

A SUGÁRHAJTÓMŰVEK KÖRNYEZETI TERHELÉSE

Az ipari forradalom hajnalán, amikor a gépek tömegesen kezdtek megjelenni, egy egészen új jelenséggel, a környezetszennyezéssel is szembe találták magukat az emberek. Abban az időben még nem számolt senki azzal, hogy a mindennapi munkát megkönnyítő gépek, berendezések által kibocsátott szennyezések milyen egészségügyi és ökológiai kockázatot rejtenek a jelen és a jövő nemzedékei számára.

A mindennapok embere a környezetszennyezést ritkán tekinti globális problémának, inkább az életét közvetlenül ért impulzusokon át (közúti közlekedés, gyárak) tapasztalja meg az emberi környezet egyre nagyobb mérvű terheltségét. Különösen igaz ez abban az esetben, amikor a repülés által okozott környezetszennyezésről beszélünk, hiszen a repülések 70-80%-a olyan magasságban történik, ami a lakosságot nem zavarja, így többnyire fel sem figyel rá. Ennek ellenére a dinamikusan fejlődő légi közlekedés jelentős szennyező forrás, amivel az ICAO (International Civil Aviation Organization – Nemzetközi Civil Repülési Szervezet) a 70-es évek óta egyre komolyabban foglalkozik.

1903-ban, amikor a Wright-fivérek először a levegőbe emelkedtek 16 LE-s gépükön, lehetőséget teremtettek arra, hogy ember alkotta építmény önjelétől a levegőbe emelkedhessen, és hosszabb-rövidebb ideig többnyire a pilóta akaratától függően manőverezzen, és mindezt motor segítségével. Így ezzel az ember képessé vált arra is, hogy szennyező forrást a levegőben üzemeltessen.

A repülőgépek jelentősebb alkalmazását az első világháború segítette elő, ami nagymértékű technikai fejlődést jelentett ezen, és más műszaki területeken is. Kezdett speciális ismereteket és szakképzettséget igénylő új iparág kibontakozni: a repülőipar.

A repülőtechnikai fejlesztések és alkalmazások terén újabb ugrást a második világháború jelentett. A repülőgépek tömeges, egyre sokrétűbb alkalmazása immár szükségszerű volt.

De nem csak a politikának volt szerepe abban, hogy a repülőgépek ilyen rövid idő alatt magas fejlettséget és technikai szintet értek el. A politika csak játszótérrel biztosított, azonban az igazi fejlődés a fejekben volt. A repülés úttörői sokszor önmagukat is feláldozva dolgoztak azon, hogy mind tökéletesebb repülőeszközök szülessenek. A korai időkben a konstruktóri és „tesztpilótái” munka még nem különült el egymástól (lásd: Zsélyi Aladár), később azonban ahogy a

repülőtechnika egyre összetettebbé vált, kezdtek külön foglalkozni egyes szakterületekkel (aerodinamika, szerkezetan, motortan, gyakorlati repülés, időjárás...). A hadsereg is meghozta maga számára a saját szakterületeit, amelyek a repülőgépek katonai alkalmazási lehetőségeit dolgozta ki.

A mai repülést tekintve azonban a legfontosabb lépést a sugárhajtóművek megjelenése jelentette. A feltalálók, tudósok és mérnökök a gázturbinában látták azt a gépet, amely egyesíti a belsőégésű motorok előnyeit a turbina rázásmentes járásának, egyszerű szerkezeti kialakításának és üzemeltetésének előnyeivel.

Barber 1791-ben jelentette be az első állandó nyomású gázturbina szabadalmát. A turbina szerkezeti kialakítására vonatkozó elképzelései a technika akkori színvonalának megfelelően kezdetlegesen voltak és nem is vezethettek eredményre. A gázturbina hosszú ideig nem jutott közelebb a megvalósuláshoz.

