

XXXI. Országos Tudományos Diákköri Konferencia
Had- és Rendészettudományi Szekció
Budapest, 2013. április 16-18.
Nemzeti Közsolgálati Egyetem
Hadtudományi és Honvédtisztképző Kar

KÖNNYŰ-VADÁSZREPÜLŐGÉP HAJTÓMŰVEK
ÖSSZEHASONLÍTÁSA

Jelige: *LWF*

Dolgozat lezárásának időpontja: 2012, *október*

TARTALOMJEGYZÉK

TARTALOMJEGYZÉK.....	1
1. A DOLGOZAT CÉLJA, TÉMAVÁLASZTÁS INDOKLÁSA.....	2
2. A GENERAL ELECTRIC F414 HAJTÓMŰCSALÁD.....	3
2.1 Bevezető.....	3
2.2 General Electric történelem.....	4
2.3 Korai erőfeszítések.....	5
2.4 A GE Aviation napjainkban.....	6
2.5 Az F414 hajtóműről általánosan.....	7
2.6 Az F414-es hajtómű gyártástechnológiája.....	8
2.7 Az F414-es hajtómű kifejlesztésének története.....	10
2.8 A hajtómű akusztikai tesztjei.....	12
2.9 A hajtómű továbbfejlesztése.....	14
2.10 A hajtóműcsalád tagjainak összehasonlítása.....	16
2.11 Az F414 variánsai.....	23
2.12 A fejezet összefoglalása.....	24
3. A KLIMOV RD-33 HAJTÓMŰCSALÁD.....	26
3.1 Bevezető.....	27
3.2 Klimov történelem.....	27
3.3 Tervezési fázisok.....	30
3.4 Az RD-33-ról általánosan.....	33
3.5 Az RD-33 hajtómű kifejlesztésének története.....	34
3.6 A hajtóművek levegő-beömlőnyílásai.....	38
3.7 Az RD-33 hajtómű főbb variánsai.....	40
3.8 A hajtóműcsalád tagjainak összehasonlítása.....	49
3.9 A fejezet összefoglalása.....	55
4. HAJTÓMŰVEK SZORÍTÓBAN.....	56
5. ÖSSZEFOGLALÁS.....	61
6. FELHASZNÁLT IRODALOM.....	62

1. A DOLGOZAT CÉLJA, TÉMAVÁLASZTÁS INDOKLÁSA

Dolgozatom témájának a könnyű-vadászrepülőgép hajtóművek összehasonlítását választottam. A könnyű-vadászrepülőgép definícióját az Egyesült Államokban futott LWF¹ program fogalmazta meg, 1965-ben gazdasági megfontolásokból létrehoztak egy olyan felosztást, ami 18.100 kg-ig magába tömöríti a harcászati vadászrepülőgépeket [1]. Ez a csoportosítás a mai napig fennáll, az e tömeg feletti, úgynevezett nehéz-vadászrepülőgépek közé olyan légijárművek tartoznak, mint az F-15 Eagle, vagy a Szu-27 Flanker, míg a könnyű-vadászrepülőgépeket az F-16 Falcon, F-18 Hornet, a MiG-29 Fulcrum, vagy a JAS-39 Gripen képviseli.

Választásom azért esett erre a kategóriára, mert a Magyar Honvédség légierijében csak könnyű-vadászrepülőgépeket rendszeresítettek, és szeretném az olvasót rávilágítani arra, hogy gépeink hajtóművei a kategóriában hol helyezkednek el. Bemutatom a közelmúltat képviselő MiG-29-ben üzemelő Klimov RD-33 hajtóművet, továbbá az F414-et, mely a jövő Gripenjeit fogja hajtani. Ismertetem a hajtóműgyárak történelmét, melyből végigkövethető a témában szereplő hajtóművek kibontakozása a koncepciótól a gyártástechnológián át egészen a megvalósításig. Dolgozatom végén összehasonlítom e felosztásban résztvevő hajtóműveket, és következtetéseket vonok le.

¹ LWF - Lightweight Fighter - Könnyű-vadászrepülőgép

2. A GENERAL ELECTRIC F414 HAJTÓMŰCSALÁD

2.1 Bevezető

Ebben a fejezetben bemutatom a General Electric által kifejlesztett F414-es hajtómű, és a hozzá tartozó hajtóműcsalád. Érdekes tudni, hogy a következő generációs JAS-39 Gripen meghajtásáról fog gondoskodni, és ez azért fontos, mert Magyarország is üzemelteti az említett harcászati repülőgépet. Tehát közvetetten mi magyarok is érintve vagyunk, hiszen a Gripen fejlesztése nem állt meg a gyártó számára, folyamatos újít, hogy a repülő megfeleljen a kor aktuális kihívásainak. Ezek a technikai újdonságok akár be is gyűrűzhetnek a Magyar Honvédség légierijének berkeibe. Józan üzemeltető fokozottan figyeli a gyártó cég fejlesztéseit, odafigyel olyan lehetőségekre, amellyel a repülőgép jobb harcászati teljesítményt, és költséghatékonyabb üzemeltetést ad.

Az F404 licenszben gyártott típusa a Volvo RM12, a Magyar Légierő JAS-39 Gripen harcászati vadászrepülőgépben dübörög. Mivel országunk e repülőgép rendszeresítése mellett döntött, így fontos ismerni gépünk további lehetőségeit. Azzal, hogy vettünk egy képességet nem elégedhetünk meg. A lízing szerződésekben foglalt repülőgépek lassan 10 évesek lesznek, ideje a típuson belüli fejlesztéseket figyelemmel követni, ha nem akarunk lemaradni. A svéd Saab Group jelenlegi Gripen Demonstrator repülőeszközében üzemelteti az F414-es hajtóművet, melyet az F404-ből fejlesztettek tovább. A Demo repülőgép a következő E típus előfutára, egy olyan gyártmány, melyre minden eddigi fejlesztés felkerült, hogy a későbbi tömeggyártás során a felmerülő hiányosságokat kiküszöböljék.



1. ábra: A JAS-39 Gripen Demo²

² Forrás: Farnborough-i Gripen prezentációból.

Dolgozatomban azonban mégis a USN³ által üzemeltetett F/A-18E/F Super Hornet harcászati repülőgépet emelem ki - mely már 10 éve használja az F414-es hajtóművet - mivel ezzel a típussal már van hosszú távú üzemeltetési tapasztalat. A Super Hornet példája rendkívül jól tükrözi a Gripen jelenlegi és jövőbeli fejlesztéseit. Az eredetileg is kiforrott Horneteket az erősebb Super Hornetekké alakították. Ez a történet olyan, mint a Gripenek esetében várható, ahol a C/D verziókat E-re fejlesztik (F, azaz a kétüléses verzió nem fog épülni, mivel a D verzió elegendő a repülőgép üzemeltetésének elsajátításához), közbeiktatva a kísérleti Demonstrator gépet. A hajtómű közös, mind a két modernizált változat az F414-est működteti. A különbség annyi, hogy 10 évvel később valósul meg a svéd eszköz az amerikai társához képest.

Ez az idő a Super Hornet részéről lehetővé tette, hogy ma már hozzáférhető jó néhány publikus üzemeltetési statisztika, elemzés és forrás. Ezeknek a felhasználásával készítettem az írásomat, ahol foglalkoztam a hajtómű kifejlesztésének történetével, az építés alatt felhasznált új gyártási technológiákkal, a továbbfejlesztési igényekkel, tesztüzemű verziókkal. Kiemelem a költséghatékony és gazdaságos üzemelés lehetőségeit, és foglalkozom a zajcsökkentés módjaival. Végül összehasonlító ábrákon szemléltetem a hajtóműcsalád tagjainak főbb tulajdonságait.

2.2 General Electric történelem

A General Electric vállalat egy amerikai multinacionális cég Schenectady-i székhellyel bejegyezve. A központ Fairfieldban található Connecticut államban. A cég több szegmenst foglal magába, úgymint az energiaszektor, technológia, ipar és fogyasztói szolgáltatások. 2011-ben a GE⁴ a Fortune magazin top 500 bruttó bevétellel rendelkező amerikai cégek listáján a hatodik helyen szerepelt, valamint a legjövedelmezőbb kategóriában a 14. helyezést érte el. A Forbes Global 2000 állítása alapján a harmadik legnagyobb vállalat, 63. legzöldebb a Newsweek szerint, és a 19. leginnovatívabb cég [2].



2. ábra: A GE Aviation logója.⁵

³ USN – United States Navy - Egyesült Államok Haditengerészete

⁴ GE – General Electric

⁵ Forrás: <http://floridareview.com/wp-content/uploads/2012/06/ga-1.jpg>

A GE Aviation, mely a repülőtechnika köré épült, egyik leányvállalata a GE-nek. Központja Evendaleben (Ohio) található. A GE Aviation a repülőgéphajtómű-gyártó cégek közül kimagasló pozícióban szerepel. Termékeit leginkább a polgári repülésben üzemeltetik, de a katonai repülés sem elhanyagolható, sőt jelen esetben a dolgozat témáját is alkotja. A divízió GEAE⁶ néven fut 2005 óta. A GE Aviation olyan nagy hajtóműgyártók vetélytársa, mint a Rolls-Royce és a Pratt & Whitney. A GE együttműködik a francia repülőgép- és rakétahajtóművekkel foglalkozó SNECMA⁷ vállalattal, és közösen működtetik a CFM⁸ International divíziót [3].

2.3 Korai erőfeszítések

A GE Aviation története az 1900-as évek elejéig nyúlik vissza. 1903-ban Sanford Alexander Moss turbófeltöltőket fejlesztett a GE részére. Ezzel hozzájárult ahhoz, hogy az elkövetkezendő tíz évben történt repülési rekordokat az ő által fémjelzett eszköz segítségével valósítsák meg. Kezdetben a repülési magasság limitálva volt, majd a II. világháború során bebizonyosodott, hogy a turbófeltöltők léte elengedhetetlen a légsavarral történő nagy magasságú repülésekhez. A GE ennek a technológiának az éllovasa volt. Míg a többi vállalat a turbófeltöltőt közvetlenül a motortengelyről hajtotta, addig a GE a kipufogó gázokkal hozta működésbe, mellyel lényegesen nagyobb teljesítményt tudott biztosítani [3].

A Frank Whittle által 1941-ben megalkotott W.1 sugárhajtóműnél természetesen a GE volt a gyártópartner, a megalapozott hírének köszönhetően. A fejlesztések során megalkották a J33-at, mely az első rendszeresített gázturbinás vadászrepülőgép, a P-80 Shooting Star meghajtása lett. 1945-ben a Lynn városi gyár megkapta a GE Gázturbina Divízió nevet. Mivel a GE nem tudta kielégíteni a légierőt megfelelő számú J33-as hajtóművel, így az Allison Engines hajtóműgyártó vállalat is besegített a gyártásba egészen 1944-ig. A háború befejeztével törölték a gyártást, és az Allison kénytelen volt bezárni a gyárát [4].

A J33-at folyamatosan áttervezték, fejlesztették. Megszületett a J35, ami már koránt sem hasonlított elődjére, majd a J47, amit sokféle vadászrepülőgépen és bombázón is üzemelt. Az igények kielégítésére (ekkor már a hidegháború idején) megépült a második gyártósor Cincinnati-ben. A J47-ből, több mint 30 ezer darabot gyártottak 1956-ig, ami nem jelenti, hogy csak addig szolgáltak az ezzel a hajtóművel repülő gépek. Az 1957-es J73 után a J79

⁶ GEAE - General Electric Aircraft Engines - General Electric Repülőgép Hajtóművek

⁷ SNECMA - Société nationale d'études et de construction de moteurs d'aviation - Nemzeti Repülőgép hajtómű Építő Vállalat

⁸ A CFM jelentése: a GE CF6 és a Snecma M56 hajtóműnevekből összerakott rövidítés [41].

következett. Ez volt a GE második legnagyobb mennyiségben gyártott hajtóműve 17 ezer darabbal. A hajtómű, ami az F-104 Starfighterben üzemelt, 1958-ban megkapta a Collier Trófeát. A díjat az innovatív és kiemelkedő teljesítményért adták a vállalatnak. További sikereket könyvelhetett el a cég a T58 és T64 tengelyteljesítményt nyújtó hajtóművekért, majd következett a J85 végül az dolgozatom törzsét képző ős, az F404 [3].

2.4 A GE Aviation napjainkban

A GEAE a II. világháború után nyitott a polgári repülés irányába, ami napjainkban a termelésének jelentősebb hányadát teszi ki, mint a katonai részleg. Megkapták a Boeing legújabb 787 Dreamliner hajtóműveinek beszállítási jogait is. A GENx pillanatnyilag a legmodernebb technológiákat felvonultató hajtómű.



3. ábra: A GENx polgári repülőgép hajtómű. A fogazott kilépő rész a zajcsökkentésben vesz részt.⁹

Tömegét és a ventilátor fokozat átmérőjét jelentősen csökkentették az elődökhöz képest, lapátjai kompozitból épültek titán belépőélekkel. Az egész ventilátorház is kompozitból áll hőtágulási mutatói rendkívül alacsonyak. Titánból készült a kisnyomású turbina 6-7. fokozata is. Tüzelőanyag fogyasztása és károsanyag kibocsátása jelentősen csökkent a TAPS¹⁰-ok alkalmazásával, melyek egy előperdítő hatással, a levegőörvénybe fecskendezik a

⁹ Forrás: http://en.wikipedia.org/wiki/File:General_Electric_GENx_on_747-8I_prototype.jpg

¹⁰ TAPS - Twin Annular Premixer Swirler - Kettős Gyűrűs Előkeverő

tüzelőanyagot, ezzel elősegítve a tökéletes keveredését és égését a keveréknek. A technológiával 15%-kal csökkent a fogyasztás [5].

Ezt a kitekintést szükségesnek tartottam, hiszen elég nagy az esélye annak, hogy távolsági utazásaink során olyan utasszállító repülőgéppel közlekedjünk, aminek a hajtóműve a GE gyártósoráról származik.

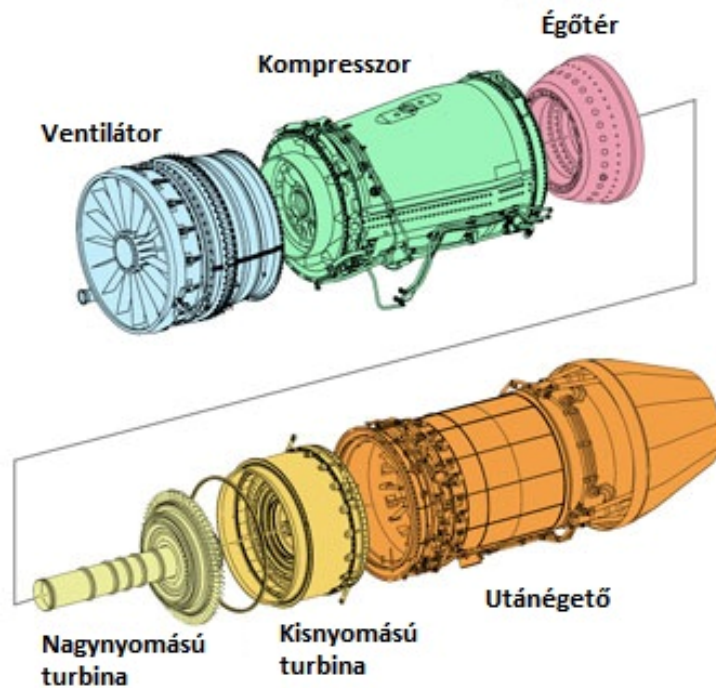
A Lynn városi szerelőcsarnokban folyamatosan történik a hajtóművek összeszerelése az USA Védelmi Minisztériuma megbízása szerint. Jelenleg az F404, F414, T700 és CFE738-as hajtóművek a prioritás, ezzel lefedve minden fontosabb ágazatot, kezdve a harcászati repülőgépeken át a helikopterekig, és a polgári gépekig. Evendale-i központja gyártja a nagy utasszállítógépek hajtóműveit, és a haditengerészet hajói részére az LM6000 és LM2500-as gázturbináit. Mivel az igények kiszolgálására nem elég két központ, így további szerelőcsarnokokat állítottak fel, melyek részegységek gyártásában, és a végleges összeszerelésben segédkeznek. Így születtek meg gyártósorok az alábbi városokban: Bromont, Hooksett, Wilmington, Madisonville és Rutland.

2.5 Az F414 hajtóműről általánosan

A General Electric F414 egy kis kétáramúsági fokú, utánégetővel szerelt gázturbinás turbofan hajtómű 98 kN tolóerővel a GE Aviation cégtől. Az F414 a széleskörűen használt F404-nek a továbbfejlesztett verziója, amit a legelterjedtebben a Boeing F/A-18E/F Super Hornet típuson alkalmaznak, de a következő generációs Gripenek a hajtóműve is lesz, és ezt választotta India is a HAL¹¹ Tejas mk. II. repülőgépei számára is.

A GE az F404-et az F412-es jelölésű hajtóműre fejlesztette, mely utánégetővel nem rendelkezett. Ezt a turbofan hajtóművet az A-12 Avenger II alacsony észlelhetőségű csapásmérő repülőgépnek szánták, ám a program törlése után a hajtómű nem veszett kárba, hanem továbbvezették az F/A-18E/F Super Hornetbe. A GE inkább ezt a megbízható utánégetővel szerelt F414 hajtóművet szerelte be a Super Hornetekbe, mint hogy kockáztasson egy teljesen új meghajtással. A tervezésénél szempont volt, hogy a méretek ne változzanak, így kis eltéréssel megegyezik a korábbi verzióval [39]. A hajtómű hat fő részegységből áll; mint a ventilátor, a kompresszor, az égőtér, a nagy- és kisnyomású turbina, és az utánégető.

¹¹ **HAL** – Hindustan Aeronautics Limited -Indiai Repüléstani Vállalat



4. ábra: Kétáramú gázturbinás hajtómű fő részegységei.¹²

Az F414 az F412-esen alapul, ami már rendelkezett FADEC¹³-kel, az alacsony nyomású rendszer az YF120-as hajtóműből származott, mely az ATF¹⁴ programra készült, ahol az F-22 Raptor hajtóműjéért vívott párharcban alul maradt a Pratt & Whitney F119-cel szemben. Az új hajtómű nagyobb tolóerőt biztosít, mindezt 2%-kal alacsonyabb fajlagos fogyasztással az F404-GE-400-hoz képest utánégető nélkül. A hajtóműre szerelt FADEC biztosítja a legmagasabb szintű megbízhatóságot és teljesítményt minden repülési üzemmód mellett. Ezen kívül a FADEC hibakereső logikával is rendelkezik. Az esetleges hibákat valós időben a pilótával, későbbi elemzés céljából pedig a karbantartókkal közöl.

2.6 Az F414-es hajtómű gyártástechnológiája

A legnagyobb különbség az F414 és az F404 között a ventilátor fokozat. Az F414 e szekciója nagyobb az F404-nél, de kisebb az F412-nél. Ez a fokozat 13 cm-rel hosszabb lett. Ez a kettő változtatás 16% többlet levegőáramlást biztosít a hajtómű részére. Hogy megmaradjon az F404 méreteinél a hajtómű az utánégető szekciót 10 cm-rel, az égőteret 2,5 cm-rel csökkentették. Az átgondolt tervezés biztosítja az F414 hajtómű számára az F404-el való

¹² Forrás: http://www.aereo.jor.br/wp-content/uploads/2010/04/f414_maintenance-imagem-GE-Aviation.jpg

¹³ FADEC – Full Authority Digital Engine Control – Teljes Körű Digitális Hajtómű Szabályzó

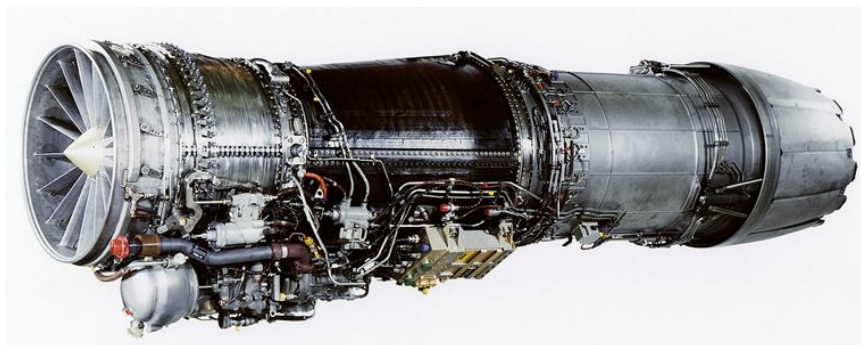
¹⁴ ATF – Advanced Tactical Fighter – Megnövelt képességű Harcászati Vadászrepülőgép

csereszabatságot, hiszen geometriai méretei, mint a hossz és az átmérő közel azonosak¹⁵, a tolóereje pedig számottevően nagyobb.

Egy másik jelentős változtatás az úgynevezett *blisk*-ek¹⁶ alkalmazása; a nagynyomású kompresszor első három fokozatának forgólapátjait a szokásos külön beszerelt lapátok helyett egybe gyártott, gyűrűbe öntött, egykristály lapátkoszorú alkotja, mellyel 23 kg tömeget spóroltak. Mivel kevesebb az alkatrész, kisebb a meghibásodásnak az esélye, ezzel nőtt a megbízhatóság is. A bliskek használatával 484 darab alkatrésszel kevesebb van az F414-ben, mint a korábbi F404-ben. Ezenkívül továbbfejlesztették a madárral és idegen tárgyakkal szembeni ütközés tűrési képességét. Ez a fejlesztés nem saját, hanem a svéd licenszben gyártott F404- a Volvo RM12-es fejlesztőmérnök csapat sikere volt, az amerikaiak csak átvették a technológiát.

A könnyűsúlyú gyűrűs égőtér a maga 30 ezer lézerrel vágott hűtő lyukaival jelentősen csökkenti az égőtér fal hőmérsékletét, ezzel biztosítva hosszú élettartamot. Az új égőtérnek a feladata, hogy tökéletesebb égést tegyen lehetővé, mint az elődje, biztosítsa, hogy felhasználásra kerüljön az összes rendelkezésre álló oxigén a tüzelőanyag elégetése során, ezzel megakadályozva, hogy a levegőben jelenlévő nitrogén és az oxigén egyesülése káros nitrogén-oxidot kibocsátást eredményezzen. [6]

Egykristályból épült a nagy terhelésnek kitett, léghűtésű kis- és nagynyomású turbina is. Háromdimenziós áramlási modellek segítettek a mérnököket, hogy több mint 1%-os hatásfokjavulást érjenek el a kisnyomású turbinánál, ami nem hangzik soknak, de mivel a részhatásfokok szorzata adja az összhatásfokot, így több százalékos összhatásfokot nyernek. A turbina tartósságának növelése érdekében hővédő bevonatot alkalmaztak.



5. ábra: A General Electric F414.¹⁷

¹⁵ Bár az új hajtómű elfér az F-18 sárkányszerkezetébe, de a többlet levegőellátást csak megnövelt keresztmetszetű szívócsatornával tudták biztosítani.

