

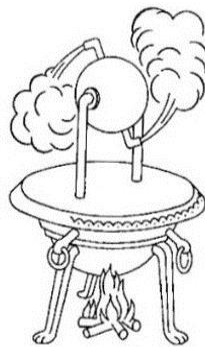
Tengelytejesítményt adó gázturbinás próbabpad fejlesztése

Bevezetés

Gázturbinákról általában

Gázturbinák alatt olyan hőerőgépet értünk, ahol a tüzelőanyag-levegő keverék folyamatos elégetése által létrejövő expanziót – és az égéstermék megnövekedett mozgási energiáját – lehet felhasználni más berendezések meghajtására, illetve sugárhajtóműveknél tolóerő képzésre [1]

A gázturbinák illetve gázturbinás sugárhajtóművek alkalmazására, már az ókorban is voltak próbálkozások. Alexandriában Kr.e. 200 körül hoztak létre olyan eszközt, amelyet a belőle kiáramló gőz forgatott meg. Ez azonban csak látványosságként szolgált.[1]



1. ábra Heron gőzsugár működésű gépe forrás:[1]

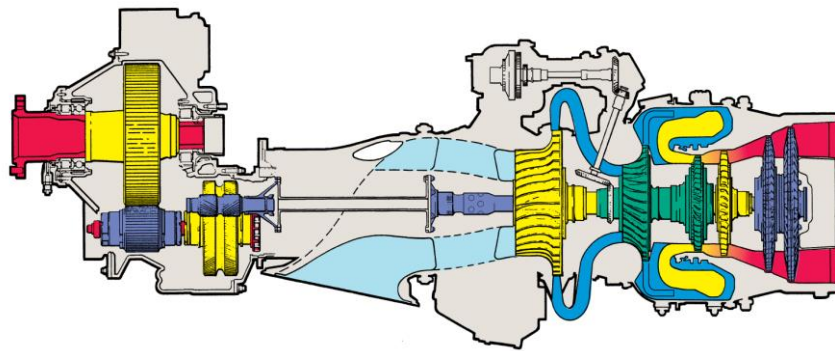
Munkára való felhasználhatóságra először a XV. században Leonardo da Vinci gondolt és készített egy kéménybe építhető forgató mechanizmust. Elképzelése szerint, a tűzhelyből felfelé áramló füst forgat meg egy lapátkoszorút, amit esetleg más gépek meghajtására lehetne alkalmazni. A gázturbina termodinamikai működését 1872-ben George Brayton dolgozta ki. Noha eredetileg dugattyús gépre dolgozta ki, de a gázturbinák ezt a termodinamikai körfolyamatot valósítják meg. Bár a XX. század elején sok tudós foglalkozott ilyen erőgépek létrehozásával illetve ezek alkalmazásával, komoly előrelépés csak a II. világháború előtt történt, a német Heinkel He 178 típusú repülőgép révén. Itt alkalmazták először gázturbinát repülőgép – tolóerő általi – meghajtására. A korai időszakban csak katonai alkalmazásban álltak, ezek azonban nagy tüzelőanyag fogyasztású, megbízhatatlan és rossz hatásfokú hajtóművek voltak. Azonban az 1950-es évektől rohamos technológiai fejlesztések révén, már alkalmazásba kerültek polgári repülésben is továbbá más iparágazatokban is elkezdett terjedni.[2]

A repülésben a legelterjedtebb az axiális kompresszorral szerelt változatok. Ennek okai, hogy kisebb a homlokfelülete adott tömegáram és nyomásviszony esetén, mint más fajtáknak,

továbbá magasabb fordulatszámon való üzemeltetés mellett jóval nagyobb tömegáramra is képes. Ezen felül nagyobb nyomásviszony és tömegáram esetén a jobb a hatásfoka. A centrifugál kompresszorral szerelt kialakítás inkább a kisméretű gázturbinákra jellemző, szintén alapos megfontolások alapján. Ezeknek egyszerűbb és olcsóbb az üzemeltetése, mint az axiális kompresszornak, nagyobb az egy fokozatban elérhető nyomásviszonya, valamint könnyebben illeszthető hőcserélőkhöz.[2]

Tengelyteljesítményt adó gázturbinák

A repülésben is elterjedt ez a gázturbina típus, általában kis-, és közepes hatótávolságú repülőgépeken alkalmazzák. A sugárhajtóművekkel ellentétben itt . A különböző hajtómű változatok a propeller meghajtásának módjában térnek el egymástól. Míg az egyikben a légsavár hajtása áttételen keresztül közvetlenül a turbináról történik. Itt egy turbina látja el a kompresszort és a légsavart teljesítménnyel. A másikonál erre a célra egy további turbina szekció (munkaturbina, szabadturbina) szolgál. A munkaturbinás változat előnye a jóval kedvezőbb nyomatéki karakterisztika. Az utóbbi megoldás terjedt el a helikopter hajtóműveknél, és a szárazföldi járművek (általában harckocsik) meghajtására. Mára a légsaváros repülőgépeken esetenként háromtengelyes elrendezést is alkalmaznak a kompresszor nagy nyomásviszonya miatt [1].



PW124/125/126/127 CROSS-SECTION

2. ábra Légsaváros gázturbinás hajtómű [2]

A tengelyteljesítményt leadó gázturbinák főbb elterjedési területe a repülésen kívül az erőművekben történő áramfejlesztés. Ezek általában axiális kompresszorral és turbinával szereltek, ezek hosszú élettartamú, jó hatásfokú és kiváló megbízhatóságú erőgépek.[2]

További felhasználási területek vizsgálata a XX. század második felében kezdődött. Ilyenkor kísérleteztek, szárazföldi és vízi járművekben való alkalmazásokkal. Eleinte ezek nem tudtak versenyre kelni a dugattyús motorokkal teljesítmény és hatásfok szempontjából. Később aztán elterjedtek a haditengerészetnél és a kereskedelmi hajózásban. Személyautóknál és vasúti járműveknél csak néhány próbálkozás volt a felhasználásukra. A kis gázturbinák (5 MW alatt). előnyük, az egyszerű kialakításuk, robusztusságuk, meghibásodás-mentes hosszú élettartamú üzemeltetésük és a kedvező áruk. A legkisebb gázturbinák a mikro gázturbinák (350 kW alatt). Ezeknél kompresszor centrifugális kialakítású, míg a turbina lehet axiális változatú is, valamint leggyakrabban diesel valamint földgáz üzeműek. Előnyei a kis méret, jó karbantarthatóság, csendes üzem, gyors indíthatóság, és megbízhatóság. A mikro gázturbinákat a földön áramfejlesztésre és meleg víz vagy levegő előállítására használják, míg a levegőben fedélzeti gázturbinaként alkalmazzák (APU: auxiliary power unit).[3] Ebbe a gázturbina típusba tartozik

a Vasúti járművek repülőgépek és hajók tanszék DEUTZ T216 típusú gázturbinája, amely részletes bemutatására később kerül sor.[2]

A próbapad és berendezései

A BME Vasúti Járművek, Repülőgépek és Hajók Tanszék laboratóriumában található gázturbinás próbapad egy olyan konstrukció, mely kifejezetten egyetemek és kutatólaboratóriumok számára készült. Ezért a hajtómű kis teljesítmény/tömeg aránnyal rendelkezik, és többféle tüzelőanyaggal is üzemeltethető. Továbbá egyszerű felépítéssel került kialakításra, melynek következtében könnyen üzemeltethető, illetve karbantartható. Utóbbi szempont talán a legfontosabb, hiszen így a hajtóművek terén nem járatos személyek illetve akár maguk a hallgatók is működtetni tudják, megismerve ez által, a gázturbinák alapvető folyamatait. A próbapad kutatási célokra is alkalmazható, mivel részei könnyen hozzáférhetőek, így a szükséges mérőeszközök gond nélkül beszerezhetőek, illetve a fentebb említett széleskörű tüzelőanyag felhasználhatóság miatt, akár új, alternatív tüzelőanyagok vizsgálatára is alkalmazható. Mivel a hajtómű tengelyteljesítményt szolgáltat, ezért mint légszavas gázturbinás hajtómű is vizsgálható [4].

A mérőrendszer részegységei egy 2 m × 1 m-es alapterületű kezelőpultban voltak elhelyezve, melynek fő elemét egy 386-os számítógép adta. A gázturbiná-próbapadon elhelyezett mérőberendezések lehetővé teszik a gázturbiná körfolyamat jellegzetes pontjaiban a torlóponti nyomások és hőmérsékletek, illetve a fordulatszám, a tüzelőanyag fogyasztás valamint a terhelő nyomaték meghatározását (a próbapadon kialakított mérőrendszerrel csak torlóponti, tehát lefektetett áramlás-mennyiségeit tudjuk mérni). A mérőberendezésekből érkező analóg jelek egy a próbapadhoz kapcsolt számítógépben kerülnek feldolgozásra, kijelzésre [4].



