

# GÁZTURBINA–EGYSÉGEK KARAKTERISZTIKÁJA, A GÁZTURBINA MATEMATIKAI MODELLJE

Ailer Piroska

Ph.D. hallgató

Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem  
Repülőgépek és Hajók Tanszék

*A Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem Repülőgépek és Hajók Tanszékén működik egy gázturbina próbapad, melynek mérőrendszere lehetővé teszi:*

- *a gázturbina-körfolyamat jellegzetes pontjaiban a torlóponti nyomás és hőmérséklet mérését,*
- *a dinamikai paraméterek (fordulatszám, terhelő nyomaték) mérését,*
- *és a fajlagos fogyasztás meghatározását.*

*A mérési eredmények feldolgozása után eredményül a gázturbina-egységek karakterisztikáját kapjuk, melyek segítségével, összeállításával elkészíthető a gázturbina matematikai modellje.*

*A későbbiekben szükséges lesz a modell linearizálására. Ez a linearizált modell lesz a szabályozandó objektum modellje, melyhez a modern szabályozáselmélet (kontrollélmélet) alkalmazásával különböző szabályozók tervezhetők, vizsgálhatók.*

## BEVEZETÉS — A GÁZTURBINA LEÍRÁSA

A vizsgált gázturbina (DEUTZ T216) [1] egy egytengelyes hajtómű, egyfokozatú centrifugális kompresszorral és egyfokozatú centripetális turbinával.

Ez a hajtómű egy speciális konstrukció, amely kifejezetten műszaki egyetemek, főiskolák, ill. kutatólaboratóriumok számára készült. Ennek megfelelően a gázturbina kis teljesítmény/tömeg-arányú, kis helyigényű, rezgésmentes működésű és egyszerűen karbantartható.

Legfontosabb paraméterei ( $p_0 = 101\,325$  Pa,  $T_0 = 288$  K,  $n = 50\,000$  1/perc esetén):

- Teljesítmény:  $P = 80$  kW;
- A levegő tömegárama:  $m_{lev} = 0,9$  kg/sec;
- A kompresszor nyomásviszonya:  $\pi_k^* = 2,8$ ;
- A turbina utáni torlóponti hőmérséklet:  $T_4^* = 938$  K.

## A FÉKPAD ÉS A MÉRŐRENDSZER LEÍRÁSA

Az alkalmazott mérőrendszer lehetővé teszi a fogyasztás, a terhelő nyomaték, a torlóponthi hőmérsékletek és nyomások, valamint a fordulatszám mérését [2]. A kialakítás egy gázturbina-próbaipari mikroszámítógépes vezérlő, adatgyűjtő és adattároló rendszer. A különböző paraméterek mérése a következőképpen történik:

- A torlóponthi hőmérsékletek mérése Ni–CrNi termoelemekkel történik. Mért lehet a gázturbina-körfolyamat jellegzetes pontjaiban a torlóponthi hőmérsékleteket, azaz a környezeti hőmérsékletet ( $T_0$ ), a kompresszor előtti ( $T_1^*$ ) és utáni ( $T_2^*$ ) torlóponthi hőmérsékleteket és a turbina előtti ( $T_3^*$ ), és utáni ( $T_4^*$ ) torlóponthi hőmérsékleteket. Mivel a turbina előtti keresztmetszetben a hőmérséklet-eloszlás nem egyenletes, azaz a turbina előtti keresztmetszetben a termoelem radiális irányú mozgatásával jelentősen eltérő hőmérséklet-értékeket kapunk eredményül, ezért a  $T_3^*$  hőmérsékletet nem vesszük figyelembe az adatok feldolgozása során, hanem számítással határozzuk meg. A hőmérséklet-mérések tartománya: 0–1200 °C. A Ni–CrNi termoelemek kompenzációs vezetékkel vannak a mérőcsatornákra bekötve. A mérőrendszer a mérőpultban elhelyezett panelen méri a környezeti hőmérsékletet, és ehhez viszonyítva számítja a többi mérési pont hőmérsékletét.
- A torlóponthi nyomások mérésére a nyomással arányos jelet szolgáltató nyomásjeladók szolgálnak. A jelek erősítés után kerülnek a számítógépes mérőrendszerbe. A mérési pontosság növelése céljából nem abszolút nyomásokat, hanem két pont közötti nyomáskülönbségeket mérünk a következőképpen:
  - környezeti nyomás (abszolút nyomás):  $p_0$ ;
  - kompresszor előtti nyomásesés:  $p_0 - p_1^*$ ;
  - a kompresszorban bekövetkező nyomásnövekedés:  $p_2^* - p_1^*$ ;
  - az égéstér nyomásesése:  $p_2^* - p_3^*$ ;
  - a gázvezető nyomásellenállása:  $p_4^* - p_0$ ;
  - valamint a gázturbina tömegáramának meghatározása céljából a mérőperemen bekövetkező nyomásesés nagysága:  $\Delta p_{\text{mérő}}$ .
 A nyomásmérések tartománya: 0–3000 Pa, 95–105 kPa, 0–36 kPa, 0–200 kPa.
- A gázturbina különböző terhelésekkel való működtetése, mérése céljából, valamint a gázturbina teljesítményének felhasználása, ill. elemész-

