

Beneda Károly, Kisszölggyémi István, Faltin Zsolt

FORDULATSZÁM ÉRZÉKELŐ RENDSZER FEJLESZTÉSE KÍSÉRLETI SUGÁRHAJTÓMŰHÖZ

Korunk repülőgépeinek nagy része gázturbinás sugárhajtóművel rendelkezik, melyeket már szinte kivétel nélkül elektronikus módon szabályoznak, s az ipar más területeitől eltérően egy-két nagyságrenddel nagyobb üzemi fordulatszámok jellemzőek rájuk. A Vasúti Járművek, Repülőgépek és Hajók Tanszéken található TKT-1-es kísérleti sugárhajtómű rendelkezik digitális szabályozással (hajtómű nyomásviszony, EPR; hajtómű teljesítményviszony, TPR szerint), azonban még a fordulatszámérés, valamint az arra épülő szabályozás ez idáig nem valósult meg, részint a fentebb említett sajátosság miatt. Jelen cikk célja bemutatni egy fordulatszám mérését megvalósító mérőrendszer kivitelezését, a szenzor mechanikai elhelyezését biztosító konzol megtervezésétől kezdve a tesztáramkörök megépítésén át az üzem közben történő ellenőrzésig. Cél volt egy olyan rendszer megalkotása, mely a jelenlegi moduláris teljes hatáskörű, digitális elektronikus szabályozórendszerbe (FADEC) egyszerűen beilleszthető.

Kulcsszavak: gázturbina, FADEC, szabályozás, mikrokontroller, TKT-1, sugárhajtómű, fordulatszám

BEVEZETÉS

Gázturbinás sugárhajtóművek

Napjaink légitársaságai elképzelhetetlen lenne sugárhajtóművek nélkül. Az 1930-as években szabadalmaztatott és létrehozott erőforrás a második világháború alatt már bevetésre került, és a 60-as évek végétől, illetve a 70-es évek elejétől teljesen átvette a főszerepet a dugattyús motortól. Alkalmazásának elterjedésének legfőbb oka a nagy teljesítménysűrűség (akár 15 kW/kg), az ebből fakadó kisebb geometriai méretek, illetve az előnyök közé tartozik még többek között az kisebb káros anyag kibocsátás [1]. A két gép hőtani folyamatában különbség csak a hőbevitelnél és -elvonásnál jelentkezik, a gázturbinánál izobár, a dugattyús motornál izochor hőcsere részfolyamatokkal valósul meg a körciklus. Fontos továbbá, hogy utóbbi esetében ciklikus-, míg a gázturbinánál folyamatos üzembről beszélünk [2].

A modern polgári és katonai repülőgépeket kivétel nélkül gázturbinás sugárhajtóművel [3], illetve tengelyteljesítményt leadó gázturbinával hajtjuk meg [4]. Az elmúlt évtizedeket megfigyelve észrevehetjük, hogy a katonai gépeknél alkalmazott hajtóművek kivételével a nagy kétáramúsági fokkal rendelkező hajtóművek terjedtek el, ami az egyáramú, és a légsaváros gépek között teremt átmenetet. Ennek elsődleges oka a propulziós hatásfok, és a megfelelő tolóerő optimalizálásából adódik, hiszen a kettő között ellentmondás van. A feloldás az, hogy minél nagyobb tömegáramú levegőt mozgassuk meg relatív kicsi kiáramlási sebességgel, vagyis a kétáramúsági fok a fejlesztések során növekvő tendenciát mutat [2].

Ettől függetlenül, egyáramú sugárhajtóműveket még napjainkban is alkalmaznak, [5]. Emiatt a kutatási célokra alkalmazott eszközök is igen elterjedtek [6], akár különleges repülési feltételek szimulációit is meg tudják valósítani (mint pl. [7] vagy [8]) vagy rendkívül kis méretű mikrogázturbinák vizsgálatára is alkalmasak [9]. A cikk célja a TKT-1-es kísérleti hajtóművön megvalósítandó fordulatszámérés és szabályozás megalkotásának ismertetése.

Szabályozási törvényszerűségek

A gázturbinára felírható anyagmérlegek és mechanikai energiamérleg alapján kapott 3 egyenletből álló egyenletrendszerhez 4 darab ismeretlen tartozik [10]. A hiányzó egyenletet a szabályozási törvényszerűség alapján kapjuk meg.

Az egyszerűség kedvéért a cikkben csak az egyparaméteres szabályozás elve kerül ismertetésre. Ekkor a szabályozás történhet [11]:

- $n = \text{állandó}$;
- $T_3^* = \text{állandó}$;
- $n_{\text{átszámított}} = \text{állandó}$;
- hajtómű nyomásviszony alapján (Engine Pressure Ratio, EPR);
- hajtómű teljesítményviszonya alapján (Turbofan Power Ratio, TPR).

A felsoroltak közül csak a napjainkban elterjedtebbeket ismertetem.

Az átszámított fordulatszám definíció szerint [11]:

$$n_{\dot{a}} = n \cdot \sqrt{\frac{288}{T_0^*}} \quad (1)$$

A képletből látszik, hogy a fizikai fordulatszám mellett a torlóponyi környezeti hőmérséklet befolyásolja az átszámított értéket, emiatt a hajtómű üzemállapotáról pontosabb képet kapunk. Ha nő a Mach-szám, akkor a T_0^* is. Ennek eredményeképpen a fizikai fordulatszám és a T_3^* értékei is fokozódni fognak, ami miatt ezzel a szabályozással biztosítható a legkevésbé a tolóerő állandó értéken tartása. Éppen ezért másfajta szabályozórendszerrel kiegészítve alkalmazzák. Ha elektronikus szabályozóval (lásd később) párosítjuk, akkor az számít egy $n_{1\dot{a}}$ (az angol szakirodalomban N1C, azaz N1 Corrected, az egyszerűbb, indexmentes jelölés miatt) értéket, ami az adott Mach-szám, p_0 , T_0 viszonyok mellett a szükséges tolóerőt adja ki. A paraméterek a repülés üzemmódjától függően természetesen változnak, azonban ez nem jelent külön problémát, mivel a gázkar állítása helyett a szabályozó változtatja N1C értékét, biztosítva a megfelelő tolóerőt [11].

A széles körben elterjedt szabályozási módok az átszámított fordulatszám és EPR szerintiék. Az EPR definíció szerint [11] a p_4^* a turbina utáni torlóponyi valamint a p_1^* a kompresszor belépő torlóponyi nyomásának hányadosa:

$$EPR = \frac{p_4^*}{p_1^*} \quad (2)$$

A modern, nagy kétáramúsági fokkal rendelkező hajtóművek ventillátor sérülése esetén annak teljesítőképessége csökken. Ebben az esetben az N1 értéket kell szükségszerűen trimmelni a tolóerő megfelelő tartásához. Az utánállítás mértékéhez ad segítséget a Rolls-Royce Trent 900 és 1000-es hajtóműveken alkalmazott TPR. A TPR értékét a kompresszor nyomásviszony és a hajtómű gyök alatt vett hőmérsékletviszonyának szorzata adja. Tehát [12]:

$$TPR = \frac{p_2^*}{p_1^*} \cdot \sqrt{\frac{T_3^*}{T_1^*}} \quad (3)$$

A p_2^* a kompresszor utáni torlóponyi nyomást, míg a T_1^* a kompresszor előtti torlóponyi hőmérsékletet jelöli. Ez a módszer bizonyítottan működőképes egyáramú gázturbinás sugárhajtómű

szabályozására nem csak tartalék, hanem fő üzemmódban is. Ez jobban belegondolva elképzelhető, hiszen a képletben semmi kifejezetten kétáramú sugárhajtóműre utaló érték nincsen [10].

Teljes hatáskörű, digitális elektronikus szabályozórendszerek (Full Authority Digital Electronic Control, FADEC)

A szabályozás alapvető célja adott gázkar álláshoz adott tolóerő biztosítása különböző repülési feltételek mellett, ami a régi hidromechanikus rendszerekkel nem volt elég kielégítő, hiszen azok a gázkar időnkénti állítását igényelték. Ez a kétpilótás eljárások elterjedésével, valamint a hajtóművek gazdaságosságának előtérbe kerülésével már nem bizonyult kielégítőnek. A megoldást a hidromechanikus egység teljes elhagyása, és a helyükbe lépő elektronikus vezérlőegységek adták, ahol a cél a biztonság és pontosság növelése a hajtómű valamennyi üzemmódján, valamint a pilóták terhelésének csökkentése. Ez esetben a hajtómű irányítását csakúgy, mint a röpsúlynál zárt hurkú szabályozással oldják meg. A fűvócsó fix geometriája miatt egyparaméteres szabályozásról beszélhetünk, ahol az egyetlen beavatkozási lehetőség a betáplált tüzelőanyag mennyisége. Az első polgári teljes hatáskörű digitális elektromos szabályozórendszerrel a Pratt and Whitney PW2000-es (1984) hajtóműveit szerelték fel, igaz, itt még csak egycsatornás (Single FADEC) formában. Ha az egyetlen csatorna kiesik, elveszítjük az adott erőforrás feletti kontrollt, mivel nincsen tartalék szabályozórendszer. Emiatt hamar nyilvánvalóvá vált, hogy két csatornára (Dual FADEC) van szükség, így ha az egyikkel probléma támad, a másik annak helyébe tud lépni. Csakúgy, mint az előző esetben, ezt a megoldást is a Pratt and Whitney alkalmazta először a hajtóműgyártók közül, a PW4000-es hajtóművén. Kezdetben a két csatorna közül az egyik elsőbbséget élvezett, ez finomabb (több paraméter szerinti) szabályozást tett lehetővé, a másik csatorna csak az elsődleges csatorna kiesése után lépett működésbe [11].

Ezt az alá-, fölérendeltséget később teljesen megszüntették. A bevett gyakorlat két teljesen egyenértékű (A és B) csatorna működtetése. Ez a gyakorlatban annyit tesz, hogy amíg az egyik csatorna vezérel, addig a másik ugyan úgy beolvassa a szükséges bemenő analóg és digitális adatokat és elvégzi azok feldolgozását, azonban a kimeneteit nem vezérli, ezért egy úgynevezett melegtartalék, „hot standby” szerepet tölt be. A két csatorna között folyamatos a kommunikáció (Cross Channel Data Link, CCDL), aminek köszönhetően a hibás adatok kiszűrhetőek. Mind-egyik csatorna magában foglal hibafeltáró logikát, amely képes felismerni és behatárolni a problémát, majd biztosítja annak kiküszöbölését. Ennek a tulajdonságának köszönhetően több rendellenesség esetében is képes marad a rendszer bizonyos fokú működésre, így a szabályozásra való képessége nem veszik el. Ez az úgynevezett hibatűrő képesség (fault tolerant). Ezzel a sajátosságával a rendszer ki tudja választani az aktuálisan vezérlést végző csatornát, mely több hiba esetén az egyes csatornákból lévő rendellenességek súlyozásával kerül meghatározásra. Általánosságban elmondható, hogy ha a számítási algoritmussal fordul elő probléma, akkor a további vezérlés a másik csatorna feladata. Abban az esetben, ha bemenő paraméter esik ki, akkor a csatornák közötti kapcsolatot megvalósító adatkommunikáción keresztül történik az adott információ pótlása, a másik csatornáról. Ha mindkét rendszerről elvész egy adott információ, akkor a hajtómű matematikai modelljét vagy egy alapértéket használva helyettesíthető a hiányzó adat. Amennyiben olyan jellemző veszik el, amelyet más értékekből nem lehet kiszámítani, üzemmód-váltás következik be. A FADEC rendszerek rendelkeznek beépített öntesztelő funkcióval (Built-In Test Equipment, BITE). Ez nem csak karbantartáskor nyújt könnyebbséget a

hibák kijelzésével, hanem folyamatos diagnosztikát biztosít a hajtómű üzeme során. Működés közben a repülőgép kommunikációs rendszerével (Aircraft Communications Addressing and Reporting System, ACARS) karöltve tudja a földi karbantartást informálni az esetleges hibákról, mely a javítás előkészítését segíti [11], [13].

A csatornák szerepei általában indításnál cserélődnek, így például az odaúton melegtartalékként üzemelő „A” csatorna a visszaúton szabályoz. Ha mindkét csatorna kiesik, a következmények a gyártó cég filozófiájától függenek. A General Electric esetében hajtóműleállásról, ha pedig Pratt and Whitney erőforrásról van szó, akkor alapfordulatra való állásról, és így a gázkar hatástalanra válásáról beszélhetünk. Az ECU funkciói az 1. ábrán láthatóak.



