

# Automatikus működtető rendszer számítógéppel segített tervezése kísérleti sugárhajtómű változtatható geometriájú fúvócsövéhez

A kísérleti gázturbinának kiemelt szerepe van mind az oktatásban, mind a hallgatók és oktatók tudományos munkájában. Segít megérteni a hajtóműben lejátszódó termikus folyamatokat, illetve ami ennél is fontosabb, ismereteket és gyakorlati alkalmazási lehetőségeket nyújt a manapság elterjedt FADEC rendszerek működésének bemutatására.

DOI 10.24228/KTSZ.2017.2.3

**Beneda Károly<sup>1</sup> – Kisszögyémi István<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> Adjunktus, BME Vasúti Járművek, Repülőgépek és Hajók Tanszék

<sup>2</sup> Repülőgépész MSc. hallgató, BME VRHT

e-mail: kbeneda@vrht.bme.hu, istvankisszol@gmail.com

## 1. BEVEZETÉS

A BME Vasúti Járművek, Repülőgépek és Hajók Tanszéken (VRHT) az elmúlt években sokféle repülőműszaki kutatás, ill. fejlesztés látott napvilágot. Széles körű repülésmechanikai [17], légiforgalmi irányítást támogató [18], valamint hajtóműveket érintő munkák gyakran nemzetközi kooperációban [10], projektekben való részvétel eredményeképpen születnek. Egyik ilyen fejlesztés az immár tizedik éve folyamatban lévő és állandó újdonságokkal szolgáló TKT-1 sugárhajtómű [15], amit a BSc, MSc és PhD képzésekben oktatási, valamint kutatási célokra hasznosítanak.

A gázturbinás sugárhajtóművek precíz, biztonságos működtetéséhez mára már elengedhetetlenek az automatikus vezérlési formák. Ez alatt nem csak maga a hajtómű, mint szabályozandó egység értendő, hanem annak egyes részegységei is, mint esetünkben a változtatható geometriájú fúvócső. Ilyen típusú fúvócsövekről a hős-

kor szuperszonikus utasszállítóitól eltekintve kizárólag nagysebességű, harcászati feladatokat ellátó vadászgépek esetén beszélhetünk, mivel hangsebesség alatti, illetve feletti tartományokon az optimális üzemmód eléréséhez más-más kritériumoknak kell megfelelni.

Ezek egyik célja a hajtóműből kiáramló levegő kinetikai energiájának növelése, minden repülési üzemmódon kellő hatásfokkal [5]. Ezt kétféle módon, a fúvócső hossz tengelyére merőleges keresztmetszetek módosításával érhetjük el. Az egyik megoldás, amikor a gázkiáramlás sebességfokozó redőnyzetet (GSF) mozgatjuk karok segítségével, a másik, mint azt a Junkers Jumo 004-es esetében is láthatjuk [11], a központi kúp hossz tengelyirányú mozgatása. Manapság döntően az előbbit alkalmazzák, mivel azzal több üzemmódban tudjuk biztosítani a legjobb fúvócső hatásfokot; illetve a turbina utáni hőmérséklet, valamint az utánégetés már nem teszi lehetővé a fúvócső belsejében elhelyezett mozgó mechanizmust.

Ilyen típusú megoldással találkozhatunk a VRHT tulajdonában lévő TKT-1 egyáramú, gázturbinás sugárhajtóművön is, ami kezdeti fejlesztése során (2008-ban) egészült ki GSF-el, amivel a kétparaméteres szabályozást és a hajtómű viselkedését lehet szélesebb határok között vizsgálni. Ennek mozgatása eddig manuális módon történt, ami a gázturbinán folyó méréseket körülményesebbé tette. Jelen cikk célja, hogy átfogó képet adjon az automatikus mozgatás megvalósításának mérőköveiről, illetve annak további fejlesztési lehetőségeiről, amelyről a közelmúltban egy BSc szakdolgozat is készült [13].

## 2. A TKT-1 GÁZTURBINÁS SUGÁRHAJTÓMŰ RÖVID ISMERTETÉSE

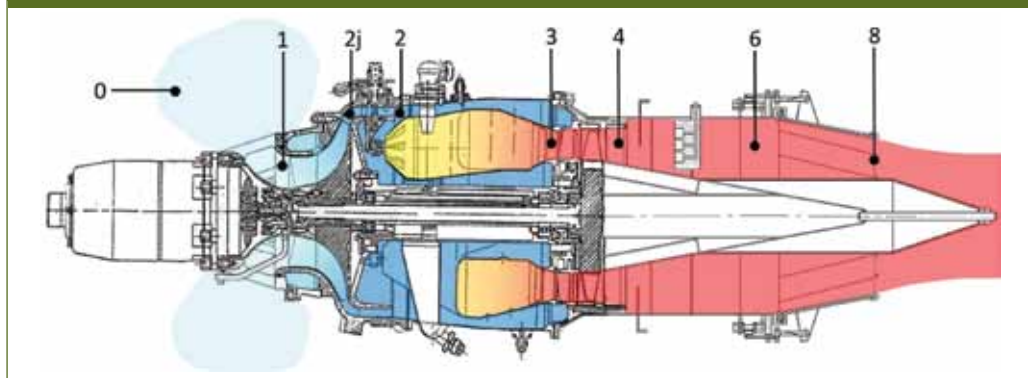
A TKT-1 típusú egyáramú, egytengelyes, gázturbinás sugárhajtóműhöz készült a mozgató berendezés, ezért annak geometriai méreteinek, szabályozási törvényszerűségeinek ismertetése elengedhetetlen. A TKT-1 a TSz-21 típusú, MiG-23-as vadászpilóta nélküli repülőgépeken rendszeresített indító gázturbinából alakították ki (1. ábra), amelynek főbb lépéseit a [15] tartalmazza.

A TSz-21 egy egyáramú, munkaturbinás (szabad tengelyes) repülőgép-fedélzeti indító gázturбина. Beömlőnyílása körgyűrű alakú, előtte helyezkedik el a SzT-3PT villamos indítómotor. Gázgenerátora egyfokozatú centrifugális kompresszorból és egyfokozatú

tú axiális turbinából áll. Égéstera gyűrűs, négy tüzelőanyag-fúvókával. Az égésgázok egy terelő lapátsor nélküli munkaturbina járókeréken átáramolva hajtanak egy bolygó-műves áttételt, amely a hajtóműindításhoz szükséges nyomatókot viszi át a repülőgép sugárhajtóművének nagynyomású forgórésére. Az expanzió végeztével a munkaközeg oldalt, egy téglalap alakú nyíláson keresztül távozik az atmoszférába. A gázturбина mindössze a hajtómű megindítására szolgál, nem használatos kiegészítő energiaforrásként (APU) [9].

A TKT-1 sugárhajtómű az évek során számos átalakításon esett keresztül. Az eredeti vezérlő rendszer még a kompresszor utáni nyomást vezérlő nyomásként felhasználva oldotta meg a szabályozást. A legnagyobb volumenű fejlesztés a szabályozó rendszert érintette. Ennek célja egy teljes hatáskörű, duplikált, digitális, elektronikus szabályozórendszer (Full Authority Digital Electronic Control, FADEC) [7] kiépítése volt, amelynek folyamatos fejlesztése során a legegyszerűbb elektronikus szabályozótól eljutottunk a hajtómű nyomásviszony (Engine Pressure Ratio, EPR) szerinti szabályozásig [4]. A hajtómű a mérésekhez igazodva DIN5221 szerinti mérőperemes szívócsővel rendelkezik, ezen felül felszerelték egy gázsebesség fokozó redőnnyel is. A hajtómű így már tengelyteljesítményt leadó gázturbinából tolóerőt szolgáltató sugárhajtóművé lépett elő.