tése céljából egy ZÖLLNER típusú vízörvényféket alkalmazunk. A gázturbina vizsgálata a vízfék által meghatározott teljes tartományban lehetséges. A fellépő terhelő nyomaték mérésére az 500 Nm terhelhetőségű nyomatékmérő cella szolgál, mely a gázturbina és a fékgép közötti kardántengelybe van beépítve. Működés közben az örvényáramú fékgép fékezőerőt fejt ki a hajtómű tengelyére. A tengelyen mérhető csavarási erőt érzékeli a cella. A számítógép a mért erőből és a kalibráló kar hosszából számítja ki a nyomatékot. A fékezés mértékét a fékgépen lévő karral lehet beállítani.

- A fordulatszám mérésére a fékgépre szerelt ABS jeladó és a hozzá tartozó 60 osztású tárcsa szolgál. A tárcsa forgásakor a jeladó minden osztásnál egy-egy impulzust ad. Ezen impulzusok számából és a közben eltelt időből a fordulatszám meghatározható. A fordulatszám-mérés tartománya: 0–100 000 1/min.
- A fogyasztás mérésére az ÜFM-2000 jelű tüzelőanyag-fogyasztásmérőt alkalmazunk. A fogyasztásmérő a súlymérés elvén alapul. A mérés megkezdésekor a számítógép a fogyasztásmérő töltő szelepét elzárja, és leolvassa a mérőedényben lévő tüzelőanyag szintet. Ezt a szintet (tömeget) a berendezésbe épített erőmérő cella érzékeli. A mérés befejezésekor a számítógép ismét leolvassa a szintet, majd az előző adatok segítségével óránkénti és fajlagos fogyasztást számít. A fogyasztás-mérés tartománya: 0–200 l/óra, pontossága:  $\pm 0,5\%$ .

A mérések vezérlését, az adatok gyűjtését és kiértékelését IBM AT kompatibilis számítógép végzi, és a mérési eredményeket a hozzá csatolt printeren nyomtatni is tudja.

A gázturbina-fékpád beépített mérési szolgáltatásai:

- az eddigiekben felsorolt mérések elvégzése;
- az adatok folyamatos kijelzése;
- a mért adatok eltárolása;
- számított mennyiségek számítása, kijelzése;
- statikus állapot-figyelés;
- dinamikus mérési lehetőség;
- folyamatos felügyeleti rendszer (hibafigyelés, vészjelzés);
- automatikus gázkar szabályozás;
- és jelszóval védett egyéb funkciók: teszt, hibakereső, nullázó és beállító funkciók, hitelesítő mérések.

## A MÉRÉSI ADATOK FELDOLGOZÁSA, A GÁZTURBINA–EGYSÉGEK KARAKTERISZTIKA SZÁMÍTÁSA

A gázturbina-egységek karakterisztikáinak meghatározásához első lépésben a munkaponti, mért paraméterek feldolgozása szükséges, amely magába foglalja a kompresszor, az égéstér és a turbina hatásfokainak kiszámítását; a kompresszor és a turbina nyomásviszonyainak meghatározását; az égéstérben való felmelegedés mértékének megállapítását; majd e számított paraméterek karakterisztikán történő ábrázolását. Mivel a karakterisztikák leírják a gázturbina teljes működési tartományában való viselkedését, ezért a karakterisztikák összességét, együttesét ill. az azokat számító összefüggések egészét a gázturbina termodinamikai-matematikai modelljének tekinthetjük. A szokásos gázturbina számítástól két helyen térünk el:

— A számítás pontosságának növelése céljából változó gáz-jellemzőkkel (állandó nyomáson mért fajhő, adiabatikus kitevő) számoltunk a következőképpen [5]:

A  $T$  hőmérséklethez tartozó entalpia alatt a következő kifejezéssel számított entalpiát értjük és  $i(T)$ -vel jelöljük (az entalpia nullértékét  $T_0=273,15$  K hőmérsékletnél kitűzve):

$$i(T) = i(T, T_0) = c_{pT_0} \cdot T \cdot (T - T_0) \quad (1)$$

A keverék entalpiája:

$$i(T) = \frac{(1 - q_T \cdot L_0) \cdot i(T)_{lev} + q_T \cdot (L_0 + 1) \cdot i(T)_{\alpha=1}}{1 + q_T} \quad (2)$$

ahol

$$i(T)_{lev} = \sum_{j=0}^5 a_j \cdot \left( \frac{T}{1000} \right)^j \quad (3)$$

$$i(T)_{\alpha=1} = \sum_{j=0}^5 b_j \cdot \left( \frac{T}{1000} \right)^j \quad (4)$$

a<sub>lev</sub> – index a tiszta levegő, míg az α=1 – index az elméleti légviszony mellett keletkező égéstermék jellemzőjét jelöli, L<sub>0</sub> az elméleti légviszony mellett 1kg tüzelőanyag tökéletes elégetéséhez szükséges levegő mennyiséget jelöli, míg q<sub>T</sub> a tüzelőanyag és a levegő tömegáramainak hányadosa.

A képletben szereplő konstansok értékei a következők:

$$\begin{array}{lll} a_0 = -293,3678 & a_1 = 1097,97 & a_2 = -184,812 \\ a_3 = 417,1935 & a_4 = -233,2832 & a_5 = 46,34816 \\ b_0 = -279,3845 & b_1 = 1066,107 & b_2 = -257,1421 \\ b_3 = 427,4263 & b_4 = -228,0005 & b_5 = 43,87954 \end{array}$$

A gázállandó:

$$R = \frac{R_{lev} \cdot (1 - q_T \cdot L_0) + q_T \cdot (L_0 + 1) \cdot R_{\alpha=1}}{1 + q_T} \quad (5)$$

ahol: R<sub>lev</sub>=287 J/kgK és R<sub>α=1</sub>=290,1 J/kgK.

A T<sub>1</sub> és T<sub>2</sub> hőmérsékletek közötti közepes fajhők és az adiabatikus kitevő:

$$c_{pT_1} / T_2 = \frac{i(T_2) - i(T_1)}{T_2 - T_1} \quad (6)$$

$$c_{vT_1} / T_2 = c_{pT_1} / T_2 - R \quad (7)$$

$$\kappa_{T_1} / T_2 = \frac{c_{pT_1} / T_2}{c_{vT_1} / T_2} \quad (8)$$

Az így számolt fajhők és adiabatikus kitevő tehát pontosabb számítást tesz lehetővé.

— A turbina előtti hőmérséklet mérésének pontossága nem megfelelő, ezért ezt a paramétert számítani kell az égéster energia-egyenletéből. Az égéster egyenlete szerint [4]:

$$q_T = \frac{c_p T_3^* - c_p T_2^*}{H_a \cdot \eta_e - i T_3^* + c_p T_2^*} \quad (9)$$

ahol: T<sub>3</sub><sup>\*</sup> — a turbina utáni hőmérséklet,  
T<sub>2</sub><sup>\*</sup> — a kompresszor utáni hőmérséklet;  
H<sub>a</sub> — a tüzelőanyag alsó fűtőértéke (H<sub>a</sub>=42800 kJ/kg);  
η<sub>e</sub> — az égőtér hatásfoka;  
iT<sub>3</sub><sup>\*</sup> — az Iljicsov-féle függvényérték.