Kuzminszkij 1886-1892 között szerkesztett egy figyelemre méltó gázturbinát, amelyet egy kis méretű hajóra terveztek felépíteni. 1890-ben Kuzminszkij javasolta először a gázturbinák repülésben való alkalmazását.

Stolze 1900 körül kezdte el gázturbinájával a kísérleteit. Elsősorban az aerodinamikai ismeretek és a megfelelő hőálló anyagok hiánya miatt kísérletei nem vezettek eredményre. A legnagyobb gondot azonban az elfogadhatóan jó hatásfokú kompresszor megszerkesztése jelentette.

Az említett nehézségek miatt a gázturbina fejlesztése egy másik irányba, az ún. robbanóturbina irányába folytatódott.

Karavogyin nevéhez fűződik az első működő robbanóturbina szerkesztése.

Holzward továbbfejlesztette a robbanóturbinával elkezdett kísérleteket. 1500-2200 kW teljesítményű turbinákat épített, amelyek hatásfoka Zsirickij szerint a 20%-ot is elérte.

Időközben a kompresszorok és a turbinák – mint dugattyús motorokhoz tartozó feltöltő turbókompresszorok – gyors fejlődésnek indultak. Az 1930-40-es években szerzett tapasztalatokat alkalmazva már olyan gázturbinák készültek, amelyek a gyakorlatban is megállták a helyüket. Ebben az időben lendült fel hazánkban is a kutatómunka.

Jendrassik György vezetésével készült el egy 74 kW-os állandó nyomású gázturbina. A gázturbina hatásfoka 21,5% volt, amit később 24,85%-ra emeltek. Erre az eredményre akkor világszerte felfigyeltek, mert kis teljesítménye mellett ilyen jó hatásfokú gázturbinát, eddig még nem építettek.

A repülőgép-gázturbinák a II. világháborúban tűntek fel. Leggyorsabban a gázturbinás sugárhajtóművek fejlődtek, mivel a repülőgépek sebességének növeléséhez nagy teljesítményű hőerőgépre volt szükség.

A légszűrő gázturbinák üzembeállítására később került sor. Ezek a hajtóművek kisebb repülési sebességtartományban üzemelnek, így a gazdaságosság terén meg kellett küzdeniük a viszonylag kis repülési sebességű, de műszakilag

kiforrott dugattyús motorokkal. Jenrassik korábbi tapasztalataira alapozva 1940-re megépített egy kísérleti légcsaváros gázturbinát, mely az elsők között volt a világon. A gázturbina teljesítménye 735 kW volt.

A kétáramú gázturbinás sugárhajtómű konstrukcióját már a 30-as évek elején elkészítették, míg a gyakorlati bevezetése az 50-es évektől kezdődött.

A kétáramú gázturbinás sugárhajtóművek térhódítására jellemző, hogy a 90-es évekre az egyáramú gázturbinás sugárhajtóműveket szinte teljesen kiszorították a polgári légiközlekedés repülőgépeiből. [9]

A sugárhajtóművek fejlesztése során a teljesítmény növelését, a gazdaságosságot és az üzembiztonságot tartották szem előtt. A környezetvédelem háttérbe szorult, és ezt korábban sem a tervezők, sem az üzemeltetők nem tekintették fontosnak. A hagyományos műszaki tervezési és gazdaságossági paraméterek mellett, a légijárművek fejlesztői és üzemeltetői számára is új követelményeket támaszt a környezetvédelem szempontjainak előtérbe kerülése.

A világ légi közlekedésében a sugárhajtóművek alkalmazása mára egyed-uralkodóvá vált, amelyet gazdaságosságuk, megbízhatóságuk, és műszaki lehetőségeik egyaránt indokolnak. Ezért vizsgáljuk meg, hogy a sugárhajtóművek milyen környezeti terhelést jelentenek és milyen lehetőségek adódnak azok csökkentésére.

