

KISMÉRETŰ KÍSÉRLETI SUGÁRHAJTÓMŰ ÉPÍTÉSE

BEVEZETÉS

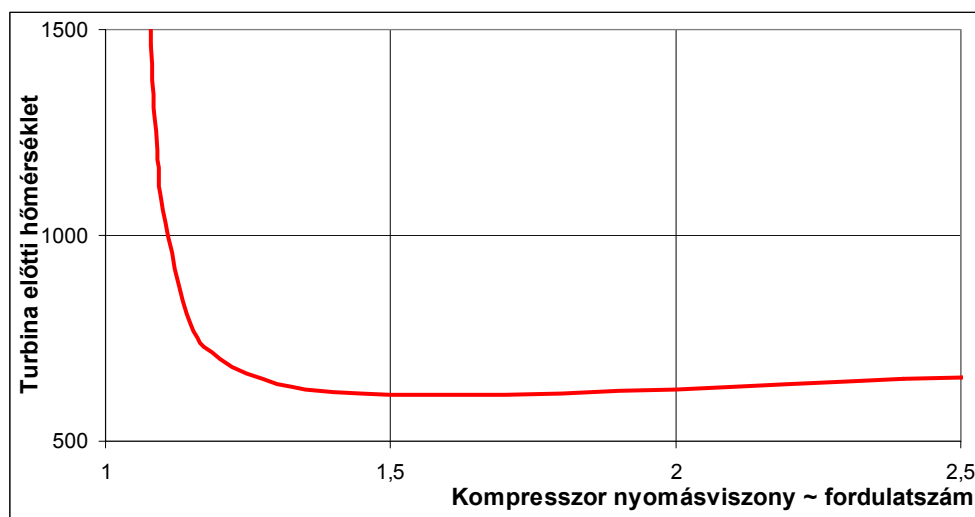
A BME Repülőgépek és Hajók Tanszéken egy kísérleti, kutatási és oktatási célú gázturbinás sugárhajtómű megépítése folyik. A hajtómű a Magyar Honvédség által rendelkezésére bocsátott, TSz-21 típusú, indító gázturbina megfelelő átalakításával valósulhat meg.

Megvalósítása nagymértékben hozzájárul a Tanszék repülőgép-hajtóművek területén folytatott tudományos kutatómunkáinak szélesítéséhez, a hazai szakemberképzés gyakorlatiasabbá tételéhez.

A TSZ-21 INDÍTÓ GÁZTURBINA

A gázturbinák indításának elméleti alapjai

A gázturbinák a veszteséges körfolyamat három főbb vesztesége miatt (kompresszor hatásfok, turbina hatásfok, tüzelőtér nyomásvesztés) egy adott minimális üresjáratú fordulatszám alatt nem üzemeltethetők, mert ehhez fentről közelítve, ahogyan a kompresszor nyomásviszony az égéstér nyomásvesztéséhez tart, a turbina előtti hőmérséklet elméletben a végtelenbe szökik (1. ábra). Az indítás folyamata lényegében üresjáratnak tekinthető, ezért az indítás célja, hogy a gázturbina forgórészét az elméleti minimális fordulatszám fölé gyorsítva a körfolyamat önfenntartása biztosított legyen.



1. ábra: Turbina előtti üresjáratú hőmérséklet a kompresszor nyomásviszony függvényében

A gázturbinák indításának elterjedt módjai

Egyik lehetőség, hogy egy elektromos motor segítségével növelik a forgórész fordulatszámát a kívánt minimális fölé. Kisebb hajtóművek – néhány száz kW kompresszió teljesítmény – esetén még a fedélzeti akkumulátor is elegendő áramerősséget tud biztosítani, a forgórész

tömegének növekedése szükségessé teszi a külső áramforrást, ami lerontja a repülőgép mobilitását, ez mind katonai alkalmazások terén, mind polgári használatban hátrányt jelent.

A nagy hajtóművek fedélzeti berendezések használatával történő beindítása egy kisméretű indító gázturbina jelenlétét igényli. Ez a gázturbina termelhet villamos áramot, vagy sűrített levegőt; illetve lehet egy munkaturbinán keresztül mechanikus kapcsolatban a főhajtómű forgórészével.

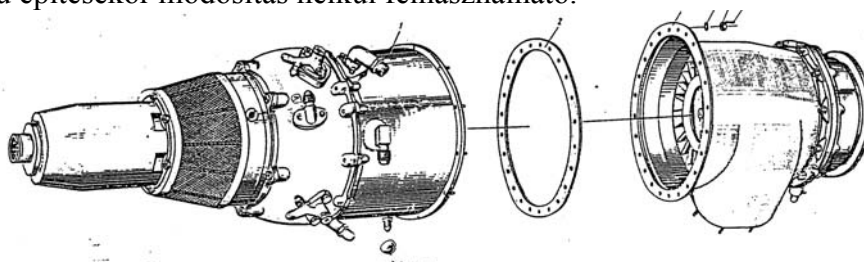
A TSz-21 gázturbina jellemzői

A TSz-21 egy egyáramú, munkaturbinás (szabad tengelyes) repülőgép-fedélzeti indító hajtómű. Gázgenerátora egyfokozatú centrifugális kompresszorból és egyfokozatú axiális turbinából áll. Égéstere gyűrűs-csöves rendszerű, négy tüzelőanyag-fűvókával. Az égésgázok egy terelőlapátsor nélküli munkaturbina járókeréken átáramolva hajtanak egy bolygóműves áttételt, amely a repülőgép sugárhajtóművének nagynyomású forgórészére viszi át a nyomatékot. A leexpandált munkaközeg oldalt, egy téglalap alakú nyíláson keresztül távozik az atmoszférába. A hajtómű mindössze a főhajtómű megindítására szolgál, nem használatos kiegészítő energiaforrásként (APU).



2. ábra: A TSz-21 szabad turbinás indító hajtómű

A 3. ábrán megfigyelhető, hogy a TSz-21 két fő szerelési egységre, a gázgenerátorra, és a munkaturbinás kihajtó egységre bontható. Ez azért lényeges, mert a gázgenerátor a sugárhajtómű építésekor módosítás nélkül felhasználható.



