

41. ábra. A Safran hajtóműgyártó csoport Open Rotor koncepciója speciális lapátvégekkel próbálja az örvényrendszert semlegesíteni (Fotó: Eric Drouin / Safran)



Varga Béla*

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

A hajtóműfejlesztésekkel kapcsolatos kihívások

A szerző cikksorozatában bemutatja a propulziós rendszerek működését, a tolóerő keletkezésének összefüggéseit, ezen belül részletesen foglalkozik a gázturbinás propulziós rendszerek típusaival, és szerkezeti kialakításukkal. Tárgyalja a hajtóművek fejlesztésének és a klímaváltozás miatt is fontos szén-dioxid-kibocsátás összefüggéseit. A tanulmány negyedik részében elméletben kifejtett hajtóműfejlesztési lehetőségek közül, a szerző az ötödik részben részletesen bemutatja az Open Rotor koncepció, a köztes visszahűtött és hőcserélős hajtóművek, valamint a határréteg-elszívás megoldásait, mint a fejlesztés lehetséges irányait.

OPEN ROTOR²¹

Az Open Rotor ötlete nem új, tulajdonképpen csak felfrissítése egy korábbi Propfan vagy Unducted Fan megneve-

zésű, sokat ígérő fejlesztésnek. Ezeknek a hajtóműveknek a kutatásával és alkalmazásával az Egyesült Államokban – az 1973-as olajárrobbanás következtében – az 1970-es és '80-as években nagyon intenzíven foglalkoztak. Ennek eredményeként született a General Electric GE-36 hajtómű, amelyet egy McDonnell Douglas MD-80 típusú repülőgépre építve repültek a Farnborough-i Nemzetközi Repülőnapra 1988-ban (42. ábra). A hajtómű alkalmazásával a korabeli hajtóművekhez képest 25-30%-os tüzelőanyag-megtakarítást értek el, de az akkori zajnormákat a hajtómű nem tudta teljesíteni. Végül a technológiai és gazdasági kockázat, a zajszint, a közvélemény elutasítása és az üzemanyagárak csökkenése a projekt iránti érdeklődés csökkenéséhez vezetett.

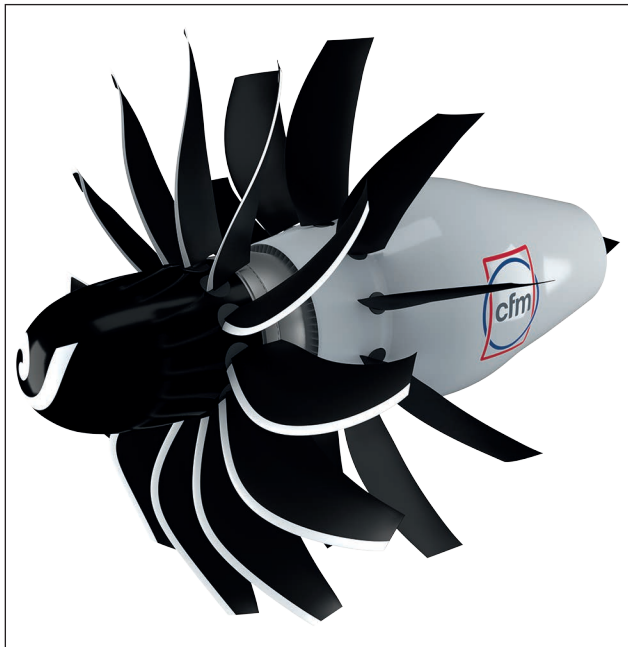
Manapság azonban – főleg a széndioxid-kibocsátás, illetve a klímaváltozás miatti aggodalmak – ismét e koncepció felé terelte a hajtóműtervezéssel foglalkozó szakemberek figyelmét. (41. ábra) A tüzelőanyag-hatékonyságot te-

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



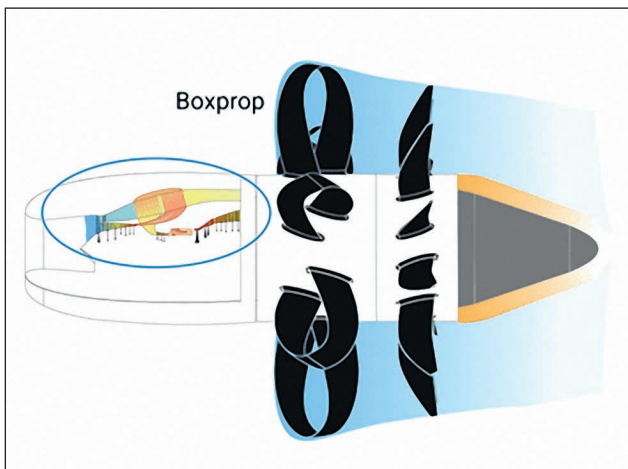


42. ábra. A General Electrics GE-36 UDF [48]



