

Beneda Károly Tamás, Simon Dávid István

TENGELYTELJESÍTMÉNYT ADÓ GÁZTURBINÁS PRÓBAPAD FEJLESZTÉSE

Cikkünk a BME Vasúti Járművek, Repülőgépek és Hajók Tanszékén üzemben álló Deutz T216 tengelyteljesítményt leadó gázturbinán alapuló próbapad fejlesztési folyamatáról szól. Bemutatja azokat a körülményeket, melyek indítóokként elvezettek a munkálatok megindulásához, egyben részleteket is közöl a régi rendszer képességeiről, melyek jelentős mértékben igényelték az effajta beavatkozást. A cikk központi része az új mérő-adatgyűjtő és vezérlő rendszernek a bemutatása, melyben a részletes leírásnak köszönhetően képet alkothatunk a létrehozott és az eredeti közötti különbségekről. A berendezés hosszú idő után újfent üzemképessé vált a vezérlések véglegesítésével, így a szerzők a mérőérzékelők kalibrálását követően már éles méréseket is lefolytattak. Ezt követően, főként a mért adatokra, a gázturbina üzemi viszonyaira támaszkodva összegezzük a megvalósult eredményeket, és rámutatunk a közeljövő fejlesztési lehetőségeire is.

Kulcsszavak: tengelyteljesítményt leadó gázturbina, fékpad, mérő-adatgyűjtő rendszer, LabVIEW, Deutz T216, légszavas gázturbina

BEVEZETÉS

Gázturbinás sugárhajtóműveket széleskörűen alkalmaznak a légi közlekedésben, leggyakrabban kétáramú sugárhajtóművek működnek a mind a polgári, mind a katonai repülőgépek propulziós rendszereiben [1]. Emellett azonban, leginkább mérsékelt repülési sebesség- és hatótávolság-tartományban a légszavas gázturbina is megfelelő alternatíva, akár már néhány száz kW teljesítmény esetén is [2], habár a legtöbb ilyen egység az 1-10MW tartományba esik [3].

Elterjedésük indokolja, hogy a felsőoktatási intézményekben mind oktatásra, mind kutatási célokra szükséges efféle berendezéseket létrehozni, fenntartani [4]. A VRHT a 2000-es évek fordulóján jutott el a Deutz T216-os típusú tengelyteljesítményt leadó gázturbinán alapuló próbapad megépítéséhez. Az akkor létrehozott rendszer azonban már a megvalósulás idején is jócskán elavultnak számított, ezért a 2010-es évek közepére igencsak időszerűvé vált a továbbfejlesztés. Ezen felül a kezelőpult helyigényének jelentős mértékű csökkentése is kívánatosá vált. A berendezés tengelyteljesítményt leadó gázturbinája a légszavas gázturbina modelljeként nemcsak az oktatásban, hanem a kutatási folyamatokban is jelentős szerepet kaphat, hiszen a közelmúltban igen erősen nőtt az érdeklődés a mikrogázturbinák ilyen felhasználási lehetőségei iránt (mint pl. [5], [6] vagy [7]), egyre kisebb teljesítménytartományokban megközelítvén a dugattyús motorok által kínált hatásfokot, miközben a felhasználható tüzelőanyagok széles skáláját nyújtják [8].

Jelen cikk célja, hogy bemutassa a BME Vasúti Járművek, Repülőgépek és Hajók Tanszékén (VRHT) az elmúlt években lefolytatott fejlesztői munkát, melynek keretében a tengelyteljesítményt leadó Deutz T216 típusú gázturbinás próbapad mérő-adatgyűjtő és vezérlő rendszereinek teljes felújítását végezték a szerzők. A létrehozott új rendszer messzemenőig felülmúlja a korábbiak a teljesítményét, melynek elavultsága azonban csak egy indok volt a munkálatok megkezdésére. Számos más indok is felmerült, melyek együttesen indították meg ezt a fejlesztést.

Cikkünk nemcsak a próbapad fejlesztésének lépcsőit kívánja bemutatni, hanem mintegy kritikát is óhajt adni a korábbi rendszerről, bízván abban, hogy az ott nyert tapasztalatokból mások is le tudják szűrni a megfelelő következtetéseket.

A PRÓBAPAD ÉS BERENDEZÉSEI

A kiindulási mérőberendezés leírása

A BME Vasúti Járművek, Repülőgépek és Hajók Tanszék laboratóriumában lévő gázturbinás próbapad egy speciális konstrukció, mely kifejezetten egyetemek és kutatólaboratóriumok számára készült. Így a hajtómű kis teljesítmény/tömeg aránnyal rendelkezik, továbbá többféle tüzelőanyaggal is működtethető. Ezek mellett egyszerű felépítésű, és könnyen üzemeltethető, illetve karbantartható. Utóbbi szempont talán a legfontosabb, hiszen így a hajtóművek terén nem járatos személyek és hallgatók is működtetni tudják, megismerve a gázturbinák alapvető folyamatait. Továbbá kutatási célokra is alkalmazható, mivel részei könnyen hozzáférhetőek, így a szükséges mérőeszközök gond nélkül beszerezhetőek. Mivel a hajtómű tengelyteljesítményt szolgáltat, ezért mint légcsavaros gázturbinás hajtómű is vizsgálható [9].

A rendszer elemei egy $2\text{ m} \times 1\text{ m}$ -es alapterületű kezelőpultban voltak elhelyezve, melynek fő elemét egy 386-os számítógép képviselte. A gázturbina-próbapadon elhelyezett mérőberendezések lehetővé teszik a gázturbina körfolyamat jellegzetes pontjaiban a torlóponti nyomások és hőmérsékletek, illetve a fordulatszám, a tüzelőanyag fogyasztás és a terhelő nyomaték meghatározását (a próbapadon kialakított mérőrendszerrel csak torlóponti, azaz lefékezett áramlásmennyiségeit tudjuk mérni). A mérőberendezésekből érkező analóg jelek egy gázturbina-próbapadi számítógépben kerülnek feldolgozásra, kijelzésre [9].



1. ábra A Deutz T216 gázturbina közelről (balra) és a próbapad eredeti kialakítása (jobbra)

A gázturbina

A gázturbinás próbapad legfontosabb része, egy Klöckner-Humboldt-Deutz T216 típusú gázturbina. A gyártó ugyanezen a típusmegjelölésen belül több verziót is tervezett több felhasználási céllal. Többek között alkalmazható generátorok, tűzoltó szivattyúk szállítható meghajtására [10]. Európában, főleg a német nyelvterületen és vonzaskörzetében igen elterjedten alkalmazták kisméretű gázturbinás próbapadokon oktatási-kutatási szerepkörben pl. a Bécsi Műszaki Egyetemen [11] vagy a Rostocki Egyetemen [12].

A gázturbina alapvető műszaki adatai ($p_0 = 101325\text{ Pa}$ nyomás, $T_0 = 288,15\text{ K}$ hőmérséklet,

$n = 833,333$ 1/s fordulatszám mellett, [10] nyomán):

- teljesítmény $P = 80$ kW;
- hajtóművön átáramló levegő tömegárama $\dot{m}_{lev} = 0,9$ kg/s;
- kompresszor nyomásviszony $\pi = 2,8$;
- turbina utáni torlóponti hőmérséklet $T_4 = 938,15$ K;
- óránkénti tüzelőanyag fogyasztás $b = 71,5$ kg/h.

A hajtómű részei

Szívócsatorna

A csatorna eredetileg nem tartozott a hajtóműhöz, a Tanszék készítette. Független elrendezésű, a felső részén a belépő keresztmetszetenél egy mérőperem lett elhelyezve, amellyel a beszívott levegő tömegárama meghatározható. A szívócsatorna kb. 3 méter hosszú, így a közelben tartózkodó személyek és gépek által nem zavart levegőt tud beszívni.

Forgórész

A kompresszor egyfokozatú centrifugális kialakítású, radiális lapátos járókerékkel. A turbina egyfokozatú centripetális kialakítású radiális lapátos járókerékkel van felszerelve. A kompresszor és a turbina (forgórész) egy egységet képez, labirint tömítéssel és golyós csapágyazással.

Égéstér

A gázturbinát egy könyökös, csöves tüzelőtérrel szerelték fel, melynek köszönhetően a gyújtógyertya és a tüzelőanyag fúvóka könnyen hozzáférhető. Ez az elrendezés ugyan csökkenti a gázturbina hosszát, így a tengely csapágyazása is kedvezőbb, valamint kritikus fordulatszáma is kevésebb, ugyanakkor nagy homlokfelületet eredményez, de mivel nem repülőgép meghajtása az elsődleges rendeltetése a berendezésnek, ebben a konfigurációban nem okoz hátrányt.