1. ábra: A TKT-1 hosszmetzeti rajza a jellegzetes keresztmetszetek jelöléseivel [15]



A tolóerő további növelése érdekében nagyobb központi kúpot kapott, amellyel tolóereje a jelenleg használt biztonságos maximumnál, a névleges fordulatszám 90%-ánál eléri a 300N-t. A hajtómű feladata mérések lebonyolítása laboratóriumi környezetben oktatási és kutatási célokból.

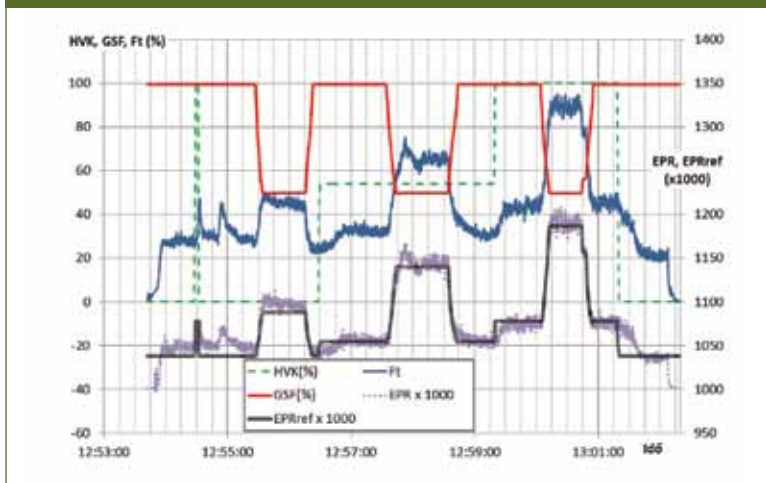
A jelenlegi szabályozórendszer teljes hatáskörű, digitális, elektronikus elven valósítja meg feladatát, azaz a napjainkban már egyeduralkodó kétszatornás, ún. duál FADEC csoportjába tartozik. A szabályozást megvalósító berendezés moduláris, a főbb feladatokért felelős áramkörök különálló kártyákon kaptak elhelyezést. Ez nemcsak a fejlesztés, de az oktatás szempontjából is jelentős, hiszen a hallgatók már tanulmányaik során megismerkedhetnek a napjainkban elterjedt tervezési filozófiákkal. A FADEC rendszerről bővebben a [15] és [4] cikkek számolnak be.

A szabályozás egyik fontos pontja a szabályozott paraméter kérdése. A sugárhajtóművek esetében a tolóerő állandó, a pilóta által diktált értéken tartása lenne a kívánatos, de ez a jellemző üzem közben nem mérhető, így mindenféleképpen közvetett módon kell megoldani a szabályozást, amelyre leggyakrabban a tolóerővel arányos fordulatszám, hajtómű nyomásviszony (Engine Pressure Ratio, EPR) vagy hajtómű teljesítményviszony (Turbófan Power Ratio, TPR) szolgálnak. A TKT-1 esetében az EPR-t alkalmazzuk, amelynek definícióját az (1) egyenlet mutatja, az 1. ábra keresztmetszet jelöléseivel összhangban. Bizonyítható (lásd [19]), hogy ez a jellemző adott repülési feltételek mellett arányos a tolóerővel, így a szabályozás megvalósítására alkalmas. A

TKT-1-en 2013 óta működik ez a fajta megoldás. A 2. ábra mérési adatai alapján egyértelmű a tolóerő és az EPR közötti összefüggés, ahol a tolóerő a névlegeshez (300 N) képesti százalékban került ábrázolásra.

$$EPR = \frac{P_4^*}{P_1^*} \quad (1)$$

2. ábra: Mérési eredmények az EPR szerinti szabályozásból ([6] nyomán)



## 3. A MOZGATÓ MECHANIZMUS SZÁMÍTÓGÉPPEL SEGÍTETT TERVEZÉSE

### 3.1. A mechanizmus működési vázlata

A fúvócső sematikus ábrája és méretei a 3. ábrán található. A tervezés szempontjából további fontos lépés a GSF-hez épített tolórudak tanulmányozása, mivel ezeken keresztül kapcsolódik a mozgató szervomotor a fúvócsőhöz, valamint elég erős áttételt is biztosít, aminek köszönhetően csökken a szervomotort érő terhelés nagysága. Működés szempontjából a szerkezet leírása a 4. ábrán követhető.

GSF-et 24 redőny alkotja, amelyek közül a 12 felső redőny csatlakozik az első rudakhoz (I). Ezeket a rudakat összekötötték 12 kis, a hajtóműhöz képest radiális tengelyen elfordu-

ló himbával (II). A himba szárainak mérete nem egyezik, tehát ott erőmódosítás lép fel. A kis himbák aztán egy gyűrűhöz (III) kapcsolódnak, ahol a redőnyöktől származó erők összegződnek. A gyűrű végén található fül ismét erőmódosítást valósít meg. A gömbcsuklós végű rúd (IV) adja az összeköttetést a következő himbával (V). Ezek után egy hosszú rúd vezet egészen a kézi mozgató karig. A mechanizmus szempontunkból utolsó eleme az (V)-ös számmal ellátott, mert az csatlakozik a megvalósítandó mozgató mechanizmushoz, a (VI)-os számú tolórúd csupán referenciaként szerepel.

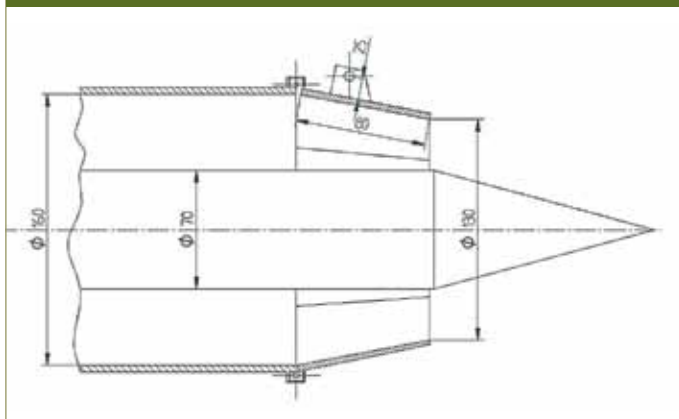
Fontos megjegyezni, hogy az egyes szögemelők, himbák mind önmagukban is áttételként viselkednek, erőkarjuk, ezáltal az általuk közölt erő is különbözik. A teljes rendszer módosítása a geometria felmérését követően 1:4,93-ra adódott.

Továbbá fontos tudni az (V)-ös himba mozgásvizonyait is. A (VI) mozgató rúd vízszintes elmozdulása 50 mm (x). Ismervén a himba hosszát (145 mm), trigonometrikus egyenletek segítségével kiszámolható a himba fél elfordulása, ami 20 fokra adódott. Mivel a himba körpályán mozog, a függőleges kitérés (y) is fontos, ami 3,2 mm.