3. ábra Deutz T216 gázturbiná közelről (balra) és a próbapad eredeti kialakítása (jobbra) [8]

A gázturbiná

A gázturbinás próbapad fő egysége egy Klöckner-Humboldt-Deutz T216 típusú gázturbiná. A gyártó ugyanezzel típusmegjelöléssel több verziót is készített más-más felhasználási célokra. Többek között alkalmazható generátorok, tüzelő szivattyúk meghajtására, természetesen hordozható formában [4]. Európában, főleg a német nyelvterületeken és ezek vonzáskörzeteiben elterjedt el, és ezeken a helyeken alkalmazzák kisméretű gázturbinás próbapadokon oktatási-kutatási szerepkörben pl. a Bécsi Műszaki Egyetemen [6] vagy a Rostocki Egyetemen [7].

A gázturbina alapvető műszaki adatai ($p_0 = 101325$ Pa nyomás, $T_0 = 288,15$ K hőmérséklet, $n = 833,333 \frac{1}{s}$ fordulatszám mellett)

- névleges teljesítmény $P = 80$ kW
- a hajtóművön átáramló levegő tömegárama $\dot{m}_{lev} = 0,9 \frac{kg}{s}$
- a kompresszor nyomásviszonya $\pi = 2,8$
- turbina utáni torlóponyi hőmérséklet $T_4 = 938,15$ K
- óránkénti tüzelőanyag fogyasztás $b = 71,5 \frac{kg}{h}$ [4]

A mérőpad részei

Szívócsatorna

Ez a csatorna nem volt a hajtómű része, a Tanszék készítette. Független elrendezésű, a felső részén a belépő keresztmetszetenél egy mérőperem lett kialakítva, mely segítségével a beszívott levegő tömegárama meghatározható. A szívócsatorna kb. 3 méter hosszú, így a közelben tartózkodó személyek és gépek által nem zavart levegőt tud beszívni [4].

Forgórész

A kompresszor egyfokozatú centrifugális kialakítású, radiális lapátosú járókerékkel. A turbina szintén egyfokozatú centripetális kialakítású radiális lapátosú járókerékkel van felszerelve. A kompresszor és a turbina (forgórész) egy egységet képez, labirint tömítéssel és golyós csapágyazással [4].

Égéstér

A gázturbinát egy könyökös, csöves tüzelőtérrel szerelték fel, melynek köszönhetően a gyújtógyertya és a tüzelőanyag fűvóka könnyen hozzáférhető. Ez az elrendezés csökkenti a gázturbina hosszát, így a tengely csapágyazása is kedvezőbb továbbá kisebb helyet foglal el a laboratóriumban, valamint a kritikus fordulatszáma kellően nagy, ugyanakkor így ez az elrendezés nagy homlokfelületet eredményez, azonban nem egy repülőgép meghajtása az elsődleges rendeltetési célja a berendezésnek, ezért ebben a konfigurációban nem okoz hátrányt [4].

Gázvezető csatorna

A gázvezető csatornát szintén a tanszék készítette. Célja a gázturbinából kilépő forró gázok elvezetése biztonságos távolságra (épületen kívül) a hajtóműtől és a kezelő személyzettől. Hővédő burkolattal is ellátták a kezelők védelme érdekében. Mivel a próbapad az egyetem területén található, így a gázvezető csatorna végére, a laboratórium falán kívül egy hangtompító dobot szereltek fel. Ebből kifolyólag a gázvezető csatornán nagy fojtás keletkezik, mely lecsökkenti a gázvezető csatorna össznyomás-visszanyerési tényezőjét [4].

Áttételház

Az áttételház kétfokozatú golyós csapágyazással rendelkezik. Az áttételházhoz csatlakozik a hajtómű szabályzó egysége a tüzelőanyag szivattyúval és az olajszivattyú. A kimenő fordulatszáma ($n = 833,333 \frac{1}{s}$ mellett) $50 \frac{1}{s}$, azaz az áttétel $\frac{3}{50}$. Ezzel akár egy hálózati generátor meghajtása is kivitelezhető volna, de a Tanszék a próbapad megépítésekor egy vízörvényfék beépítése mellett döntött, mint terhelést létrehozó elem [4].

Tüzelőanyag-rendszer és a gázturbina szabályzó egysége

A tüzelőanyag a tüzelőanyag szivattyú segítségével a tartályból egy szűrőn és a tüzelőanyag-kenőolaj hőcserélőjén át az égéstérbe kerül beporlasztásra. A szabályzóegység a tüzelőanyag-szivattyúval van együtt. Feladata, hogy az egység oldalán található gázkar által beállított fordulatszámnak megfelelő mennyiségű tüzelőanyagot juttasson a gázturbinába. Továbbá megakadályozza a hajtómű túlpörgését, illetve a túl magas turbina utáni torlóponthi hőmérsékletet a gázturbina leállításával [4].

Vízörvényfék

A vízörvényfék sem volt eredetileg a gázturbina része, viszont elengedhetetlen a hajtómű különböző terhelések melletti működtetése céljából, valamint a hajtómű által generált teljesítmény elemésztése miatt. A ZÖLLNER típusú vízfék egy kardántengellyel van összekötve az áttételház kimenő tengelyével. A próbapad működtetése során biztosítani kell a vízfék megfelelő mennyiségű vízzel való ellátását, melyet betápláló és leürítő szivattyúk, valamint a csővezetékben elhelyezett csapok segítenek. Indításkor azonban nem lehet víz a vízfékben, mert megakadályozza a gázturbina indítását, illetve a hajtómű fordulatszám emelkedését, azaz melegfennakadáshoz vezethet [4].

Használt szenzorok

Hőmérséklet mérése

A torlóponthi hőmérsékletek mérése NiCr-Ni (K típusú) termoelemekkel történik. Ezekkel a termoelemekkel a gázturbina-körfolyamat jellegzetes pontjaihoz tartozó hőmérsékleteket mérjük, tehát a kompresszor előtti (T_1^*), kompresszor utáni (T_2^*), illetve turbina előtti (T_3^*) és turbina utáni (T_4^*) torlóponthi hőmérsékleteket. Mivel a turbina előtti keresztmetszetben a hőmérséklet-eloszlás nem egyenletes, ezért a T_3^* értéket érdemes számítással meghatározni. A hőelemek méréstartomány -200...1200 °C között található.[8]

Egy további mérési pont a termoelemek hidegponthi kompenzációját hivatott elvégezni, egy negatív hőmérsékleti együtthatóval rendelkező termisztor szolgáltatja a környezeti hőmérséklettel (T_0) arányos jelet [8].

A nyomás mérése

A torlóponthi nyomások mérése a különböző nyomásokkal arányos analóg jelet szolgáltató 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 $p_0^* - p_1^*$ (MPXV5004GP);
- A kompresszor által létrehozott nyomáscsökkenés $p_2^* - p_1^*$ (Honeywell 142PC30D);
- Égéstér nyomásesése $p_2^* - p_3^*$ (Honeywell 142PC05D);
- Gázvezető csatornában létrejövő nyomásesés $p_4^* - p_0^*$ (MPXV5004GP);
- A levegő tömegáramának meghatározása céljából a mérőperemen mért nyomásesés $\Delta p_{\text{mérőperem}}$ (MP3V5004GVP).[8]

A fordulatszám mérése

A fordulatszám mérésére a vízörvényfékre szerelt ABS jeladó és az ehhez tartozó 60 osztású fogas tárcsa szolgál. A tárcsa forgásakor a jeladó előtt elhaladó osztások impulzust gerjesztenek a jeladóban. Ezen impulzusok számából és az eltelt időből meghatározásra kerül a fordulatszám. A mérési tartománya: $0 \sim 1666,66 \frac{1}{s}$ [8].

A terhelő nyomaték mérése

A gázturbina terhelésének a beállítása természetesen a vízörvényfékkel történik. A terhelőnyomaték mérése egy 500 Nm maximális terhelhetőségű KALIBER 7934 típusú nyomatékmérő cellát használunk. Az eszköz az áttételház és a vízfék közötti kardántengelybe van beépítve. A fékezés mértékét a vízféken lévő karral lehet manuálisan beállítani [8].

Tüzelőanyag fogyasztás mérése

A tüzelőanyag fogyasztást egy KALIBER ÜFM-2000 típusú gravimetrikus tüzelőanyag fogyasztásmérővel végezzük. A mérőberendezés a súlymérés elvén alapszik. A mérés megkezdésekor a számítógép a fogyasztásmérő töltő szelepét elzárja, majd 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: $0 \sim 200 \frac{l}{h}$, pontossága 0,5% [4].