Gázelvezető csatorna

A gázelvezető csatornát szintén a tanszék készítette. Célja a gázturbinából kilépő forró gázok elvezetése biztonságos távolságra (épületen kívül) a hajtóműtől. Ezért hővédő burkolattal is ellátták. Mivel a próbapad az egyetem területén található, így a gázelvezető csatorna végére, a laboratórium falán kívül egy hangtompító dobot szereltek fel. Ebből kifolyólag a gázelvezető csatornán nagy fojtás keletkezik, mely lecsökkenti a gázelvezető csatorna össznyomás-visszanyerési tényezőjét.

Áttételház

Az áttételház kétfokozatú golyós csapágyazású. Az áttételházhoz van csatlakoztatva a hajtómű szabályzó egysége a tüzelőanyag szivattyúval és az olajszivattyúval. A kimenő fordulatszáma ($n = 833,333$ 1/s mellett) 50 1/s, azaz az áttétel 3/50. Ezzel hálózati generátor meghajtása is lehetséges volna, azonban a Tanszék a próbapad megépítésekor a vízörvényfék, mint terhelő berendezés illesztése mellett döntött.

Tüzelőanyag-rendszer és a gázturbina szabályzó egysége

A tüzelőanyag a tüzelőanyag szivattyú segítségével a tartályból a szűrőn és a tüzelőanyag-ke-nőolaj hőcserélőn át az égéstérbe kerül beporlasztásra. A szabályzóegység a tüzelőanyag-szivattyúval van együtt. Feladata, hogy a szabályzó egység oldalán található gázkar által beállított

fordulatszámnak megfelelő mennyiségű tüzelőanyagot juttasson a gázturbinába. Továbbá megakadályozza a hajtómű túlpörgését, illetve a túl magas turbina utáni torlóponyi hőmérsékletet a gázturbina leállításával.

Vízörvényfék

A vízörvényfék sem volt a gázturbina része, viszont elengedhetetlen a hajtómű különböző terhelések melletti működtetés és mérés céljából, valamint a hajtómű által generált teljesítmény elemzése miatt. A ZÖLLNER típusú vízfék egy kardántengellyel van összekötve az áttételház kimenő tengelyével. A próbapad működtetése során biztosítani kell a vízfék kielégítő mennyiségű vízzel való ellátását, melyet betápláló és leürítő szivattyúk, valamint a csővezetékekben elhelyezett csapok segítenek. Indításkor azonban nem lehet víz a vízfékben, mert megakadályozza a gázturbina indítását, illetve a hajtómű fordulatszám emelkedését [13], azaz melegfennakadáshoz vezethet.

A mérőberendezések

A hőmérséklet mérése

A torlóponyi hőmérséklet mérése NiCr-Ni (K típusú) termoelemekkel történik. A termoelemekkel a gázturbina-körfolyamat jellegzetes pontjaihoz tartozó torlóponyi hőmérsékleteket mérjük, azaz a kompresszor előtti (T_1^*), kompresszor utáni (T_2^*), illetve turbina előtti (T_3^*) és turbina utáni (T_4^*) torlóponyi hőmérsékleteket. Mivel a turbina előtti keresztmetszetben a hőmérséklet-eloszlás nem egyenletes, ezért a T_3^* értéket érdemes számítással meghatározni. A hőelemek méréstartománya $-200 \dots 1200$ °C.

Egy további mérési pont a hőelemek hidegponyi kompenzációját hivatott elvégezni, egy negatív hőmérsékleti együtthatóval rendelkező termisztor szolgáltatja a környezeti hőmérséklettel (T_0) arányos jelet.

A nyomás mérése

A torlóponyi nyomások mérése a nyomással arányos analóg jelet szolgáltatató nyomásszenzorokkal történik. A mérés pontosságának növelése céljából ahol lehetséges, nem abszolút nyomásokat, hanem két mérési pont közötti nyomáskülönbséget (differenciál nyomás) mérünk. (Az alább felsorolt nyomások mérőeszközei zárójelben találhatóak.) A mért nyomások:

- Környezeti nyomás (az egyetlen abszolút nyomás) p_0 (Honeywell 142PC15);
- Kompresszor előtti nyomáscsökkenés $p_0^* - p_1^*$ (Honeywell 24PCE);
- A kompresszor által létrehozott nyomáscsökkenés $p_2^* - p_1^*$ (Honeywell 142PC30D);
- Égéstér nyomásesése $p_2^* - p_3^*$ (Honeywell 142PC05D);
- Gázvezető csatornában létrejövő nyomásesés $p_4^* - p_0^*$ (Honeywell 24PCE);
- A levegő tömegáramának meghatározása céljából a mérőperemen mért nyomásesés $\Delta p_{\text{mérőperem}}$ (Honeywell 24PCE).

A fordulatszám mérése

A fordulatszám mérése a vízfékre szerelt ABS jeladó és a hozzátartozó 60 osztású tárcsa szolgál. A tárcsa forgásakor a jeladó előtt elhaladó osztások impulzust gerjesztenek a jeladóban. Ezen impulzusok számából és az eltelt időből meghatározható a fordulatszám. A mérési tartomány: $0 - 1666,66$ 1/s

A terhelő nyomaték mérése

A gázturbina terhelésének a beállítása a vízörvényfékkel történik. A terhelőnyomaték mérése egy 500 Nm terhelhetőségű KALIBER 7934 típusú nyomatékmérő cella szolgál. Az eszköz az áttételház és a vízfék közötti kardántengelybe van beépítve. A fékezés mértékét a vízféken lévő karral lehet beállítani.

Tüzelőanyag fogyasztás mérése

A tüzelőanyag fogyasztást egy KALIBER ÜFM-2000 típusú gravimetrikus tüzelőanyag fogyasztásmérővel hajtjuk végre. A mérőberendezés a súlymérés elvén alapszik. A mérés megkezdésekor a számítógép a fogyasztásmérő töltő szelepét elzárja és leolvassa a mérőedényben lévő tüzelőanyag-szintet. Ezt a tüzelőanyag szintet (tömeget) a berendezésbe épített erőmérő cella méri. A mérés befejezésekor a számítógép ismét leolvassa a szintet, majd kiszámolja az óránkénti és a fajlagos tüzelőanyag fogyasztást. (A töltő és leeresztő szelepek vezérlése digitális kimenő jelekkel van megvalósítva.) A fogyasztás mérés tartománya: 0–200 l/h, pontossága 0,5% [9].

A PRÓBAPAD FEJLESZTÉSE

A koncepció

Mivel a mérőrendszer már a megépítések elavultnak számított, és a mérési eredményeket sem lehet róla lementeni, továbbá a Tanszék laborjának átalakítása miatt jelentősen csökkent a rendelkezésre álló hely, ezért vált szükségessé a próbapad fejlesztése. A rendszert hordozható számítógép segítségével lehet működtetni, ami nagymértékű helymegtakarítást jelent. A mérés során továbbra is a már meglévő érzékelőket és szenzorokat használjuk. Maga a próbapad lényegében változatlan marad, azonban néhány átalakítást, mint pl. a gázvezető cső eredeti 45°-os megdöntése helyett függőleges kivitelre van szükség az új, kisebb helyigény miatt. A lényegi változást azonban az új mérő-adatgyűjtő rendszer és a számítógépen lévő szoftvert jelenti [13].

A mérő-adatgyűjtő egység

Az érzékelőkből a jelek egy NI USB-6218 típusú adatgyűjtőbe jutnak, és onnan az analóg jeleket átalakítva egy USB kábelen keresztül kapcsolódnak a számítógéphez, melynek vázlatát a 2. ábra mutatja. Az egységen keresztül zajlik az esetleges vezérlése a mérendő rendszernek. Ilyenkor a számítógépből érkező digitális jeleket alakítja át analóg jelekké (ahol szükséges) és így adódik tovább a vezérlőjel a mérendő rendszernek.



2. ábra Az adatgyűjtő rendszer vázlatos felépítése ([14] nyomán)

Az adatgyűjtő 32 analóg bemenetet (analog input, AI), és két analóg kimenetet (analog output, AO) képes kezelni. Továbbá rendelkezik 8 digitális bemenettel (digital output, DO), és 8 digitális kimenettel (digital input, DI). A készülék használatához szükség van a számítógépre telepíthető, kifejezetten a National Instruments által készített vezérlőprogramokra (NI device monitor, NI DAQmx) [14].

Az előző fejezetben felsorolt mérendő mennyiségek messze nem használják ki a mérő-adatgyűjtő eszköz lehetőségeit. Az 1. táblázat bemutatja az alkalmazásban lévő csatlakozókat, az azokon vett vagy éppen kiadott jelek megnevezésével együtt.

