervezés jelen fázisában szerepel. Itt tekintettel kell lennünk arra a körülményre, hogy a lehetőségek viszonylag behatároltak másfajta indítási mód használatára, elsőként célszerű a már bevált módszert felhasználni, figyelembe véve, hogy ez a hatás kizárólag az indítás néhány másodperce alatt okoz zavart, a mérés effektív időtartama alatt nem.

Sokkal érdekesebb azonban az indítás után az alapjáratú üzemmódra való kifutás utáni bő fél percre (9:58:50 $\rightarrow$ 9:59:25) a történése (15. ábra). Amint a kompresszor utáni túlnyomásból látható, a gázturbina fordulatszáma jelentősen esett, állandó tüzelőanyag-betáplálás és GSF pozíció mellett. Ez minden bizonnyal a 924-es berendezés tüzelőanyag-szivattyújával kapcsolatos probléma, melynek hátterére a próbapaddal nyert információk adhatnak kellő rávilágítást.



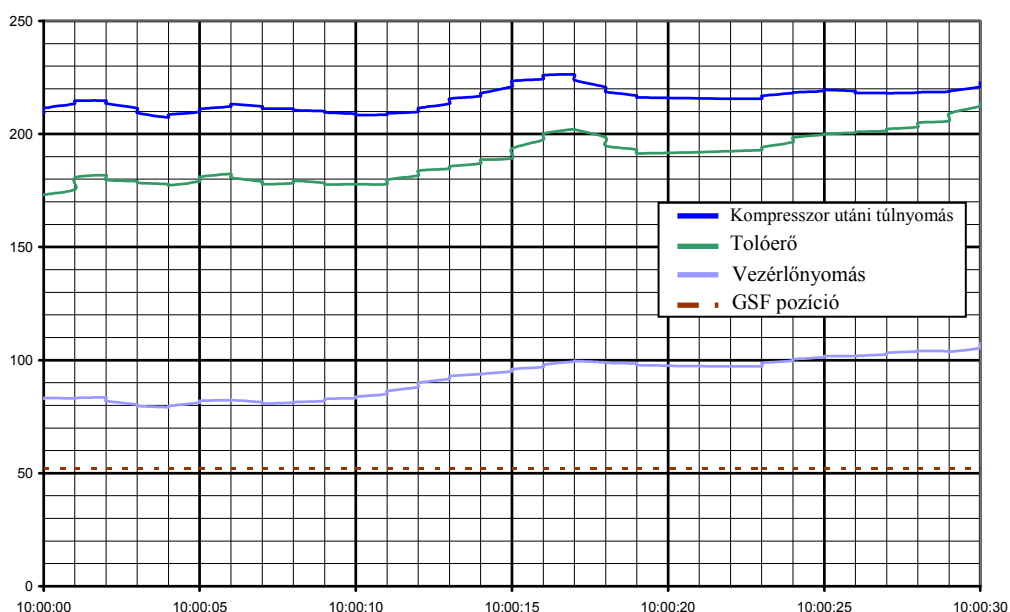
15. ábra: Az alapjáratú üzemmód csökkenő fordulatszáma (feltehetőleg a 924 hibája miatt)

Más téren sem sok jóval kecsegtetnek a tapasztalatok. Fény derült arra, hogy bár az eredeti elgondolás a gyakorlat szempontjából alkalmasnak bizonyult (a gázturbina üzemeltethető, működik, a szükséges feladatokat többé-kevésbé ellátja), a további használat szempontjából már nem tartható.

Egyrészt az a körülmény, hogy ez a kettős elrendezés, melyben egy 924-ből csak a tüzelőanyag-szivattyú, míg a másiktól csak a kenőolaj szivattyú működik, a villanymotorok melegezését ugyan megelőzi, de két villanymotor üzemideje növekszik egyszerre, tehát a berendezés élettartama szempontjából ez már jelentős hátránynak mondható.

A nagyáramú tápellátás üzemképes, de olyan mértékű elektromágneses zajt generál, amely a mérőrendszer bizonyos elemeinek működését igencsak károsan befolyásolja. Többek között a laboratóriumi körülmények mellett (pl. akkumulátorról üzemeltetett indítómotor) a fordulatszám-érzékelés tökéletesen funkcionált. Az üzemi körülmények mellett teljességgel használhatatlan jeleket ad a zavaró tényezők hatására. Ez lehetetlenné teszi a korrekt szabályzást, bár a gázturbina működik, a pontosabb vizsgálatok érdekében szükséges ezt a zavarást kiküszöbölni. Ez teljességgel megoldódik, ha megvalósul a kihajtás, ott ugyanis nem lesz olyan korlátozó feltétel, mely a jelenlegi rendszerben jelen van (méret, elrendezés, stb.), és negatív hatást gyakorolna a fordulatszám mérésére. Emellett a mechanikus hajtás az elektromos rendszerben természetesen nem generál zajokat.