A fékpad fejlesztése

Mivel a tárgyalt mérőrendszer már a megépítésekor elavultnak számított, továbbá a mérési eredményeket sem lehetett eltárolni, illetve a Tanszék laborjának átalakítása miatt csökkent a rendelkezésre álló hely, ezért vált szükségessé a próbapad fejlesztése. A munka elkezdése óta az eredeti rendszer, jelentős átalakításokon esett át. A rendszert hordozható számítógép segítségével lehet működtetni, ami nagymértékű helymegtakarítást jelent. A mérés során továbbra is a már meglévő érzékelőket és szenzorokat használjuk, mivel számunkra továbbra is megfelelő pontossággal rendelkeznek és az új részekkel nincsenek kompatibilitási problémái. Maga a gázturbinás próbapad lényegében változatlan marad, azonban néhány átalakítást, mint pl. a gázvezető cső eredeti 45°-os megdőntése 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.[8]

A mérőberendezés

Az érzékelőkből érkező jelek egy NI USB 6218 típusú adatgyűjtőbe futnak, ami USB kábellel van a számítógéphez csatlakoztatva. Az adatgyűjtőn keresztül végezzük a próbapad vezérlését is. 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) [8].

Lábszám	Gyári megnevezés	Jel használat
1	PFI0 / P0.0	Gázkar alapjárat
2	PFI1 / P0.1	Fordulatszám
3	PFI2 / P0.2	Gázkar min. végállás
4	PFI3 / P0.3	Gázkar max. végállás
6	PFI4 / P1.0	Gázkar fel
7	PFI5 / P1.1	Gázkar le
8	PFI6 / P1.2	Kifogyasztó tartály szelep
9	PFI7 / P1.3	Indítómotor
12	AO0	Gázkar le (analóg)
13	AO1	Gázkar fel (analóg)
24	AI4	T_1^*
25	AI12	T_2^*
26	AI5	T_3^*
27	AI13	T_4^*

Lábszám	Gyári megnevezés	Jel használat
33	PFI8 / P0.4	Gázkar alapjárat
40	PFI14 / P1.6	Nagynyomású elzáró szelep
41	PFI15 / P1.7	Kisnyomású elzáró szelep
47	AI16	Gázkaz pozíció (analóg)
49	AI17	p_0
50	AI25	Δp_2
51	AI18	Δp_3
52	AI26	Δp_{mp}
53	AI19	Δp_1
54	AI27	Δp_4
56	AI20	T_0
63	AI23	Kifogyasztó tartály erőmérő cella
64	AI31	Terhelőnyomaték

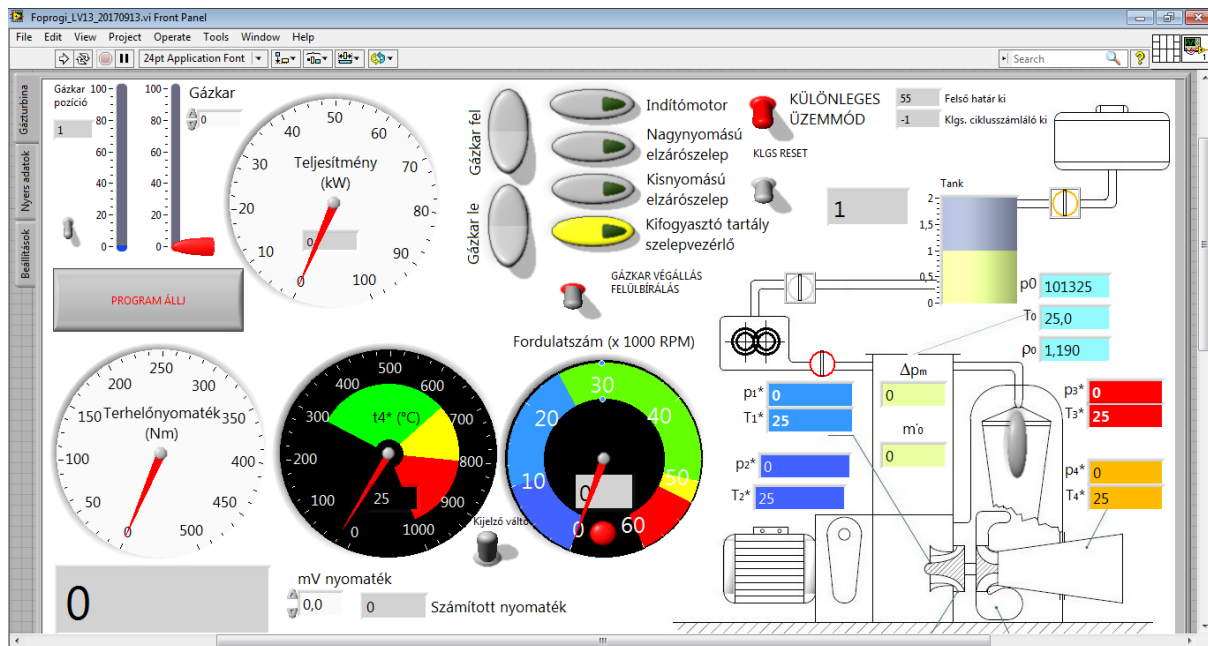
1.táblázat Az NI USB-6218 által kezelt jelek

A vezérő szoftver

A hordozható számítógépre telepített program a szintén a National Instruments által kifejlesztett rendszertervező program, a LabVIEW (Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench). Ez egy olyan grafikus programozási nyelv, melyet kifejezetten mérőberendezések illetve ezek jelfeldolgozási műveleteinek vizsgálatára hoztak létre. A fejlesztők nagymértékben segítik a programozásban kevésbé jártas felhasználókat, mivel a gyártó rengeteg mintaprogrammal, előre elkészített programrészekkel és ezeket részletes leírással látta el [2].

A LabVIEW program, melyet virtuális műszernek (VI, Virtual Instrument) is hívnak, két alapvető részből tevődik össze. Az egyik a felhasználóval kapcsolatot tartó Front Panel, a másik pedig a program vezérlését végző Block Diagram, ami nem begépelte programsorokból áll, hanem egyes (leginkább műveletek elvégzéséért felelős) csomópontok közötti vezetékkezelésből áll. A Front Panel vezérlő elemei, kijelzői szintén csomópontokként jelennek meg a működési vázlaton, melyek ki- illetve bemeneti változóként viselkednek [8].

A következő ábrán az adatgyűjtő szoftver kezelőfelülete látható.