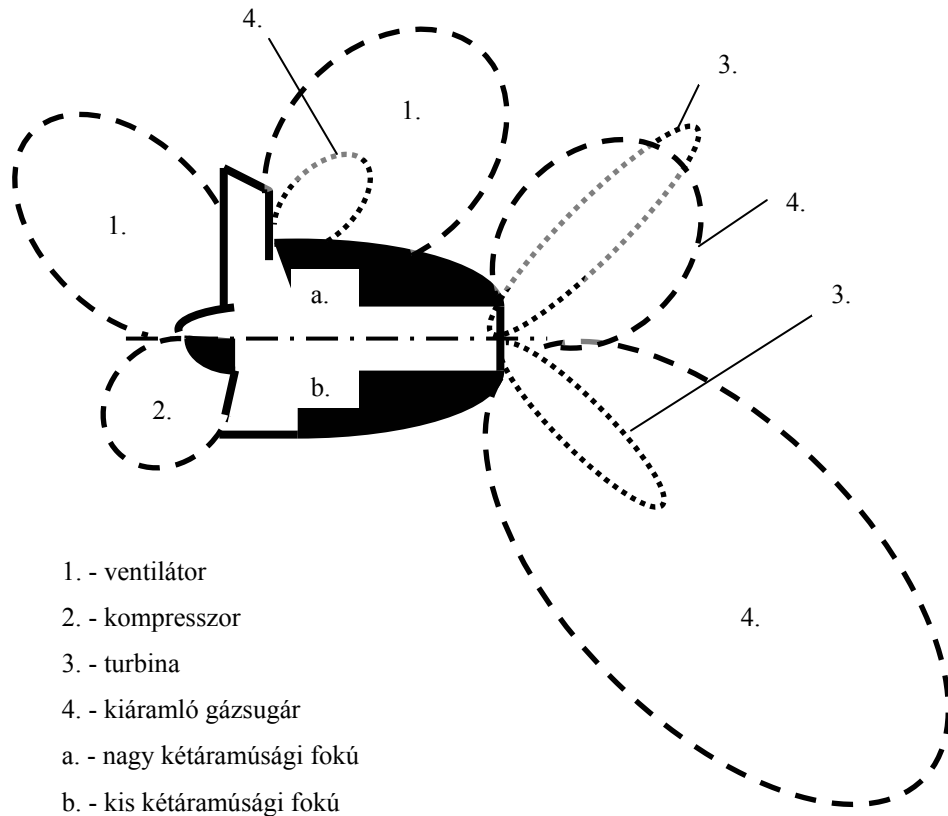
A gázturbinás sugárhajtóművek üzemeltetése során alapvetően két jelentős, a környezetre gyakorolt hatást nevezhetünk meg: a kiáramló gáz emissziós terhelését és a hajtómű és segédberendezései által keltett zajterhelést. A továbbiakban ezzel a két hatással foglalkozom.

A környezetvédelem sarkalatos problémája a Föld anyag- és energiakészleteinek csökkenése. Azonban a kiaknázott és kiaknázatlan fosszilis energiahordozó mennyiség még hosszú ideig biztosítja az emberi igények kielégítését. Napjaink fő problémája így környezetünk szennyeződése, ezáltal az emberi élet minőségének romlása. Az eddigi technikai fejlődést nem annak az emberi környezetre gyakorolt hatása határozta meg, hanem minden esetben más szempontok érvényesültek. A kereskedelmi célú repülés megjelenésével együtt azonban a gazdaságos üzemeltetés igénye is megjelent, és az ennek megfelelő tervezési követelmények már a 30-as években kialakultak. A korábbi tradicionális tervezési paraméterek mellett (méret, hatótávolság, sebesség) a környezetet terhelő szempontok, úgymint a kibocsátott zaj, emisszió, a gyártási és karbantartási folyamatok és végső soron az újrahasznosíthatóság kérdései fogják meghatározni a jövőbeni tervezési követelményeket és technológiai stratégiákat.