¹⁶ Igazán találó ennek az alkatrésznek az angol terminológiában a neve; *blisk*, ami a *blade* és a *disk* szavakból formálódott. Mivel a magyar műszaki nyelv nem ismer ilyen szóösszetételt, ami kifejező lenne, az egyszerűség miatt a továbbiakban a *blisk*-et használom

¹⁷ Forrás: <http://www.aereo.jor.br/wp-content/uploads/2010/09/GE-F414.jpg>

Az F414 a GE legújabb léghűtésű sugárirányú lángstabilizátorával és befecskendező rendszerével rendelkezik az utánégetőtérben. Tartósságuk és ellenálló képességük közel háromszoros a korábbival szemben, több mint 6000 utánégetési ciklust biztosítanak. A lángstabilizátorok, a GSF redőnyei és tömítései egyenként kiszerezhetők a teljes hajtómű kivétele nélkül is. Jelentős változtatás, hogy a FADEC tüzelőanyag szabályozó rendszerrel működteti az utánégető szekciót a korábbi különálló hidraulikus rendszer helyett [6].

A teljesítményt és a megbízhatóságot az adta, hogy a legjobb technológiákat ötvözték korábbi tapasztalatokra alapozva. Olyan hajtóművekből merítettek, melyek már bizonyítottak, mint a GE23A, az F412, az YF120 és további katonai és civil hajtóművek. Mindezek mellett az F404 több mint 5 millió repült órájának tapasztalata is beépült az F414-be. Ennek eredménye képpen a tartósság, a megbízhatóság és a teljesítmény megnövekedett. A hajtómű nagy hőterhelésnek kitett részei 2000 órás, míg a forgó alkatrészekre és a szerkezetre 4000 órás élettartamot garantálnak. Kritikus alkatrészek, mint a forgó tárcsák a GE szigorú új tesztjei miatt megbízhatóbbak lettek. Ennek köszönhetően háromszoros élettartamot biztosítanak az kis terhelésű ciklusok okozta kifáradásokra.

2.7 Az F414-es hajtómű kifejlesztésének története

1991-ben az F/A-18 továbbfejlesztési programja magába foglalta egy fejlettem hajtómű megalkotását is. A követelményeket igen egyszerűen fogalmazták meg; nagyobb hatótávolsággal és harcászati képességgel kell felruházniuk a gépet. Az eredmény az F/A-18E/F lett, ami még ekkor Advanced Hornet néven futott, és amely mintegy 25%-kal nagyobb méretekkkel rendelkezett, mint a rendszerben lévő F/A-18 Hornet, a USN elsődleges repülőgép hordozó fedélzeti több feladatú harcászati repülője. A gép meghajtásáról az F414 gondoskodott 97,7kN-os tolóerejével, ami 35%-kal több mint az F404 tolóereje, amit az F/A-18-as alapszériáiban alkalmaztak. A 35% többlet igaz az utánégető és az utánégető nélküli üzemmódra is.

Az F414 jelentősen megnövelte az F/A-18E/F harcászati repülőgép teljesítményét különböző repülési profilokon. Közel 30-40%-kal biztosít többlet tolóerőt a légi közelharcok során, 25-30%-ot ad a szuperszonikus elfogásokhoz, és 40%-ot az alacsony magasságú és nagy sebességű levegő-föld bevetéseknél, ahol ez a többlet teljesítmény a műveleti terület fölött a repülőgép biztonságát és túlélőképességét növeli.

Az F414-et természetesen széleskörű teszteknek vetették alá az USN Műszaki és Gyártási Fejlesztési Program¹⁸ keretein belül. Ténylegesen 1991-ben kezdődött a tesztorozat, ahol az első megépített hajtómű főbb elemeit értékelték ki. Egy évnyi finomhangolás után megszületett a végső forma a főbb elemeknél. Az első olyan hajtómű, mely méltán viselhette az F414 nevet, 1993 májusában épült meg. Itt már benne volt a gépben az, amit a mérnökök elképzeltek. A tényleges repülőgépbe beépítést másfél évnyi teszt előzte meg. A hosszú kutatási idővel a legtöbb felmerült problémát megoldották, és ezzel elősegítették a magas üzem közbeni megbízhatóságot, mely közvetve jelentős megtakarítást eredményez a kevés meghibásodás okán. A USN programja 1998-ban ért véget. Ez idő alatt tízezer tesztórát futott a 14 darab hajtómű.

Az F414-es hajtómű építésének programja volt az első igazán jelentős tesztorozat a USN és az AEDC¹⁹ között. A tesztek az AEDC-ben 1993 októberében kezdődtek, és hat hónappal később a GE üzemeiben folytatódtak a massachusetts-i Lynn városában.

Az AEDC tesztek között volt magassági teljesítményt, és működőképességet mérő vizsgálat is. Három mérőföldkőnek nevezhető részre bontható a tesztorozat; 1995 májusától az Előzetes Repülési Minősítési²⁰ teszt, 1996 szeptemberében a Korlátozott Gyártási Minősítés²¹, és az 1997 szeptemberétől futó Teljes Gyártási Minősítés²². A Super Hornet berepülése 1995 novemberében kezdődött meg. Az F414-ről nyert adatok feldolgozásának meggyorsítása érdekében egy nagysebességű adatkapcsolati vonalat építettek ki a tesztbázis és a USN Trenton városában lévő központja között, ezzel biztosították a mérnököknek a "virtuális jelenlétet" a repülések alatt. Időben ugyanazon adatok kerültek megjelenítésre Trentonban, mint az AEDC bázisán. Így sikerült elérni, hogy az adatfeldolgozás valósidejű legyen, jelentősen felgyorsítva a kutatásokat a hagyományos módszerekhez képest.

A mérnöki csapat²³ munkálatai ekkor a végéhez értek. Már a 70%-osan kész hajtómű is komoly megtakarításokat eredményezett a kutatásnak. A gyártási ciklus hajtómű részegységeként elérte a 20%-os időbeli csökkenést, néhány egységnél a 60%-ot is megütötte. A korábbi hajtóművek kifejlesztéséhez képest már 25%-kal jobb költséghatékonysággal dolgoztak. A tervezés olyan pontosságú volt, hogy az eredeti, első alkalommal megépített teszthajtómű 80%-át megtartották, csak a maradék 20% módosult később a tesztek során. Ez nem volt elmondható korábban épült hajtóművekről. Minden

¹⁸ Engineering and Manufacturing Development Program

¹⁹ AEDC - Arnold Engineering Development Complex - Arnold-i Mérnöki és Fejlesztési Komplexum

²⁰ Preliminary Flight Qualification

²¹ Limited Production Qualification

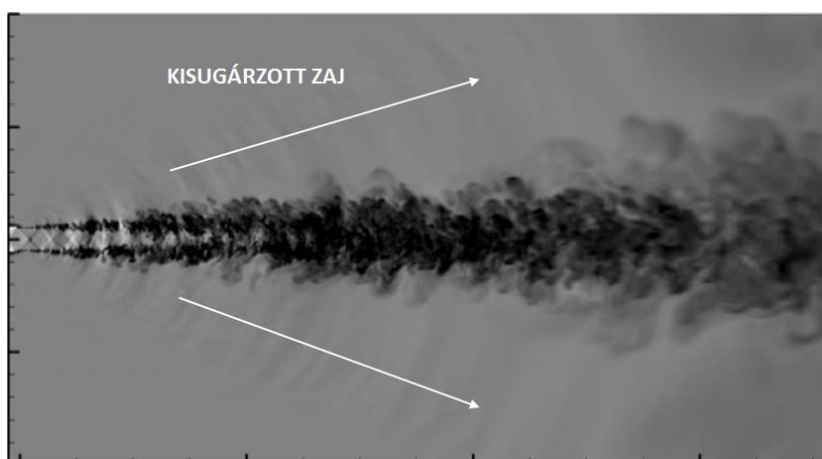
²² Full Production Qualification

²³ A mérnöki csapat az Integrated Product Development Team néven működött.

nagyobb munkafázis a kijelölt időpontra vagy még hamarabb elkészült. A legjobb példa erre, amikor az utánégetőt és a GSF-et tervezték. Ez mindösszesen 14 hónapot vett igénybe. Ezekkel a módszerekkel sikerült azt elérnie a tervezőcsapatnak, hogy átlagosan 17 hónappal kevesebb időt vett igénybe az F414 hajtómű kifejlesztése, mint a korábbi hajtóműveknél.

2.8 A hajtómű akusztikai tesztjei

Jelentős fejlesztés folytak a környezeti zajterhelés, és a fogyasztás csökkentése területén is. Sikerült mechanikai és áramlástechnikai eszközökkel befolyásolni a zaj nagyságát. Az áramlástechnikai zajcsökkentést úgy valósították meg, hogy a kétáramú hajtómű külső áramának hidegebb és lassabb levegőjének egy részét keverik a hajtóműmag belső áramának a nagysebességű forró égésgázaival még a környezetbe való kilépés előtt. Ez első olvasatra nem jelent újdonságot, a legtöbb kétáramú, utánégetővel szerelt gázturbinás hajtómű így működik. De ebben az esetben kis örvénykeltő gyűrűkön²⁴ áramlik át a levegő, mely ennek az eszköznek a hatására örvénylésbe kezd, így jobban és gyorsabban elkeveredik a két áram. Ez azért fontos, mert a két levegőáram különböző tulajdonságai gerjesztik azokat a zajhullámokat, melyek nagy zajjal járnak. Mechanikai eszközök alatt a GSF kilépő részénél a „cápa fog” alakú háromszög elemek értendők. Alapvetően a feladata ugyanaz, mint az áramlástechnikai résznek, de ez már a hajtóművön kívüli áramlások hűtésében játszik szerepet. Itt a külső áram hiánya miatt a környezeti levegőt keveri a hajtóműből kiáramló gázokkal. [6][7]



6. ábra: A kiáramló gáz sugár $M=1.4$ -nél. Jól kivehetőek a terjedő hanghullámok.²⁵

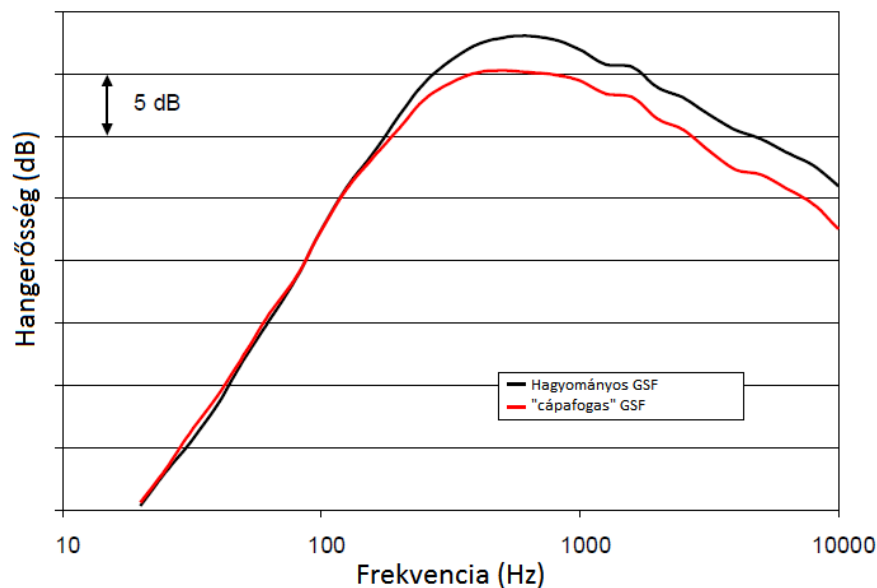
²⁴ Az angol terminológiában *swirler* néven említik, ami az égőtérnél is megjelenik, mint a tüzelőanyag befecskendezés/keverésért felelős eszköz.

²⁵ Forrás: Naval Research Advisory Committee - Jet engine noise reduction



7. ábra: "Cápa fogak" a GSF kilépő részénél.²⁶

Ezzel a technikával sikerült 3 dB-lel csökkenteni a zaj intenzitását, de a hangnyomás ábrázolásának logaritmikus mivolta miatt ($20 \cdot \lg[p/p_0]$) ez már érezhetően csökkenti a zajártalmat [8].



8. ábra: A hangerősség különböző frekvencia értékek mellett.²⁷

Ezeket a méréseket felszálló üzemmód mellett hajtották végre az RTT²⁸ program keretein belül, mely arra volt hivatott, hogy e kutatásokból származott technológiai megvalósításokat visszamenőleg is alkalmazni lehessen a korábbi hajtóműtípusokra, mint az F404, és az előző

²⁶ Forrás: Naval Research Advisory Committee - Jet engine noise reduction

²⁷ Forrás: Naval Research Advisory Committee - Jet engine noise reduction

²⁸ **RTT** – **R**apid **T**echnology **T**ransition

generációs F414-ek. Az utólagos alkalmazhatóságát az engedi meg, hogy a módosítás kevés változtatással jár hajtóművön belül és kívül is. Összességében kijelenthető, hogy ennél a hajtóműtípusnál ez az egyetlen lehetséges eljárás, amivel csökkenteni lehet a zaj nagyságát. [7]

2.9 A hajtómű továbbfejlesztése

Azzal, hogy a GE F414 gázturbinás sugárhajtómű elkészült és készen állt a tömeggyártásra, a fejlesztés nem állt meg. A felvázolt jövőképet három fázisban gondolták el a tervezőmérnökök. Alapvetően a tolóerő növelésre koncentráltak a program indulásakor, így e paramétert határozták meg, mint mérföldkő. A módosítások továbbra is lehetővé tennék az F/A-18E/F-ba való integrációját, mivel méretben csak kis mértékben változnának az új hajtóművek (a szívócsatorna változik!).

Az első lépésben az alap F414-hez képest 10%-os tolóerő többletet vizionáltak utánégetővel. A megvalósítás 2005-ben megtörtént, bár a kitűzött többletet nem sikerült teljes mértékben elérni, de az új F414-GE-400-as hajtómű üzembiztosabb, és kiforrottabb lett. A tolóerő többletet a továbbfejlesztett gázgenerátornak köszönheték, melyben az egész kompresszort bliskekkel látták el, és a felhasznált új szerkezeti anyagok jobb hőállósági mutatókkal rendelkeztek.

Második lépésben a fentiekhez képest még 15%-nyi növekedést vártak, összesen 111kN körüli tolóerőt akartak realizálni. 2006-ban a GE bemutatta az EDE²⁹ hajtóművét. A fejlesztések a hajtómű magját, a gázgenerátort érintették. A hajtómű nagyobb ventilátorral és kisnyomású turbinával épült. Hatfokozatú nagynyomású kompresszorral rendelkezett az eredeti F414 hét fokozatával szemben, továbbá korszerűsített nagynyomású turbinával. A nagynyomású turbina új anyagokat tartalmazott, és új áramlási eljárás szerint jutott el a hűtőlevegő a lapátokhoz. Ezek a változtatások 66 Kelvinnel növelték meg a turbina hőterhelhetőségét, mely így 1721K lett, ami érdekességgént megegyezik az F404 licenzgyártott Volvo RM12 hajtómű turbina előtti maximális hőmérsékletével. Az EDE 15% többlet tolóerőt, vagy megnövelt élettartamot kínált többlet tolóerő nélkül, ezen kívül jobb törmelékütközési ellenállással rendelkezik, és a fajlagos fogyasztása is kedvezőbb mintegy 2%-kal az alap F414-hez képest.

Az első gyártású ventilátorok hagyományos technikával készültek, de a jövő bliskjei haladó dörzshegesztéssel lesznek gyártva a költségsökkentés miatt [6]. A dörzshegesztés a sajtoló-

²⁹ EDE – Enhanced Durability Engine – Megnövelt Tartósságú Hajtómű

hegesztés egy különleges fajtája, amelynél a két hegesztendő felületet egymáshoz képest megforgatjuk, és megfelelő nyomással összeszorítjuk. Az érintkező felületeken, a súrlódás következtében a fém felmelegszik, képlékeny állapotba kerül, majd a hő és a nyomás hatására létrejön a kötés. Dörzshegesztéssel, bonyolult geometriájú alkatrészek egyszerű elemekből állíthatók össze. Egy alkatrészen belül eltérő vegyi összetételű és mechanikai tulajdonságú anyagok is alkalmazhatók. A hegesztés előnyei kézzel foghatóak; a hegesztett kötés minősége egyenletes, megbízható, nem függ a hegesztő kézügyességétől, a felhevített fémtérfogat tetszés szerint szabályozható a hegesztendő anyag tulajdonságaitól függően, túlhevülés nincs, a hőfok egy határértékhez tart (~ 1623 K), fémkombinációk is gyorsan és olcsón állíthatók elő jó szilárdsági értékek mellett (pl. réz-alumínium, acél-alumínium, stb. valamint ötvöztelen és erősen ötvözött acélok), a gép gyártósorba illeszthető, automatizálható. Az eljárás gazdaságos, hiszen jó az anyagkihasználás, egy alkatrészen belül többféle anyagminőség alkalmazható, illetve különböző keresztmetszetű anyagok hegeszthetők össze. [8]

Maga az F414 EDE koncepciója 2003-ban került a tervasztalra, majd 2006-ban lett megépítve az első hajtómű. 2009-ben a USN szerződést kötött a GE-vel. Ennek a szerződésnek sarkalatos pontja volt a fajlagos fogyasztás csökkentése, hiszen ebben az időben a haditengerészet költségvetését is elérte a válság. George Bolln, a GE F404/414 főmérnöke szerint, a Super Hornetek EDE típusú hajtóművel 2020-ig 1 milliárd dollárt spórolnának. Ha a korábbi Super Hornet flottát is ellátnák visszamenőlegesen az újítással, akkor további 1, azaz összesen már 2 milliárd dollárral csökkenthetnék a kiadások. A megépített hajtómű sikeresen teljesítette a szerződésben leírtakat, és 2%-kal csökkent fajlagos fogyasztási értékeket produkált, mindemellett megnövelték a turbina élettartamát 6000 órára. Lehetőség van 20%-os tolóerő növelésre is, de ebben az esetben a turbínák élettartama 2000 órára csökken (végül nem éltek ezzel a lehetőséggel). Mivel az eszközök üzemideje és élettartama általánosan növekedett, így a meghibásodások miatti karbantartások és szétszerelések száma is csökken, további pénzt megtakarítva. A kétfokozatú, előre elnyújtott ventilátor megnövelt levegő tömegáramot és mintegy 10%-os többlet nyomásviszonyt tud létrehozni csökkent alkatrésszám, súly és üzemeltetési költség mellett. A dörzshegesztett alkatrészek megnövelt ellenállást mutatnak madárral, vagy idegen tárgyal való ütközés esetén, ezzel csökken a javítási átlagköltség is. A megerősített kivitelű belépőélel rendelkező lapátok a bliskeken állandó relatív távolsággal³⁰ rendelkeznek a kompresszorház falától, így a hatfokozatú kompresszornál 3%-os hatásfokjavulást értek el. A turbina lapátjait új eljárások alapján

³⁰ Relatív távolság: A lapáthossz és a lapát-ház közötti rés hányadosa.

tervezett hűtőcsatornákkal látták el, így sikerült megnövelni a turbina előtti maximális hőmérsékletet. [6][9][10]

Az utolsó lépésben az alap F414-hez képest már plusz 25% tolóerő növekedéssel számolnak, így az 128 kN-ra emelkedne. Ezzel már nagyjából versenyképes lehetne a nagytestvér F110 hajtóművel, ami az F-15-ben, F-16-ban üzemel. Hogy ezt az impozáns tolóerőt elérjék meg kell növelni a levegő tömegáramát, némileg magasabb turbina előtti hőmérsékletet kell biztosítani, továbbá áttervezett kisnyomású turbinát és új utánégetőt kell alkalmazni.

A GE új lendülettel kezdte meg a munkálatokat. Ezt a verziójú hajtóművet EPE³¹-nek nevezi, mely a szövetségi IHPTET³² program keretén belül született meg. Ennek a programnak a célja az volt, hogy olyan tudományos kutatásokat végezzenek, amelyek kiemelkedően nagy eredményeket hoznak a katonai gázturbinás hajtóművek terén.



9. ábra: Az IHPTET program logója³³

A program 1985 és 2005 között futott. Az IHPTET kutatásai lefedték a gázturbinák minden jelentős fajtáit, mint a turbófan/turbojet³⁴, a turboprop/turboshaft³⁵ és a kísérleti hajtóműveket is. Ami az F414 esetében fontos az, hogy a kategóriájában (turbófan hajtóművek) a cél nem kevesebb volt, mint megduplázni az eddigi tolóerő-tömeg arányt. A program jelentős eredményeket mutatott fel, melyeket felhasználtak a JSF³⁶ fejlesztésében is, és összességében sikeresnek volt mondható, bár eredeti célját sosem sikerült teljes mértékben elérnie. [11][12]

³¹ **EPE** – Enhanced Performance Engine – Megnövelt Teljesítményű Hajtómű

³² **IHPTET** – Integrated High Performance Turbine Engine Technology – Nagyteljesítményű Gázturbina Technológia

³³ Forrás: http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/0/05/IHPTET_logo.png (2012.09.07.)

³⁴ Kétáramúsággal rendelkező/nem rendelkező

³⁵ Tengelyteljesítményt nyújtó

³⁶ **JSF** – Joint Strike Fighter - Egyesített Támadó Repülőgép

2.10 A hajtóműcsalád tagjainak összehasonlítása

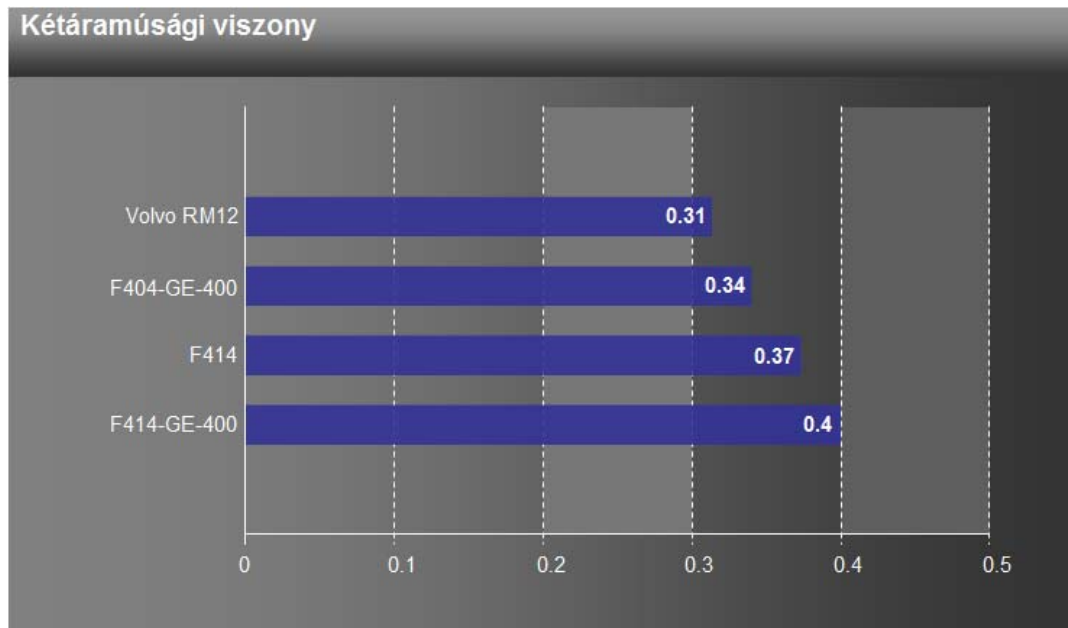
Ebben a fejezetben összehasonlítom az F414-et a kategóriájába tartozó más hajtóművekkel. A grafikonokat több forrásból nyert adatok alapján próbáltam elkészíteni, ahol az adott értékekben esetleges eltéréseket mutattak, ott középértéket vettem. Amennyiben volt forrásanyagom, ott beemeltem a tesztüzemű hajtóműveket is. Grafikonokat készítettem a kétáramúsági viszonyról, a beszívott levegő tömegáramáról, a nyomásviszonyról, a fajlagos tüzelőanyag fogyasztásról, és a tolóerő nagyságáról. Amelyik grafikon igényelte, ott készült utánégetős és utánégető nélküli ábra is.