Lábszám	Gyári megnevezés	Jel megnevezése	Lábszám	Gyári megnevezés	Jel megnevezése
1	PFI0 / P0.0	Gázkar alapjárat	33	PFI8 / P0.4	Gázkar alapjárat
2	PFI1 / P0.1	Fordulatszám	40	PFI14 / P1.6	Nagynyomású elzáró szelep
3	PFI2 / P0.2	Gázkar min. végállás	41	PFI15 / P1.7	Kisnyomású elzáró szelep
4	PFI3 / P0.3	Gázkar max. végállás	49	AI17	p_0
6	PFI4 / P1.0	Gázkar fel	50	AI25	Δp_2
7	PFI5 / P1.1	Gázkar le	51	AI18	Δp_3
8	PFI6 / P1.2	Kifogy. tartály szelep	52	AI26	Δp_{mp}
9	PFI7 / P1.3	Indítómotor	53	AI19	Δp_1
24	AI4	T_1^*	54	AI27	Δp_4
25	AI12	T_2^*	56	AI20	T_0
26	AI5	T_3^*	63	AI23	Kifogyasztó tartály erőmérő cella
27	AI13	T_4^*	64	AI31	Terhelőnyomaték

1. táblázat Az NI USB-6218 által kezelt jelek [15]

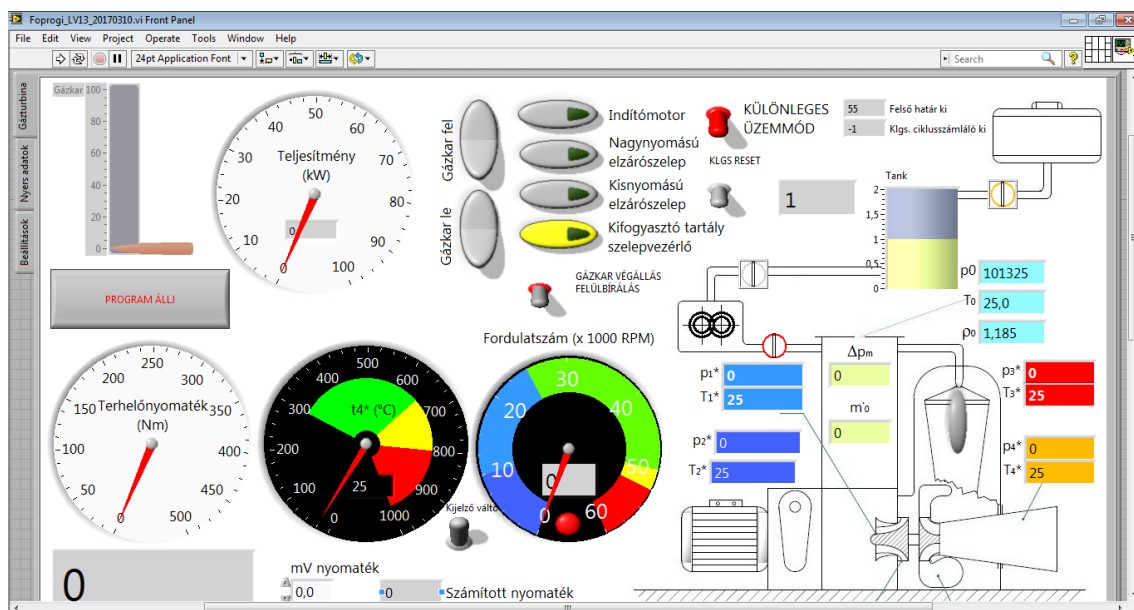
A vezérlő szoftver

A hordozható számítógépre telepített program a szintén a National Instruments által kifejlesztett rendszer-tervező program, a LabVIEW (Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench) keretein belül valósult meg. Ez egy grafikus programozási nyelv, amit kifejezetten mérőberendezések illetve ezek jelfeldolgozási műveleteinek vizsgálatára hoztak létre. A fejlesztők szerint a LabVIEW programozásban kevésbé jártas felhasználóknak is könnyen elsajátítható, mivel a gyártó rengeteg mintaprogrammal, előre elkészített programrészekkel valamint részletes leírással látta el [16].

A LabVIEW program, melyet virtuális műszernek (VI, Virtual Instrument) is hívnak, két alapvető részből tevődik össze: a felhasználóval kapcsolatot tartó Front Panel, és a program vezérlését végző részét tartalmazó Block Diagram, mely nem begépelte programsorok, hanem egyes (leginkább műveletek elvégzéséért felelős) csomópontok közötti vezetékezésből áll. A Front Panel vezérlő elemei, kijelzői szintén csomópontokként jelennek meg a működési vázlaton, melyek ki- illetve bemeneti változóként viselkednek.

A 3. ábra az adatgyűjtő szoftver kezelőfelületét mutatja. Az összes vezérlőelem és kijelző egyszerre történő megjelenítése nem lehetséges, így azok három lapra elosztva kerülnek megjelenítésre. A három fül a bal felső saroknál található, „Gázturбина”, „Nyers adatok” és „Beállítások” feliratokkal. Utóbbi kettő kiegészítő szerepet tölt be, a 3. ábrán az elsőre történő kattintással elérhető nézetet figyelhetjük meg. Ennek bal oldalán látható a terhelő nyomaték kijelző, és a gázkar állás

csúszka, mely egyelőre kiszürkített állapotban van, mivel egy későbbi gázkar pozicionálás megvalósítására készült, jelenleg csupán az eredeti konfigurációnak megfelelő, fel-le jellegű kézi vezérlést hoztunk létre. Ezek mellett helyezkednek el a teljesítmény és turbina utáni hőmérséklet kijelzésére szolgáló szimbolikus műszerek. A képernyő közepén találhatóak a különféle célokat szolgáló nyomógombok, valamint alattuk a fordulatszámot mutató műszer. A nyomógombok között látható két függőleges elhelyezkedésű, ezek a jelenlegi gázkar vezérlést megvalósító elemek, amely a gázkar állító motor táplálását irányítja ellentétes irányokba, és csak akkor, ha a nyomógombok le vannak nyomva. Ezek mellett vannak a szelepvezérlő gombok és az indítómotor indítógombja. A kifogyasztó tartály szelepvezérlőt a program irányítja aszerint, hogy mennyi tüzelőanyag található benne, továbbá a kis- és a nagynyomású elzárószelepeket is a program vezérli. A nagynyomású szelep esetén indítás során a megfelelő fordulatszám elérésekor a program kinyitja a szelepet. Mivel az indítómotorral közel 10 000 1/min a maximálisan elérhető fordulatszám, így a tüzelőanyag betáplálás kezdetét 9000 1/min értékben határoztuk meg.



3. ábra: A LabVIEW program fő képernyőképe

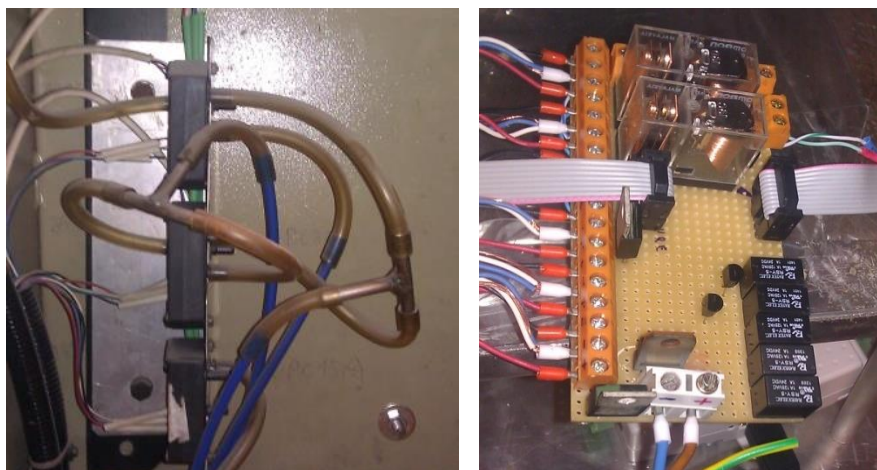
A képernyő jobb oldalán a gázturbinás próbapad sematikus ábrája látható, a jellegzetes keresztmetszetek termodinamikai jellemzőivel, valamint további kiegészítő értékekkel, mint pl. a kifogyasztó tartály szintje, ill. beszívott levegő tömegárama.

A gázturbina sematikus ábrája felett található a különleges üzemmód kapcsoló. Ennek a funkciója, hogy csökkenő periódusidővel állítja a gázkart a maximális és minimális kitérítettség között; ez a lehetőség a gázkar mozgató motor átviteli függvényének meghatározása miatt lesz a későbbiekben fontos, hogy egy automatikus szabályozó – a jelenleg még kiszürkített gázkar csúszka pozíciója alapján – nemcsak fel-le vezérlést, hanem tényleges pozíciótartást és – követést legyen képes megvalósítani, ezzel is egyszerűsítvén az üzemeltetést.