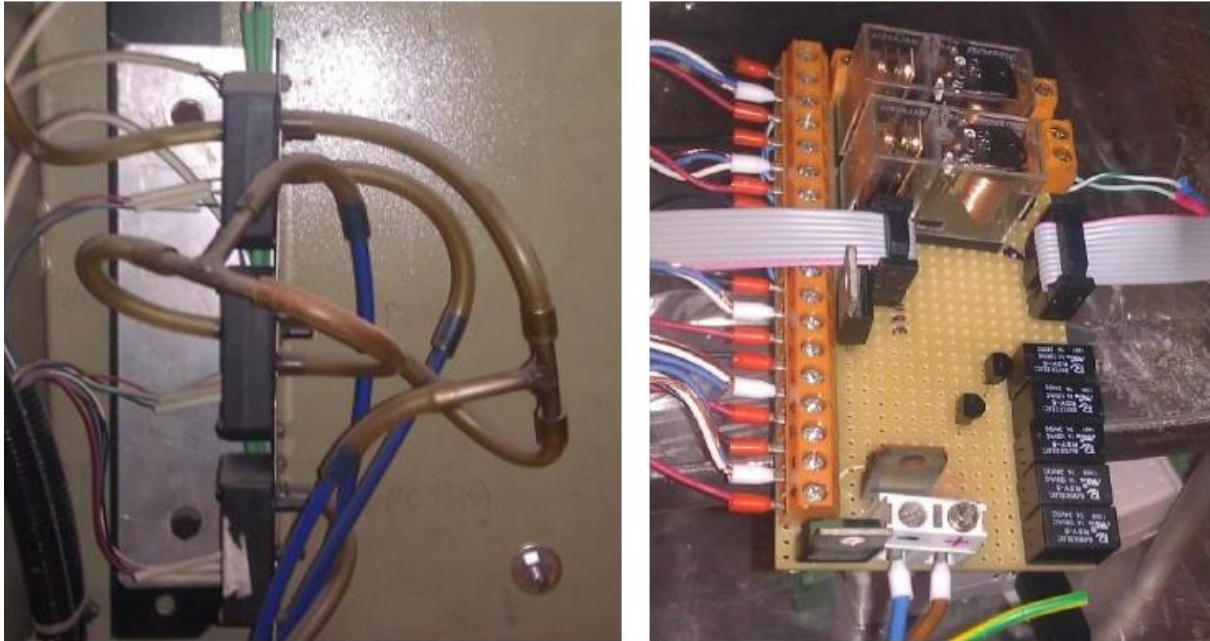
4. ábra Szoftver fő kezelőfelület

Mivel az összes vezérlőelem és kijelző egyszerre történő megjelenítése a kezelő számítógép monitorjának korlátai miatt nem lehetséges, így ezeket két további lapra elosztva látható. A három fül a bal felső saroknál található, „Gázturbina”, „Nyers adatok” és „Beállítások” feliratokkal. Utóbbi kettő kiegészítő szerepet tölt be, a 4. ábrán az első fülre történő kattintással elérhető nézetet figyelhetjük meg. Ezen látható jobb oldalt a mérőpad sematikus rajza, melyen a jellegzetes keresztmetszetekben található mérőpontokon a torlóponti nyomások és hőmérsékletek figyelhetők meg. Az ábrán továbbá fel van tüntetve a tüzelőanyag ellátási rendszer is, ami tartalmazza a kifogyasztó tartály szintkijelzését, valamint mutatja a gázturbina által beszívott levegő tömegáramát. A lap bal oldalán látható a gázturbina pozíció és a terhelő nyomaték kijelző. A bal felső sarokban láthatóak a gázturbina pozíció csúszkák, melyekből a bal oldali a gázturbina jelen idejű pozícióját mutatja, a jobboldali pedig a gázturbina pozíció beállító csúszka, amin százalékosan adjuk meg a gázturbina pozícióját. Ezek mellett láthatóak még az eredeti konfigurációból kiegészítő, másodlagos jelleggel meghagyott gázturbina vezérlő gombok. Alattuk helyezkednek el a teljesítmény és turbina utáni hőmérséklet kijelzésére szolgáló szimbolikus műszerek. A képernyő közepén találhatóak a tüzelőanyag ellátáshoz szükséges szelepek vezérlő gombjai és az indítómotor vezérlőkapcsolója, valamint alattuk a fordulatszámot mutató műszer. 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 [8].

Nyomásmérés

Mivel az eredeti rendszer szenzorait használjuk, melyek 12V-os tápfeszültséget igényelnek, amit egy összesített áramkörön keresztül kapnak meg. Ez az áramkör a szenzorok tápfeszültség

elosztásán kívül tartalmazza azokat a reléket, melyek az adatgyűjtő egység TTL jelei alapján vezérlik a gázturbina 24V-os rendszerének komponenseit (mágnesszelepek és indító relé). Az áramkör az 5. ábrán látható, megkülönböztethetőek 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. [2]



5. ábra Nyomásmérő szenzorok (balra) analóg és digitális feladatok áramköre (jobbra)

A nyomásmérő eszközök kalibrálását egy U-csöves manométerrel végeztük, valamint a tanszéki laborban található különböző nyomást előállító készülékek felhasználásával. Az eljárás a különböző típusú nyomásszenzorokra végeztük el, melyek 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 jelleggörbéjük lineárisnak tekinthető szakaszán szokták alkalmazni, és erre a szakaszra teszik a szenzor méréstartományát. Ezért a nyomás-feszültség átalakítás egy egyszerű képlettel megadható a program számára [2].

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

ahol:

p_{ki} : a mért nyomás értéke

U_{be} : a beolvasott feszültség

ofs : nullponti eltolás

fac : szorzótényező

Mivel a mérőperemhez felhasznált szenzor (MP3V5004GVP) csak 3 V tápfeszültséget igényel, amely előállításához egy illesztő áramkört készítettünk. Továbbá mindegyik szenzor sorkapoccsal rendelkezik, amivel a mérő-adatgyűjtő rendszerhez kapcsolódik [8].

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 [8].

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

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

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, 22500mm (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) új változója az R (specifikus gázállandó), ami levegőre nézve $R = 287 \text{ J/(kgK)}$ [8]

Hőmérsékletmérés

A hőmérsékletek kalibrálása hasonlóan történt, mint a nyomásmérés esetén. Jelen esetben is megtartottuk a szenzorokat a régi rendszerből és újrakalibráltuk őket. Azonban itt egy jelentős különbség van az eredeti rendszerhez képest, mely a környezeti hőmérséklet mérésének módjával függ össze. Az eredeti kialakításban egy ötödik hőelemet is alkalmazásra került a kezelőpulton belül a környezeti hőmérsékletnek tekinthető hőmérséklet mérésére. Azonban azt meg kell jegyezni, hogy a hőelemek elsősorban hideg- és melegponti 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. Ehhez az eredeti konfigurációban egy PCLD-8710 típusú csatlakozó blokkot alkalmaztak, amely elvégezte a hidegponti kompenzációt (Cold Junction Compensation, CJC). Látható, hogy ez eléggé bonyolult és helyigényes megoldás mivel közvetlenül a hidegpont mellett van egy további hőelem, amely mindig 0mV kimenetet ad, mert jó közelítéssel termikus szempontból együtt fut a közelében lévő elektronikus berendezésekkel. Ezért, és a PCLD-8710 eltávolítása a rendszerből vezetett arra a végeredményre, hogy ezt egy 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 pont, kompresszor előtti-utáni, illetve turbina előtti-utáni pontok mérését a már meglévő szenzorok felhasználásával oldottuk meg [8].

Az alábbi táblázatban feltüntetjük a leggyakrabban alkalmazott hőelem típusok legfontosabb jellemzőit, ahol a * a konstantán anyagot jelöli, mely egyfajta réz-nikkel ötvözet [9]. A repülésben, ezen belül gázturbinás hajtóműveknél leggyakrabban a K típusú hőelemet alkalmazzák, mert méréstartományja kellően széles, Seebeck-együtthatója kellően nagy (nagy jelet ad adott hőmérséklet-különbség esetén), és viszonylag olcsó, ezért a pontosabb mérések kivitelezéséhez, például nagy gázturbinás hajtóműveknél általában nagyobb számban alkalmazzák. A termoelemekből érkező feszültségek egy MCP6G04 típusú erősítőn keresztül jutnak el az adatgyűjtő egységbe. Ez az integrált áramkör egy ún. választható erősítésű eszköz, tehát nem a kezelő által hozzáadott ellenállásosztó határozza meg az erősítés mértékét, hanem egy választó bemenetre adott feszültséggel lehet dönteni erről a paramétréről: 1-szeres, 10-szeres és 50-szeres erősítések közül lehet választani. 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, amely még mindig nem nagy, ezért az 50-szeres beállítást használjuk. Mivel az erősítő közel sem ideális, figyelembe kell venni az ún. bemeneti nyugalmi áramot (input bias current). Ez a kiválasztott erősítő esetében 1 pA , mely nem lehet tetszőlegesen „nagy” érték ($1\text{--}100 \text{ nA}$ nagyságrendű), mert ebben az esetben a véges bemeneti ellenállású analóg-digitális (A/D) átalakítón már jelentős mértékű feszültségesés keletkezne, vagyis a mért elektromotoros erő kisebb lenne, mint a hőelem által – a hőmérsékletkülönbség hatására – előállított érték, ezáltal jelentős hibát vinnénk be a rendszerbe [8].

<i>Típus</i>	<i>Vezetékek anyagai</i>	<i>Alkalmazási tartomány</i>	<i>Termofeszültség $\Delta t = 100^\circ\text{C}$-ra (mV)</i>
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 kalibrálásához során egy MY-64 típusú multimétert használtunk, 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 offset értékét [8].

Terhelőnyomaték mérése

Mivel az általunk alkalmazott Kaliber 7934 típusú nyomaték-mérő cella cellatényezője ismert (2 mV/V) az adatlap alapján [10], amit $5,85 \text{ V}$ -os tápfeszültség mellett használunk. Kalibrálás során, működő gázturbina mellett különböző fordulatszámokon és a tengelyhez felszerelt

vízörvényfék 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 [8].

Tüzelőanyagfogyasztás mérés

A tüzelőanyag fogyasztás mérése szintén a már meglévő rendszer alapján működik. A programban a mérés menete szintén hasonló a nyomásméréshez. A különbségek csak a kalibrálás során jelentkeztek. Jelen esetben a mérőedényben lévő tüzelőanyag tömege, valamint az erőmérő cellára ható erő segítségével határoztuk meg a szükséges értékeket. A mérés közbeni működése viszont különbözik 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, és az eltelt idő alatt meg lehet állapítani a tüzelőanyag fogyasztás mértékét [8].