	F404-GE-400	Volvo RM12	F414	F414-GE-400	F414-EDE	F414-EPE
Hajtómű maximális átmérője:	884 mm	884 mm	889 mm	889 mm	n/a	n/a
Hajtómű teljes hossza:	4034 mm	4040 mm	3922 mm	3912 mm	n/a	n/a
Hajtómű száraz tömege:	996 kg	1055 kg	1110 kg	1110 kg	n/a	n/a
Kétáramúsági fok:	0.34	0.31	0.37	0.4	n/a	n/a
Kompresszor nyomásviszony:	24.6	27.5	30	30	n/a	n/a
Kompresszor tömegárama:	64.2 kg/s	68 kg/s	78 kg/s	76.7 kg/s	n/a	n/a
Fajlagos tüzelőanyag fogyasztás:	87 kg/kNh	84 kg/kNh	85.6 kg/kNh	85.6 kg/kNh	83.9 kg/kNh	85.6 kg/kNh
Fajlagos tüzelőanyag fogyasztás utánégetővel:	185.4 kg/kNh	181.5 kg/kNh	187.9 kg/kNh	187.9 kg/kNh	184.1 kg/kNh	187.9 kg/kNh
Turbina előtti megengedett maximális hőmérséklet (T_3):	1655 K	1721 K	1655 K	1655 K	1721 K	1721 K
Tolóerő:	47.2 kN	54 kN	64.5 kN	55.6 kN	62.2 kN	66.7 kN
Tolóerő utánégetővel:	72.2 kN	80.5 kN	97.7 kN	97.9 kN	111 kN	120 kN
Tüzelőanyag fűtőérték:	42.845 MJ	42.845 MJ	42.845 MJ	42.845 MJ	42.845 MJ	42.845 MJ

10. ábra: A vizsgált hajtóművek főbb adatai.³⁷

A kétáramúsági fok leegyszerűsítve a ventillátoron keresztülráamló levegőmennyiség és a belső hajtóművön keresztülráamló levegőmennyiség viszonyaként értelmezhető. Elmondható, hogy növelésével nő a propulziós hatásfok, de a hajtómű mérete és tömege is, illetve nagy kétáramúság már csak szubszonikus sebességnél valósítható meg. Propulziós hatásfok alatt a vontatás szempontjából hasznos teljesítmény és a vontatáshoz befektetett összes energia hányadosa értendő.

³⁷ Forrás: saját szerkesztés.

11. ábra: A kétáramúsági viszony.³⁸

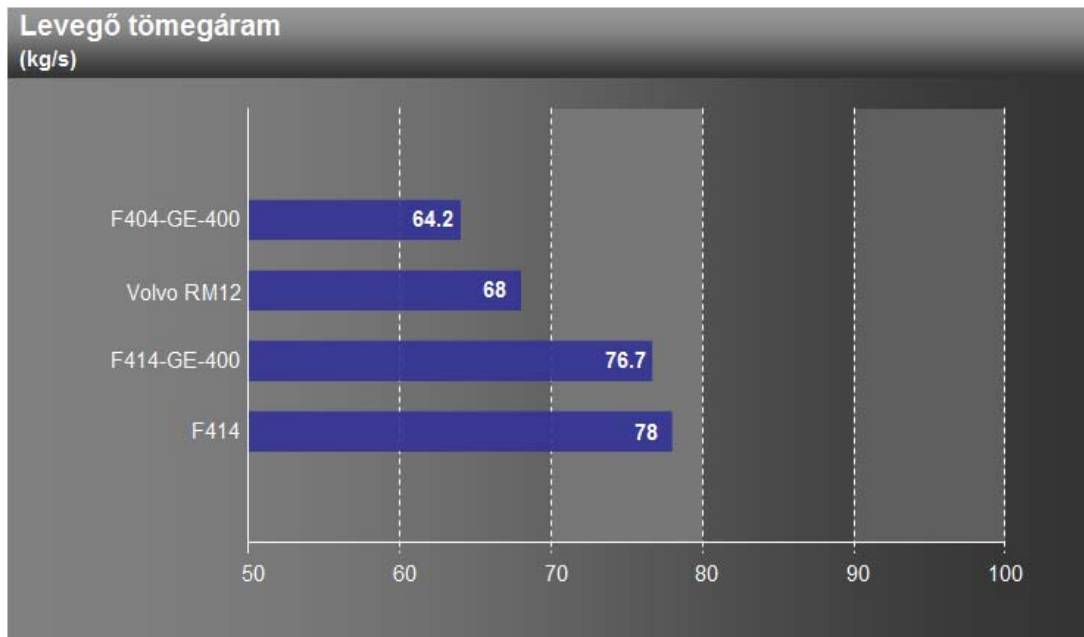
A mai polgári repülés igényeit kielégítve egy olyan hajtóművet várnak el az üzemeltetők, melyek képesek gazdaságosan üzemelni, és kellő tolóerőt biztosítani. Az utasszállító gépeknél egyértelmű növekedést mutat a kétáramúság fok, hiszen ez az egyik legfontosabb ágazat, ahol számít a költség és a gazdaságos üzemeltetés. A változások szemmel láthatóak a hajtómű keresztmetszet növekedésénél. A katonai repülésnél kompromisszumot kell kötni, hiszen ezeknél a gépeknél nem elegendő a hangsebesség alatti repülés, képesnek kell lennie akár a hangsebesség kétszeresével is repülni mindezt lehetőleg gazdaságosan.

A grafikonon megfigyelhető, hogy a nagyjából időrendben későbbi gyártású hajtóművek nagyobb kétáramúsági fokkal rendelkeznek, tehát pillanatnyilag a katonai alkalmazású hajtóműveknél is emelkedő trendről beszélhetünk. Ez a tendencia nem feltétlenül gazdasági szempontok miatt alakul így, hanem annak is betudható, hogy a repülőgépek maximális sebessége már nem feltétel, hogy elérjék a hidegháború alatt gyártott gépek sebességét, hiszen a légi harcok többsége látótávolságon kívüli, köszönhetően a nagy hatótávolságú légi harc rakétáknak. Az esetleges közeli harcok döntő többségét is szubszonikus tartományban vívják meg. Természetesen ez nem azt jelenti, hogy nem képesek szuperszonikus elfogásra, csak azokon a sebességeken nem gazdaságos az üzemelés.

Hogy nagyobb tolóerőt adjon le a hajtómű, egyik feltétele a levegő tömegáram mértékének a növelése. A levegő mennyisége alapvetően meghatározza az elégethető tüzelőanyag

³⁸ Forrás: saját szerkesztés

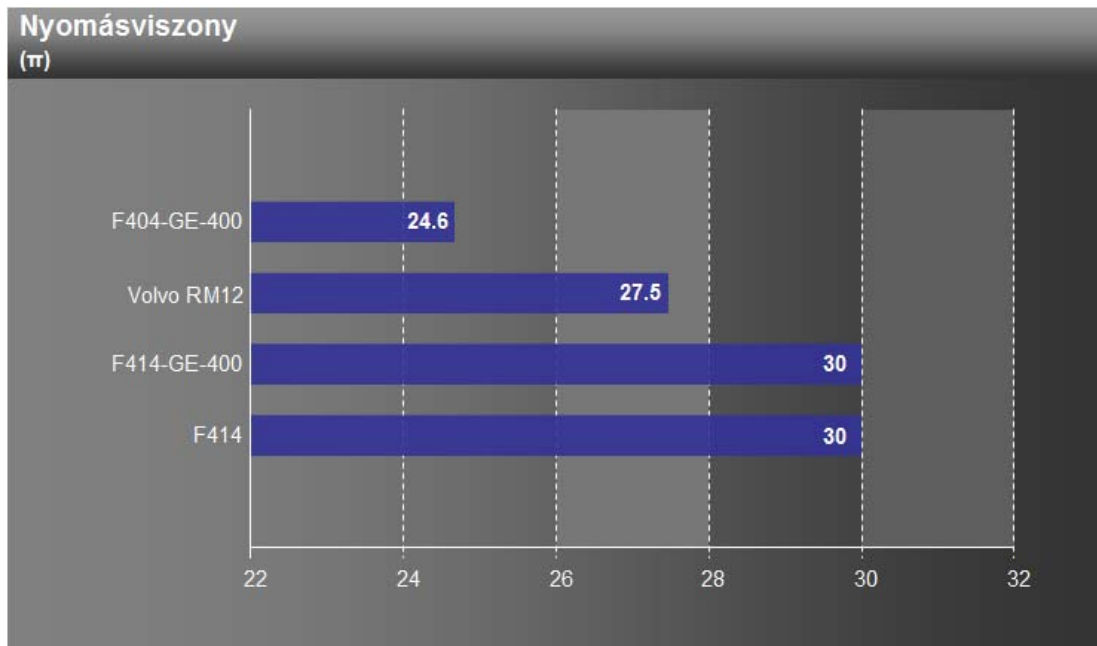
menyiségét, hiszen több bejuttatott tüzelőanyag égésével, több munkát és ezzel tolóerőt vehetünk ki. Ezen felül a hajtómű égőterének nagyobb légtömeggel való körüláramoltatása elősegíti a hűtést, ezzel megnövelve az égőtér élettartamát úgy, hogy egy filmszerű réteget képez a levegő az égőtér burkolatán. Már a Volvo is ezek alkalmazásával jutott többlet tolóerőhöz, hiszen az F404 licenz jogainak a megszerzése után átalakította a ventilátor fokozatot. Ezzel a lépéssel 6%-os levegő tömegáram növekedést értek el.



12. ábra: Levegő tömegáram.³⁹

A kompresszor levegőt szolgáltat az égéshez, nyomásviszonya a hajtómű egyik fő jellemzője, mely a kompresszor kilépő és belépő keresztmetszetében mérhető nyomások hányadosa. A nyomásviszony az elmúlt évtizedekben folyamatosan növekedett köszönhetően a jobb anyagtechnológiának, mely révén sikerült hőállóbb fémekből gyártani a turbinát. Miért fontos ez?

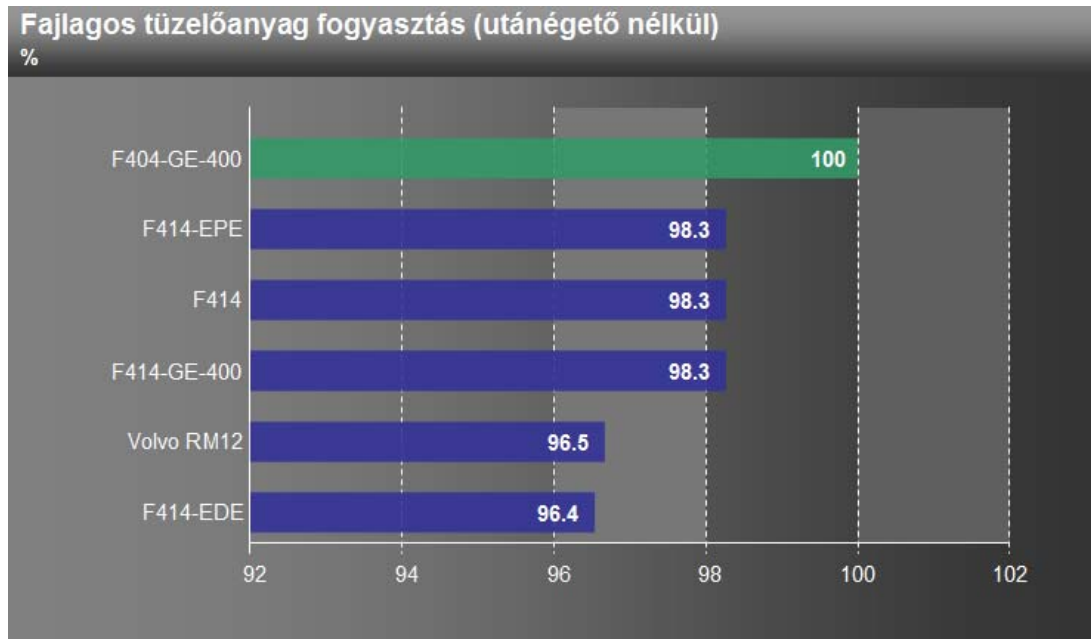
³⁹ Forrás: saját szerkesztés.

13. ábra: A nyomásviszony.⁴⁰

A kompresszió során megnő a nyomás és ezzel a hőmérséklet is. A komprimálás lehet olyan mértékű is, hogy elérje a turbina megengedett maximum hőfokát tüzelőanyag befecskendezése nélkül, de ebben az esetben nem tudunk hasznos munkát kivenni a rendszerből. A komprimálást úgy kell megválasztani, hogy a lehető legtöbb hasznos munkát adja a hajtómű. Ezt a hőálló anyagok biztosítják, melyekkel a maximális megengedett turbina hőmérséklet megemelésével több munkát tudunk kivenni nagyobb nyomásviszony mellett.

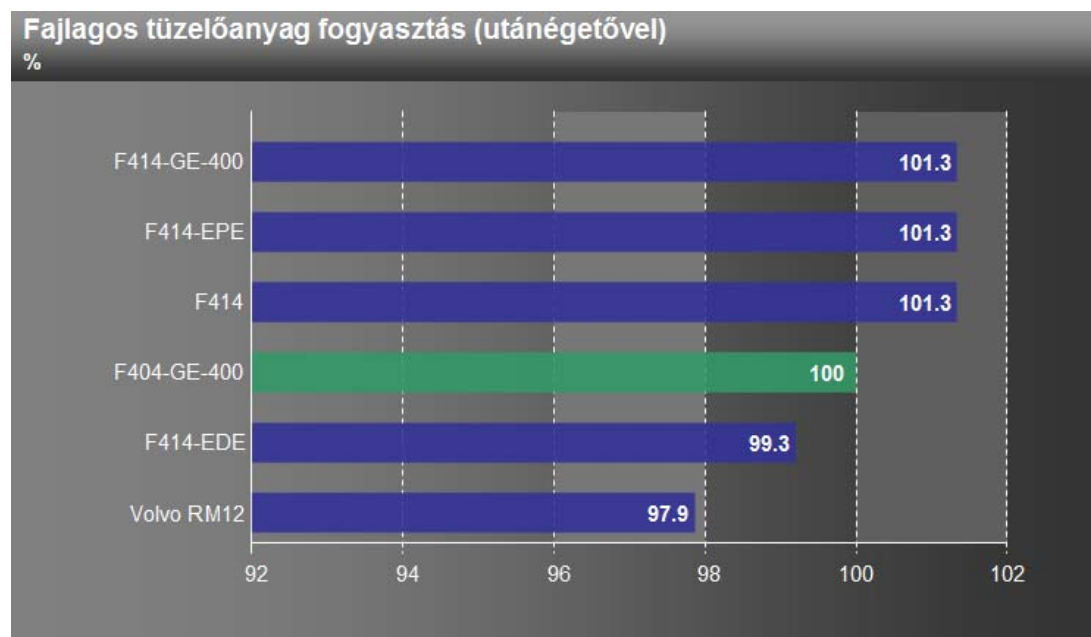
A gazdaságosság egyik mérvado tulajdonsága a fajlagos tüzelőanyag fogyasztás. Itt megkülönböztetünk utánégető és utánégető nélküli üzemmódot. Hogy a fejlődés látványos legyen referenciának választottam a hajtóműcsalád őseit, az F404-et. Itt már beemeltem a tesztüzemű hajtóműveket is, hiszen a hozzájuk kapcsolódó kutatási programok egyik célja volt a fajlagos fogyasztás csökkentése, a megnövelt tolóerő mellett. A grafikon további magyarázatot nem igényel, hiszen szemmel láthatóak a fejlesztések eredményei, melyek kedvezőbb tüzelőanyag fogyasztást mutatnak az összes későbbi építésű hajtóműnél.

⁴⁰ Forrás: saját szerkesztés.



14. ábra: Fajlagos tüzelőanyag fogyasztások a referenciaként jelölt hajtóműhöz viszonyítva.⁴¹

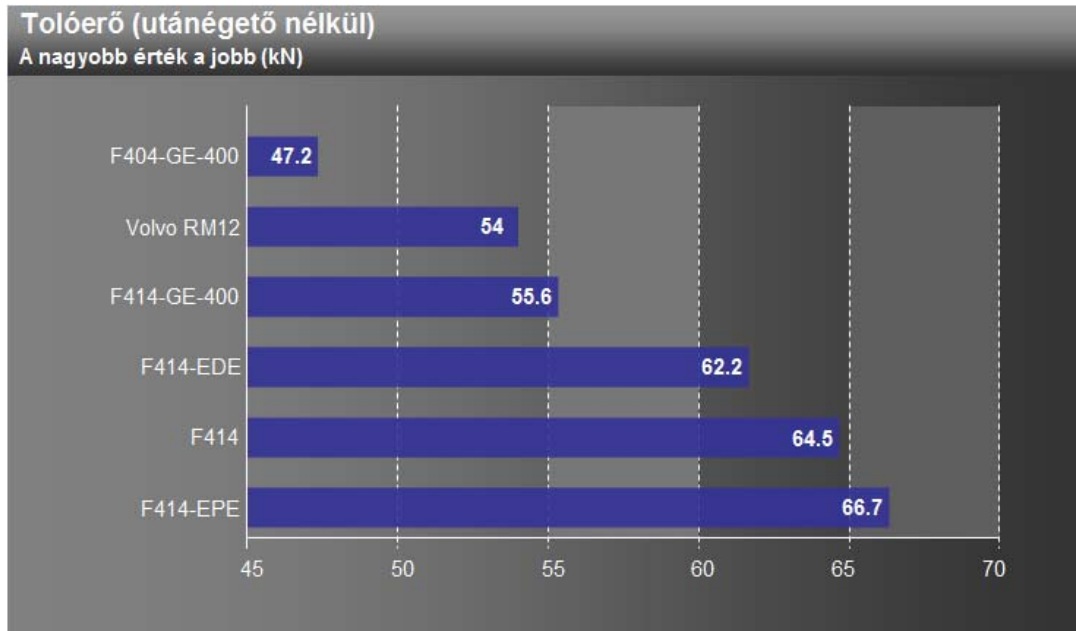
Utánégetővel (más néven *forszázs*) kicsit módosul a felállás. Ugyanis csak a repülési idő kis hányada történik forszázs használata alatt, de ha kell, elérhető a kívánt tolóerő, nagyobb fogyasztás mellett. Az F414-EDE fajlagos fogyasztása alacsonyabb típusársaihoz képest, így ezzel is megfelel a középső betűnek, a "D", mint *durability*, azaz tartósságnak. A viszonylagosan csökkentett mértékű tüzelőanyag befecskendezés kíméli a rendszert.



15. ábra: Fajlagos tüzelőanyag fogyasztások a referenciaként jelölt hajtóműhöz viszonyítva.⁴²

⁴¹ Forrás: saját szerkesztés.

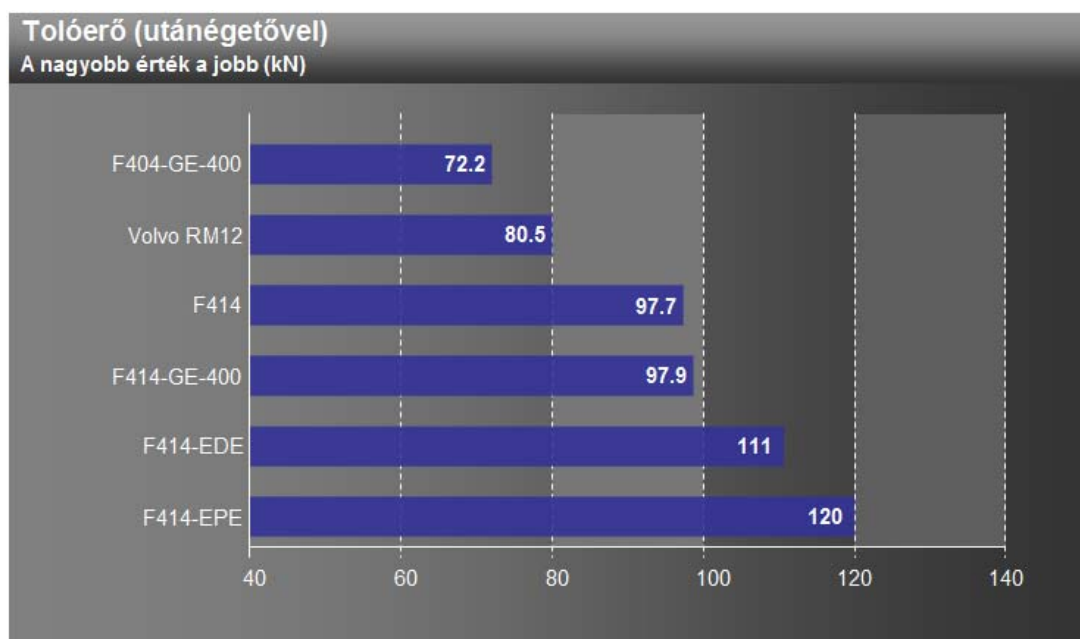
A repülőgép hajtómű egyik legmeghatározóbb tulajdonsága a tolóerő. Tolóerő az az erő, ami egy repülőgépet, rakétát, saját hajtással rendelkező repülő lövedéket, hajót a közegellenállással szemben mozgat, illetve gyorsít. Más szóval azt a hajtóerőt nevezik tolóerőnek, melyet a reaktív hajtóművek fejtenek ki a járműre [13]. Utánégető nélkül a gazdaságossági tulajdonságok a mérvadóak. Ezt jól is példázza az F414-GE-400-as, ahol igen nagy visszalépésnek tűnik az eredeti F414-hez képest. Korábban írtam, hogy lehetőség volt többlet tolóerőre, de ekkor a hajtómű bizonyos részegységei hamarabb használódtak el. A 2005 utáni évek gazdasági megfontolásai kikényszerítették azt, hogy a megrendelő a hosszabb üzemidejű hajtóművek fejlesztését támogassa, így e hajtómű esetében lemondtak az utánégető nélküli többlet tolóerőről. Megemlítendő a szupercirkálás képessége is. A szupercirkálás a repülő eszköz azon tulajdonsága, amikor külső függesztménnyel képes tartósan hangsebesség felett repülni utánégető használata nélkül. 2009 januárjában az F414-el szerelt JAS-39 Gripen Demo-nak sikerült elérni ez a képességet. Az 1.2 Mach-számot 8500 méter magasságban érte el forszázs nélkül [14]. A nagyobb hajtóművel rendelkező harcászati repülőgépek képesek elérni az 1.5-1.6 Mach-számot is.



16. ábra: Tolóerő utánégető nélkül.⁴³

⁴² Forrás: saját szerkesztés.

⁴³ Forrás: saját szerkesztés.