Nyomásmérés

Az eredeti rendszer szenzorait kívántuk felhasználni, melyek 12V-os tápfeszültséget igényelnek, amit egy összesített áramkörön keresztül kap meg. Ez az áramkör a szenzorok tápfeszültségén

kívül tartalmazza azokat a reléket, melyek az adatgyűjtő modul TTL jelei alapján vezérlik a gázturbina 24V-os rendszerének komponenseit (mágnesszelepek, indító relé). Az áramkör az 5. ábrán látható, megkülönböztethetők rajta a narancssárga sorkapcsok a szenzorok csatlakoztatására, a fehér sorkapocs a 24V táp fogadására, a nagy átlátszó házú relék, melyek a gázkar motor vezérlését végzik, és a jobb alsó sarokban az öt kis fekete relé, melyek a további kétállapotú egységek működtetéséért felelnek. Az adatgyűjtő modullal szalagkábeleken történik az adatcsere [13].



4. ábra A nyomásmérő szenzorok (bal oldalt) és a vegyes analóg és digitális feladatok segédáramköre (jobb oldalt)

A kompresszor előtti (Δp_1), a turbina utáni (Δp_4) nyomásoknál, továbbá a mérőperem nyomásesése (Δp_m) csekély mértékű, ezeket eredetileg Honeywell 24 PCE típusú szenzorral mértük, amelynek a méréstartománya 0-3500Pa, és belső erősítéssel nem rendelkező érzékelők, így a kimenő feszültség változása szintén kismértékű, mindössze 0–46 mV [17]. Ezek a fent említett szenzorok jele külső erősítőn át jut az áramkörre, ahol egy sorkapcson keresztül csatlakozik a mérő-adatgyűjtő rendszerhez. A kompresszoron bekövetkező nyomásnövekedést (Δp_2) Honeywell 142PC30D jelű szenzorral mérjük, melynek méréstartománya: 0-206kPa. Az égéstér nyomásesését (Δp_3) Honeywell 142PC05D szenzorral határozzuk meg, méréstartománya: 0-35kPa. Végül a környezeti nyomást Honeywell 142PC15 típusú érzékelővel rögzítjük, melynek méréstartománya: 0–105 kPa [18]. A nyomásmérő eszközök kalibrálása egy U-csöves manométerrel, valamint a tanszéki laborban megtalálható nyomást előállító készülékek segítségével történt. Az eljárást a különböző típusú nyomás-szenzorokra lett elvégezve, aminek az eredményeit felhasználva meghatározásra kerültek a szükséges tényezők (ofszet és faktor). Mivel a szenzorok rendelkeznek egyfajta karakterisztikával, ami a mért fizikai mennyiség és a feszültség átalakítás közötti kapcsolatot jellemzi, a legtöbb esetben a szenzorokat a jelleggörbájük kvázi lineáris szakaszán szokták alkalmazni, és erre a szakaszra teszik a szenzor méréstartományát. Ez a jelenlegi esetben sincs másként, ezért a nyomás-feszültség átalakítás egy egyszerű képlettel megadható a program számára [13].

$$p_{ki} = \frac{U_{be} - ofs}{fac} \quad (1)$$

ahol:

- p_{ki} : a mért nyomás értéke
- U_{be} : a beolvasott feszültség

- *ofs*: nullponti eltolás
- *fac*: szorzótényező

A belső erősítéssel rendelkező nyomá szenzorok nem mutattak semmilyen rendellenességet a kalibrálás során, így ezeket változtatás nélkül fel tudtuk használni a végleges konfigurációban. Miután azonban a segédáramköröket létrehoztuk, mellyel a kis nyomások erősítetlen érzékelőit csatoltuk a rendszerhez, a kalibráció alatt mindegyiknél hibát észleltünk.

Az alkalmazott 24PCE típusú érzékelők tehát csak egy piezorezisztív ellenálláshidat tartalmaznak egy membránon kialakítva, melynek deformációja a hídkapcsolás egyes ellenállásainak értékét a mérés technikában szokásos elven változtatja, úgy, hogy a kimeneti vezeték feszültség-különbséget fognak mutatni, mely a membránt ért terheléssel (nyomással) lesz arányos. A maximális kimenő feszültség pedig a fentebb említett $\pm 46\text{mV}$, az előjel a membrán deformációjának irányától függ, vagyis attól, hogy az eszköz két csonkja közül melyikre csatlakoztattunk nagyobb nyomást. A kis kimenő jelfeszültség miatt szükséges a jel erősítése, azonban az erősítő már csak egyféle polaritású jelet enged át, mivel nem szimmetrikus (pl. $\pm 12\text{V}$) tápellátással rendelkezik, hanem csak $+12\text{V}$ -ot kap. Így a két jelvezeték polaritása is adott kell legyen mindhárom érzékelő esetén, holott a p_1 és Δp_m szívóhatást (relatív vákuumot), a p_4 pedig túlnyomást fog detektálni a működés során, vagyis a nyomást továbbító csövek megfelelő csonkra vezetéseiről a felhasználónak kell gondoskodnia, ezt lehet látni a 4. ábrán is.

A problémák a kalibrációnál kezdődtek, amikor egyik erősítő sem adott ki értelmes jelet. Ezek után megvizsgáltuk a szenzorokat, lecsatlakoztatván a mérési helyről odavezető csöveket, kézi pumpával, illetve vákuumszivattyúval próbáltunk megfelelő nyomást létrehozni. A szenzorok erősítetlen kimenetén látszott némi változás, az erősítő kimenete természetesen továbbra sem mutatott semmit. A sikertelenség miatt kíváncsiságból felcseréltük az összes szenzorhoz vezető tesztcső csatlakozását, és az ellenkező oldali csonkokra vezettük az adott érzékelőnek megfelelő nyomást. Így azonnal működésre lehetett bírni az erősített kimenetet is, tehát az eredeti konfigurációban a csövek helytelenül voltak felszerelve, és így a szenzorok nem jelezhetek helyes értékeket.

A következő lépés tehát a kalibráció volt, az előbb említett vákuumszivattyú és kézi pumpa kimenetét elágaztattuk egy U-csöves manométerre is, hogy ott a pontos nyomásértéket leolvassuk. Azonban a várt valamilyen ofszet feszültségről már minimális nyomásváltozás hatására emelkedni kezdő kimenet helyett az összes szenzor $1,5\text{--}2,5\text{ kPa}$ nyomás alatt nem produkált kimenetet. Mivel a várható nyomások jelentős hányada ebbe a tartományba esik, kijelenthető volt, hogy ezek a szenzorok alkalmatlanok a további használatra. Azt, hogy mikor és milyen módon érte őket olyan behatás, aminek következtében a névleges karakterisztikától ennyire eltérnek, már nem megállapítható. Azonban annyi biztos volt, hogy teljesen új érzékelők beszerzésére és a rendszerbe integrálására lesz szükség.

Tekintettel arra, hogy a PD-60R típusú mikrogázturbina mérő-adatgyűjtő rendszerében [19] szintén Freescale szenzorokat alkalmazunk, kézenfekvő volt, hogy az ott használtakhoz hasonló eszközökkel oldjuk meg a felmerült problémát. A Freescale 2004-ben vált ki a Motorolából, és foglalkozik a félvezetőgyártással, benne a szenzorokkal, míg 2015 végétől NXP néven folytatja tevékenységét. A kínálatukban megtalálhatóak az MPXV5004GP és MP3V5004GVP típusok, melyeknek a legfontosabb jellemzőik a következők:

- tápfeszültség $+5\text{V}$ (MPXV...) vagy $+3\text{V}$ (MP3V...);

- 4kPa méréshatár;
- belső erősítéssel rendelkeznek;
- túlnyomás (...GP) vagy relatív vákuum (...GVP) mérésére alkalmasak.

Az érzékelőkhöz készítettünk egy illesztő áramkört, melyen a 3V tápfeszültség előállítása történik a bemenő 5 V-ból (ezt értelemszerűen az MPXV5004GP azonnal felhasználja) az MP3V ... szenzorok számára, és mindegyik szenzor sorkapoccsal rendelkezik a jel mérő-adatgyűjtőhöz való csatlakoztatására. Ezen áramkör elkészítését követően az új szenzorok kalibrálását végeztük el, mely minden esetben a gyártó által rendelkezésre bocsátott adatlapokon ([20] és [21]) közölt névleges értékeknek megfelelő viselkedést igazolt.

