

Varga Béla

## Az adaptív hajtómű-technológia megjelenése a katonai repülés területén

*A múlt század 60-as éveitől mind a polgári, mind a katonai repülésben az egyszerű, egyáramú sugárhajtóműveket felváltották a kétáramú hajtóművek. Először a kis kétáramúsági fokú hajtóművek jelentek meg, majd a kétáramúsági fok folyamatosan növekedett a kereskedelmi repülőgépek kétáramú hajtóműveinél. Manapság a kis kétáramúsági fokú hajtóművek jellemzően a többfeladatú harcászati repülőgépek erőforrását képezik. Maga a hajtómű kialakítása jelentősen nem változott évtizedek óta. Ehhez képest jelenthet új szintet és igazi minőségi ugrást az adaptív hajtómű-technológia. A cikkben ezt a fejlesztési folyamatot, illetve a várt előnyöket mutatom be.*

**Kulcsszavak:** kis kétáramúsági fokú hajtómű, propulziós hatásfok, elfolyási ellenállás, adaptív hajtómű-technológia

### 1. Bevezetés

A második világháborút követően a megnövekedett sebesség- és az azzal összefüggésben álló teljesítményigény miatt a tervezők a dugattyús-légcsavaros repülőgépmotorok helyett új megoldásokat kerestek. Ebben az útkeresésben meg kell említeni az angol Frank Whittle munkásságát, aki az első olyan gázturbinás hajtóművet készítette el, amely már minden olyan gépegységgel rendelkezett, amellyel egy mai modern gázturbinás hajtómű is. A német Hans von Ohain tervezte az első működőképes, repülőgépbe épített gázturbinás sugárhajtóművet, a Heinkel HE S3-at, amely az első sugárhajtású repülést lehetővé tette. Meg kell emlékeznünk a magyar Jendrassik Györgyről is, a Ganz-gyár mérnökéről, akinek 1938-ban megépített gázturbinája 16 400 f/min fordulatszámra és 72,5 kW teljesítménynél 21,2% effektív hatásfokot ért el [4]. Majd az 1950-es évektől kezdődően véglegesen berobbant a gázturbinás korszak a repülés területére a folyamatos fejlődés és a szerepkör szerinti szerkezeti specializálódás mellett.

### 2. Kétáramú gázturbinás hajtóművek (turbofan)

A múlt század 60-as éveitől mind a polgári, mind a katonai repülésben az egyszerű, egyáramú sugárhajtóműveket kezdték felváltani a kétáramú hajtóművek. A legfontosabb különbség az egyáramú hajtóművekhez képest, hogy a hajtóműbe beszívott levegő egy része elkerüli

a gázgenerátor-egységet, és a tolóerő egy része az úgynevezett külső áramban keletkezik. Ennek mértéke a kétáramúsági fokkal jellemezhető, amely a külső és a belső csatorna (gázgenerátor-egység) tömegáramainak viszonyszámát jelenti.

A Rolls-Royce Conway volt a világ első sorozatban gyártott kétáramú hajtóműve 0,3-as kétáramúsági fokkal, hasonlóan a sokkal újabb 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 a civil és a katonai felhasználásra tervezett hajtóművek fejlesztési irányának szétválása ettől kezdve figyelhető meg.

Ez azt jelenti, hogy a tervezők eljutottak az egyáramú sugárhajtóművektől a kis kétáramúsági fokú, majd az egyre nagyobb kétáramúsági fokú hajtóművekig, előre lépve ezzel a fajlagos tüzelőanyag-fogyasztás csökkentésében. Más szóval a manapság utasszállító repülőgépeken (és a katonai szállító repülőgépek egyes típusain) alkalmazott kis fajlagos tolóerejű/nagy kétáramúsági fokú hajtóművek az 1960-as évektől a nagy fajlagos tolóerejű/kis kétáramúsági fokú hajtóművekből alakultak ki az évek során. Az egyre magasabb termikus határfokon kívül ebben kiemelt szerepet a növekvő kétáramúsági fokból származó propulziós határfok-növekedés jelentett.