3. ábra: A TSz-21 hajtómű összeszerelési rajza

A főbb adatok[4]

1. táblázat

Nyomásviszony	$2 \div 2,5$
Fordulatszám	50500 1/min
Számított tömegáram	1,18 kg/s
Turbina előtti számított gázhőmérséklet állandósult üzemmódon	850 °C
Az állandósult üzemmód elérésének ideje	5-15 sec.
Az indítás maximális időtartama	40 sec.
Az indítás alatt elfogyasztott tüzelőanyag, legfeljebb	1,2 kg

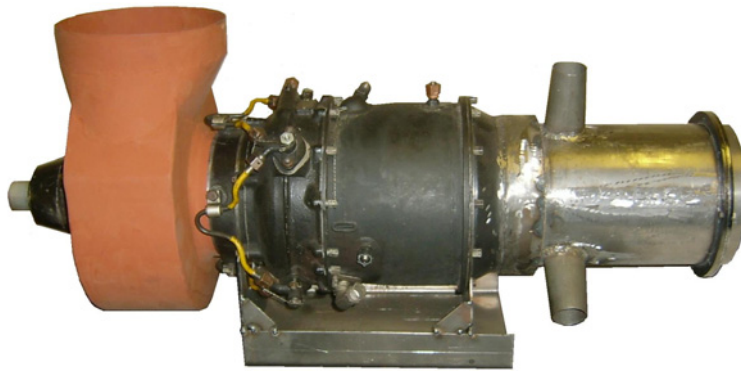
A SUGÁRHAJTÓMŰVÉ ALAKÍTÁS LÉPÉSEI

Szívócsatorna

Az eredeti konstrukcióban a TSz-21 a MiG-23, illetve Szu-22 főhajtóművére volt rögzítve, és a repülőgép sarkányán megfelelően kialakított csatornán keresztül áramlott be a munkaközeg.

Az átalakítás előtt a főhajtóműről eltávolított TSz-21-nek különböző biztonsági és műszaki megfontolásoknak megfelelő új szívócsatornát kellett tervezni, mely konstrukcióját tekintve egy szívócsőből és egy gyűjtőházból áll, ami a TSz-21 beömlőnyílásához csatlakozik. A szívócső végére kerül felszerelésre egy mérőperem, amivel a hajtóműbe beáramló közeg mennyiségét lehet a kísérleti mérések során meghatározni.

A szívócső függőlegesen kerül beépítésre, ami mind a hajtómű, mind a közelében tartózkodók biztonságát szolgálja, így elkerülhető a földről vagy személyek ruházatáról apró tárgyak bekerülése a hajtóműbe, ami a berendezés sérülését okozhatja, és személyi sérüléssel is járhat.



4. ábra: A sugárhajtómű még szívócső nélküli gyűjtőházzal

Fúvócső

A sugárhajtóműként való üzemeltetéshez elengedhetetlen, hogy az eredetileg gázgenerátor turbina utáni rendelkezésre álló nyomásviszonyt kihasználva, a közeg szabályozottan expandálhasson, ezáltal olyan sebességre tegyen szert, amely tolóerőt szolgáltat. Ehhez szükség van egy fúvócsőre, illetve azon belül egy áramvonalazó kúpos központi testre, amely a turbina tárcsa utáni térben folytonos átmenetet biztosít a fúvócső be- és kilépő keresztmetszetei között, és egy axiálisba fordító lapátkoszorúra, mert számításaim szerint jelentős tangenciális sebességgel lép ki a közeg a turbinából, s tengelyirányba terelve az áramlást, megnövelhető a hajtómű tolóereje.

Emellett a fúvócső megfelelő szerkezeti kialakításával megoldható a turbinatárcsa hűtése is, mivel a TSz-21 indító gázturbina eredeti üzemeltetési viszonyai között mindössze 40 (MiG-23) ÷ 50 (Szu-22) másodperc ideig működött. Ennyi idő alatt nem melegedtek át a hajtómű turbinatárcsái és lapátjai, a hűtést a természetes hővezetés jelentette, mely a hajtómű hideg részei felé vonta el a hőt a forró égésgázoknak közvetlenül kitett alkatrészekről.

Sugárhajtóműként 3 ÷ 5 perces időtartamú kísérleti üzemeltetéssel számolhatunk, nem hanyagolhatjuk el a gázturbina felmelegedését, és az ebből származó jelentős hőterhelést. Ennek kivédésére két járható út kínálkozik.

Az első lehetőség, hogy a kísérleti üzemeltetés során betáplált maximális tüzelőanyag-mennyiség is alacsonyabb legyen, mint a műszaki leírásokban ([2],[4],[7]) megadott számított turbina előtti gázhőmérséklet, vagyis a kisebb hőmérséklet hatására kisebb mértékű hőterhelése lesz a hajtóműnek.

Az alacsonyabb turbina előtti hőmérséklet alacsonyabb forgórész fordulatszámot is jelent, aminek jótékony hatása a szilárdsági terhelések csökkentésében mutatkozik meg. Ez azért is célszerű, mert a kisebb igénybevételek mellett üzemeltetett hajtómű várhatóan nagyobb élettartammal fog rendelkezni, vagy másként megfogalmazva, ugyanakkora üzemidőre számítva nagyobb lesz a biztonsági tényezője.

Lévé, hogy a turbina előtti hőmérséklet csökkentése a hajtómű karakterisztikáját figyelembe véve csak korlátozottan használható, mivel létezik egy $T_{3\min}^*$, amely alatti turbina előtti hőmérsékletek esetén a turbina nem tud elegendő munkát szolgáltatni a kompresszor hajtására, a hajtómű működésképtelen. Ebből levonható az a következtetés, hogy az ezzel a módszerrel elérhető hőmérséklet-csökkenés a hőterhelést nem befolyásolja jelentős mértékben. Szükséges tehát a hőterhelésnek leginkább kitett alkatrészeket hűteni.

A lapát- és tárcsahűtés tervezésekor azonban szem előtt kellett tartani, hogy lehetőség szerint minél kisebb konstrukciós átalakítással járjon az eredeti hajtóművet tekintve, ezáltal könnyebben, biztonságosabban megvalósítható legyen a hűtés. Ilyen megfontolások miatt kellett eltekinteni a gázgenerátor turbina lapátjainak közvetlen hűtésétől, illetve a két oldalról történő tárcsahűtés kivitelezésétől, mert mindkettő jelentős módosítást igényelt, ami a szerkezet megbontásával járt volna, és a későbbi üzemeltetés során meghibásodás forrása lehetne.

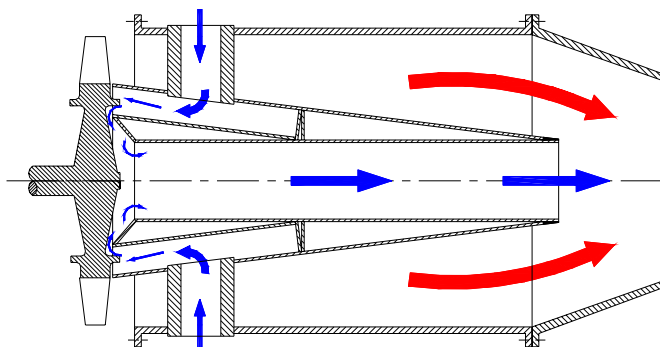
Ezért szükséges olyan hűtési megoldást találni, amely egyrészt elégséges hűtési hatásokkal rendelkezik, másrészt lehetőség szerint nem igényel az eredeti konstrukción változtatásokat.

