

Pásztor Endre, Beneda Károly Tamás

## A TKT-1 KISMÉRETŰ, OKTATÁSI ÉS KUTATÁSI CÉLÚ GÁZTURBINÁS SUGÁRHAJTÓMŰ ELSŐ TÍZ ÉVE

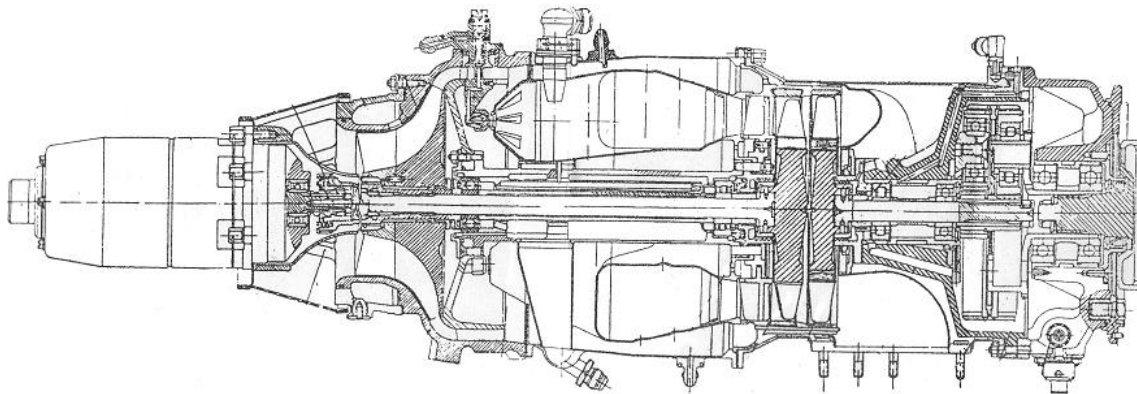
*2005-ben a BME akkori Repülőgépek és Hajók Tanszékén egy nagyszabású fejlesztői munka vette kezdetét, melynek célja egy kisméretű, oktatási és kutatási célra egyaránt használható sugárhajtómű létrehozása volt. Az előzetes vizsgálatok és építés bő két évet vett igénybe, mire megvalósult a próbapad, és az első üzemi próbák kezdetüket vehették. Azóta számos tekintetben bővült, fejlődött a berendezés, a hallgatók bevonása mind tanórák, mind pedig szakdolgozatok, diplomatervek kapcsán folyamatos, ezáltal is lehetővé téve a repülőgép-hajtóművek terén szerzett gyakorlati tudást számukra. Jelen cikk célja, hogy bemutassa az átalakítás folyamatát, a használat eredményeit az elmúlt tíz év tükrében.*

**Kulcsszavak:** gázturbinás sugárhajtómű, gázturbinás próbapad, teljes hatáskörű digitális elektronikus szabályozás, változtatható keresztmetszetű fűvócső, mérő-adatgyűjtő rendszer

### BEVEZETÉS

Két – egy pályáját elhagyni készülő és egy pályakezdő – oktató elhatározta, hogy épít, illetve átalakít egy korszerű, kisméretű sugárhajtóművet, repülőgép indító gázturbinából, oktatási és kutatási feladatok ellátására.

A sugárhajtóművet egy TSz-21 típusú indító gázturbinából alakították ki, mely eredetileg a MiG-23 és Szu-22 harci repülőgépekben teljesített szolgálatot a Magyar Honvédség kötelékében. A munkálatokat a Közlekedés- és Gépészmérnöki Karok rokon tanszékeinek körében élénk érdeklődés és segíteni akarás kísérte.



1. ábra A TSz-21 indító gázturбина hosszmetzeti képe [18]

A munkának mindvégig motorja volt és maradt laboratóriumunk technikus, aki rendkívüli szakmai tudással, találékonysággal és lelkesedéssel segítette és ténylegesen végezte ezen fejlesztéssel kapcsolatos szerteágazó tevékenységét. Munkájának színvonalára való hivatkozásul megemlíjtjük, hogy ő kezdeményezte és hozta létre a hajtómű változtatható kiömlő keresztmetszetű fűvócsövet, amely azóta is kifogástalanul működik.

Néha felbukkant, elsősorban saját tanszékünk részéről halvány, szkeptikus vélekedés is, amelynek lényege az volt, dicsérendő ez a törekvés, de a tanszéknek nem hoz anyagi hasznot. Megjegyezzük, hogy a munka a nagy takarékoskodás időszakában, a nadrágszij meghúzás jegyében kezdődött. Válaszunk az volt, hogy ezt a kísérleti sugárhajtóművet az oktató és kutató munka színvonalának növelése céljából készítjük, és nem az azonnali és közvetlen anyagi haszon érdekében.

A Tanszéken emellett számos más repülőműszaki témájú kutatás-fejlesztés is folyik, melyeknek részeredményei azonban kölcsönösen alkalmazhatóak az eltérő rendeltetésű célokra is. Kiemelendő ezek közül a tanszéki laborberendezések mérő- és adatgyűjtő rendszerének korszerűsítése kapcsán végzett fejlesztő munkát [15], valamint a Controller Area Network (CAN) elektronikus kommunikációs busszal kapcsolatos kísérletek, mely a TKT-1 szabályozórendszerében is jelentős szerepet kapott [11], illetve az a számos munka, melyek a kisméretű gázturbinás hajtóművek alkalmazási lehetőségeiről szólnak, pl. [19].

## **A KÍSÉRLETI GÁZTURBINÁS SUGÁRHAJTÓMŰ KIALAKÍTÁSA**

### **Az építés kezdeti szakasza**

Az átalakítandó, eredeti, működőképes indító gázturbinát (lásd 1. ábra) a Légierő bocsátotta rendelkezésünkre két példányban, könyvjóváírással, térítés nélkül. Ezért az önzetlen segítségért ezúton is köszönetet mondunk. A végül átalakításra került példány (gyári száma 0302301134) egyébként a 01-es oldalszámú MiG-23MF vadászrepülőgépben teljesített szolgálatot, mígnem 1994. december 5-én kiszereztek és konzerválták, mert a jegyzőkönyv tanúsága szerint „bizonytalanul indít”.

A Szolnoki Repülőtisztai Főiskolán tárolt selejttendő műszaki alkatrészek közül jó néhány, még használható berendezést válogattunk ki. Az SzRTF-nek, ill. jogutódjainak nyújtott segítségéért is köszönetet mondunk.

Az elkészült sugárhajtómű üzemeltetéséhez tüzelő- és kenőanyag is szükséges volt, méghozzá nem elhanyagolható mennyiségben. Ezt a kecskeméti Központi Légijármű Javítóüzem bizonyos technológiai folyamatoknál leeresztésre kerülő, tiszta, de már tényleges üzemben, repülőgépben fel nem használható maradékokból biztosította rendelkezésünkre. Köszönet érte.

A fejlesztési, átalakítási munka nehezen szétválaszthatóan, de alapjában három síkon folyt. Termikus-áramlástechnikai és szilárdsági ellenőrző számítások, az átalakítás tervezése és tényleges kivitelezése, vizsgálatok, szakmai-tudományos kísérletek.