### 3. Kis kétáramúsági fokú hajtóművek

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

A kisebb méretű kis kétáramúsági fokú hajtóművek – jellemzően utánégető nélkül – a kiképző, könnyű harcászati repülőgépek erőforrását képezik. Ez a kategória a haladó kiképzőgépek kategóriájából alakult ki, szintén lehetővé téve többfeladatú felhasználást a könnyű támadótól a felderítő feladatokig, míg közben lehetővé teszi a kiképzési feladatok megoldását is. Lassabbak, mint 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: L-159 Alca, Hawk, Yak-130, Aermacchi MB-346, Alpha Jet.

### 4. Kis vagy nagy kétáramúsági fok

Láthatólag a fent említett hajtómű-család kiforrott, széles körben alkalmazott és az üzemeltetésével kapcsolatban rengeteg tapasztalattal rendelkeznek az üzemeltetők és a gyártók. Mégis vannak ennek a kategóriának olyan hátrányai, amelyeket a jelenlegi elrendezéssel

szinte lehetetlen megoldani. Ha elemezzük, hogy milyen alapvető követelményeknek kellene megfelelnie egy ilyen hajtóműnek, akkor a következő két követelményt kell kiemelni.

Egyrészt a hajtóműnek rendelkeznie kell a hagyományos jellemzőkkel, például nagy fajlagos tolóerővel az utánégető nélküli szupercirkálás (*supercrusing*) megvalósításához, illetve nagy emelkedő és gyorsulási képességgel. Másrészt a nagy (nagyobb) kétáramúsági fokú *turbofan* tulajdonságokkal csökken a fajlagos tüzelőanyag-fogyasztás, nő a hatótávolság és/vagy a járőrözési idő (csökken a szükséges légi utántöltési kapacitás).

Sajnos a nagy repülési sebességhez tartozó nagy fajlagos tolóerő és a jobb szubszonikus hatékonyság érdekében az alacsony fajlagos tolóerő egymásnak ellentmondó követelmény, ami nehezen feloldható probléma.

$$F = \dot{m}(w - v); \quad \eta_{prop} = \frac{2v}{(w-v)+2v} \quad (1)$$

A (1) egyenlet jól szemlélteti ennek a lényegét. A bal oldali képletben a zárójelben lévő tag  $(w - v)$  a fajlagos tolóerő, ahol a  $(w)$  a fúvócsőben felgyorsított gáz hajtóműből való kilépési sebessége,  $(v)$  pedig a repülési sebesség. A propulziós hatásfok a jobb oldali képlet. Jól látható, hogy a fajlagos tolóerő a propulziós hatásfok képletében a nevezőben van, ami értelemszerűen nagy fajlagos tolóerő esetében a propulziós hatásfok csökkenéséhez vezet, de elkerülhetetlen a maximális tolóerő eléréséhez. Ugyanakkor szubszonikus járőrözéshez vagy a maximális hatótávolság (repülési idő) eléréséhez, ami sokkal mérsékeltbb tolóerő-szükségletet jelent, a fent említett okok miatt sokkal kedvezőbb lenne az alacsonyabb fajlagos tolóerő. Sajnos a tolóerő csökkentésekor ez nemcsak a fajlagos vonóerő csökkenéséből származik, hanem a tömegáram  $(\dot{m})$  csökkenéséből is. Ez azonban további veszteség létrejöttét is felveti.

Ez abból adódik, hogy a szívócsatornát úgy méretezik, hogy átengedje a maximális közegáramot, amelyet a hajtómű igényelhet, és minden egyéb esetben a hajtómű tényleges levegőfogyasztása és a maximális levegőfogyasztás közötti mennyiséget elengedje a szívócsatorna mellett. Ez ellenállás-növekedéssel jár, amelynek az angol kifejezése „*spillage drag*” (elfolyásból származó ellenállás).