Emellett meg kell még említeni a fejlesztések fejezetében részleteiben is ismertetett problémát, nevezetesen, hogy a szivattyúegység összetett felépítése révén számos meghibásodásra ad lehetőséget. Ezek kiküszöbölése, megelőzése, időben történő felismerése szintén szükségessé teszi a próbapadot, hiszen a gyakorlat során olyan nagy periódusidejű, nagy amplitúdójú lengések jöttek létre a tüzelőanyag-betáplálásban, amelyek mindenképpen részletesebb vizsgálatokat igényelnek. A működés egy részletének legfontosabb jellemzőit mutatja a 16. ábra.



16. ábra: A működésben tapasztalható ingadozás állandó gázkar és GSF pozíció mellett

A tapasztalatok alapján az általunk állandósult üzemmódnak szánt működés közben a gázturbina megközelítőleg 5 másodperces periódusidővel először fokozatosan vesztett fordulatszámából a csökkenő tüzelőanyag-betáplálás miatt. A problémát fokozza, hogy a tüzelőanyag mennyiség kompresszor utáni vezérlőnyomás segítségével kerül szabályzásra, ami értelemszerűen a fordulatszám csökkenése révén a folyamatra gerjesztő hatást gyakorol. Azonban az így létrejövő lassulás idővel megszűnik, és éppen ellenkezőjére fordul, a gázturbina ismét több üzemanyagot kap, és ennek köszönhetően a folyamat fordítva is lezajlik. A jelenségre jellemző amplitúdó körülbelül 1-2 ezer fordulat/perc értékkel rendelkezik, ez a névlegeshez képest 2-4%-ot jelent. Ez a probléma – a fordulatszám-érzékelés nehézségei mellett – megköveteli a behatóbb tanulmányozást, a probléma okának felderítését, valamint a sikeres azonosítást követően a probléma megszüntetésére irányuló lépéseket.

A problémára jellemző, hogy minden időben kialakul, minden működtetés során tapasztaltuk, és gyakoriságából fakadóan egyik legfontosabb kiváltó oka lett a 924-es próbapad létrehozásának. Mivel a próbapad még a cikk írásának idején készül el, így a probléma megoldása még csak jelen időben írható, ezért a hiba okaként jelenleg csak feltételezéssel lehet élni, mely szerint a 924-es berendezés kompresszor utáni nyomását transzlációs mozgássá, elmozdulássá átalakító szelencés szerkezete állhat a jelenség hátterében. A körülmények ugyanis arra engednek következtetni, hogy működés közben a nagy nyomás alá kerülő szelence tágulása következtében egy kezdődő repedésen keresztül csökkenni kezd a benn uralkodó nyomás, így idővel a repedés a szelence kevésbé deformált alakjának újbóli elérésekor zárul, és ismét nyomásnövekedés következhet, majd ez a folyamat ismétlődik. Feltételezések szerint tehát a szivattyú vezérlőelemében lehet a probléma forrása, de ez teljes bizonyossággal csak a próbapad üzembe állítása után derülhet ki.

Tolóerő illetve üzemmód változtatása

A tolóerő rugalmas változtatására jelenleg a 2008-ban készült változtatható keresztmetszetű GSF⁸ redőnyzet szolgál, teljes mértékben kézi vezérléssel, tolórudas mechanizmuson keresztül [5].

A szerkezet tervezésénél alapvető cél volt, hogy a létrehozható maximális szűkítés se legyen túl nagy terhelés a gázturbinának, ennek megfelelően ez a konstrukció olyan minimális kilépő keresztmetszetet tud létrehozni, amely nagyjából fél terhelést jelent csak. Ez tehát elegendő olyan vizsgálatokhoz, amikor például hallgatói mérés során a gázturbina üzemállapotában végbemenő változást szeretnénk demonstrálni a fűvócső szűkítés hatására. Nem mellékes, hogy egy ilyen mérsékelt terhelést még az üzemeltetésben járatlan személy (hallgató) sem tud olyan hirtelenséggel változtatni, hogy az a gázturbina biztonságos, stabil üzemét veszélyeztetné.

Elégtelen viszont ez a szűkítés olyan jellegű kísérletekhez, amelyekben a sugárhajtómű teljes terhelését szeretnénk részleteiben feltárni, esetleg olyan erős tranziens folyamatokat létrehozni,

⁸ GSF – gázkiáramlás-sebesség fokozó (redőnyzet)

amelyeket csak a hirtelen nagymértékű fűvócső keresztmetszet változás tud előidézni. Ennek tükrében tehát új fűvócső tervezése van folyamatban, mellyel szemben a meglévő tapasztalatok alapján a következő követelményeket támaszthatjuk:

- felépítésében egyezzen a meglévő, bevált konstrukcióval
- működési tartománya legyen szélesebb, a nagyobb terhelések létrehozhatóságának érdekében
- működtetése legyen elektromos, annak érdekében, hogy a FADEC rendszerbe illeszthető legyen
- a működtetés legyen biztonságos, tekintettel a jelenleginél nagyobb terhelések esetében, amikor pompázs, vagy egyéb nemkívánatos tranziens jelenség léphet fel