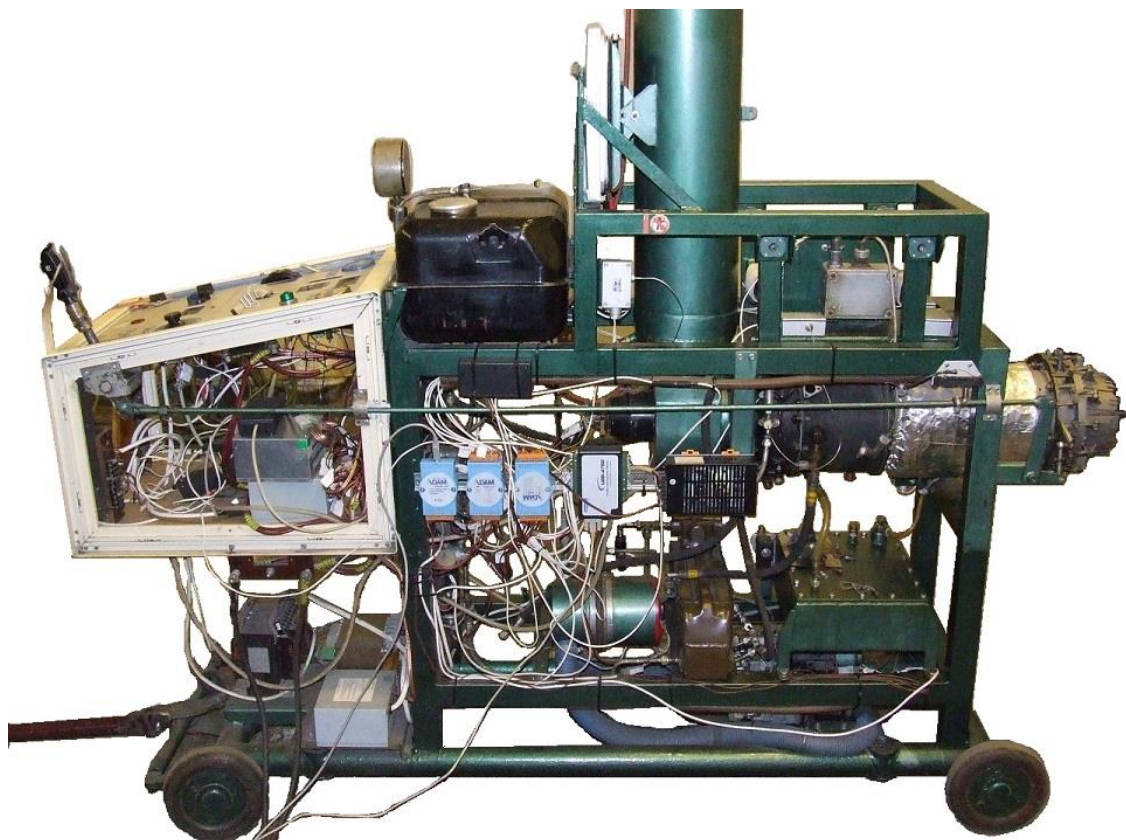
Az első fázis témája az átalakítandó hajtómű üzemi viszonyainak vizsgálata, ellenőrző számításai, a hajtómű tulajdonságainak megismerése és várható teljesítményeinek meghatározása volt. E munkálatok TDK dolgozat keretében kezdődtek [4], majd egyre inkább kibővültek, s eredményeikről különböző bel- és külföldi konferenciákon számoltunk be [5]. E témából számos diplomaterv is készült (lásd később), melyek az átalakítás és a hajtómű ellenőrző számításainak egy-egy fontos mozzanatát dolgozták fel. Ezek a diplomatervek egyrészt a hallgatók munkájának színvonalát is emelték, másrészt jelentős segítséget nyújtottak a teljes komplex feladat megoldásához. Talán itt célszerű és aktuális megemlíteni, hogy ezen berendezés kísérleti eredményeinek felhasználásával egy azóta sikeresen megvédett PhD disszertáció is készült [7].

Feltétlenül megemlítendő, hogy az üzemképes hajtóművet laboratóriumi gyakorlatok keretében a repülőgépész hallhatóknak is bemutatjuk, méréseket végeznek vele és rajta. Jelenleg két választható tárgy keretében is lehetőség van közelebbi ismereteket szereztetni, ezek a Gázturbinák mérés technikája és a Gázturbinák elektronikus szabályozása címen váltakozva, őszi ill. tavaszi félévben kerülnek meghirdetésre. Ezen hajtómű indítása mindig eseményszámba ment, mert ez ugyan kicsi, kísérleti berendezés, mégis jelentős mértékben pótolja az óriási hajtómű nagyon költséges indítása és üzeme közben szerzett tapasztalatokat, élményeket.

A működő kísérleti hajtóművet több műszaki csoportnak is bemutattuk, működésével a szakemberek igen élénk érdeklődését váltva ki. Megtekintette a berendezést az MTA Áramlás- és Hőtechnikai Bizottsága (2009. május 21-én), illetve azóta szorosabb együttműködés jött létre a Kassai Műszaki Egyetem Repülőmérnöki Karával [2], valamint a brno-i egyetem hasonló fejlesztéseket végző munkacsoportjával is.

### **A sugárhajtómű és a próbapad kialakítása**

A kutató-fejlesztő munka második pontjában a berendezés átalakításának megtervezése és kivitelezése volt, bár az egyes főbb szakaszokat nagyon nehéz egymástól még közelítően is különválasztani. A munkának ebben a fázisában a volt Vasúti Járművek és Rendszeranalízis Tanszék akkor még aktív tanszéki mérnöke a hajtómű felfüggesztésének megoldásával és a tolóerő mérőberendezés kialakításával vette ki a részét. A próbapadot a 2. ábra mutatja.



2. ábra A sugárhajtómű próbapadja

A hajtómű kenőolaját visszahűtő radiátort a Budaörsi Repülőgépes Növényvédő Szolgálat egyik vezetőjétől kaptuk. Munkánkban különösen nagy segítséget jelentett az Aerotechnika

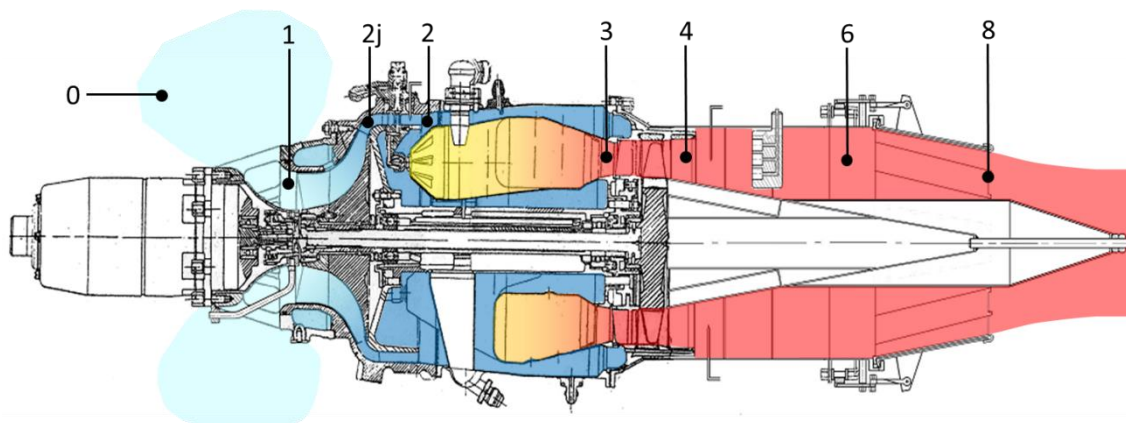
Vállalat pénzbeli támogatása, amelyet a műszerek, elsősorban különféle hőmérők beszerzésére használtunk fel. A Gépészmérnöki Kar Energetikai Gépek és Rendszerek nevű „testvér-tanszéke” több, elsősorban toroid transzformátorok átadásával segítette munkánkat.

A villamos problémák megoldásában a Közlekedésmérnöki Kar ilyen irányú tanszéke nyújtott segítséget.

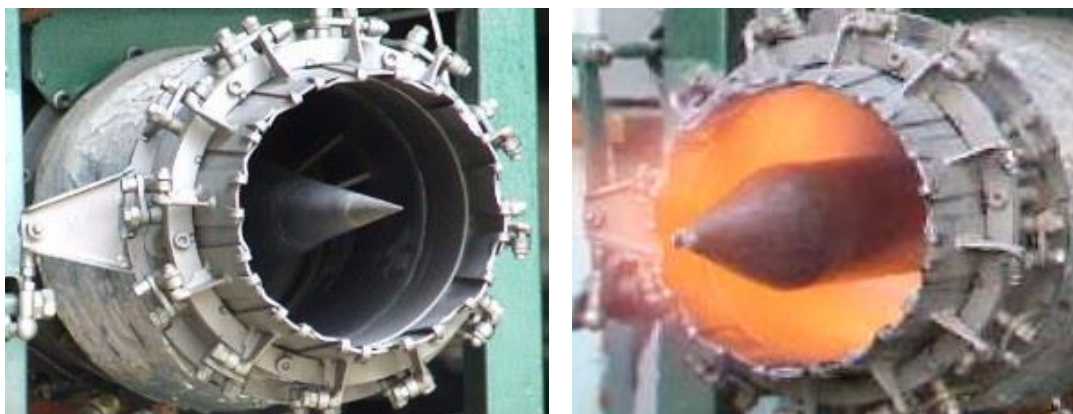
A hajtómű egyenfeszültségű indító motorjának áramellátása több problémát okozott. Transzformátorral nyert, több száz amperes váltóáram egyenirányításának megoldása nehézségbe ütközött. Több, sikertelen próbálkozás után akkumulátorból nyert egyenárammal és lényegében a saját indító-szabályozó egységének felhasználásával oldottuk meg végül.