Miután a nyomás értékeket kiszámítottuk, már csak meg kell ezeket jeleníteni. Ehhez először újra át kell alakítani, majd mivel a környezeti nyomás (p_0) kivételével az összes differenciál nyomás, ennek megfelelően az értékek a (2) egyenlet szerint alakulnak. Természetesen még egy kivételről meg kell emlékezni, az pedig a mérőperem nyomásesése, mivel ezt az értéket a tömegáram számításában éppen különbségi nyomásként kell használni, ezért ezt nem transzformáljuk, hanem a (3) szerint képezzük belőle a gázturbina által beszívott tömegáramot.

$$\begin{aligned} p_1^* &= p_0 - \Delta p_1; & p_2^* &= p_1^* + \Delta p_2 \\ p_3^* &= p_2^* + \Delta p_3; & p_4^* &= p_0 + \Delta p_4 \end{aligned} \quad (2)$$

$$\dot{m}_0 = \alpha_{mp} \cdot A_{mp} \cdot \sqrt{2 \cdot \rho_0 \cdot \Delta p_{mp}} \quad (3)$$

ahol:

- p_{ki} : a mért nyomás értéke;
- \dot{m}_0 : a hajtómű által beszívott tömegáram;
- α_{mp} : a mérőperem kontrakciós tényezője, értéke 0,6;
- A_{mp} : a mérőperem keresztmetszete, 22 500 mm² (a furatátmérő $\varnothing 150$);
- ρ_0 : a környezeti sűrűség, melyet a (4) képlettel (állapotegyenlet) határozhatunk meg, a p_0 környezeti nyomás és T_0 hőmérséklet ismeretében:

$$\rho_0 = \frac{p_0}{R \cdot T_0} \quad (4)$$

A (4) újabb változója az R specifikus gázállandó, melynek értéke levegőre $R = 287 \text{ J/(kgK)}$.

Hőmérsékletmérés

A hőmérsékletek kalibrálása hasonló elvet történt, mint a nyomásmérés esetén. Tehát a szenzorokat megtartottuk a régi rendszerből és újrakalibráltuk őket. Egy fontos változtatást vittünk véghez, mely a környezeti hőmérséklet mérésével kapcsolatos. Az eredeti konfigurációban egy ötödik hőelemet is alkalmaztak a kezelőpulton belül a hőmérséklet mérésére. Azonban azt mindenképpen meg kell jegyezni, hogy a hőelemek a hideg- és melegpont közötti hőmérsékletkülönbség mérésére alkalmasak, tehát önmagukban az abszolút hőmérséklet megállapítására még nem elegendőek, meg kell határozni az ún. hidegponti hőmérsékletet is, melyhez a hőelem

által érzékelt különbséget hozzá kell adni. Az eredeti konfigurációban a PCLD-8710 bővítőkártya rendelkezett a hidegponti kompenzáció (Cold Junction Compensation, CJC) lehetőséggel. Eléggő fölőslegesnek ítéltető tehát az a megoldás, melyben közvetlenül a hidegpont mellett van egy további hőelem, ami lényegében mindig 0mV kimenetet ad, mert igen jó közelítéssel termikus szempontból együtt fut a közelében lévő elektronikus berendezésekkel.

Ez a gondolat, valamint a PCLD-8710 eltávolítása a rendszerből vezetett arra a megoldásra, hogy a kereskedelemben kapható negatív hőmérsékleti együtthatós (Negative Temperature Coefficient, NTC) termisztorral, azaz hőmérsékletre változó ellenállású félvezetővel oldjuk meg. Mivel a berendezés a laboratórium temperált (bár nem légkondicionált) helyiségében működik, ahol a hőmérséklet változása minimális, ezért csupán két hőmérséklet mellett történő kalibrálást végeztünk.

A maradék négy helyszín, kompresszor előtti-utáni, valamint turbina előtti-utáni pontok mérését a már meglévő szenzorok felhasználásával oldottuk meg.

A 2. táblázat mutatja a leggyakrabban alkalmazott hőelem típusok legfontosabb jellemzőit, ahol a * a konstantán anyagot jelöli, mely egy réz-nikkel ötvözet [22]. A repülésben, ezen belül gázturbinás hajtóműveknél leggyakrabban a K típusú hőelemet alkalmazzák, mert méréstartománya kellően széles, Seebeck-együtthatója elegendően nagy (viszonylag nagy jelet ad adott hőmérséklet-különbség esetén), és relatíve olcsó, tehát a pontosabb mérés okán nagy hajtóműveknél általában nagyobb számban alkalmazható. A termoelemből érkező feszültség egy MCP6G04 típusú erősítőn keresztül jut el az adatgyűjtő egységbe. Ez az integrált áramkör ún. választható erősítésű eszköz, azaz nem a felhasználó által hozzáadott ellenállásosztó határozza meg az erősítés mértékét, hanem egy választó bemenetre adott feszültséggel lehet dönteni erről a paraméterről. A lehetséges választások az 1-szeres, 10-szeres és 50-szeres erősítések [23]. Az általunk alkalmazott K hőelemek közel $40 \mu\text{V}/^\circ\text{C}$ meredekséggel rendelkeznek, a normál üzemi tartományban, mely várhatóan maximálisan 1000°C mellett 40 mV-ot ad, mely még mindig nem számottevő, ezért a használt erősítés mértéke 50. Mivel az erősítő közel sem ideális, figyelembe kell venni az úgynevezett bemeneti nyugalmi áramot (input bias current). Ez a kiválasztott erősítő esetében 1 pA, mely nem lehet tetszőlegesen „nagy” érték (1...100 nA nagyságrendű), mert akkor a véges bemeneti ellenállás analóg-digitális (A/D) átalakítón már számottevő feszültségesés jönne létre, vagyis a mért elektromotoros erő kisebb lenne, mint a hőelem által – a hőmérséklet-különbség hatására – előállított érték, vagyis jelentős hibát vinnénk be a rendszerbe.

Típus	Vezetékek anyagai	Alkalmazási tartomány	Termofeszültség $\Delta t = 100^\circ\text{C}$ -ra (mV)
T	Cu-Ko*	-200...600	4,25
J	Fe-Ko*	-200...900	5,37
K	NiCr-Ni	-200...1200	4,04
S	PtRh-Pt	0...1500	0,64

2. táblázat Fontosabb hőelem típusok

A hőmérsékletek kalibrálása során egy MY-64 típusú multimétert hívtunk segítségül, mely hőelem érzékelővel is el van látva. A próbamérések során dokumentáltuk a multiméter által mért és a program által mutatott hőmérsékleteket. Így táblázatba rendezve meghatároztuk az összes hőelem faktor és ofszet értékét.

Terhelőnyomaték mérés

Mivel az általunk használt Kaliber 7934 típusú nyomatékmérő cella cellatényezője ismert (2 mV/V) az adatlap alapján [24], amit 5,85 V-os tápfeszültség mellett használunk. Kalibrálás során, működő gázturbina mellett különböző fordulatszámokon és a tengelyhez felszerelt víz-örvényfék segítségével különböző terhelések mellett mértük a MY-64 típusú multiméterrel a szenzorból érkező feszültség értékeket, valamint a program által mért feszültséget, melyeket szintén táblázatba rendezve vizsgáltunk.

Tüzelőanyagfogyasztás mérés

A tüzelőanyag fogyasztás mérése szintén a már meglévő rendszer alapján működik. A programban gyakorlatilag ugyan az a mérés menete, mint a nyomásmérés esetén. A különbségek a kalibrálás során jelentkeztek. Itt a mérőedényben lévő tüzelőanyag tömege, valamint az erőmérő cellára ható erő segítségével határoztuk meg a szükséges értékeket. A mérés közbeni működése azonban eltér az eredeti koncepciótól. Jelenleg a program folyamatosan méri a tüzelőanyag mennyiségét a rendszerbe beépített erőmérő cella segítségével. A mérés kezdetén a kifogyasztó tartályt feltöltjük 1 kg tüzelőanyaggal, majd a program a kifogyasztó tartály mágnes szelepét elzárja. Amint a tüzelőanyag szint 0,5 kg alá esik, akkor a program nyitja a kifogyasztó tartály mágnes szelepét.

Fordulatszám-mérés

A fordulatszám mérése teljes mértékben az eredeti szenzor és jelformáló áramkör segítségével történt, az NI USB-6218-hoz az 1. táblázatban megadott módon csatlakozva, ahol a belső számláló méri a két jel között eltelt időt, ebből képes aztán frekvenciára, vagyis fordulatszámra viszszaszámolni.

A próbapad átalakítása

A próbapadon igyekeztünk minimális átalakítást végezni. Lényegében a gázvezető cső függőleges kivezetése jelent meg, mint újdonság, a régi hangtompítót egyelőre még nem alkalmazzuk. Ezen felül a fékgépen egy tartókonzol került kialakításra, ahol a vezérlő számítógép helyezhető el, továbbá azok az elektronikus áramkörök (beleértve az NI USB-6218-at is), melyek a mérés lebonyolításához szükségesek, a szívócsatornán lévő dobozban, illetve az alatta készített polcokon helyezkednek el, így minimalizálva a berendezés helyszükségletét. A jelenlegi konfigurációt az 5. ábra mutatja.