Erre jelenthet megoldást az a módszer, hogy a turbina tárcsát hátulról, a fűvócsó központi kúpján keresztül hideg levegővel áramoltatjuk körbe. Ennek hatására a turbina fűvócsó felőli oldala hűtött lesz, és a hőmérséklet-különbségek hatására kialakuló hővezetés nyomán a turbina lapátjaiból is hő kerül elvonásra, vagyis, ha nem is olyan hatásosan, mint közvetlen hűtés esetén, de a lapátok is kismértékben hűthetők.

Ehhez a módszerhez, hogy ne igényeljen szerkezeti változtatást, egy külön meghajtott ventilátor kell, ami a szükséges nyomású hideg levegőt a turbina utáni nyomás ellenében a turbina tárcsa és a központi kúpos test közötti résen keresztül tudja áramoltatni. Szükséges volt tehát megbecsülni, hogy csökkentett fordulatszámokon hozzávetőlegesen mekkora turbina utáni nyomással kell számolni, amit a ventilátornak le kell győznie.

Közelítőleg $\pi_{hv}^* \approx 1,25$ nyomásviszonyt kell előállítania majd a hűtőlevegőt szállító ventilátornak, hogy a turbinatárcsa és a központi kúpos test közötti résen a hűtőlevegő a túlnyomásából fakadóan kiáramolhasson, ezáltal a hűtés megvalósulhasson. Ez viszont elég nagy nyomásviszony, a hűtőlevegő áramlás fenntartásához nagyságrendileg közelítőleg 1-10 kW energia szükséges.

A gázgenerátor turbina tárcsájának hűtésére kínálkozik egy előreláthatólag kevesebb energiával és biztonságosabban megvalósítható módja is. Ennek az elvi vázlata a 6. ábrán látható, és működési elve az injektor hatáson alapul. A megvalósított fűvócsó a 7., illetve 8. ábrán látható.



6. ábra: A turbinatárcsa hűtése injektoros központi kúppal

A sugárhajtómű fűvócsővében áramló gázok a központi kúpos testen kialakított méretezett furaton keresztül sebességükből adódóan hűtőlevegőt szívnak a kúpos test járatain keresztül, amely körüláramolva a tárcsa egyik oldalát, az eredeti hajtóművön konstrukciós átalakítás nélkül jó hatásfokú hűtést képes megvalósítani. Az ábrán a piros nyilak az égésgázok, a kék nyilak a hűtőlevegő áramlását jelölik.



7. ábra: A megvalósított injektoros központi kúppal ellátott fűvócső a hajtóműre építve



8. ábra: A fűvócső belseje a turbina futólapát koszorújával

A segédberendezések átalakítása

A TSz-21 indító gázturbina minden esetben az adott repülőgép főhajtóművére rögzítve, annak kenés- és tüzelőanyag-rendszerébe integrálva foglalt helyet. Jelen alkalmazásban azonban a főhajtómű segédberendezései, melyek a TSz-21 táplálását végezték, eredeti állapotban nem használhatók fel, ezért feltétlenül szükség van különböző átalakításokra.

A MiG-23 vadászipülőgép R-29 típusú hajtóművén egy „924” jelű tüzelőanyag-olaj szivattyú táplálta a TSz-21 rendszereit. [4] Ez egy fogaskerekes típusú, elektromos meghajtású berendezés, melyben együtt található az olaj- és tüzelőanyag-szivattyú. [4] Ezeket egyszerre hajtotta meg egy villanymotor, mely szabályozás nélkül – miután a kompresszor utáni túlnyomás a $0,02 \div 0,045$ bar ($n \approx 6000 \div 9000$ f/min) értéket meghaladta – látja el a TSz-21 tüzelőanyag-fűvókait és kenésrendszerét.

A kísérleti sugárhajtómű üzemeltetésekor azonban alapvető követelmény, hogy fordulatszáma szabályozható legyen, vagyis a betáplált tüzelőanyag mennyisége változtatható legyen, miközben a hajtóműbe bevezetett kenőolaj mennyisége változatlan marad. Mivel a szivattyú szállítása a fogaskerekek fordulatszámától függ, a tüzelőanyag szivattyú fordulatszám szerinti szabályozhatósága követelmény, illetve működés közben a fordulatszáma az adott megvalósítandó hajtómű-üzemmódtól függően változni fog majd. A „924” berendezésben a két fogaskerékes szivattyú azonban közvetlen mechanikus kapcsolatban van, így elképzelhetetlen a kapcsolat megbontása – azaz nagyobb konstrukciós változtatás – nélkül a kitűzött cél megvalósítása egyetlen berendezéssel. Mivel a Tanszék két üzemképes berendezéssel rendelkezik, célszerűnek mutatkozott a két berendezés egyszerre történő felhasználása, az egyiket csak tüzelőanyag-, a másikat csak kenőolaj-szivattyúként üzemeltetve.

Ebben az esetben eggyel több meghajtó villanymotorra és a hozzá tartozó elektromos segédberendezésekre – pl. egyenirányítóra – van szükség. A villanymotor eleve rendelkezésre áll, de hangsúlyozandó, hogy a Tanszék lehetőségei és anyagi állapota mellett a konstrukciós változtatás nem elképzelhető – sem a „924” segédberendezésen, sem a TSz-21 hajtóműn –, ezért mindenképpen az egyszerűen megvalósítható megoldásokat kell előnyben részesíteni.

A két „924” típusú szivattyú tehát külön fogja ellátni a TSz-21 kenés- és tüzelőanyag-rendszerét. Egyenáramú villanymotor hajtja meg mindkettőt, ezekhez megfelelő transzformátor és egyenirányító szükséges.

A tüzelőanyag-szivattyú fordulatszámának szabályozása legegyszerűbben a transzformátor áttételi viszonyának módosításával vagy egy változtatható ellenállással képzelhető el, ezáltal a villanymotorra jutó egyenirányított feszültség nagyságát tudjuk szabályozni, ami pedig a motor fordulatszámával egyértelmű kapcsolatban van. A változtatható áttételű transzformátorral gazdaságosabb szabályozás valósítható meg, hiszen a transzformált villamos energia teljes egészében a villanymotorra jut, míg a változtatható ellenállás esetén a motorral sorba kapcsolt ellenállás növelésével ugyan a motorra eső feszültség csökken, ezáltal fordulatszáma is csökkenni fog, de az áramkör által felvett energia állandó marad alacsonyabb fordulatszámokon is. Változtatható áttételű toroid transzformátor segítségével pedig egyszerűen megoldható a szabályozás.

Az indító villanymotor a TSz-21 tartozéka, így csupán a szükséges feszültség előállítása és szabályozása jelent ez esetben feladatot. Ehhez szükséges az előbbi bekezdésekben említetteken kívül még egy változtatható áttételű toroid transzformátor és egy egyenirányító. A hajtóműhöz szükséges összes villamos berendezés megtervezésében nagy segítséget nyújtott dr. Kurutz Károly professzor emeritus, akinek ezúton szeretném megköszönni munkáját.