Ezen indító gázturbina eredeti állapotában tengelyteljesítményt szolgáltatott, mely az indítandó berendezést nagy áttételű bolygóműves fordulatszám-csökkentő áttételen keresztül forgatta meg. Ezt a reduktort – és az azt meghajtó egyfokozatú axiális munkaturbinát – leszereltük, és a már említett technikusunk mestermunkáját, a folyamatosan változtatható keresztmetszetű fúvócsövet építettük a helyére. A 3. ábrán tekinthető meg a jelenlegi változat hosszmetzeti képe a jellegzetes aerodinamikai keresztmetszetek számozásával együtt. Ennek a kilépő keresztmetszetnek a kialakításakor ügyeltünk arra, hogy a fúvócső legfeljebb akkora terhelést hozhasson létre a sugárhajtóműnek, mint amekkorát a munkaturbina okozott. A kezdeti konstrukcióban a keresztmetszet jóval nagyobb volt, ez kisebb terhelést jelentett, a tapasztalatok alapján azonban további szűkítés, és ezáltal tolóerő növekedés volt elérhető, melyet a 4. ábra mutat összehasonlítóképpen.

A gázturbina centrifugális, radiális kompresszorral működik. Az ilyen nagyságú centrifugális kompresszorok már többnyire gyengén hátrahajló lapátózással készülnek. Az érdeklődő olvasó ennek a megoldásnak a termikus-áramlástani tulajdonságairól az [16] irodalomban kaphat bővebb felvilágosítást.



3. ábra A TKT-1 gázturbinás sugárhajtómű hosszmetzeti képe a jellegzetes keresztmetszetek jelöléseivel



4. ábra A TKT-1 eredeti és jelenlegi (nagyobb központi kúppal csökkentett keresztmetszetű) GSF szerkezete

Az eredeti indító gázturbinán a tüzelő- és kenőanyag szivattyúk egy egységben helyezkedtek el, önálló villanymotoros hajtással. Ezt a megoldást, némi változtatással megtartottuk: a várhatóan hosszabb üzemidők miatt két egységet állítottunk üzembe, egyikben a tüzelőanyag-, a másikban az olajszivattyút hagytuk meg.

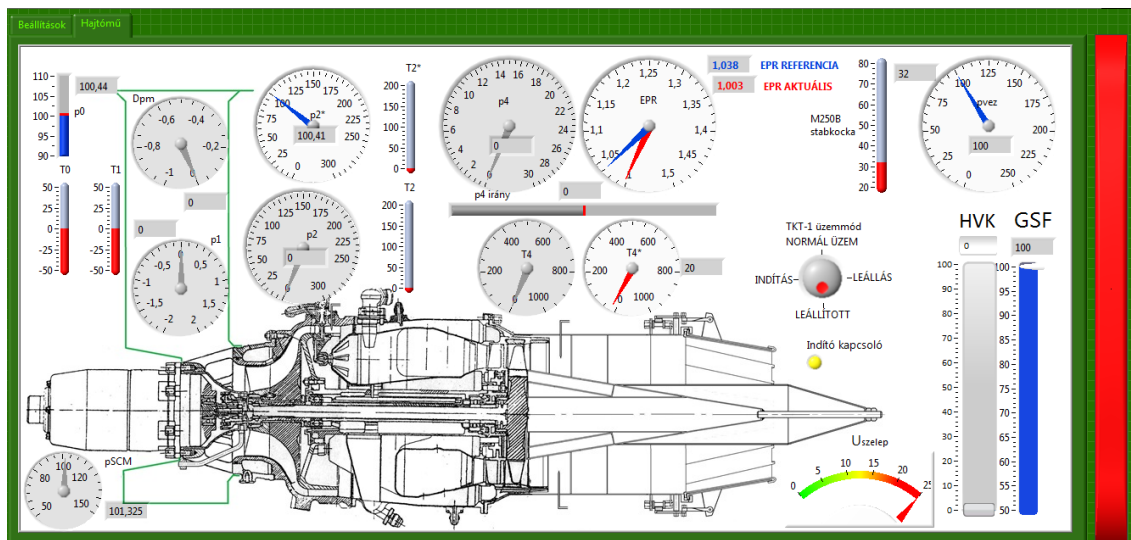
A hajtómű fordulatszámának meghatározásával sok gondunk volt. Az eredeti konstrukción nem volt lehetőség a mérésére, effajta eszköz elhelyezésére nem volt elegendő hely. Végül, több sikertelen konstrukció után a kompresszor tárcsájának megfestésével és optikai elven működő eszközt építettünk be az indítómotor tengelykapcsolóját áramvonalazó burkolaton belülré, ahol mindössze 5 mm széles gyűrű alakú helyen kellett elrendezni a szükséges alkatrészeket. Próbálkoztunk a fordulatszám-mérés termikus úton történő megoldásával, azonban pontossága vitatható volt.

A gázturbina a próbapadra történő felszereléskor egy hosszú függőleges szívócsatornát kapott, melynek célja kettős. Egyrészt biztosítja a kezelőszemélyzet biztonságát azáltal, hogy fej feletti térségből történik a beszívás, ez pedig a gázturbina szempontjából is kedvező, mert az idegen tárgyak bekerülésének esélye is minimális. Másrészt pedig a beszívó szájnak a DIN 5221 szabvány szerinti kialakításával nyert mérőperem segítségével a hajtómű által aktuálisan beszívott levegőmennyiség is meghatározható.

## A TKT-1 ÜZEMELTETÉSE

### Kezdeti próbálkozások

2007. december 5-én megtörtént az első sikeres üzemmódra kifutás, és ezzel megkezdődött a sugárhajtómű üzemi tesztelésének folyamata. Kezdetben még csak minimális mennyiségű adat mérése volt lehetséges, illetve a rendszer a felhasznált műszerek jellegéből adódóan csak pillanatnyi leolvasást tett lehetővé. Ez természetesen nyilvánvalóvá tette, hogy komplex mérő-adatgyűjtő rendszer kiépítése válik szükségessé a lehető legrövidebb időn belül. 2008 tavaszán ez meg is valósult, az automatikus rögzítéssel és valós idejű megjelenítéssel rendelkező program megfelelt az elvárásoknak. A meglévő hőelemek mellett a nyomások piezorezisztív érzékelőkkel történő mérésével a legfontosabb adatok immár a teljes üzemelésre vonatkozóan kiértékelhetőek voltak a mérés befejeztét követően is. A pillanatnyi leolvasás megkönnyítése érdekében a szoftver a jellemző értékeket a gázturbina metszeti képén mutatja meg, mely az 5. ábrán tekinthető meg.



5. ábra A mérő-adatgyűjtő program képe

## Üzemeltetési tapasztalatok

Az automatikus indító rendszer már 2008 nyarán elkészült, ezzel is növelve a megbízhatóságot és egyszerűsítve a kezelők munkáját. Az első kivétel egy egyszerű monostabil multivibrátor volt a széles körben alkalmazott 555 típusú integrált áramkör segítségével, mely 10 másodperces késleltetést biztosított az indítómotor és a gyújtás működtetésére. Amennyiben ezen időintervallumon belül az indítómotorban elhelyezett röpsúlyos kapcsoló elérte a lekapcsolási fordulatszámot, az bontotta az áramkört, az indítómotor védelme érdekében. Ha a tüzelőanyag-beáplálás ennyi időn belül nem vezetett az égés megindulásához, az indítási kísérlet automatikus megszakítását is biztosította az áramkör.

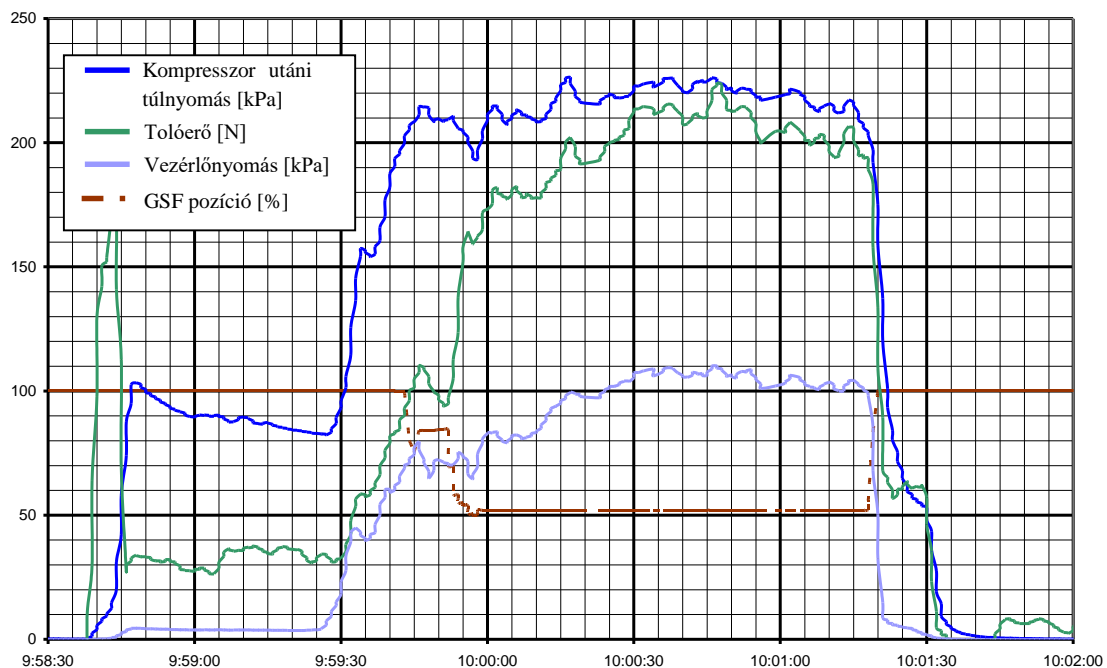
Az elmúlt több mint 7 év során összesen 184 indítási kísérletet hajtottunk végre, melyből 120 zárult teljes sikerrel. Érdekes, hogy a kezdeti sikeresség 65% környékén volt az első két (teljes) évben, 2010-ben érte el a rendszer akkori fejlettségének legfelsőbb fokát, és produkált 100%-os sikert. 2011-től megkezdődtek az elektronikus szabályozásnak a munkálatai, itt a még kipróbálatlan rendszer gyermekbetegségeinek következtében esett vissza ideiglenesen a sikeresség, ami a kezdeti nehézségek elhárítását követően ismételen emelkedő tendenciát mutat.