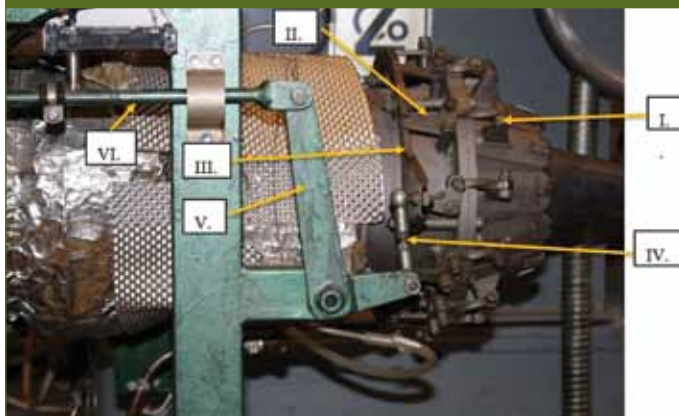
## 3.2. Előzetes számítások

A szerkezetet érő terhelések megállapítása elsőként elméleti számítással történt, ami az alapadatok felvételével kezdődött. Ezek voltak a kompresszor és turbina izentrópus hatásfokai, amelyeket a [8] forrás tartalmaz. A fűvócső izentrópus hatásfoka a [19]-ben közölt tartományon belül vettük fel. Mivel a legnagyobb

3. ábra: A TKT-1 GSF főbb geometriai méretei



4. ábra: A mozgató elemek elhelyezkedése

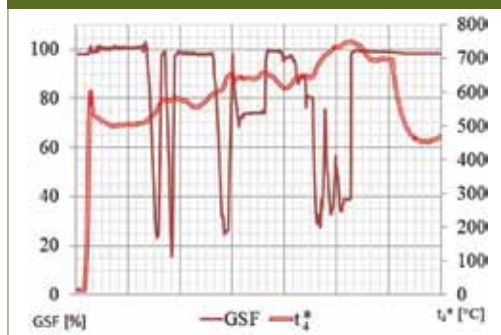


terhelések a névleges teljesítményen adódnak, ezért a számítást erre az esetre végeztük el. Maga a kalkuláció változó fajhővel történt, így pontosabb eredményre vezet. A belépő levegő állapotjelzőit a laborra jellemző 27°C-ra, és a NEL szerinti alap légköri nyomás alapján vettük fel. A szívócsatorna össznyomás-visszanyerési tényezőjét [19] alapján 0,97-re vettük. Miután az alapadatok kiválasztása megtörtént, a kompresszor által végzett valós teljesítmény meghatározása következett. A turbínából kilépő sebességet a [19] szerinti gyakorlati adatokból határoztuk meg, mert a kilépő sebesség jelen körülmények között nem mérhető.

## 3.3. Mérési eredmények

A számítások mellett valós körülmények között is kipróbáltuk a rudazaton ébredő erőviszonyokat. A mérést egy, a manuális mozgatókarhoz rögzített erőmérő cella segítségével végeztük. Az erőkar ebben az esetben 18:5-höz, tehát 3,6-szer kisebb értéket ad a mechanizmusra ható valós erőhöz képest. A mérés során három paramétert jegyeztünk fel, hogy az eredmények összevethetők legyenek a számításokkal, ezek voltak a kifejtett erő  $F$  (N), a kompresszor utáni torlóponthoz nyomás  $p_2^*$  (bar) és a torlóponthoz turbinát követő hőmérséklet ( $^{\circ}\text{C}$ ). A méréseket teljesen nyitott és zárt GSF állapotban végeztük. A mérési eredmények az 1. táblázatban találhatók, a mérés során a gázhőmérséklet és a GSF pozíciójának lefutása pedig az 5. ábrán figyelhető meg.

5. ábra: A  $t_4^*$  és a GSF paraméterek alakulása



Következtetés: A mérési eredmények alapján a terhelések, az első kivételével, kisebbek a számítottaknál. Ennek oka lehet a redőnyzet belső súrlódása, illetve, hogy a hajtómű a vártnál kisebb fűvócső nyomásviszonnyal dolgozik, ezáltal a kilépő közeg sebessége, következésképpen a dinamikus erőhatások mérsékeltebbek.

## 3.4. A mozgató mechanizmus

A konstrukcióval szemben támasztott legfontosabb követelmények az olcsóság, a kis helyszükséglet, eredményezzen viszonylag könnyű, de erős szerkezetet, a gépi mozgatás mellett legyen lehetőség kézi vezérlésre is és a könnyű szerelhetőségre, valamint egyszerű és könnyű javíthatóságra.

A tervezés megkezdése előtt már rendelkezésre állt egy VIGOR VSD-11AYMB típusú csőrő szervomotor, amelynek terhelhetősége 50 kg/cm. További kiindulási alap volt a GSF-et összekötő rudazat, amely jó áttételi és csatlakoztatási viszonyai miatt ideális a mozgató szerkezettel való integrálásra. Már a projekt elkezdésekor eldöntöttük, hogy a két szerkezetet az V-ös himbánál oldjuk meg, mivel így lesz az erő/nyomaték módosítás maximális, továbbá könnyen lehet rögzíteni a TKT-1 tartószerkezetéhez a mozgató modult. A kialakítás során tehát a következő kinematikai modellű erőátviteli változatok lehetségesek:

- forgó-forgó erőátvitel,
- alternáló-alternáló erőátvitel,
- forgó-alternáló erőátvitel.

1. táblázat: Mérési eredmények

alapjázat	p <sub>2</sub> *[bar]	F [N]	T [K]	F <sup>F</sup> <sub>mechanizmus</sub> (mért) [N]	F <sup>F</sup> <sub>mechanizmus</sub> (számított) [N]
Nyitott	1.8	13.734	786.5	49.44	30.9
Zárt		15.696	825	56.5	38
Közepes					
Nyitott	2.5	13.734	865.6	49.44	100
Zárt		17.658	910	63.56	110
Maximum					
Nyitott	3.5	1.5	984	52.974	175
Zárt		2	917	70.63	183



Az első változat egy láncos, esetleg fogas szíjas vagy egy elég nagy áttételi viszonyú fogaskeréket igényelne. Ezek mindegyike meglehetősen költséges, ezért nem vettük figyelembe.

A második megoldás lenne a leginkább célra vezető, hiszen nincsen mozgásállapot átalakítás. Ez esetben pl. egy hidraulikus munkahengert lehetne alkalmazni, amelynek élettartama és teherbírása több mint elégséges. Viszont az előzőleg említett ok miatt, nevezetesen a túl drága kialakítás gátat szab ennek az elképzelésnek, ami egyébként egyeduralkodó a valós konstrukciókon. Másik megoldás a csavarosós mechanizmus lenne, amihez azonban a szervomotor jelentős átalakítása (mivel az csak 6 fordulat megtételére képes) és nagy gyártókapacitás szükséges. Nagy előnye viszont az álló helyzetben lévő terhelés levétele a szervóról, illetve az áttételi szám növelése. További lehetőség egy szabványos fogaskerék-fogasléc áttétel, ami könnyen beszerezhető, a szervomotor mozgástartományát kellőképpen lefedi és nincs szükség jelentős átalakításokra.

## 3.5. Fogaskerék-hajtás

A fogaskerék áttétel a szerkezet szempontjából a leglényegesebb rendszer, hiszen itt történik a forgó mozgás átalakítása (fogaskerék) lineáris mozgássá (fogasléc). A szervomotor mellett rendelkezésre állt egy 2-es modulú műanyag fogaskerék (6. ábra), aminek lényeges adatait

a 2. táblázat tartalmazza. A fogaskerék anyaga poli(oxi-metilén), rövidítve POM, amely valójában poliformaldehid. Nagy szilárdság, merevség, valamint jó kopásállóság jellemzi [12].

Mivel a fogaskerék adott volt, a fogaslécet ehhez az elemhez kellett igazítani. Terveink szerint megegyező anyagú fogaslécet szándékoztunk beszerezni, ez azonban nem volt lehetséges, ezért a C45-ös anyagot választottuk. A C45-ös acél terhelhetősége 215 MPa, ami jóval nagyobb a műanyagénál, 35 MPa, ezért a fogasléc jelentősen túlméretezett.

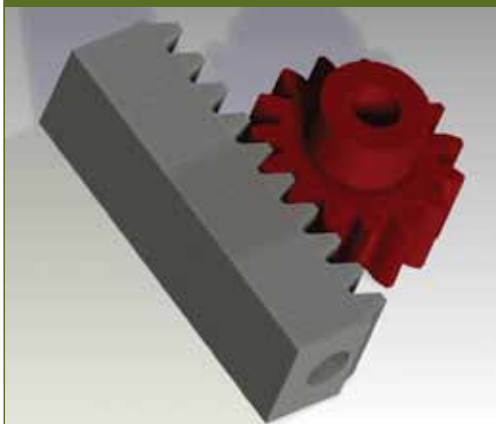
Ebből következően kizárólag a műanyag fogaskereket ellenőriztük fogtő szilárdságra egyszerűsített DIN 3990-es eljárással.