A kenésrendszer átalakítása

A kenésrendszer feladata, hogy az üzemeltetés közben a gázturbina forgórészéhez megfelelő mennyiségű kenőolajat vezessen, majd azt a kenési helyekről elvezesse. [4]

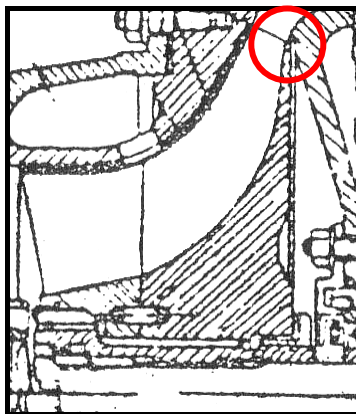
A kenésrendszer a MiG-23 főhajtóműve esetében a következő elemekből áll. [4]

- a főhajtómű olajtartálya
- a gázturbina olajszivattyúja (a tüzelőanyag-szivattyúval egybeépítve a „924” berendezésben)
- a TSz-21 belső olajvezető csatornái kalibrált furatokkal
- elektromágneses zárószelep
- olaj be- és elvezető külső csővezetékek
- ejektoros olaj visszaszállító szivattyú.

A fő problémát az jelenti, hogy a főhajtóműről leszerelt állapotban megkapott TSz-21 kenésrendszerének alapvető elemei, melyek tulajdonképpen a főhajtómű részei is egyben, szükségképpen hiányoznak. A pótlásukra az alábbiakban leírt megfontolásuk figyelembevételével kerülhet sor.

Amint azt a [4]-ben részletesen kifejtették, a TSz-21 gázgenerátor forgórészének olajozása a kompresszor mögötti tér nagy nyomású levegőjéből történő elvétellel, a kompresszor tárcsa mögött elvezetett levegővel egy injektort működtetnek, ami az áttételházból szívja az olajat.

A kompresszor tárcsa hátsó oldala, amint az a 9. ábrán is jól megfigyelhető (piros körrel jelölve), nincsen tömítve. Nem található rajta labirint (sem egyéb, tömítést szolgáló konstrukciós elem), vagyis a kompresszor tárcsa és a ház közötti résen, mint labirinton keresztül szabadon áramolhat a nagynyomású közeg.



9. ábra: A kompresszor tárcsája

Így a kenés voltaképpen olaj-levegő emulzióval valósul meg, ami a kenési feladatot – amennyiben ez tudatos tervezés eredménye – ellátja, azonban ugyanez a keverék kerül a TSz-21-ből elvezetésre a külső csővezetékeken keresztül. A levegő-olaj keverék azonban mindennemű kezelés nélkül nem engedhető vissza a tervezett olajtartályba a megnövekedett fajtérfogat miatt, mivel az olajhoz képest túl sok levegőt tartalmaz; illetve az emulzió atmoszférába történő visszavezetése – a magas olajtartalom miatt – igen gazdaságtalan lenne. Erre két fő megoldás kínálkozik:

Az elvezetett olajnak külön, nagy térfogatú gyűjtőtartályt készíteni, ahol a levegő kisebb sűrűségénél fogva, az üzemeltetési időközön kívül az olajból távozhat, majd a megmaradt olaj ismét felhasználható.

Az elvezetett olaj visszatér az eredeti tartályba, azonban a tartály és a hajtómű közé egy levegő-olaj leválasztó berendezést kell beépíteni, amely (pl. centrifugális elven) szét tudja választani a két komponenst, innentől pedig már közel tiszta olaj vezethető vissza a tartályba. Mivel a gyűjtőtartály megépítése nehézkes, szükséges lesz a kísérleti sugárhajtómű kenésrendszerébe egy olajleválasztó berendezés beépítése, valamint olajhűtőt is kell a rendszerbe építeni.

Mérőberendezések, kezelőszervek

A mérőberendezések szükségessége

A hajtómű körfolyamatának, üzemeltetési paramétereinek pontos megismeréséhez elengedhetetlenek a különféle mérőeszközök.

A kísérleti sugárhajtóművet a Tanszék kutatási-kísérleti munkáján kívül oktatási célokra is fel kívánja használni. A hajtóművel a Közlekedésmérnöki Kar alapképzését teljesítő hallgatók többféle mérést is végezhetnek majd, úgymint

- általános gázturbina körfolyamat mérése – a Hő- és Áramlástan,
- turbókompresszor karakterisztikájának meghatározása – a Hő- és Áramlástechnikai Gépek,

- hajtómű rendszertechnikai mérés – a Repülőgépek és Hajtóművek Vizsgálata című tárgyak keretében. A mérések lefolytatása szintén megköveteli a hajtómű minél több paraméterének állandó mérését.

Termikus paraméterek mérőeszközei

A hajtómű körfolyamatának figyelemmel kíséréséhez részben a Tanszéken meglévő eszközök, részben pedig az Aerotechnika vállalat jóvoltából ajándékba kapott berendezések szolgálnak majd.

A körfolyamat paramétereinek mérésénél ki kellett választani, mely jellemzők mérése elengedhetetlen, mert a szűkös anyagi körülmények nem teszik lehetővé a teljeskörű megfigyelést. A lehető legkevesebb mért paraméter a következőket tartalmazza, amelyekkel a hajtómű működése már jól leírható:

- környezeti nyomás és hőmérséklet,
- kompresszor előtti hőmérséklet és nyomás,
- kompresszor utáni hőmérséklet,
- a kompresszor által létrehozott nyomáskülönbség,
- turbina utáni hőmérséklet,
- kenőolaj hőmérséklet.

A környezeti nyomás mérése vízoszlopos manométer segítségével történik, a környezeti hőmérséklet a laborban elhelyezett folyadékszálás (higanyos vagy alkoholos) hőmérővel lehetséges. Ez utóbbi esetén a vizuális leolvasással elérhető pontosság elegendő.

Az Aerotechnika vállalat biztosított a kísérleti sugárhajtómű megépítéséhez hat darab termoelemet, amelyek a következő helyekre kerülnek beépítésre:

- kompresszor előtt (1 db)
- kompresszor után (2 db)
- turbina után (2 db)
- hajtóműből távozó kenőolaj vezeték (1 db).

A kompresszor nyomásviszonyának mérése csak közvetve, az egyszerűen kivitelezhető nyomáskülönbség-méréssel valósulhat meg. Ekkor egy differenciálmánométer két ága a kompresszor előtti és utáni térbe kerül bekötésre, és a kompresszor által előállított nyomáskülönbség mérhető vele, ebből pedig a

$$\pi_k = \frac{p_2^*}{p_1^*} = \frac{p_1^* + \Delta p^*}{p_1^*} = \frac{\Delta p^*}{p_1^*} + 1 \quad (1)$$

egyenlettel a nyomásviszony számítható; ahol

- π_k^* a kompresszor torlóponthi nyomásviszonya,
- p_1^* a kompresszor előtti,
- p_2^* a kompresszor utáni torlóponthi nyomás,
- Δp^* a kompresszorban létrejövő torlóponthi nyomásnövekmény.