Év	Indítási kísérlet	Sikeres indítás	Üzemmódra kifutás	Sikeresség, %	Üzemidő (ó:pp:mm)	
					Éves	Összesített
2007	19	11	6	31,6	0:05:50	0:05:50
2008	46	32	29	63,0	0:34:22	0:39:12
2009	44	29	29	65,9	1:13:47	1:52:59
2010	8	8	8	100,0	0:43:37	2:35:36
2011	31	24	22	71,0	1:50:49	4:24:25
2012	14	10	10	71,4	0:40:31	5:04:56
2013	10	9	9	90,0	1:23:51	6:36:45
2014	5	5	5	100,0	0:51:32	7:26:17
2015	7	7	2	28,6	0:05:16	7:31:33

1. táblázat A TKT-1 eddigi üzemelésének összesítése

Végül az idei év a teljes hatáskörű elektronikus szabályozó rendszer bevezetésének köszönhetően ismételten jelentős romlást mutat, de hozzátesszük, hogy a csekély számú indítás miatt a tényleges érték nem feltétlenül összemérhető az előző évek számaival, ill. reményeink szerint ez a mutató a cikk megírását követően még javulhat. Az összegzést az 1. táblázat mutatja.

Először csupán rövid, 2–4 perces járatásokat végeztünk. 2010-ben már 5–10 perces üzemeléseket hajtottunk végre, melyek a hajtómű dinamikai viselkedését voltak hivatottak feltárni a szabályozórendszer megalkotása céljából. Ekkor szembesültünk a sokkal rövidebb működési időkre tervezett rendszerelemek gyengéivel, pl. a tüzelőanyag-szivattyú nyomáscsökkenésével, mely többször alapjárat alá történő lassulást jelentett, és lehetetlenné tette a normál üzemállapot újbóli elérését. Egy ilyen jellemző üzemviszonyokat taglaló diagram látható a 6. ábrán. Az ábra bal oldalán, a regisztrátum kezdetétől számított kb. 15 másodperc elteltével kezdődik a hajtómű indítása, mely nagyjából 5 másodperc alatt eléri az alapjáratit állapotot, de ez nem stabil, hanem csökkenő tendenciát mutat (az ábra a kompresszor utáni túlnyomást szemlélteti, mely arányos a fordulatszámmal), ami jelentős probléma, ha állandósult üzemállapotot szeretnénk vizsgálni. A mérés még a kézi üzem mód-állítást időszakában készült, mely egyértelműen rávilágít a megközelítés hibájára, mely szerint magasabb üzemmódokon sem lehetséges korrekt, stabil üzemállapotot előidézni, a paraméterek sztochasztikus változása megnehezíti a mérési eredmények értékelését. Nyilvánvaló volt tehát, hogy automatikus szabályozó rendszerre szükség van, melynek részleteit a cikkben később tesszük közzé.



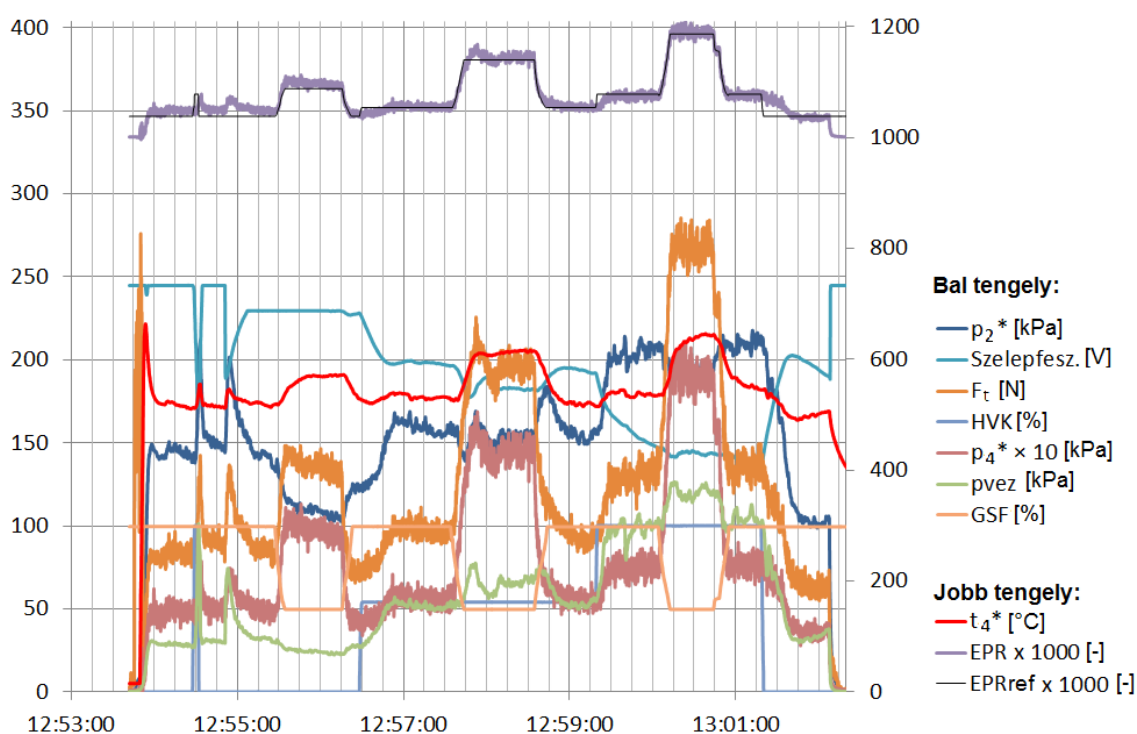
6. ábra Egy korai üzemelés (2010) jellemzői

Tekintettel az oktatási jellegre, bizonyos körülmények között – természetesen oktatói felügyelet mellett – hallgatók is végezhetnek méréseket a gázturbinán. Ehhez természetesen szükség volt a repülésben elterjedten alkalmazott dokumentációhoz hasonló leírás létrehozására, mely támaszul szolgálhat a berendezéssel ismerkedő hallgatók részére, hogy az adott feladat kivitelezése

kellő biztonsággal történhessen. Ehhez az üzemeltetési kézikönyvhöz is számos mérést végeztünk, többek között a gázsugár hőmérséklet-eloszlását a tartózkodási helyek kiválasztása céljából, valamint a környezet zajterhelésének vizsgálatát is.

A szabályozó rendszer megalkotását követően a mérések mind minőségi, mind mennyiségi oldalról jelentős változáson mentek keresztül. Az üzemállapot a korábbiakhoz mérten jóval stabilabb lett, az elért üzemidő egyetlen indításból többször is meghaladta a tíz percet, s volt alkalom, hogy a 19 percet is elértük (2014. március 26-án 19'05" volt az egy járatás során elért rekord üzemidő).