17. ábra: Tolóerő utánégetővel.⁴⁴

Többet tolóerőre van szükség a mozgó tárgy emeléséhez és gyorsításához [13]. Ez igaz a repülőgépek esetében is. És a harcászati repülőknél itt a lényeg! Egy jól manőverező harcászati repülőgép legfontosabb szükséglete a tolóerő tartalék. Még ma is kihívás a repülőgépeknek függőlegesen emelkedve gyorsítania fegyverzet nélkül, nemhogy terhelve. Gyakran elhangzik az a kijelentés, miszerint a JAS-39 Gripen lusta a levegőben alulméretezett hajtóműve miatt. Ezt orvosolná az F414, mely rendkívüli tartalékokkal rendelkezik. Ez a tartalék az utánégetésnél jelentkezik markánsan, hiszen a fordulóharc egy angol kifejezéssel jellemezhető igazán; "*turn and burn*", ahol a nagymértékű manőverezést forszázs kíséretében hajtják végre. Az alap F404-hez képest az F414 mintegy +35%-ot, az F414-EPE pedig +66% többletteljesítményt ad. Természetesen az F414-EPE hozza a legnagyobb értéket, hiszen "P", mint *performace*, azaz teljesítmény jellemzi ezt a hajtóművet. Ezzel már valóban eléri a GE F110 1986-ban gyártott verziójú hajtómű szintjét, mely az F-14, F-15, F-16 harcászati repülőgépeket hajtja. Az összehasonlítás természetesen csak példaerejű, hiszen a két hajtómű nem egy kategória.

⁴⁴ Forrás: saját szerkesztés.

2.11 Az F414 variánsai

F414-GE-400

Ez a variáns üzemel a Boeing F/A-18E/F Super Hornetekben. Ez lett volna még a (már törölt) tengerészeti F-117N meghajtása is. Az F414 alap hajtómű továbbfejlesztett verziója.

F414-EDE

A Megnövelt Élettartamú Hajtómű variáns, ami továbbfejlesztett nagynyomású kompresszorral és turbinával rendelkezik. A turbina magasabb üzemi hőmérsékletet bír, geometriája aerodinamikailag jobb mutatókkal rendelkezik. A kompresszor az eredeti hét fokozatról hatra csökkent. Ezek a változtatások 2%-os fajlagos fogyasztás csökkenéssel, és háromszoros élettartammal ruházták fel a hajtóművet. [9]

F414-EPE

A Megnövelt Teljesítményű Hajtómű újratervezett központi részt, kompresszort és turbinát kapott. 25%-os tolóerőt biztosít az előző verziókhoz képest (120 kN utánégetővel). [15]

F414M

Tolóereje 55,6 kN, utánégetővel 75 kN. A koreai T-50 Golden Eagle oktatógép korai hajtóműve. Gyenge teljesítménye miatt visszatértek az alap F414-re. [16]

F414G

A Saab JAS-39 Gripen Demonstrator hajtóműve. Alapvetően egy F414-GE-400-as módosított FADEC-kel az egyhajtóműves üzem miatt. 1.2 Mach-os szupercirkálásra képes. [17]

F414-GE-INS6

Az indiai Légiforgalmi Fejlesztő Ügynökség választotta ezt a hajtóművet a HAL Tejas mk. II-es könnyű-vadászrepülőgépük számára. 2010 októberéig 99 darab hajtómű került rendelésre. Ez a verzió az alap F414-től erősebb, FADEC-el ellátott. A 99 darabot 2013-ig le kell szállítania a GE-nek. [18][19]

2.12 A fejezet összefoglalása

A Super Hornet esetében egyértelműen pozitív eredményeket mutatnak a statisztikák. Mint már tudjuk, a repülőgép fejlesztése párhuzamosan történt az F414-es hajtóművel. 1995-ben repült először a Super Hornet, majd a sorozatgyártás 1997-től indult be a McDonnell Douglas és a Boeing egyesülése után. Az első rendszeresített Super Hornet 1999-ben szállt fel repülőgép-hordozó fedélzetéről, ezzel folyamatosan kiszorítva a bevetésekről az F-14 Tomcatet. 2006-ra a kivont Tomcatek helyett már csak F/A-18E/F-ek szolgálnak a hordozókon.

Ausztrália 1984 óta üzemelteti az F/A-18A-t. 2007-ben rendelt F verziót, hogy az öregedő F-111 flottát váltsa. A gépek 2010-ben kerültek rendszeresítésre, az F-111-ek mellett. Valószínűsíthető, hogy teljesen leváltják őket, mint ahogy az Egyesült Államokban is hasonlóan történt [20].

Indiában 2012 elején döntött el az F414-INS6 hajtóművek sorsa, melyeket a HAL Tejas mk. II. gépekbe szerelnének. Még 2010-ben aratott győzelmet a GE az európai Eurojet EJ200 fölött a Tejas hajtóművéért folytatott harcban 15 hónapos egyeztetés után. Érdekesség a szerződésben, hogy a GE kikötötte, hogy ha az F414-el hajtóművel szerelt repülőgépek atomfegyvert hordoznak, és azt bevetik Pakisztán ellen, esetleg lezuhanak pakisztáni területen, akkor India fizessen kártérítést a cégnek [20]. Valószínűleg a GE semleges kíván lenni, és nem akarja magát célponttá tenni. 2012 januárjában a szerződés megkötetett, és 800 millió dollárért 99 darab F414-INS6-os hajtóművet vehetnek át 2013-ig. Fontos megemlíteni, hogy az első 18 darab hajtómű után India átveszi a gépegységek teljes gyártósrát, és a maradékot saját maga gyártja le [20].

Mint ahogy azt a dolgozatomban elején említettem már teljes bizonyossággal a Saab is az F414-et választotta az új Gripenekhez. Jelenleg a Gripen Demoban, és két teszt példányban üzemel a hajtómű. A kétprototípus az E verzió előfutárai, melyek szűzfelszállását 2013-ra tervezik. Modifikált FADEC-kel rendelkezik, mely az egy hajtóműves üzemhez szükséges. Az alapmodell tovább fejlődött tolóerő tekintetében a korábbi F404-hez képest, de amint rendszeresítésre kerül a tesztüzemű F414 EPE, akkor további teljesítményhez jutnak az általuk meghajtott repülőgépek [21]! A semlegesség kérdése a Saab esetén kétszer nagyobb hangsúlyt kap. Bár az ország hivatalosan nem semleges, de a kormány a semlegesség elkötelezett híve. Így egy olyan ország esetén, amely üzemeltet valamilyen svéd technikát, és konfliktusba keveredik, vajon miként fog nagyjavításokat végezni a semlegesség tükrében?

2010-ig körülbelül 1000 db F414-es hajtómű került leszállításra a csapatokhoz, melyek összesen több mint 1 millió órát üzemeltek. A General Electric F414 gázturbinás hajtómű tehát remek pályafutást tudhat maga mögött (és előtt), olyan harcászati repülőgépekben üzemel, melyek jelentősek a repülőgép piacon. Megbízhatósága, és többlet teljesítménye az elődökhöz képest kiemelkedővé teszi a kategóriájában.

3. A KLIMOV RD-33 HAJTÓMŰCSALÁD

3.1 Bevezető

Az 1990-es évek elején született meg egy olyan tender a Magyar Honvédségben, ami szerint légierő-modernizációt kell alkalmazni. A Honvédelmi Minisztérium politikai államtitkára bejelentette, hogy az orosz államadósság közel felének fejében többek között 22 db MiG-29B-t és 6 db UB-t rendeltek a légierő részére. A megrendelésre szóló szerződés elkészült és azt 1993-ban Moszkvában aláírták. Így gazdagodott a Magyar Légierő 28 darab MiG-29-cel, melyekben a Klimov RD-33-as üzemelt.

Mivel a géptípus nemrég került kivonásra, így az emlékek frissek róla, sokak számára a mai napig „a vadászrepülőgépet” jelenti. Mivel a típus fölött eljárt az idő, és leváltásra került, szeretném bemutatni, hogy milyen képességekkel rendelkezett a hajtóműve, és hogy a mai világban hová tart. Mert a MiG-29 Magyarországon elavult, de a hazájában továbbfejlesztik, aminek egyik jelentős eleme maga a hajtómű.

Bemutatom a Klimov Gépgyárat a kezdetektől napjainkig, majd a gyártás elméleti szakaszait, melyek elengedhetetlen részei egy új hajtómű megszületésének. Kiemelem a szívócsatorna egyedi kialakítását, és megvizsgálom egy baleseten keresztül a hajtómű megbízhatóságát. Mivel a típusverziók lényeges különbségeket hordoznak magukban, így ahol valami különleges technikai újítás történt, az külön kiemelem. Végül összemérem a hajtóműcsalád tagjait, és következtetéseket vonok le.

3.2 Klimov történelem

A Klimov Gépgyár napjaink vezető orosz hajtóműgyártó vállalata. A cég nem csak repülőgép hajtóműveket fejleszt, hanem más kapcsolódó területekkel is foglalkozik, mint a reduktor gyártás helikopterekhez, vagy földi gázturbinás egységek harcjárművek és erőművek részére. A Klimov termékei leginkább a MiG-29 harcászati repülőgép, a Mi-24 és Ka-50 helikopterek és a T-80 harckocsi meghajtásaként ismertek. 90%-a a FÁK⁴⁵ országainak helikopterei közül Klimov meghajtással rendelkeznek. Több mint 150 ezer termék került ki a gyáraiból, hajtóműveit 75 ország üzemelteti [22].

⁴⁵ FÁK – Független Államok Közössége

A Sergei Izotov, Klimov helyettese által tervezett helikopter-hajtóművek méltán viselik tervezője nevét. 1960-ban Sergei Izotov lett a vezető tervezője az OKB-117-nek⁴⁶, ahol az iroda helikopter hajtóműveken, és rakéta meghajtásokon dolgozott.

Ezek az OKB-k a szovjet idők alatti kutatóintézetek voltak, ahol prototípusokat építettek katonai felhasználásra. Azonosításukra egy számsort használtak, de nem hivatalosan a fejlesztő gárda vezetőjének a nevével fémjelezték az irodákat. Például így lett az OKB-51 Sukhoi tervezőről elnevezve; OKB Sukhoi. Sikeres irodák gyakran megtartották a nevet a tervező halála után is. A Szovjetunió összeomlása után az OKB-k NPO-k⁴⁷ lettek. Az 1990-es években sokuk összeolvadt, mára csak néhány iroda maradt, ahol folytatódnak a kutatások [22] [23].

1983-ban, Izotov halála után a tervezőiroda visszakapta eredeti nevét. Az iroda közvetlenül a saját tesztüzeme mellett helyezkedik el, így a Klimov Gépgyár és a Klimov Tudományos Társulás közvetlenül tudnak együttműködni. A sorozatgyártás Krasnyy Oktyabr városában történt, ami a mai Azerbajdzsán területén fekszik. A szovjet összeomlás után a vállalat gyártósora Moszkvába települt át, és Chernyshev néven működik. 1992 elején a Klimov volt az első vállalat, melyet részvénytársasággá szerveztek felbomlás után, és ezzel megszületett a mai nevén ismert Klimov Gépgyár [22].

A részvénytársaság 1912-ben alapították Szentpéterváron, ahol Renault típusú gépjárműveket javítottak. A Klimov Gépgyár ugyanitt szerelte össze és javította azokat a repülőket, melyek szintén Renault meghajtással rendelkeztek.

Vladimir Klimov tervező irodája 1933-ban kezdte meg gyártani a Hispano Suiza Y12-es dugattyús motor licenszét megbízás alapján. A termék Klimov M-100 nevet kapta. Ez a motor adott alapot a híres VK-105-nek, mely a Yakovlev és Lavocskin vadászrepülőgépekbe, és Petylakov Pe-2-es gyorsbombázókba kerültek. Ennek licensze pedig a csehszlovák Avia Vr. 36-ba került [24]. Ebből a 12 hengeres motorból 129 ezret gyártottak 1935 és 1946 között. Az orosz gépek több mint 50%-át látták el az M-105 dugattyús motorral [22].

Klimov a gázturbinás hajtóművek területén is az élen állt, amikor a tervező irodája legálisan lemásolta a Rolls-Royce Nene-t, mivel az angolok a terveket átadták. A vállalatot 1946 után bevonták a különböző alkalmazásokban használatos hajtóművek tervezésére. Ötven év alatt több mint 40 féle gázturbinát és reduktort tervezett. Az első szovjet gázturbinát, a VK-1-et, a MiG-15, MiG-17, az Il-28 és a Tu-11 használta. A hatvanas-hetvenes években a GTD-350, a

⁴⁶ **OKB** - Опытное конструкторское бюро – Kísérleti Tervező Iroda

⁴⁷ **NPO** - Научно-производственное объединение – Tudományos Gyártó Szervezet

TV2-117, és a TV3-117 került alkalmazásba olyan helikoptereken, mint a Mi-2, Mi-8, Mi-17, és Mi-24. A hetvenes években a vállalat megtervezte az RD-33 gázturbinás hajtóművet is a MiG-29 számára [22].

A TV3-117 fejlesztése a napjainkban sem áll meg. Az 1640 kW teljesítménnyel rendelkező hajtómű 15 modifikációval rendelkezik, és ezzel lefedi az orosz helikopter meghajtások és reduktorok 95%-át. A Mil és Kamov helikopterek világszerte 39 országban üzemelnek, mint katonai, szállító, civil, földre vagy vízre szálló gépként.

Mi sem bizonyítja a vállalat innovációját, mint az hogy 1994-ben elvállalta francia Mirage F1 harcászati repülőgép hajtóművének cseréjét SMR-95-re. Az ATAR 9K-50(9C) SNECMA leváltásával nagymértékben megnövelték a repülőgép teljesítményét. Vagy az, hogy 1997-ben a negyedik generációs TV7-117 turboprop fejlesztést sikeresen alkalmazták a belföldi forgalomra szánt An-140 és Il-114-es utasszállító repülőgépeken. A vállalat jövőbeni ötödik generációs TVa-3000 hajtóműve fogja hajtani a Mi-38-as helikoptert, ami jelenleg szintén a TV7-117-et használja [22].



18. ábra: A Klimov Gépgyár logója.⁴⁸

Napjainkban a Klimov Gépgyár munkáinak nagy részét a TV3-117 hajtóművek nagyjavítása adja Oroszországon belül és azon kívül. Ebbe beletartoznak a különböző gépegységek élettartamának meghosszabbítása is. Egyidejűleg az RD-33-as karbantartásokat is végez azoknak az országoknak, ahol a típus még üzemben van [22].

Több mint 35 éve fejleszt gázturbinákat földi egységek részére is. Gázturbinák szolgáltatják a teljesítményt harckocsik, gépjárművek, önjáró lövegek számára. Ezen kívül mobil energiát szolgáltató erőművek is üzemelnek Klimov meghajtással, legyen az dízel, vagy benzines. Különböző hajóknak is szolgáltató motorokat, de extrém felhasználásra is építenek, mint a hó és jég eltakarításra szánt eszközök, melyeket repülőtereken, vagy vasútvonalakon alkalmaznak. Egyes esetekben magát a repülőt jégtelenítik vele [22][25].

⁴⁸ Forrás: http://niburtf.com/cases/klimov_big.jpg

3.3 Tervezési fázisok

Mint minden eszköz tervezésénél, így a hajtóműveknél is felállítható egy ciklus, mely az ötlet megszületésétől a sorozatgyártásig tart. A Klimov Gépgyár bebocsátást enged leírásaiban ezekbe a fázisokba. Megtudhatjuk, hogy egy mai modern hajtómű milyen tervezési fázisokon esik át, míg végül elnyeri végső formáját.

Alapvetően a megrendelő elképzelése adja meg a követendő irányokat, az ő igényeit kell kielégíteni. Ezek az igények sokfélék, melyek a hajtómű különböző paramétereit befolyásolják. Ilyenek lehetnek maga a fizikai méretei, a teljesítménye, a fogyasztása, a karbantarthatóság, sőt a zaj kibocsátás nagysága is már követelmény főleg a civil repülések körében. Mivel a Klimov Gépgyár sok más vállalattal áll kapcsolatban, így az elképzelt hajtóművet nem teljesen egyedül kell előállítania. Egy egész ágazat épül a hajtóműgyártásra, nem csak a repülőgép építésre. Olyan intézményekkel dolgoznak együtt, mint az Orosz Tudományos Akadémia, a Baranov Központi Hajtómű Intézet, a Nemzeti Repülőgépanyagokat Kutató Intézet, a Nemzeti Könnyűfém Intézet, vagy a Szabványügyi Hivatal.

A következő fázisban az elgondolást elemzik, felvázolják a megvalósítás első lépéseit. Számba veszik a lehetséges megoldásokat. A Klimov Gépgyár természetesen nem kezd új fejlesztésbe, ha már rendelkezésre áll olyan megépített eszköz, mely kielégíti a megrendelő igényeit. Tengelyteljesítményt szolgáltató hajtóműveket kínál 400 és 6000 LE között, a 15 tonnát meg nem haladó felszálló súlyú helikopterek számára. Turboprop típusban 2000 és 6000 LE a választék 24 tonnáig, míg turbojet hajtóműveket 1-től 120kN tolóerőig a katonai alkalmazású harcászati repülőgépeknek és pilóta nélküli légi járműveknek.

Amennyiben a megrendelő egyéni feltételeket szab, úgy beindul a tervezés fázisa. Napjainkban a tervezés bármely fázisa elképzelhetetlen számítógépek alkalmazása nélkül. A tervezési fázis alatt több verziót gondolnak el, a képzeletnek nem szab határt a megépítés és a tesztelés. Ez a sok verzió óriási adathalmazt generál, melyek feldolgozása nagy kapacitású számítógépeken történik. A hajtóműtervezés időigényes és drága üzlet. Viszont ezzel a technikával csökkenteni lehet a költségeket, hiszen nem kell minden egyes verziót megvalósítani. Időt lehet spórolni pont az előbb említett fölösleges építési fázisokat kihagyva. Lehetőséget nyújt a minőség javítására olyan módon, hogy a korábbi tervezések adatait át lehet emelni, esetleges részegységeket nem kell újra megtervezni, hanem modulárisan hozzá lehet adni az új hajtómű projekthez. A fázis ezen kívül jól párhuzamosítható, mivel egy adott

problémát több terminálon lehet megoldani. A folyamatokkal együtt fut az úgynevezett PDM-rendszer⁴⁹. Ennek a feladata, hogy begyűjtsön minden eddigi információt (műszaki leírásokat, szimulációs adatokat, teszt eredményeket, stb.), amelyeket beillesztve egy adatbázisba megkönnyítik a mérnökök munkáját, így időt spórolnak és csökkennek a költségek.

Ennek a bevezetése a Klimov Gépgyár mérnökeinek a sajátja, amivel biztosítani tudják a folyamatos kiemelkedő minőséget és teljesítményt.

Miután megszületett papíron a hajtómű, elkészül a prototípus. A prototípus alapvetően a tesztekhez szükséges. Ez idő alatt különböző paraméterek kerülnek tesztelésre, melyeket az igények, és a tervezők megadtak. Egy új hajtómű tervezésénél az úttörő mérnöki megoldások, gyártási technológiák és anyagok kerülnek vizsgálat alá. A Klimov Gépgyárnál a gázturbinák, reduktorok és egyéb részegységek a legújabb technológiákkal készülnek. Az öntvények kristályszerkezetét előre meghatározzák, és a legjobb mutatók szerint készítik. Az elkészítés után különböző felszínkezelési eljárások alá vetik. A sajtolásra és a megmunkálásra különösen odafigyelnek a kifinomult részegységek gyártásánál, mint a fogaskerekek és bármi más, ami a meghajtással kapcsolatban van. Hegesztési technológiájuk argon védőgázban történik, ívhegesztéssel vagy hideghegesztéssel. Az ívhegesztésnél az elektromos áram hőhatása használható erre a célra. A hideghegesztés pedig olyan eljárás, a melynek során az adott hideg anyag folyáshatáránál lényegesen nagyobb feszültséggel terhelik az összekötendő felületeket. A hegesztés során a munkadarabok nagy alakváltozást szenvednek. Ez az alakváltozás tompahegesztéskor zömítési dudorként, átlapolt hegesztéskor pedig keresztmetszet-csökkenésként jelentkezik [26]. Bevonatképzést is alkalmaznak fémmel, kerámiával és kompozitokkal egyaránt.

Ezeket a technológiákat az Államközi Repülési Bizottság jegyzi. Minden esetben elérik a nemzetközi követelményeket a repülőgépgyártás iparágában.

A próbapadi tesztek, ahol az elmélet beigazolódik, egy jelentős mérföldkő a hajtómű születése során. Itt feszegetik első körben az elérni kívánt tulajdonságokat. Ezeknek a teszteknek a lehető legközelebb kell állniuk a valósághoz, olyan szimulációkat kell lefuttatni, melyekkel a hajtómű a valós életben is találkozhat. Ez nem csak az optimális üzemre igaz, hanem az extrém esetekre is, hiszen ilyenkor lépnek fel a nemkívánatos üzemzavarok.

⁴⁹ **PDM - Product Data Management - Termék adatkezelés**

A Klimov Gépgyár 70 speciális próbapaddal rendelkezik, melyekkel a részegységeket is lehet egyenként tesztelni nem csak a hajtómű egészét. Külön lehetséges hő-sokknak alávetni a kiválasztott alkatrészeket, megbizonyosodni róla, hogy tűrik az előírt paramétereket, és utána biztonságosan lehet beépíteni a rendszerbe. A próbapadokon természetesen valós méretű turbojet, turboshaft és turboprop hajtóművek mellett a reduktorokat is lehet tesztelni. A próbapadok a szükséges vizsgálatok teljes spektrumát lefedik. A hidraulikus ellenállással működtetett próbapad 70 és 6000 LE tengelyteljesítményt leadó földi gázturbinák tesztelésére hivatott. Turboprop hajtóműveket 400-tól és 6000 LE-ig, turbojet és turbofan hajtóműveknek akár 2.5 Mach-os körülményeket is tudnak biztosítani egészen 120 kN tolóerőig.



19. ábra: próbapadi tesztek a Klimov Gépgyárnál⁵⁰

A Klimov vállalatnál kiemelkedő lehetőséget biztosít az, hogy rendelkezésre áll egy olyan teszterület, ahol valós méretű MiG-29-est tudnak vizsgálat alá helyezni. Párhuzamosan üzemelhet a két hajtómű, miközben folynak a mérések.

A tanúsítványok megszerzése elengedhetetlen része a hajtóműépítésnek. Csak olyan repülőgép vehet részt a nemzetközi forgalomban, mely hitelesített dokumentumokkal rendelkezik a rendszereiről. A hajtómű egy kritikus rendszer, melynek szigorú követelményeknek kell megfelelnie. Már egy egyszerűnek tűnő környezetvédelmi előírás be nem tartása, és ez által a tanúsítvány elvesztése a piacon komoly hátrányt jelenthet. A tanúsítvány a minőségbiztosítás legfőbb fegyvere. Nem csak a gyártót kötelezik, hanem a piac többi résztvevőjét, a szállítókat és a viszonteladókat is. Ezek a szabványok egyaránt érvényesek belföldön és külföldön is. A tanúsítvány elősegíti a hosszabb távú piaci sikereket, a termék védelmet élvez a nem hivatalos termékekkel szemben, javítja annak minőségét, és

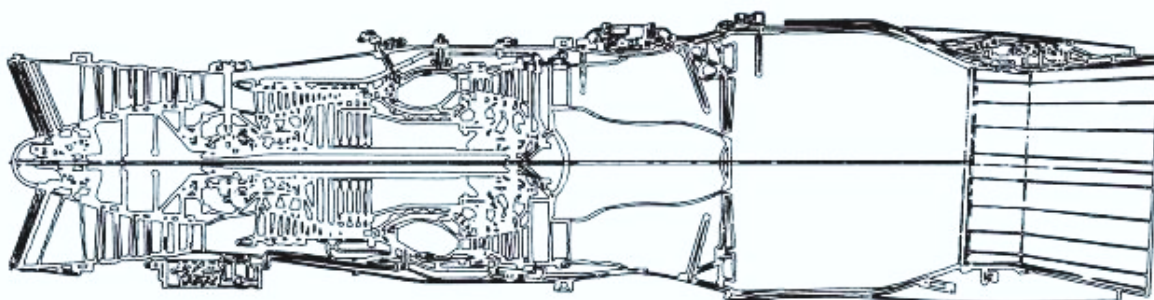
⁵⁰ Forrás: <http://klimov.ru/f/i/t/2100054056/2100054051/2100054055/>

kiváló munkára ösztönöz a kutatási és tervezési fázisokban. Mi sem bizonyítja jobban a Klimov Gépgyár sikerességét, hogy a vállalat által eddig tervezett hajtóművek 50%-a sorozatgyártása került, és hogy a polgári repülőgép hajtóműveinek 100%-a rendelkezik a legszigorúbb tanúsítványokkal.

