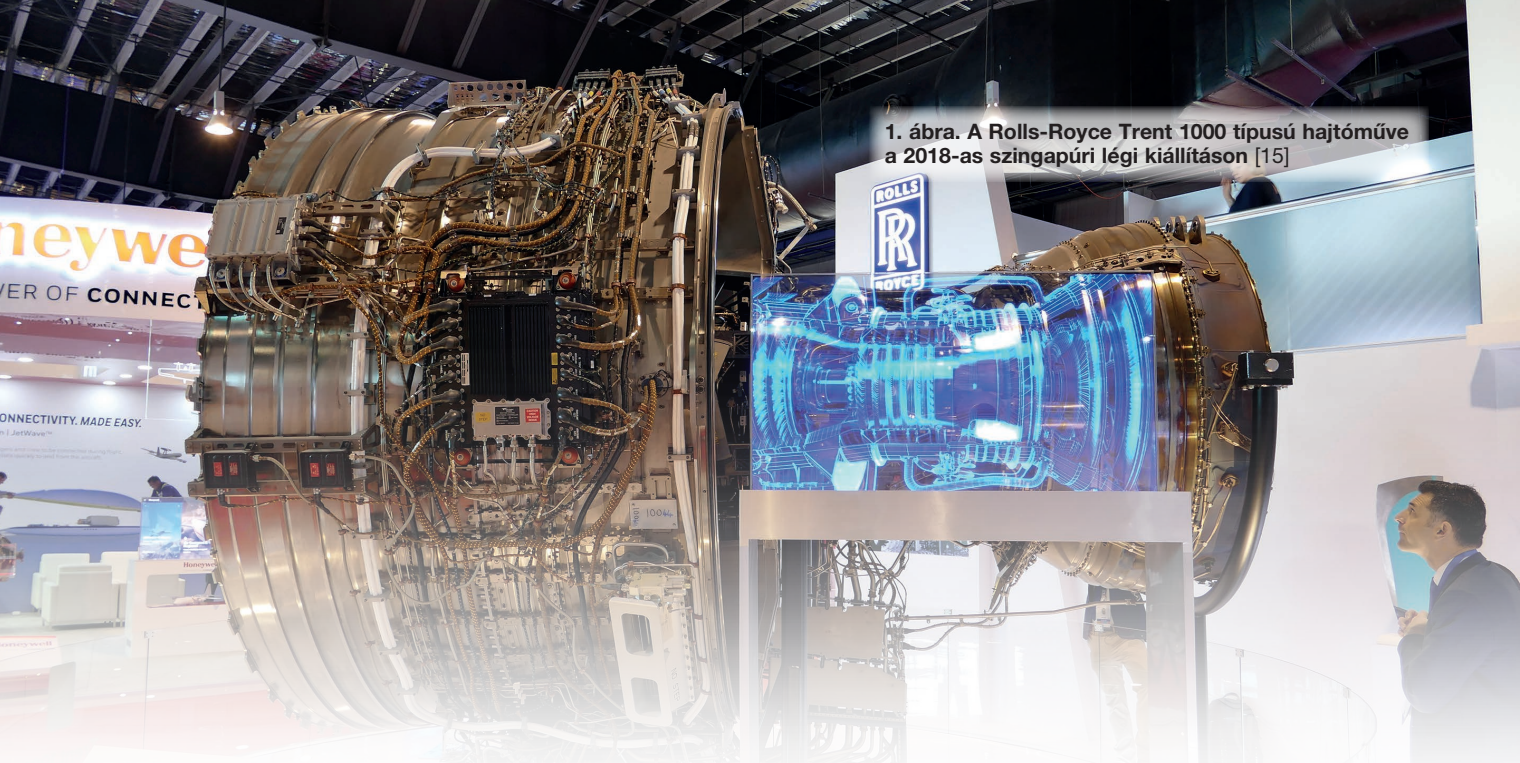


1. ábra. A Rolls-Royce Trent 1000 típusú hajtóműve a 2018-as szingapúri légi kiállításon [15]



Dr. Varga Béla*

A gázturbinás repülőgép-hajtóművek fejlesztési irányai **I. rész**

REPÜLŐGÉP PROPULZIÓS RENDSZEREK

Repülőgép-hajtómű alatt egy erőgép és egy munkagép egy egységben történő alkalmazását értjük, amelynek feladata a repülőgép mozgatásához szükséges vonóerő, vagy tolóerő létrehozása. (Ideértendő az erőgép és a munkagép közötti közlőmű is, amely az erőgép fordulatszámát a kívánt mértékre csökkenti.) Az erőgép kifejezés alatt napjainkban még legtöbb esetben hőerőgépet értünk, amely a termodinamikai körfolyamatok valamelyikét (az Otto-, Diesel-, Brayton'-féle változatban) valósítja meg. A munkagép a hajtómű azon szerkezeti egysége, amely a toló(vonó)erő közvetlen létrehozását biztosítja valamilyen közegáram felgyorsításával. A közegáram lehet a környező

levegő, vagy a hőerőgép forró munkaközege, illetve mindkettő együttesen.

A VONÓERŐ MEGHATÁROZÁSA

A vonóerő egy olyan mechanikai erő, amely valamilyen közegáram felgyorsításának következtében jön létre, nagysága a felgyorsított közeg tömegáramától és a felgyorsítás mértékétől függ, iránya pedig Newton III. törvényének értelmében a felgyorsítással ellentétes irányú. Ennek az erőnek a meghatározásához legalkalmasabb az impulzustétel, mivel egyrészt bármely propulziós rendszerre egyaránt alkalmazható, másrészt nem szükséges ismernünk a pro-

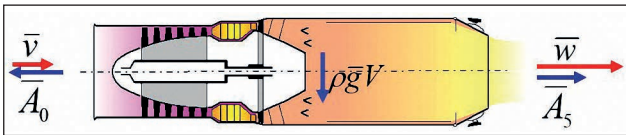
ÖSSZEFOGLALÁS: A szerző tanulmányában bemutatja a propulziós rendszerek működését, a tolóerő keletkezésének összefüggéseit, ezen belül részletesen foglalkozik a gázturbinás propulziós rendszerek típusaival és szerkezeti kialakításukkal. Tárgyalja a hajtóművek hatásfokát meghatározó tényezőket, a hatásfok növelésével kapcsolatban az azokban rejlő lehetőségeket és korlátokat, valamint a hatásfok és a klímaváltozás jelentősége miatt is fontos szén-dioxid-kibocsátás összefüggéseit. Ismerteti a nemzetközi légiforgalmat érintő, a szén-dioxid-kibocsátás csökkentésére irányuló intézkedéseket, és hogy azok milyen kihívásokat jelentenek a repülőgép-hajtóművek fejlesztése szempontjából. Vizsgálja az alternatív tüzelőanyagok alkalmazásának lehetőségét, valamint azok a hajtómű termikus hatásfokára, és fajlagos hasznos munkájára kifejtett hatását. Foglalkozik a gázturbinás hajtóművek égőtereinek kialakításával, kémiai, termodinamikai és gázdinamikai kérdéseivel, valamint a keletkező égéstermék összetételével.