1. ábra Teljes hatáskörű, digitális elektronikus szabályozórendszer

A fent említett tulajdonságok részletezése után látható, hogy a FADEC több mint egy szabályozórendszer. A hagyományos hidromechanikus és hibrid megoldásokkal szemben támasztott előnyei a következők [11], [13]:

- nincs szükség a szabályozórendszer trimmelésére. Ez a korábbi rendszerek jellemzője volt, ami jelentős mennyiségű hajtóműjáratással, és ebből adódóan kerozin felhasználással járt;
- a pompázsgátló eszközök kifinomult vezérlésének köszönhetően csökken a tüzelőanyag-fogyasztást, mivel a hajtómű szélesebb üzemmod-tartományban működhet levegőelvitel nélkül (1. ábra: VBV);
- fokozatmentesen állítható aktív részvezérlést tesz lehetővé, ami által az optimális rész méret folyamatosan biztosítható (1. ábra: Clearance Control);
- a hidromechanikus rendszerek érzékenyek voltak a gyártás pontosságára és a használatból adódó kopásokra. Emiatt ezek ismétlési pontossága sokkal kedvezőtlenebb, mint a digitális számítógépeké;

- képes az indítási ciklus teljes körű (Airbus filozófia), illetve részleges (Boeing filozófia) levezénylésére;
- biztosítja a hajtómű nyomás-, hőmérséklet-, fordulatszám-korlátozásainak betartását;
- az állandó fordulatszám megtartásának köszönhetően nem következik be a hajtómű levegőelvételtől, és környezeti paraméterektől függő felpörgése, illetve lassulása. A régi hidromechanikus rendszerrel ellátott gépek egy részének alapjárata a legnagyobb terhelésre volt méretezve, melyhez egy adott tüzelőanyag-betáplálás tartozott. Ha a terhelés egy része megszűnt, akkor fordulatszám-növekedés, és ennek következtében felesleges tolóerő-, valamint tüzelőanyag-fogyasztástöbblet keletkezett.

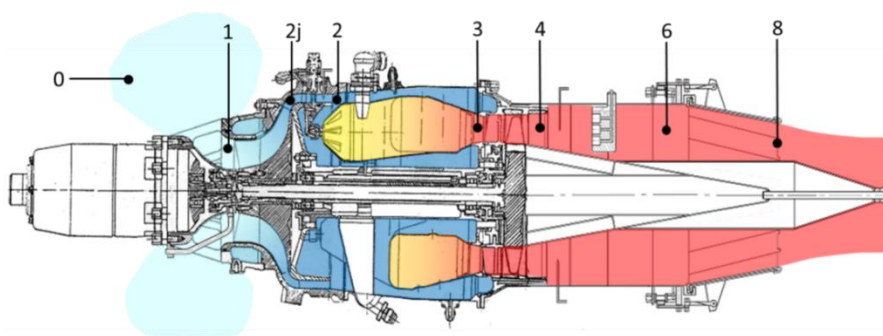
A TKT-1 KISMÉRETŰ OKTATÁSI ÉS KUTATÁSI CÉLÚ GÁZTURBINÁS SUGÁRHAJTÓMŰ ÉS RENDSZEREI

A TKT-1 rövid ismertetése

A sugárhajtómű egy TSz-21-es indító hajtóműből került átalakításra, mely eredetileg a MiG-23 és Szu-22 harci gépeken teljesített szolgálatot a Magyar Honvédség kötelékében. A kapott egység eredetileg a 01-es oldalszámú MiG-23MF vadászgépen működött, azonban azt „bizonytalan indítás” miatt kiszerezték, majd konzerválták.

A TSz-21 eredetileg egy egytengelyes gázgenerátorral rendelkező, egyáramú munkaturbinás (szabadtengelyes) repülőgép-fedélzeti indító gázturbina. Fontos, hogy nem egy klasszikus értelemben vett fedélzeti gázturbináról van szó, ennél a típusnál csak a hajtómű indítása volt a cél, nem pedig egyéb segédenergia szolgáltatása, ez az üzemi viszonyokat is nagyban befolyásolja. A munkaturbina által hajtott bolygómű vitte át a repülőgép hajtóművének indításához szükséges nyomatókat az áttételházon keresztül a nagynyomású forgórészre. Az indító gázturbina gázgenerátora egy radiális centrifugál kompresszorból, és egy egyfokozatú axiális turbinából áll. A beömlőnyílás körgyűrű alakú, ami előtt kapott helyet a SzT-3PT villamos indítómotor. A gyűrűs égéstérbe négy tüzelőanyag-fúvóka juttatja el a kerozint [14].

A gázturbina a mai formáját sok éves munka és átalakítások árán érte el. A gépegység hosszmetsetét a 2. ábra mutatja be, a jellegzetes keresztmetszetek jelölésével.

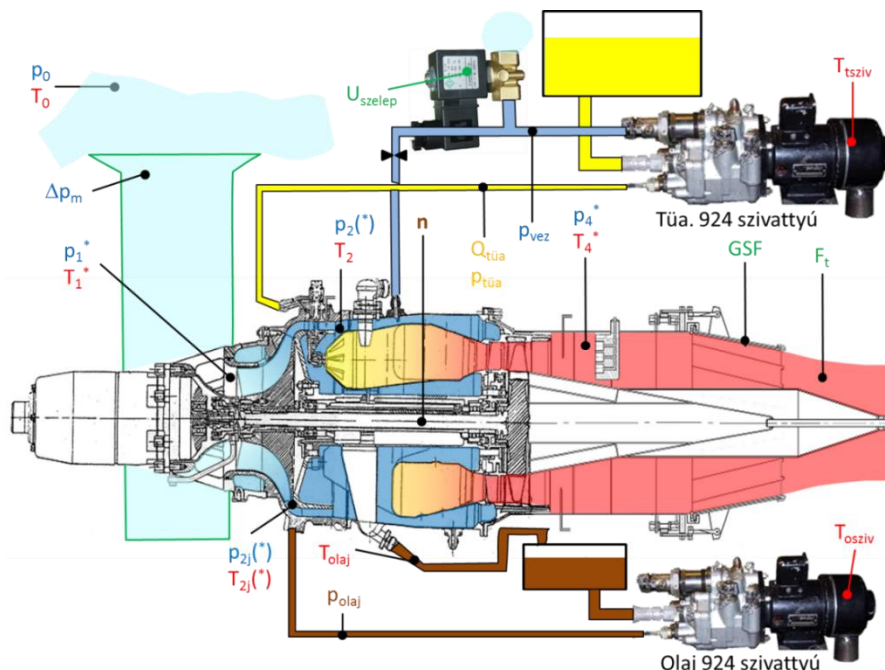


2. ábra A TKT 1-es hosszmetsetete a jellegzetes keresztmetszetekkel kiegészítve [15]

A munkaturbina eltávolításra került, helyébe a központi kúp, és az azt körülölelő turbina utáni diffúzor került, változtatható keresztmetsetetű gázsebesség-fokozó (GSF) redőnyzettel felsze-

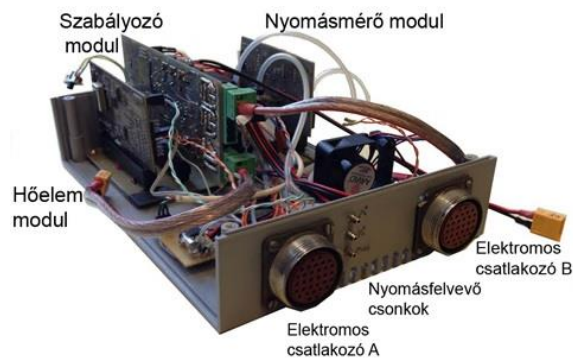
relve. A központi kúp átmérője, és hossza később meg lett növelve, hogy a jelenleg biztonságos, névleges fordulatszám 90%-nál a tolóerő elérje a 300 N-t.

A legjelentősebb fejlesztések azonban a szabályozórendszert érintették. Az eredeti vezérlő rendszer még a kompresszor utáni nyomást vezérlőnyomásként felhasználva végezte a szabályozást. A korszerűsítés célja egy Dual FADEC rendszer kialakítása volt. Az első elektronikus szabályozó, mely a PELE fantázianevet viselte, először még csak a kezelő által beállított munkapont beállítását, és megtartását volt képes biztosítani, az indítási és leállítási ciklusok lebonyolítására még nem volt alkalmas. A FADEC teljes kiépítése előtt az EPR, TPR szabályozási törvények alkalmazására került sor.



3. ábra TKT-1 és mérési helyei

A jelenlegi szabályozórendszer (TEDDI: Teljes Hatáskörű, Duplikált Digitális Szabályozórendszer) moduláris felépítésű, az egyes feladatok végrehajtásáért egy-egy áramkör felelős. A hardver rész felépítését tekintve rendelkezik [16] egy nyomásmérő, egy hőmérséklet-mérő és a szabályozás megvalósításáért felelős egységgel.

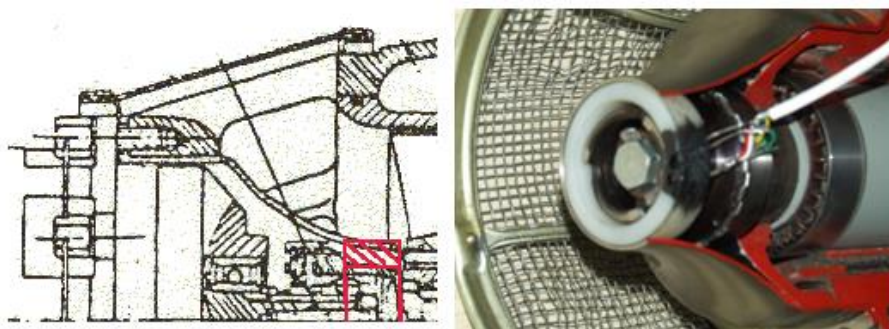


4. ábra A TEDDI felépítése ([16] nyomán)

FORDULATSZÁMMÉRÉS MEGVALÓSÍTÁSA A TKT-1-ES GÁZTURBINÁS SUGÁRHAJTÓMŰVÖN

Korábbi kísérletek a fordulatszám-mérés kivitelezésére a TKT-1 hajtóművön

Az alárendelt feladatköre miatt a TSz-21 indító gázturbinának nem volt lényegi mérőrendszerre [14], így a fordulatszám-érzékelés is hiányzott természetesen. Az első lehetőség az indítómotor áramvonalazó burkolata alatt kínálkozó gyűrű alakú térben, optikai, visszatükröződés elvén működő fordulatszám-érzékelés megvalósítása lett volna. Ennek első változata egy műanyag gyűrűben tartalmazta a fénykibocsátó diódát (LED-et), valamint mellette a fény érzékelését végző fototranzisztort. A vezetékek elhelyezése nem volt tökéletes, az indítómotor tengelykapcsolója igen hamar tönkretette azokat. Ennek érdekében elkészült egy új, továbbfejlesztett verzió, ami tesztkörnyezetben a gázgenerátor forgatásánál tökéletesen működött, azonban beszerelt állapotban – valószínűleg a próbapad fémszerkezete által létrehozott elektromágneses zavaroknak köszönhetően – teljes működésképtelenséget produkált. A szenzor elhelyezése és az első megvalósított egység az 5. ábrán látható.



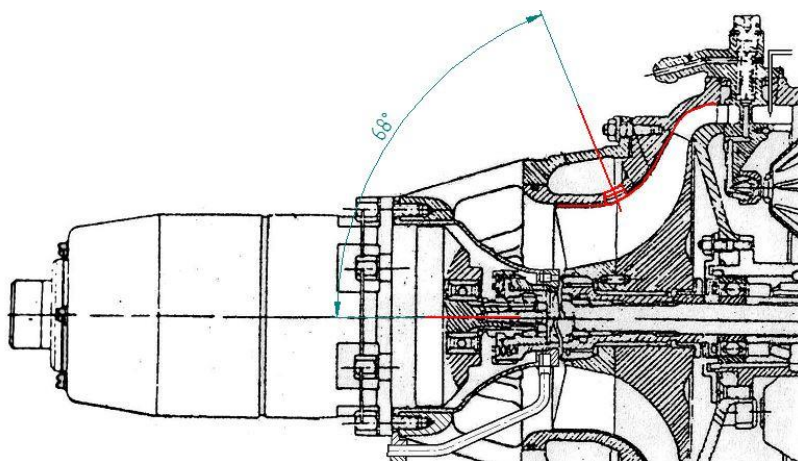
5. ábra A fordulatszám-érzékelő elemek tartógyűrűjének telepítési helyszíne az indítómotor burkolat alatt [17]

A fordulatszám-mérő tartókonzol tervezése

A mérés létrehozásához először a kapott fordulatszám-mérő elhelyezésének megoldása volt a feladat. A legkézenfekvőbbnek a kompresszorház megfúrása tűnt, ugyanis annak külső köpenye alatt egy pompázsgátló kamra került kialakításra, aminek furatokkal ellátott palástján keresztül már eljuttatható a jeladó a lapátokig. A konzol felfogatására a kompresszorházat rögzítő töcsavarok közül kettőt jelöltünk ki.