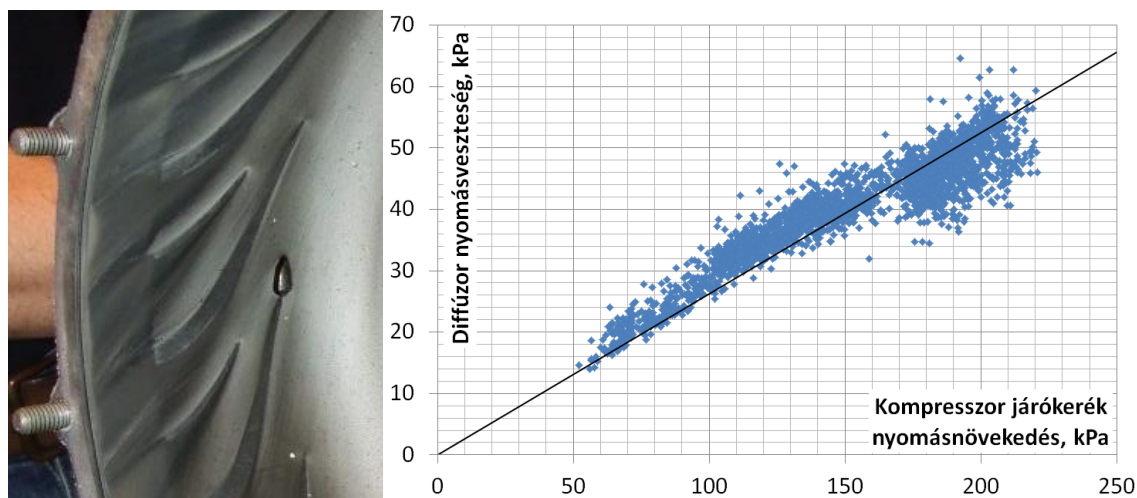
Egy tipikus működés adatfolyamát mutatja a 7. ábra. A diagram felső részén a jobb oldali tengelyhez tartozó EPR aktuális és referencia értékeinek 1000-szeresei láthatóak (tekintettel arra, hogy ezek az 1,0...1,2 tartományban mozognak normál üzemi viszonyok között a TKT-1 esetében). Amint megfigyelhető, a fő szabályozási paraméter alapvetően megfelelő módon követi a kijelölt referenciát, csak néhány esetben tapasztalható kisebb eltérés közöttük. Az utolsó lassítási folyamat 13:01:15 körül mutat jelentősebb késlekedést, itt azóta a szabályozórendszer módosításával már sikerült az anomáliát kiküszöbölni. A diagram alsó részén található adathalmaz többnyire a bal oldali tengelyhez tartozik, kivétel a turbina utáni gázhő,  $t_4^*$ , ez nagysága okán szintén a jobb oldali tengely értékeivel van összhangban. Fontos kiemelni ezek közül a tolóerő alakulását, mely egyértelmű összefüggést mutat az EPR értékének változásával, tehát teljes mértékben alkalmas a tolóerő közvetett szabályozására.



7. ábra Egy üzemelés jellemzői a szabályozórendszerrel (2013)

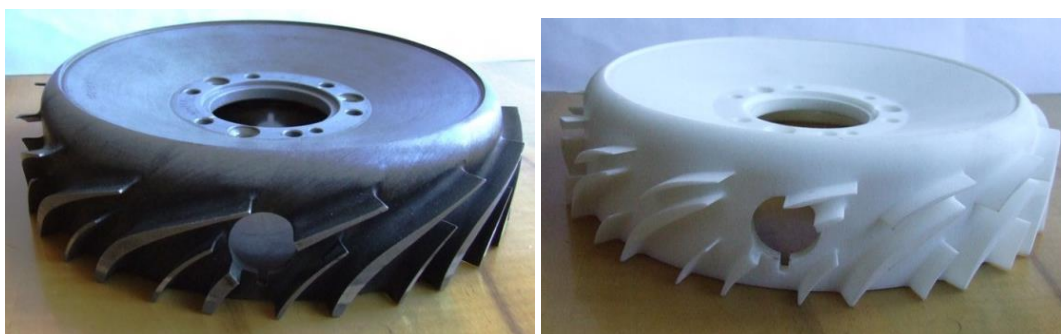
A mérési eredményeink alapján kiderült, hogy a centrifugális kompresszor diffúzorának igen jelentős nyomásvesztése van, mely felkeltette az érdeklődést egy új, kedvezőbb konstrukció megalkotására. A – szétszerelés után – szemmel látható leválási nyomok a ház belső falán és a mérési eredmények a 8. ábrán láthatóak. Ez azt is jelenti, hogy a névleges 3,5-es nyomásviszony esetében

már 90 kPa a várható diffúzor nyomásvesztés, vagyis a járókerék önmagában 4,4-nyi torlóponti nyomásviszonyt hozna létre, de ennek tekintélyes hányada elvész az állólapátokban.



8. ábra A centrifugálkompresszor diffúzorában megfigyelhető leválási nyomok

Tekintettel arra, hogy teherviselő feladatot nem lát el a hajtómű szerkezetében, illetve nem mozgó komponensről van szó, a megvalósítás viszonylag egyszerűnek tekinthető, legalábbis a forgórész áttervezésének kérdésköréhez képest. Egy jelenleg készülő diplomaterv keretében a elkészült és beépítésre került egy javított lapátos diffúzor, melyet a 9. ábra mutat, az eredetivel összehasonlításban.



9. ábra Az eredeti diffúzor és az áttervezett változat

### Alkalmazás az oktatásban

A sugárhajtóművel kapcsolatban születtek már sikeres tudományos diákköri munkák, kezdvén a fiatalabb szerzőtárs 2005-ben végzett termikus-áramlástanai számításával az átalakítást illetően; Zipszer Gábor 2008-ban a kompresszor aktív pompázsgátló rendszerének numerikus áramlástanai vizsgálatát végezte el, míg Pallag Nándor 2011-es munkájában a gázturbina körfolyamat numerikus áramlástanai modellezését készítette el.

### Diplomatervek és szakdolgozatok:

- Beneda Károly 2006 (matematikai modell)
- Sándor István 2008 (mérő-adatgyűjtő rendszer)
- Szirczák Dávid 2009 (állítható belépő terelő lapátsor számítása, tervezése);
- Szabó András 2009 (tolóerő-vektoráló berendezés tervezése, számítása);
- Bánsági Zoltán 2010 (üzemidő számítás és turbina végeselemes analízise);

- Kóti Dávid 2010 (szívócsatorna numerikus számítása);
- Pallag Nándor 2010 (turbina lapáthűtés vizsgálata, BSc);
- Balásházy János 2011 (elektronikus szabályozó megalkotása);
- Rácz Gábor 2011 (segédberendezés áttételház tervezése)
- Horváth Ádám 2013 (hajtómű nyomásviszony (EPR) alapú szabályozás megvalósítása)
- Pallag Nándor 2013 (gázturbina körfolyamat numerikus áramlástan modellezése MSc);
- Leposa Norbert 2013 (hajtómű teljesítményviszony (TPR) alapú szabályozás megvalósítása)
- Tolnai András 2014 (rezgésmérés és diagnosztika, MSc)
- *Kovács Péter 2015 (gázsebesség-fokozó redőnyzet automatikus állító rendszerének tervezése – folyamatban)*

Azt is fontos megemlíteni, hogy egy jelenleg folyamatban lévő PhD munka esetében bár nem ez a fő vizsgálatok tárgya, de kiváló eredményeket szolgáltat a felállított elméleti összefüggések validálására [10].

**Tantárgyak:** A Gázturbinák mérés technikája c. választható tantárgy először 2009 őszén indult, jelentős érdeklődéssel, összesen 12 hallgató teljesítette ezen alkalommal. Azóta már csaknem harmincra emelkedett az összlétszám, viszont meg kell jegyezni, hogy csak őszi félévekben indul, valamint 2011-ben az Egyetem lebontotta az Ae labor egy jelentős részét, ezzel csaknem teljesen ellehetetlenítve a kísérleti berendezés üzemét, és a normális rend csupán 2012-re állt helyre. Azóta a Közlekedés- és Járműmérnöki Kar döntése nyomán a megmaradt labor helyiségei közül számosat átvett a Gépjárművek és Járműgyártás Tanszék, és mindössze egy nagycsarnok maradt a VRHT birtokában. Ezzel további nehézségeket okoztak, mivel műhely híján csak a laborfoglalkozások szünetében lehetséges a fejlesztő munka a berendezésen, ami igen csak lecsökkenti a hatékonyságot, mivel Tanszékünk négy évfolyamszintű tárgy félévente összesen közel ötszáz hallgatójának tart laborokat, ami lényegében a félév nagy részében teljesen leköti a labor kapacitását. Ezen problémák dacára 2015 tavaszán elindult Gázturbinák elektronikus szabályozása mely a terv szerint a másik tárgy kiegészítéseként tavaszi félévekben kerül meghirdetésre. Az első alkalommal 13 fő teljesítette a tárgyat.

### **Nemzetközi kapcsolatok**

A sugárhajtóműves próbapad megépítésének ötletét eredetileg a Kassai Műszaki Egyetemen hasonló gázturbinán alapuló MPM-20 adta. Az ottani kutatókkal 2009-ben kezdődött az azóta is ápoltság, melyet több ízben történő kölcsönös látogatások, illetve egymás munkájának segítése révén erősítünk. Az ottani fejlesztések javarészt a szabályozással kapcsolatban folynak [13], a TKT-1 esetében pedig a folyamatosan állítható gázkiáramlás-sebességfokozó redőnyzet jelentett olyan többletet, melyet az együttműködés során megoszthattunk egymással [3].