Megvizsgálva a feltétel-rendszert, az alapvető különbség a mechanikus működtetési mód elvetése az előző változathoz képest. Abban az esetben, ha a szabályzórendszer teljes hatáskörét biztosítani kívánjuk, természetesen a GSF sem lehet manuális működtetésű. Egy megfelelő léptető- vagy egyszerű egyenfeszültségű villanymotor segítségével megvalósítható a mozgatás, illetve annak digitális vezérlése. Szoftveres megoldásokkal pedig elérhető, hogy a motor fordulatszáma megfelelően alacsony legyen, azaz a keresztmetszet-változás sebessége kordában tartható legyen, amennyiben arra szükség van például hallgatói mérés esetén, tehát az elektromos mozgatáshoz tartozó elektronika, valamint az azt működtető program egyszerre garantálja a FADEC rendszerbe történő illeszthetőséget és a biztonságos működtetés lehetőségét is.

ELÉRT EREDMÉNYEK

Fejlesztések

Amint az a [4]-ben megállapításra került, a gázturbinás berendezés vezérlő-, illetve szabályzó rendszerének továbbfejlesztése két egymástól független úton valósult meg, illetve kezdődött el.

Elsőként a meglévő PC alapú adatgyűjtő rendszer került átdolgozásra a hallgatói mérések biztonsága érdekében, illetve kibővítésre, annak érdekében, hogy számítógépes vezérlés valósulhasson meg.

Másodsorban elindult a teljes hatáskörű digitális szabályzórendszer tervezése és megvalósítása, mely mikrokontrollerek segítségével fogja megvalósítani a gázturbina megfelelő működtetését.

Ezek mellett, természetesen nem elhanyagolandó a kihajtás tervezése, mely alkalmassá teszi az üzemeltetési tapasztalatok során napvilágot látott legjelentősebb problémáknak a csökkentését, esetenként megszüntetését.

Oktatás

A gázturbinás sugárhajtómű elérte egyik legfontosabb célját, amikor részévé vált a repülőgépes

oktatásban részt vevő hallgatók számára a szervezett kereteken belüli működtetés, mérés.

Jelentős munkát végeznek az érdeklődő hallgatók is, melyek eredményei – túl az egyéni ismeretek fejlesztésén – a gázturbina fejlesztéséhez is hozzájárulnak, így téve azt a következő évfolyamok számára mind tökéletesebbé.

TOVÁBBFEJLESZTÉSI LEHETŐSÉGEK

Ahogy az a leírtakból kiviláglik, természetesen nem egy befejezett folyamatról van szó a TKT-1 fejlesztését illetően, hanem egy távlatokat nyújtó, sokak együttműködését igénylő munkáról.

Ennek megfelelően a jelen cikkben leírtak még csak az alapot szolgáltatják a későbbiekben megvalósuló újdonságok számára.

A közeljövő legfontosabb feladata tehát a leírt feladatok megvalósítása, kivitelezése, melyek lehetővé teszik, hogy a berendezés a későbbiekben még több lehetőséggel rendelkezzen mind az oktatás, mind a kutatás terén. Így tehát, a gázturbina áttervezését követően olyan sokrétű további fejlesztések indulhatnak meg, mint például a szabályzórendszer finomítása, különféle szabályzási algoritmusok hatásának, működési körülményeinek vizsgálata.

Ezek mellett – a távoli célok elérése érdekében – érdemes lehet egy olyan, a berendezés méreteiből adódóan kis létesítmény létrehozása, amely segítségével a földi körülmények változtathatóak, magyarul a gázturbina repülés közben tapasztalt környezeti paraméterei szimulálhatóak, ezáltal nemcsak atmoszférikus be- és kilépő jellemzők között végezni a méréseket.

IRODALOMJEGYZÉK

- [1] Двигатели 1944-2000: Авиационные, ракетные, морские, промышленные. Év nélkül.
- [2] APS1000 APU brosúra. <https://hsapps.utc.com/powersystems/products/aps1000apds.htm>
- [3] BÁNSÁGI Zoltán László: Turbina tárcsa végeselemes analízise ekvivalens üzemmódok meghatározására. Repüléstudományi Konferencia, Szolnok, 2010.
- [4] BENEDA Károly: Teljes hatáskörű digitális gázturbina szabályzás (FADEC) fejlesztése kisméretű sugárhajtóműves berendezéshez. Repüléstudományi Konferencia, Szolnok, 2009.
- [5] BENEDA Károly: Kisméretű gázturbinás sugárhajtóműves berendezés kísérleti és oktatási célokra. Repüléstudományi Konferencia, Szolnok, 2008.
- [6] BENEDA Károly: Kisméretű kísérleti sugárhajtómű építése. Repüléstudományi Konferencia, Szolnok, 2006.
- [7] Электродвигатель ЭМ-660Т – ПАСПОРТ. 1980.
- [8] SÁNTA Imre – BENEDA Károly: Kisméretű gázturbinás sugárhajtóműves kísérleti berendezés és matematikai modellje. GÉP, Budapest, 2007.
- [9] Sziroczák Dávid: Előperditő lapátsor tervezése TKT-1 sugárhajtóműhöz. Szakdolgozat, Budapest, 2009.