A számítás menete: először a fogaskerekre ható nyomatókót határoztuk meg. Ebben az esetben a szervomotor maximális terhelhetőségét vettük alapul. Következő lépés a fogaskerekre ható tangenciális erő kiszámítása. A tangenciális erőből és a kapcsolószögből számítható a normál erő. Ezek után már csak a radiális erő számítása volt lényeges. Az erők szemléltetése a 7. ábrán látható.

## 3.6. Fogaskerék és a szervomotor agy

A nyomatókó átvitele a szervóról a fogaskerekre egy alumínium aggyal valósul meg. Az agy egyik végén a bordástengellyel ellátott szer-

6. ábra: A fogaskerék és a fogasléc modellje

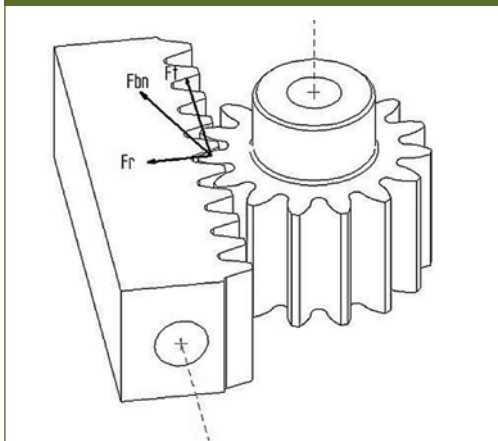


2. táblázat: A fogaskerék adatai

Fogaskerék alapadatok	
Osztókör (d)	30 mm
Szélesség (b)	19 mm
Modul (m)	2
Fogsám (z)	15
Anyag	POM
Megengedhető feszültség	35 MPa

vomotort a tengelyhez, a másik felén a fogaskerékhez ragasztással rögzítik. A tiszta nyíró igénybevétel biztosításához a fogaskereket és az agyat két csavar is összefogja (8. ábra). Szilárdságilag a szervomotor agy már méretezve

7. ábra: A fogaskerekre ható erők



8. ábra: A fogaskerék és a tengely kapcsolata



volt, hiszen az a szervomotor gyári tartozéka. Így tehát csak a ragasztást kell ellenőrizni csavarásra. A számítás az [1] alapján történt, ami során az agy geometriáját egy 15×15 mm-es négyzetnek vettük, ami a biztonság felé történő elmozdulást eredményez. Mivel a ragasztó szilárdsága ismeretlen, (a szokásos érték 30MPa) 15 MPa-t vettük alapul. A szilárdsági

ellenőrzését az elemi szilárdságtannak megfelelően végeztük el.

## 3.7. A tartószerkezet

A tartószerkezet, amit a 9. ábra mutat, rögzíti a mozgató mechanizmust és a szervomotort, vezeti az erőátvitel elemeit és összeköttetést ad a TKT-1 vázszerkezetével. A szerkezetet három lemezből állítottuk össze, hegesztéssel. A geometriai méreteket úgy választottuk meg, hogy azok a lehető legnagyobb szilárdságot adják. Így kézenfekvő volt a hajtómű-vázszerkezet bal oldali hátsó zártszelvényének körbefogása.

9. ábra: A tartószerkezet CAD modellje



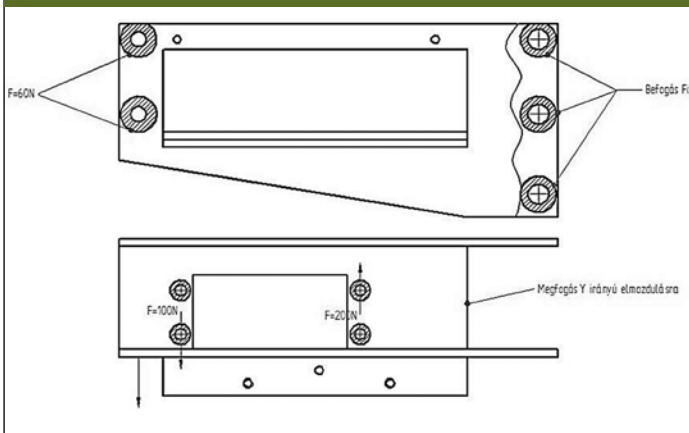
### 3.7.1. A tartószerkezet igénybevételei

Ígénybevétel szempontjából a domináns terhelés a szervomotor által leadott nyomaték, ami hajlításként jelentkezik. Ezen felül a fogaslécen keletkező radiális erő a csúszkákon keresztül tovább adódik a szerkezetre. A kapcsolatot a TKT-1-es szerkezetével és a szervóval erőzáró módon, súrlódás útján valósul meg.

A szerkezet terheléseinek és elmozdulásának számítását véges elemes programmal végeztük.

Az erők és befogások bevitelle a 10. ábra jelölései szerint történt. A csavarok helyénél egy 14 mm-es átmérőjű gyűrű szimulálja a súrlódó

10. ábra: Az erők és megfogások feltétele



tolerál, tehát nincs szükség módosításra.

## 3.8. Lineáris mozgató elemek

A lineáris mozgató elemek, amelyeket a 12. ábra illusztrál, alakítják át a szervomotor forgó mozgását egyenes vonalúvá. A rendszer fő elemei:

1. Fogasléc
2. Tengely
3. Perselyek
4. Összekötő elemek
5. Rögzítő csavarok
6. Egyenesbevezető lemez

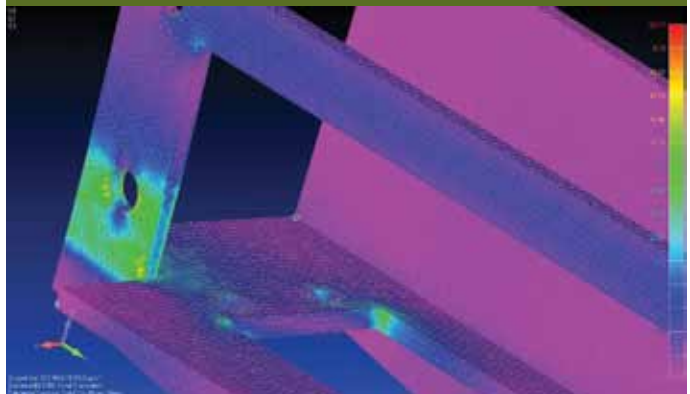
felületet. Ez a rész elmozdulásmentes, míg a második befogást az "y" tengely mentén rögzítettük. A nagyobb biztonság érdekében a varratokat a modelltől elhagytuk, és egy anyagból álló alkatrészként vizsgáltuk. Mivel a varrat a sarkoknál növeli a vastagságot, a szerkezet geometriailag merevebb lesz. E nélkül tehát a szerkezet a szimulációban gyengébb, a valóságban viszont erősebb lesz. A vizsgálat során melegen hengerelt AISI 1030-as anyagtulajdonságot adtunk meg.