Tolóerő mérése inga segítségével

A sugárhajtómű legfontosabb jellemzőjének, a tolóerőnek mérése a Tanszék műhelyében készülő inga segítségével történik. Ez egy fémszerkezet, mely a ráerősített hajtómű működése közben annak tolóereje következtében deformációt szenved, amely erőmérő cellák használatával mérhető. A szerkezet geometriájának ismeretében számítható az igénybevételt okozó erőhatás, ami tulajdonképpen a sugárhajtómű belső tolóereje.

Biztonsági berendezések

A kísérleti sugárhajtómű, mint berendezés a benne lejátszódó nagy hőmérsékletű égési folyamat és nagy fordulatszámmal forgó alkatrészek miatt fokozottan tűz- és balesetveszélyes,

ezért már a berendezés tervezésekor kiemelten fontos a jövődöbeli biztonságos üzemeltetési feltételek megteremtése.

A biztonságos üzemeltetés egyik feltétele a kezelő személyeknek a működő hajtóműtől való kellő távolsága. Ez több problémát vetett fel.

A hajtómű szabályozása a hajtóműtől csak viszonylag nagy távolságra biztonságos, tehát az összes szabályozandó jellemző a kezelő személyek közelében kivezetésre kell kerüljön. Mivel a legfontosabb szabályzott mennyiség a betáplált tüzelőanyag tömegárama, és a tüzelőanyag csővezetékeit a kezelő személyekhez vezetni szintén balesetveszélyes, szükségessé vált a tüzelőanyag-szivattyú elektromotorjának fordulatszám-szabályozása, így a hajtóművet üzemeltető személyek számára csak egy elektromos berendezést kell kezelni, a tüzelőanyag-rendszer kellő távolsága biztosítható.

A hajtómű üzeme közben a mérőberendezések leolvashatóságának biztosítása érdekében célszerű egy kezelőpultot kialakítani, ahol együtt van a hajtómű üzemének kontrollálásához szükséges összes mérőműszer, kezelőszerv – hőmérséklet- és nyomásmérők, változtatható áttételi viszonyú transzformátorok a villamos motorok fordulatszámának szabályozásához, stb. – lehetőség szerint logikus csoportokba foglalva.

A kezelőpultot a hajtóműtől a biztonság érdekében egy tűzfallal kell elválasztani, így üzemzavar esetén sem veszélyezteti a berendezés a közelében tartózkodók épségét.

A turbina forgó tárcsája köré erősítő fal építésével – amely a tűzfallal egységet alkot – lehet növelni a szerkezet biztonságát.

Kezelőszervek, irányítópult

Az irányítópult célja, hogy a hajtómű üzemeltetéséhez szükséges összes mérőeszközt és szabályzó kezelőszervet a hajtóműtől biztonságos távolságban, egy helyen, logikus felépítéssel biztosítsa a hajtóművet üzemeltető személyeknek.

Az irányítópulton ezért megtalálhatóak lesznek a mérések lefolytatásához szükséges termoelemek mért értékeit mutató kijelző, az ehhez szükséges átkapcsoló berendezés, mellyel egy kijelzőn jeleníthetők meg az adatok – természetesen nem egy időben –; az indításhoz és a szabályozáshoz szükséges toroid transzformátorok vezérlőelemei, az elektromos kapcsoló- és biztosító elemei.

Az egész berendezés egy kerek kiskocsra kerül telepítésre, ami mind a kutatási, mind az oktatási munkát megkönnyíti. Mivel ez egy sugárhajtómű lesz, ellentétben a Tanszéken jelenleg is üzemelő, tengelyteljesítményt leadó berendezéssel, ennek fontos jellemzője a meghatározott fűvócső-keresztmetszeten kiáramló gázok sebessége, ezáltal a tolóerő. Ezért nem lehet a már megvalósított berendezéshez hasonlóan, egy csővezetéken keresztül a labor helyiségből a szabadba vezetni az égésgázokat, emiatt vált szükségessé, hogy a szabadban végrehajtható kísérletekhez ne egy állandó telepítésű berendezés készüljön, hanem az csak az üzemelés időtartamára kerüljön ki a szabadba a kerek kiskocsi segítségével.

A HAJTÓMŰ MATEMATIKAI MODELLJE

A hajtómű termikus-áramlástanai számítását elvégezve rendelkezésre állnak a nevezetes keresztmetszetek méretezési üzemmódon érvényes paraméterei. A változó üzemmódokon történő működés leírásához ezek azonban csupán a kiinduló adatok.

A hajtómű matematikai modellje a részegységek karakterisztikáit és az ezeket szerves egységgé kapcsoló keret egyenletrendszer összessége. A részegységek – szívócsatorna, kompresszor, égéstér, turbina, valamint fűvócső – karakterisztikái számításal határozhatóak meg mérési eredmények hiányában. Amint a hajtómű üzemképessé válik, a modell illesztésével az adott példányra érvényes pontos modell megkapható lesz.

A matematikai modell alkalmas arra, hogy számítógépes programként megvalósítva szimulálni lehessen a hajtóműben lejátszódó munkafolyamatokat – a modell pontosságának megfelelő részletességgel. A matematikai modell felhasználásával automatikus szabályzó

rendszer készíthető a gázturbinához, mely biztosítja a hajtómű teljes üzemmód-tartományában a biztonságos működést.

Szívócsatorna modell

A szívócsatorna modellje a benne lejátszódó egydimenziósnek feltételezett áramlásból kiindulva a be- és kilépő keresztmetszetek termikus paraméterei közti kapcsolatot definiálja. Adiabatikus áramlást feltételezve a torlóponthi hőmérséklet állandó, az össznyomás azonban a sűrűlódás következtében csökken. Földi, rögzített kivitelű kísérleti sugárhajtómű révén a szívócsatorna ki- és belépő torlóponthi nyomásainak hányadosa, az össznyomás-visszanyerési tényező csak a szívócsatornába belépő dimenziótlan tömegáram függvénye, melyet az (2) egyenlet ír le. [5]

$$\sigma_{sz} = 1 - (1 - \sigma_{sz0}) \cdot [\bar{q}(\lambda)_1]^2 \quad (2)$$

ahol

- $\sigma_{sz0} = 0.97$, a TSz-21 méretezési üzemmódjához tartozó becsült össznyomás-visszanyerési tényező,
- $\bar{q}(\lambda)_1 = q(\lambda)_1 / q(\lambda)_{10}$, a viszonylagos dimenziótlan tömegáram a számított üzemmód és a méretezési üzemmód dimenziótlan tömegáramainak hányadosa,
- $q(\lambda)_{10} = 0,69606$. a méretezési üzemmódon számított dimenziótlan tömegáram a szívócsatornában, a kompresszor belépő keresztmetszete előtt.