Az együttműködés a vállalatok és kutató intézetek között nagyon fontos a high-tech, és tudásalapú eszközök megvalósításánál. A Klimov Gépgyár ezért arra törekszik, hogy kapcsolatot teremtsen tervező irodákkal, részegység gyártókkal, és vezető K+F központokkal. Így a hajtóművet nem egészében kell tekinteni, hanem alrendszerenként. Ezzel a gondolattal beemelte azokat a külsős csoportokat, ahol speciálisan csak egy bizonyos területre koncentrálódik a tudás.

3.4 Az RD-33-ról általánosan

Az RD-33 kéttengelyes, kétáramú, utánégetéssel rendelkező hajtómű, viszonylag kis kétáramúsági fokkal. Szabályozható, hangsebesség feletti gázkiáramlás-sebességfokozóval rendelkezik.



20. ábra: Figyeljük meg, hogy a hajtómű nem teljesen tengelyszimmetrikus.

A fűvócső 5°-os szöget zár be a tengellyel.⁵¹

Az RD-33 hajtóműbe kétforgórészes, 13 fokozatú axiális kompresszort építettek be. Két részből áll; kisnyomású-(ventilátor) és nagynyomású kompresszor. A nagynyomású fokozat első három állólapát koszorúja állítható. A lapátok elfordítását a tüzelőanyag szabályzó rendszer és a pompázsgátló rendszer vezérli. A kompresszor részt külön jégtelenítő rendszerrel szerelték fel, amit a nagynyomású részből vezettek vissza. A kisnyomású kompresszor 4 fokozatú és axiális. Egy fokozat egy forgó lapátsorból és egy álló terelőlapát-koszorúból áll. A nagynyomású kompresszor kilenc fokozatból, a mellső és hátsó labirint

⁵¹ Forrás: <http://warfare.ru/image.aspx?img=0702ey70/update/feb2005/6/rd33-2.jpg>

tárcsájából és a tengelyből áll. A nagynyomású kompresszor tengelyen keresztül kapcsolódik a nagynyomású turbina fokozathoz.

Az égőtér gyűrűs rendszerű, egyenes áramú. Az égőtér örvénykeltő belépőrendszerrel (swirler) és ez által kiváló gázcirkulációs tulajdonsággal rendelkezik. A fűvókákat közel helyezték el egymáshoz, biztosítva az indításkor az égőtérben a láng megbízható tovaterjedésének, egyenletes láng kialakításának, egyenletes levegő-üzemanyag keverék kialakulásának a feltételeit. Mindezekre azért volt szükség, hogy biztosított legyen az üzemanyag jó beporlasztása, ugyanakkor elkerüljék indításkor az üzemanyagban túlságosan dús keverék kialakulását.

A turbina első nagynyomású fokozata biztosítja a nagynyomású kompresszor számára a forgatónyomatékokot. A második fokozat a kisnyomású turbina fokozat, amely a kompresszor kisnyomású részét, a ventilátort hajtja meg. Mindegyik turbinafokozat egy álló- és egy forgólapát-koszorúból áll. A fokozatok a szükséges teljesítményt biztosítják a kompresszor fokozatainak meghajtására. A turbinalapátok öntöttek, bandázkötés nélküliek. A kis radiális rések elérése érdekében a lapátok felső homlokfelülete erősen levékonyított azért, hogy csökkentsék az ébredő erőt, ha esetleg a lapát érintkezne a házzal. A turbina megbízható működése érdekében a hőszigetelést és az alkatrészek hűtését meg kell oldani. A turbina hűtését a kompresszor 5. fokozatától elvezetett levegővel valósítják meg.

A gázkiáramlás-sebességfokozó hangsebesség feletti, a hajtómű üzemmódjától függően a kritikus- és kiömlő-keresztmetszetre szabályozott. A hajtómű típusától függően a kiömlő keresztmetszet lehet szabályozott, vagy nélküli [27].

3.5 Az RD-33 hajtómű kifejlesztésének története

1988-as Farnborough-i légi bemutató volt az a pillanat, amikor a MiG-29 frontvadászrepülőgép először mutatkozott be nyugaton. Nagy feltűnést keltett a szakemberek körében is az addig soha nem látott harci manőverek.

Az RD-33-as története 1968-ig nyúlik vissza, amikor Szergej Izotov megkezdte munkáját egy olyan hajtóművön, ami a kor frontvadászainak többlet teljesítményt biztosítana. A megbízást nem egyedül vállalta a Klimov Gépgyár, hanem a Tumanszkij is versenybe szállt. A hajtómű létrehozásával kapcsolatban egy érdekes esemény adódott. Történt ugyanis, hogy a programban magát biztos befutónak tekintő Tumanszkij tervezőirodával szemben a vadászrepülőgépekhez már az ötvenes évek óta nem készítő Klimov megoldását választotta az illetékes állami bizottság. Tumanszkij iroda ugyanis a kívánt mérettartományba beleillő, a

MiG-21bisz-ekből is ismert R-25-300-as egyáramú hajtóműveket akarták áttervezni kétáramúra, ami túl azon, hogy nem volt életszerű, meg sem valósult a Klimovnál addig csak helikopter hajtóműveket tervező Izotov RD-33-asához képest. Volt még egy hajtómű, az R-67-300, de ez sem került le a tervasztalról, mert a háromtengelyes megoldás túl komplexnek tűnt. Izotov egy teljesen új, szovjet viszonylatban igencsak progresszívnek számító konstrukciót alkotott. Megoldásai annyira előremutatóak voltak, hogy Izotovot személyesen felkereste az akkor már akadémikusi tekintélynek örvendő idős Arhip Ljulka, hogy segítsen a csapatának megoldani a vibrációs problémákat a legújabb hajtóművükön az AL-31F-en, melyet később a Su-27-en alkalmaztak [28][29].

A szovjetek első ízben építettek kis kétáramúsági aránnyal rendelkező hajtóműveket, miközben az Egyesült Államok már gőzerővel rendszeresítette harcászati repülőgépein az ilyen típusú meghajtásokat, mint az F-16, F-16 és F-18-ason. Az RD jelölés is innen származik, jelentése turbófan, vagyis ventilátor fokozattal ellátott gázturbinás hajtómű. Ugyanebben az időben váltott a Ljulka tervezőiroda is a kétáramúságot megvalósító hajtóművek útjára az AL-21F-el. Az új hajtóművek önmagukkal hozták az új rendszerek születését is, mint az azt kiszolgáló elektronikai és önellenőrző rendszert. Fontos követelmény volt a hajtómű optimális munkája, a stabilitás, a csökkent tömeg és a gazdaságos üzemelés. Nagy nyomás alatt dolgoztak a szovjet mérnökök, hiszen az Egyesült Államok harcászati repülőgépeihez hasonló, de leginkább azokat felülmúló konstrukciót akartak építeni. Részben sikerült elérni a kívánt teljesítménymutatókat, de technológiailag hátrányban voltak. Az anyagok minősége és megmunkálása az idő rövidsége miatt gyengébb volt a konkurensénél. Ez azt hozta magával, hogy az első késznek vélt hajtóműsorozat alacsony megbízhatósággal, és rövid élettartammal rendelkezett [29].

Az első nullszériás RD-33-ak, melyet megküldtek 1976-ban a MiG irodának, csak 25 órás két nagyjavítás közötti üzemidővel rendelkezett! Ez a nullszéria a még nevén nem említett MiG 9.01-be volt beszerelve, és a szűzfelszállása 1977. október 10-én történt. A végleges, rendszeresített verzióig még hosszú út állt a mérnökök előtt. Az igen rövid idejű repülések eredményeit felhasználva megalkotta a Klimov az 1-es és 2-es hajtóműszériát. 1978. április 20-án került sor a 903-as szériaszámú MiG-29-es repülésére ezekkel a hajtóművekkel. Ugyanebben az évben, ugyanezekkel a hajtóművekkel megtörtént az első baleset is. Repülés közben a jobb hajtómű kompresszorában megszűnt az olajnyomás, és ez ennek a részegységnek a széteséséhez vezetett, melynek következtében a hajtómű kigyulladt. Menickij pilóta sikeresen katapultált, azonban a repülőgép megsemmisült. 1979-ben a 903-ast felváltotta a 908-as MiG-29-es prototípus. De a sikertelenség nem pusztult el a 903-as géppel

együtt, 1980. október 30-án ismét lezuhant a teszt példány. Ezúttal a égőtérben történt a végzetes hiba, aminek a feltárása után módosították a kritikus részegységet a további hajtóműveknél [29].

A MiG-29-es gyártása az 1982. évben fellendült, és ebben az évben csapatpróbára küldték országszerte a repülőgépet. A csapatpróbák alatt nem voltak jelentős események, amik voltak azoknak is csak jelentéktelen hányadát okozta hajtóműhiba. A Szovjet Légierő 1983-ban kapta meg a gépeket. 1984-ben rendszeresítésre került, és hivatalosan is jóváhagyták a sorozatgyártást. Az ekkor legyártott 100 darab gépet később modernizálták, így a modernizált verzió lett az alapszéria. 1986 óta a repülő a Szovjetunió tagállamaiban is rendszeresítésre került [29].

A megbízhatóság kérdése továbbra is fennállt. Egyes esetekben a hajtómű felszálló üzemmódon, bizonyos kedvezőtlen körülmények mellett a szívócsatorna, és a körülötte lévő szerkezet önrezgését a hajtómű felerősítette. A szétrázott szívócsatorna alkatrészeit a működő hajtómű beszívta, így pompázst okozott. Az 1989-es Le Bourget-ben megtartott légi bemutatón megfelelőek voltak ezek a körülmények, és létrejött az önrezgés felerősödése.



21. ábra: Jól megfigyelhető a jobb oldali zárt redőny.⁵²

A hajtóműből egy kis lángpamacs csap ki, ami a pompázásra utal. A pilóta szerencsétlenségére a repülőgép nagy állásszöggel és kis sebességgel repült (180 km/h), így a hirtelen megállt

⁵² Forrás: <http://a.holland-avery.com/images/49.MiG-29.S.jpg>

hajtómű nagy homlokellenállást rótt a gépre, melynek következtében az süllyedve elfordult jobbra⁵³. A hirtelen leállást igazolja, hogy az előszárny tetején kialakított levegőbeömlő redőny a jobb oldalon zárva van, tehát nem történik levegő beszívás a hajtómű részéről. A túl oldalon ez nyitott helyzetben van, ahogy annak 200 km/h alatt lennie kell. Továbbá, hogy a becsapódáskor csak a bal oldali hajtóműből csap ki erőteljes lángnyelv [31]. A pilóta, Anatoly Kvochur 2.5 másodperccel az ütközés előtt katapultált. Ernyője az utolsó pillanatban fékezte le a földet érés előtt. Hihetetlen módon egyetlen csonttörés nélkül túlélte a balesetet. Az égő roncsból 30 méterre ért földet [29][30].

Sok forrás utal egy esetleges madárral való ütközéssel. Véleményem szerint ez elképzelhetetlen, hiszen már korábban is történtek madárral való ütközések, és ezek nem okoztak másodperceken belüli nulla fordulatszámra leeső hajtómű leállást. Esélyesebb, hogy az akkori vezetés jobbnak látta a madárral való ütközést hirdetni, mint egy esetleges hibát feltárni a konkurencia előtt. A hiba nem lehetett a szó szoros értelmében konstrukciós hiba, hiszen a rezgések vizsgálata igen nehéz. Általában csak a bekövetkezése határozható meg, de matematikailag leírni, és számolni nem lehetséges ezeket a jelenségeket.

A Klimov Gépgyár vezető tervező pozícióját 1988-ban Aleksandr Aleksandrovich Sarkisov vette át, akinek szakterülete az égőterek tervezésében mutatkozott meg. Első intézkedése volt a hajtómű megbízhatóságának a növelése. Szerkezeti, technológiai és módszertani intézkedéseket hozott, melyek befolyással bírtak a gyártásra. Ennek eredményeképpen jelentősen növekedett a megbízhatóság először részegységek szintjén, majd átfogóan az egész hajtóműre tekintve [29].

Az eddigi előállított 5000 darab RD-33-ast Oroszország a mai napig nagyjavítja a Chernyshev-i szerelőközpontjában. Mivel 25 országban került rendszeresítésre a MiG-29, és ezzel az RD-33 és variánsai, így bőven akad munka.

A RD-33-asnak köszönhetően a MiG-29-es elnyerte a "legjobb frontvadász repülőgép" címet, hivatalosan megkapta a Lenin-díjat, valamint a Szovjetunió Állami Díját. Az RD-33-as kategóriájának egyik legjobb, és mára már legmegbízhatóbb gázturbinás hajtóműve. A fejlesztések nem álltak le, a mai napig öregbítik a legújabb verziók a hajtómű hírnevét [29].

⁵³ A 2005-ben Szabó "Tópi" Zoltánnal történt személyes elbeszélgetésem alapján megalapozott ez a reakciója a gépnek. Ő szintén ugyanezt a jelenséget mondta el, ami olyan erővel hatott rá, hogy csak az övek fogták meg, annyira előre akart haladni a teste a hirtelen bekövetkezett lassulás miatt [30].

3.6 A hajtóművek levegő-beömlőnyílásai

Fontosnak tartom kiemelni külön a szívócsatorna egyedi kialakítását, hiszen ezzel a remek szerkezettel kitűnő törmelékbeszívás elleni védelmet biztosítottak a tervezők.

A nyugati gépek többsége maximálisan törmelékmentes kifutón képes csak üzemelni. Elég, ha rátekintünk például az F-16-os szívócsatornájára. A beömlőnyílás igen alacsonyra került, ezzel szemben a MiG-29 redőnyös megoldása magasabbról való szívást biztosít. A háborús körülmények nem mindig engedik meg a makulátlan kifutópályát, itt mindenféleképpen előnyt élvez az orosz technika. Mindemellett az üzembiztonság is megnövekedett, hiszen az esetleges szívócsatorna előtt elhaladó földi személyzet is biztonságosabban tudja kiszolgálni a gépet járó hajtómű mellett.



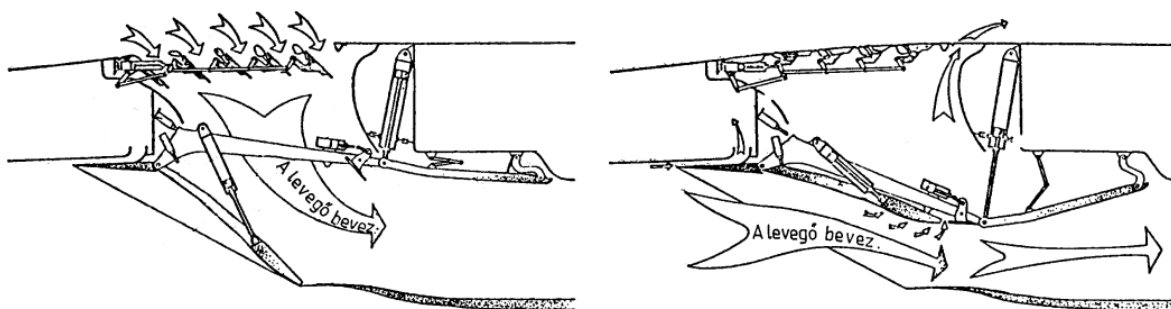
22. ábra: Jól látható a két szívócsatorna közötti magasságkülönbség.^{54 55}

A repülőgépnek a szuperszonikus áramlás külső sűrítését alkalmazó, sík felületekből álló, két szárny alatti levegő-beömlőnyílása van, vízszintesen elhelyezkedő fékezőfelületekkel, melyet négyfokozatú éknek hívnak. Mindegyik levegő-beömlőnyílás egy hajtóművet szolgál ki, biztosítva a hajtómű tolóerejének maximális hatékonyságát és megbízható működését az összes repülési üzemmódon. Az elfáradt határréteget nem vezetik be a szívócsatorna terébe, mivel negatív módon befolyásolja a jellegzőbóját, így a levegő-beömlőnyílásokat a repülőgép törzsének felületéről elmozdították, távolabb helyezték. Abból a célból, hogy kizárt legyen az idegen tárgyak bekerülése a levegő-beömlőnyílás csatornájába és a hajtóműbe, a hajtómű működésekor a földön, gurulásnál, valamint kis sebességű repülésnél (műszer szerinti 200km/h alatt) a szívócsatornát lezárja az ék mellső paneljének teljesen kiengedett

⁵⁴ Forrás: http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/7/73/Ukraine_Air_Force_MiG-29_Dragunov-1.jpg

⁵⁵ Forrás: <http://tigerairshow.com/>

redőnye. Ebben az esetben a hajtóművekbe történő levegőbetáplálás a felső bevezetés redőnyein keresztül biztosított, amelyeket a szárnytövekben alakítottak ki [32][33].



23. ábra: A MiG-29 levegő-beömlőnyílás működése 200km/h alatt (bal) és felett (jobb).⁵⁶

A redőnyök az atmoszferikus levegőnyomás és a szívócsatornában lévő levegőnyomás közötti nyomáskülönbség hatására nyílnak ki, és rugók hatására záródnak. Mindegyik levegő-beömlőnyílás saját ARV-29D automatikus szabályozórendszerrel van ellátva. Ez a rendszer az ék helyzetének programozott szabályozására szolgál a hajtómű átszámított fordulatszámának, a repülési magasságnak és sebességének függvényében, valamint vezérli a levegő-beömlőnyílás mechanizációját fel- és leszálláskor. A levegő-beömlőnyílások és a teljes hajtóműrendszer stabil működésének ferde megfűvásakor és csúszásakor, valamint a hajtóművek üzemmódjának megváltozásakor történő biztosítására elő van irányozva a szabályozási program korrekciója a fordulatszám-csökkentő szelep működésbe lépése alapján [32][33].

Ez az innovatív megoldás nem csak a MiG-29-esen található meg. Napjainkban a Jak-130 többcélú kiképző repülőgéppel az exportért lobbizó Irkut vállalat is ezt a megoldást választotta gépére.

Egy érdekes történet kerekedett a 2012-es Farnborough-i repülőnapon, miszerint a torony nem akart felszállási engedélyt adni már a pályára gurult Jak-130-asnak. A légiirányító azért nem akarta megadni a felszállási engedélyt, mert a levegő-beömlőnyílások le voltak takarva. Ha a repülőgép hajtóműve nem kap levegőt, akkor az nem biztonságos repülés közben, így a torony meg volt győződve arról, hogy balesetet kerül el azzal, ha megtagadja az engedélyt.

⁵⁶ Forrás: A MiG-29 típusú repülőgép műszaki üzemen tartási szakutasítása



24. ábra: Jak-130 leszállás közben. A fő beömlő lezárva, a redőny nyitva.⁵⁷

A gyártó Irkut vállalat képviselője gyorstalpaló kurzuson elmagyarázta, hogy a fő beömlők azért vannak zárva, mert a gép füves és előkészítetlen felszállópályákon is képes legyen üzemelni, és a lezárás az idegentárgy beszívását akadályozza meg. A levegőbeszívás a szárnytőben elhelyezett redőnyökön keresztül valósul meg. A torony még mindig vonakodott, de végül megadta a felszállási engedélyt [34].

3.7 Az RD-33 hajtómű főbb variánsai

RD-33 (a 2 és 2s széria)

Ez az a hajtómű, amely egyenesen a tervezőasztalról lejtött nullszéria utáni javított verzió. Annak ellenére, hogy a rendszer fokozatosan javult messze el volt maradva élettartamilag a nyugati típusoktól. A kezdeti két nagyjavítás között eltelt üzemóra 25-ről folyamatosan emelkedett. Papíron 350 órát tudott, de a valóságban 150 órát mutatott ez az érték. A teljes élettartam 800 óra (vagy 8 év), de ez hajtóművenként igen nagy szórást képviselt. A későbbi 2s típus elérte a 700 órás nagyjavítást, és a garantált élettartamot 1000 órában adták meg, mely végül 1400 óra lett. Ekkor 1982-től írunk [29].

Az RD-33 gyermekbetegsége a szabad szemmel is jól látható füst kibocsátása üzem közben, ami felerősödik üzemmód váltások során. Ez nagy hátrány légi harc közben, hiszen megkönnyíti az ellenségnek az azonosítást, és a szemmel való követést. Ez a hátrányos tulajdonság részben a rövid égőtérnek volt betudható. A hajtómű felpörgési sebessége igen jó volt - ez a manőverező légi harcban fontos tulajdonság - alapjáratról teljes utánégetésre 3 mp

⁵⁷ Forrás: <http://cdn-www.airliners.net/aviation-photos/photos/3/9/0/1719093.jpg>

alatt érte el a legnagyobb fordulatszámot, amit a jelentősen több tüzelőanyag befecskendezéssel értek el, mely szintén oka a füstölésnek.

Ehhez hozzáadódott az alacsony üzemi élettartam, és a gyenge minőségű gyártástechnológia. Ami viszont kiemelkedő tulajdonsága volt az a fajlagos tüzelőanyag fogyasztása, mely jobb értékeket mutatott, mint a fejlett nyugati típusok bármelyike. Amikor viszont üzemelt a hajtómű, akkor kiválóan és stabilan hozta azt, amit elvártak tőle.



25. ábra: a jellegzetes füstölés.⁵⁸

A hajtómű -60-tól +60 Celsius-fokig üzemképes, ezzel biztosítva a sarki, vagy az egyenlítői régiókban való üzemeltetést is. Ez elmondható a későbbi verziókról is. Az égőtér magas hőmérséklettűrő titán és alumínium ötvözetből készült, fala vékonyabb volt az elődeinél. Az utánégető kamrában a gyújtás, és az égés nagyon stabil volt [29].

RD-33/191

A német Luftwaffe-val együttműködve a DASA⁵⁹ és a Chernyshev megalkotta a 2s verzió üzemidő, és élettartam hosszabbítását olyan módon, hogy csökkentették a turbina feszültségét. Az eredmény; 350 óra helyett 700-750 óra üzemidő lett. Ezzel az apró változtatással új kiérdemelte az RD-33/191 jelzést [29].

RD-33 3. sorozat

A két nagyjavítás közötti üzemidő 700-ról 1000 órára nőtt, a teljes élettartam pedig 2000 óra lett. Az utánégető teljesítménye megmaradt az eddigi 83 kN. A hajtómű az először 1995-

⁵⁸ Forrás: <http://www.leteckemotory.cz/motory/rd-33/kourivost.jpg>

⁵⁹ DASA - DaimlerChrysler Aerospace

ben felszállt MiG-29SD és SM típusokban üzemelt. Továbbá az 1998-as ILA⁶⁰ repülőnapon bemutatott MiG-29SMT is megkapta a meghajtást. A hajtómű rendszeresítését a német fél is kezdeményezte, de a modernizációról nem került elő információ. Oroszország és Malajzia saját MiG-29S alapon nyugvó MiG-29N gépein is megtörtént a hajtóműcsere. Az 1997-ben beszerzett gépeken végül rá egy évre sikeresen megtörtént a csere 2s-ről 3-asra. Jelentések szerint a MiG-29SMT (és SMT-II) gépek 3-as típusú hajtóművei 4000 órás élettartammal rendelkeznek 40%-kal csökkent üzemeltetési költségek mellett. Ezt a továbbfejlesztett égőtérrel, és tartósabb csapágyazással érték el [29].