A kassai kollégákkal kialakult kapcsolat nyomán 2013 tavaszán a brnoi Honvédelmi Egyetem Légierő és Repülőgépek Tanszékének munkatársai tettek látogatást és szemlélték meg a TKT-1-est. Az ottani kisméretű gázturbinás próbapad szintén hasonló alapokon került kifejlesztésre [17], és emellett a centrifugális kompresszorok instabil jelenségeinek és azok megakadályozására szolgáló rendszerek vizsgálata folyik ott [14].

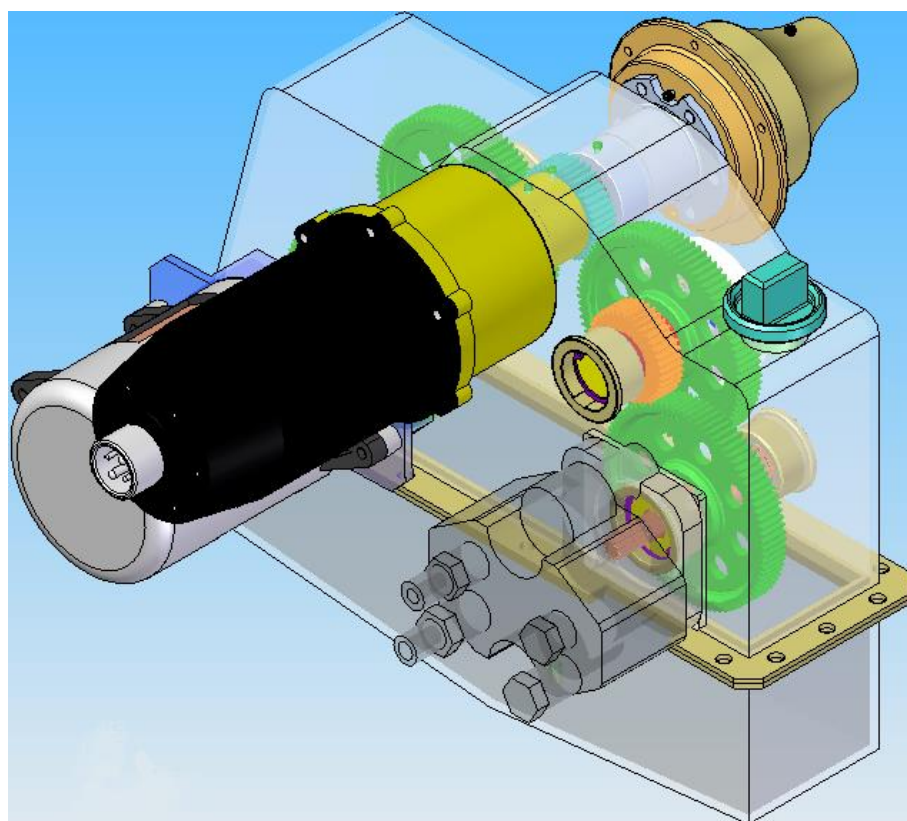
## FEJLESZTÉSEK AZ ÜZEMBE ÁLLÍTÁS ÓTA

### A szivattyúegység próbapadja

Az egyre hosszabb üzemelések az eredetileg 40 másodpercnyi egyhuzamban végzett munkára készült szivattyúegységeknek a normálistól eltérő viselkedését hozták, mint az a fentiekben megállapításra került. Annak érdekében, hogy a rendellenességek és a későbbiekben bemutatásra kerülő meghajtásházhoz történő illesztés kapcsán felmerülő vizsgálatokat elvégezhessük, létrehoztunk egy különálló próbapadot, mely a 924-es tüzelőanyag-olaj szivattyúegység ellenőrzésére szolgál. A kialakításról a [12] cikkben számoltunk be részletesen.

### Segédberendezések áttételháza

Egy BSc szakdolgozat keretében egy hallgató megtervezte a segédberendezések áttételházát, mely szükségtelenné tenné a szivattyúk villamos meghajtását, és ezzel jóval kedvezőbb üzemeltetési viszonyokat tudna teremteni. Az áttételház alkatrészei nemrégiben elkészültek a kis-kunfélegyházi Ho-Fém Kft. jóvoltából, és reményeink szerint a közeljövőben megkezdődhetnek az első félüzemi próbái. A meghajtásház és a rá épített segédberendezések látványterve a 10. ábrán látható [12].



10. ábra A segédberendezések áttételházának terve

## Teljes hatáskörű digitális, elektronikus szabályozórendszer (FADEC<sup>1</sup>)

Amint arról már 2009-ben számot adtunk [6], az egyik legérdekesebb és legösszetettebb feladat a szabályozórendszer megalkotása és fejlesztése. Az első hosszabb kísérletek után 2011-ben már megvolt a kellő tapasztalat a gázturbina viselkedését illetően, és megindulhatott az első, egyszerű elektronikus szabályozó tervezése, mely a kezelő által kiválasztott munkapont beállítását és megtartását volt képes megvalósítani, miközben minden egyéb feladat (indítási és leállítási sorrendvezérlés, stb.) maradt kézi kivitelezésű. Ezt a rendszert PELE fantázianéven hoztuk létre [8].

A szabályozó több továbbfejlesztésen ment keresztül, és a FADEC rendszer előfutáraként először próbáltunk ki rajta újfajta szabályozási törvényszerűségeket, úgy mint  $EPR^2$  és  $TPR^3$ , melyek definíciói az alábbiakban láthatóak, amikben az indexek egybevágóak a 3. ábra jelöléseivel.

$$EPR = \frac{p_4^*}{p_1^*} \quad (1)$$

$$TPR = \frac{p_2^*}{p_1^*} \cdot \sqrt{\frac{T_3^*}{T_1^*}} \quad (2)$$

ahol  $p_1^*$  a kompresszor előtti,  $p_2^*$  a kompresszor utáni, valamint  $p_4^*$  a turbina utáni torlóponyi nyomás. A turbina előtti torlóponyi hőmérsékletet  $T_3^*$ , a kompresszor előtti  $T_1^*$  jelöli. Az utóbbi paramétert a Rolls-Royce kezdte el használni legfejlettebb nagy kétáramúsági fokú hajtóművein [20]. Szerzőtársunk bizonyította, hogy nemcsak kétáramú hajtóműveken alkalmazható ez a módszer [9], hanem egyáramú sugárhajtóművek esetében is tökéletes kapcsolat található a  $TPR$  paraméter és a tolóerő között, tehát ez a jellemző használható a szabályozás alapjául. Megjegyzendő, hogy a gyakorlatban a turbina előtti hőmérséklet mérése több okból kifolyólag nehézkes, ezért a kialakított rendszerek – köztük a TKT-1-é is – a turbina utáni hőmérséklettel helyettesíti. Ez a TKT-1-en gyűjtött mérési adatok alapján a 11. ábrán látható.

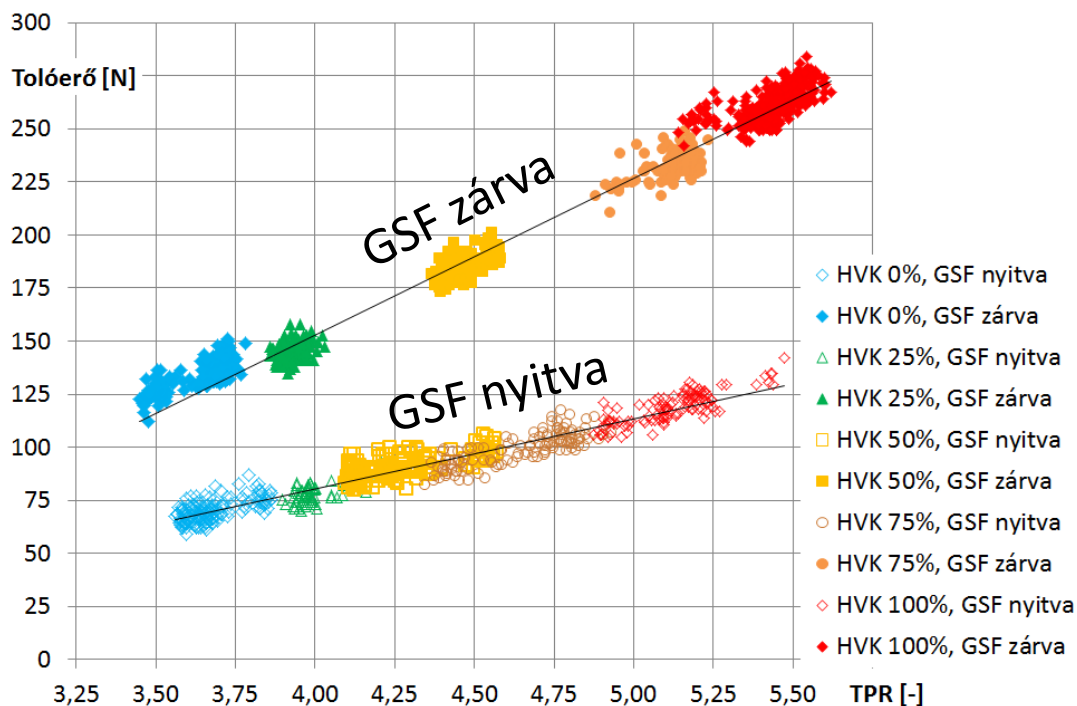
A szabályozórendszer teljes egészében saját fejlesztés, a moduláris hardverelemektől kezdve a szoftverig bezárólag. Létrehozásakor fontos szempont volt, hogy a berendezés oktatási célokkal is rendelkezik, így ennek a rendszernek a nagy hajtóművek hasonló egységeit is modelleznie kell, hogy a hallgatók tapasztalatot szerezhessenek ezen a téren is.