A cél az olyan kialakítás, hogy a tolóerő-csökkenés lehetőleg csak a fajlagos tolóerő  $(w - v)$  csökkenésén keresztül valósuljon meg a tömegáram  $(\dot{m})$  állandósága mellett, ami részben lehetővé teszi, hogy a szívócsatorna mindig közel névleges üzemmódban dolgozzon, részben pedig a tömegáramok modulálásával (a magból a külső áramba terelésével) növelhető a kétáramúsági fok (BPR)<sup>1</sup> és ezzel a propulziós hatásfok. A folyamat a 2. egyenletsoron keresztül jól követhető.

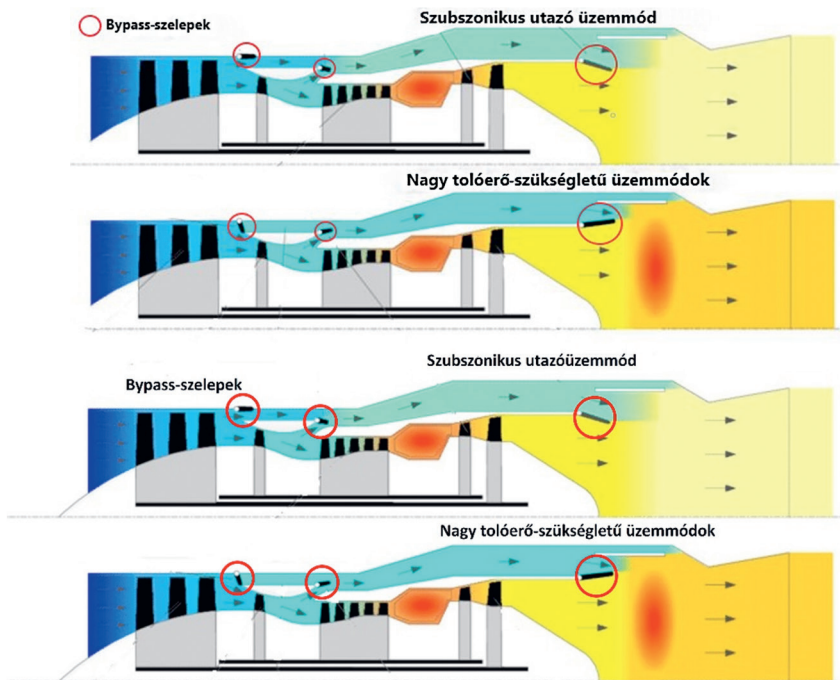
$$F = \dot{m}(w - v) \downarrow; \quad \dot{m} = \dot{m}_{k\ddot{u}l\ddot{u}l\ddot{u}l\ddot{u}l} \uparrow + \dot{m}_{mag} \downarrow = const; \quad (w - v) \downarrow; \quad BPR = \frac{\dot{m}_{k\ddot{u}l\ddot{u}l\ddot{u}l\ddot{u}l} \uparrow}{\dot{m}_{mag} \downarrow} \quad (2)$$

Az elmúlt 50 évben számos repülőgéphajtómű-gyártó cég, egyetemi és kutatóközpont végzett elméleti vizsgálatokat különböző elrendezésű változó ciklusú hajtóművekkel (VCE)<sup>2</sup>. Ezeknek a kutatásoknak pontosan a fenti feltételeknek a teljesítése volt a célja. A 1. ábrán olyan sematikus hajtóművet láthatunk, amelyben az áramlás modulálása a jelölt *bypass*-szelepekkel történik. Természetesen a helyzet nem olyan egyszerű, ezért sokáig ezeknek a hajtóműveknek

<sup>1</sup> Bypass Ratio.