KULCSSZAVAK: gázturbinás hajtómű, szén-dioxid-kibocsátás, alternatív tüzelőanyagok, égőterek

ABSTRACT: In his study, the author presents the operation of propulsion systems, the basic principles of the thrust production, and deals in detail with the types of gas turbine propulsion systems and their structural design. He discusses the factors that determine the efficiency of engines, the possibilities and limitations in efficiency enhancement, as well as the correlations between efficiency and carbon dioxide emission, which are important due to the increasingly pressing climate change. He describes the measures aimed at reducing carbon dioxide emissions affecting international air traffic and what challenges they pose in terms of the development of aircraft engines. He investigates the possibility of using alternative fuels and their effect on the thermal efficiency and specific net work output of the engine. He deals with the design of the combustion chambers of gas turbine engines, chemical, thermodynamic and gas dynamic issues, and the composition of the combustion products.

KEY WORDS: gas turbine engine, carbon dioxide emissions, alternative fuels, combustion chambers

* Alezredes (PhD), egyetemi docens, NKE HHK Repülő Sárkány-hajtómű Tanszék ORCID: 0000-0003-3454-0825



2. ábra. A propulziós rendszerek tolóerejének meghatározása (A szerző szerkesztése [1] alapján)

propulziós rendszerben lejátszódó folyamatokat, csupán néhány paramétert a rendszer belépő és kilépő keresztmetszetében. Nevezetesen a tömegáramot (\dot{m}), a repülési sebességet (v), a kilépő sebességet (w), a belépő és kilépő keresztmetszeteket (A_0) és (A_5), valamint a környezeti nyomást (p_0) és a kilépő keresztmetszet nyomását (p_5) (2. ábra).

Az impulzustétel szerint (1) egy nyitott rendszeren áthaladó közeg impulzusának változása ($\frac{dI}{d\tau} = \int_{A'} \bar{c} \rho \bar{c} d\bar{A}$) egyenlő a rendszeren belül ráható térfogati ($\int_V \rho \bar{g} dV$) és felületi erők ($\int p d\bar{A}$), valamint az áramlásba helyezett test által az áramlásra ható erők (\bar{F}_R) előjelhelyes összegével, ahol A' az áramlás szempontjából szabad keresztmetszetek (\bar{A}_0) és (\bar{A}_5), V pedig a rendszer térfogatát jelenti.

$$\frac{dI}{d\tau} = \int_{A'} \bar{c} \rho \bar{c} d\bar{A} = \int_V \rho \bar{g} dV - \int_{A'} p d\bar{A} + \bar{F}_R \quad (1)$$

Ez utóbbi (erő fontos számunkra, mivel a hatás-ellenhatás törvénye értelmében amekkora erővel hatott az áramlásra a vizsgált test, az áramlás ugyanakkora erővel fog visszahatni a vizsgált testre. Ennek megfelelően átrendezve az (1) egyenletet, kapjuk a (2) egyenletet.

$$\bar{F}_R = \int_{A'} \bar{c} \rho \bar{c} d\bar{A} + \int_{A'} p d\bar{A} - \int_V \rho \bar{g} dV \quad (2)$$

Kibontva az integrált tagokat – feltételezve, hogy a sebességeloszlás egyenletes a be- és kilépés keresztmetszeteiben, valamint tekintve, hogy a térfogati erők elhanyagolhatók a többi erőhöz képest (tulajdonképpen a rendszerben aktuálisan bent lévő munkaközeg súlya néhány tíz Newtonra tehető) – kapjuk a (3) egyenletet, ahol a 0-s a belépő, az 5-ös index a kilépő keresztmetszetet jelenti.

$$\bar{F}_R = \bar{v} \rho_0 \bar{v} \bar{A}_0 + \bar{w} \rho_5 \bar{w} \bar{A}_5 + p_0 \bar{A}_0 + p_5 \bar{A}_5 \quad (3)$$

Ez még továbbra is vektoriális összegzés, ahol a vektorok hatásvonalai egybeesnek a repülőgépjármű hosszirányában, amelynek következtében áttérhetünk skaláris tárgyalásra (4).

$$F = \dot{m}_5 w - \dot{m}_0 v + p_5 A_5 - p_0 A_0 \quad (4)$$

Ha eltekintünk a tömegszaporulattól (pl. elégetett tüzelőanyag), vagy tömegcsökkenéstől (levegőelvételek a kompresszortól), vagyis $\dot{m} = \rho v A_0 = \rho w A_5$, valamint feltételezzük teljes expanzió esetére, hogy $p_5 = p_0$ és $A_5 = A_0$, akkor a következő egyszerű egyenletet kapjuk:

$$F = \dot{m}(w - v) \quad (5)$$

Az (5) egyenletnek megfelelően a vonóerő (tolóerő) értéke függ a megmoz-

gott közegmennyiségtől és a közeg felgyorsításának mértékétől, más néven a fajlagos vonóerőtől. Ez minden propulziós elven működő hajtásra érvényes (légcsavaros repülőgép, gázturbinás repülőgép-hajtóművek, hajócsavar, helikopter-forgószárny, evezőlápát).

A PROPULZIÓS RENDSZEREK OSZTÁLYOZÁSA

Bár a tolóerő (vonóerő) képzés szerint valamennyi propulziós rendszer (hajtómű) – szerkezeti kialakításuk különbözősége ellenére – azonos alapelv szerint működik, a különbözőségek alapján lehetőség nyílik az osztályozásukra. (3. ábra)

Az osztályozás első szempontja, hogy a hajtómű hőerőgép egysége a tüzelőanyag elégetéséhez környezeti levegőt használ, vagy az égést tápláló oxigént is a fedélzeten tárolja (szállítja). Ez utóbbiak a rakéták, de mivel ezek repülőgép propulziós rendszerként történő használata elhanyagolható, így ezúttal ezekkel nem foglalkozunk.

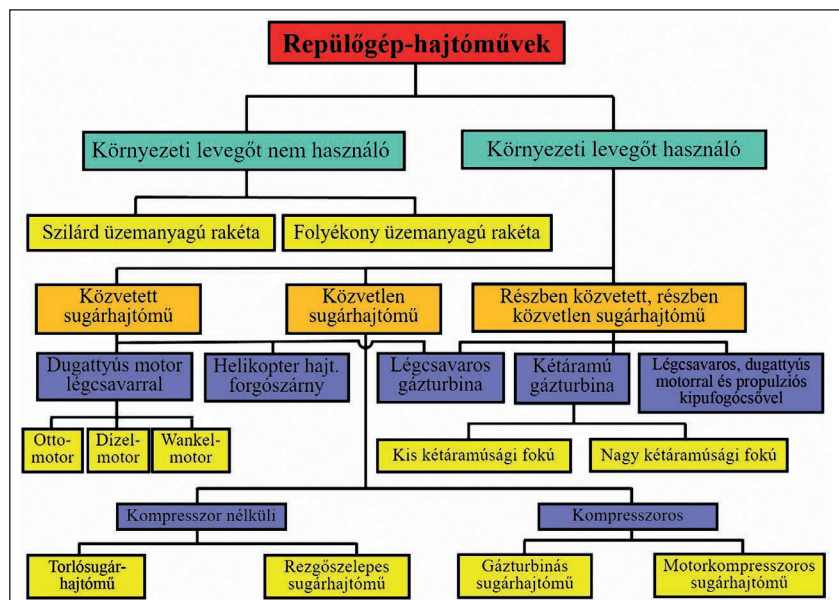
A környező levegőt az égéshez felhasználó hajtóművek három kategóriába sorolhatók:

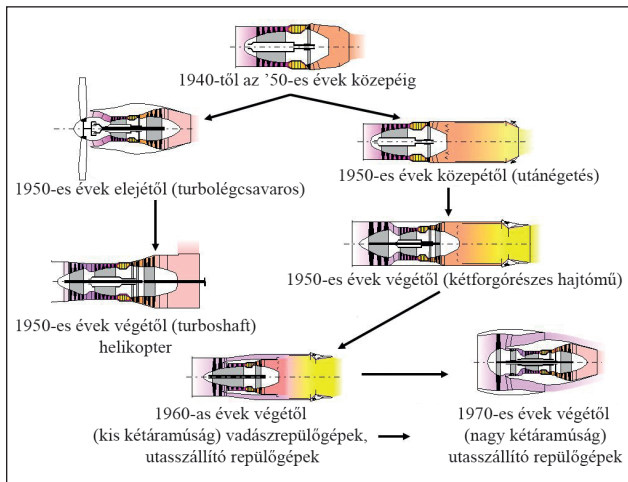
- közvetett sugárhajtóművek: a felgyorsított közeg a környező levegő;
- közvetlen sugárhajtóművek: a felgyorsított közeg a hőerőgép munkaközegé;
- részben közvetett, részben közvetlen sugárhajtóművek: a felgyorsított közeg részben a környező levegő, részben a hőerőgép munkaközegé.

Láthatóan mind a három fenti csoportban megjelentek a gázturbinás hajtóművek, amelyek a múlt század ötvenes éveitől – a kisépítésű repülőgéptől eltérően – egyeduralomká váltak, mint repülőgép propulziós rendszerek.

A gázturbinás hajtóművek a belső égésű motorok csoportjába tartoznak (4. ábra). Ezek maguk nevezett központi egységét egy kompresszor és turbina, valamint a köztük lévő égőtér alkotja. Ezeket a szerkezeti egységeket gyakran gázgenerátornak is hívják, mivel a turbina kilépő keresztmetszetét nagy energiájú és nyomású, forró égéstermék hagyja el, amely a gázgenerátorban keletkezik. Ez az energia a hajtómű fajtájától függően más-más módon hasznosul.

3. ábra. A repülőgép-hajtóművek osztályozása (A szerző szerkesztése)





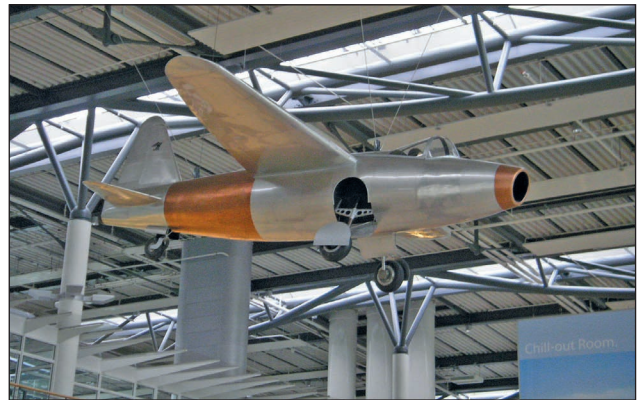
4. ábra. A gázturbinás hajtóművek fejlődési folyamata (A szerző szerkesztése)

Az első, gyakorlatban alkalmazott gázturbinás hajtóművek estében a tolóerő létrehozásának eszköze a hajtómű utolsó részegysége, az ún. fúvócső volt. A zárójelben az angol terminológia szerinti elnevezése olvasható. Ezzel meg is született a gázturbinás hajtóművek első kategóriája, az *egyáramú gázturbinás sugárhajtómű* (turbojet). Hamarosan azonban megindult a további specializálódásuk, és három újabb, jól elkülöníthető kategória jelent meg. Ezek a *turbólégcsavaros hajtóművek* (turboprop, avagy légcsavaros gázturbina), a *kétáramú sugárhajtóművek* (turbofan) és a *tengelyteljesítményt szolgáltató gázturbinás hajtóművek* (turboajtó). A 4. ábra, fentről jobbra lefelé három – némileg módosított – egyáramú gázturbinás sugárhajtóművet szemléltet. Az alsó két ábrán kétáramú gázturbinás sugárhajtómű látható, amelyek között a különbséget a kétáramúsági fokok² jelenti. A bal oldali kis kétáramúsági fokú gázturbinás hajtóművek manapság a harcászati repülőgépek, illetve a könnyű kiképző harcászati repülőgépek jellemző hajtóművei.

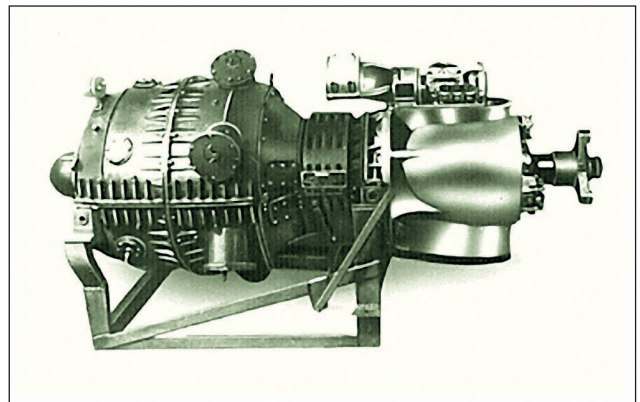
A jobb oldali nagy kétáramúsági fokú hajtóműveket az utasszállító repülőgépeknek alkalmazták. Az ábra egyfajta evolúciós folyamatot is mutat, amelynek során az utasszállító repülőgépek az egyáramú sugárhajtóművektől eljutottak a nagy kétáramúsági fokú (6–12) hajtóművekig, jelentősen előre lépve ezzel fajlagos tüzelőanyag-fogyasztásuk³ csökkentésében (hatásfokuk növelésében). Az ábra bal oldalán, a felső turbólégcsavaros gázturbinás hajtóművek (turboprop) a katonai szállító repülőgépek és a kis hatótávolságú, jellemzően kis és közepes méretű polgári utasszállító repülőgépek hajtóművei. Ez alatt egy tengelyteljesítményt adó gázturbina „(turbó)tengelyes” következik. A magyar szaknyelvben ennek a hajtómű kategóriának a megnevezésénél tapasztalható a legnagyobb bizonytalanság. Ma a magyar terminológiában erre nincs is olyan jellemző megnevezés, mint az angol „turboshaft engine”, vagy az orosz „турбовальный двигатель”.