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 visszaszámolni [8].

A próbapad átalakítása

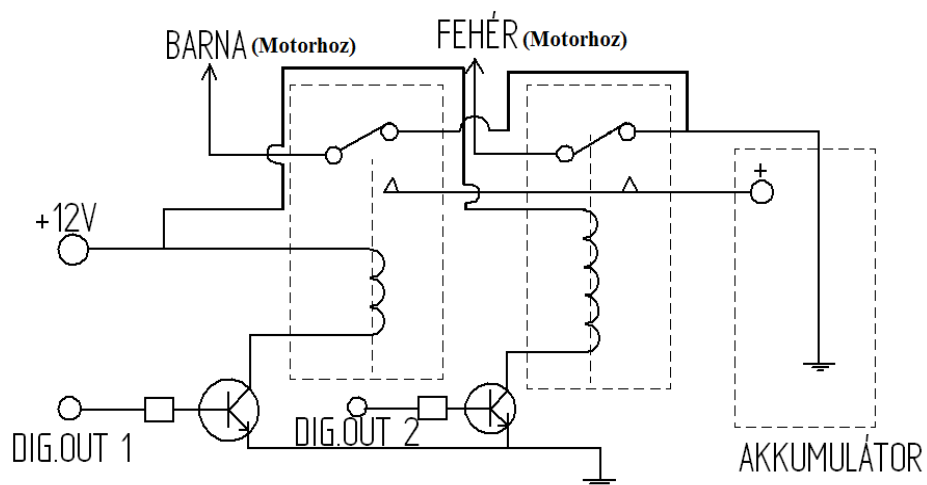
A próbapadon fizikailag csak minimális átalakítás lett levégezve. Ez a gázelvező cső függőleges kivezetésében jelenik meg, mint újdonság, a régi hangtompítót egyelőre még nem alkalmazzuk. Ezen felül a fékgépen egy tartókonzol került felszerelésre, ahol a vezérlő számítógép helyezhető el, továbbá azok az elektronikus áramkörök (beleértve az NI USB-6218-at is), melyek a mérés lebonyolításához elengedhetetlenek, a szívócsatornán elhelyezett dobozban, valamint az alatta elkészített kis polcon helyezkednek el, így minimalizálva a berendezés helyszükségletét. A jelenlegi konfigurációt az 6. ábra mutatja [8].



6. ábra A próbapad jelenlegi kialakításban

Gázkar vezérlés

A gázkart az eredeti kialakításon nyomógombok segítségével lehetett vezérelni. Sajnos a szöghelyzet jeladó nem került felszerelésére, így nem lehetett automatikus szabályozást megvalósítani a próbapadon. Most ez a vezérlési lehetőség csak másodlagos megoldásként van jelen, amire a kezelőponton kialakított kapcsolóval lehet átváltani. Mivel ez a megoldás is teljesen szoftveresen lett megoldva, így érdemes pár szót ejteni róla. Alapvetően a szoftver digitális jeleket küld, a mérő-adatgyűjtő rendszernek majd ez küldi ki a vezérlőjelet a megfelelő részegységnek. Itt két relét irányítunk, ezzel befolyásolva az áram irányát. [2]

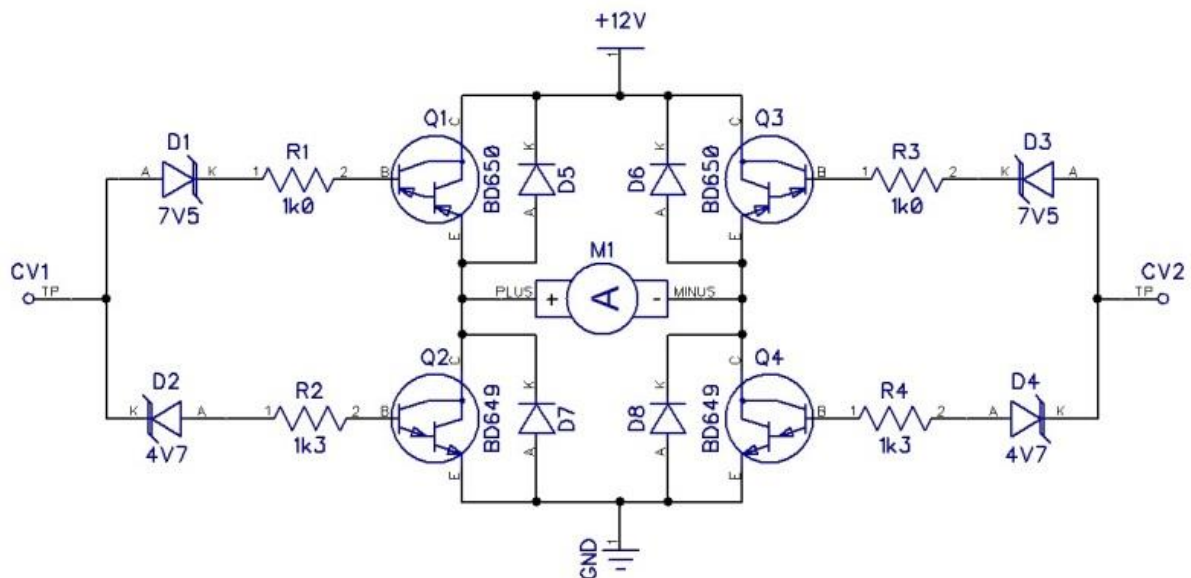


7. ábra Gázkar motor eredeti vezérlés [2]

Az ábra alapján a következőképpen működik a rendszer: Ha a DIG. OUT 1 vezérlőfelültséget kap, ami a hozzá tartozó tranzisztor bázis ága, akkor működésbe hozza a "barna" vezetékhez

tartozó relét, és így az áram a motor felől a fehérrel jelzett vezetéken keresztül zárja az áramkört. Ha a DIG. OUT 2 magas, akkor a hozzá tartozó tranzisztor nyit ki, ami a másik relét működteti, és így lesz ellentétes az áram iránya. Amennyiben azonos a relék állapota (nincs vezérlés, vagy hiba miatt mindkettőt vezéreljük), akkor a biztonság miatt a motor kapcsai azonos potenciálra (föld vagy táp, az előzővel megegyező sorrendben) kerülnek, így a motor nem fogja a gázkart elmozdítani. Tehát ha a DIG.OUT 1 vonalon adunk vezérlést, a tüzelőanyag betáplálást növelni, míg a DIG.OUT 2 jellel pedig csökkenteni tudjuk. A gázkarhoz kapcsolódik még: két végállás, és az alapjáratot jelző kapcsoló is. Ezek digitális jelet küldenek az adat-gyűjtőn keresztül a programnak, ami jelzőlámpákkal figyelmeztet az alapjárat, valamint a minimális fordulatszám elérésére. Amint lecsökkentettük a minimális értékre a fordulatszámot, a rendszer már nem engedi tovább csökkenteni azt [2].

Mint látható, régebben a motor működtetéséhez külön áramforrásra is szükség volt, mert így különösebb átalakítás nélkül, gyorsan lehetett a rendszerbe integrálni a gázkar mozgását. Továbbá a próbapad rendszerében sehol sem kellett felhasználni 12V egyenfeszültségű és 2A áramerősségű áramot. Így, első lépésként egy 12V-os és 24W-os hálózati adapter került beszerelésre. Az eredeti kialakításon csak 3 állás kapcsolható (fel-le, nincs mozgás) így első lépésben egy potenciométer került beszerelésre, amit egy tolórúd köt össze a motorral. a potenciométer a mérő-adatgyűjtő egység 47. lábához van csatlakoztatva. Maga a vezérlés PID szabályozást valósít meg. Ha a kezelő mozgatja a csúszkát a szoftver kezelőfelületén és beállítja a kívánt gázkarpozíciót, akkor a program nemcsak a helyes irányban mozditja a motort, de a mozgás sebességét is befolyásolja. Ennek kivitelezésére egy H-híd került megtervezésre.