43. ábra. 2021. június 14-én a CFM – a Safran és a General Electric Aviation vegyesvállalata – bemutatta az Open Rotor koncepció által ihletett RISE (Revolutionary Innovation for Sustainable Engines) programot, amelynek célja a CO₂-kibocsátás 20%-os csökkentése a jelenlegi hajtóművekhez képest (Fotó: Safran)

44. ábra. A dobozlégcsavar szerkezeti kialakítása [51]



kintve ezeknél a hajtóműveknél még a mai korszerű reduktoros, nagy kétáramúsági fokú hajtóművekhez képest is kb. 15%-os fogyasztáscsökkenést predesztinálnak. [49] A tüzelőanyag-fogyasztás csökkenését a két nagy átmérőjű, ellenforgó lapátkoszorú eredményezi a propulziós hatásfok növelésén keresztül. További pozitív hatást jelent a külső áram burkolatának hiánya, amely ellenálláscsökkenéssel jár, ugyanakkor ez okozza az alkalmazást nehezítő nagy zajterhelést is. Egyrészt a zaj fő forrása, hogy az első lapátsor lapátvégeiről leváló örvénysort átmettszi a második lapátsor (43. ábra), másrészt a külső áram burkolatának hiánya miatt semmi nem tompítja a keletkező zajt.

A tervezők többféle megoldással próbálkoznak az örvényrendszer semlegesítése vagy legalábbis gyengítése érdekében. Ezek egyike a lapátvégek winglet-szerű kialakítása, amely jelentősen gyengíti a leváló örvénysor erejét. (41. ábra)

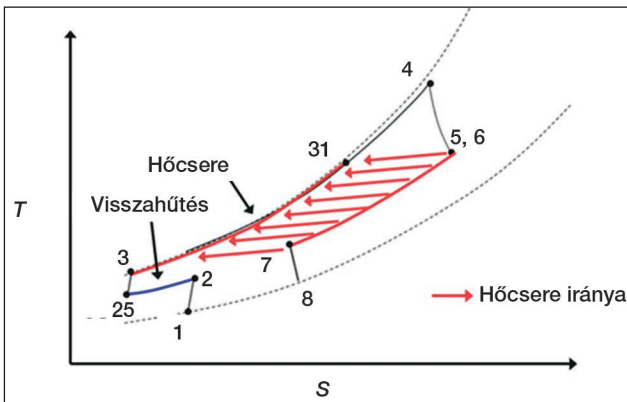
Az Ultimate program részét képezi a Boxprop (dobozlégcsavar) koncepció, amely szintén a zaj csökkentésére irányul. A koncepciót, amely páronként a lapátvégeknél csatlakozó mellső és hátsó lapátból áll, (formailag hasonlít egy dobozszárnyhoz), Richard Avellan és Anders Lundblad 2009-ben olyan megoldásként fogalmazta meg, amely a hagyományos lapátokhoz képest jelentősen csökkenti a lapátvégi örvények erősségét. (44. ábra)

Ez a megoldás növeli a hatásfokot, alacsonyabb interakciós zajkibocsátást és nagyobb szerkezeti merevséget eredményez. A nagyobb szerkezeti merevség lehetővé teszi a Boxprop lapátsor előre nyílazását, növelve a távolságot a hátsó, ellentétesen forgó lapátsor között. Ez a megnövelt távolság lehetővé tenné a lapátvégi, legöngyölődő örvénysor további gyengülését, amely a zaj szempontjából is előnyös. [50] Az Open Rotor-os hajtóművek rendszerbe állítását 2030 körül tervezik, de korántsem biztos, hogy a Boxprop elrendezést is alkalmazzák majd.