A kifejezést átrendezve, a  $T_3^*$  értékét meghatározva:

$$T_3^* = \frac{-BJ + \sqrt{BJ^2 - 4 \cdot AC \cdot BI}}{2 \cdot AC} \quad (10)$$

ahol:

$$BJ = 1,07626 + 1,823 \cdot q_T$$

$$BI = -71,972 - 168,206 \cdot q_T - BH$$

$$BH = H_a \cdot \eta_e \cdot q_T + c_p T_2^* (1 + q_T)$$

$$c_p T_2^* = 18,107 + 0,912577 \cdot T_2^* + 1,151786 \cdot 10^{-4} \cdot T_2^{*2}$$

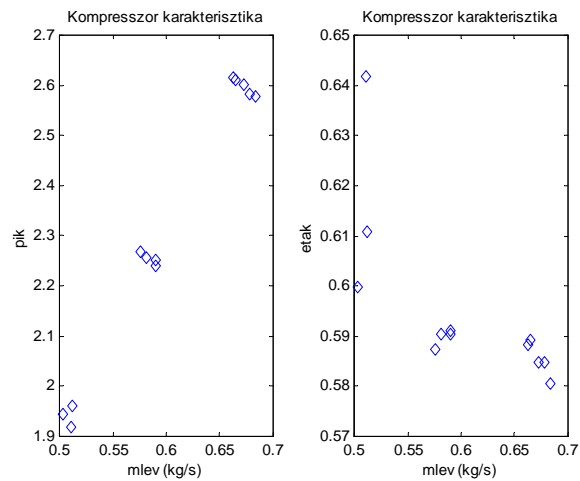
$$AC = 4,05714 \cdot 10^{-5} + 6,568 \cdot 10^{-6} \cdot q_T$$

Így a hiányzó  $T_3^*$  turbina előtti hőmérséklet meghatározható, kiszámítható.

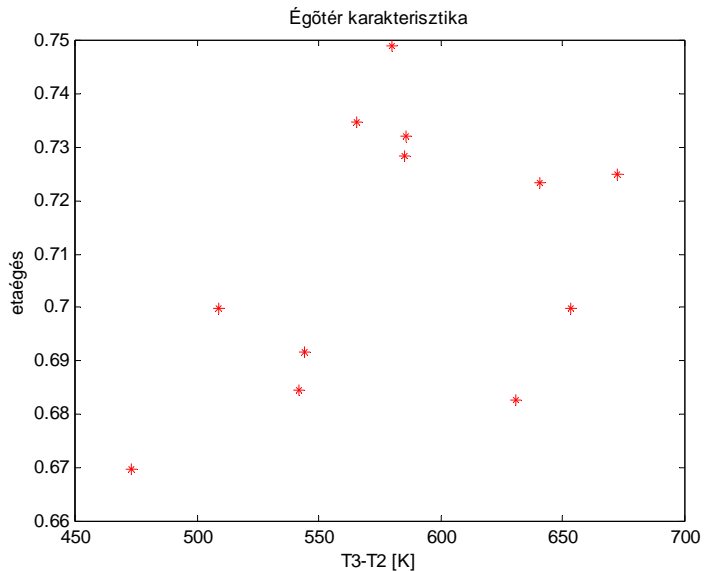
## A KARAKTERISZTIKÁK

A mérések során statikus munkapontok paramétereit mértük. A mérések eredményeinek feldolgozása MatLab 5. 3 szoftver segítségével történt.

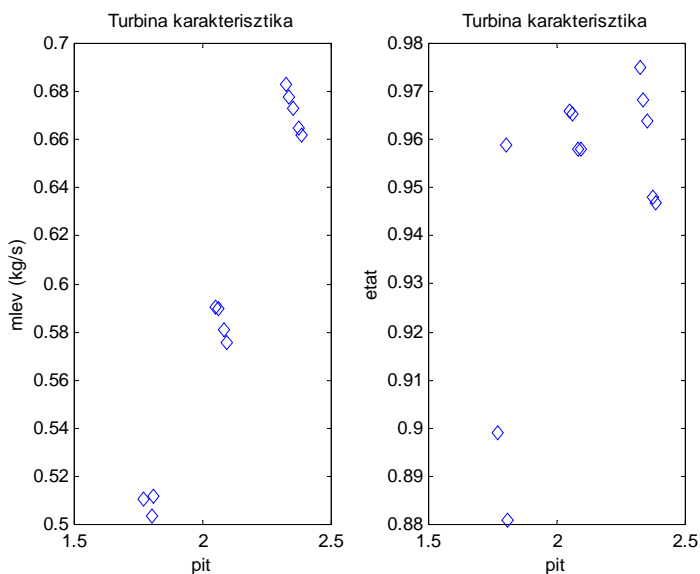
— A kompresszor karakterisztika [3]. A kompresszor karakterisztikája a gázturbinán átáramló levegő tömegáramának függvényében ábrázolja a kompresszor nyomásviszonyát és a kompresszor izentrópikus hatásfokát.