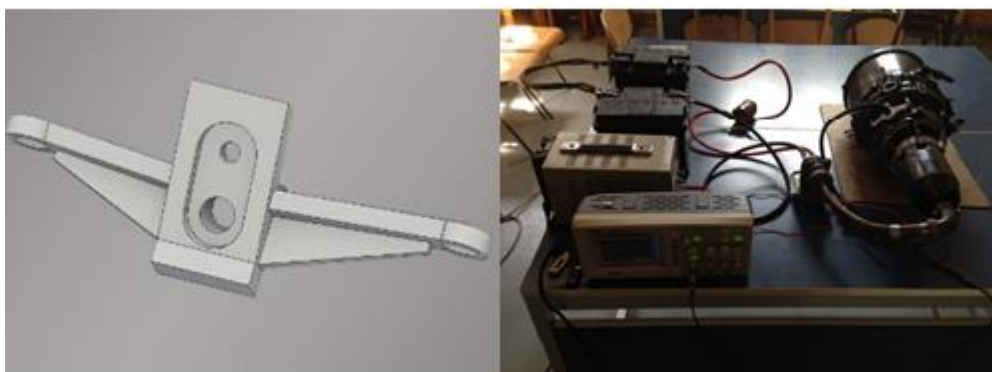
A tartó kialakításához két lehetőség kínálkozott, az egyik 3D nyomtatással, a másik lemez-munkával való megvalósítás volt. A szenzor pontos pozicionálása rendkívül fontos volt, hiszen a túlzott belógás következtében a kompresszor darálta volna be, túl nagy távolságról pedig az érzékelő nem működött volna. Ezek milliméteres nagyságrendek, ugyanis a fordulatszám-mérő leírása alapján a megfelelő (kompresszor lapáttól mért) távolságnak 0,3 mm és 1,4mm között kell lennie. Ennek köszönhetően a 3D nyomtatás mellett döntöttünk. Az ideális felfogtatás érdekében a két töcsavart hosszabbakra kellett cserélni. A konzol elhelyezésének megértéséhez nyújt segítséget a 6. ábra.

A legelső, amit meg kellett állapítanunk, a szenzor vízszintessel bezárt szöge volt. A TKT-1 hosszmetzeti ábrájának segítségével sikerült meghatározni a furat középvonalának a hajtómű tengelyével bezárt szögét, ami 68 fokra adódott.



6. ábra A szenzor elhelyezésének szemléltetése

A konzol a lyukkör meghatározását követő tervezés és további szilárdsági megfontolások után nyerte el végső formáját.



7. ábra A konzol 3D modellje, valamint a szerelés utáni ellenőrzése

A süllyesztés a szenzor megfogását szolgálja. A felső furat a szenzor csavaros rögzítését biztosítja, míg az alsó a fordulatszámérő tájolását. Az első éles tesztet egy másik szétszedett TSz-21-es gázgenerátoron hajtottuk végre, ahol a forgórészt az indítómotorral hoztuk mozgásba 11000 ford/perc-ig (hideg átforgatás). A fordulatszám érzékelőt az oszcilloszkópra csatlakoztatva már láthattuk is kijelzett négyzetjelet, valamint annak frekvenciáját. A próba összeszerelését a 7. ábra mutatja be.

Előnyei miatt a konzol anyagának az úgy nevezett PET-G lett választva. A PET (Polietiléntereftalát) homopolimerből kopolimerizációval létrehozott anyag (a G a glikol módosításra utal) magas olvadásponttal rendelkezik, ami egy gázturbinára építve indokolt. Ezen kívül nagyon erős tárgyakat lehet vele készíteni, rugalmas és nem vetemedik. Ellenálló a szénhidrogénekkel és az különböző olajokkal szemben, ami beépítését tekintve szintén szükséges [18]. Az anyag néhány számunkra fontosabb tulajdonságát az 1. táblázat mutatja.

| | | | | | |
|-------------------|------------------------|------------------|--------|------------------------|-----------|
| Sűrűség | 1,27 g/cm ³ | Nyíró szilárdság | 62 MPa | Rugalmassági modulus | 2206 MPa |
| Szakítószilárdság | 53 MPa | Olvadáspont | 220 °C | Rockwell keménység | 115 (-) |
| | | | | Üvegeseési hőmérséklet | 137–160°C |

1. táblázat A PETG fizikai tulajdonságai [18][19]

A beépítés még egy apró módosítást vont maga után, ugyanis a tüzelőanyag elosztó csőhálózata útban volt, így a konzol jobb felső sarka eltávolításra került.

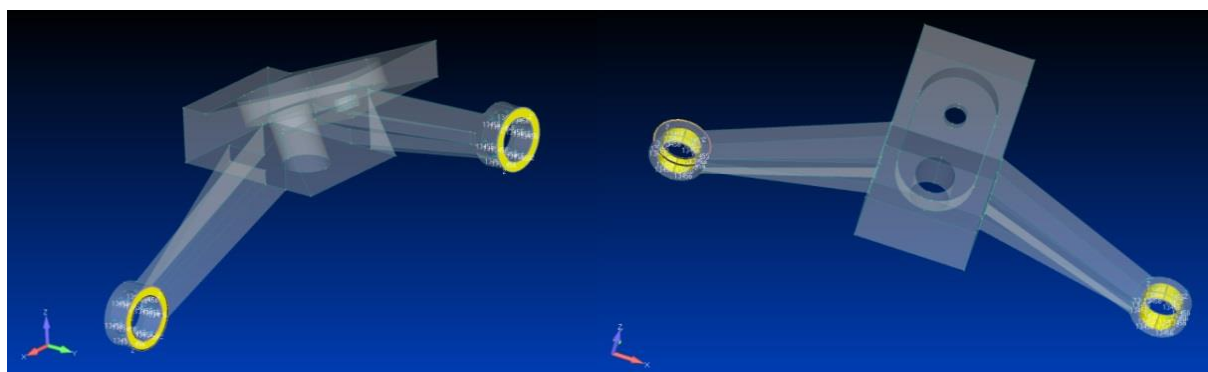


8. ábra A konzol beépítése

A konzol szilárdsági ellenőrzése

Az ellenőrzési folyamat a *Siemens FEMAP*[®] nevű véges elemes szoftverével lett végrehajtva. A konzol a legnagyobb terhelést a beszereléskor kapja, amikor a szenzor a süllyesztett részbe kerül benyomásra. Ezt az értéket egy szélső esetre, azaz 40 N -os erőnek feltételeztük.

Az első lépés az úgynevezett geometriai ellenőrzés volt, kerülvén a modellben lévő esetleges redundanciákat. Az anyag megadása a fent említett adatbázisból nyert értékek alapján történt, figyelembe véve annak nemlineáris jellegét. A következő feladatomban a kényszerek meghatározása és a terhelés felvétele volt. A konzol két csavarral van felerősítve, ami a csavar irányú (képen y : zöld nyíl irány) mozgáson kívül blokkolja az összes elmozdulást, valamint elfordulást. A házon felfekvő gyűrű felület köti le a fennmaradt szabadságfokot.

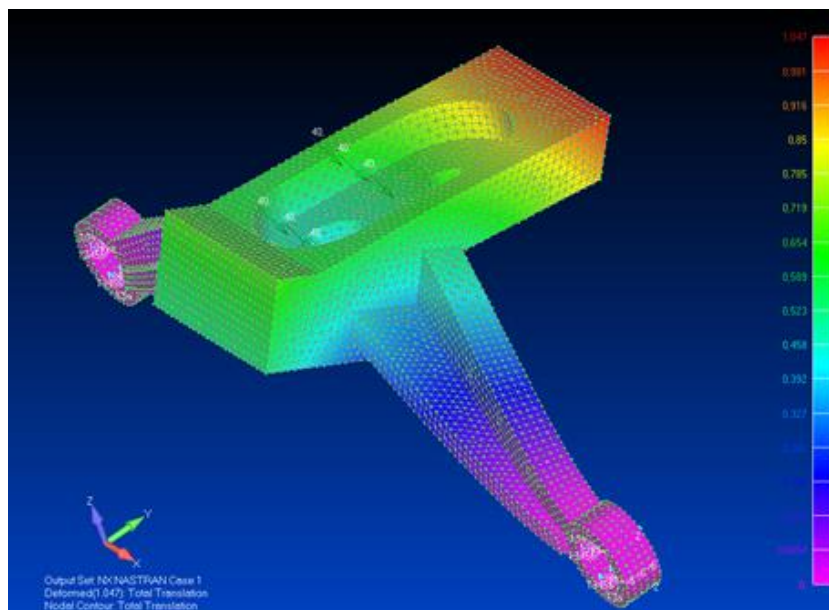


9. ábra A kényszerezett felületek

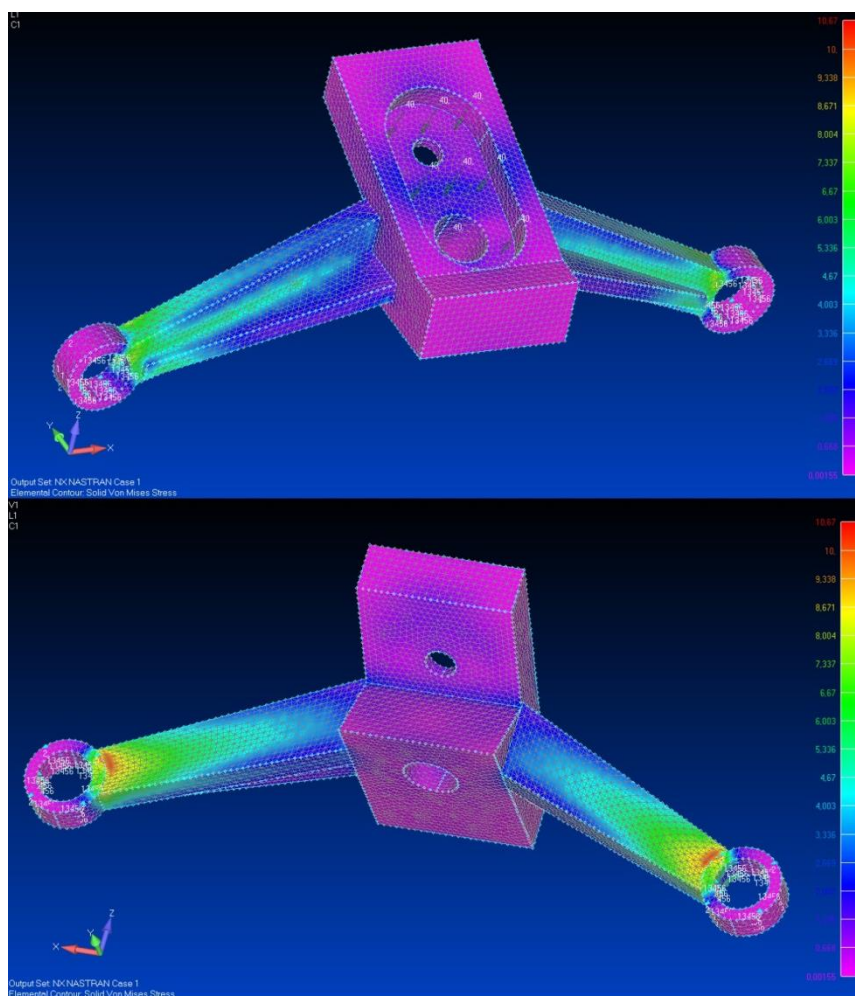
A háló automatikus generálással lett létrehozva, $0,8\text{ mm}$ -es hálómérettel, ami után történt egy háló minőségellenőrzés, ami a lekerekítések és bonyolult felületátvezetések hiányában nem mutatott hibát.