Kompresszor modell

A TSz-21 kompresszora egyfokozatú centrifugális típusú. A járókerék méretei és tapasztalati tényezők figyelembe vételével számított várható méretezési nyomásviszonya $\pi_{k,mér} = 3,5$.

A kompresszor karakterisztika a [1]-ben ismertetett módon, részegységekre bontva kerül meghatározásra. A kompresszor járókerekekében végbemenő energiaközlésből származó torlóponthi hőmérséklet- és elméleti nyomásemelkedés kapható meg, amiből a kompresszor fokozat egészében lejátszódó sűrűlódási, ütközési és résvesztések figyelembevételével számítható a létrejövő nyomásnövekedés.

A sűrűlódási veszteségek számítása a klasszikus áramlástan csősűrűlódási jelenségeit leíró összefüggéseivel történt, melyben egy dl elemi hosszon sűrűlódásból eredő nyomásvesztés:

$$dp^* = \rho \cdot \frac{c^2}{2} \cdot \lambda \cdot \frac{dl}{d_h} \quad (3)$$

ahol

- ρ a közeg sűrűsége
- c a közeg sebessége
- λ a csősűrűlódási tényező, mely a kompresszor áramlási viszonyait tekintve függvénye a Reynolds-számnak, illetve a sűrűlódó felületek érdességének, melyre a [1]-ben található összefüggéseket használtam fel.
- dl az elemi áramlási csatornahossz
- d_h az áramlási csatorna hidraulika átmérője, mely a keresztmetszet négyszeresének és a kerületnek a hányadosa, melynek segítségével a nem kör keresztmetszetű csatornában végbemenő áramlások leírhatóak.

Pontos számítás esetén a (3) egyenletből az adott részegység nyomásvesztése integrálással nyerhető, de a modell egyszerűbbé tétele érdekében a veszteség közepes értékekkel is számítható [3], dl helyébe az áramlási csatorna hosszát helyettesítve.

A különböző fordulatszámokra és átáramló dimenziótlan közegmennyiségre elvégzett számítások adják a kompresszor fokozat karakterisztikáját.

Az égéstér modellje

Az égéstér modell három fő jellemzőnek, a kilépő hőmérsékletnek, az égési hatásfoknak és az össznyomás-visszanyerési tényezőnek a változását írja le.

Az össznyomás-visszanyerési tényező

A földi telepítésű szívócsatornához hasonlóan az égéstér össznyomás-visszanyerési tényezője alapvetően a sűrűdásból adódik, így az átáramló közeg sebességének négyzetével arányos. Az ezt leíró egyenlet megfelel a (2) egyenletnek, annyi különbséggel, hogy oda az égéstér méretezési össznyomás-visszanyerési tényezőjét, méretezési és aktuális dimenziótlan tömegáramát kell behelyettesíteni.

Az égési hatásfok

Az égési hatásfok meghatározására – az [5] irodalom alapján – az égéstérbe belépő közeg nyomásának és az égéstérben lejátszódó hőmérséklet-növekedés függvényében az alábbi képlet szolgál:

$$\eta'_e = \left(a_1 + a_2 \cdot p_2^* + a_3 \cdot p_2^{*2} \right) - \left(b_1 + b_2 \cdot p_2^* + b_3 \cdot p_2^{*2} \right) \cdot \left(\frac{T_3^* - T_2^* - 722}{100} \right)^2 \quad (4)$$

ahol

$$p_2^* = \begin{cases} 5,5 \rightarrow p_2^* \geq 5,5 \\ p_2^* \rightarrow \text{egyébként} \end{cases},$$

— illetve az együtthatók értékei a 3. táblázat tartalmazza. [5]

Az égési hatásfok együtthatóinak értéke			3. táblázat
	1	2	3
a	0,9088426	$3,549215 \cdot 10^{-2}$	$-3,5998272 \cdot 10^{-3}$
b	$4,400762 \cdot 10^{-3}$	$-6,053727 \cdot 10^{-4}$	$-1,020467 \cdot 10^{-5}$

Az égéstérből kilépő közeg hőmérséklete (T_3^*)

Az égéstér hőmérlege alapján az [5]-ben közölt közelítő képletet alkalmazva:

$$T_3^* = \frac{-B_1 \pm \sqrt{B_1^2 - 4A_1C_1}}{2A_1} \quad (5)$$

ahol

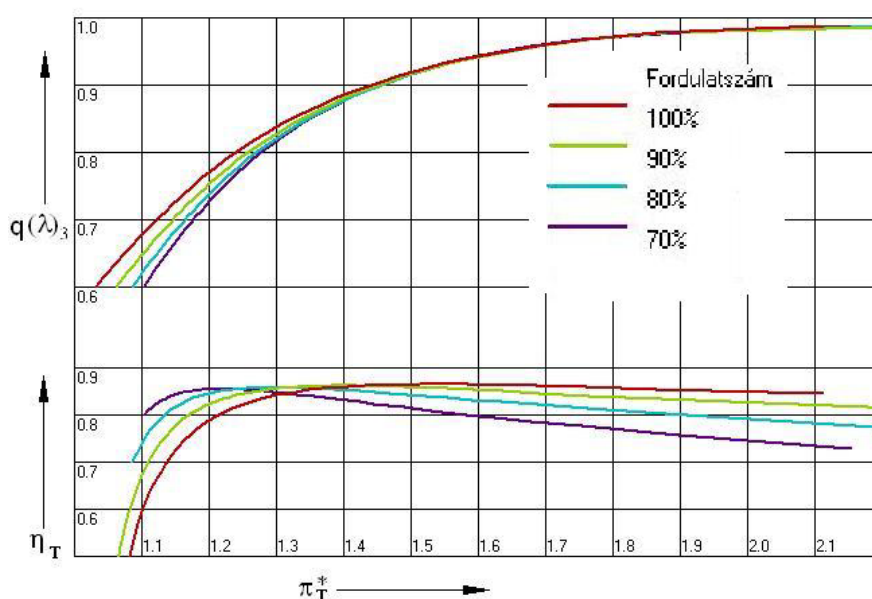
- $A_1 = -71,972 - 168,206 \cdot q_T - H_a \cdot \eta_e \cdot q_T - c_p T_2^* (1 + q_T)$
- $B_1 = 1,07626 + 1,826 \cdot q_T$
- $C_1 = 4,05714 \cdot 10^{-5} + 6,568 \cdot 10^{-6} \cdot q_T$
- q_T a tüzelőanyag és a munkaközeg tömegáramának hányadosa
- H_a a tüzelőanyag fűtőértéke
- η_e az égési hatásfok
- T_2^* a kompresszorból kilépő közeg torlóponti hőmérséklete
- c_p a munkaközeg állandó nyomáson vett fajhője a $T_0^* - T_2^*$ tartományban

Turbina modell

A TSz-21 gázgenerátor turbina egyfokozatú, axiális típusú. A karakterisztika számítása a [5]-ben részletezett lapátsor-számítási eljárásból felépített fokozat számítása.