A szabályozó moduláris felépítésű, az egyes, jól körülhatárolható feladatok ellátásáért különálló áramkörök felelnek. A jelenlegi kiépítésben (lásd 12. ábra) rendelkezünk egy nyomás- és egy hőmérséklet-mérő modullal, valamint a szabályozás megvalósításáért felelős egységgel. A későbbiekben tervezzük egy második csatorna beépítését, mellyel a napjainkban elterjedt kétcsatornás kialakítások működése is vizsgálható lenne.

<sup>1</sup> FADEC: Full Authority Digital Electronic Control, teljes hatáskörű digitális, elektronikus szabályozórendszer

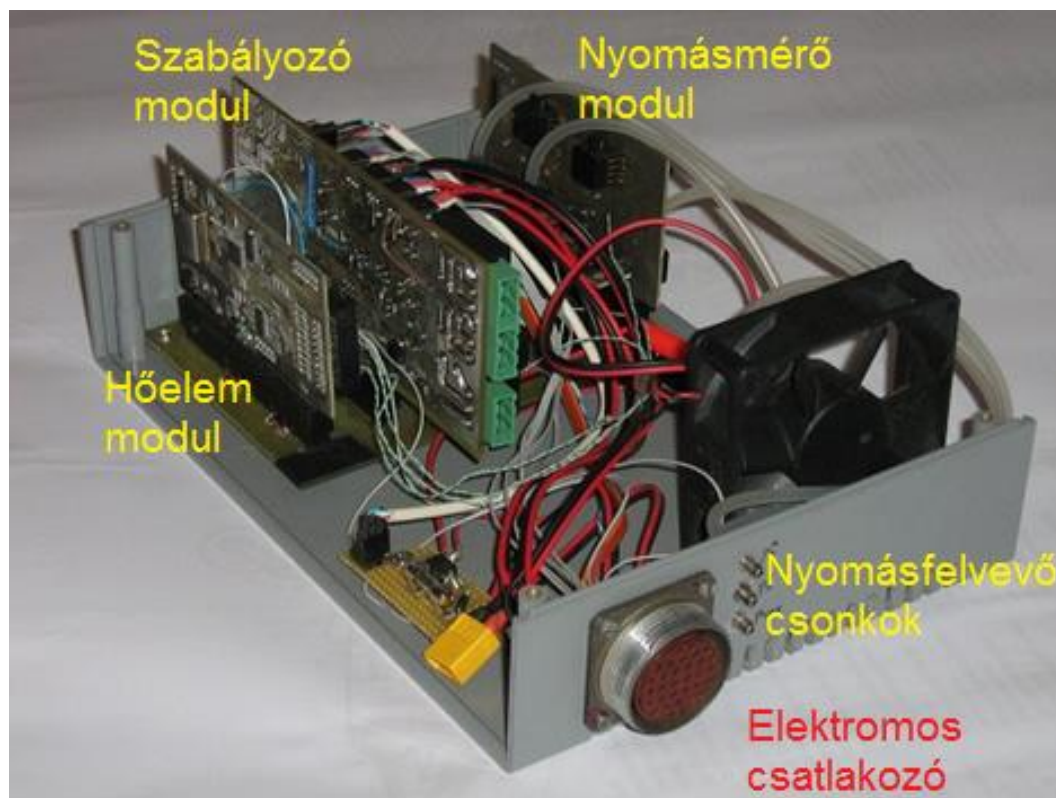
<sup>2</sup>  $EPR$ : Engine Pressure Ratio, hajtómű nyomásviszony

<sup>3</sup>  $TPR$ : Turbofan Power Ratio, hajtómű teljesítményviszony



11. ábra Tolóerő és TPR összefüggése a TKT-1 sugárhajtómű esetében

A fő szabályozásért felelős modul szoftvere jelenleg egy egyszerű proporcionális-integráló-deriváló (PID) algoritmust implementál, mely az EPR szerinti üzemmódot valósítja meg (a TPR külön programként opcionálisan választható). A gázturbina átviteli függvényének meghatározásakor nagyban támaszkodtunk a [21] irodalomban közöltekre, valamint a Tanszéken korábban ebben a témakörben megvédett doktori munka során nyert eredményekre [1].



12. ábra A szabályozó rendszer jelenlegi kialakítása

## ÖSSZEFOGLALÁS

### Elért eredmények

A szerzők sikeresen létrehoztak egy kísérleti sugárhajtóműves berendezést, mely oktatási és kutatási feladatok terén is megállja a helyét. Viszonylag kicsiny mérete gazdaságos üzemeltetést tesz lehetővé, de mivel nem túlzottan miniatűr, az egyes mérési feladatok megvalósítása sem ütközik túlzott nehézségekbe.

A gázturbina az elmúlt nyolc évben, amikor már tényleges üzemeltetésekre is sor került, általában megbízhatóan működött, egyes rendszerelemek gyengeségei, gyermekbetegségei miatt természetesen tapasztaltunk rendellenességeket, de ezek sosem vezettek meg nem engedett üzemállapothoz.

A kialakított mérő-adatgyűjtő rendszer alapos ismereteket szolgáltat, mellyel megalapozható volt a korszerű, FADEC elven kialakított szabályozás.

A hajtómű jelentős szolgálatot tett az elmúlt években végzett repülőgépezés szakos hallgatóknak, akik ily módon igen fontos ismeretekre tettek szert a gázturbina üzemeltetésével, termodinamikai jellemzőivel kapcsolatban.

### Továbbfejlesztési lehetőségek

A sugárhajtómű az eredeti elképzelésekhez képest jelentősen fejlődött az elmúlt évek során, de ez természetesen nem jelenti azt, hogy ne lenne lehetőség további módosításokra, javításokra. Mivel ilyen helyzetben igen széles a lehetőségek tárháza, csupán átfogó képet próbálunk meg felvázolni a legfontosabbak megemlítésével.

A gázturbina módosítása, forgó- vagy állólapátok optimalizálásával kedvezőbb üzemi viszonyok teremthetők, illetve erre vonatkozó módszerek próbálhatóak ki.

Napjainkban az alternatív hajtóanyagok szintén fontos kutatási területet képviselnek, ezen a téren is jelentős kutatások végezhetőek.

Szándékozunk sugárfordító rendszert is kiépíteni, mellyel tovább bővíthetőek a próbapad képességei. Ezen felül a tolóerő vektorálás lehetősége is számottevő jelentőséggel bír.

A rendszerek kapcsán a szabályozás területén számottevő a perspektíva. Lehetőség nyílik másfajta szabályozási algoritmusok, illetve törvényszerűségek tesztelésére, illetve a meglévő komponensek továbbfejlesztésére. Tekintettel a sugárhajtómű széles üzemmód-tartományban mutatott nemlineáris viselkedésére, effajta szabályozási rendszer létrehozása nagyfokú előrelépést jelentene a mostanihoz képest.