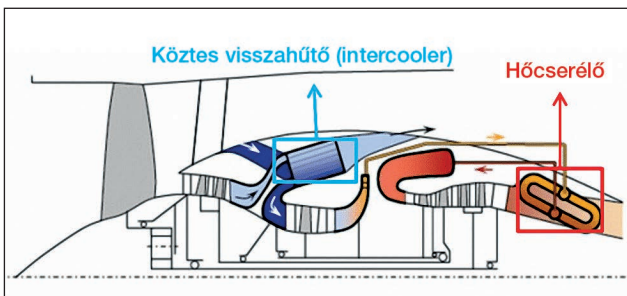
KÖZTES VISSZAHÚTOTT ÉS HŐCSERÉLŐS HAJTÓMŰVEK²²

A köztes visszahűtött hőcserélős hajtóművek (Intercooled and Recuperated Aero-engine – IRA) – ellentétben a Geared Turbofan és az Open Rotor hajtóművekkel –, a propulziós hatásfok helyett a hajtómű körfolyamatán keresztül, a termikus hatásfok javítását célozták meg. Több kutatási projekt is foglalkozott és foglalkozik ezzel az elgondolással, többek között az MTU Aero Engines AG²³ és a LEMCOTEC²⁴ európai kutatási projekt. Ez teljesen érthető, mert bár az alapelv egyszerű, de a megvalósítás rendkívül összetett. Nyilvánvaló, hogy a fúvócsövön kiáramló magas hőmérsékletű gázzal nagy energiát veszünk. A kompresszió során a köztes visszahűtés sem új megoldás, de annak már egy működő struktúrába történő beillesztése úgy, hogy sem a tömeg, sem a méret, sem az áramlási veszteségek ne nőjenek, rendkívül bonyolult feladat.

A körfolyamat T-s diagramját²⁵ a 45. ábra, míg a hajtómű sematikus vázlatát a 46. ábra szemlélteti. A diagramon jól látszik a változás a hagyományos Brayton-körfolyamathoz képest. A körfolyamat jellegzetes pontjainak számozása megegyezik a hajtómű sematikus ábráján a megfelelő keresztmetszetek számozásával. A legelső különbség egy hagyományos nagy kétáramúsági fokú hajtóműhöz képest az intercooler (hőcserélő), amely a kisnyomású kompresszorból kilépő áramot hűti a külső áram levegőjével (2–25) pontok között. Ennek eredményeként a nagynyomású kompresszormunka kisebb lesz ugyanolyan nyomásviszony létrehozásához. Az égőtérben azonban alacsonyabb



45. ábra. Hőcserélős, visszahűtött hajtómű körfolyamatának T-s diagramja (A szerző szerkesztése [52] alapján)



46. ábra. Köztes visszahűtő (intercooler) és hőcserélős hajtómű sematikus szerkezeti vázlata (A szerző szerkesztése [52] alapján)

hőmérsékletéről (3 pont) kell elkezdni az izobár hőközlést, amely többlet tüzelőanyag-felhasználást jelent. Így az intercooler önmagában nem sok segítséget jelent. Másrészről azonban a hőcserélő (recuperator) segítségével a (6–7) pontok között a forró égéstermék hője (a nagy része már veszteség-hő lenne) visszakerül az égőtér elé a (3–31) pontok között, így a tüzelőanyag égőtérben történő elégetésével csak a (31–4) pontok közötti izobár hőközlés hőjét kell lefedni.

Természetesen ezt a (6–7) pontok közötti hőt nem lehet teljes egészében visszajuttatni, hiszen maga a hőcserélőben lejátszódó folyamat is veszteséges.

A jelen projektek fő célja éppen a jó hatásfokú, kis tömegű, kompakt és kis áramlási veszteséggel járó hőcserélő tervezése. Ebben nagy szerepe van a ma már széles kör-

ben alkalmazott 3D-s áramlási szimulációknak, de még ezzel együtt is magának a hőcserélőnek a kifejlesztése is többéves fejlesztői tevékenységet igényelhet. A hajtóművet elhagyó gázáram hőmérséklete (8) sokkal alacsonyabb lesz, de maga a fúvócsőben lezajló expanzió is alacsonyabb hőmérséklet-tartományra tolódik, csökkentve a fúvócsőben keletkező tolóerőt. A jelenlegi fejlesztések a kompakt hőcserélő kialakítására összpontosulnak.

HATÁRRÉTEG-ELSZÍVÁS (BOUNDARY LAYER INGESTION – BLI)

A hagyományos, nagy kétáramúsági fokú hajtóművek tömeg- és ellenálláscsökkentése, valamint a tolóerő által a repülőgép szerkezetére ható terhelés kedvezőbb elosztása érdekében ígéretes lehet a tolóerő megosztása. Ez egyben lehetővé tenné az alap hajtómű fan fokozat átmérőjének csökkentését úgy, hogy a propulziós hatások növekedne az összességében nagyobb fan felület miatt. (47. ábra)