5. ábra: A Deutz T216 próbapad jelenlegi állapota

TESZTÜZEM

A gázturbina próbajáratásának vázlatja

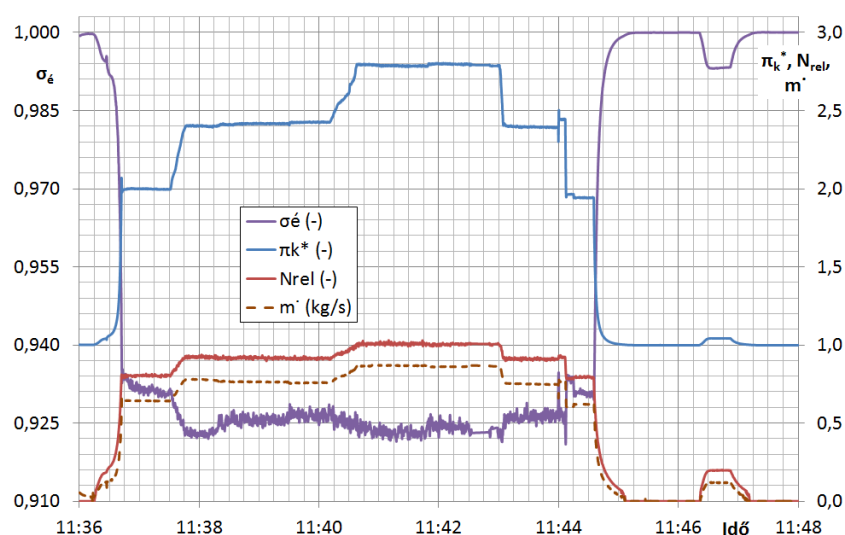
A mérés során célunk meghatározni a gázturbina jellegzetes pontjaiban a nyomás, hőmérséklet adatokat, valamint a gázturbina által leadott a tengelyteljesítményt a mérés ideje alatt, tizedmásodperces elbontással, majd az adatok ismeretében grafikusán ábrázolni az eredményeket. A procedúra előtt természetesen a gázturbinát elő kell készíteni a vizsgálat elvégzéséhez. Először a tüzelőanyag tartályt kell feltölteni a gázturbina specifikációinak megfelelő tüzelőanyaggal, esetünkben ez gázolaj. Majd meg kell bizonyosodni róla, hogy a vízörvényfék tartálya fel van töltve vízzel. Ezután csatlakoztatni lehet a számítógépet a mérő-adatgyűjtő rendszerhez, végül a próbapadot csatlakoztatjuk az elektromos hálózatra. A mérés menete a gázturbina indításával kezdődik. Az indítási folyamat során, az elektromos indítómotor $9500 \frac{1}{min}$ fordulatszám értékre pörgeti a gázturbinát. Itt a program automatikusan kinyitja a nagynyomású elzárószelepet amellyel megkezdődik a tüzelőanyag égéstérbe való porlasztása, majd gyújtógyertya segítségével meggyullad, és létrejön az égés. Amint a fordulatszám eléri a $20\,000 \frac{1}{min}$ alapjáratú értéket kikapcsolható az elektromos indítómotor, innen már csak a turbina többleteljesítmény áll rendelkezésre, melynek hatására kifut a $40\,000 \frac{1}{min}$ alapjáratú fordulatszámra, ahol hagyjuk stabilizálódni, majd a fordulatszámot felemeljük $45\,000 \frac{1}{min}$ -re. Ezen az értéken terheljük a gázturbinát a vízörvényfék segítségével, majd a terhelésmentesítés után tovább elemeljük a fordulatszámot egészen $50\,000 \frac{1}{min}$ -ig. Itt szintén a vízörvényfék segítségével, terheljük a gázturbinát. A fékezés megszüntetése után újra felvesszük az alapjáratú fordulatszámot, majd a betáplálás megszüntetésével leállítjuk a gázturbinát. A leállítás után, mivel a tüzelőanyag betápláló vezetéken elhelyezésre került egy kézi elzáró szelep is, ezt elzárva, lehetőség nyílik az elektromos indítómotor üzemeltetésével a gázturbina belsejének a környezeti levegővel való hűtése.

A mérés kiértékelése

A LabView által rögzített adatok tizedmásodpercenként egy szöveges fájlba kerülnek mentésre, amelyet MS Excel táblázatban rendezünk. Mivel a mért adatok jelenleg csak differenciákat rögzítenek a hőmérsékletek esetében a környezeti hőmérséklethez képest, illetve nyomások esetén a környezeti nyomáshoz képest, ezért további, de egyszerű átszámításokra van szükség, és ezekkel az új értékekkel dolgozunk tovább. Meghatároztuk a kompresszor nyomásviszonyát és az égéstér nyomásvesztését, valamint kiszámítjuk a gázturbina által leadott hasznos teljesítményt, mint a gázturbina üzemállapotára leginkább jellemző mennyiségeket. Ezeket a kiszámított értékeket ábrázoljuk diagram formájában, melyeket a 6. és 7. ábrákon mutatunk be.

Főbb nyomások

Az 6. ábrán látszik, hogyan változtak a jellemző nyomások illetve az azokból származtatott mennyiségek a mérés 12 perce alatt. Nyomon követhetjük az égéstér össznyomás-visszanyerési tényezőjének (σ_ϵ), a kompresszor nyomásviszonyának (π_k), valamint a gázturbinába belépő tömegáramának (\dot{m}) alakulását, miközben referenciaként a gázturbina relatív fordulatszám (N_{rel}) is látható. Ez utóbbi a valós fordulatszám és a névleges 50 000 1/min hányadosa, amely a skálák összehangolása végett került ilyen formában ábrázolásra. Az időskála kis léptéke 15 s, a gázturbina próbaüzem során tehát közel nyolc percet töltött üzemi viszonyok között.



6. ábra Mért nyomásviszony és nyomásvesztés

Az indítási folyamat során megfigyelhető, hogy az indítómotor hatására közelítően tíz másodperc alatt éri el a 9000 1/min értéket a fordulatszám, melynél a tüzelőanyag-betáplálás megindul. Látható, hogy egy szintén nagyjából tíz másodpercnyi szakasz következik, melyben a fordulatszám emelkedése bár gyorsabb, mint azt megelőzően, de még nem számottevő. Ez a szakasz az égés stabilizálódását takarja, melyet a 6. ábrán tovább részletezünk. Nem sokkal 11:36:30 után a gyorsítás mértéke megugrik, és ismét közel 10 s elteltével a forgórész már a névleges 80%-át jelentő alapjáratú fordulatszámon jár. Eközben megfigyelhető, hogy milyen drasztikusan változik az égéstér össznyomás-visszanyerési tényezője, valamint, hogy ez nem áll be azonnal egy értékre, hanem állandó fordulatszám mellett lassan tovább csökken. Mivel a tendencia egy bizonyos értékhez konvergáló jelleget mutat, ez vélhetően az indítási tranzienst lecsengése, melynek során a gázturbina szerkezeti elemei felmelegednek, és végül

eléri az üzemi hőmérsékletet. Az égéstér nyomásvesztése ugyanis nem elhanyagolható mértékben függ a hőfoktól. Amennyiben tovább tartottuk volna ezt az üzemállapotot, valószínűleg a σ_ε rövidesen 0,927 körüli értéken stabilizálódott volna.

Az alapjáraton történő stabilizálódást követően 11:37:30 körül gyorsítottunk 45 000 1/min, azaz 90%-os értékre. Az előzőleg 2,0 közeli kompresszor nyomásviszony 2,4-re nőtt, az égéstér össznyomás-visszanyerési tényezője pedig 0,925-ös érték körül változott. Ennek az oka az égéstér össznyomás-visszanyerési tényező $(p_3^*)/(p_2^*)$ és a p_3^* nagymértékű függése a turbina előtti hőmérséklettől. Az 6. ábra nem tartalmazza a terhelés alakulását, de összevetvén a 7. ábra görbéivel megfigyelhető, hogy minden egyes σ_ε változás egybefügg a gázturbina terhelési állapotának változásával. Mivel a terhelés növelésének hatására emelkedik a hőmérséklet, ez pedig rontja a hatásfokot is. A kompresszor nyomásviszonya azonban jól kivehetően kirajzolódik, hogy hogyan alakult a különböző fordulatszámok esetén. Látható, hogy a π_k^* maximális értéke 500001/min-nél közelítette meg a gyártó által megadott 2,8-es névleges értéket, de nem érte el teljességgel azt, mivel a mért környezeti hőmérséklet ($t_0 = 24,5$ °C) eltért a Nemzetközi Egyezményes Légkörben (NEL) foglaltaktól. Mivel részletes kompresszor karakterisztika jelenleg még nem áll rendelkezésre, így csak becsülni lehet az eltérést az átszámított fordulatszám alapján:

$$n_a = n \cdot \sqrt{\frac{288}{T_0^*}} = 50000 \frac{1}{\text{min}} \cdot \sqrt{\frac{288}{297,5}} = 49195 \frac{1}{\text{min}} \rightarrow n_{rel} = 98,4\% \quad (5)$$

Az eltérés tehát közel 1,5%, ennyi eltérés nagyjából 2,77 körüli nyomásviszonyt eredményezne, ezt a mérés is megerősíti.