RD-33M (3M sorozat)

Ez egy lényegesen továbbfejlesztett változata a 3. sorozatnak. A haditengerészeti MiG-29K-nak, és a MiG-29/M1/M2-nek a hajtóműve. A különbségek jelentősek. Megemelt tolóerőt ad le felszállásnál, ami a repülőgép-hordozókon a rövid felszálló út miatt szükséges. A tolóerőt három névleges lépésben könnyedén lehetett beállítani a hajtóművezérlő kar segítségével. Normál földi felszálló üzemben 53 kN, forszázssal 88 kN, míg maximális utánégetővel 93 kN tolóerőt adott le a hajtómű. Az égéstér áttervezésével gyakorlatilag megszüntettek egy gyermekbetegséget, azaz eltűnt a hajtómű jellegzetes füstölése. A tengerészeti mivolta miatt kiemelt figyelmet fordítottak a korrózióvédelemre, mivel a sós tengeri levegő hamar kikezdi a fémfelületeket. Digitális hajtóművezérlést kapott (FADEC) BARK-88 néven. Használatával 100 kilogrammnyi rendszertömeget spóroltak meg, mert kikerültek a korábbi szabályozórendszerek fölösleges elemei, és a kábelek mennyisége is lecsökkent. Alkalmazásával csökkent a fajlagos tüzelőanyag fogyasztás, és növekedett az élettartam. A BARK-88 súlya 9 kg, mérete 220x260x120 mm, teljesítménye 40 W.

Malajzia ismét modernizálásra adta a fejét, 2000-ben a MiG-29N gépeit modernebb MiG-29M2-re cserélte. Az első M2-es gépük 2001. szeptember 26-án emelkedett a magasba. A nyilvánosság rá egy hónapra, októberben láthatta a LIMA⁶¹-2001 repülőbemutatón [29].

RD-33MK

Oroszország és India közötti szerződés értelmében az átadásra váró MiG-29K-nak erősebb hajtóműre volt szüksége. Az igény már 2001-ben felmerült. A Klimov Gépgyár vezető főmérnöke Vladimir Sirmanov 2004 áprilisában bejelentette, hogy az új hajtómű az RD-33MK nevet viseli, és kiemelten jobb teljesítményt fog szolgáltatni elődeihez képest. Ekkor a

⁶⁰ ILA - Internationale Luft- und Raumfahrttausstellung - Nemzetközi Légi és Űrhajózási Kiállítás

⁶¹ LIMA - Langkawi International Maritime & Aerospace exhibition - Langkawi Nemzetközi Tengeri és Légi Kiállítás

Klimov Gépgyár már anyagi gondokkal küzd, a megrendelés sikere a további működést biztosította a jövőben. Az új hajtómű megtartotta a korábbi RD-33M összes jellemzőjét, mint a korrózióval szembeni ellenállás, a csökkent hőkibocsátású GSF, a trópusi környezetben való üzemeltetés, és a BARK-88 vezérlőblokk. Felvetődött egy jövőbeli elképzelés, miszerint a hajtómű rendelkezzen vektorálható GSF-fel. Az így megépült meghajtás bekerült a MiG-29K/KUB-ba, és a MiG-29OVT-be, ami tulajdonképp az exportsikerek marketingje miatt MiG-35-re kereszteltek át [29].

RD-33K

A hajtómű további korrózióvédelmet kapott. A ventillátor fokozat áttervezésével megnövekedett a levegő tömegárama, és a turbina előtti maximális hőmérséklet is. Ezen kívül a rendszer teljesen új FADEC-et kapott. Ezekkel a változásokkal felszálló üzemmódban 55 kN-ra emelkedett a tolóerő, utánégetővel 88 kN lett. Rendelkezésre áll 94 kN-os teljes utánégetés is. A tüzelőanyag fogyasztás 7%-kal csökkent utánégető használata mellett, köszönhetően az új ellenőrző rendszernek. A hajtómű felpörgési ideje is csökkent minden üzemmódon [29].

Az RD-33K hajtóművének tesztje érdekes körülmények között zajlott. Az egyik teszt példány MiG-29 bal oldali alapszériás hajtóműve helyére szerelték az újat, miközben a jobb oldalon megtartották az eredetit. A bal oldali hajtómű ugyanakkor új beömlőnyílást igényelt, így ennek átalakításával egy felemás repülőgépet kaptak. Az első tesztrepülés 1985. szeptember 27-én történt. A repülőgép, és a hajtómű többszöri módosítása után végül megkapta az elektronikus hajtóművezérlő rendszerét. A tesztek 1990-ben zárultak. 1991-ben az 1616 számozás feletti MiG-29-ek már az RD-33K-val voltak szerelve.

Indiában rendszeresítették a haditengerészeti MiG-29K-kat, melyekben RD-33K üzemelt, így kiharcolták, hogy a hajtóműveket az országban gyártsák. Oroszország 2004-ben megadta az engedélyt. Ezzel a lépéssel első ízben született meg az anyaországon kívüli gyártás [29].

RD-33M10

A hajtómű az RD-33M utódja. Teljes korrózióvédelmet, és füstmentes égőteret kapott. Tolóerejét jelentősen megemelték, teljes utánégetéssel 105 kN. A hajtómű prototípusát a 2001-es MAKS⁶² légibemutatón mutatták be közönség előtt, de ez egy megnövelt 115 kN tolóerejű verzió volt a show kedvéért VK-10M néven.

⁶² MAKS - Международный авиационно-космический салон - Nemzetközi Légi- és Űrszalon

2010-ben megkezdődött a sorozatgyártás. A MiG-29K/M1/M2/SMT repülőgépek hajtóműveit váltja le [29].

RD-33N és SMR-95

Ezekkel a hajtóművekkel kívánták a 2. és 3. generációs harcászati repülőgépek teljesítményét növelni. Az RD-33N a MiG-21-be, míg a szerkezetileg azonos exportváltozat, az SMR-95 a Mirage III, és Mirage F1-be került. Természetesen ezek a Miragek nem a francia verziókra értendők, hanem más országokban rendszeresített gépek voltak. Az SMR-95 az RD-33-hoz képest új segédberendezés házat kapott, mely főleg a tüzelőanyag-ellátó rendszert érintette. A hajtóművet 1994-ben kísérleti célokból a Dél-afrikai Super Mirage F1-ekre, és Super Cheetah D-2-re (jelentősen korszerűsített Mirage III) szerelték. A földi gurulótesztek után hamar rátértek a repülésre. A régi francia Atar 09K50-hez képest az új orosz hajtóművel 16%-os többlet tolóerőt könyvelhettek el utánégetővel. A fajlagos tüzelőanyag-fogyasztás jelentősen, 25%-kal csökkent, ezen kívül a gyorsulása is javult. A számított harctéri hatékonysága az új hajtóművekkel statisztikailag 200%-kal megnövekedett. Ha az Angola elleni légi ütközetben már lett volna ez a hajtóműcsere, valószínűleg a MiG-23-asok elleni vesztes csata másképp alakult volna [29].



26. ábra: Mirage F1 orosz hajtóművel.⁶³

Mivel ezek a gépek egy hajtóművel rendelkeztek, így kiemelt fontossággal bír a megbízhatóság (a MiG-29-es két hajtóműve kellő biztonságot nyújt egy esetleges hajtómű

⁶³ Forrás: http://www.leteckemotory.cz/motory/rd-33/smr-95_flaz_2.jpg

leállítás során, hiszen eggyel is képes leszállni). Az Atar 09K50 1200-2000 óra élettartammal bírt altípustól függően. Az SMR-95 ezzel szemben csak 600 órával rendelkezett, de bizonyos források itt 1000 és 2000 órát is írnak. Az utóbbiak túlzóak lehetnek, hiszen a fenti verziók leírásaiból tudjuk, hogy 1994 táján nem rendelkeztek ilyen élettartammal. Ezen kívül az SMR-95 az alap RD-33-ból származott, és így 50%-os növekedést kellett volna mutatnia az akkori legmodernebb RD-33-hoz képest, melyeken már számos műszaki fejlesztést hajtottak végre.

Az orosz hajtóműveket 1995-ben kellett volna üzembe állítani valamennyi dél-afrikai Super Mirage-n és Super Cheetah-on, de ez végül nem így történt. Annak ellenére, hogy növekedett a tolóerő, csökkent a fogyasztás, és egyéb harcászati tulajdonságai is jelentősen javultak a Dél-Afrikai Köztársaság a teljes hajtóműcsere programot törölte több okból is. Az egyik ilyen fő ok a logisztika volt. Egy olyan öszvér gépet kellett üzemeltetni, ami alapvetően francia technológiára alapul, de orosz hajtóművel van felszerelve. Mivel a nyugati üzemeltetés, és karbantartás eltér a keletitől, így rengeteg logisztikai probléma adódott, melyekkel a karbantartók nem tudtak megbirkózni. A hajtómű megbízhatósága is kérdéses volt az afrikai fél számára, de közrejátszott az is, hogy a régi sárkányszerkezetre már nem éri meg költeni. Ezzel bevégezett az SMR-95 sorsa [29].

RD-43

A MiG-29 egyre növekvő tömege miatt (nagyobb belső tüzelőanyag-tartály, elektronika...) nagyobb teljesítményű hajtóműre volt szükség. Az új hajtómű az RD-43 nevet kapta. 55 kN felszálló, és 100 kN maximális tolóerőt adott le. Mérete megegyezik az RD-33-mal. 3-5%-os fajlagos tüzelőanyag-fogyasztás csökkenést mértek, amit a teljesen digitális FADEC-nek köszönhetnek. A turbina előtti hőmérséklet elérhette az 1800 Kelvint [35].

A haditengerészeti MiG-29 RD-33K hajtóművein kívül visszamenőleg is lecserélték a hajtóműveket. A teljesítménybeli ugrás nem volt jelentős, de a hajtómű igen nagy fejlesztési potenciállal rendelkezik [29].

RD-93

Alapvetően egy RD-33N, az RD-33-as alapszéria tulajdonságaival. A segédberendezések háza a hajtómű aljára került. Hogy megfeleljen az egyhajtóműves repülőgépek üzemének, osztott kétoldali szívócsatornával rendelkezik. Elsődlegesen a JF-17 Thunder (korábban FC-1 Super-7) kínai-pakisztáni harcászati repülőgép meghajtása. Alapvetően kínai gyártású, bár a

szerződés szerint Pakisztánt is bevonták a fejlesztésekbe, hogy létrehozzanak egy olyan váltótípust, amely méltó utódja lehet a régóta szolgálatban álló J-7-nek [29].

Sajtóértesülések szerint 2004-ben a Klimov 100 darab RD-93-at szállított le Kínának, majd később további 500 darab volt tervben. 2004-ben egy konferencián arról tárgyaltak Moszkvával, hogy átadhatják-e Kínának a gyártás lehetőségét, de végül elálltak az exporttól is a hajtómű nagyfokú hamisítása miatt. Kína Guizhou WS-13 (WoShan-13) néven gyártotta tovább, és szerelte be JF-17-es gépeibe. Mivel Pakisztán is benne volt a szerződésben, így Kína átadta nekik a gyártás jogát is. A WS-13 továbbfejlesztésével, mely 86 kN tolóerővel rendelkezett utánégetővel, a WS-13A 2200 óra élettartammal, és 100 kN tolóerővel rendelkezett utánégető mellett. 2007-ben mutatták be az első használható variánst, majd a sorozatgyártás 2009-ben kezdődött meg. A 2010-es Farnborough-i légibemutató JF-17-esei, már ezzel a hajtóművel repültek [36].

RD-133

A hajtómű alapja továbbra is az RD-33. Jelentős változás a vektorálható tolóerővel rendelkező GSF, mely KLIVT⁶⁴ néven fut, és akár más típusú hajtóművekre is rászerezhető. A fűvóka gyorsan reagál, és ígéretesebb, mint bármelyik másik orosz, vagy akár európai és amerikai verziók. A korszerű harcászati repülőgépek elengedhetetlen eszköze ez. A hatékony kormányzásba törekednek bevonni a legnagyobb működő erőt, a hajtómű tolóerejét is. A tolóerő vektor irányának megbízható függőleges és/vagy vízszintes vezérlésével az eredő tengelyirányú összetevője mellett kívánt nagyságú, oldalirányú komponensek is létrejönnek, melyekkel a repülőgép aerodinamikai kormánysszervekkel kombinált, vagy akár autonóm módon is teljes értékű kormányzása valósítható meg.



27-28. ábrák: jól megfigyelhető, hogy a GSF tengelye nem esik egybe a gép tengelyével.^{65 66}

⁶⁴ KLIVT - Klimov's Vectoring Thrust - Klimov féle tolóerővektorálás

⁶⁵ Forrás: <http://www.airsceneuk.org.uk/airshow01/zhukovsky/MiG-29OVTnozzles.jpg>

A repülőgép instabilitása, az aktív kormányvezérlés tolóerővektor vezérléssel kiegészítve, a korábbiakban ismeretlen, hagyományos kormányvezérlő rendszerrel rendelkező repülőgépekkel megvalósíthatatlan manőverek végrehajtását teszi lehetővé [37].

Az első tolóerő vektorálás az amerikai X-31 tesztrepülőn jelent meg. Három nagyméretű, masszív lapátot szereltek a fúvóka végére. Egy látszólag egyszerű megoldás mellett maradtak végül az amerikaiak, megszületett a lapos fúvóka, ami két dimenzióban vektorál (lásd F-22). Orosz részről a Saturn AL-31FP hajtóművel próbálkoztak először, de végül a legjobb megoldást a Klimov Gépgyár adta [29].

Az AL-31FP egy egyméteres kiegészítővel van szerelve, hogy elérjék a kívánt funkciót. Ezt gömbcsuklóval függesztették fel a hajtóműre. Ez az egy méter ahhoz kellett, hogy megfelelő nyomatékot biztosítson a GSF redőnyeinek mozgatásához. Ezzel szemben az RD-133 csak kismértékben tér el az eredeti hajtómű kialakítástól, csak egy lényegesen rövidebb lemezor tanúskodik arról, hogy alatta működik valami fontos. A megoldás lényegesen kevesebb mozgatóteljesítményt igényel, mint a Saturn megoldása. Az RD-133 az egyszerű KLIVT-tel mindössze 90 kg-mal növelte meg az összsúlyt az eredeti RD-33-hoz képest, ami így 1145 kg-ra gyarapodott. A hajtómű mérete változatlan maradt, így a modifikáció, és a beszerelés visszamenőleg is lehetséges. Hogy a méret ne változzon a mozgató mechanizmust, azaz a három munkahengert az utánégetőbe helyezték. Ezek a hengerek igen nagy terheléseknek vannak kitéve, és itt nem csak a hőhatásra kell gondolni, hanem a rázkódásra is. Az utánégető falát és a hengerek burkolatát is megerősítették hővédő elemekkel. Tolóereje felszálló üzemmódon 56 kN, forszázzsal 90 kN, élettartama 2000 óra. Maximum kitérítési szögtartomány 15 fok minden irányba, kitérítés sebessége 60 fok/mp [29].

A tolóerő vektorált hajtómű csak elektromos kormányvezérléssel (fly by wire) irányítható. A XX. század utolsó évtizedeinek technikai fejlődése lehetővé tette az olyan repülőgép vezérlési eljárást, ahol a kormánylapokat (szárny-, repülőgép-mechanizációt) mozgató elektrohidraulikus, vagy elektromos végrehajtó eszközhez a vezérlő jelek - a hagyományos tolórudak, sodronykötelek helyett – analóg, vagy digitális kódok formájában, villamos vezetéken jutnak el. A digitális vezérlés bináris bemeneti jeleket tartalmazó vektort dolgoz fel, bináris kimeneti jelek vektorává [37].

A többi tolóerő vektoros hajtómű kifejlesztéséhez képest a Klimov Gépgyárnak elenyészően rövid idő volt elegendő. Az első ilyen tulajdonsággal rendelkező hajtóművet 1997 elején építették meg. Az 50 órányi fékpadi teszten 1000 kitérítést hajtottak végre minden irányba,

⁶⁶ Forrás: Dr. Óvári Gyula - Korszerű repülőgépek kormányvezérlése (kézirat)

mindezeket utánégetővel is megtették. 1997 végén már a repülési teszteket kezdték el. 1998 végén, tervszerűen két MiG-29-es vívott egymás ellen szimultán légiharcot. Az egyik RD-33-mal, a másik RD-133-mal volt szerelve. A teszt választ adott a tolóerővektorálás fontosságára. Még ebben az évben a MiG tervezőiroda négy RD-133-ast rendelt, de csak egy készült el, amely statikusan részt vett az 1998-as MAKS-on. A MiG érdeklődését mutatva a technológia iránt tárgyalásokat kezdeményezett a Klimov Gépgyárral, akik már a Suhoi tervezőirodával is felvették a kapcsolatot a Su-27-es tolóerő vektorálásával kapcsolatban [29].

Az RD-133 az új elektromos kormányvezérléssel jelentősen megnövelte a MiG-29SMT manőverezési képességét hangsebesség alatti tartományban, és nagy állásszögeknél. Az új tulajdonság azonban nem érvényesül minden sebességi tartományon, elmondható, hogy csak 0.5 Mach-ig használható. Nagy sebességek mellett inkább nemkívánatos terhet ró a gépre és pilótájára, hiszen a kritikus túlterhelés igen hamar elérhető ezzel a rendszerrel, ekkor általában kikapcsolja az automatika. Mivel a rendszer csekély hátránnyal rendelkezik, így alkalmazása indokolt. A MiG tervezőiroda továbbra is számít a Klimov Gépgyárra, aki a továbbiakban tolóerő vektorálással szállítja a hajtóműveit. Idővel a nagy darabszám miatt a kissé megemelkedett gyártási költség az eredeti RD-33 árához tendál.

Az ezzel szerelt MiG-29-ek megkapták az OVT utótagot. A MiG-29OVT gépeket a 2001-es MAKS-on avatták. 2004-től a MiG-29M2-esek is folyamatosan megkapták az RD-133-at. Marketing és export célokból az ezzel szerelt MiG-29M1 megkapta a MiG-33 nevet, míg a MiG-29M2 MiG-35-re keresztelték [29].

RD-333

Az RD-133 modifikált, továbbfejlesztett változata, a legújabb ötödik generációs Klimov hajtómű. Az áttervezett ventilátor immár 85 kg/mp levegőt szív 75.5 kg/mp helyett. A nagynyomású turbina nagyobb hőteherbírással (1800 K) rendelkezik. Felszálló tolóereje utánégetővel 98.5 kN-ra emelkedett. A MiG-35 (MiG-29OVT) legújabb hajtóműve [29][38].

A kezdeti problémák az RD-33 körül lassan megoldódtak, ma már egy korszerű, megbízható és nagy teljesítményű hajtóműről beszélhetünk. Mutatói bátran összevethetőek a kortárs nyugati hajtóművekkel a kategóriájában. Húszévnyi fejlesztés 50%-os teljesítménynövekedést hozott, és igen jelentősen kitölték az élettartamát a kezdethez képest. Az elképzelés, miszerint a hajtómű belép a 120-130 kN-os tolóerővel rendelkező hajtóművek kategóriájába, valószínűleg sose fog megvalósulni [29].

3.8 A hajtóműcsalád tagjainak összehasonlítása

Úgy kapunk közel valós képet a hajtóművariánsokról, ha összehasonlítjuk őket. A hiányos, és legfőbbképp eltérő forrásadatok megnehezítették a valós összehasonlítást. Ahol eltérő tulajdonságok voltak, ott középértéket adtam meg. A grafikonoknál nem mindig ugyanazokat a hajtóműveket hasonlítottam össze, hanem hozzáadtam vagy kivettem egyes altípusokat, mert bizonyos tulajdonságokról nem volt kellő információ, és torzította volna az összehasonlítást.

	RD-33 (2)	RD-33 (2s)	RD-33 (3)	RD-33M	RD-33K	RD-33M10
Hajtómű maximális átmérője:	1040 mm		1040 mm	1040 mm	1040 mm	1040 mm
Hajtómű teljes hossza:	4240 mm		4240 mm	4240 mm	4240 mm	4240 mm
Hajtómű száraz tömege:	1055 kg		1055 kg	1055 kg	1145 kg	1055 kg
Kétáramúsági fok:	0.55		0.55	0.55	0.55	0.55
Kompresszor nyomásviszony:	21.7		21.7	21.7	21.7	21.7
Kompresszor tömegárama:	77 kg/s		77 kg/s	77 kg/s	82 kg/s	77 kg/s
Fajlagos tüzelőanyag fogyasztás:	75 kg/kNh		75 kg/kNh	75 kg/kNh	75 kg/kNh	n/a
Fajlagos tüzelőanyag fogyasztás utánégetővel:	205 kg/kNh		205 kg/kNh	205 kg/kNh	190 kg/kNh	n/a
Turbina előtti megengedett maximális hőmérséklet (T_3):	1680 K		1680 K	1680 K	1800 K	n/a
Tolóerő:	50 kN		50 kN	53 kN	55 kN	n/a
Tolóerő utánégetővel:	81.3 kN		81.3 kN	88(93) kN	88(94) kN	105(115) kN
Két nagyjavítás közötti idő:	250 óra	700 óra	1000 óra	n/a	n/a	n/a
Élettartam:	800 óra	1000 óra	2000 óra	n/a	4000 óra	n/a

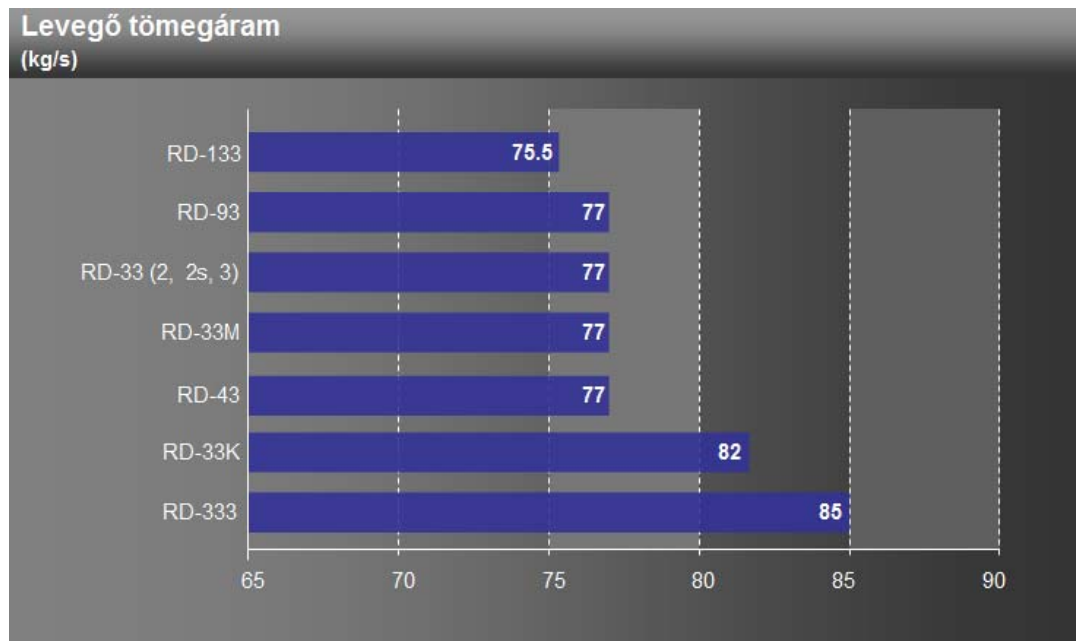
	SMR-95	RD-43	RD-93	RD-133	RD-333	WS-13(A)
Hajtómű maximális átmérője:	1040 mm	1040 mm	930 mm	1040 mm	1040 mm	4140 mm
Hajtómű teljes hossza:	5440 mm	4240 mm	4229 mm	4240 mm	4240 mm	1020 mm
Hajtómű száraz tömege:	1295 kg	1055 kg	1055 kg	1145 kg	1145 kg	1135 kg
Kétáramúsági fok:	0.55	0.55	0.55	0.55	0.55	0.57
Kompresszor nyomásviszony:	21.7	21.7	21.7	21.7	21.7	n/a
Kompresszor tömegárama:	77 kg/s	77 kg/s	77 kg/s	75.5 kg/s	85 kg/s	n/a
Fajlagos tüzelőanyag fogyasztás:	n/a	71 kg/kNh	75.5 kg/kNh	71 kg/kNh	71 kg/kNh	n/a
Fajlagos tüzelőanyag fogyasztás utánégetővel:	n/a	195 kg/kNh	205 kg/kNh	195 kg/kNh	195 kg/kNh	n/a
Turbina előtti megengedett maximális hőmérséklet (T_3):	1680 K	1800 K	1680 K	n/a	n/a	1650 K
Tolóerő:	n/a	55 kN	49.4 kN	56 kN	n/a	51.2 kN
Tolóerő utánégetővel:	83 kN	100 kN	81.4(88.4) kN	90 kN	98 kN	86(100) kN
Két nagyjavítás közötti idő:	600 óra	n/a	700 óra	n/a	n/a	n/a
Élettartam:	1400 óra	n/a	1400 óra	2000 óra	4000 óra	1500 óra

29. ábra: A vizsgált hajtóművek főbb adatai.⁶⁷

Alapvetően elmondható, hogy a hajtómű fizikai méretei az idők folyamán nem változtak egyik alváltozatnál sem. Ez igaz a hossza, átmérőre. Némely eltérés mutatkozik a tömegben, hiszen a digitalizáció megjelenésével a hajtóműcsalád fiatalabbik generációi megkapták a FADEC-et. A vadhajtások, mint az SMR-95 teljesen más utat járt be. Ott nem szovjet repülőtechnikába építették be, így alkalmazkodnia kellett a körülményekhez, míg a WS-13, mely nagyban hasonlít az eredeti RD-33-hoz, a kínai viszonyokhoz képest épült.