A GÁZTURBINÁS HAJTÓMŰVEK KIALAKULÁSA⁴

A II. világháborút követően a megnövekedett sebesség-, és az azzal közből összefüggésben álló teljesítményigény miatt a tervezők a dugattyús-légcsavaros repülőgépmotorok helyett új megoldásokat kerestek. Meg kell említeni az angol Whittle⁵ kiemelendő munkásságát, aki az első olyan gázturbinás hajtóművet készítette el, amely már minden



5. ábra. Heinkel 178, az első gázturbinás repülőgép [2]



6. ábra. Jendrassik tengelyteljesítményt szolgáltató gázturbinája [3]



7. ábra. Jendrassik tengelyteljesítményt szolgáltató CS-1 gázturbinája. A típusjelzés a „Csónakmotor” elnevezésre utal, a tárgy a Magyar Műszaki és Közlekedési Múzeum Műszaki Tanulmánytárában látható (Forrás: MMKM)

olyan gépegységgel rendelkezett, amivel egy mai modern gázturbinás hajtómű is. A német Hans von Ohain⁶ tervezte az első működőképes repülőgépbe épített gázturbinás sugárhajtóművet, a Heinkel HE S3-at, amely az első sugárhajtású repülést lehetővé tette. (5. ábra)

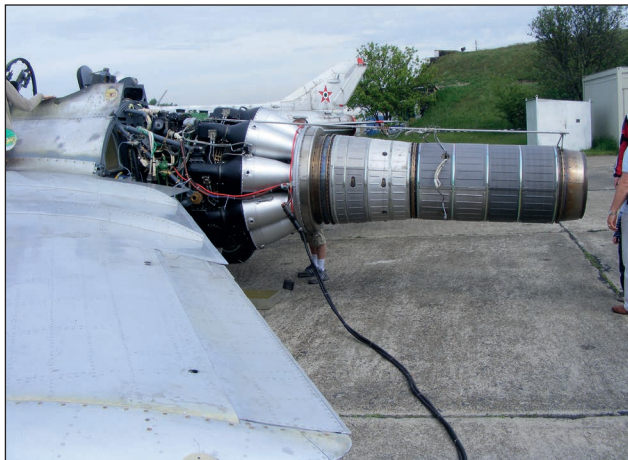
Itt kell megemlékeznünk a magyar Jendrassik Györgyről, a Ganz-gyár mérnökéről, akinek 1938-ban megépített gázturbinája (6., 7. ábra) 16 400 f/min fordulatszámon és 72,5 kW teljesítménynél 21,2% effektív hatásfokot ért el. A turbina előtti maximális gázhőmérséklet 475 °C, kompresszorának nyomásviszonya 2,2 volt. Ilyen alacsony turbi-

na előtti gázhőmérséklettel, illetve ilyen kis méretű géppel mind a mai napig nem értek el ilyen jó hatásfokot. Újszerű volt mind az axiális kompresszor, mind a turbina: mindkető enyhén ívelt lapátokkal, feles forgással (50% reakciófok). A kompresszor fokozati hatásfoka 85%, a turbináé 88% volt. [3]

EGYÁRAMÚ GÁZTURBINÁS HAJTÓMŰVEK (TURBOJET)

Már a II. világháború idején egyre több repülőgéptípusban megjelentek a gázturbinás hajtóművek, így például a Messerschmitt Me 262-esben, az Arado 234-esben, vagy a szövetségesek részéről a Gloster Meteor repülőgépekben (bár ez utóbbi nem kapott még harctéri szerepet). Az 1950-es években azután végképp és visszavonhatatlanul berobbant a repülésbe a gázturbinás korszak.

A 8. ábra a korai gázturbinás korszak (az 1940-es évek közepétől az 1950-es évek közepéig) hajtómű-elrendezését szemlélteti. Jellemzője a centrifugál kompresszor, amely szükségszerűen nagy törzsátmérőt eredményezett. A centrifugál kompresszor lekorlátozta a maximális kompresszor nyomásviszonyt is. A konstrukciós megoldás jellegzetessége volt még a csöves égőtér. Ezek a hajtóművek



8. ábra. A 031-es oldalszámú MiG-15 típusú, első generációs sugárhajtású vadászrepülőgép VK-1-es hajtóműve a tököli repülőtéren 2021-ben (Fotó: a szerző saját felvétele)

9. ábra. A Tumanszkij R-11 a Szovjetunióban, az 1950-es évek elején a Szergej Tumanszkij[®] vezette OKB-300 tervezőirodában kifejlesztett gázturbinás sugárhajtómű volt, amelyet főként a MiG-21 vadászrepülőgép változatainál alkalmaztak [4]



1. táblázat. Egyáramú gázturbinás hajtóművek és egy ma is gyártott, kis méretű típus jellemző paramétereinek összehasonlítása (A szerző szerkesztése [5] alapján)

Jellemző paraméterek	I. generációs	II. generációs	TJ-100
Tolóerő [kN]	8–30	40–80	1
Tömegáram [kg/s]	20–50	40–100	1,7
Tolóerő utánégetéssel [kN]	nincs	60–120	–
Kompresszor-nyomásviszony [-]	2,5–5	10–16	~3,5–4
Turbina előtti gázhőmérséklet [K]	1100–1200	1300–1500	~1070
Fajlagos tüzelőanyag-fogyasztás [kg/Nh]	0,11–0,13	0,085–0,12	0,107
Hajtóműtömeg [kg]	700–900	1000–2200	16,5
Termikus hatásfok [%]	15–30	25–35	~23

tekinthetők a sugárhajtású repülőgép-gázturbinák első generációjának, a rájuk jellemző adatokat a 1. táblázat tartalmazza.

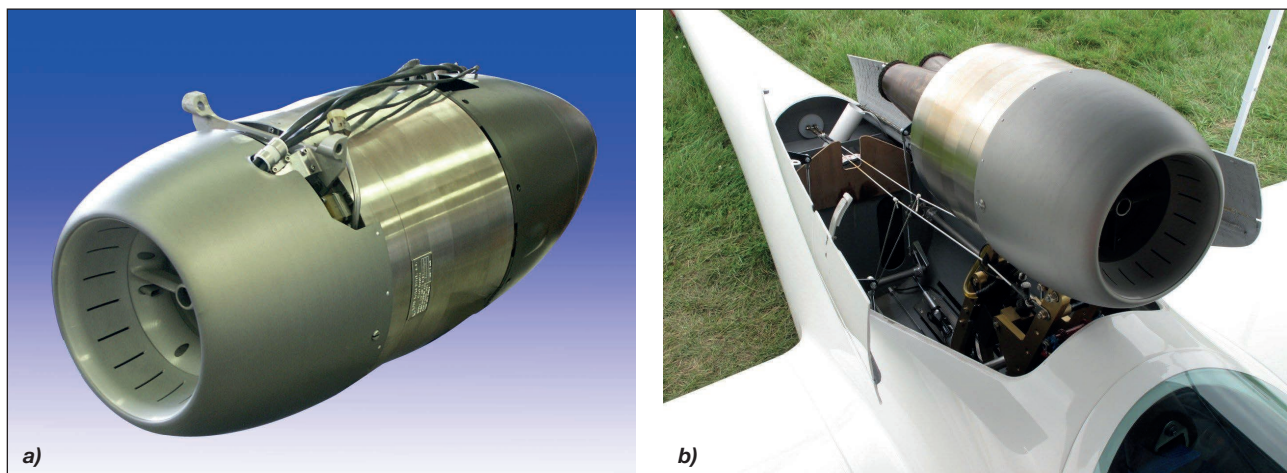
Az egyáramú gázturbinás hajtóművek következő generációjának az 1950-es évek második felétől az 1970-es évek közepéig beépített hajtóművek tekinthetők. (9. ábra) Ezek axiál kompresszorral, egy vagy két forgórészes kivitelben készültek. Az első két forgórészes a Bristol Siddeley Olympus hajtóműve volt 1950-ben. Az egymástól függetlenül forgó kis- és nagynyomású forgórészek alapvetően a hajtóművek pompázs jellemzőit javították, amely a kompresszorlapátok áteséséből következő, a hajtómű működésére veszélyes jelenség.