A tömegáram változása is figyelemmel kísérhető a teszt során. Jól látható, hogy állandó fordulatszám mellett történő terhelés növelésének hatására, enyhén csökken az idő múlásával. Ebben a vonatkozásban sem sikerült elérnünk a gyártó által megadott értéket, attól közel 3%-kal elmaradó, 0,87 kg/s értéket regisztráltunk. Ez a csökkenés szintén a NEL-től való eltéréssel magyarázható.

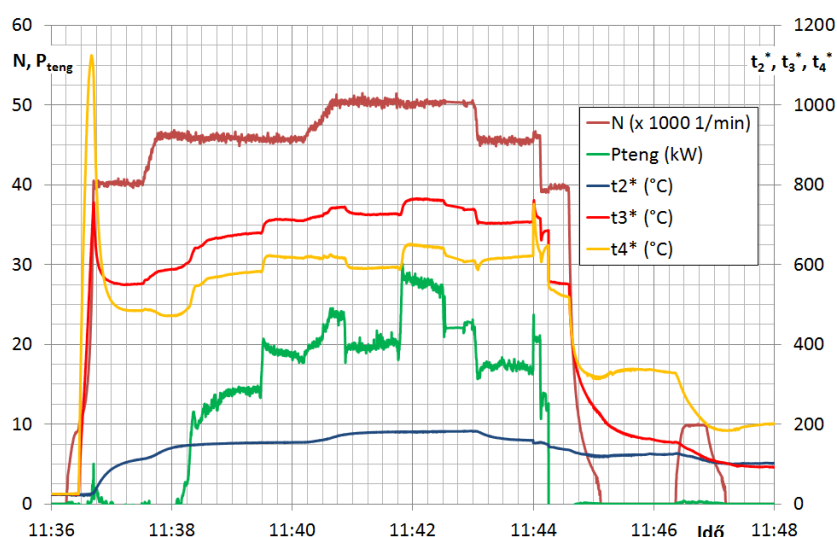
A diagram végén látható kismértékű és rövid nyomásnövekedés a leállítási folyamat végeztével működésbe hozott indítómotor hatása, melyet a hajtómű hideg átforgatása miatt, a hatékonyabb hűtés érdekében kapcsolunk be.

Hőmérsékletek és teljesítmény

A 7. ábra alapvetően a hőmérsékletek és a hasznos teljesítmény nyomon követését teszi lehetővé, ismét feltüntetvén a fordulatszámot, mint viszonyítási alapot. A görbék a 7. ábrán tehát rendre a fordulatszám (N), a gázturbina által leadott hasznos teljesítmény (P_{teng}), a turbina előtti torlóponti hőmérséklet (t_3^*), a turbina utáni torlóponti hőmérséklet (t_4^*), valamint a kompresszor utáni torlóponti hőmérséklet (t_2^*). A t_4^* és a t_3^* diagramokon az indítási fázisban látszik egy nagyarányú hirtelen melegedés, ez a gázturbinák indítása során keletkező jelenség, mivel ilyenkor az égés már folyamatban van, azonban a gázturbinába belépő levegő tömegárama még elég kicsi, ezért keletkezik a magas hőmérséklet. Ezért kell figyelemmel kísérni az indítási folyamatot, és egészen nagy, közel 40%-os névleges fordulatszámig a villamos indítómotorral a gyorsítást segíteni. De az alapjárat fordulat számot elérve, már drasztikusan csökken a hőmérséklet, és beáll a normális tartományba.

Nagyon fontos megemlíteni azt, hogy helyenként, de mindig tranziens folyamatok során a turbina

utáni hőmérséklet túlnó a turbina előtti értéken, ami átlagos értékeket feltételezve fizikailag lehetetlen volna. Itt azonban arról van szó, hogy mindkét hőmérsékletet csupán egy-egy pontban mintavételezzük, így az adott keresztmetszetben uralkodó hőmérséklet-mező inhomogenitásai nagymértékben befolyásolni képesek a mért értékeket. Az állhat tehát a látható jelenség hátterében, hogy a turbina után elhelyezett érzékelő vélhetően éppen a keresztmetszet egy „forró pontján” helyezkedik el, melyet tranziens folyamatok során jóval nagyobb hőterhelés ér, mint a keresztmetszetre érvényes átlag, így pillanatnyilag hamis értéket mutat, mely a feltehetően lassabb reagálású és a saját átlagértékéhez jobban közelítő turbina előtti hőmérséklet fölé is kerülhet.



7. ábra A mért hőmérsékletek és a gázturbina hasznos teljesítménye

Ez a jelenség, tekintettel arra, hogy a szenzor állandósult állapotban helyes értékeket közvetít, csupán az átmeneti állapotokban előforduló rendellenességnek, de nem a szenzor teljes működésképtelenségének a jele. Így tehát ezt az anomáliát bizonyosan meg lehetne szüntetni több érzékelőnek a turbina utáni keresztmetszetben történő elhelyezésével, melyekből átlagot számítva volna meghatározható a t_4^* effektív értéke.

A diagramról leolvasható továbbá az adott pillanatban a hasznos tengelyteljesítmény. Ezzel párhuzamosan jól megfigyelhetőek a terhelés hatására bekövetkező hőmérséklet-változások is. Mint az a korábbiakban említést nyert, az indításkori rendellenességek elkerülése végett mindenképpen üres fékberendezéssel kell az indítást végrehajtani. A fékgépbe a víz betáplálása nem sokkal 11:38 után kezdődött, amikor egy percnyi tranziens folyamat során a nyomaték nulláról közelítőleg 50 Nm-re emelkedett, ez nagyjából 15 kW hasznos terhelésnek felel meg. Észre lehet venni a terhelés jelentősebb lépcsői mellett annak ingadozását is, mely a vízörvényfék manuális működtetésére visszavezethető eltérések. A fékgép ugyanis minden esetben egy meghatározott állapotba lett állítva, így elvben a terhelésnek lépcsős jelleget kéne mutatnia, ezzel szemben vannak benne helyenként olyan szakaszok, melyekben számottevő csökkenést tapasztalhatunk. Ilyenkor a fékgépet kezelő személynek kéne a terhelést manuálisan utánállítani abban az esetben, ha a kísérlet megköveteli az állandó teljesítmény tartását. Ez a későbbiekben esetleg hátrányt jelenthet, hogy a mérés állandó beavatkozást igényel.

ÖSSZEFOGLALÁS

Elért eredmények

Az a leírtakból egyértelműen kiviláglik, hogy a kiindulási állapothoz képest nagy előrelépést sikerült tenni. Az elmúlt időszakban munkánkkal elértük, hogy a próbapadot a modern kor követelményeinek megfelelően lehet alkalmazni, mint oktatási, mint kutatási célra. Megvalósultak azok a próbapadot érintő változtatások, melyek az új elhelyezés miatt voltak szükségesek (pl. gázelvező cső).

Elkészült egy a régítől gyökeresen eltérő mérő-adatgyűjtő rendszer, melynek hardvere sokkal nagyobb mintavételi sebességet, felbontást és csatornaszámot kínál. Ez utóbbi tulajdonsága a további fejlesztésekre lesz majd jótékony hatással. Az alkalmazott számítógép is természetesen illeszkedik az elvárásokhoz, így nem jelent gátat a nagy adatforgalom szempontjából. A szoftver is alapjaiban születtett újjá, fejlett grafikus környezetben esztétikus, felhasználóbarát külalakat kapott, továbbá a működése során automatikusan ment minden bejövő adatot, így a mérést követően bármilyen jelenség visszakereshetővé válik.

Bár a jelenlegi másodpercenkénti tíz mintavétel még nem túlzottan nagy érték, hogy olyan dinamikus folyamatok, mint pl. pompázs vizsgálatára, alkalmas legyen, de az átlagos oktatási-kutatási igényeket már így is kielégíti, és jelentősen javítható, amennyiben szükséges. A jelenlegi rendszer már jóval több adatot szolgáltat a felhasználó számára, mint az eredeti változat. Nagy előny továbbá a modernizálással megtakarított terület, ahova akár egy új laborberendezést is be lehet szerelni.

Továbbfejlesztési lehetőségek

Az elért eredmények ellenére a próbapadot számos vonatkozásban tovább lehet még fejleszteni. Első lépésként a mérési adatfájlba történő rögzítés módosítását említhetnénk, melyben nem nyers adatokat, hanem már kész jellemzőket (π_k^* , σ_ϵ , P_{teng} stb.) lehetne elmenteni, ezáltal lecsökkentve az üzemelés utáni kiértékelés idejét.

A gázkar mozgatása még mindig a régi rendszer szerint működik, de a már a szoftverben megjelenik ennek a csúszkával mozgatható továbbfejlesztett változata. Ez nyilván egy teljesen új szabályozást követel meg, részletes visszacsatolással, ellenben a most kiépített végállás-kapcsolókkal határolt rendszerrel.