⁶⁷ Forrás: saját szerkesztés.

A kétáramúsági fok állandó. Ez betudható annak, hogy a hajtómű gyakorlatilag a napjainkban készült el. Értem ez alatt, hogy a kapkodva megalkotott konstrukció mára vált kiforrottá. Ez köszönhető a gyártástechnológiának, az anyagminőségnek és a digitális tervezésnek. Kijelenthető, hogy ezen eljárásokban felzárkózott a nyugati riválisaihoz a Klimov Gépgyár.

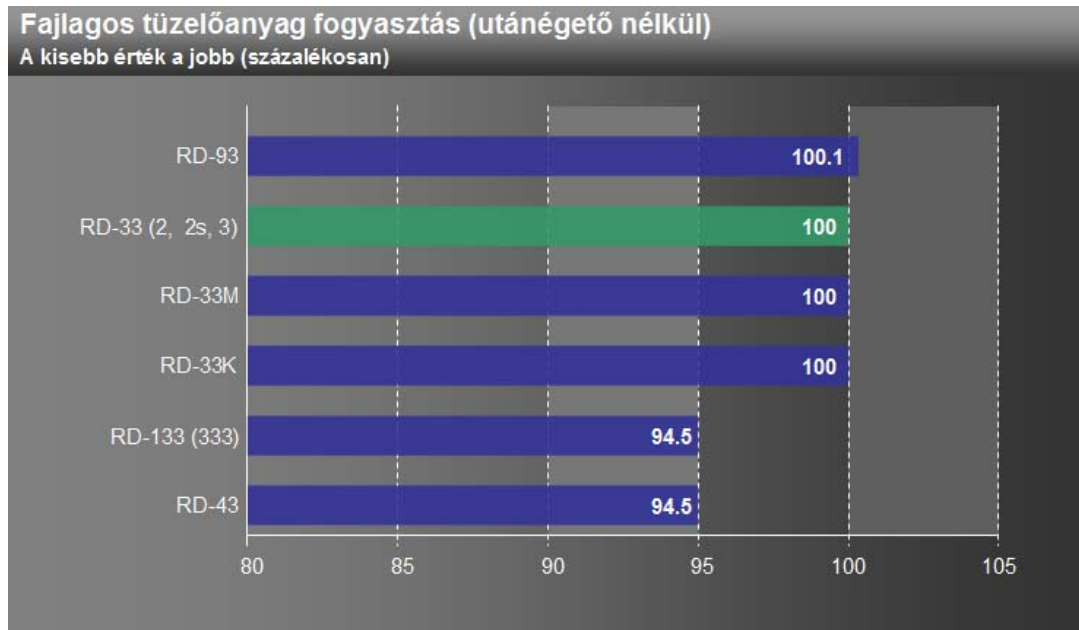


30. ábra: Levegő tömegáram.⁶⁸

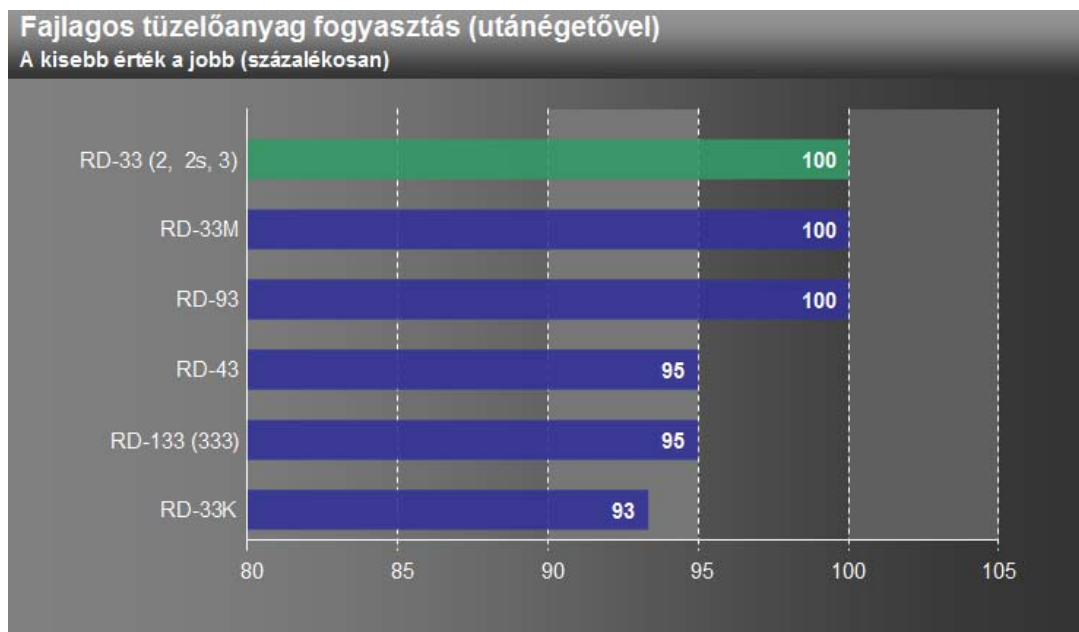
A levegő tömegáram néhol anomáliákat mutat. Alapvetően a széria kezdeti tagjai hasonló értékekkel bírnak, a 90-es évektől azonban megnő a levegőfogyasztás. Itt kilóg a sorból az RD-133. Itt valószínűsíthetően hibás forrásadat állt rendelkezésemre, hiszen később látható lesz, hogy ez a hajtómű aránylag nagy tolóerővel rendelkezik, és ennek egyik elengedhetetlen feltétele a nagy levegőmennyiség.

Utánégetés nélkül a fejlődés jól látható a fogyasztás terén, markáns különbségek vannak a kezdeti és napjaink hajtóművei között. A exportváltozat RD-93 némileg rosszabb mutatóval bír, de a különbség elhanyagolható a referencia RD-33 első szériáihoz képest. A csökkenő tendenciának a politikusok is örülnek, hiszen az üzemeltetési költségek is alacsonyabbak fajlagosan a korábbi évekhez képest, habár nem ez ma nem vehető észre a gazdasági nehézségek miatt.

⁶⁸ Forrás: saját szerkesztés.



31. ábra: Fajlagos tüzelőanyag fogyasztások a referenciaként jelölt hajtóműhöz viszonyítva.⁶⁹



32. ábra: Fajlagos tüzelőanyag fogyasztások a referenciaként jelölt hajtóműhöz viszonyítva.⁷⁰

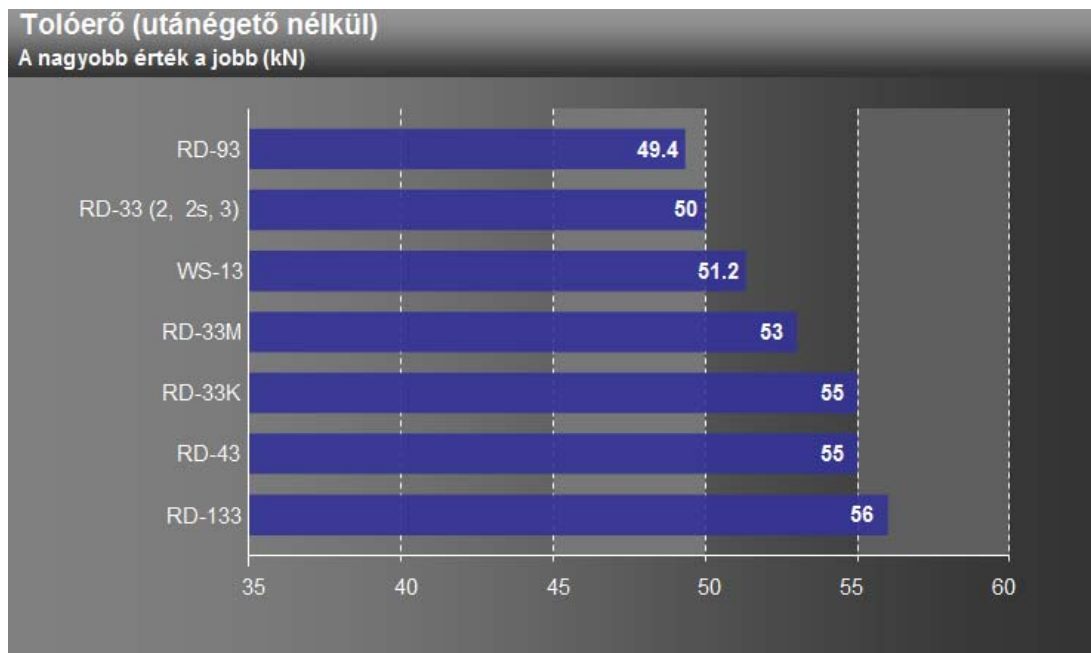
A tervezőmérnökök mintha nagyobb hangsúly fordítottak volna az utánégetés nélküli tüzelőanyag fogyasztásra. Idővel jelentős csökkenést tudtak felmutatni a hajtóműcsalád fiatalabb résztvevői. Ez magyarázható annak, hogy a MiG-29-es igen rövid ideig tud repülni forszázzsal. Ez körülbelül 20 percet jelent folyamatos utánégetéssel. Frontvadász mivolta miatt, az esetleges hosszabb idejű elfogások az légtérsértőkkel szemben kegyetlenül

⁶⁹ Forrás: saját szerkesztés.

⁷⁰ Forrás: saját szerkesztés.

megkövetelik a sebességet, amit csak utánégetővel képesek hozni, és ez borzasztó tüzelőanyag fogyasztást követel. Az 32. ábrán látható, hogy jelentősen sikerült a fogyasztás leszorítani, a K-verzió már 7%-os javulást mutat.

Tolóerő táján sok hajtóművariáns rendelkezik forrással, így beemeltem a lehető legtöbbet. Általában a gyártók csak a maximális tolóerőt jelölik meg, ezért az utánégető nélküli táblázat kevesebb hajtómű típust tartalmaz.

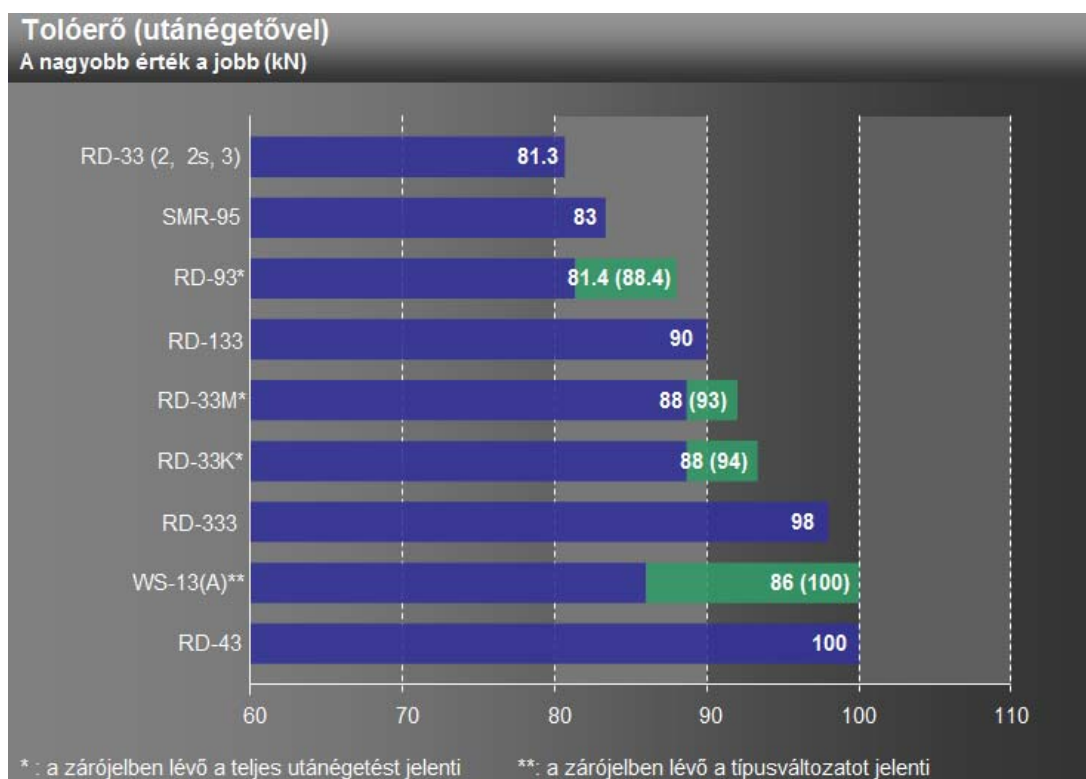


33. ábra: Tolóerő utánégető nélkül.⁷¹

Mondhatni természetes a tendencia. Az RD-93 exportverzió némileg butított, mint minden, ami külföldre kerül. A tolóerő növekedés összességében nem jelentős, mindössze 10% többlet választja el egymástól a kezdeti és napjaink hajtóművét.

Mivel jó néhány alváltozat rendelkezik több fokozatú forszázzsal, ezért a fokozatokban leadott teljesítményt igyekeztem ábrázolni a zöld festéssel.

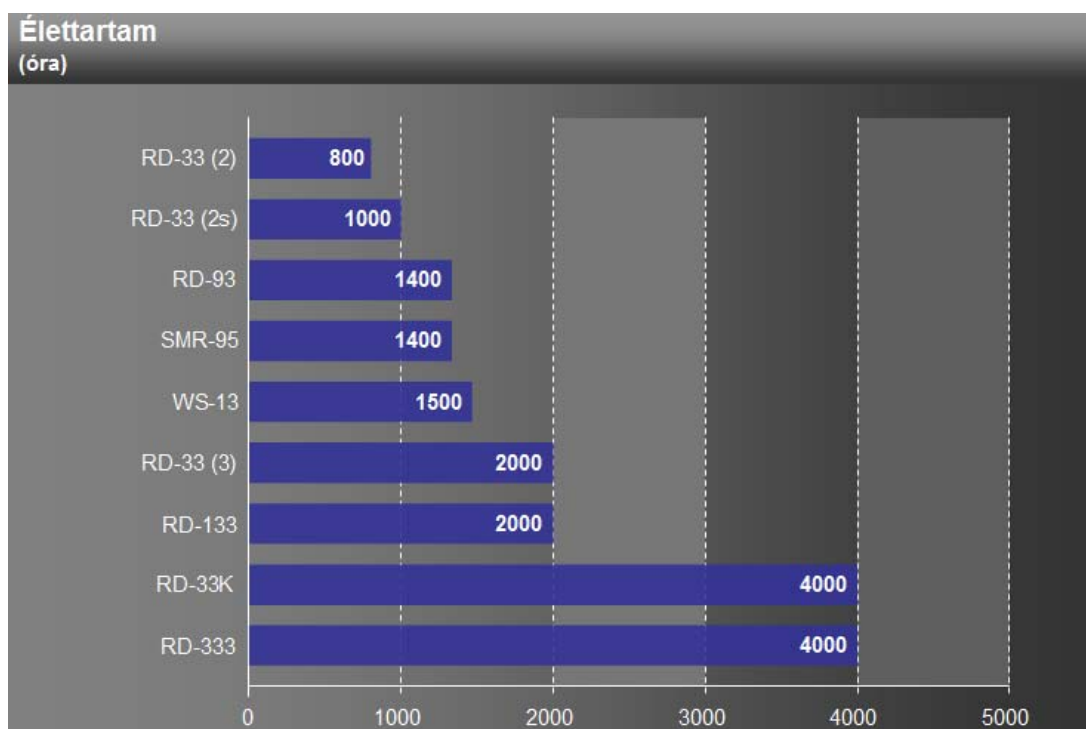
⁷¹ Forrás: saját szerkesztés.

34. ábra: Tolóerő utánégetéssel.⁷²

Nem került bele az RD-33M10 a maga 105 kN tolóerejével, amivel a legnagyobb tolóerővel rendelkező Klimov hajtómű lehetne, mert feltételezhetően nem került elegendő mennyiség rendelkezésre belőle, nem beszélve a pár darab 115 kN-os bemutató verzióról. Valószínűsíthetően ez a kiemelkedő teljesítmény elegendő volt egy légibemutató lerepülésére, de huzamosabb idejű használatot nem engedett meg, tovább csökkentve az így is alacsony élettartamot. A kínai-pakisztáni WS-13A még tesztüzem alatt van, a kiadott 100 kN-os tolóerőadat nem hitelesített, egyetlen kínai forrásban találtam meg.,

Fontosnak találom, hogy kiemeljem az élettartamot ennél a hajtóműcsaládnál. Hiába az alacsony üzemeltetési költség, ha a hajtómű idő előtt végleg selejtezhető. A kezdeti értékek igen alacsonyak voltak, ezeket nem is tüntettem fel a grafikonon. A 25 órás élettartammal rendelkező hajtómű felidézte a II. világháborús német Me-262 BMW 003-as hajtóművének élettartamát, de itt még gyerekcipőben járt a tudomány. A papíron feltüntetett értékeket gyakran nem érték el a hajtóművek. Hogy miért vetettek papírra fals értékeket azt feltehetően az akkori teljesítménykényszer hozta, mely a mérnökökre nehezedett.

⁷² Forrás: saját szerkesztés.



35. ábra: A Klimov hajtóműcsalád tagjainak élettartama.⁷³

A kezdeti nehézségek ellenére hamar megjött a fellendülés, és markánsan megnőtt a hajtóművek élettartama. A külföldi piacra betört hajtóművek nem vitték jó hírét a Klimov Gépgyárnak. Ezt bizonyítja, hogy már a Dél-afrikaiak sem örültek, mikor rá kellett döbenniük a hajtómű rövid élettartamára. Az eset azonban érdekes, mert az egész repülőgép koncepciót hamarabb dobták ki, mint ahogy a hajtómű élettartama lejárt volna.

A minőségi gyártás a 90-es években sem jellemezte a kínai hadipart, így az alap RD-93-at sem tudták érdemben továbbfejleszteni, ami meglátszik a grafikonon is. Elmondható, hogy saját gépek fejlesztésénél mindig a hajtómű okoz problémát. Csak nagyon kevés, és tehetős ország próbálkozik hajtóműépítéssel. Kína eljátszotta Oroszország bizalmát, amikor 1995-ben megkötött szerződés alapján 200 Szu-27 harcászati repülőgépet vásárolt, majd megkezdte alapos vizsgálatukat, hogy saját másolatot készítsen. 2006-ban Oroszország leállította a szállítást, de ekkor már 95 példányt adott át [45]. Ezzel a lépéssel teljesen elzárta magát Kína, hogy esetleges támogatáshoz jusson további hajtóműfejlesztéseihez, melyek teljes mértékben az orosz termékekre alapoznak. Ezért maradt az RD-93, és az AI-31 (Szu-27 hajtóműve) klón viszonylag gyenge a kategóriájában. Technológia hiányában nem tudták feltornázní az élettartamot.

⁷³ Forrás: saját szerkesztés.

3.9 A fejezet összefoglalása

Elmondható, hogy a Klimov Gépgyár felzárkózott a nyugati hajtóműgyártókhoz. Most már képes olyan minőségi hajtóműveket építeni, melyek minden körülmények között üzembiztosak. Így találta meg a helyét a tengerészeti vonalon is. Ezzel a továbbfejlesztéssel bővülni tudott a piaca a MiG Oroszországi Repülőgyártó Vállalatnak, és olyan partnereket talált, mint India, aki repülőgép-hordozóira szánta a MiG-29-est, és vele együtt a Klimov hajtóművet.

Mivel a MiG-29 és az RD-33 elválaszthatatlanok egymástól, ezért mindenképp előnyére válhat az iraki fegyvervásárlás is, aminek a híre nemrég került napvilágra [40].

Több olyan fejlesztés is megtörtént, amelyekre a nyugat irigykedve tekinthet, hiszen a tolóerő vektorálás olyan egyszerűséggel, és hatékonysággal oldották meg, amire korábban nem volt példa. A levegőbeömlés biztosítása tábori körülmények közötti üzemelést is megenged, melyek a keleti gépek sajátosságai, bár a svédek is érezték ennek fontosságát, és ebben a szellemben tervezték meg repülőgépeiket.