— Az égőtér karakterisztikája [3]. Az égőtér karakterisztikája az égőtérben történő felmelegedés függvényében az égés hatásfokát ábrázolja.



— A turbina karakterisztika [3]. A turbina karakterisztikája a turbina nyomásviszonyának függvényében a gázturbinán átáramló levegő tömegáramát és a turbina izentrópus hatásfokát ábrázolja.



## ÉRTÉKELÉS, ÖSSZEFOGLALÁS

A karakterisztikákon az áttekinthetőség érdekében csak 3 fordulatszám érték lett ábrázolva ( $n=40\ 000, 45\ 000, 50\ 000$  1/min.).

A kompresszor és a turbina karakterisztika formailag megfelel az elméleti karakterisztikáknak, a mérési eredmények tehát jól közelítik várakozásainkat. Két jelentős eltérés mutatkozik:

- Az égéstér karakterisztikáján látható, hogy a munkaponti értékek igen nagy szórást mutatnak, és az égéstér hatásfoka rendkívül alacsony (általában ez az érték 0,95–0,99 szokott lenni).
- A turbina hatásfoka viszont nagyon nagy, bizonyos munkapontokban eléri, ill. meghaladja 0,95-öt. Mivel a turbina centrifugális, ezért ennek hatásfoka legfeljebb 0,8 a vonatkozó irodalom szerint.

Az időközben elvégzett ellenőrző mérések szerint a problémát az egyik nyomásmérő okozza, mégpedig a mérőperemen létrejövő nyomásesés értékével van gond. Az ismételt mérések és számítások után a közeljövőben javítják meg, ill. cserélik ki a nyomásérzékelőt. Várható, hogy az új méréssorozat már minden szempontból elfogadható eredményt ad.

A karakterisztikák leírják a gázturbina működésének teljes tartományát, Ezzel lehetőség nyílik, hogy a karakterisztikák egyenletekkel történő felírása után a matematikai modellt átalakítsuk egy, a szabályozástechnikában használatos formába, az állapotteres reprezentációba. Az állapotteres reprezentáció pedig már alkalmas forma a szabályozó rendszer megtervezéséhez.

## FELHASZNÁLT IRODALOM

- [1] DEUTZ Gas Turbine T216 típusleírás
- [2] ENERGOTEST: Gázturbina-próbapad kezelési utasítás
- [3] DR. PÁSZTOR ENDRE: Repülőgép-hajtóművek elmélete I., Előadásvázlatok, 1996.
- [4] DR. PÁSZTOR ENDRE, DR. LÉVAI ZOLTÁN, DR. SÁNTA IMRE: Diagnosztikai elemzések I., Tanulmány 1982.
- [5] DR. SÁNTA IMRE: Segédlet gázturbinás repülőgép hajtómű évfolyamterv készítéséhez, Budapest, 2000.

*GÁZTURBINA–EGYSÉGEK KARAKTERISZTIKÁJA, A GÁZTURBINA  
MATEMATIKAI MODELLJE*

*In this paper a gas turbine - test stand will be presented, which is used in the Budapest University of Technology and Economics Department of Aircraft and Ships. Its measuring system is able to:*

- measure the dynamic pressure and temperature in the characteristic points of the gas turbine cycle;*
- measure the dynamic parameters (number of revolution, moment of load);*
- determine the specific consumption.*

*After the elaboration of the measured values the result will be the characteristics of the gas turbine – units. With these characteristics the mathematical model of the gas turbine can be prepared.*

*Later the linearization of this mathematical model will be needed; this linearized model will be the model of the object of the control system and with the modern control theory special controllers can be designed, and investigated.*