A program lefutása után a várakozásoknak megfelelő mértékű elmozdulást, valamint feszültség szintet és eloszlást kaptam, amit a 10–11. ábrák szemléltetnek. A legnagyobb feszültség a befogásnál ébredt és $10,67\text{ MPa}$ -ra adódott. A maximális elmozdulás kicsivel több, mint 1 mm -

re adódott, a rögzítő csavarokat összekötő szakasztól legtávolabban lévő részen, ami a valóságot tükrözi. Összefoglalásként kijelenthető, hogy a konzol megfelel a szilárdsági elvárásoknak.



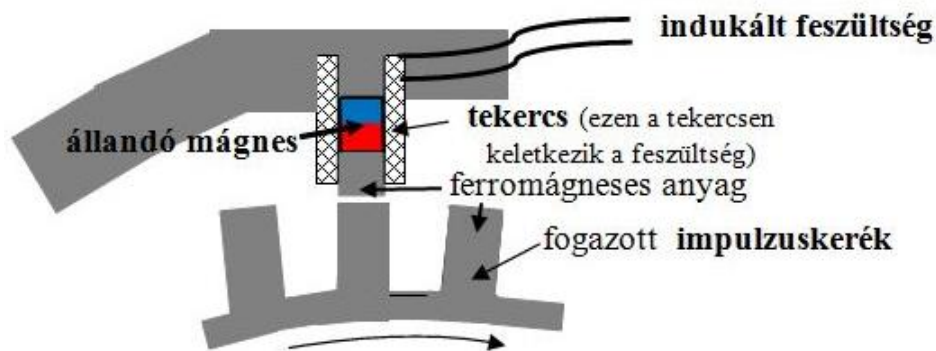
10. ábra Az erőhatás következtében fellépő deformáció



11. ábra A terhelés hatására fellépő feszültségeloszlás

A fordulatszámérő szenzor

Az rendelkezésünkre álló induktív jeladó egy állandó mágnesből, és egy azt körülölelő tekercsből áll. A mérés a nyugalmi indukció, azaz a változó mágneses mező által indukált feszültség hatására válik lehetővé. A változó mágneses mező létrehozását a 20 lapáttal rendelkező, alumíniumból (diamágneses anyagból) készült centrifugálkompresszor forgása során periodikusan változó légrés biztosítja. A szenzor működésének szemléltetése a 12. ábrán látható:

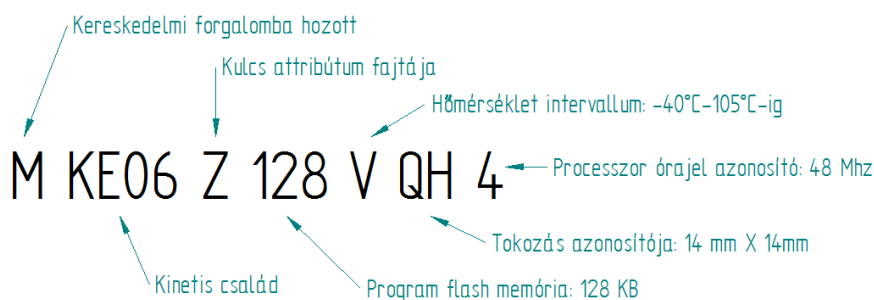


12. ábra Az érzékelő felépítése [20]

A fordulatszámérő 100 μ s hosszúságú jeleket bocsát ki a jeladó előtt elhaladó lapátok hatására. A szenzorról továbbá még fontos megemlíteni, hogy egy nyolcas előosztóval rendelkezik, ami a későbbi fordulatszám levezetésben kap fontos szerepet.

A fordulatszámérő jel feldolgozása

A fordulatszám feldolgozását és tengelyfordulatszámra történő átszámítását a Kinetis MKE06Z128VQH4-es típusú, 64 lábbal rendelkező mikrokontrollere (MCU: Microcontroller Unit) végzi [21], mely kód értelmezését a 13. ábra segíti.



13. ábra Az MCU jelölésének részletezése ([21] alapján)

A mikroprocesszor felprogramozásához és konfigurálásához a Kinetis Design Studio szoftver állt rendelkezésemre. A mérést a centrifugális kompresszoron végezzük. A lapátszámnak köszönhetően az egy fordulat alatt generált impulzusok száma 20. Az érzékelt fordulatszámot tehát első körben 20-al osztanunk kell, hogy a tengely vonatkoztatásában számoljunk tovább:

$$f_1 = \frac{f_{\text{érzékelte}}}{20} \quad (1/s) \quad (4)$$

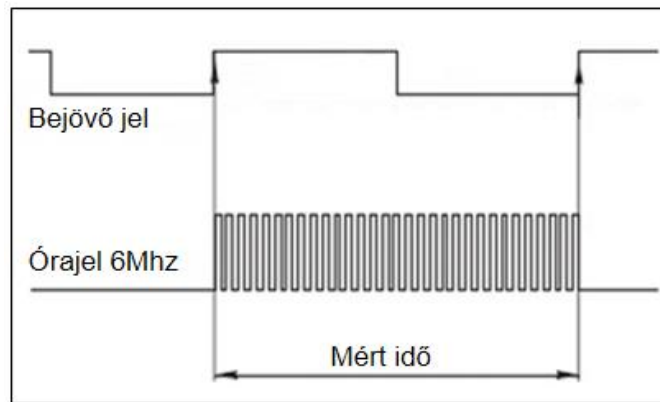
Ahogy a szenzornál már említésre került, az egy 8-as előosztóval van ellátva (frekvencia tekintetében 8-as szorzó). Ez alapján a tényleges másodpercenkénti tengelyfordulatszám:

$$f_2 = f_1 \cdot 8 \text{ (1/s)} \quad (5)$$

Ahhoz, hogy a fordulatszámot a megszokott $1/min$ alakban kapjuk meg, még 60-nal szoroznunk kell, azaz:

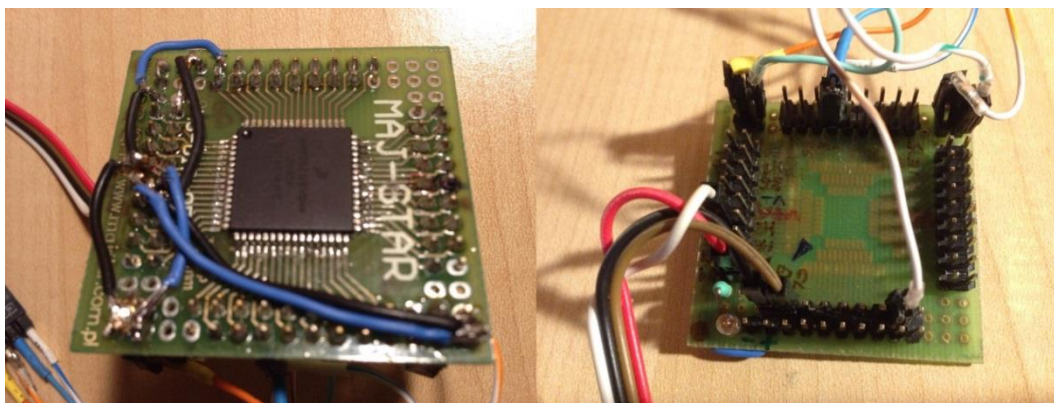
$$f_{valós} = f_2 \cdot 60 = \frac{f_{érzékelő} \cdot 8}{20} \cdot 60 \text{ (1/min)} \quad (6)$$

A 8-as előosztáson kívül a többi művelet végrehajtása szoftveres módon történik. A processzor órajeléből (ami esetünkben 48 Mhz) megtáplálunk egy 16 bites számlálót, ami 2^{16} -ig, azaz 0-ról indulva 65 535-ig tud elszámolni. Ennek frekvenciája nem lehet teljesen tetszőleges, mivel minden leosztó csak adott számokkal képes a műveletet megvalósítani. Maga a leosztási folyamat több lépésből áll. Az első műveletet egy Adatbusz Frekvenciaosztó (Bus Frequency divide, BDIV) hajtja végre, majd a DIV1, DIV2 következik. A 48 Mhz-es frekvenciát a DIV2 felezi meg, majd a 6MHz-re történő leosztást a számláló előosztója teszi lehetővé. Ez a frekvencia a méréshez megfelelő felbontást valósít meg. A számítás menetének megértését a 14. ábra segíti.



14. ábra A fordulatszám mérése ([13] nyomán)

A felső a bejövő jel esetünkben már a 8-cal előosztott négyszögjel. Az alsó jel a már említett 6 MHz-es órajellel fut. A szoftver a 14. ábrához úgy került beállításra, hogy csak egyfajta élre, mégpedig a felfutó élre legyen érzékeny. A számláló az órajelet számolja úgy, hogy minden órajel felfutó élre léptet egyet. Amikor van egy fordulatszám (innenről Revolutions Per Minute, RPM) jel (felfutó él), akkor automatikusan rögzíti az éppen aktuális számláló értékét, miközben a számláló megy tovább. A következő beérkező jel hatására ugyanaz a folyamat játszódik le. A számítást a program megszakítása után végezzük. A két alkalom között eltelt idő egy különbségképzéssel kerül megállapításra, ami egy reciprokképzés és a fenti műveletek végrehajtása után tengelyfordulatszámra konvertálható. Amennyiben a 16 bites számláló a ciklusa végére ér, az túlcsordul, majd – ahogyan az egész folyamat során – a számláló zérus értéktől folytatja a ciklust. A mikrokontroller NYÁK-on történő elhelyezését és a csatlakoztató túsort a 15. ábra mutatja be.



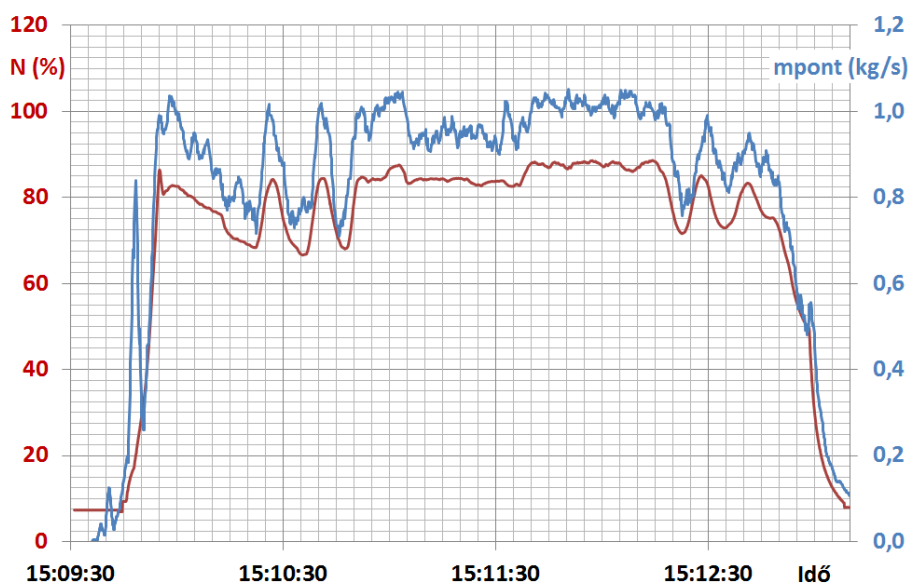
15. ábra Az MCU és a túsorok elhelyezése

Az első mérés lebonyolítása a teljes rendszerrel

A mérés előkészítése rengeteg szereléssel töltött munkaórát emésztett fel, hiszen a szenzor elhelyezéséhez szükséges furat létrehozása a hajtómű próbapadból való kiszedését, valamint megbontását vonta maga után. Egyéb, hőelemeket érintő fejlesztés is ekkor lett eszközölve. A szét-, és összeszerelés a hajtómű üzemeltetési kézikönyv – „A TKT-1 kísérleti gázturbinás sugárhajtómű leírása” – meghatározott pontjai alapján történt.

A mérési adatokat három számítógép dolgozta fel és rögzítette. Az AE laborban lévő asztali számítógép a hajtómű mérő-adatgyűjtője által küldött információt kapta meg, amit egy LabVIEW program tett szemléltetőbbé. Az egyik laptop a TEDDI adatait gyűjtötte és rögzítette a Terminal nevű program segítségével, míg a másik számítógép a fordulatszám-mérő modulra volt csatlakoztatva.