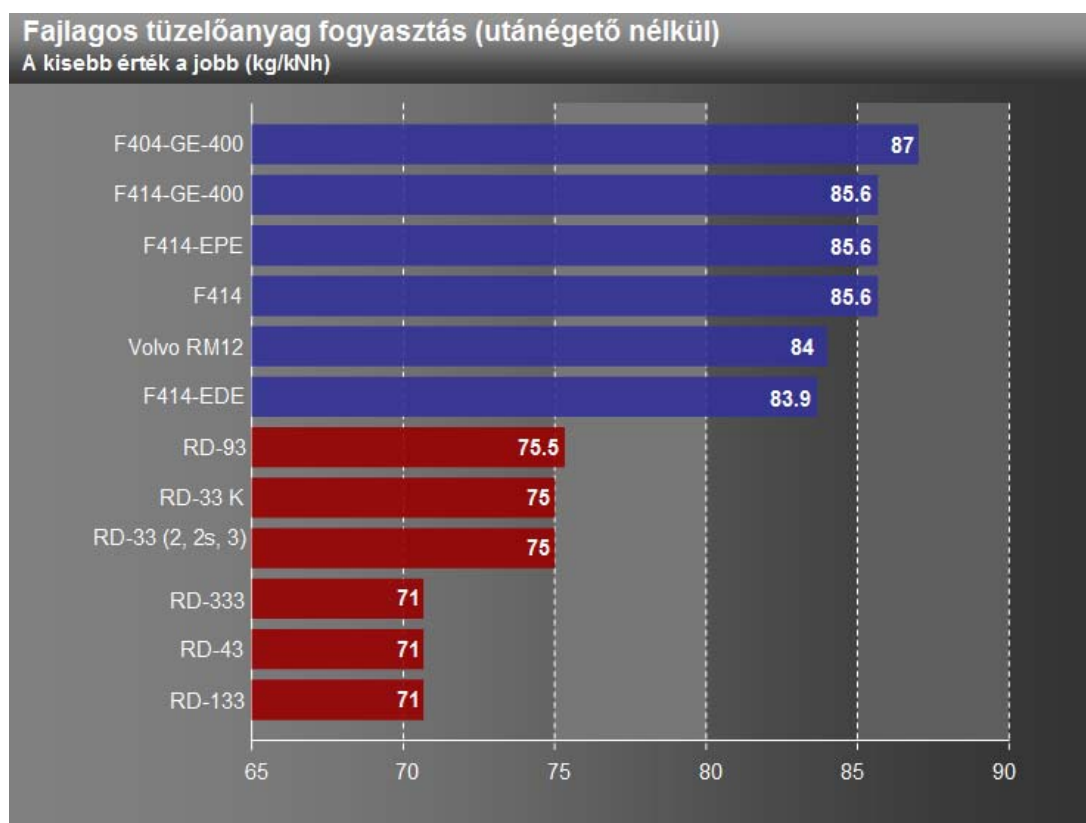
Végeredményben egy kompakt, és most már üzembiztos hajtóművet tudhat magáénak a vállalat, melynek üzemeltetése költséghatékony, de ha kell, akkor a kellő teljesítményt tudja hozni hatékonyan.

4. HAJTÓMŰVEK SZORÍTÓBAN

Igyekeztem a legátfogóbb képet adni az egyes hajtóművekről, részletezve a gyártástechnológiát, a fejlesztési potenciált és nem utolsósorban a gazdaságos üzemeltetést. Ebben a fejezetben a két nagyhatalom hajtóműveit összehasonlítva, grafikonokon levezetve láthatóvá válnak a képességek, papíron. Mert a valóság mutathat mást. A forrásaim legtöbbször csak a hivatalosan kiszivárogtatott adatokra épít, melyek akár propaganda jellegűek is lehetnek. A mérések próbapadon történtek, a lehető legideálisabb feltételek mellett. Általában nulla méterre vonatkozó adatok jelennek meg, de a magasság megváltozásával jelentősen változnak az értékek is. Ezért fontos a fajlagosítás a mértékegységeknél, hogy összehasonlíthatóak legyenek. Mert hiába tűnik az egyik gép kedvezőbb fogyasztásúnak lehet, hogy jóval kevesebb tolóerőt produkál.

Az első megméréstetés a fajlagos tüzelőanyag fogyasztás. Alapvetően meghatározza egy repülőgép gazdaságosságát az, hogy a befektetett tüzelőanyagot milyen mértékben képes tolóerővé alakítani. Már a vizsgált repülőgépek tervezésének évtizedében, a 70-es években is mutatkozott az olajválság. A tüzelőanyagok árának folyamatos, drasztikus növekedése, a költség-hatékonyságot fokozatosan, még a katonai repülésben is elsődleges elvárássá tette. Az, hogy a tüzelőanyag-igénynövekedés nem vált lineárisá annak is köszönhető, hogy már pl. a 2. és 3. generációs (közepes hatósugarú, polgári) repülőgépnél is kimutatható a takarékosra való törekvés (korszerűbb, takarékos hajtóművek /turbófan, propfan stb./ és sárkányok /szuperkritikus szárny, winglet, pontosan meghatározott aerodinamikai formák és csatlakozások stb./ alkalmazása). A fokozódó környezetszennyezés, és az ezt magával hozó környezetvédelmi előírások, melyek az ezredforduló környékén szigorodtak, folyamatosan fejlesztésekre kényszerítik a mérnököket. A fenntartható gazdasági fejlődés is tovább ösztönöz. Ennek tudatában vizsgáljuk meg a tüzelőanyag fogyasztást [42].

Hogy markánsan el lehessen választani a keleti és a nyugati technológiát, ezért a Klimov Gépgyár termékeit vörössel, míg a GE kék színnel van jelölve.



36. ábra: A fajlagos tüzelőanyag fogyasztás utánégetés nélkül.⁷⁴

A hadseregeknél markáns programok hivatottak elősegíteni a tüzelőanyag megtakarítást. Ez jellemzően az Egyesült Államokra vonatkozik, hiszen ott egymást érik a fejlesztési programok, melyeknek része a takarékoság növelése is. Ez azonban nem mondható el az orosz félről (vagy igen jól titkolja ezeket a programokat). Bár hajtóművei utánégető nélkül jobb fogyasztási mutatókkal bírnak, mint a nyugati társai, lehet nincs is szüksége ilyen programokra. Ellenben utánégetővel borul a képlet. Jelentős többletfogyasztás mutatkozik a konkurenciával szemben, ahol már 1-2%-os csökkenésnél kijelentik a program sikerességét.

A FADEC megjelenése mind a két ország számára nagy előrelépést jelentett. A digitálisan szabályozott hajtóművek sokkal optimálisabban, és pontosabban adagolják a tüzelőanyagot, ezzel jelentős megtakarítás érhető el. És itt valóban 1-2% is fontos, hiszen egy gép egy százaléka megsokszorozódik egy században, ezredben, ország szinten. Ezt az elméleti értéket tegyük fel, hogy 30 évvel megszorozhatjuk. Érezhető lesz az üzemeltetési költség.

⁷⁴ Forrás: Saját szerkesztés.

37. ábra: Fajlagos tüzelőanyag fogyasztás utánégetővel.⁷⁵

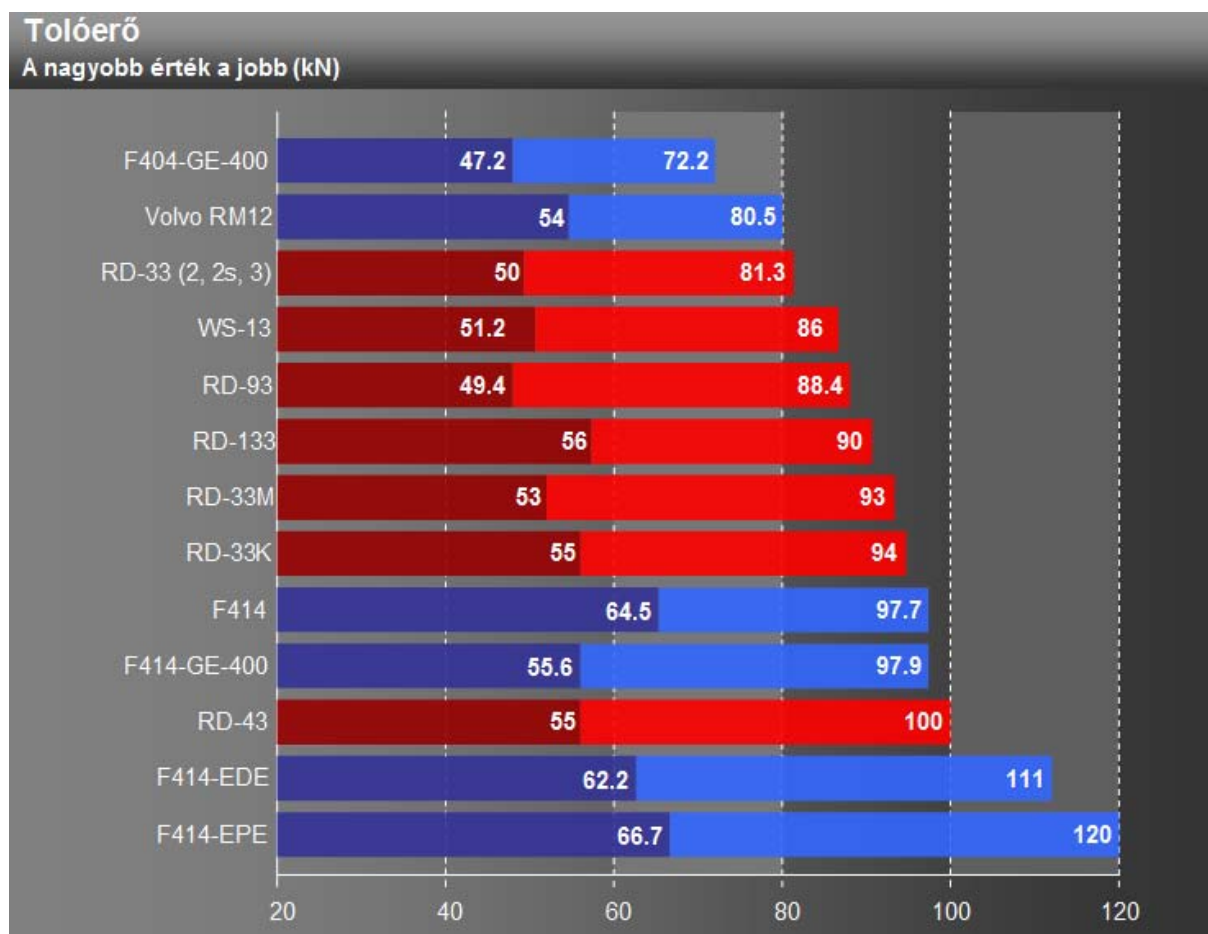
Jól példázza az 50-es évek első felében rendszerbe állított, 2030-2035-ig hadrendben tartani kívánt B-52-es bombázó repülőgép „H” változatának bevezetése, csak az új hajtóművek és digitalizált vezérlésük beépítésének következtében úgy növelte a hatótávolságukat 50 %-kal, hogy közben 25 %-kal csökkentek az üzemeltetés közvetlen költségeit. Járulékosan pedig 55 darabra volt csökkenthető a feladatuk ellátáshoz szükséges KC-135R légi utántöltő repülőgéppark állománya, ami önmagában ~6 milliárd USD megtakarítást eredményez a tervezett kivonásukig hátralévő 25 évben [42].

Az összehasonlítások legfontosabb kategóriája az utánégetéssel megadott tolóerő. Ez a "mindenki erre kíváncsi" kategória. Itt csúcsosodik ki a technika, amiért építették az egész meghajtást.

A két ős, az F404 és az RD-33 összemérhető bátran, nagyjából ugyanakkor kerültek kifejlesztésre. Azonban a Szovjetunió összeomlása olyan gazdasági következményeket hozott magával, hogy az orosz repülőgépipar nem tudta tartani a lépést az amerikaiakkal, így körülbelül 10 éves technológiai hátrányt halmoztak fel. Ez abból következethető, hogy az F404, ami a saját korszakában kiforrottnak számított, továbbfejleszhetővé tették a

⁷⁵ Forrás: Saját szerkesztés.

digitalizáció megjelenésével. A Klimovnál ez a digitális átállással adódó új lehetőségek később jelentek meg.



38. ábra: A tolóerő utánégetéssel és nélküle.⁷⁶

Látható, hogy a hajtóműcsalád fokozatosan fejlődik, de messze nem olyan ütemű, mint a GE F414-es meghajtása, mely idővel kategóriát ugrott, és belépett a 100-120 kN-t tömörítő hajtóművek közé. Kiemelendő az RM12 és az F414-GE-400 (F414G) közötti kapcsolat. A JAS-39 Gripen esetében az előbbi a C/D verzióig, míg az utóbbi az E verziótól üzemel. Markáns különbség tapasztalható, számszerűsítve 22% többlet tolóerővel fog rendelkezni az új Gripen. Ez szükségszerűen magával hoz olyan tulajdonságnövekedést, mint a maximális felszálló súly, ami így 18%-kal emelkedett. Mivel az új repülőgép 40%-kal(!) több üzemanyagot is magával tud vinni, érdemes összehasonlítani a korábbi C/D verziókkal. Ha olyan mennyiséggel töltik fel a gépet, mint a C/D-ket, akkor a tolóerő-súly aránya⁷⁷ 20%-kal

⁷⁶ Forrás: Saját szerkesztés.

⁷⁷ Tolóerő-súly arány: A repülőgép maximális tolóereje osztva a repülőgép üres súlyával és félig feltöltött tüzelőanyag tartállyal (a súly és a tolóerő is fontban van megadva).

fog növekedni, de ha teljes töltöttséggel vizsgáljuk, akkor is 10% többletet eredményez a repülőgép köszönhetően az új hajtómű tolóerejének [43]. A tolóerő többletnek az F/A-18E/F Super Hornet üzemeltetői kétszeresen is örülnek, hiszen a gépeikben kétfő ilyen hajtómű üzemel.

Orosz részről inkább a megbízhatósági problémák megoldására összpontosítottak, hiszen a kapkodó munka a tervezésnél meglátszik. Míg a GE-nél már a továbbfejlesztésen gondolkodtak, addig a Klimov az élettartam hosszabbításra törte a fejét. Párhuzamosan sikerült növelni a tolóerő nagyságát, de még mindig lemaradásban vannak. Összehasonlító táblázatot nem is érdemes csinálni, mert az oroszok nagyon lemaradva kullognának az amerikai termék mögött, hiszen már az F404 is 8000 óra feletti élettartammal rendelkezett.

A tolóerő-súly arány egy fontos tulajdonság egy manőverező harcászati repülőgép esetében. Általában az egyik ismérve a manőverező képességnek. A Gripen együléses verziói az A és C 0.81-es aránnyal rendelkeznek. Ha teljes fegyverzettel kell ezt nézni, akkor ez minden repülőgép esetében is romlik, szóval a repülőnapokon bemutatott intenzív manőverezést gyakorlatilag nem képes kivitelezni felfegyverzve. Az alulméretezett tolóerő meglátszik a gép repülésén. Ezen segített az F414, mely 0.94-re tornázta fel ezt az arányt a Demo esetében. Ezzel sokat javított a manőverező képességén fegyver nélkül és fegyverrel is. Az F-18C alapvetően 1 fölötti aránnyal rendelkezik, pontosan 1.09. A Super Hornetre való fejlesztéssel 1.15-ig növelték. De ne felejtsük el, hogy közben a gép üres súlya 10400 kg-ról 14500 kg-ra növekedett! Forrásom szerint a MiG-29-es volt a dolgozatomban mélyen az egyetlen gép, aminek csökkent a tolóerő-tömeg aránya. A kezdeti remek 1.15-ről egészen 1.09-ig csökkent, de vészüzemű tolóerővel ismét képes volt elérni az 1.15-öt. Ez azzal magyarázható, hogy a gép üres tömege folyamatosan növekedett a technikai berendezések fejlődése miatt. Ezzel nem tudott lépést tartani a Klimov [44].

5. ÖSSZEFOGLALÁS

Mint ahogy a repülőgépek, úgy a hajtóműgyártás is rendkívüli fejlődésen ment keresztül igen rövid idő alatt. Ezek a harci repülőgépek a háborúknak épültek, és a hadszíntér igényeihez igazodtak. A dugattyús motorú vadászrepülőgépet felváltotta a gázturbinás hajtóművel szerelt harcászati repülőgép ahol, mint elődjénél sokáig a sebesség növelése volt a lényeg. Ez a jelenség jóformán megmaradt az egyáramú gázturbinák használatával, majd lassan kikopott a kétáramúság megjelenésével, mely gazdaságilag kedvezőbb volt szubszonikus sebességeken, ezért hamar megjelentek az ilyen hajtóművek a polgári légiközlekedésben. A felismerés, miszerint a légi harcok nagy hányada hangsebesség alatt történik, ezért a harcászati repülés is a gazdaságilag kedvezőbb irányba tendált. Továbbá hatással voltak az elmúlt évtizedek gazdasági problémái, melyek rányomták bélyegüket a repülőgépgyártásra. Az emisszió, a zajkibocsátás, és a gazdaságos üzemeltetés is szempont lett az ezredfordulóra.

Két olyan hajtóműgyárat választottam összehasonlításra, ahol napjaink meghatározó harcászati repülőgépei részére gyártanak korszerű hajtóműveket. Egy repülőgép meghatározó eleme a meghajtás, amit a legkisebb költségek mellett kell biztonságosan üzemeltetni. A jelenlegi technológiákat alkalmazva a két vállalat mindig a lehető legjobbat hozza ki termékeiből, folyamatosan keresve a továbbfejlesztés lehetőségét.

A Magyar Légierőben használt könnyű-vadászrepülőgépek hajtóművei ma már nem a legkorszerűbbek, de a vásárlásuk idején az aktuális csúcstechnikát képviselték. Napjainkban egy harcászati repülőgép üzemeltetését közel 40 évre tervezik, de ez nem azt jelenti, hogy az első és az utolsó széria ugyanazzal a képességekkel rendelkezik. Ne ragadjunk le egy típuszámnál, mert a JAS-39 Gripen név sem jelöli a fejlődési szinteket. A típusverzió a lényeg, az 'E' jelenti a következő típusváltozatot, és itt már markáns különbségek adódnak az alap 'A' verzióhoz képest. Hazánk jelenleg az egyik legmodernebb harcászati repülőgépeket üzemelteti Közép-Európában, és hogy ezt fenntartó legyen, figyelemmel kell követni a repülőgép továbbfejlesztésének részleteit, egészen az alrendszerek világáig, ahol most a hajtómű került bemutatásra.

6. FELHASZNÁLT IRODALOM

- [1] http://en.wikipedia.org/wiki/Lightweight_Fighter_program (2012.10.20.)
- [2] http://en.wikipedia.org/wiki/General_Electric (2012.10.15.)
- [3] http://en.wikipedia.org/wiki/GE_Aviation (2012.10.15.)
- [4] <http://www.fundinguniverse.com/company-histories/allison-gas-turbine-division-history/> (2012.10.15.)
- [5] <http://www.geaviation.com/engines/commercial/genx/> (2012.10.15.)
- [6] <http://www.harlo.hu/dorzshegesztes/> (2012.09.07.)
- [7] Naval Research Advisory Committee - Jet engine noise reduction. 2009. április. E-dokumentum
- [8] <http://www.gcaudio.com/resources/howtos/loudness.html> (2012.09.09.)
- [9] Flight International, 2001. május 8-14-i száma.
<http://www.flightglobal.com/pdfarchive/view/2001/2001%20-%201626.html> (2012.09.11.)
- [10] https://www.fbo.gov/index?s=opportunity&mode=form&id=77f98549958a79e2a492dd0744397003&tab=core&_cview=1 (2012.09.11.)
- [11] http://en.wikipedia.org/wiki/Integrated_High_Performance_Turbine_Engine_Technology (2012.09.07.)
- [12] <http://www.flightglobal.com/news/articles/military-engines-power-surge-213594/> (2012.09.07.)
- [13] <http://www.grc.nasa.gov/WWW/K-12/airplane/thrsteq.html> (2012.10.01.)
- [14] <http://htka.hu/2009/01/22/fontos-merfoldko-a-gripen-demonstrator-eleteben/> (2012.10.01.)
- [15] <http://www.aviationweek.com> GE brings good things to Hornet, Gripen c. cikk (2012.09.11.)
- [16] <http://www.flightglobal.com/news/articles/lockheed-ponders-t-50-re-engining-for-t-x-programme-357148/> (2012.09.11.)
- [17] <http://www.flightglobal.com/news/articles/saab-celebrates-supercruise-test-success-for-gripen-321428/> (2012.09.11.)
- [18] <http://www.tejas.gov.in/history/genesis.html> (2012.09.11.)
- [19] <http://www.flightglobal.com/news/articles/india-picks-ges-f414-for-tejas-mkii-fighter-348059/> (2012.09.11.)
- [20] http://en.wikipedia.org/wiki/Boeing_F/A-18E/F_Super_Hornet (2012.10.02.)
- [21] <http://www.defenseindustrydaily.com/the-jas39-gripen-swedens-4th-generation-wild-card-02401/> (2012.10.02.)
- [22] <http://www.globalsecurity.org/military/world/russia/klimov.htm> (2012.10.07.)
- [23] <http://en.wikipedia.org/wiki/OKB> (2012.10.06.)
- [24] http://en.wikipedia.org/wiki/Hispano-Suiza_12Y (2012.10.06.)
- [25] <http://www.militaryphotos.net> (2012.10.07.)
- [26] http://hu.wikipedia.org/wiki/Hegeszt%C3%A9s_%28f%C3%A9mek%29 (2012.10.08.)
- [27] Vektor László Richard – Az RD-33 hajtómű szerkezeti felépítésének ismertetése. E-dokumentum
- [28] <http://sis.gportal.hu/gindex.php?pg=27907613> (2012.10.09.)
- [29] <http://www.leteckemotory.cz/motory/rd-33/> (2012.10.09.)
- [30] http://www.youtube.com/watch?v=lzGiWNFS3Fs&list=LL-WFoVJLX5GqN_I_lev84uw&feature=mh_lolz (2012.10.09.)
- [31] <http://www.youtube.com/watch?v=3kSOwXjo6Fo> (2012.10.09.)
- [32] A MiG-29 típusú front-vadászrepülőgép, a Magyar Honvédség kiadványa, 1994. Re/9
- [33] A MiG-29 típusú repülőgép műszaki üzemben tartási szakutasítása (GK-437B), első könyv, A repülőgép és rendszerei, a Magyar Honvédség kiadványa, 1995.
- [34] <http://iho.hu/hir/felreertes-farnborough-ban-megis-repulhetett-a-jak-130-120712> (2012.10.14.)
- [35] <http://articles.janes.com/articles/Janes-Aero-Engines/Klimov-RD-43-VKS-Russian-Federation.html> (2012.10.11.)
- [36] http://en.wikipedia.org/wiki/Guizhou_WS-13 (2012.10.12.)
- [37] Dr. Óvári Gyula - Korszerű repülőgépek kormányvezérlése (kézirat), Nemzeti Közszerződési Egyetem
- [38] <http://www.defence.pk/forums/jf-17-thunder/68207-jf-17-thunder-multirole-fighter-thread-4-a-503.html> (2012.10.12.)
- [39] http://en.wikipedia.org/wiki/General_Electric_F414 (2012.09.07.)
- [40] <http://biztonsagpiac.hu/irak-orosz-fegyvereket-vasarol> (2012.10.21.)
- [41] http://www.aerosup.com/AIRCRAFT-PARTS-FROM-CFM_1.aspx (2012.10.15.)
- [42] Dr. Óvári Gyula - Alternatív üzemanyagok alkalmazásának lehetőségei a repülésben. (kézirat), Nemzeti Közszerződési Egyetem
- [43] <http://desvariosdeunatardedeverano.blogspot.hu/2012/08/rare-exports.html> (2012.10.19.)
- [44] <http://www.defence.pk/forums/air-warfare/72354-thrust-weight-ratios-all-fighter-planes.html> (2012.10.19.)
- [45] http://en.wikipedia.org/wiki/Shenyang_J-11 (2012.10.18.)

Szolnok, 2012.10.28.

.....