A hálózást automatikus hálózási paranccsal hajtottuk végre, tetragonális elemekkel. A kapott eredmény megfelelt a várakozásoknak, a maximális igénybevétel a szervomotor környezetében, illetve a bal oldali csúszka a felfogatásánál található, ahol hajlítás formájában jelentkezik a terhelés. A maximális egyenértékű feszültség 54,82MPa (11. ábra), ami jelentősen alulmúlja az acél megengedhető feszültségét. A szerkezetet azonban nem csak maximális feszültségre, hanem deformációra is méretezni kell, hiszen a túl nagy deformáció a lineáris mozgású elemek beraadásával fenyeget. Ebben az esetben a kitérés 0,15 mm a maximum, amit a szerkezet még

## 3.9. Összeköttetés a himbával

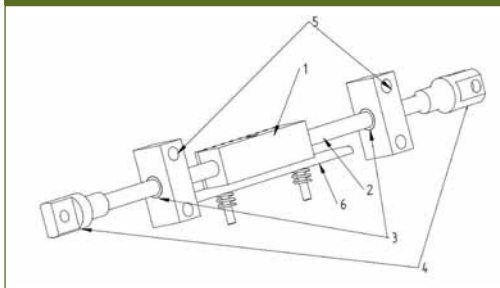
Ez az összeköttetés adja a mechanikai kapcsolatot a GSF mozgató karok és a mechanizmus között. A himba (V) mivel forgó mozgást valósít meg, a 2.1-ben közölt kitéréseket produkálja. A függőleges kitérés miatt egy további köztes elemet is be kell iktatni a rendszerbe, ami kompenzálja a vertikális kitérésből származó különbséget. A megoldást a 13. ábra mutatja. A köztes elemet fejes csapokkal rögzítik a himbához és az összekötő villához. A csapokat az axiális elmozdulás megakadályozására, rögzítő tárcsával szerelik fel.

11. ábra: Feszültségeloszlás

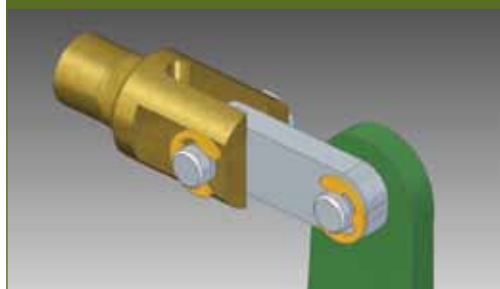




12. ábra: A lineáris mozgató elemek



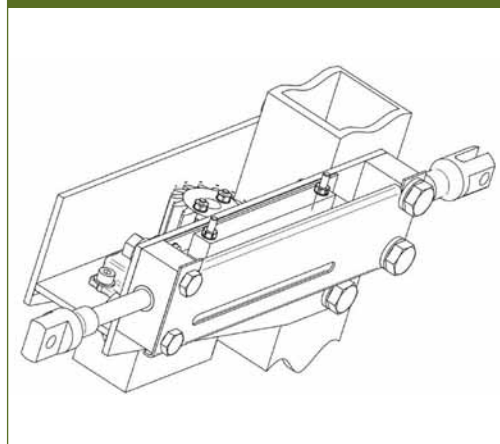
13. ábra: Az összeköttetés



## 3.10. Összeszerelés

A megvalósított konstrukció axonometrikus modellje látható a 14. ábrán.

14. ábra: Megvalósított konstrukció axonometrikus ábrája



## 4. AZ ELEKTRONIKUS RENDSZER

### 4.1. A vezérlő elektronika létrehozása

A vezérlő elektronika kialakítása volt – a mechanizmus mellett – a fejlesztés elsődleges feladata. Programozásának és működésének egyszerű megérthetősége miatt a vezérlő elektronika alapjának az Arduino fejlesztői környezetet és az Arduino Uno nevű platformot választottuk.

#### 4.1.1. Az Arduino Uno ismertetése

Az Arduino egy fejlesztői platform, amely az Atmel AVR mikrokontroller családra épül. Kifejlesztésének oka az egyszerűbb fejlesztési projektek megvalósítása. A fejlesztői platform az úgynevezett IDE-ből (integrált fejlesztői környezet) és az Arduino Board-ból áll. Az IDE-vel lehet programozni az Arduino kártyát. A kommunikáció USB porton keresztül megy végbe [14]. Az Arduino Uno alapja az Atmel mikrochip gyártó cég által kifejlesztett AtMega 328 nevű mikrokontroller. Specifikációit az alábbi, 3. táblázat tartalmazza:

3. táblázat: Az ATMega 328 specifikációi [2]

Lábak száma	28	processzor	8 bit
Max működési órajel	20 MHz	EPROM	1 Kbyte
RAM memória	2 Kbyte	Tápfeszültség	5 V DC
Flash memória	32 Kbyte		

Az Arduino Uno 11 digitális I/O, azaz bemenetnek vagy kimenetnek is felhasználható lábbal és 6 analóg jel beolvasására alkalmas bemenettel rendelkezik. Ezen felül ellátták 2 db 5 V-os és egy 1 darab 3,3 V-os táplálással. Az eszköz megtáplálása történhet USB kábel vagy külön transzformátor segítségével. Feszültség stabilizátor gondoskodik a megfelelő feszültség ellátásról. Két lábat az RS232 szabványú kommunikációra különítettek el: RX a fogadás (receive), TX pedig az adás (transmit).

## 4.1.2. ATTiny45 mikrokontroller

A feladat során az Arduino Uno mellett egy másik mikrokontroller is beépítésre került a szabályozó rendszerbe. Az ATTiny sorozat gyakorlatilag egy gyengébb teljesítményű Atmega328, így programozása hasonló, mint nagyobb társáé, pontosabban annak segítségével történik. A technikai paraméterek a 4. táblázatban találhatók.

4. táblázat: Az ATTiny45-ös specifikációi [3]

Lábak száma	8	processzor	8 bit
Max működési órajel	20 MHz	EPROM	256 Byte
RAM memória	256 Byte	Tápfeszültség	2,7-5,5 V DC
Flash memória	4 Kbyte		

## 4.2. A mikro szervomotorok általános ismertetése

### 4.2.1. A szervomotor működés elmélete

A kisméretű, hobbi célokra használt szervomotor egység négy fő részből áll [21] (15. ábra).

1. Egyenáramú motor
2. Potenciométer
3. Fogaskerék áttétel
4. Működtető áramkör

A szervomotor lényege, hogy valamilyen elektromos jel (input) hatására a villanymotor megfelelő irányba történő elforgatásával gépi mozgatót, esetleg rásegítést valósíthatunk meg. Mivel a legtöbb esetben az egyenáramú villanymotor (1) nyomatéka önmagában nem kielégítő és a fordulatszáma is túl magas, a kimeneti tengelyhez egy nagy áttételű fogaskerék rendszeren (3) keresztül kapcsolódik. Ennek köszönhetően a motor nyomatéka a többszörösére növekszik, fordulatszáma pedig ezzel ellentétes arányban csökken. Ahhoz, hogy a szervomotor pozíciója a működési tartományon belül ismert legyen, általában a kimeneti tengelyt kis potenciométerrel szerelik fel. A működtető áramkör (4) összehasonlítja a bemeneti jel (signal) és a

potenciométertől kapott feszültség értékeket, és ennek megfelelően vezérli a DC motort. A szervomotor legfontosabb paraméterei a terhelhetősége és a forgási sebessége. Az előbbi értéket kg-cm-ben, illetve oz-in-ben (uncia-hüvelyk, 1 oz-in = 0.0734kg-cm) szokták megadni. Ez azt jelenti, hogy a szervomotor az adott erőkaron hány kilogramm terheléssel tud megbirkózni. Minél nagyobb ez az érték, annál nagyobb a szervomotor által kifejtendő nyomaték. A forgási sebességet pedig a 60 fokok elforduláshoz szükséges idővel adják meg (sec/60°).

15. ábra: A szervomotor általános felépítése [16]



A szervomotor egység működéséhez három vezeték szükséges:

- tápvezeték,
- földvezeték,
- jel (signal) vezeték.