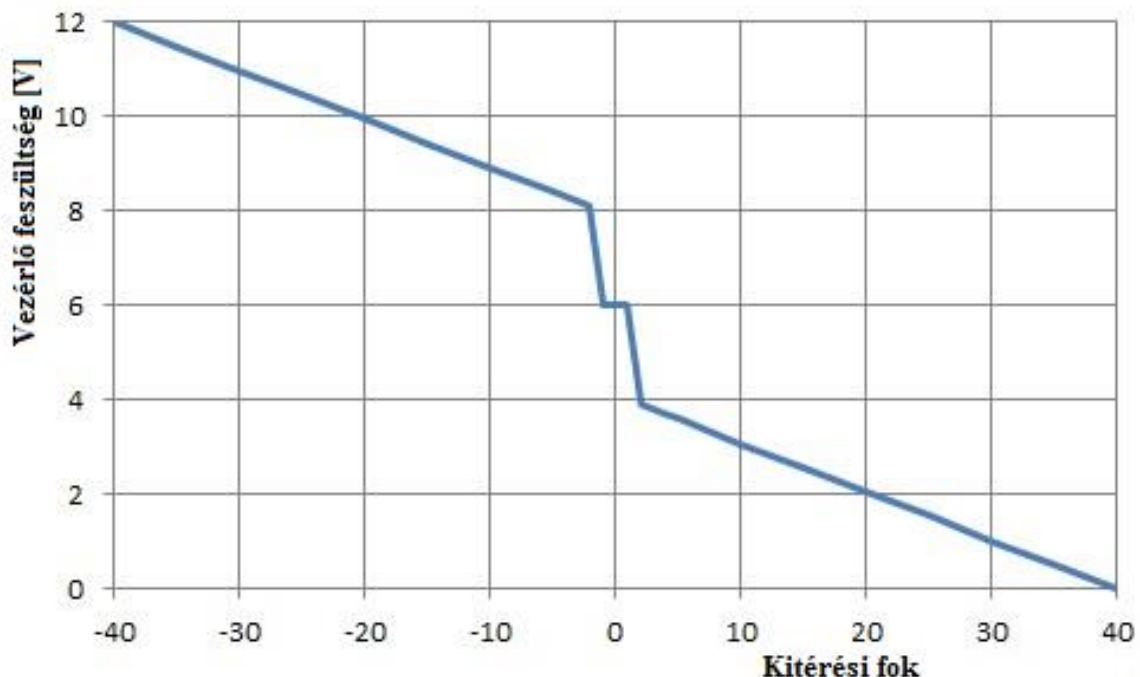


8. ábra A H-híd kapcsolási rajza

Az elektromos motor, amely a gázkart mozgatja körülbelül 2A áramerősséggel 12V egyenfeszültségről működik, ennek megfelelően BD649 (NPN szennyezésű) és BD650 (PNP szennyezésű) darlington tranzisztorokból építettük fel a H-hídat. Ezek maximum 8A áramerősséget és 100V kollektor-emitter feszültséget képesek kezelni. Mivel az adatgyűjtő csak 2 analóg kimenettel rendelkezik, ezért kerültek beszerelésre Zener-diódák oldalanként ellentétes irányban, hogy az azonos oldalon lévő tranzisztorokat egyszerre lehessen vezérelni. Mivel nem fog mindig mozogni a motor, szükség van semleges zónára a vezérlő feszültségben, ez a zóna értelemszerűen a teljes feszültség tartomány felénél lett meghatározva, ezt biztosítja a

D1 és D4 dióda, ez durván $\pm 2V$ mozgási teret enged meg, ahol a motor nem mozog. Ha a vezérlőfeszültség lecsökken, a PNP tranzisztor nyit, az ellentétes esetben a NPN. Fontos megjegyezni, hogy a tranzisztorok viselkedése miatt, ha csak kevéssé térünk el a közepes feszültségszinttől, akkor egy csökkentett áramerősség fog áthaladni a motoron, ami alacsonyabb sebességű mozgatót eredményez. Ha gyorsabb mozgató szükséges, akkor a tranzisztorok jobban kinyitnak. Ennek eredményeként a rendszer képes a teljes működési tartományát 3 másodperc alatt végigjárni. Ennek előnye, hogy esetlegesen kialakult megnövekedett teljesítményigényt is ki tudja szolgálni egy gyors fordulatszám emeléssel.

Ha a CV1 és a CV2 azonos 6V feszültségen vannak, akkor egyik tranzisztor sincs nyitva, így a gázkar-mozgató motoron egyik irányban sem folyik áram. Normál üzemben a CV1 és a CV2 együtt vezéreltek, viszont egymás komplementereként viselkednek. Tehát ha gázkart fel akarjuk mozgatni, akkor a Q1 és Q4 tranzisztorok működnek, míg a másik irányban a Q3 és Q4. A szabályozó szoftver tervezésekor figyelembe vettük, hogy már a szabályozó hardver hatással van a motor sebességére, és a visszacsatolás miatt figyeljük a gázkar pozícióját ezért ez már önmagában megvalósított egy integráló szabályozást. Ezért már csak egy egyszerű arányos szabályozást kellett kialakítani a programon belül. Az előzetes mérések során azt tapasztaltuk, hogy a motor fordulatszáma 3V tápfeszültség alatt elhanyagolható. Így tényleges működési tartománynak a 3-10V feszültségtartomány lett választva, a tranzisztorok durván 1V körüli szaturációs feszültségét is beleértve. A meglehetősen kicsi, 1%-os statikus hibát figyeltünk meg működési tartományra érve. Ezen kívül, a motor vezérlőfeszültsége arányosan növekszik a hibával. Működés közben a tranzisztorokon eldisszipált teljesítmények hő formájában jelennek meg. Ez a többlet hőmérséklet rontja a szabályozó hatékonyságát. Ezért ezt az egységet aktív léghűtéssel kellett ellátni a stabil működés érdekében.



9. ábra A vezérlőrendszer átviteli függvénye

Egy mérés vázlata

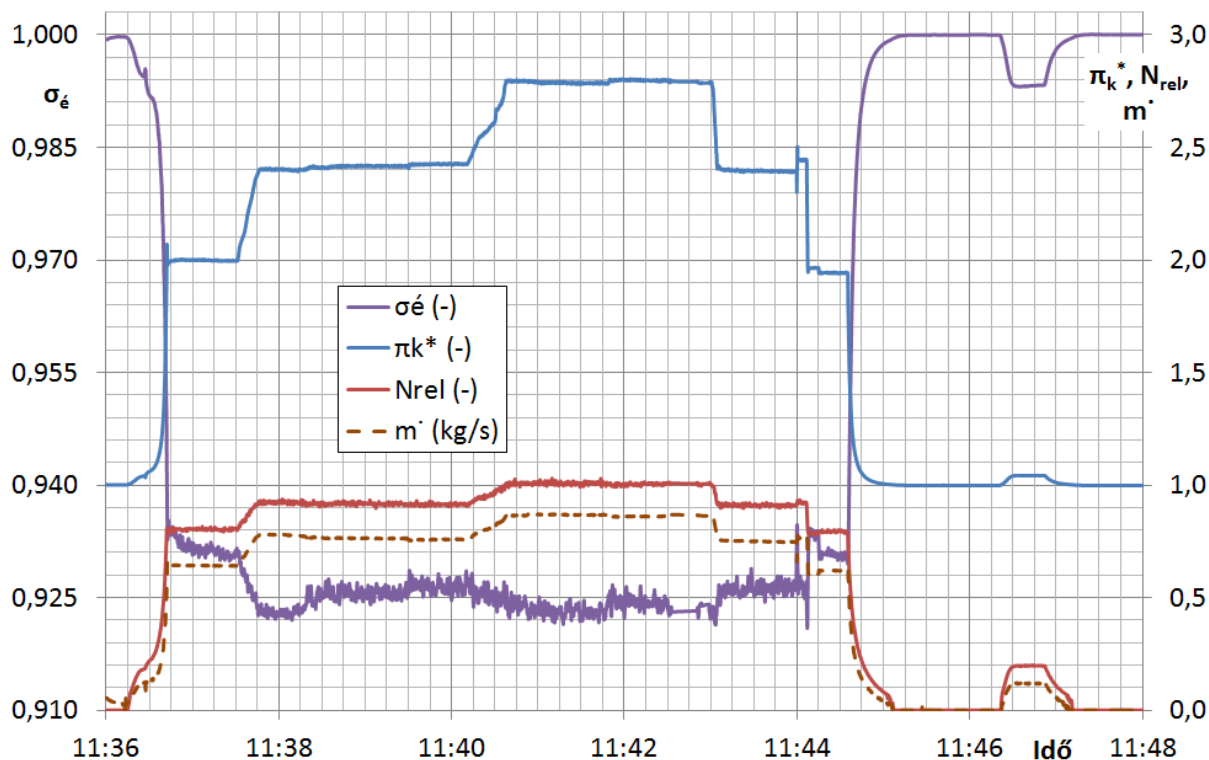
A mérés során célunk meghatározni a gázturbina jellegzetes pontjaiban a nyomás, hőmérséklet adatokat, valamint a gázturbina által leadott a tengelyteljesítményt a mérés ideje alatt, tizedmásodperces felbontással, majd az adatok ismeretében grafikusán ábrázolni az eredményeket. A mérés elvégzése előtt a gázturbinát elő kell készíteni a vizsgálat elvégzéséhez. Először a tüzelőanyag tartályt kell feltölteni a gázturbina specifikációinak megfelelő tüzelőanyaggal, esetünkben gázolajjal. Majd meg kell bizonyosodni róla, hogy a vízörvényfék tartályában van-e víz, mivel a hiány pótlása egy meglehetősen hosszadalmas folyamat és víz nélkül nem működik a vízörvényfék. Ezután csatlakoztatni lehet a számítógépet a mérőadatgyűjtő rendszerhez, végül a próbapadot csatlakoztatjuk az elektromos hálózatra. A mérés folyamata a gázturbina indításával kezdődik. Az indítási procedúra során, az elektromos indítómotor $9500 \frac{1}{min}$ fordulatszám értékre pörgeti a gázturbina forgórészét. Itt a program automatikusan kinyitja a nagynyomású elzárószelepet, amellyel megkezdődik a tüzelőanyag égéstérbe való porlasztása, majd gyújtógyertya segítségével meggyullad, és kialakul az égési folyamat. Amint a fordulatszám eléri a $20\,000 \frac{1}{min}$ alapjáratit értéket kikapcsolható az elektromos indítómotor, innen már csak a turbina többletteljesítmény áll rendelkezésre, melynek hatására a $40\,000 \frac{1}{min}$ alapjáratit fordulatszámra emelkedik, 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 emeljük a fordulatszámot egészen $50\,000 \frac{1}{min}$ -ig. Itt szintén a vízörvényfékkel, terheljük a gázturbinát. A fékezés megszüntetése után újra felvesszük az alapjáratit 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 hűtésére [8].