A repülés környezeti kérdései esetében megállapíthatjuk, hogy külön kell vizsgálni a levegőszennyezés és a zajprobléma, valamint az emissziós és imissziós kérdéseket. Ezt azért lényeges megtenni, mert a különböző hatások

kialakulását esetenként a környezeti tényezők és egyéb körülmények eltérően befolyásolják.

A motoros repülés kezdete óta a repülőgépek zaja leginkább a hajtóművekhez kapcsolódik. A sugárhajtóművek fő zajforrásai a levegő-beömlőnyílás, a ventilátor, a fűvócső és a kiáramló gázsugár. A hajtómű részegységei által keltett jellemző egyen-hangnyomású zajkép az ábrán látható.



1. ábra. A hajtómű részegységei által keltett jellemző egyen-hangnyomású zajkép

Napjainkban nagy jelentőségűek mind tolóerőt, mind zajemissziót tekintve a sugárhajtású repülőgépek. Ezeknél továbbra is a gázsugár zaj a legnagyobb, az eredő zajszintet döntő módon meghatározó zajösszetevő, így a zajcsökkentési célkitűzéseket is ennek érdekében határozták meg a fejlesztők.

Gázturbinás sugárhajtóművekkel rendelkező közforgalmú repülőgépek esetében a légijármű zajkibocsátása szempontjából meghatározó szerepe van a hajtóművek részegységei által keltett zajnak. Ezek a ventilátor, a kompresszor, a turbina, mint lapátos gépek, a szívócsatorna és fúvócső és az égéstér. [5]

A közforgalmú szubszonikus repülőgépek esetében a pilonokra függesztett hajtómű elrendezés élvez elsőbbséget. Ezen elrendezés előnyei közül a karbantartási, technológiai, áramlástani, biztonsági és zajcsökkentési szempontok emelhetők ki.

A kísérleti zajvizsgálatok, mérések egyértelműen bebizonyították, hogy lehetőség van az egyes részegységeknél hangelnyelés, szigetelés és akusztikailag optimalizált áramlástani viszonyok megvalósítására a hajtóműveknél és azok környezetében.

A beömlő-csatorna áramlástani szempontok szerinti optimalizálása a kétáramúsági fok növelése a kiáramló gázsugár áramlástani feltételeinek javítása, a kompresszor, a turbina, a ventilátor, az égéstér és áttételház zajszigetelése lehet a leghatékonyabb eszköz a légi járművek által keltett zaj csökkentésére. A fenti elemek szerepét figyelembe véve a kérdéskör komplex kezelése történik a tervezőirodák napi munkája során.

A cikk során nem érintett területek: a légijármű sárkányszerkezete által keltett aerodinamikai zaj, és csökkentésének lehetőségei; a repülőterek és azok környezetében működtetett zajmonitor rendszerek kérdései; a repülőgépek segédhajtóműveinek zajkibocsátása.

Jelentős eredményt a hajtóműgyártók a nagy kétáramúsági fokú hajtóművek kifejlesztésével értek el.

A tervező cégek és gyártók alkalmazkodnak a kor követelményeihez akkor, amikor légi közlekedést az egyre növekvő zajkorlátozás jellemzi. A világon több mint 500 olyan repülőtér van, ahol különböző zajcsökkentési eljárást alkalmaznak (NAP – Noise Abatement Procedure) úgy, mint preferált fel- és leszállópályák, repülési profilok, megközelítési eljárások, vagy leszállási tilalom. Egyre több repülőteret szerelnek fel zajmérő mikrofonokkal, amelyekkel minősítik a repülőtereket a pillanatnyi zajszint alapján, és a leszállási díjak gyakran tartalmazzák a zajbírságokat is. Így az üzemeltető társaságok közvetlenül is érintve vannak abban, hogy a beszerzések során, az alacsony zajszinten működő légijárművet részesítsék előnyben. Ezzel viszont azon technológiai fejlesztések számára nyílnak lehetőségek, amelyek környezetünk kisebb terhelését célozzák.