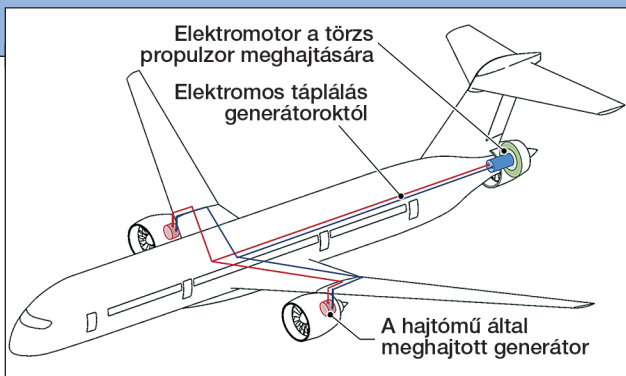
A propulziós törzs koncepció (Propulsive Fuselage Concept – PFC) lényege, hogy maga a törzs is része a propulziós rendszernek. Az elgondolás szerint a szívócsatorna mintegy körbe venné a törzs hátsó részét, és a fan oly módon történő elhelyezésével, hogy az „elnyelje” a törzs határrétegét, csökkenthető a repülőgép ellenállása, miközben még az előbb említett módon a propulziós hatások is javulhat. Természetesen e módszer hátrányokkal is rendelkezik. Ezek közé tartozik a szívócsatorna nyomásvesztésének növekedése, amely csökkenti a lefekteződés következtében létrejövő nyomásnövekedést, valamint, hogy a törzs hatására kialakult egyenetlen sebességmező rontja a fan fokozat működési körülményeit. [53]

A koncepciót alaposan megvizsgálták különböző projektekben; néhány ezek közül: a NASA „FuseFan”, a Bauhaus Luft-fahrt „Claire Liner”, a MIT „D8” és a NASA „STRAC-ABL” elemzések. A NASA elemzései kimutatták, hogy a BLI-technológia, a ma üzemelő repülőgépekhez képest képes a repülőgép tüzelőanyag-fogyasztásának akár 8,5%-kal történő csökkentésére.

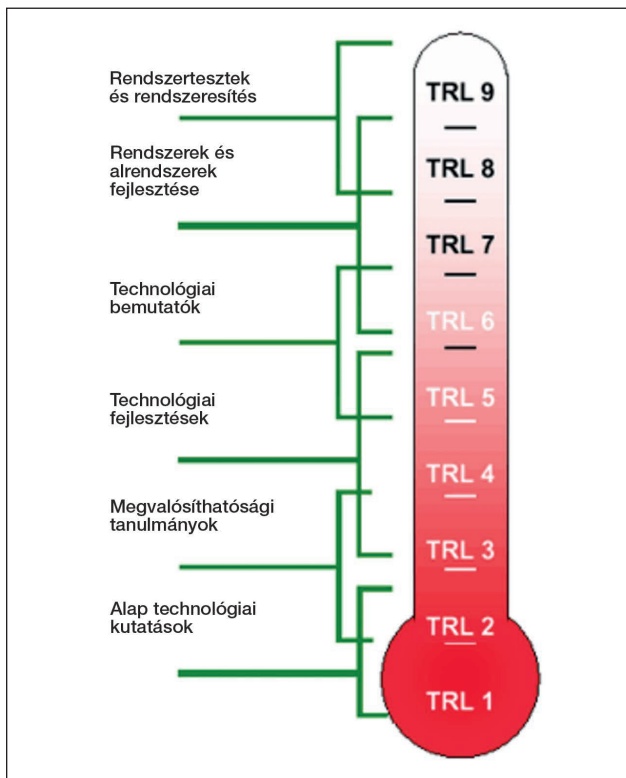
A Horizon 2020 keretprogram részeként az Európai Unió is finanszíroz egy olyan projektet, amelynek célja a PFC-koncepció vizsgálata CENTRELINE (ConcEpt validation sTudy foR fuselagE wakefilLing propulsioN intEgration) néven. (48. ábra) Ez egy kéthajtóműves elrendezés, ahol a harmadik elektromos meghajtású fan (propulzor) a fő hajtóművek generátoraitól kapja az elektromos táplálást. [54] A CENTRELINE projekt célkitűzése, hogy mind a CO₂, mind az NO_x-kibocsátás 11%-kal csökkenjen a fejlett ha-

47. ábra. Határréteg-elszívás megoldásának ábrázolása [53]





48. ábra. Az Európai Unió által finanszírozott Centreline program vázlata [54]



49. ábra. A NASA által kifejlesztett technológiai felkészültségi szintek (Technology Readiness Level – TRL) skálája (A szerző szerkesztése [56] alapján)

gyománys repülőgépekhez képest, amelyek hajtóművei, aerodinamikai megoldásai, szerkezete és rendszerei megfelelnek a 2035-ös rendszerbe állításra. [55]