<sup>2</sup> Variable Cycle Engine.

a számítógépes matematikai modellezésén kívül nem sok minden történt. Ezt törte meg az Egyesült Államok az adaptív ciklusú hajtóművek (ACE)<sup>3</sup> fejlesztési projekt-sorozatával. Az új megnevezés lehetséges, hogy csak terminológiai különbség, de jelezheti, hogy ez a hajtómű továbblépést jelent még az eredeti eszméhez (VCE) képest is, hiszen mint látni fogjuk, megjelenik a kettős *bypass*, vagyis ezek a hajtóművek háromáramú hajtóművek.



1. ábra  
A változó ciklusú hajtómű sematikus ábrája [3]

## 5. Az adaptív hajtómű-technológia története

A gyakorlati megvalósítás és a projektek időrendje:

- 2007: az Egyesült Államok légereje és haditengerészete fogalmazta meg az adaptív hajtóművek koncepcióját az Adaptive Versatile Engine Technology (ADVENT) program keretében, amely a nagyobb Versatile Affordable Advanced Turbine Engines (VAATE) program része lett;
- 2012: megtörtént a Pratt & Whitney és a General Electric kiválasztása az Adaptive Engine Technology Demonstrator (AETD) programba, amelynek során továbbfejlesztették a technológiát, demonstrációs hajtóművekkel végzett tesztekkel;

<sup>3</sup> Adaptive Cycle Engine.

- 2016: életbe lépett az Adaptive Engine Transition Program (AETP) 6. generációs vadászrepülőgépek (New Generation Air Dominance [NGAD] Aircraft) meghajtására. A GE hajtóműve az XA100, a P&W-hajtómű pedig az XA101 jelölést kapta.

Az adaptív hajtóművek legfontosabb tulajdonságai:

- az adaptív hajtómű egy háromáramú hajtómű, ahol a harmadik áram részben a régi elnevezés szerint a kétáramúsági fok növelését, részben a hajtóműben keletkező hő elvezetését biztosítja a törzs elemeinek védelme érdekében (*thermal management*);
- az áramlás modulálásának képességével a magba vagy a középső áramba szabályozni lehet a hajtómű kétáramúsági fokát és optimalizálni a *fan* nyomásviszonyát a tüzelőanyag-fogyasztás, illetve a tolóerő szempontjából;
- a koncepció a tüzelőanyag-hatékonyság növelését célozza, hogy megnöveljék a repülőgép hatótávolságát járőrözés alatt, miközben továbbra is fenntartják a lehetőségét a nagy fajlagos tolóerő létrehozásának.

### 5.1. General Electric XA100-GE-100

Az XA100-as hajtómű tesztelése 2022 szeptemberében fejeződött be az Arnold Engineering Development Complex nevű intézetben. A 6. generációs repülőgépekben (NGAD) tervezik felhasználni. A GE ugyanakkor hangsúlyozza, hogy az XA100-as hajtómű kompatibilis az F35A és az F35C repülőgéppel a törzs módosítása nélkül, de a tesztelés azt mutatta, hogy a hajtómű potenciálisan módosítható az F-35B repülőgép meghajtására is. Ez azért lényeges, mert a vártnál gyakrabban kell kiépiteni az F135-ös (Pratt & Whitney) hajtóműveket nem tervezett karbantartáshoz, elsősorban a forró tér javításai miatt. A probléma megoldásának egyik alternatívája a Pratt & Whitney által ajánlott Engine Enhancement Package (EEP) program, a másik az F135 hajtóművek cseréje az új fejlesztésű XA100-GE-100 hajtóművekre, amely valószínűleg nem lenne ellenére a GE-nek, és lobbizik is erőteljesen ezért a megoldásért [1].