A TKT nehézkes indulása után – amit a gyújtórendszer nem megfelelő működése eredményezett – a mérés rendben lezajlott. A HVK folyamatos változtatásával igyekeztünk a várható fordulatszámjelet reprezentatívvá tenni. Az első mérés sikeres lezajlása utána azok kiértékelése volt a feladat. A Terminal program segítségével a mentett adatok könnyen importálhatóak Excelbe. A 16. ábrán azonnal látható a már korábban említett jelenség, miszerint 4000 (pontosabban 3720) fordulat/perc alatti tartományban a szenzorunk indukált feszültségéből képzett jel nem kimutatható. Az ábrán szembeötlő továbbá a 15:09:20,9-től 1 másodpercen át tartó, esetenként a valós fordulatszám kétszeres értékei is. Utóbbi probléma pontos forrására ez idáig nem derült fény, azonban vélhetően valamelyik nagyáramú szivattyú kefés egyenfeszültségű motorjának kommutátor szikrázásából fakadhat, vagy ezzel egyenértékű elektromágneses zavar okozhatja. A fordulatszám adatok validációja a kompresszor tömegáramával történt, ugyanis a kettő között egyenes arányosság áll fent. A 16. ábra szépen szemlélteti a kapcsolatot, amin látható, hogy a fordulatszám görbéje együtt mozog a tömegáram görbéjével.

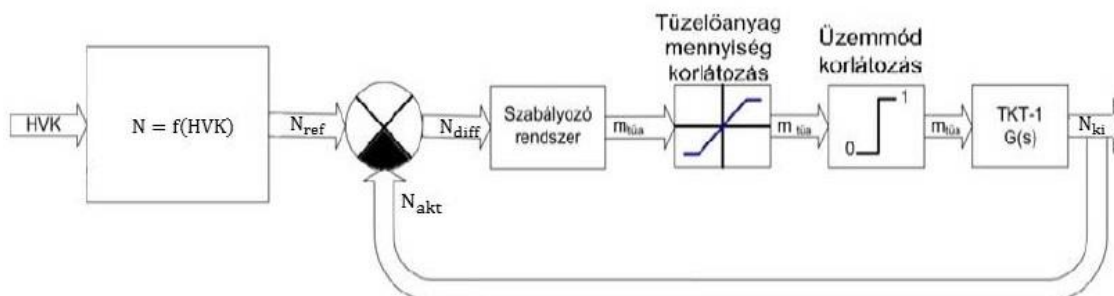


16. ábra A fordulatszámérő validációja

A FORDULATSZÁM SZABÁLYOZÁS MEGVALÓSÍTÁSA A TKT-1-ES GÁZTURBINÁS SUGÁRHAJTÓMŰVÖN

A szabályozó tervezése

A fordulatszámérő egység TEDDI-vel való összekapcsolása után a feladat egy fordulatszám alapján történő szabályozás létrehozása volt. A szabályozás blokkdiagramját a 17. ábra mutatja be.



17. ábra A szabályozás blokkdiagramja ([22] nyomán)

Ahogy az ábra is mutatja, esetünkben egy bemenet van definiálva, mivel a létrehozandó szabályozás egyparaméteres. Az egyetlen bemenet a hajtómű vezérlőkar pozíciója.

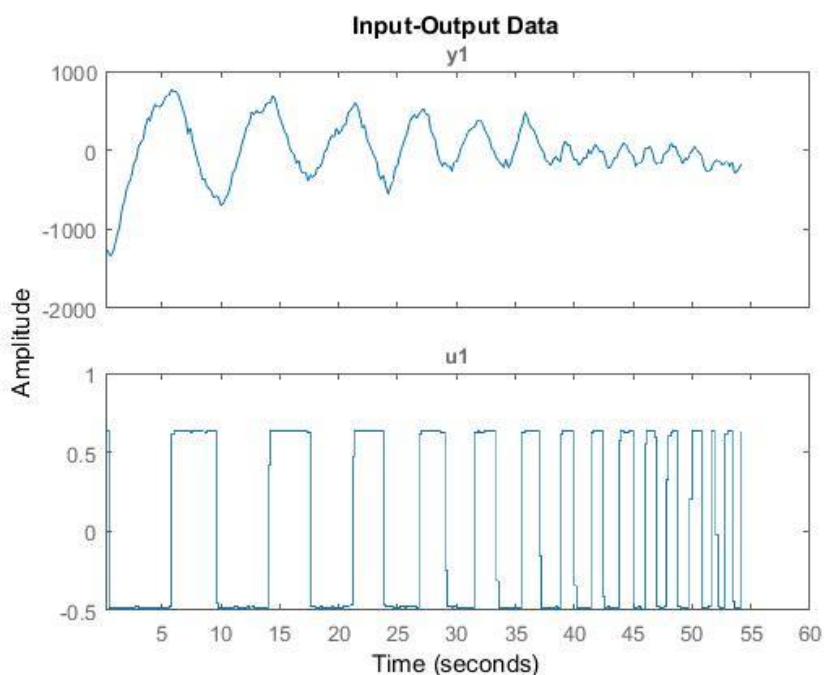
A szabályozás menete a 17. ábrával együtt könnyen megérthető. A szabályozórendszer a referencia fordulatszámértéket (N_{ref}) összehasonlítja az éppen aktuális fordulatszámértékkel (N_{akt}), majd a két érték különbségéből előállít egy differencia értéket (N_{diff}), amit addig csökkent, míg a különbségvonalás értéke 0 nem lesz ($N_{akt} - N_{ref} = 0$). Ezt egy PID típusú szabályozóval tesszük lehetővé, ahol:

- P – az arányos tagot;
- I – integráló tagot;
- D – a differenciáló tagot jelöli.

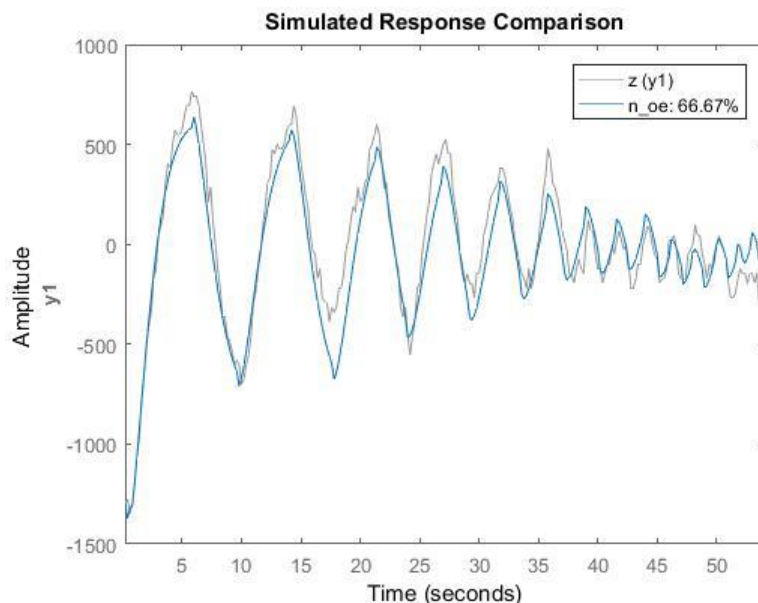
A szabályozó létrehozásának elsődleges feltétele, hogy tisztában legyünk a TKT-1-es átviteli függvényével, majd annak ismeretében a PID szabályozó megtervezhető és finom hangolható. Az identifikációs mérés alapját a TEDDI különleges üzemmódja adta. Az üzemmód sajátossága, hogy a szelepfeszültségre (kb. 17 V-os középvezültségre), mint bemenetre egy folyamatosan csökkenő periódusidővel rendelkező négyyszögjelet vezérlünk ki, amire a hajtómű valamilyen módon reagálni fog. Ez a reagálás fordulatszám formában lesz a kimenetünk, ami rögzítésre kerül. Az átviteli függvény definíció szerint a kimenőjel és a bemenőjel zérus kezdeti feltételekkel vett Laplace-transzformáltjainak hányadosa, azaz:

$$G(s) = \frac{Y(s)}{U(s)} \quad (7)$$

A $G(s)$ meghatározása érdekében két identifikációs mérés került lebonyolításra. A vizsgálat során nyert fordulatszám és feszültség adatok normálásra kerültek, hiszen a szabályozórendszer részére a differencia fordulatszám érték a fontos. A diszkrét idejű rendszer átviteli függvény közelítése mindkét esetben MATLAB-ban, azon belül az „Output-Error” függvény segítségével lett meghatározva. Több mérést végeztünk, ezek közül egyről közlünk ábrát.



18. ábra A mérés bemenetének (lent) és kimenetének (fent) normáltja



19. ábra A mérés (szürke) és annak közelítő függvénye (kék)

A mérés esetében a szelep középfeszültsége 17,86 V, a fordulatszám középértéke pedig 41 883 1/min volt. Fontos megemlíteni, hogy a sugárhajtómű széles üzemmód-tartományban erősen nemlineáris viselkedést mutat, így az általunk alkalmazott lineáris megközelítés csak egy adott munkapont szűk környezetében modellezheti helyesen a működést. Az alkalmazott amplitúdót tehát szükséges volt csökkenteni, de nem túlságosan, hogy a létrejövő eltérések még jóval kiemelkedjenek a mérési zajból. Amint a 19. ábrán látható, a kimeneti függvény Matlab által közelített alakja 66,67% pontossággal közelíti az eredeti kimenetet, jól szemléltetve az előző gondolat helyességét, miszerint egy munkapont szűkebb környezetében megmaradván a lineáris közelítés jobban illeszkedik a mért adatsorra. Amint a diagramon látható, csak igen nagy frekvenciájú szelepváltoztatásoknál mutatkozik jelentős eltérés.

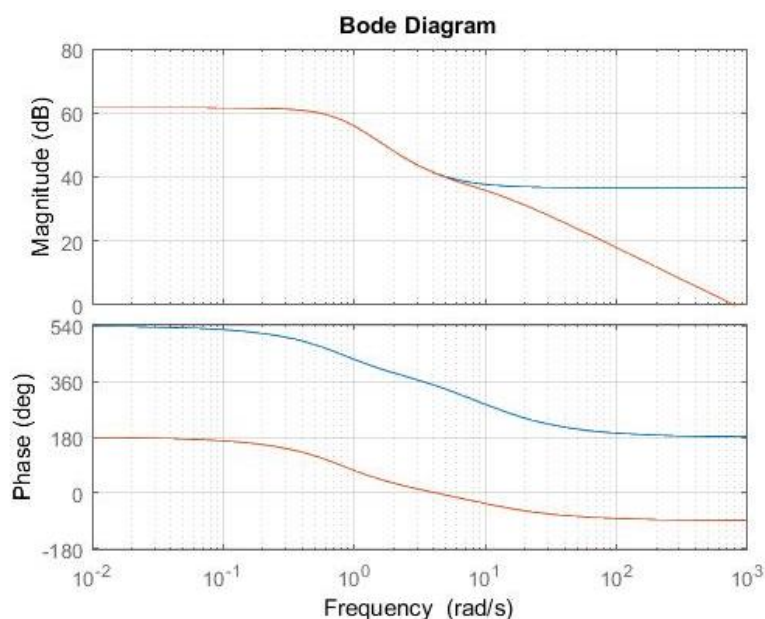
A rendszer folytonos átviteli függvénye a Tustin módszerrel való konverzió után:

$$G(s) = \frac{-68,01 \cdot s^3 + 792,9s^2 - 340,3 \cdot s - 7871}{s^3 + 11,34 \cdot s^2 + 14,05 \cdot s + 6,542} \quad (8)$$

Mivel a számláló harmadfokú tényezője jelentősen – egy, esetleg kettő nagyságrenddel – kisebb, mint a számláló többi tagja, ezért azt elhanyagoltuk. Az így kapott egyszerűsített alak:

$$G(s) = \frac{792,9 \cdot s^2 - 340,3 \cdot s - 7871}{s^3 + 11,34 \cdot s^2 + 14,05 \cdot s + 6,542} \quad (9)$$

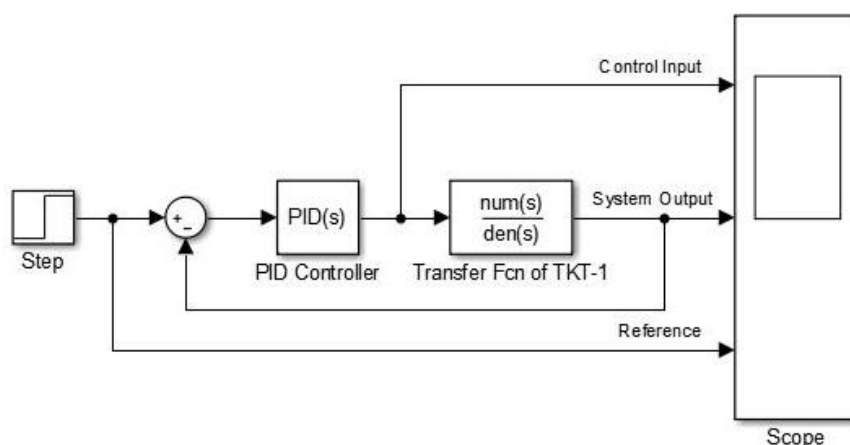
Az egyszerűsítés előtti és utáni átviteli függvényekhez tartozó Bode-diagramokat a 20. ábra szemlélteti.