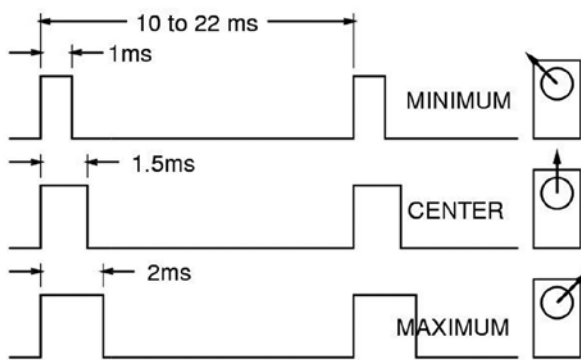
### 4.2.2. PWM vezérlés

A PWM Pulse Width Modulation, magyarul impulzus-szélesség moduláció az egyik legelterjedtebb vezérlési forma a kisméretű szervomotoroknál.

Működésének alapja egy megadott időközönként kibocsátott négyszögjel, amelynek szélessége az adott ismétlési perióduson belül tetszőlegesen változtatható. Ez által változtatható a kimenő feszültség effektív értéke, így a maximális és a nulla feszültségek között bármilyen értéket fel lehet venni. Fontos jellemzője az ún. kitöltési tényező, amely az impulzus és az ismét-

lési periódus hányadosa. Ez azt jelenti, hogy, ha a jel folytonos, a kitöltési tényező értéke 1, míg ha nincs kibocsátott impulzus a kitöltési tényező értéke zérus. E két érték között természetesen az impulzus szélességének megfelelően bármilyen érték felvehető. Az ismétlési periódust a jelet feldolgozó szervomotor tulajdonságainak megfelelően kell megválasztani. Az itt használt szervomotor 50Hz-es jel fogadását képes feldolgozni. A 16. ábrán jól látható a PWM és a szervomotor együttműködése, amelyen a jobb oldali szimbólum a szervomotor vezérelt pozícióját mutatja.

16. ábra: PWM jel hatása a szervomotor pozíciójára [16]



## 4.3. Az elektronikus rendszer felépítése

A tervezésnél szempont volt, hogy a szervomotort lehessen számítógépről LabVIEW környezetből kiadott utasításként vezérelni, és legyen egy tartalék rendszer, amennyiben ez meghibásodna. Előbbit az Arduino Uno, utóbbit pedig az ATtiny45 segítségével valósítottuk meg. A tartalék rendszerben a vezérlő jel kibocsátásához szükséges információt egy potenciométer szolgáltatja. Az elektromos rendszer működése szerint két részre osztható: a feszültségszabályozó és jeladó blokkokra.

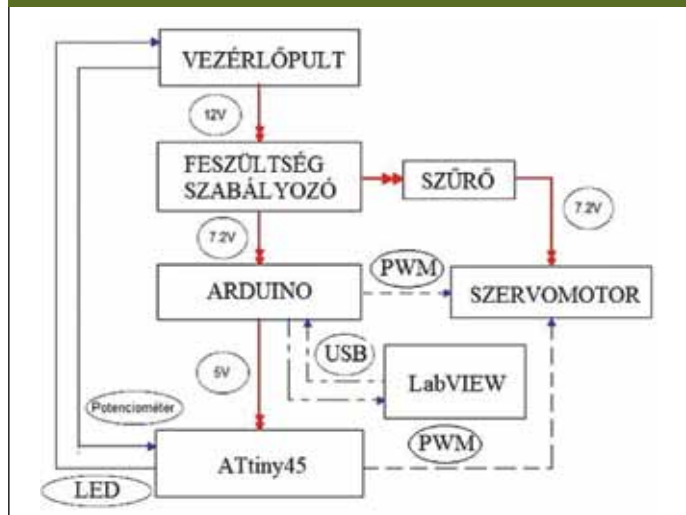
A feszültségszabályozó eszközök feladata a kívánt feszültségérték előállítása és tartása normál üzemi körülmények között. A jeladó berendezések vezérlik a szervót, illetve adják a referencia értékeket a vezérlő moduloknak.

A szabályozó rendszert 7 db blokkra lehet felbontani (17. ábra). A piros vonal a tápáramot jelzi, a kék vonalak a vezérlőjelet szimbolizálják.

## 4.4. A LabVIEW vezérlőprogram

A LabVIEW (Laboratory Visual Engineering Workbench) a National Instruments által fejlesztett vizuális programozási környezet. Ez azt jelenti, hogy a program írása az előre megírt panelek (User Interface-ek) összerakásával valósul meg. Ezzel a programírás leegyszerűsödik, sokkal áttekinthetőbb. A panelek között rengeteg lehetőség van egy mérőeszköz által nyújtott adatok számítógépes kiértékelésére és tárolására, így a mérések is egyszerűbbé válnak. Mivel a TKT-1-es rendelkezik már egy ilyen mérőprogrammal, kézenfekvő, hogy a szabályozó rendszer is ezen a rendszeren

17. ábra: Az elektromos rendszer blokkdiagramja



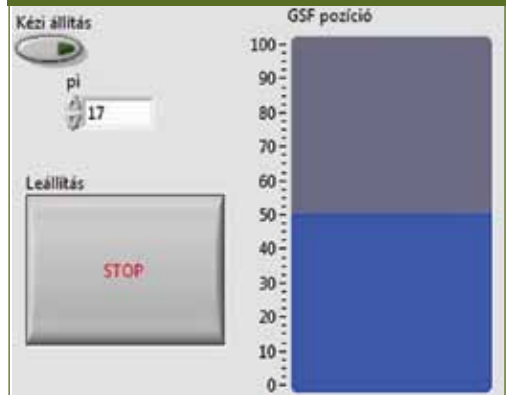
alapuljon. Mivel a főszoftver még fejlesztés alatt áll, a mozgató mechanizmus programja külön íródott és a későbbiek során kerül majd sor egy modulként beépítésre a fő programba.

A LabVIEW az Arduino Interface letöltése után képes kezelni az Arduino Uno-t, azaz arra adatokat küldeni és onnan adatokat fogadni. A kommunikáció USB-porton keresztül zajlik, tehát nem igényel külön csatlakozást a fejlesztő környezethez képest. A kommunikáció folytonos, tehát nem lehet megszakítani a kapcsolatot, ellentétben a sima programozással, ahol a programkódot a mikrokontrollerben tárolják. A program a fentiekben leírt módon, a panelekkel gyorsan összeállítható. Először is be kell lépni a blokkdiagram ablakba és kiválasztani az arduino init interface-t, amivel a program meghatározza a kommunikációs portot, adatsebességet és az eszköz típusát. A beállításokat más számítógépen módosítani kell. A következő lépés, mint az Arduino környezetben is, a szervomotor virtuális csatlakoztatása az eszközhöz. Ez a szervók számának megadásával, – ami most esetünkben egy – majd a szervomotor vezérlő jelének meghatározásával történik. A szervomotor a 9-es lábhoz csatlakozik, tehát ezt a lábat is inicializálni kell. Ezek után, hogy a program folyamatos legyen és ne fejeződjön be idő előtt, egy while ciklust alkalmazunk, ami egészen a stop gomb lenyomásáig működésben marad. A servo write elem oldja meg a megfelelő impulzus kibocsátását, azonban ehhez egy mikroszekundumban értelmezett értéket kell neki megadni. Korábban láthattuk, hogy a normál szervomotorok 600-2400  $\mu$ s-os impulzus tartományban üzemelnek. Ez a felhasznált eszközre is vonatkozik, de a teljes mozgástartomány nincs kihasználva. Ahhoz, hogy a fogasléc ne ütközzön bele a mechanizmus falába, a szervomotor mozgástartományát kalibrálni kellett. Ezt empirikus úton végeztük: megfigyeltük, hogy mely értékeknél éri el a fogasléc a határt, ezáltal meg tudtuk határozni az impulzus intervallumokat. A kapott értékeket az 5. táblázat foglalja össze: A kalibráció után létre hoz-