ÖSSZEZÉS

A fenti fejezetben nem törekedtem és nem is törekedhettem a teljességre, hiszen a kutatások könyvtári szakirodalmat megtöltenének. A bemutatott elképzelések a kivitelezés különböző fázisaiban tartanak és törvényszerű, hogy nem mindegyik jut el a megvalósításig. A NASA létre hozott egy ún. TRL-skálát (Technology Readiness Level – technológiai felkészültségi, érettségi szint), amely a projekt érettségét mérhetővé teszi különböző jól definiálható fejlesztési szakaszokhoz kötve.

A skála kilenc szintet tartalmaz, amely az adott projekt szempontjából akár több tíz évet is jelenthet a rendszerbe állításig, vagy a fejlesztés kihullik valamelyik fázisban. (49. ábra)

(Vége a sorozatnak.)

HIVATKOZOTT IRODALOM

- [49] Larsson, L., Grönstedt, T., and Kyprianidis, K. G., (2011) Conceptual design and mission analysis for a geared turbofan and an open rotor configuration. In ASME 2011 Turbo Expo: Turbine Technical Conference and Exposition, American Society of Mechanical Engineers, pp. 359–370. <https://asmedigitalcollection.asme.org/GT/proceedings-abstract/GT2011/54617/359/351063> <https://doi.org/10.1115/GT2011-46451>;
- [50] Capitaio Patrao, Alexandre. (2018) On the Aerodynamic Design of the Boxprop Department of Mechanics and Maritime Sciences Division of Fluid Dynamics, Chalmers University of Technology Gothenburg, Sweden ISBN 978-91-7597-795-9 p. 3. https://research.chalmers.se/publication/505742/file/505742_Fulltext.pdf (Letöltve: 2022.12.6.) <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.22991.74408>;
- [51] Are major efficiency gains for the turbofan still in reach? (2018) <https://www.wearefinn.com/topics/posts/are-major-efficiency-gains-for-the-turbofan-still-in-reach/> (Letöltve: 2022.12.6.);
- [52] Misirlis, D., Vlahostergios, Z., Flouros, M., Salpingidou, C., Donnerhack, S., Goulas, A., Yakinthos, K. Intercooled Recuperated Aero Engine: Development and optimization of innovative heat exchanger concepts 2 nd ECATS Conference, 7-9 November 2016, Athens, Greece http://www.ecats-network.eu/uploads/2017/06/ECATS2016_2.10p-Misirlis.pdf (Letöltve: 2022.12.12.);
- [53] Seitz, Arne et al. (2018) Concept validation study for fuselage wake-filling propulsion integration Corpus ID: 132992953 31st. Congress of the International Council of the Aeronautical Sciences Belo Horizonte, Brazil 2018.; http://www.icas.org/ICAS_ARCHIVE/ICAS2018/data/papers/ICAS2018_0342_paper.pdf (Letöltve: 2022.12.12.);
- [54] ConcEpt validation sTudy foR fusElage wake-filLIng propulsioN intEgration <https://ec.europa.eu/inea/en/horizon-2020/projects/h2020-transport/aviation/centreline> (Letöltve: 2021.2. 22.);
- [55] Ploetner, K. O., Rothfeld, R., Urban, M., Hornung, M., Tay, G., Oguntona, O. (2017) Technological and Operational Scenarios on Aircraft Fleet-Level towards ATAG and IATA 2050 Emission Targets in 17th AIAA Aviation Technology, Integration, and Operations Conference 2017 Denver, Colorado <https://arc.aiaa.org/doi/pdf/10.2514/6.2017-3771> <https://doi.org/10.2514/6.2017-3771>;
- [56] TEC-SHS (2008) Technology Readiness Levels Handbook for Space Applications TEC-SHS/5551/MG/ap issue 1 revision 6 https://artes.esa.int/sites/default/files/TRL_Handbook.pdf (Letöltve: 2022.12.12.).

JEGYZETEK

- 21 Open Rotor: nyitott (nem burkolt) forgórészes hajtóművek.
 22 Köztes visszahűtött hőcserélős hajtóművek: Intercooled and Recuperated Aero-engine (IRA).
 23 MTU Aero Engines AG – német repülőgép-hajtóművek gyártója, fejlesztője és szerviztámogatást is nyújt.
 24 LEMCOTEC – Low Emissions Core-Engine Technologies.
 25 T–s diagram: hőmérséklet–entrópia diagram.