**FELHASZNÁLT IRODALOM**

- [1] AILER PIROSKA: Mathematical Modeling of a Low-Power Gas Turbine Engine and its Control System. ICAS 2000 Congress, pp. 752.1-7 (online) [http://www.icas.org/ICAS\\_ARCHIVE/ICAS2000/PAPERS/ICA0752.PDF](http://www.icas.org/ICAS_ARCHIVE/ICAS2000/PAPERS/ICA0752.PDF) (2015. 11. 22.)
- [2] R. ANDOGA, L. FŐZŐ, L. MADARÁSZ, és T. KAROL': A Digital Diagnostic System for a Small Turbojet Engine. Acta Polytechnica Hungarica. Vol. 10, no. 4, 2013, pp. 45-58. ISSN 1785-8860 (online) url: [http://www.uni-obuda.hu/journal/Andoga\\_Fozo\\_Madarasz\\_Karol\\_42.pdf](http://www.uni-obuda.hu/journal/Andoga_Fozo_Madarasz_Karol_42.pdf) (2015. 11. 16)
- [3] R. ANDOGA, M. KOMJÁTY, L. FŐZŐ, L. MADARÁSZ: Design of the variable exhaust nozzle control system for a small turbojet engine MPM-20. SAMI 2014, IEEE 12th International Symposium on Applied Machine Intelligence and Informatics, proceedings: January 23-25, 2014, Herľany, Slovakia. IEEE , 2014 pp. 195-199. - ISBN 978-1-4799-3441-6
- [4] BENEDA KÁROLY: Épülő kisméretű kísérleti sugárhajtómű termikus-áramlástanai számítása és átalakításának problémái. TDK dolgozat, BME, 2005.
- [5] BENEDA KÁROLY: Kisméretű kísérleti sugárhajtómű építése. Szolnoki Repüléstudományi Konferencia, 2006, (online) [http://www.repulestudomany.hu/kulonszamok/2006\\_cikkek/beneda\\_karoly.pdf](http://www.repulestudomany.hu/kulonszamok/2006_cikkek/beneda_karoly.pdf) (2015. 11. 16)
- [6] BENEDA KÁROLY TAMÁS: Teljes hatáskörű digitális gázturbina szabályzás (FADEC) fejlesztése kisméretű sugárhajtóműves berendezéshez. Szolnoki Repüléstudományi Konferencia, 2009, (online) [http://www.repulestudomany.hu/kulonszamok/2009\\_cikkek/Beneda\\_Karoly\\_Tamas.pdf](http://www.repulestudomany.hu/kulonszamok/2009_cikkek/Beneda_Karoly_Tamas.pdf) (2015. 11. 16)
- [7] BENEDA KÁROLY: Development of active surge control devices for centrifugal compressors. PhD értekezés, BME, 2013. (online) <https://repozitorium.omikk.bme.hu/bitstream/handle/10890/1243/ertekezés.pdf?sequence=1&isAllowed=y> (2015. 11. 16)
- [8] BENEDA KÁROLY: Hajtómű nyomásviszony (EPR) alapú szabályozás megvalósítása a TKT-1 gázturbina sugárhajtóművön. Szolnoki Repüléstudományi Konferencia, 2014, (online) [http://www.repulestudomany.hu/kulonszamok/2014\\_cikkek/2014-2-17-0154\\_Beneda\\_Karoly\\_Tamas.pdf](http://www.repulestudomany.hu/kulonszamok/2014_cikkek/2014-2-17-0154_Beneda_Karoly_Tamas.pdf) (2015. 11.22)
- [9] BENEDA KÁROLY: Modular Electronic Turbojet Control System Based on TPR. Acta Avionica, Vol. XVII., 31 – No. 1 (2015), pp. 2-14. ISSN 1335-9479.
- [10] BICSÁK GYÖRGY, FOROOZAN ZARE, VERESS ÁRPÁD: Gázturbina égésfolyamatának vizsgálata különböző égésmoделlekkel. A Jövő Járműve: Járműipari Innováció 2012:(3/4) pp. 46-51. (2012)
- [11] BICSÁK, GY., JANKOVICS I.: High level software support of aircraft and design skill development. READ 2012 Conference, Brno, Oct. 17-18, 2012, CD-ROM Proceedings, Paper\_READ2012\_Jankovics\_István\_Bicsák\_Gyorgy, pp 1 - 15, ISSN 1425-2104.
- [12] HORVÁTH ÁDÁM, TÓTH VILMOS, és BENEDA KÁROLY TAMÁS: A TKT-1 gázturbina sugárhajtómű tüzelőanyag- és szabályozórendszerének fejlesztése. Szolnoki Repüléstudományi Konferencia, 2012, (online) [http://www.repulestudomany.hu/kulonszamok/2012\\_cikkek/70\\_Horvath\\_Adam-Toth\\_Vilmos-Beneda\\_Karoly-Lektoralt.pdf](http://www.repulestudomany.hu/kulonszamok/2012_cikkek/70_Horvath_Adam-Toth_Vilmos-Beneda_Karoly-Lektoralt.pdf) (2015. 11. 22.)
- [13] J. HRABOVSKÝ, R. ANDOGA, L. FŐZŐ: Designing a digitally controlled fuel system for an experimental small turbojet engine. CINTI 2014, 15th IEEE International Symposium on Computational Intelligence and Informatics. Proceedings, November 19-21, 2014, Budapest. IEEE, 2014 pp. 491-496. ISBN 978-1-4799-5337-0
- [14] JILEK, A.; KMOCH, P.; POLEDNO, M.: Internal recirculation channel application in centrifugal compressors, International Conference on Military Technologies (ICMT), 2015, vol., no., pp.1-6, 19-21 May 2015, Brno, doi: 10.1109/MILTECHS.2015.7153675
- [15] NAGY A. és JANKOVICS I.: Laboratóriumi berendezések mérő és adatgyűjtő rendszereinek korszerűsítése a BME Repülőgépek és Hajók Tanszék hő- és áramlástechnikai laboratóriumában. Repüléstudományi Közlemények XXV. (2013/1) pp. 53-60. (online) [http://www.repulestudomany.hu/folyoirat/2013\\_1/2013-1-05-Nagy\\_Andras-Jankovics\\_Istvan.pdf](http://www.repulestudomany.hu/folyoirat/2013_1/2013-1-05-Nagy_Andras-Jankovics_Istvan.pdf) (2015. 11. 22.)
- [16] PÁSZTOR E., VARGA B.: Energy and Aerodynamic Examination of Slightly Backward Leaning Impeller Blading of Small Centrifugal Compressors. Periodica Polytechnica Transportation Engineering, Budapest 43(4), pp. 199-205, 2015, doi: 10.3311/PPtr.8093
- [17] JIŘI PEČINKA, ADOLF JÍLEK: Preliminary Design of a Low-Cost Mobile Test Cell for Small Gas Turbine Engines. ASME Turbo Expo 2012: Turbine Technical Conference and Exposition. DOI: 10.1115/GT2012-69419
- [18] Re/872. Az 55 típusú hajtómű műszaki üzemeltetési szakutasítás 2. könyv. Honvédelmi Minisztérium, 1980.
- [19] J. ROHACS, AND D. ROHACS: Ride Control for the Personal Plane. Proceedings of the 28th International Congress of the Aeronautical Sciences (ICAS), ISBN 978-0-95653333-1-9, ICAS 2012-5.3.2, Brisbane, Australia, Sept. 23 – 28, 2012.

- [20] A. L. ROWE, N. KURZ: Control System for a Ducted Fan Gas Turbine Engine. United States Patent No. 5887419, 1999, (online) <http://patentimages.storage.googleapis.com/pdfs/US5887419.pdf> (2015. 11. 16)
- [21] A. WATANABE, S. M. ÖLÇMEN, R. LELAND, K. W. WHITAKER, és L. C. TREVINO, "Soft Computing Applications on SR-30 Turbojet Engine," 1st AIAA Intelligent Systems AIAA Technical Conference. Paper Number 2004-6444, (online), url: [http://www.turbinetechnologies.com/portals/0/pdfs/gas\\_turbine\\_tech\\_sheets/nasa-marshall.pdf](http://www.turbinetechnologies.com/portals/0/pdfs/gas_turbine_tech_sheets/nasa-marshall.pdf) (2015.10.25)
- 

***FIRST TEN YEARS OF TKT-1 SMALL SCALE GAS TURBINE ENGINE FOR EDUCATIONAL AND RESEARCH PURPOSES***

*In 2005, at the former Department of Aircraft and Ships of BME a monumental development work has begun, which had the goal to establish a small scale turbojet engine for both educational and research purposes. The initial investigations and reconstruction of a free shaft gas turbine have consumed more than two years, until the test bench has been created and the first operational tests have been conducted. The equipment has been developed in many aspects further, the involvement of students is quite broad ranging from electable subjects as well as BSc and Master Theses, so the students have the possibility to gather practical knowledge of aircraft gas turbine engines. The aim of this article is to demonstrate the process of reconstruction, the results of operation in the mirror of the past ten years.*

**Keywords:** *gas turbine engine, gas turbine test bench, Full Authority Digital Electronic Control, variable convergent nozzle, data acquisition system*

---



[http://www.repulestudomany.hu/folyoirat/2015\\_3/2015-3-09-0238\\_Pasztor\\_E-Beneda\\_K\\_T.pdf](http://www.repulestudomany.hu/folyoirat/2015_3/2015-3-09-0238_Pasztor_E-Beneda_K_T.pdf)