tunk egy csúszkát, amivel kézi beállítással, a kurzor segítségével lehet mozgatni a GSF-et. Mivel a csúszka 0 és 100 közötti értékeket ad, be kellett szorozni egy konstans értékkel, hogy a megfelelő impulzust bocsássa ki (18. ábra). Ennek képlete (2):

$$t = 1440 + 1,2 \cdot \text{csúszka} \quad (2)$$

18. ábra: A LabVIEW program képernyőképe



## 4.5. A tartalékrendszer vezérlő programja

Az ATtiny45-re is kell egy szervomotor vezérlő programot írni. Ebben az esetben tehát az Arduino IDE segítségével kódolják a mikrokontrollert. Jelentősen egyszerűsíti a helyzetet, hogy az Arduino környezethez számos kiegészítő segédprogramot („könyvtár”) írtak, amelyek segítségével egyszerűen és gyorsan meg lehet írni a különböző eszközök programját. Mivel az Arduino alapkönyvtára 16-bites számlálóra készült, az ATtiny pedig 8-bites timerrel rendelkezik, külön le kellett tölteni egy 8-bites könyvtárat, amit csatolni kellett az alapprogramhoz.

## 5. ÖSSZEFOGLALÁS

### 5.1. Elért eredmények

A mozgató mechanizmus lényegében kész, de még nem készült el a takarólemez marása, ez azonban kozmetikai problémának minősíthető, a berendezés működőképességét semmilyen formában nem befolyásolja. A berendezéssel hajtóműpróbákat hajtottunk végre, amelyek során a LabVIEW által vezérelt szervomotor képes volt a tolorúd mozgatására.

5. táblázat: Impulzus szélességek

Minimum érték	1440 $\mu$ s
Maximum érték	1560 $\mu$ s
Működési intervallum	120 $\mu$ s

A 19. ábrán a felszerelés előtti állapotot láthatjuk, amelyen minden lényeges elem összeszerelésre került.

19. ábra: A mechanizmus összeszerelve



A 20. ábra teszt üzemlet mutat, amit a labor helyiségben végeztünk el, a tényleges indítás előtt. Végül a 21. ábra az indítás két jellegzetes állapotát örökíti meg. A bal oldalt látható részen a tüzelőanyag begyulladásának pillanata, amelyet a turbina terheléseinek mérséklése végett mindenképpen nyitott GSF redőnnyel kell végrehajtani. A jobb oldali részen pedig egy teljesen terhelt állapot figyelhető meg. Érdekes összevetni a két szituációban előálló különbségeket a GSF redőnyzet, valamint a mozgató elemek pozíciójában. Elkészült továbbá az a

20. ábra: a TKT-1-re felszerelt berendezés



21. ábra: Az indítás pillanata (nyitott GSF) és egy terhelt állapot (zárt GSF)



csatlakozó rúd is, amely az eredeti kézi mozgató mechanizmusnak kapcsolja a most elkészített szerkezethez. Abban az esetben, ha a szervomotor megtáplálását lekapcsoljuk, akkor szükség szerint kézi mozgásra is át lehet térni.

Mivel a TKT-1 gázturbinás sugárhajtómű elsődleges felhasználási területe az oktatás és kutatás, emiatt ennek a fejlesztésnek kiemelt szerepe van abban, hogy emelje a színvonalát mind a hallgatók által – pl. a légi járművek szakmai blokk tárgyainak keretein belül – elvégzett mérési feladatoknak, mind pedig a Tanszék jelenleg is futó gázturbinás kutatásainak. Az automatikus mozgató berendezés ugyanis nemcsak a kézi vezérlésnek megfelelő nyílt hurkú vezérlésben működhet, hanem program szerinti változtatást is lehetővé tesz, ami pl. katonai hajtóművek szabályozásának jellegzetessége, azaz az új rendszer az ilyen hajtóművek üzemének szimulációját is lehetővé teszi.

Ezen túlmenően lehetőséget biztosít arra, hogy egy előírt ütemben történő terhelésváltoztatást hozzon létre (pl. fél perc alatt juttassa el egyik végállásból a másikba), ami a kézzel való mozgathoz képest jelentősen növelné a pontosságot, valamint az egyes mérési pontok ismétlési pontossága is javítható lesz így módon.

Megemlíthető még a berendezés védelme is: mint oktatásban részt vevő eszköz, kiemelt szerepe van a biztonságnak. Egy mérés során bármi rendellenesség lép fel, jelentősen csökkenthető egy károsodással járó esemény kockázata, ha a GSF automatikus működtetéséért felelős rendszer rendellenességet észlelve képes a fűvócsövet teljesen nyitni, így minimálisra csökkenteni a gázturbina terhelését.



## 5.2. Továbbfejlesztési lehetőségek

Bár a szerkezet elkészült, működőképességéről éles üzemi viszonyok között is meggyőződhattünk, szükséges a takarólemez legyártása, a szennyeződések kivédése érdekében, számos továbbfejlesztési lehetőség is mutatkozik.

### 5.2.1. Csúszóperselyek cseréje teflonra

A teflon rendkívül kedvező súrlódási és kopási tulajdonságokkal rendelkező anyag, ezért a modern gépgyártásban egyre jobban terjed a felhasználása. A sárgaréz perselyek is kiválóan működnek, de kenést igényelnek és súrlódásuk és kopási tulajdonságuk is jobb. A teflon perselyek száraz kenésűek, ezért a szerkezet kevesebb karbantartást igényelne a jelenleginél.

### 5.2.2. A poliamid perselytartók cseréje

Mivel ezeket az alkatrészeket kézzel (kézifűrész, csiszolópapír) alakították ki, méreteik eltérnek a tervezettől. Habár ezt a kellemetlenséget hézagoló lappal sikerült kiküszöbölni, célszerű volna új, gépi készítésű alkatrészekkel történő cseréjük.

### 5.2.3. A meglévő szervomotor vezérlő áramkör áttervezése

Mivel a szervomotor saját mozgástartományához képest kis szögkitéréseket produkál, és a TKT-1 rendelkezik pontos lineáris potenciométerrel, elképzelhető a szervomotor saját potenciométerének és vezérlő áramkörének cseréje egy külső mikrokontroller vezérelt áramkörre, ami érzékenyebb hangolásra lenne alkalmas, mint az eredeti. Továbbá a mikrokontroller szabályozhatná az éppen fékező üzemmódban lévő villanymotor nyomatékát. Ezzel sokkal biztosabb helyzet tartást lehetne elérni.

### 5.2.4. Kétparaméteres szabályozás létrehozása

Talán a legperspektivikusabb továbbfejlesztési lehetőség a hajtómű szabályozó rendszerébe

történő integrálás, és ezek nyomán a kétparaméteres szabályozás megvalósítása, amelyben a hajtómű tolóereje sokkal pontosabban tartható, mivel a GSF pozíció egy további beavatkozási lehetőséget teremt a tüzelőanyag-betáplálás mellett. A hagyományos egyparaméteres megoldás során választani kell: vagy a fordulatszám, vagy más jellemző (pl. EPR) szerint végezzük a beavatkozást, de így a megzavarásokat (pl. repülési feltételek megváltozása) nehézkesen lehet figyelembe venni. Amennyiben a tüzelőanyag-betáplálás mellett a fűvócső keresztmetszet is módosítható, a kettővel egyszerre két jellemzőjét lehet a hajtóműnek az aktuális elvárásokhoz adaptálni. Ezáltal a tolóerő állandósága nagyobb pontossággal, szélesebb üzemmód-tartományban biztosítható. A megoldást a fejlett katonai hajtóműveken alkalmazzák. Ezek vizsgálata, modellezése is lehetővé válik az újonnan létrehozott rendszerrel.