Nagy mértékben fokozná a használhatóságot, ha az üzemeltetést végző személy nem csak felle parancsot adhatna a gázkarnak, hanem egy konkrét fordulatszámot lehetne beállítani. Ilyenkor a csúszka által képviselt referencia jel alapján a program szabályozó algoritmusá addig mozgatja a gázkart, amíg az el nem éri azt a pozíciót, melyben a fordulatszám az általunk megkívánttal megegyezik.

Ezen túlmenően az érzékelők területén is lenne bővítésre lehetőség. Nagyon sok olyan paraméter van (pl. olajnyomás és -hőmérséklet, vibráció), melyeket jelenleg nem mérünk. Az NI USB-6218 eszközön jelenleg 13 analóg csatornát használunk, tehát még 19 lehetőség nyílik, azaz sokáig nem fog korlátozó tényezőt jelenteni. Természetesen a meglévő szenzorok bővítése is érdekes lehetőségeket kínál, említhetjük pl. a fentebb részletezett hőmérsékleti anomáliát a turbina utáni mérési ponton, ahol több szenzor elhelyezése az adott keresztmetszetben bizonytal megoldaná a most fennálló problémát.

Nagyobb volumenű fejlesztés is elképzelhető a rendszeren. Ugyanis a jelenleg használt vízörvényfék számottevően lassítja a mérést, manuális beavatkozást igényel, vagyis cseréje egy korszerűbb, pl. örvényáramos fékre, esetleg hálózati generátorra nagy mértékben emelné a berendezés képességeit. Ezen felül még érdemes volna fontolóra venni egy szűkítő alkalmazását a fúvócsőben, melynek hatására a tengelyteljesítmény mellett a tolóerő létrehozását is imitálni lehetne, vagyis sugárhajtómű működését is szimulálhatnánk a kísérletek során.

Végül pedig megemlíthető, hogy bár készült doktori értekezés a gázturbina szabályozás témakörében ezen a próbapadon [9], az csak az elméleti vizsgálatot foglalta magában, kivitelezett szabályozó a jelenlegi röpsúlyos berendezés helyett még nem készült. Kézenfekvő tehát, hogy a későbbiekben egy FADEC (Full Authority Digital Electronic Control, teljes hatáskörű, digitális elektronikus szabályozás) elven működő rendszert fejlesszünk ki.

FELHASZNÁLT IRODALOM

- [1] 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)
- [2] VERESS Árpád, BICSÁK György, ROHÁCS Dániel: Pressure Loss and Flow Uniformity Analysis of Baseline and Redesigned Engine Inlet Duct for a Small Turboprop Aircraft. In: *Czech Aerospace Proceedings*, 2016/1, pp. 3-9.
- [3] BICSÁK György, SZIROCZÁK Dávid, Dr. ROHÁCS Dániel: Changes in Aerospace Development Process Trends. In: Rolandas Makaras, Robertas Keršys, Rasa Džiaugienė (szerk.), *Proceedings of 20th International Scientific Conference Transport Means 2016*. 1159 p., Juodkrantė, Litvánia, 2016.10.05-2016.10.07. pp. 528-535.
- [4] Jakub HNIDKA, 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
- [5] Ladislav FÖZŐ, 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
- [6] JeongMin SEO, Hyung-Soo LIM, JunYoung PARK, Moo Ryong PARK, Bum Seog CHOI: Development and experimental investigation of a 500-W class ultra-micro gas turbine power generator. *Energy*, 2017, pp. 9-18. ISSN 0360-5442, doi: 10.1016/j.energy.2017.02.012
- [7] Thanate SANGSAWANGMATUM, Udomkiat NONTAKAEW: Design of Radial Inflow Turbine for 30 kW Micro-turbine. *MATEC Web of Conferences* 95: 3rd International Conference on Mechatronics and Mechanical Engineering (ICMME), 06005 (2017) DOI: 10.1051/mateconf/2017950 (online) url: http://www.matec-conferences.org/articles/mateconf/pdf/2017/09/mateconf_icmme2017_06005.pdf (2017.03.12)
- [8] A. HOXIE, M. ANDERSON: Evaluating high volume blends of vegetable oil in micro-gas turbine engines. *Renewable Energy*, 2017, ISSN: 0960-1481, pp. 886-893, doi: 10.1016/j.renene.2016.09.054
- [9] AILER Piroška: Kisteljesítményű gázturbina modellezése és nemlineáris irányítása. PhD disszertáció, BME, 2003.
- [10] KLÖCKNER-HUMBOLDT-DEUTZ AG: *Technisches Handbuch Betrieb/Wartung Gasturbine T216*. Oberursel, 1980. (online) url: <http://documentslide.com/documents/handbuch-t216.html> (2017.03.12)
- [11] Christopher OERTEL: Messung einer Drehzahlkennlinie der Kleingasturbine KHD T216. Diplomamunka, Technische Universität Wien, 2015. (online) url: https://publik.tuwien.ac.at/files/PubDat_240372.pdf (2017.03.21)
- [12] Energetische Nutzung von RME-basiertem Glycerin in der Kleingasturbine an der Universität Rostock. Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. (FNR), Rostock, 2009. (online) url: <http://www.fnr-server.de/ftp/pdf/berichte/22020106.pdf> (2017.03.12)
- [13] SIMON Dávid István: Tanszéki gázturbinás próbapad modernizálása. BSc szakdolgozat, BME VRHT, 2014.
- [14] NATIONAL INSTRUMENTS: DAQ M Series NI USB-621x User Manual. Texas, USA, 2009 (online) url: <http://www.ni.com/pdf/manuals/371931f.pdf> (2017.03.12)
- [15] NATIONAL INSTRUMENTS: NI USB-621x Specifications. (online) url: <http://www.mdi-dd.de/pdf/621xspecz.pdf> (2017.03.12)
- [16] Hans-Petter HALVORSEN: Introduction to LabVIEW. (online) url: <http://home.hit.no/~hansha/documents/lab-view/training/Introduction%20to%20LabVIEW/Introduction%20to%20LabVIEW.pdf> (2017.03.12)
- [17] HONEYWELL: 24PC series catalog. (online) url: https://sensing.honeywell.com/index.php?ci_id=49846 (2017.03.12)

- [18] HONEYWELL: 142PC series catalog. (online) url: <https://www.jameco.com/Jameco/Products/ProdDS/1814840.pdf> (2017.03.12)
- [19] BENEDA Károly: Modular Electronic Turbojet Control System Based on TPR. Acta Avionica, Vol. 17, Issue 1, 2015. ISSN 1339-9853 (online) url: (2017.03.12)
- [20] NXP: MPXV5004G pressure sensor datasheet. (online) url: <http://www.nxp.com/assets/documents/data/en/data-sheets/MPXV5004G.pdf> (2017.03.12)
- [21] NXP: MP3V5004GVP pressure sensor datasheet. (online) url: <http://www.nxp.com/assets/documents/data/en/data-sheets/MP3V5004G.pdf> (2017.03.12)
- [22] Termoelem-hőmérők (elméleti összefoglaló). BME Energetikai Gépek és Rendszerek Tanszék, 2014. (online) url: ftp://ftp.energia.bme.hu/pub/Aramlas-_es_hotechnikai_meresek_BMEGEATAG02/elmelet/3_Termoelem-homerok.pdf (2017.03.13)
- [23] MICROCHIP: MCP6G04 választható erősítési tényezőjű erősítő adatlapja. (online) url: <http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/22004b.pdf> (2017.03.12)
- [24] KALIBER KFT.: A 7934 típusú forgótengelyes nyomaték-mérő adatlapja. Budapest. (online) url: <http://members.chello.hu/kaliberkft/documents/7934.pdf> (2017.03.12)

DEVELOPMENT OF TURBOSHAFT ENGINE TEST BENCH

Our article describes the development process of the Deutz T216 test bench at BME Department of Aeronautics, Naval Architecture and Railway Vehicles. It states those conditions which have led to the necessity of development, meanwhile it also gives details about the capabilities of the old system, which significantly required improvement. The core of the article describes the data acquisition and control system, in which the reader gets an thorough picture about the differences between newly developed and original systems. The test bench has been put into operation after a prolonged preservation period, thus the authors have been able to conduct measurements after finalizing the control system. Finally, mostly based on the newly measured data sets and operational conditions of the gas turbine, conclusions are drawn and some further development possibilities are also shown.

Keywords: turboshaft engine, turboprop engine, test bench, LabVIEW, data acquisition, Deutz T216

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

Simon Dávid István (BSc)
MSc hallgató
Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem
Vasúti Járművek Repülőgépek és Hajók Tanszék

simon.david.istvan@gmail.com
orcid.org/0000-0001-9159-7233

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

Simon, Dávid István (BSc)
MSc Student
Budapest University of Technology and Economics
Department of Aeronautics Naval Architecture and
Railway Vehicles

simon.david.istvan@gmail.com
orcid.org/0000-0001-9159-7233



http://www.repulestudomany.hu/folyoirat/2017_2/2017-2-15-0386_Beneda_Karoly-Simon_David.pdf