20. ábra A (8) és (9) átviteli függvények összehasonlítása Bode diagramban

Az ábra alapján megállapítható, hogy 20 rad/s és afeletti körfrekvenciák esetében amplitúdóban jelentős eltérés tapasztalható, azonban ez a tartomány – mivel a gyakorlatban 1 másodperc alatt 5-ször történő gázkar pozícióváltást jelentene – számunkra nem releváns. A fáziszög egyszerűsített függvénye 540° helyett 180°-ról indul, azonban jellegre megegyeznek, így az egyszerűsítés végrehajtható.

Az átviteli függvény meghatározása után a PID szabályozó hangolása volt a feladat. Az egyes tagok meghatározását a MATLAB programba beépített Simulink környezetben végeztük, amiben teljes rendszereket lehet blokkdiagram formájában modellezni, majd vizsgálni. A megvalósított blokkdiagramot a 21. ábra mutatja.



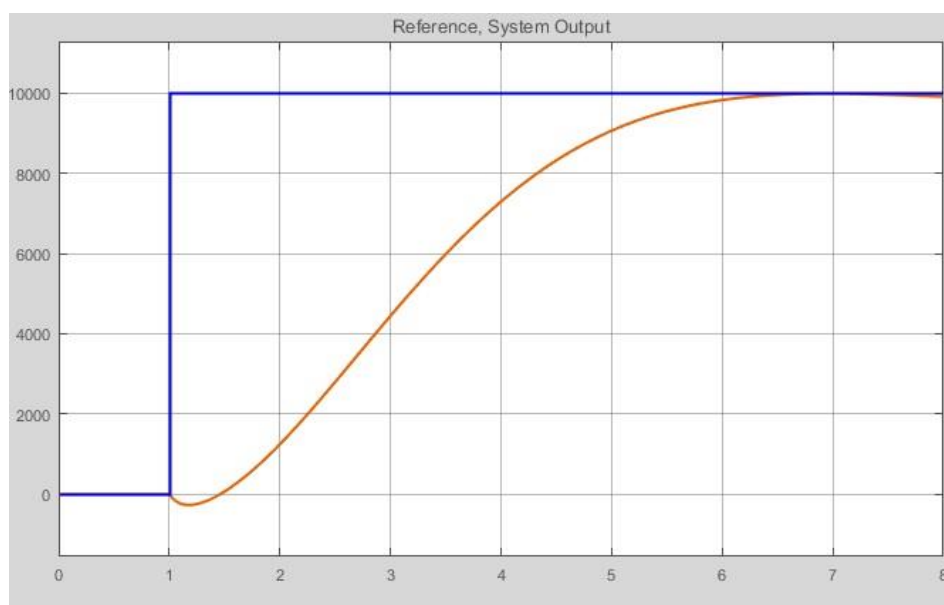
21 ábra A megvalósított szabályozórendszer Simulink blokkvázlata

A gyors hangolás végrehajtását a PID tagok beállításánál található hangoló (Tune) funkció segítette. Az automatikus hangolást igényeinknek megfelelően végezhetjük jelkövetés, kiegyensúlyozottság, valamint adott külső zavarra való reagálás szempontjából. A referencia jelkövető (Reference tracking) üzemmód kiválasztása után megtörtént a program által javasolt PID tagok meghatározása. Ezután a beállítás sebességét, valamint a rendszer tranziens viselke-

dését két csúszkával lehet optimalizálni. Esetünkben sikerült egy olyan konfigurációt találni, ami túllendülés-mentes, valamint a beállási idő 4,93 másodperc, ami elfogadható. A differenciáló tagra esetünkben nem volt szükség, így csupán PI típusú szabályozóról beszélhetünk. Az egyes tagok értékei a következők:

- $P = -4.9046 \cdot 10^{-4}$
- $I = -3.43619 \cdot 10^{-4}$
- $D = 0$

Ezután a szabályozó működését a virtuális oszcilloszkópon (Scope) tudtuk nyomon követni, amire a referencia jelet (Reference: az ábrán kék), és a rendszer kimenetét (System Output: narancssárga) kötöttük. A szabályozó megvalósításakor a kivezérelt jel korlátosságára is ügyelni kellett, hiszen a szelep vezérlőfeszültsége nem vehet fel tetszőleges értéket.



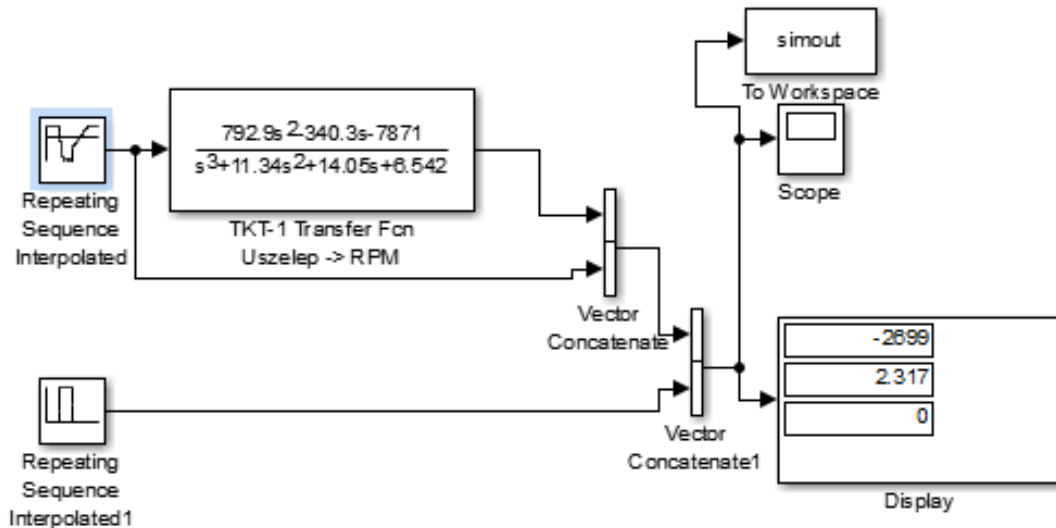
22. ábra A referencia jelet (sötétkék) és a rendszer kimenete (vörös)

A szabályozó Kinetisbe való implementálásánál fontos kiemelni, hogy annak megvalósítása továbbra is mintavételezési eljárás alapján, így a már folytonos időben, frekvenciartományban megállapított adatokat diszkrét időtartományban értelmezett alakra kell alakítani.

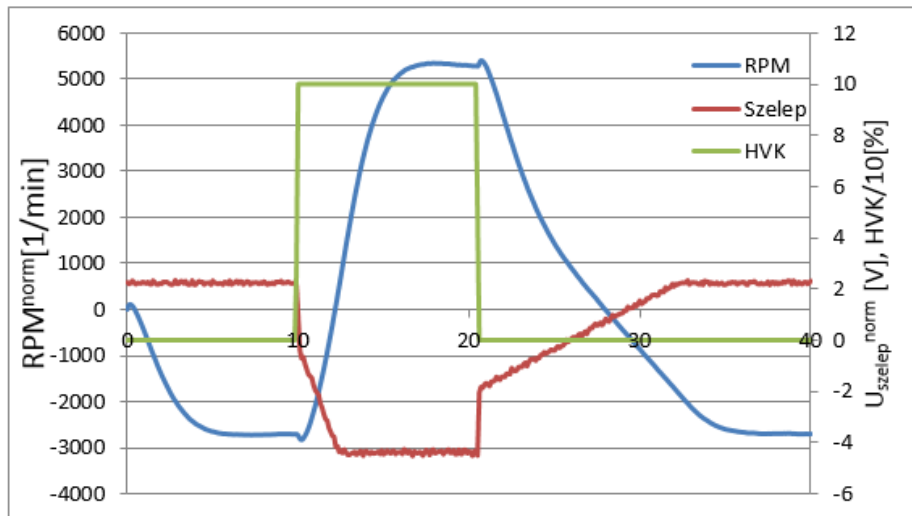
A tervezett szabályozó tesztelése

Az átviteli függvény közelítéséből fakadóan a szabályozó egy G_n néveleges átviteli függvényre lett megtervezve. Azt, hogy a gázturbina valójában hogyan fog viselkedni, nem tudtuk, azonban tisztában szeretnénk volna lenni, hogy a közelített modell hogyan reagál egy valós HVK, és ebből következő U-szelep bemenetre. Utóbbi normalás után került bevitelre. Ebből fakadóan az élesben történő kipróbálás előtt szeretnénk volna megbizonyosodni a szabályozónk helyes működéséről. A Kinetist hozzákapcsoltuk a szelephez, ami kapott egy csatornát a duplikált HVK-ból, és egy tesztpanel segítségével szimuláltuk a gázturbina által keltett fordulatszám-jeleket. A mérés maga abból állt, hogy a tesztpanel fordulatszám-jelét beállítottuk egy fix értékre, majd a HVK-val eltérő parancsjelet generáltunk. Rögzítettük a Kinetis által kiadott szelepfeszültség lefolyást, majd a MATLAB-ban már létrehozott modellre, mint bemenet vezettük rá az így lemerített szelepfeszültség időbeli változását. Ehhez kis mértékben át kel-

lett alakítani a korábban már megalkotott blokkdiagramot. Az így létrejövő új rendszert, a 23. ábra mutatja be. A kimenetet fordulatszámokban kaptuk meg, ami tízezres nagyságrendű, ugyanakkor a HVK és U-szelep értékei 10-es nagyságrendbe esnek. Ennek köszönhetően a Scope-on történő ábrázolásban csak a fordulatszám értékek látszódnak, így a jobb szemléltetés érdekében az említett paraméterek a szimuláció eredményéből készült, Excel-diagramban lettek ábrázolva, amit a 24. ábra mutat be.



23. ábra A SIMULINK-ben átalakított modell az előzetes szimuláció számára

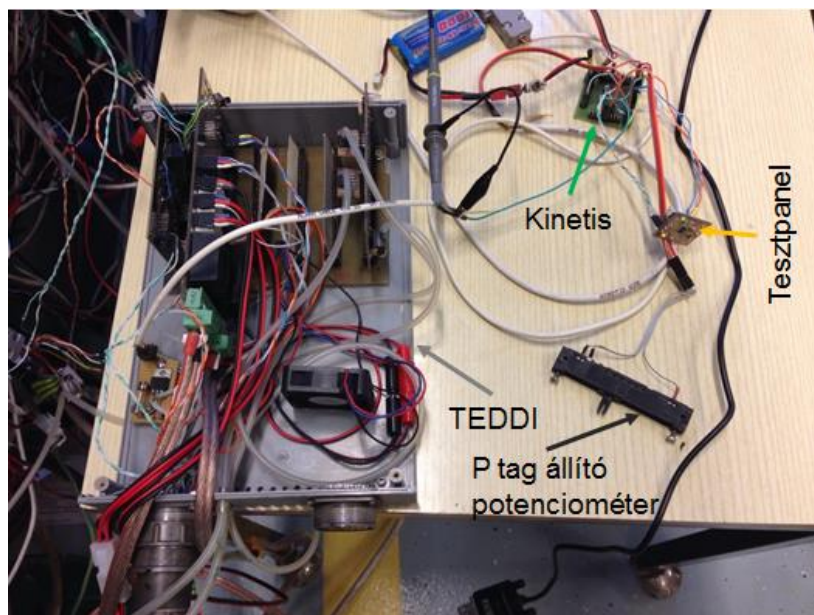


24. ábra A MATLAB szimuláció eredménye

A vízszintes tengelyen az idő szerepel másodpercben, az elsődleges tengelyen a fordulatszámot jelöltük, aminek negatív értékei a vezérlőjel kiválasztott referenciától való eltérésként történő normalálásának köszönhető. A HVK megváltoztatására reagáló hajtóműmodell a kék görbe szerint válaszol, aminek jellegét elfogadottnak ítéltük.