Mérési eredmény bemutatása

A LabView által rögzített adatok tizedmásodpercenként egy szöveges txt fájlban kerülnek eltárolásra, 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 következő ábrákon mutatunk be. [8]

Főbb nyomások

A 10. ábrán látszik, hogyan változtak a jellemző nyomások illetve az azokból származtatott mennyiségek a mérés 12 perce alatt. Nyomon követhető az égéstér össznyomás-visszanyerési tényezője (σ_e), a kompresszor nyomásviszonya (π_k), valamint a gázturbinába belépő tömegáram (\dot{m}) alakulását, referenciaként a gázturbina relatív fordulatszáma (N_{rel}) is látható. Ez utóbbi a valós fordulatszám és a névleges $50\,000 \text{ 1/min}$ hányadosa, amely a skálák összehangolása miatt került ilyen formában ábrázolásra. Az időskála kis léptéke 15 másodperc , a gázturbina próbaüzem során tehát közel nyolc percet töltött üzemi viszonyok között [8].



10. ábra Mért nyomásviszony és nyomásvesztés

Az indítási folyamatba megfigyelhető, hogy az indítómotor hatására közelítően tíz másodperc alatt éri el a 9000 1/min értéket a fordulatszám, ahol megkezdődik a tüzelőanyag-betáplálás. Megfigyelhető, hogy egy szintén nagyjából tíz másodperces szakasz következik, melyben a fordulatszám emelkedése bár picivel gyorsabb, mint azt megelőzően, de még nem számottevő. Ez a szakasz az égés stabilizálódását jelenti, melyet a 11. ábrán tovább részletezünk. Nem sokkal 11:36:30 után a gyorsítás mértéke nagyban megugrik, és ismét durván 10 másodperc elteltével a forgórész már a névleges 80%-át jelentő alapjárat fordulatszámon jár. Mindeközben az is látható, hogy milyen sebesen változik az égéstér össznyomás-visszanyerési tényezője, valamint, hogy ez nem áll be egy értékre, hanem állandó fordulatszám mellett lassan tovább csökken. Mivel ez a tendencia egy értékhez konvergáló jelleget mutat, ez vélhetően az indítási folyamat csillapodása, melynek során a gázturbina szerkezeti elemei felmelegednek, és végül elérik az üzemi hőmérsékletet. Az égéstér nyomásvesztése ugyanis közel sem elhanyagolható mértékben függ a hőmérséklettől. Amennyiben tovább tartott volna ezt az üzemi állapotot, valószínűleg a σ_e rövidesen 0,927 körüli értéken stabilizálódott volna. Az alapjáraton történő stabilizálódást követően 11:37:30 körül emeltük a fordulatszámot 45 000 1/min, azaz 90%-os értékre. Az előzőleg 2,0 körüli kompresszor nyomásviszony 2,4-re nőtt, az égéstér össznyomás-visszanyerési tényezője pedig 0,925-ös érték körül változott. Ennek oka az égéstér össznyomás-visszanyerési tényező $(p_3^*)/(p_2^*)$ és a p_3^* függése a turbina előtti hőmérséklettől. A 10. ábrán nem látható a terhelés alakulása, de összehasonlítva a 11. ábra görbéivel megfigyelhető, hogy minden egyes σ_e változás egybefügg a gázturbina terhelési állapotának változásával. Mivel a terhelés növekedésének hatására emelkedik a hőmérséklet is, ez pedig rontja a hatásfokot. A kompresszor nyomásviszonya azonban jól kivehető, hogy hogyan változott különböző fordulatszámok esetén. Látható, hogy a π_k^* maximális értéke 50000 1/min-nél közelítette meg a gyártó által meghatározott 2,8-as névleges értéket, de nem érte el teljességgel azt, mivel a mért környezeti hőmérséklet ($t_0 = 24,5 \text{ }^\circ\text{C}$) eltért a Nemzetközi

Egyezményes Légekörben (NEL) foglaltaktól. Mivel részletes kompresszor karakterisztika sajnos még nem áll rendelkezésre, így csak becsülni lehet az eltérést az átszámított fordulatszám alapján:

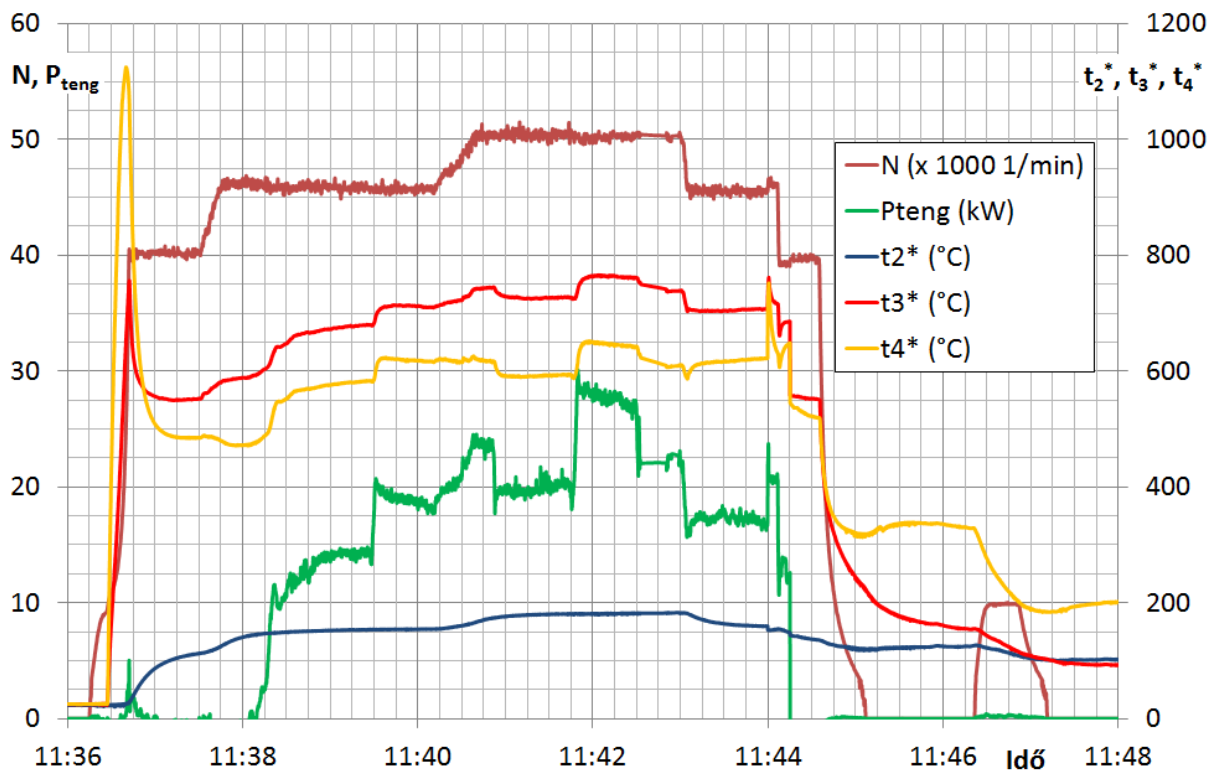
$$n_a = n \cdot \sqrt{\frac{288}{T_0^*}} = 50000 \frac{1}{min} \cdot \sqrt{\frac{288}{297,5}} = 49195 \frac{1}{min} \rightarrow n_{rel} = 98,4\% \quad (5)$$

Az eltérés tehát közel 1,5%, ennyi eltérés nagyjából 2,77 körüli nyomásviszonyt eredményezne, ezt az elvégzett mérés is alátámasztja [8].