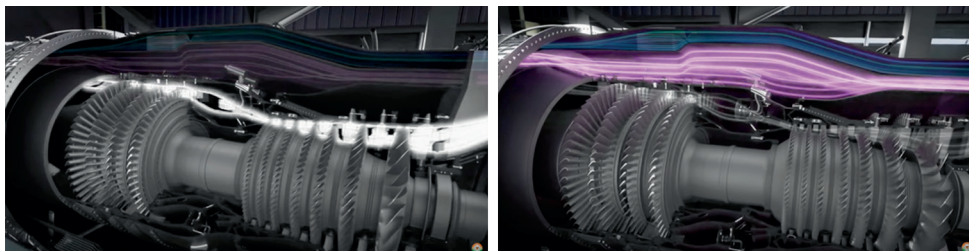
### 5.2. Pratt & Whitney XA101

2017-ben a Pratt & Whitney sikeresen tesztelt egy F135-maggal (gázgenerátor-egység) rendelkező, adaptív háromáramú *fanegységet*, és XA101 elnevezéssel a „Growth Option 2.0” program keretében ezt az F135 hajtómű továbbfejlesztésének tekintette. 2018 júniusában a Pratt & Whitney megváltoztatta az F135 fejlesztési tervét, és helyette adaptív *fanegységet* kínált „Growth Option 2.0” programban, új magrésszel. 2020-ban az F135 fejlesztési terve „Growth Option 2.0”-ról „Engine Enhancement Packages”-re (EEP) módosult, míg a háromáramú XA101 új hajtómű, amelyet potenciálisan az F-35A-k későbbi új erőforrásának terveznek. Az XA101 földi tesztelése 2021 szeptemberében kezdődött [5].

## 6. A General Electric XA100-GE-100 fejlesztési eredményei

A GE az általa fejlesztett hajtóművel kapcsolatban több részletet megosztott. Ez alapján az XA100-GE-100 hajtómű 3 fontos innovációt ötvöz a generációs változás érdekében:

- adaptív, képes nagy tolóerőt biztosítani a maximális teljesítmény eléréséhez, valamint képes az üzemmódot optimalizálni a tüzelőanyag-megtakarítás szempontjából, lásd 2. ábra;
- a harmadik áram egyben lehetővé teszi az ezekben a nagy teljesítményű hajtóművekben keletkező nagy mennyiségű hő elvezetését;
- a fejlett alkatrész-technológiák széles körű alkalmazása, beleértve a kerámia mátrix kompozitokat (CMC)<sup>4</sup>, a polimer mátrix kompozitokat (PMC)<sup>5</sup> és az additív gyártást [2].



2. ábra

A General Electric XA100-GE-100 hajtóműve teljes tolóerő- (bal) és utazóüzemlében (jobb) [2]

További eredmények a jelenleg alkalmazott F135 hajtómű teljesítményéhez képest:

- 30%-kal megnövekedett hatótávolság;
- 25%-kal jobb tüzelőanyag-fogyasztás, kisebb szükséges légi utántöltési kapacitás;
- a CO<sub>2</sub>-kibocsátás csökkenése, valamint alkalmas alternatív tüzelőanyagok égetésére;
- több mint 10%-os tolóerő-növekmény, 20–40%-kal nagyobb gyorsulás.

A GE szerint a kiemelkedő tolóerő, a tüzelőanyag-hatékonyság, a hőelvezetés megoldása, a nagy szilárdságú, de könnyű konstrukció, illetve főleg ezek egy rendszerben történő egyesítése többet jelent, mint ezeknek a képességeknek a pusztá összegzése [1].

## 7. Összefoglalás

Az adaptív ciklusú hajtóművek (ACE) alkalmasak a nagy tolóerő-szükségletű feladatokra, mint például az utánégető nélküli szuperszonikus cirkálás, az intenzív gyorsítás vagy az emelkedés, és rendelkezniük kell az alacsonyabb fajlagos tüzelőanyag-fogyasztással, például a nagy távolságú felderítés esetén. Járulékos előnynek tekinthető, hogy ezeknek a hajtóműveknek a fojtása lehetséges állandó közegáram mellett, ami a szívócsatorna elfolyásból származó ellenállásának (*spillage drag*) javulását eredményezi, ezzel növelve a „beépített tolóerő” nagyságát. Ehhez

<sup>4</sup> Ceramic Matrix Composites.