A már szabályozó képességgel felruházott mikrokontroller a fent említett teszt mellett még a Terminal programban is kipróbálásra került (25. ábra). A vizsgálat alapját egy már korábban elkészített tesztpanel segítette, ami fordulatszám (RPM) és HVK jeleket tud imitálni. A nyomtatott áramkörtön található két potenciométer, aminek változtatásával biztosított a fordulatszámértékek és HVK pozíció szimulálása. A két ellenállás állítása a kis méretek miatt kisméretű csa-

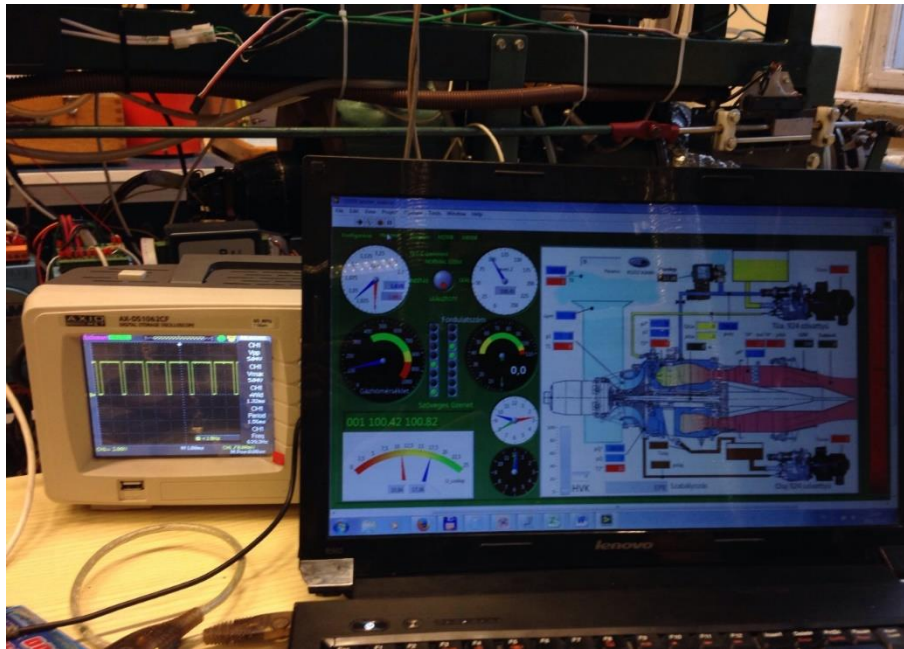
varhúzóval lehetséges. A Kinetis által fogadott RPM és HVK jeleket, valamint a szabályozó P és I tagjának értékeit a Terminal programban figyeltük meg és rögzítettük. A szabályozót ezek alapján finomítottuk, mivel az vizsgálatok elején a P tag értékét túl nagygnak ítéltük.



25. ábra A tesztelést megvalósító kapcsolás

Az éles mérés előtt még egy biztonsági intézkedést hajtottunk végre. A PI szabályozónk D tag hiányában csak a P taggal tudna a gázturbinára veszélyes lenni. Ilyen eset lenne például egy P tag által okozott túllövés. Az arányos tag értékét jelenlegi viszonyok mellett csak a Kinetis forráskódjában lehet módosítani, ami működés közben nem túl praktikus. Ennek érdekében egy lineáris potenciométer lett bekötve a Kinetisbe, mely a P tag gyors módosítását teszi lehetővé a gázturbina működése közben is. Az említett intézkedések után a szabályozó megérett az élesben történő kipróbálásra.

Az U_{szelep} vezérlését változtatható kitöltési tényezőjű PWM jel biztosítja, amit idáig a TEDDI vezérelt ki. A Kinetis „összeházasítása” a szeleppel nem volt egyszerű. Eredetileg 400Hz-en próbáltuk szabályozni a szelepet, azonban az így kapott szelep visszacsatolást vizsgálva erősen fűrészes jelleget kaptunk. Ez a jel nagyjából 0,3 V-os amplitúdóval és 2,5 másodperces periódusidővel rendelkező lengések jöttek létre az állandósult állapotok helyett, melynek fel-futó élei lassabban, lefutó élei gyorsabban jöttek létre fűrészfog jellegű jelalakot létrehozva. Mivel a gázturbina 0,6V-nyi eltérésre körülbelül 1000 ford/perc eltéréssel reagál, ez a jelenség semmiképpen sem volt megengedhető. A fűrészjel amplitúdója főleg kis feszültségeknél volt jelentős, majd a feszültség növelésével folyamatosan csökkent. Ennek ellenére még nagyobb feszültségeknél is zavaró, közel tized volt nagyságrendű maradt. A megoldást a 640Hz-re való áttérés nyújtotta, mely értéket hosszas kísérletezés, empirikus meghatározás során értük el, és vélhetően a szelep és a tekercs öngerjesztésével függhet össze. A PWM jelet oszcilloszkópon, míg a szelepfeszültség értékének változását a Terminal programban és a méréshez létrehozott LabVIEW programban vizsgáltuk, mely kísérleti összeállítás a 26. ábrán látható.

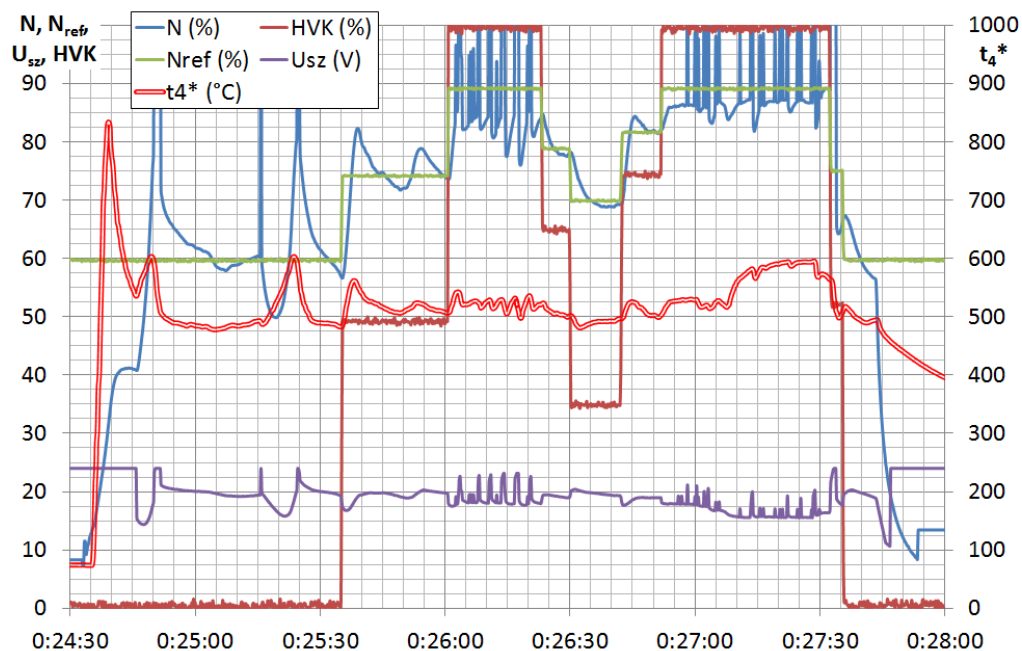


26. ábra Az U_{szelep} jelének vizsgálata. A monitor bal alsó részében látható a szelepfeszültség (kék mutató: referencia feszültség, piros mutató: aktuális feszültség. A mutatók átlagértéket mutatnak, az oszcilloszkóp a szelepre ténylegesen kimenő PWM jelet)

A szabályozó élesben történő kipróbálása

Az utolsó lépés a szabályozó TKT-n való kipróbálása volt. A főkapcsoló bekapcsolása után következett a TEDDI önellenőrzése, ami kiterjedt a szelepre is, így a szabályozás átruházását csak ezután tudtuk lebonyolítani. Lecsatlakoztattuk a két vezetékét, ami az U_{szelep} vezérléséért felel, majd a Kinetishez csatlakoztattuk. Így már az új modul felelt a szabályozásért a TEDDI által levezenyelt indítási procedúra befejeztével, azaz 25 000 fordulatszám felett. Az alapjárat $30\,000 \frac{1}{\text{min}}$ -re, míg a maximális fordulatszám $45\,000 \frac{1}{\text{min}}$ -ben lett a modulban beállítva. A mérés eredménye a 27. ábrán látható. Már a mérés közben látni lehetett, hogy az aktuális fordulatszám adatsorba meglehetősen sok zavarjel, „tüske” került bele, amik a szabályozó megzavarásával meglehetősen egyenetlen fordulatszámgörbét okoztak. Ez a fűrészelés a diagramon is látható. A gázturbina indítása sem volt zökkenőmentes, a két akkumulátorral megtáplált indítómotornak a kinti hidegben $-0\text{ }^{\circ}\text{C}$ -os környezeti hőmérsékletnek köszönhetően – már füllel halhatóan is nehézkesen sikerült kipörgetni hajtóművünket alapjáratra. Ennek eredménye a diagramon is látható, hiszen a 40%-os fordulatszámnál (20 000-es fordulatszám környékén) a fordulatszám emelkedése megtorpan, majd egy csökkenés vehető észre, aminek a szelep beindulása vetett véget. Ez a jelenség könnyen okozhatta volna a gázturbina melegfennakadását is. Az alapjáratra kifutás nem igazán sikerült, a fordulatszám 60-80% közötti lengése figyelhető meg. A referenciajel követése csak nagyvonalakban sikerült, meglehetősen ingadozó fordulatszámot kaptunk, ami azonban a szabályozó finomításával kiküszöbölhető. Fontos megjegyezni még azt is, hogy az átviteli függvény a fordulatszám egy szűk tartományában lett megállapítva, azonban a gázturbina erősen nemlineáris. Ehhez képest a szabályozó leginkább a 0:26:00 és 0:27:30 között tette a dolgát, a 45 000-es fordulatszám elérésén kívül szépen reagál. A legjobb jelkövetést mutató rész a 0:26:30-tól 0:26:50-ig terjedő időtartomány, ott a HVK gyakori mozgására meglehetősen jól simul a tényleges görbe a referenciá-

hoz. A HVK állításoknál látható, hogy a P tag kissé erőteljesebb, így a maximális fordulatszám kivételével túl- és alullövések figyelhetőek meg. Egy, a túlpörgés megakadályozására szolgáló nyomáskorlátozó szelep miatt nem volt elég vezérlőnyomásunk, így a 45000-es fordulatszámot nem is értük el. A szabályozó jobb működése érdekében szükséges pár módosítást végrehajtani. Az egyik ilyen lenne a fordulatszámérés módosítása. Jó megoldásnak tűnik a jel kisimítására, ha egy új feltételt adunk meg a programban, melynek lényege az, hogy ha egy adott időkeretben (1-2 tizedmásodperc) többeszes fordulatszám eltérés jelentkezik, akkor azt hagyja figyelmen kívül, és tartsa meg az előző értéket. Ezáltal a szabályozót erősen zavaró jel, ami esetenként jelentős hibajeleket generál, kiküszöbölnénk. A másik feladat a PI szabályozó konstansainak további finomítása lenne.



27. ábra Az éles mérés eredménye

ÖSSZEFOGLALÁS

Az eredmények értékelése

A cikk célja ismertetni a tervezett komponenseket a Vasúti Járművek, Repülőgépek és Hajók Tanszék tulajdonában lévő TKT-1-es gázturbinához.

A feladat részét képezte a kapott indukciós fordulatszámérő szenzor megfelelő elhelyezése a hajtóművön, ami Solide Edge-ben megtervezett, majd PET-G anyagból, 3D nyomtatással előállított konzol segítségével valósult meg. A cikkben a konzolon FEMAP-ban elvégzett szilárdsági ellenőrzés is bemutatásra kerül.