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 értük el a gyártó által megadott értéket, attól közel 3%-kal kisebb, $0,87 \frac{kg}{s}$ értéket regisztráltunk. Ezt a csökkenést ismét a NEL-től való eltérés okozza. 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 működtetünk [8].

Hőmérséklet és teljesítmény

A következő ábra a hőmérsékletek és a hasznos teljesítmény alakulását mutatja be a mérés során, ismét feltüntetve a fordulatszámot, mint viszonyítási alapot. A görbék a 11. ábrán tehát rendre a fordulatszám (N), a gázturbina által leadott hasznos teljesítmény (P_{teng}), a turbina előtti torlóponthi hőmérséklet (t_3^*), a turbina utáni torlóponthi hőmérséklet (t_4^*), valamint a kompresszor utáni torlóponthi 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 már zajlik az égés, azonban a gázturbinába belépő levegő tömegárama még elég kicsi. 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 normál üzemi tartományba. Nagyon fontos megemlíteni, hogy helyenként, de mindig tranziens folyamatok során a turbina utáni hőmérséklet túlnő a turbina előtti értéken, ami átlagos értékeket feltételezve fizikailag lehetetlen volna. Itt azonban arról van szó, hogy mindkét hőmérséklet csupán egy-egy pontban lett mintavételezve, így az adott keresztmetszetben uralkodó hőmérsékletmező inhomogenitásai nagymértékben befolyásolják a mért értékeket. Az állhat tehát a jelenség háttérben, 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 vélhetően lassabb reagálása és a saját átlagértékéhez jobban közelítő turbina előtti hőmérséklet fölé is kerülhet [8].



11. ábra Mért hőmérsékletek és a gázturbina hasznos teljesítménye

Ez a jelenség, figyelembe véve, hogy a szenzor állandósult állapotban helyes értékeket közvetít, csupán az átmeneti állapotokban előforduló rendellenességeknek, de nem a szenzor teljes működésképtelenségének a jele. Így tehát ezt az anomáliát minden bizonnyal 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 50Nm-re emelkedett, ez nagyjából 15kW 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-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 [8].

Összefoglalás

Elért eredmények

Az a leírtakból egyértelműen kiviláglik, hogy a kiindulási állapothoz képest nagy előrelépést sikerült tenni. 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. gázvezető cső). Továbbá kidolgozásra került az új gázkar-vezérlés mellyel pontosabban beállítható egy általunk kívánt fordulatszám, valamint már teljes egészében saját áramforrásról működik a mérőpad. Azonban az idő rövidege, valamint a munka során felmerült váratlan események hatására már nem maradt idő a tanszéki laboratórium korlátozott hozzáférhetősége miatt élesben is tesztelni a gázkar-vezérlő rendszert. Meghiúsult továbbá a vezérlőszoftverbe épített szűrő megtervezése, valamint a mért adatok kezelésének átdolgozása. Nagy sikerként értékelhető, hogy már nem kell semelyik részegységnek sem külön áramellátás, immár mindet a közös transzformátorból alakítunk át az általunk kívánt árammá. Sikerült azonban további apró előrelépéseket tenni a mérőadat-gyűjtő rendszerben, melynek megnöveltük a mintavételi sebességét. Ez majd a további fejlesztésekre lesz jó hatással. Fejlődött a grafikus felület is, természetesen az új gázkar-vezérlésnek köszönhetően.

Továbbfejlesztési lehetőségek

Az elért eredmények ellenére a próbapadot számos vonatkozásban tovább lehet még fejleszteni. Természetesen egy hatékony adatszűrő hozzáadása a rendszerhez, hogy a mérési eredményekben is látható nagymértékű bizonytalanságokat kiszűrjük, ezzel egy pontosabban nyomonkövethetővé téve grafikus ábrázolás során. Továbbá a mérési adatfájlba történő rögzítés módosítását is kilátásba helyeznénk, melyben nem nyers adatokat, hanem már kész jellemzőket (π_k^* , σ_ϵ , P_{teng} , stb.) lehetne elmenteni, ezáltal lecsökkentve az üzemelés utáni kiértékelés idejét. Ezen felül az érzékelők területén is lenne bővítésre lehetőség. Rengeteg olyan paraméter van (pl. olajnyomás és –hőmérséklet, vibráció), melyeket jelenleg nem mérünk semmilyen módon. Az NI USB-6218 eszközön még sok mérésre alkalmas analóg bemeneti csatorna található, azaz sokáig nem fog korlátozó tényezőt jelenteni. Illetve a meglévő szenzorok bővítése is érdekes lehetőségeket kínál, pl. a fentebb részletezett hőmérsékleti anomáliát a turbina utáni mérési ponton, ahol több szenzor elhelyezése az adott keresztmetszetben minden bizonnyal megoldaná ezt a problémát.[8]

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 nagymértékben emelné a berendezés képességeit. Ezen felül még érdemes volna fontolóra venni egy szűkítő alkalmazását a fűvócsőben, 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 [4], az csak az elméleti vizsgálatot foglalta magában, kivitelezett szabályozó a jelenlegi röpszerűs berendezés helyett még nem készült. Kézenfekvő tehát, hogy a későbbiekben egy FADEC (Full Authority Digital Electronic Control, teljes hatáskörű, digitális elektronikus szabályozás) elven működő rendszer kerüljön kialakításra.[8]

Hivatkozások

[1] Dr. Veress Árpád: Repülőgép hajtóművek elmélete 1. előadás jegyzet 2017

forrás:

http://www.vrht.bme.hu/letoltes/Tanszeki_letoltheto_anyagok/Oktatok_anyagai/Dr.Veress_Arpád_anyagai/Oktatott_targyak/Repulogep_hajtomuvek_elm_I_BSc/Rep-Hajt-Elm-1-BSc_v44.pdf (2017.10.11)

[2] Simon Dávid István: Tanszéki gázturbinás próbapad modernizálása. BSc szakdolgozat, BME VRHT, 2014

[3] Beneda Károly Tamás, Simongáti Győző Veress Árpád: Járművek hő- és áramlástechnikai berendezései I. 2010

forrás: http://www.tankonyvtar.hu/hu/tartalom/tamop412A/0018_Jarmuvek_ho-es_aramlastechnikai_berendezesei_1/Beneda_Simongati_Veress_Jarmuvek_I_1_1.html

(2017.10.11)

[4] Ailer Piroska: Kisteljesítményű gázturbina modellezése és nemlineáris irányítása. PhD disszertáció, BME, 2003.

[5] KLÖCKNER-HUMBOLDT-DEUTZ AG: Technisches Handbuch Betrieb/Wartung Gasturbine T216. Oberursel, 1980.

forrás: <http://documentslide.com/documents/handbuch-t216.html> (2017.10.11)

[6] Christopher OERTEL: Messung einer Drehzahlkennlinie der Kleingasturbine KHD T216. Diplomamunka, Technische Universität Wien, 2015.

forrás: https://publik.tuwien.ac.at/files/PubDat_240372.pdf (2017.10.11)

[7] Energetische Nutzung von RME-basierendem Glycerin in der Kleingasturbine an der Universität Rostock. Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. (FNR), Rostock, 2009.

forrás: <http://www.fnr-server.de/ftp/pdf/berichte/22021708.pdf> (2017.10.11)

[8] Beneda Károly Tamás, Simon Dávid István: Tengelyteljesítményt adó gázturbinás próbapad fejlesztése

forrás: http://www.repulestudomany.hu/folyoirat/2017_2/2017-2-15-0386_Beneda_Karoly-Simon_David.pdf (2017.10.11)

[9] Termoelem-hőmérők (elméleti összefoglaló). BME Energetikai Gépek és Rendszerek Tanszék, 2014.

forrás: ftp://ftp.energia.bme.hu/pub/Aramlas-es_hotechnikai_meresek_BMEGEATAG02/elmelet/3_Termoelem-homerok.pdf (2017.10.13)

[10] KALIBER KFT.: A 7934 típusú forgótengelyes nyomatókmérő adatlapja. Budapest.

forrás: <http://members.chello.hu/kaliberkft/documents/7934.pdf> (2017.10.25)