## FELHASZNÁLT IRODALOM

- [1] Alfred Böge: Formeln und Tabellen Maschinenbau 3. kiadás, ISBN:978-3-8348-1915-4
- [2] ATMega328 adatlap: <http://www.atmel.com/devices/atmega328.aspx> (megtekintés: 2016-05-17)
- [3] ATTiny45 adatlap: <http://www.atmel.com/devices/ATTINY45.aspx> (megtekintés: 2016-05-17)
- [4] Beneda Károly: Development of a Modular FADEC for Small Scale Turbojet Engine. In: Proceedings of SAMI 2016 – IEEE 14th International Symposium on Applied Machine Intelligence and Informatics, Herľany; 2016, pp. 51-56, DOI: <https://doi.org/10.1109/SAMI.2016.7422981>
- [5] Beneda Károly: Fűvócsövek. Tanszéki segédlet, BME VRHT (2016)
- [6] Beneda Károly: Hajtómű nyomásviszony (EPR) alapú szabályozás megvalósítása a TKT-1 gázturbinás sugárhajtóművön. Repüléstudományi Közlemények, 26. évf. (2014), 2. szám, pp. 191-210, ISSN 1789-770X, [http://www.repulestudomany.hu/kulonaszamok/2014\\_cikkek/2014-2-17-0154\\_Beneda\\_Karoly\\_](http://www.repulestudomany.hu/kulonaszamok/2014_cikkek/2014-2-17-0154_Beneda_Karoly_)

- [7] Tamas.pdf (megtekintés: 2016-05-17)  
Beneda Károly: A TKT-1 sugárhajtómű fejlesztése és alkalmazása a BME repülőgépes képzésében. Repüléstudományi Konferencia, Szolnok, 2010. HU ISSN 1789-770X. [http://www.repulestudomany.hu/kulonszamok/2010\\_cikkek/Beneda\\_K\\_T\\_1.pdf](http://www.repulestudomany.hu/kulonszamok/2010_cikkek/Beneda_K_T_1.pdf) (megtekintés: 2016-05-17)
- [8] Beneda Károly: Épülő gázturbinás sugárhajtómű üzemi jellemzőinek vizsgálata matematikai modell segítségével. Diplomaterv, BME Repülőgépek és Hajók Tanszék, 2006.
- [9] Beneda Károly: Épülő kisméretű kísérleti sugárhajtómű termikus-áramlási számítása és átalakításának problémái. Tudományos diákköri dolgozat, BME Repülőgépek és Hajók Tanszék, 2005.
- [10] Bicsák György, Veress Árpád: Verification of a Cost Efficient Solution to Simulate the Airflow Conditions in an Oil-To-Air Heat Exchanger of a Small Aircraft Applying Porous Material. Repüléstudományi Közlemények, 27 évf. (2015) 2. szám, pp. 253-271. URL: [http://www.repulestudomany.hu/folyoirat/2015\\_2/2015-2-19-0209\\_Bicsak\\_Gyorgy-Veress\\_Arpád.pdf](http://www.repulestudomany.hu/folyoirat/2015_2/2015-2-19-0209_Bicsak_Gyorgy-Veress_Arpád.pdf) (megtekintés: 2016-05-17)
- [11] John Foster: Design Analysis of Messerschmitt Me-262 Jet Fighter. Part II – The Power Plant. In: J. L. McLellan: Me-262. pp. 23-40. [www.enginehistory.org/German/Me-262/Me262\\_Engine\\_2.pdf](http://www.enginehistory.org/German/Me-262/Me262_Engine_2.pdf) (megtekintés: 2016-05-17)
- [12] Dr. habil. Kalácska Gábor: POM rudakról, lemezekről. A műszaki műanyag félkész termék ismertető sorozat (III. RÉSZ) <http://www.quattroplast.hu/pom-rudakrol-lemezekrol-muszaki-muanyag-felkesz-termek-ismerteto-sorozat-iii-resz> (megtekintés: 2016-05-17)
- [13] Kovács Péter: Automatikus működtető rendszer tervezése változtatható geometriájú fúvócsőhöz. BSc szakdolgozat, BME VRHT, 2016.
- [14] Mikrokontroller programozás: <http://www.lydiard.plus.com>
- [15] Pásztor Endre, Beneda Károly: A TKT-1 kisméretű, oktatási és kutatási célú gázturbinás sugárhajtómű első tíz éve. Repüléstudományi Közlemények, 27. évf. (2015) 3. szám, pp. 117-132. [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) (megtekintés: 2016-05-17)
- [16] PWMábra: <http://projectedneuralactivity.blogspot.hu/2012/12/controlling-servo-using-raspberry-pi.html> (megtekintés: 2016-05-17)
- [17] Rohács Dániel, Rohács József: Impact of Out-Of-The-Box Approach on the Future Air Transportation System. Repüléstudományi Közlemények, 27. évf. (2015) 3. szám, pp. 189-206, [http://www.repulestudomany.hu/folyoirat/2015\\_3/2015-3-14-0243\\_Rohacs\\_D-Rohacs\\_J.pdf](http://www.repulestudomany.hu/folyoirat/2015_3/2015-3-14-0243_Rohacs_D-Rohacs_J.pdf) (megtekintés: 2016-05-17)
- [18] Rohács József, Rohács Dániel, Jankovics István: Conceptual development of an advanced air traffic controller workstation based on objective workload monitoring and augmented reality. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part G – Journal of Aerospace Engineering 2016. DOI: <https://doi.org/10.1177/0954410016636154>
- [19] Dr. Sánta Imre: Segédlet gázturbinás repülőgép hajtómű évfolyamtervhez. BME VRHT (2007)
- [20] Szervomotor ábra: [http://www.robotiksystem.com/servo\\_motor\\_types\\_properties.html](http://www.robotiksystem.com/servo_motor_types_properties.html) (megtekintés: 2016-05-17)
- [21] Szervomotor működési elv: <http://www.jameco.com/jameco/workshop/howitworks/how-servo-motors-work.html> (megtekintés: 2016-05-17)



## **The computer-aided design of an automatic operating system for the variable-geometry nozzle of an experimental jet engine**

The experimental gas turbine has a key role in both the education and the scientific work of students and professors. It helps to understand the thermal processes occurring in the engine, and, more importantly, provides knowledge and practical application possibilities to illustrate the operation of the FADEC systems prevalent today. The current development of the gas turbine improves the accuracy of the change in the nozzle outlet cross-section, thereby the quality of the regulation according to the "EPR". The proposed enhancements, i.e. the activation of the mechanism in the regulatory system of the engine, may result in additional measurement and research opportunities.



## **Die computergestützte Gestaltung eines automatischen Betriebssystems für ein experimentelles Strahltriebwerk mit variablen Düsengeometrie**

Die experimentelle Gasturbine spielt eine Schlüsselrolle sowohl in der Ausbildung als auch in der wissenschaftlichen Arbeit von Studenten und Professoren. Es hilft die im Triebwerk auftretenden thermischen Prozesse zu verstehen, und, was noch wichtiger ist, bietet Wissen und praktische Anwendungsmöglichkeiten, um den Betrieb der heute vorhandenen FADEC-Systeme zu veranschaulichen. Die aktuelle Entwicklung der Gasturbine verbessert die Genauigkeit der Änderung des Düsenaustrittsquerschnitts, wodurch auch die Qualität der Regelung nach dem "EPR" erhöht wird. Die vorgeschlagenen Verbesserungen, wie die Einbeziehung des Mechanismus ins Regulierungssystem des Triebwerks, können zu zusätzlichen Mess- und Forschungsmöglichkeiten führen.

### **E számunk lektorai**

Dr. Gulyás András

Horváth Lajos

Dr. Katona András

Kövesné Dr. Gilicze Éva

Szűcs Lajos

Dr. Varga Béla