A fokozat számítási eljárása a bemenő adatokból kiindulva elvégzi először az állólapát koszorú jellemzőinek meghatározását, amelyet a bemenő tömegáramhoz kell igazítani. A bemenő tömegáramnak létrehozásához szükséges állólapát nyomásviszonyt – mivel a jellemzőket minden egyes üzemállapotban számítja az eljárás, függvény és annak deriváltja híján a Newton-Raphson módszer helyett az ahhoz hasonló – szelő módszerrel határozom meg. Ez a módszert alkalmazható minden további helyen, ahol a be és kimenő paraméterek összeegyeztetése szükséges. A futólapát adott fordulatszámra szükséges nyomásviszonyának meghatározása a következő lépés, amely éppen a bemenő tömegáram áthaladását teszi lehetővé. Végezetül a fokozat jellemzőit az állólapát belépő és futólapát kilépő jellemzőiből kaphatjuk.

Az eljárással meghatározott turbina jelleggörbét a 10. ábra mutatja.

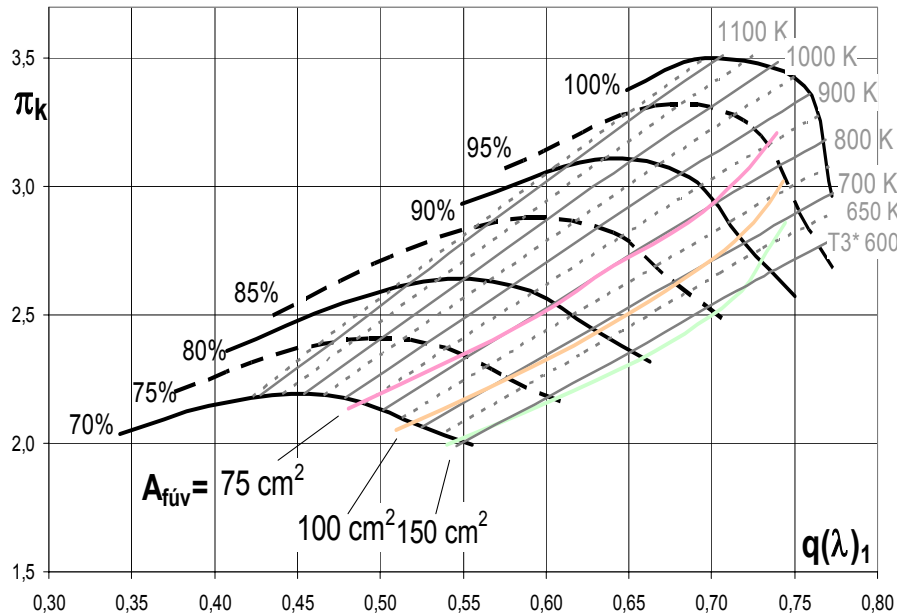


10. ábra: A turbina dimenziótlan tömegárama és hatásfoka a torlóponti nyomásviszony függvényében

Fúvócső modell

A fúvócső modellje az abban lejátszódó expanzió hatására létrejövő kiáramlási sebesség, valamint az ebből keletkező tolóerő számítását szolgálja. Ehhez az [5] közölt a nyomásviszony alapján dimenziótlan jellemzőket számító modellt.

A különböző kilépő keresztmetszetű fúvócsövekkel elvégzett számítások alapján meghatároztam a hajtómű kompresszor karakterisztikán ábrázolható együttműködési görbéit, melyet a 11. ábra mutat be. Ezen szürke színnel jelöltem a különböző turbina előtti hőmérsékleteken elképzelhető gázgenerátor együttműködési vonalakat, amelyeket aztán nagy mértékben korlátozni fog a fúvócső.



11. ábra: Az együttműködési görbék a kompresszor karakterisztikán

A modellt alkotó keret-egyenletrendszer

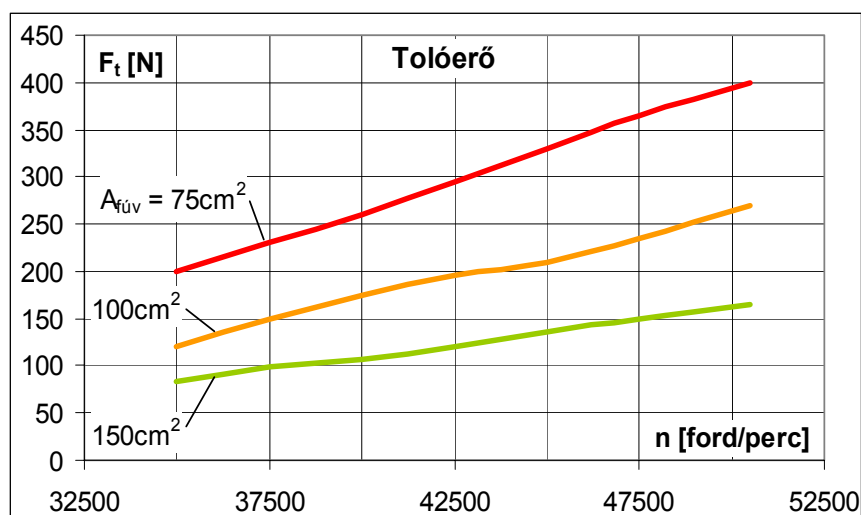
A hajtómű teljes matematikai modelljét a részegységek karakterisztikái, valamint az azokat összefogó, fizikai megmaradási elvek alapján megfogalmazott keret-egyenletrendszer alkotják. Ezek

- a kontinuitást kifejező egyenletek a részegységek között, (tömegáram-megmaradási egyenletek);
- az energia-megmaradást leíró összefüggések a forgórész forgómozgására vonatkozóan.

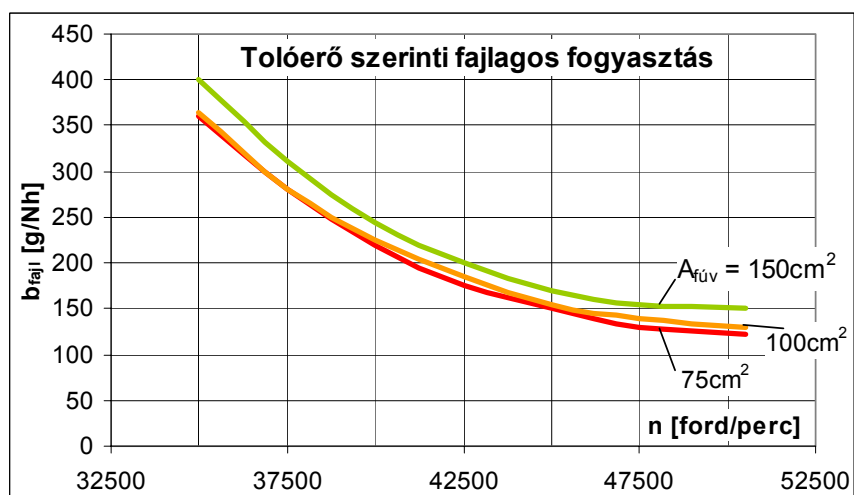
A modell így felállított keret-egyenletrendszere azonban eggyel több változót tartalmaz, mint amennyi egyenletet, megoldása csak úgy lehetséges, hogy hozzávesszük még a hajtómű szabályozási törvényszerűségét leíró egyenletet. Ez a TSz-21 és a belőle átalakított sugárhajtómű esetén az állandó (illetve állandósult üzemállapoton állandó) fordulatszámú tüzelőanyag-szivattyú miatt a tüzelőanyag-tömegáram állandósága. Ennek segítségével, tehát egy adott tüzelőanyag-mennyiség mellett egy kívánt fordulatszámon a modell segítségével meghatározható a hajtómű együttműködési pontja, valamint termikus-áramlástani jellemzői. Az így nyert együttműködési pontokat, illetve a belőlük nyerhető görbéket fúvócső átmérő szerint rendezve mutatja a 11. ábra.