<sup>5</sup> Polimer Matrix Composites.

a fejlesztéshez jelenleg a Pratt & Whitney és a General Electric kapott mandátumot. Láthatóan a Pratt & Whitney-fejlesztés kaotikusabb. A cég nehezen találta meg az irányvonalat az új fejlesztéshez, és kezdetben a meglévő megoldások toldozgatásához fogtak. A GE bátrabban nyúlt új megoldásokhoz, és a hajtóműve láthatóan előbbre tart a fejlesztésben, ami jelentős üzleti sikert hozhat a cégnek.

## Felhasznált irodalom

- [1] GE Aerospace. XA100 Adaptive Cycle Engine. Revolutionary Capabilities To Deter Geopolitical Threats. Online: [www.geaerospace.com/propulsion/military/xa100](http://www.geaerospace.com/propulsion/military/xa100)
- [2] GE News Staff: Testing on GE's First XA100 Adaptive Cycle Engine Concludes, Proves Out Transformational Capabilities. Online: <https://blog.geaerospace.com/technology/testing-on-ge-s-first-xa100-adaptive-cycle-engine-concludes-proves-out-transformational-capabilities>
- [3] S. Lu et al., „Research on a Component Characteristic Adaptive Correction Method For Variable Cycle Engines,” International Journal of Turbo and Jet Engines, 2021. Online: <https://doi.org/10.1515/tjeng-2021-0026>
- [4] Szellemi Tulajdon Nemzeti Hivatala: Jendrassik György. Online: [www.szttnh.gov.hu/hu/magyar-feltalalok-es-talalmanyaik/jendrassik-gyorgy](http://www.szttnh.gov.hu/hu/magyar-feltalalok-es-talalmanyaik/jendrassik-gyorgy)
- [5] Wikipedia the Free Encyclopedia: Pratt & Whitney XA101. Online: [https://en.wikipedia.org/wiki/Pratt\\_%26\\_Whitney\\_XA101](https://en.wikipedia.org/wiki/Pratt_%26_Whitney_XA101)

## Adaptive Engine Technology in Military Aviation

*From the sixties of the last century, both in civil and military aviation, the pure turbojet engines were replaced by the two-stream engines. The low bypass ratio engines appeared first, and then the bypass ratio steadily increased in commercial aircraft engines. Nowadays, low bypass ratio engines are typically the power sources of multi-role combat aircrafts. The design of the engine itself has actually not changed for decades. In comparison, adaptive engine technology can represent a new level and a real leap in quality. In this paper, I present this development process and the expected benefits.*

**Keywords:** *low bypass ratio engine, propulsive efficiency, spillage drag, adaptive engine technology*

Dr. Varga Béla  
egyetemi docens  
Nemzeti Közzolgálati Egyetem  
Hadtudományi és Honvédtisztképző Kar  
Repülő Sárkány-hajtómű Tanszék  
[varga.bela@uni-nke.hu](mailto:varga.bela@uni-nke.hu)  
[orcid.org/0000-0003-3454-0825](https://orcid.org/0000-0003-3454-0825)

Béla Varga, PhD  
Associate Professor  
Ludovika University of Public Service  
Faculty of Military Science and Officer Training  
Department of Aircraft and Engine  
[varga.bela@uni-nke.hu](mailto:varga.bela@uni-nke.hu)  
[orcid.org/0000-0003-3454-0825](https://orcid.org/0000-0003-3454-0825)

„A TKP2021-NVA-16 számú projekt az Innovációs és Technológiai Minisztérium Nemzeti Kutatási Fejlesztési és Innovációs Alapból nyújtott támogatásával, a TKP2021-NVA pályázati program finanszírozásában valósult meg.”