A kompresszor fokozatok száma elérheti a 17-et is (például a híres General Electric J79 hajtómű esetében). A fokozatok alacsony egyenkénti nyomásviszonya azonban ennek ellenére is mérsékelt kompresszor-nyomásviszonyt tett lehetővé. (1. táblázat) Az egyáramú gázturbinás hajtóművek legtöbbször csöves-gyűrűs égőtérrel készültek és az 1950–60-as években utasszállító repülőgépekbe is beépítésre kerültek. A Concorde volt az utolsó utasszállító repülő típus, amelyben egyáramú gázturbinát alkalmaztak. Az Olympus 593 típusú hajtómű a szuperszonikus sebesség elérése miatt utánégetőt is tartalmazott, amely az utasszállításban unikális jelenség volt.

A gázturbinás hajtóművek katonai felhasználása általában utánégetővel rendkívül elterjedt volt. Manapság ezek a hajtóművek jobbra kiszorultak a repülésből. A fenti hajtóművekkel szerelt repülőgépek elavulttá váltak és kivonásra kerültek, vagy néhány éven belül kivonásra kerülnek.

Ezt a hajtóműkategóriát még a mai korszerű technológiával sem lehetne hatékonyra, üzemanyag-takarékossá tenni. Természetesen ez nem jelenti azt, hogy ma már nem gyártanak ilyen hajtóműveket (10. ábra), de ezek – bár működési alapelveik szerint azonosak –, strukturálisan azonban teljesen mások, mint az elődeik; méretük és tolóerejük a töredéke a korábbi társaiknak. A tolóerő általában kisebb 1 kN-nál (2. táblázat), így főként pilóta nélküli légi járművek





10. ábra. A negyedik generációs PBS TJ-100 hajtómű és alkalmazása vitorlázó repülőgépen [6]

2. táblázat. Kis kétáramúsági fokú gázturbinás hajtóművek jellemző paraméterei (A szerző szerkesztése)

Jellemző paraméterek	Többfeladatú, harcászati repülőgép	Könnyű kiképző támadórepülőgép
Tolóerő [kN]	50–80	15–30
Tolóerő utánégetéssel [kN]	80–120	általában nincs
Tömegáram [kg/s]	60–100	30–50
Kétáramúsági fok [-]	0,3–0,6	0,5–2
Kompresszor-nyomásviszony	25–35	10–20
Turbina előtti gáz hőmérséklet [K]	1600–1900	1300–1500
Fajlagos tüzelőanyag-fogyasztás [kg/Nh]	0,075–0,08	0,08–0,083
Hajtóműtömeg [kg]	800–1200	300–600
Termikus hatásfok [%]	> 40	30–40

(Unmanned Aerial Vehicle – UAV) meghajtására, a kisebb méretűek modell hajtóművekként, illetve kísérleti labormérésekre alkalmazhatók. Természetesen felépíthetők ilyen hajtóművek repülőgépekre is, például vitorlázó repülőgépre, de amíg egy dugattyús segédmotor óránként 4–5 liter benzinnel megelégszik, a fenti kis gázturbinás hajtómű 100–120 liter kerozint is elfogyaszt óránként.

KÉTÁRAMÚ GÁZTURBINÁS HAJTÓMŰVEK (TURBOFAN)

A múlt század hatvanas éveitől mind a polgári, mind a katonai repülésben az egyszerű, egyáramú sugárhajtóműveket felváltották a kétáramú hajtóművek. A legfontosabb különbség a két típus között, hogy a hajtóműbe beszívott levegő egy része elkerüli a gázgenerátor-egységet, és a tolóerő egy része az ún. külső áramban keletkezik. Ennek mértéke a kétáramúsági fokkal jellemezhető, amely a külső és a belső (gázgenerátor egység) tömegáramainak viszonyszámát jelenti. A kétáramúság jelentősen javította a hajtóművek propulziós hatásfokát, ezen keresztül pedig a fajlagos tüzelőanyag-fogyasztását. Először a kis kétáramúsági fokú hajtóművek jelentek meg, majd ez a kétáramúsági fok folyamatosan növekedett a kereskedelmi repülőgépek kétáramú hajtóműveiben. Kis kétáramúsági fokúnak nevezhetjük azt a hajtóművet, amelynek a kétáramúsági foka kisebb, mint kettő.

A Rolls-Royce Conway (11. ábra) volt a világ első, sorozatban gyártott kétáramú hajtóműve 0,3-es kétáramúsági