Az így összeállított hajtómű modell segítségével előrejelezhetők a sugárhajtómű várható üzemi jellemzői. A legfontosabbaknak – úgy mint tolóerő, tolóerőre vonatkoztatott fajlagos fogyasztás, valamint turbina előtti hőmérséklet – a fordulatszám szerinti változását a 12.-14. ábrák mutatják. Ezeken látható, hogy amint az várható, a terhelés növelésével (fúvócső-keresztmetszet csökkentésével) adott fordulatszámon a tolóerő és a turbina előtti hőmérséklet nő, a tolóerőre vonatkoztatott fajlagos fogyasztás pedig csökken. A fordulatszám szerint a jellemzők közül a tolóerő progresszív növekedése, a fajlagos fogyasztás egyre lassuló csökkenése, valamint a turbina előtti hőmérséklet egy optimális fordulatszámig történő csökkenése, majd újbóli növekedése figyelhető meg.

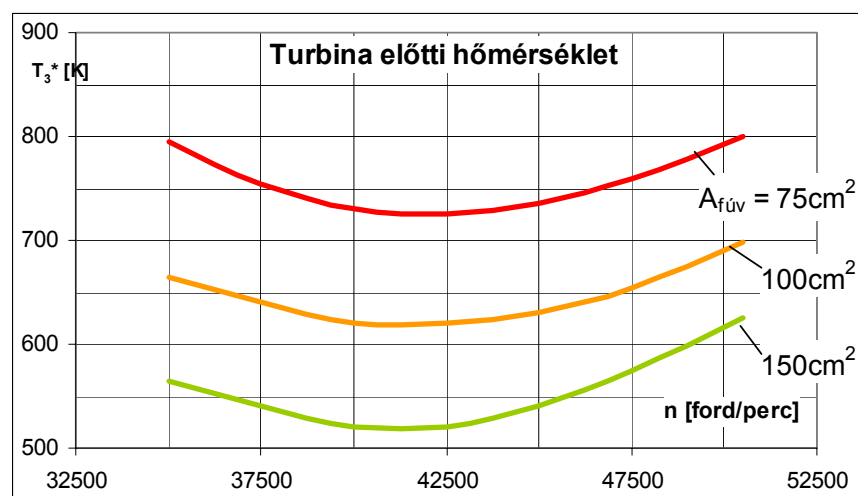
A modell által számított eredmények összehasonlítva a Tanszéken korábban megépített, hasonló geometriai és termikus paraméterekkel rendelkező, turbófeltöltőből készített sugárhajtómű jellemző adataival [6] igen reálisak, de természetesen a működés során mért adatok segítségével történő illesztés tovább finomítja majd a modellt.



12. ábra: A tolóerő változása a fordulatszám függvényében különböző fúvócső keresztmetszetek esetén



13. ábra: A tolóerő szerinti fajlagos fogyasztás változása a fordulatszám függvényében



14. ábra: A turbina előtti hőmérséklet változása a fordulatszám függvényében

TOVÁBBFEJLESZTÉSI LEHETŐSÉGEK

A hajtómű részegységeinek matematikai modellje rendelkezésre áll, paramétereit azonban még illeszteni szükséges az adott, valóságos gép jelleggörbéihez, amely a kísérleti sugárhajtómű beindítását követően lehetővé válik. Ezzel megtörténhet a matematikai modell identifikációja, pontosítása, valamint a későbbiekben – a Tanszék eddigi gázturbina területen végzett kutatásainak szerves folytatásaként – kifejleszthető egy általános, a turbógép jellegétől (axiális/centrifugális) független matematikai modell.

A műszaki megoldásokat tekintve az első szempont a lehető legkevesebb konstrukciós változtatás szem előtt tartása volt. Miután a kísérleti sugárhajtómű üzembe áll, és megbízhatóan működik, sor kerülhet olyan módosításokra, kiegészítésekre, mellyel a berendezésen vizsgálható folyamatok, mért paraméterek száma növelhető. Ilyen lehet például:

- üzem közben változtatható keresztmetszetű fűvócső megépítése és használata. Ez több elven is megvalósítható, melyek közül a legfontosabbak:
 - a központi kúp axiális mozgásával elérhető a keresztmetszet-változás,
 - vagy a vadászrepülőgépek sugárhajtóművein használt redőnyös, változtatható kúpszögű gázsebesség-fokozóval;
- több mérőeszköz felszerelése, meglévők elektronikus jelet szolgáltató eszközre való cseréje;
- elektronikus formában mért mennyiségek számítógépes rögzítése, feldolgozása, kiértékelése, felhasználása a későbbi üzemeltetésben;
- a megalkotott és a hajtómű paramétereire illesztett modell felhasználásával valósidejű szabályzórendszer létrehozása és alkalmazása a gázturbina üzemeltetésében.

FELHASZNÁLT IRODALOM

- [1] CSATÓ János: Előperdítés hatása turbófeltöltő centrifugálkompresszorának karakterisztikájára. Budapest, 1994.
- [2] Двигатель 31 (серия 5) – Руководство по ремонту – Книга девятая – Ремонт сборки и испытание турбостартера TC-20Б. Ёв nélkül.
- [3] FERGUSON, T. B.: The Centrifugal Compressor Stage. Butterworths, London, 1963.
- [4] Re/872. Az 55 típusú hajtómű műszaki üzemeltetési szakutasítás 2. könyv. Honvédelmi Minisztérium, 1980.
- [5] DR. SÁNTA Imre: Gázturbinás hajtóművek termodinamikai modellezése és a modellek alkalmazásai. Kandidátusi értekezés. Budapest, 1993.
- [6] PÁSZTOR Endre: Kisméretű gázturbinás sugárhajtómű kísérleti üzeme és jelleggörbéinek meghatározása. Haditechnikai Szemle, Budapest, 1958/1, 6-16. o.
- [7] Турбокомпрессорный Стартер TC-21. Каталог деталей и сборочных единиц. Ёв nélkül.