A szenzor által érzékelt jel feldolgozását egy 32 bites, 64 lábú Kinetis mikrokontroller hajtja végre. Cél volt egy olyan rendszer megalkotása, mely a TKT-1-es jelenlegi moduláris teljes hatáskörű, digitális elektronikus szabályozórendszerbe (TEDDI) később egyszerűen beilleszthető, valamint nagyfokú megbízhatósággal rendelkezik. Jelenleg a Kinetis és a számítógép között RS232-n valósul meg a kommunikáció.

Mivel sikerült egy megbízható fordulatszám-mérő rendszert kialakítani, további cél egy fordulatszám alapján történő szabályozás megalkotása volt, kiegészítvén a TEDDI által már megvalósított TPR (Turbofan Power Ratio), EPR (Engine Pressure Ratio) szerinti szabályozást. Az ehhez szükségszerű úgynevezett identifikációs mérések ismertetésére is sor került. A folytonos idejű átviteli függvény megállapítása ezután MATLAB-ban történt, majd annak ismeretében ugyanazon program Simulink környezetében megállapításra kerültek a PID tagok értékei is. A Kinetisben ezután implementálva lett a folytonos idejű szabályozó diszkrét idejű változata. A tervezett szabályozó kipróbálása előtt több teszten is átesett a biztonság érdekében. Az ellenőrzések sikeressége után, a cikk beadásáig ki lett próbálva éles körülmények között is. Cél, hogy a TEDDI később akár kétcsatornás üzemmódban is tudna működni, ezáltal még több, manapság alkalmazott módszert és megoldást lehet majd segítségével a jövő mérnök-hallgatói számára bemutatni egy valódi gázturbina üzeme közben.

Továbbfejlesztési lehetőségek

Legfontosabb megemlíteni, hogy a szabályozó finomítása még hátravan. A CAN kommunikációhoz szükséges rendszer mind hardveres, mind pedig szoftveres részből kiépítésre került, azonban a TEDDI-vel való összekapcsolás és együttműködés még nem tökéletes, így annak befejezése még feladat. Méréseink során a legnagyobb problémát a 924-es tüzelőanyag szivattyú nem megfelelő működése okozta, ugyanis gyakran kellett mérés közben az U_{szelep} környezeti levegőhöz vezető csonkját ujjal betömni, és a vezérlőnyomást ezúton növelni, mivel a HVK változtatására esetenként nem reagált a szivattyú. Ez egyébként teljesen érthető, mivel egyrészt jócskán az üzemidején túl van használatban, ami miatt a belső kopások nagyobbak lehetnek a megengedettnél, másrészt pedig eredetileg egy néhány 10 másodpercig üzemelő, állandó fordulatszámot tartó gázturbinához lett eredetileg tervezve, vagyis egy hosszabb üzemelés alatt még egy üzemképes szivattyú is mutathatja a rendellenesség jeleit. A problémára megoldást jelenthet az olajszivattyúval történő csere, hiszen az jóval kisebb és közel állandó szállításoknak volt kitéve az elmúlt évek alatt. Elegánsabb módosítást jelentene a vezérlőnyomás szabályozását egy motoros vagy mágnesszelepre cserélni.

A cikk elején részletezett szabályozási módokban ismertetett átszámított fordulatszám szerinti szabályozás kiépítésére is sor kerülhet a jövőben, hiszen a kettő közötti átváltást egy konstans és egy torlóponthoz környezeti hőmérséklet gyök alatt vett hányadosa jelenti, aminek programozása valószínűleg nem okozna túl nagy nehézségeket. Mivel a hajtómű földön van telepítve, a Mach szám azonosan zérus lenne, azonban egy téli és egy nyári üzemeltetés során a környezeti statikus hőmérséklet jelentősen eltérhet. Ez a módosítás természetesen majdnem teljesen érvényét veszítené, ha az 'AE' laborban kiépítésre kerülő gázvezető megépülne, és a TKT kizárólag beltérben működne. A továbbiakban sorra kerül a mérő- és adatgyűjtő rendszer integrációja is, mely a TEDDI és az egész fordulatszám-szabályozó modulra is hatással lesz. A rendszer összevonására már nagy szükség van, hiszen az évek alatt a hibakeresés nagyon bonyolulttá vált.

FELHASZNÁLT IRODALOM

- [1] BENEDA Károly, Dr. SIMONGÁTI Győző, Dr. VERESS Árpád: Járművek hő- és Áramlástechnikai berendezései. Budapest, BME Repülőgépek és Hajók Tanszék, 2011 (online) url: http://www.vrht.bme.hu/letoltes/Tanszeki_letoltheto_anyagok/Oktatok_anyagai/Dr.Veress_Arpad_anyagai/Oktatott_targyak/Jarmuvek_ho_es_aramlastechnikai_berendezesei_I/Jhoag_1_jegyzet_jo_v38.pdf (2017.03.13.)
- [2] ROLLS-ROYCE: The Jet Engine 5th Edition. Derby, England, 1996. ISBN 0 902121 2 35
- [3] Foroozan ZARE, VERESS Árpád: Derivation and Application of a New Equation for Design and Analysis of Triple Spool Mixed Turbofan Jet Engines with Verification. Acta Polytechnica Hungarica 13:(6) pp. 147-162. (2016)
- [4] VERESS Árpád, BICSÁK György, ROHÁCS Dániel: Pressure Loss and Flow Uniformity Analysis of Baseline and Redesigned Engine Inlet Duct for a Small Turbojet Aircraft. In: Czech Aerospace Proceedings, 2016/1, pp. 3-9.
- [5] Z. KATOLICKÝ, B. BUŠOV, M. BARTLOVÁ: Turbojet Innovation and TRIZ. 16th International Conference on Mechatronics, pp. 16-23, 3-5 Dec. 2014. doi: 10.1109/MECHATRONIKA.2014.7018230
- [6] Jakub HNIČKA, Jiří PEČINKA: Measurement automation for small jet engine testing. In: SAMI 2016, pp. 29-34. ISBN 978-1-4673-8740-8, DOI: 10.1109/SAMI.2016.7422977
- [7] Jiří PEČINKA, Gabriel T. BUGAJSKI, Adolf JÍLEK, Petr KMOCH: Small Engine Inlet Distortion Testing Device. In: International Conference on Military Technologies 2015. Brno, University of Defence, 2015, pp. 455-460. ISBN 978-80-7231-976-3
- [1] Dries VERSTRAETE, et al., "Micro propulsion activities at the University of Sydney," in: *Proceedings of the PowerMEMS 2010 Conference*. 2010, pp. 255-258. (online) url: http://cap.ee.ic.ac.uk/~pdm97/powermems/2010/poster-pdfs/255_Verstraete_41.pdf (2017.03.12)
- [2] Ladislav FŐZŐ, Rudolf ANDOGA, Radovan KOVACS: Thermo-dynamic cycle computation of a micro turbojet engine. 2016 IEEE 17th International Symposium on Computational Intelligence and Informatics (CINTI), Budapest, 2016, pp. 75-80. doi: 10.1109/CINTI.2016.7846382
- [3] BENEDA Károly: A „MARCEL” elektronikus sugárhajtómű szabályozó rendszer fejlesztése, Repüléstudományi Közlemények Különszám 2015. (online) url: http://www.repulestudomany.hu/folyoirat/2015_2/2015-2-16-0197-Beneda_Karoly_Tamas.pdf (2017.03.13)
- [4] BENEDA KÁROLY: Repülőgép hajtóművek elmélete II. (online) url: http://www.vrht.bme.hu/letoltes/Tanszeki_letoltheto_anyagok/Oktatok_anyagai/Beneda_Karoly_anyagai/BMEKORHA522/Rg%20hmu%20elm%20II%20jegyzet%20BK%202016.pdf (2017.03.13)
- [5] A. L. ROWE, N. KURZ: A Method of Obtaining an Indication of the Power Output of a Turbine. European Patent EP 1 069 296 A3, 2001.
- [6] GENERAL ELECTRIC: CF6-80C2 Electronic Control Unit Training Course, (1991), Technical Publication: 2665/5552, Doc.No.: A-RMO-62
- [7] Re/872. Az 55 típusú hajtómű műszaki üzembentartási szakutasítás 2. könyv. Honvédelmi Minisztérium, Budapest, 1980.
- [8] BENEDA Károly, Rudolf ANDOGA, Ladislav FŐZŐ: Linear Mathematical Model adapted to Small Scale Turbojet Engine with Variable Exhaust Nozzle. Periodica Polytechnica Transportation Engineering, megjelenés alatt.
- [9] BENEDA Károly: Development of a Modular FADEC for Small Scale Turbojet Engine, Symposium on Applied Machine Intelligence and Informatics 2016. pp. 51-56, ISBN 978-1-4673-8740-8, DOI: 10.1109/SAMI.2016.7422981
- [10] BENEDA Károly, Dr. SÁNTA Imre: Kisméretű gázturbinás sugárhajtóműves kísérleti berendezés és matematikai modellje. GÉP, 2008/2, pp. 15-25, ISSN 0016-8572.
- [11] Tony WHELAN: Polymer Technology Dictionary. Springer, Dordrecht, 1994. ISBN: 978-94-010-4564-3
- [12] Physical Properties for VIVAK® PETG Sheet (online) url: <http://www.usplastic.com/knowledgebase/article.aspx?contentkey=537> (2017.03.13)
- [13] Dr. VARGA Zoltán, SZAUTER Ferenc: Járműmechanika (online) url: http://www.tankonyvtar.hu/hu/tartalom/tamop425/0007_09-Jarmumechatronika/adatok.html (2017.03.13)

- [14] FREESCALE SEMICONDUCTOR: KE06 Sub-Family Data Sheet. (online) url: <http://www.nxp.com/assets/documents/data/en/data-sheets/MKE06P80M48SF0.pdf?fsrch=1&sr=1&pageNum=1> (2017.03.13)
- [15] LEPOSA Norbert Krisztián: TKT-1 gázturbinás sugárhajtómű szabályozása TPR alapján. Szakdolgozat, BME VRHT, Budapest, 2013

DEVELOPMENT OF ROTOR SPEED MEASUREMENT OF EXPERIMENTAL GAS TURBINE

Aircraft are typically powered nowadays with gas turbine engines, which have electronic control system almost without exception. In contrast to other fields of industry, the operational rotor speeds are one or two magnitudes higher. At the Department of Aeronautics, Naval Architecture and Railway Vehicles of BME there is a small scale turbojet engine for educational and research purposes, the TKT-1, which has a digital control based on Engine Pressure Ratio (EPR) and Turbofan Power Ratio (TPR) as well. The rotor speed measurement, mostly due to the previously mentioned property, has not been developed yet, however. The present work has the goal to introduce the reader into the realization of a rotor speed measurement system from the mechanical aspects through electronic circuits up to the operational tests. The aim of this work was to create such a device, which can be fit into the present modular FADEC system. Besides the design of electronic circuits, the authors have created the firmware of the 32-bit microcontroller in charge for the data acquisition and control.

Keywords: gas turbine, FADEC, control, microcontroller, TKT-1, jet engine, RPM

Kisszölygyémi István (BSc)
hallgató
Budapesti Műszaki és Gazdasági Egyetem
Vasúti Járművek, Repülőgépek és Hajók Tanszék

istvankisszol@gmail.com
orcid.org/0000-0003-4463-6222

Kisszölygyémi István (BSc)
Student
Budapest University of Technology and Economics
Department of Aeronautics Naval Architecture and
Railway Vehicles

istvankisszol@gmail.com
orcid.org/0000-0003-4463-6222

Beneda Károly (PhD)
mérnök-tanár
AEROK Repülőműszaki Oktató és Szolgáltató kft.
karoly.beneda@aerok.hu
orcid.org/0000-0003-1900-7934

Beneda Károly (PhD)
maintenance training engineer
AEROK Aviation Technical Training Centre
karoly.beneda@aerok.hu
orcid.org/0000-0003-1900-7934

Faltin Zsolt (MSc)
PhD hallgató
Budapesti Műszaki és Gazdasági Egyetem
Vasúti Járművek, Repülőgépek és Hajók Tanszék

zsfaltin@vrht.bme.hu
orcid.org/0000-0002-8361-1397

Faltin Zsolt (MSc)
PhD Student
Budapest University of Technology and Economics
Department of Aeronautics Naval Architecture and
Railway Vehicles

zsfaltin@vrht.bme.hu
orcid.org/0000-0002-8361-1397



http://www.repulestudomany.hu/folyoirat/2017_1/2017-1-11-0377_Beneda_K-Kisszolygyemi_I-Faltin_Zs.pdf