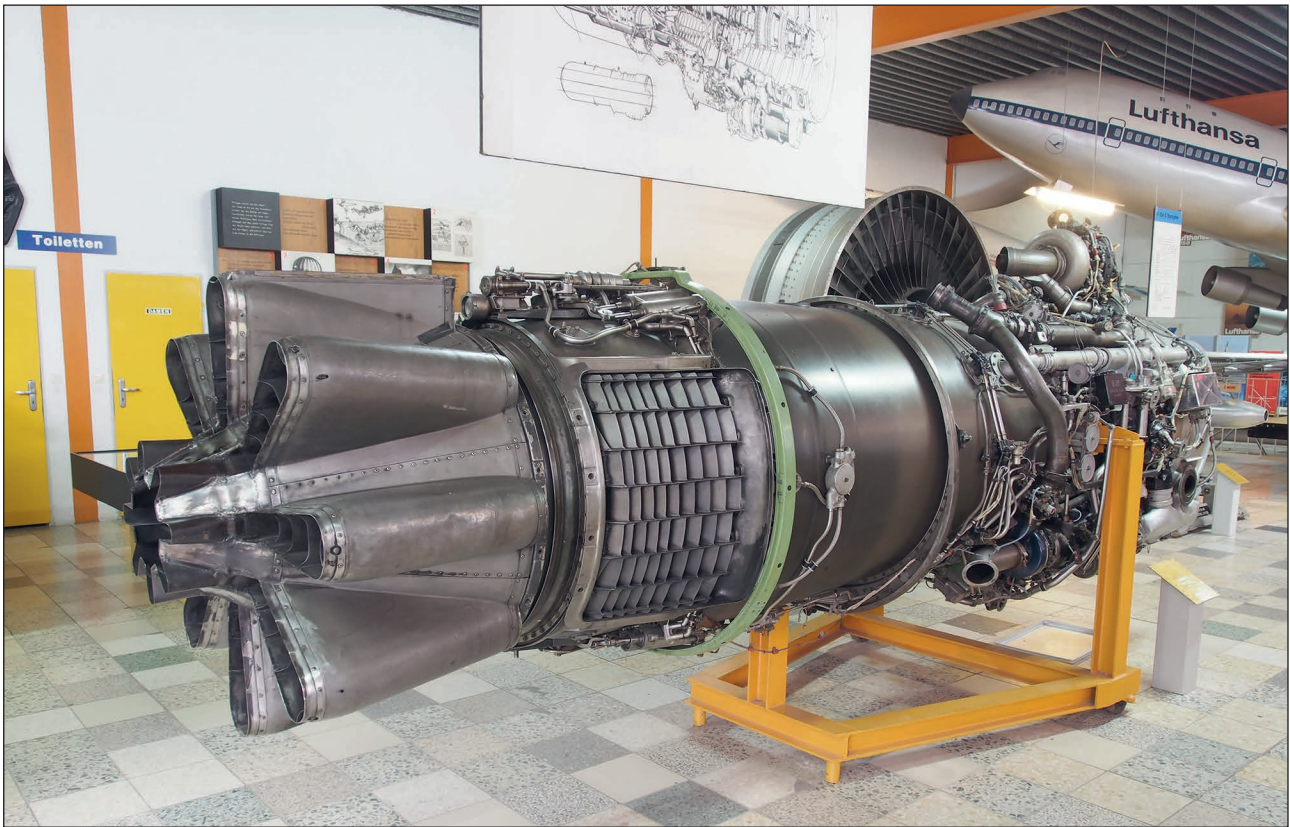
fokkal, hasonlóan a modern General Electric F404 (RM 12) hajtóműhöz. A prototípus 1950 januárjában készült el, később a típust Boeing B-707, Douglas DC-8, Vickers VC10 utasszállító repülőgépekbe is beépítették.

Az 1960-as évek polgári alkalmazású, kétáramú hajtóművei, mint például a Pratt & Whitney JT8D és a Rolls-Royce Spey kétáramúsági foka közelített az egyhez, így többé-kevésbé megegyezett a katonai változatok kétáramúsági fokával. A kétáramúsági fok tekintetében ettől kezdve megfigyelhető a civil és a katonai felhasználásra tervezett hajtóművek fejlesztési irányának szétválása (12. ábra).

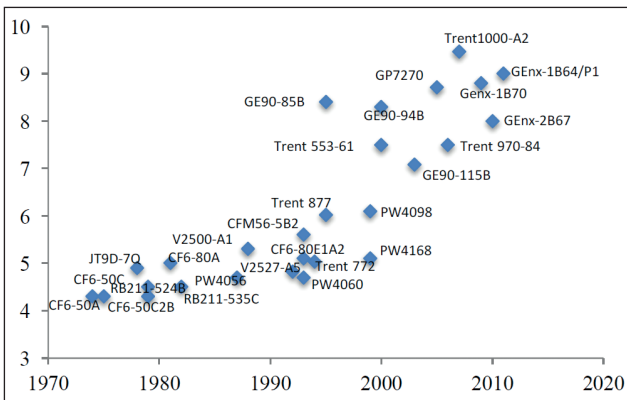
KIS KÉTÁRAMÚSÁGI FOKÚ HAJTÓMŰVEK

Manapság a kis kétáramúsági fokú hajtóművek (13. ábra) részben a többfeladatú harcászati repülőgépek erőforrását képezik. Ez utóbbi kifejezés azt jelenti, hogy ugyanaz a repülőgép (platform) többféle feladat ellátására alkalmas (pl. légi harc, földi támadó feladatok, légi felderítés, előretolt légi vezetés, elektronikai harc). A teljesség igénye nélkül a leggyakoribb típusok ebben a kategóriában: az F-18-as; a Rafale, a Szu-30-as, a MiG-29-es, a JAS 39 Gripen, az Eurofighter Typhoon, az F-16 Fighting Falcon és az F/A-18 Hornet.

A kisebb méretű, kis kétáramúsági fokú hajtóművek – jellemzően utánégető nélkül – a könnyű kiképző harcászati repülőgépek erőforrását képezik. Ez a kategória a haladó



11. ábra. Rolls-Royce RB.80 Conway hajtómű a Flugausstellung Hermeskeil német repülési múzeumban [7]



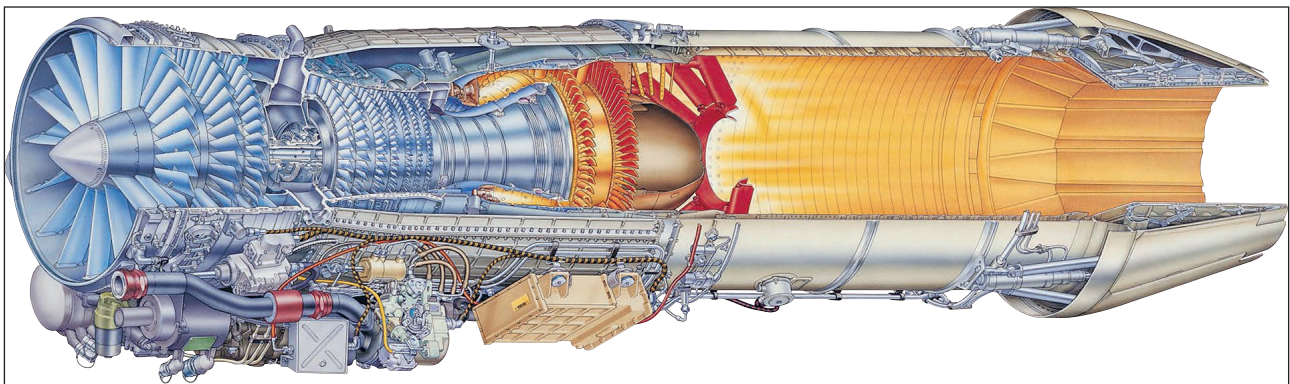
12. ábra. Repülőgépjárművek kétáramúsági fokának növekedése az évek során [8]

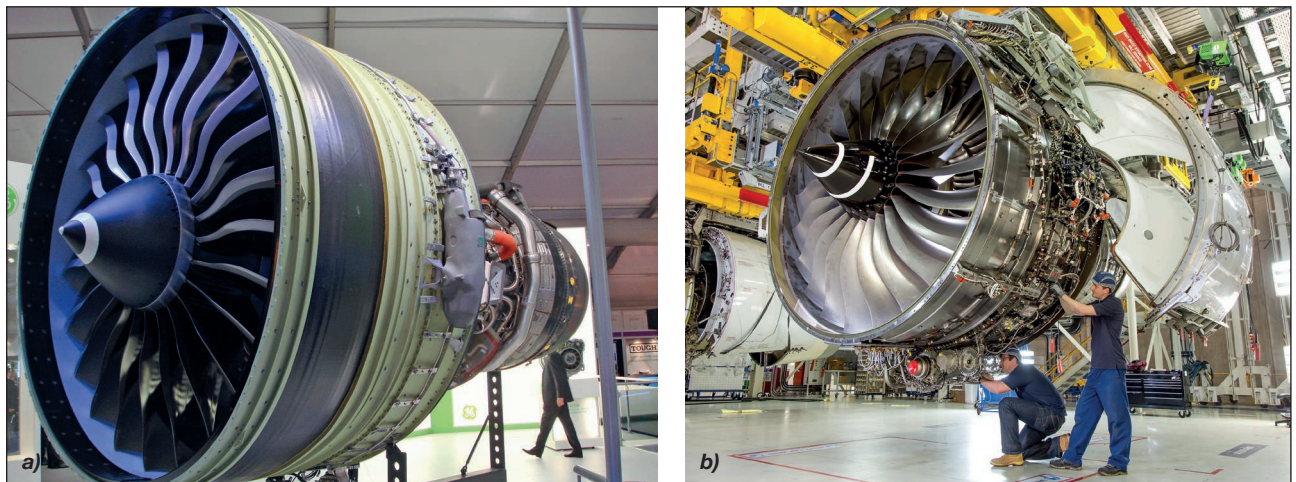
kiképző gépek kategóriájából alakult ki, a könnyű támadótól a felderítő feladatokig ugyancsak biztosítva a többfeladatú felhasználást, míg közben lehetővé teszi a kiképző feladatok megoldását is. Lassabbak, mint a nagyobb társaik, általában szubszonikus sebességre képesek, illetve egyes típusok mérsékelt hangsebesség feletti repülési sebességre is alkalmasak. A teljesség igénye nélkül a leggyakoribb típusok ebben a kategóriában: az L-159 Alca, a Hawk, a Jak-130-as, az Aermacchi MB-346-os és az Alpha Jet.

NAGY KÉTÁRAMÚSÁGI FOKÚ HAJTÓMŰVEK

A manapság utasszállító repülőgépeken (és néhány katonai szállító repülőgépen) alkalmazott, kis fajlagos tolóerő/nagy kétáramúsági fokú hajtóművek, az 1960-as évektől a

13. ábra. General Electric RM 12, a Gripen kis kétáramúsági fokú hajtóműve [9]





14. ábra. A két nagy hajtóműgyártó a General Electric (GE90–115B, bal) és a Rolls Royce (Trent) csúcshajtóművei [10] [11]

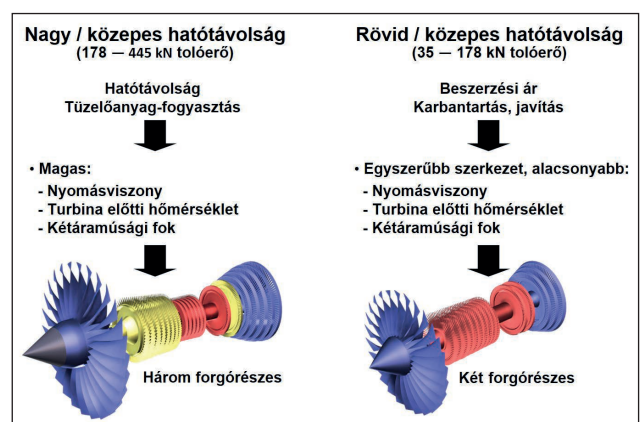
nagy fajlagos tolóerő/kis kétáramúsági fokú hajtóművekből alakultak ki az évek során.

Ez azt jelenti, hogy a tervezők eljutottak az egyáramú sugárhajtóművektől a kétáramú, majd az egyre nagyobb kétáramúsági fokú hajtóművekig, előre lépve ezzel a fajlagos tüzelőanyag-fogyasztás csökkentésében. Az egyre magasabb termikus hatásfokon kívül ebben kiemelt szerepet a növekvő kétáramúsági fokból származó propulziós hatásfok-növekedés jelentette.

A legnagyobb hajtóműgyártók, a General Electric, a Rolls-Royce plc. és a Pratt & Whitney. A General Electric és a francia Safran közös vállalkozása a CFM International. A Pratt & Whitney-nek szintén van egy közös vállalkozása International Aero Engines néven a japán Aero Engine Corporation, és a német MTU Aero Engines céggel, amely főleg az Airbus A320 repülőgépcsalád erőforrásait gyártja. A Pratt & Whitney és a General Electric által létrehozott Engine Alliance szállítja a hajtóműveket pl. az Airbus A380 repülőgépekhez is. [12] (3. táblázat)

3. táblázat. A nagy kétáramúsági fokú gázturbinás hajtóművek jellemző paramétereinek összehasonlítása (A szerző szerkesztése [13] [14] alapján)

Jellemző paraméterek	Általában	GE90–115B	Trent XWB–97
Tolóerő [kN]	50–500	514	431
Tömegáram [kg/s]	300–1500	–	1436
Kétáramúsági fok [-]	4–12	9	9,6
Kompresszor-nyomásviszony [-]	25–45	42	50
Turbina előtti gáz hőmérséklet [K]	1400–1800	–	–
Fajlagos tüzelőanyag-fogyasztás [kg/Nh]	0,05–0,07	–	0,0486
Hajtómű-tömeg [kg]	1500–8000	8283	7550
Termikus hatásfok [%]	40–50	–	–



15. ábra. A két és három forgórészes hajtóművek sematikus ábrái (A szerző szerkesztése)

A forgórészek száma szerint a kétáramú hajtóművek lehetnek két vagy három forgórészesek. A három forgórészes hajtóművek (kis-, közepes és nagynyomású forgórészek) fejlesztésében a Rolls-Royce járt az élen. Mivel a három forgórész bonyolultabb szerkezetet eredményez, ezért csak akkor érdemes alkalmazni, ha annak pozitív hozadéka van. (15. ábra)

Nagy távolságú repülőjáratoknál, ahol maga a nagy hatótávolság és a tüzelőanyag-fogyasztás (mint a legnagyobb költségtényező) lényeges, és a repülőgép jelentős méretei miatti nagy a tolóerőszükséglet, indokolt a három forgórészes hajtómű alkalmazása. Ezeknél a hajtóműveknél, a hatásfok növelése érdekében minél magasabb nyomásviszony, turbina előtti gáz hőmérséklet és kétáramúsági fok elérésére törekednek. A kétáramúsági fok növekedése önmagában is indokolja a három forgórészt, mivel ebben az esetben csak a kisnyomású forgórész fordulatszámát korlátozza a fan⁹ fokozat nagy átmérője miatti korlátozott fordulatszám. A közepes nyomású forgórész fordulatszámát már optimális értékre lehet választani, amivel csökkenthető a turbina- és a kompresszor fokozatok száma. Két forgórészes hajtómű esetében számos kompresszor fokozatot kell meghajtani a fan fokozat által diktált alacsonyabb fordulatszámon, amely csökkenti a fokozatonkénti nyomásviszonyt, illetve növeli a fokozatszámot azonos kompresszor-nyomásviszony eléréséhez. A három forgórész alkalmazása ennek megfelelően csökkenti a hajtómű hosszúságát és tömegét, további előnyként növeli a modularitását.

A rövid távolságú repülőjáratok általában kisebb hajtóműveket igényelnek. A tüzelőanyag-fogyasztás a teljes költségben kisebb részarányt foglal el, míg a fő költségtegyező a beszerzési ár és a karbantartás költsége. Ennek megfelelően a nyomásviszony, a turbina előtti gázhőmérséklet és a kétáramúsági fok növelése nem olyan hangsúlyos. Ez egyben alacsonyabb beszerzési árat, és alacsonyabb karbantartási költséget is jelent.

Ezek a nagy kétáramúsági fokú hajtóművek (két vagy három forgórésszel) több tízezer példányszámban szolgálgják a kereskedelmi, és kisebb számban a katonai repülést is. Kiforrott konstrukciók, ennek ellenére a gyártók hatalmas kihívásokkal néznek szembe a következő évtizedekben. A szigorodó zajnormák és a károsanyag- – elsősorban a NO_x-kibocsátás – csökkentésén túl, prioritássá vált a hatásfok növelése, illetve azon keresztül drasztikus tüzelőanyag-fogyasztás és CO₂-kibocsátás-csökkentés. Cikksorozatunk további részeiben ezekkel a kérdésekkel foglalkozunk.

(Folytatjuk)

HIVATKOZOTT IRODALOM

- [1] Joachim Kurzke, Ian Halliwell. *Propulsion and Power: An Exploration of Gas Turbine Performance Modeling* (Springer, 2018);
- [2] Forrás: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Flughafen_Rostock-Laage1.JPG (Letöltve: 2022.9.29.);
- [3] <http://www.sztnh.gov.hu/feltalalok/jendrass.html> (Letöltve: 2021.1.21.) és <https://tudas.hu/a-xx-szazad-meghatarozo-merno-ke-is-magyar-volt-aki-a-nacikat-is-atverte/> (Letölve: 2022.9.29.);
- [4] Forrás: Varga Attila – CC BY-SA 3.0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=2693190> (Letölve: 2021.1.21.);
- [5] PBS Aerospace, PBS TJ100 Turbojet Engine <https://www.pbsaerospace.com/aerospace-products/engines/turbojet-engines/tj-100-turbojet-engine> (Letölve: 2021.1.12.);
- [6] Forrás: <https://www.coolthings.com/tst-14j-bonusjet-sailplane/> (Letölve: 2021.2.3.);
- [7] Forrás: By Alf van Beem – Own work, CC0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=36376707> (Letöltve: 2021.2.3.);
- [8] Forrás: https://www.researchgate.net/publication/322299242_Modelling_and_Characteristics_of_a_Novel_Multi-fuel_Hybrid_Engine_for_Future_Aircraft (Letöltve: 2021.1.12.);
- [9] Forrás: Reserarchgate – Knut Andreas Meyer https://www.researchgate.net/figure/The-full-RM12-jet-engine_fig1_283676568/download (Letöltve: 2021.2.3.);
- [10] Forrás: flickr.com/photos/dysanovic/2678713012 (Letöltve: 2022.10.2.);
- [11] Forrás: <https://www.flickr.com/photos/rolls-royceplc/14658761544/> (Letöltve: 2022.10.2.);
- [12] Turbofan Manufacturers. https://en.wikipedia.org/wiki/List_of_turbofan_manufacturers (Letöltve: 2021.2.26.);
- [13] Introducing the GE Aerospace GE90 Engine <https://www.geaerospace.com/propulsion/commercial/ge90> (Letöltve: 2022.10.2.);
- [14] „Trent engine family” Rolls-Royce <https://www.rolls-royce.com/products-and-services/civil-aerospace/widebody/power-of-trent.aspx> (Letöltve: 2022.10.2.);
- [15] Forrás: <https://www.flickr.com/photos/rolls-royceplc/40118972711/> (Letöltve: 2022.10.2.).

JEGYZETEK

- 1 A termodinamikai körfolyamatok feltalálói Nikolaus August Otto (Holzhausen an der Haide, 1832. június 10. – Köln, 1891. január 26.), Rudolf Christian Karl Diesel (Párizs, 1858. március 18. – La Manche, 1913. szeptember 30.) és George Bailey Brayton (Rhode Island, Egyesült Államok, 1830. október 3. – Kingbury, Egyesült Királyság, 1892. december 17.).
- 2 A kétáramú hajtóművek alapvető jellemzője a kétáramúsági fok (α), amelyet, a külső és belső tömegáramok arányaként értelmezünk. Megkülönböztetünk kis ($\alpha < 2$) és nagy kétáramúsági fokú hajtóműveket (a korszerű, nagy kétáramúsági fokú hajtóművek esetében $\alpha > 5$).
- 3 Fajlagos tüzelőanyag-fogyasztás: tolóerő, vagy teljesítményegységére eső tüzelőanyag-fogyasztás jellemzi a hajtómű tüzelőanyag-hatékonyságát, egyenértékű a hatásfokkal [kg/Nh, kg/kWh];
- 4 Dr. Varga Béla, „A gázturbinás korszak hajnala és a fejlesztés nehézségei I. rész” *Haditechnika* LVI. évf., 6. szám (2022): 67–73. DOI: 10.23713/HT.56.6.12
- 5 Sir Frank Whittle angol mérnök (Coventry, Egyesült Királyság, 1907. június 1. – Columbia, Maryland, Egyesült Államok, 1996. augusztus 8.)
- 6 Hans Joachim Pabst von Ohain német fizikus, mérnök (Dessau, Dessau-Roßlau, Németország, 1911. december 14. – Melbourne, Florida, Egyesült Államok, 1998. március 13.)
- 7 Jendrassik György Széchenyi-díjas magyar gépészmérnök (Budapest, 1898. május 13. – London, Egyesült Királyság, 1954. február 8.)
- 8 Szergej Tumanszkij repülőgép-hajtóműtervező (Minszk, Orosz Birodalom, 1901. május 21. – Moszkva, Szovjetunió 1973. szeptember 9.)
- 9 Fan (ventilátor) fokozat: nagy kétáramúsági fokú hajtóművek nagy átmérőjű első fokozata.

HADITECHNIKA FOLYÓIRAT

Olvasóink figyelmébe!

Tájékoztatjuk Tisztelt Olvasóinkat, hogy a *HADITECHNIKA* folyóirat szerkesztősége új címre költözött.

Székhelyünk és postacímünk:

Zrínyi Kiadó

1087 Budapest, Kerepesi út 29/b

Telefonszám: +3630/773-7494 · E-mail: haditechnika@hmzrinyi.hu.

A Haditechnika folyóirat digitális változata a laptapir.hu weboldalon is olvasható.