A sugárhajtóművek fejlesztése során a kibocsátott zajszint olyan mértékre csökkent, hogy az már összemérhetővé vált a sárkányszerkezet által keltett zajszinttel.

A Nemzetközi Polgári Repülési Szervezet (ICAO) zajkibocsátást szabályozó rendszerét 1971 óta alkalmazzák, míg az emissziós előírásokat csak 1981-ben

fogadták el. Az ICAO a közforgalmú repülőgépek által kibocsátott zaj mértékének meghatározásával, annak korlátozásával, és az egységesen alkalmazott zajkorlátozó intézkedések kidolgozásával alapul szolgál az egyes nemzeti szabályok megalkotásánál. A 20/1997.(X.21.) KHVM rendelettel hirdetett a nemzetközi polgári repülésről szóló ún. Chicagói egyezmény 16. függelékének I. kötete tartalmazza a légi járművek által keltett zaj korlátozásait, amit a tagországoknak minimális követelményszintként kell alkalmazni, az alábbiak szerint:

- a légi járművek zajminősítési eljárásai. E témakörben kell megemlíteni az 1997. október 6-a előtt típusminősített szubszonikus, sugárhajtóművekkel felszerelt repülőgépek minősítését és az ezen időpont után minősítettekét. Az eljárás lényege az, hogy adott módszer szerint, hitelesített akusztikai eszközökkel, meghatározott repülési pályán mozgó légi jármű, megfelelő számítógépes módszerrel zajmérésnek van alávetve és a le- ill. felszálló és oldalirányból mért zaj értéke az előírásokban rögzített, engedélyezett értéktartományon belüli elhelyezkedéséről szóló tanúsítvány kerül kiadásra;
- a környezetvédelem oldaláról jelentkező mind erősebb nemzetközi nyomás hatására az ICAO Környezetvédelmi Bizottsága a mérési és számítási módszerek változatlan hagyása mellett 2006. január 1-e utáni időszakra a jelenleg érvényes legszigorúbb előírási értékek 10%-os csökkentését határozta el, amit végül az illetékes testület változatlan határidővel 8%-os értékekkel léptetett hatályba.

Célkitűzésként az alábbi zajkibocsátási szinteket határozták meg az új gépek tervezői számára: 2004-re -15dB , 2010-re $>-20\text{dB}$ (az A320-as utasszállító repülőgép esetén a zavaró zajterület $1,5\text{ km}^2$, és a repülőtér határain belül a zajszint 85dB (1998-as adat)).

Az új feltételrendszerben az európai gyártók kedvezőbb helyzetben vannak, bár a feltételek teljesítése jelentős fejlesztéseket igényel. Az amerikai gyártók reménykednek, hogy az amerikai Szövetségi Légügyi Hivatal (FAA) a korábbi gyakorlatot folytatva enyhíteni fogja illetékességi területén a szabály alkalmazását, pl. átalakítások a zajcsökkentés terén, amit az európai szakemberek kezdettől fogva elleneztek.

Az európai országok, elsősorban az Európai Unió tagállamainak légügyi hatóságai a ciprusi megállapodás keretében kidolgozott és saját nemzeti jogrendszerükbe iktatott zajkövetelmény-rendszerét, a JAR-36 követelményeit alkalmazzák. E rendszer magába foglalja az ICAO vonatkozó és normatív előírásait, de ezen túlmenően szigorítások is fellelhetők egy-két témakörben. Lényeges szempont, hogy ezen szabályozás szerint nem lehetséges a zajcsökkentés érdekében átalakított, korábban típusminősített légi járműveket üzemeltetni az illetékességi körbe tartozó országok polgári repülésében. [8]

Minden vizsgálati módszer alapjául szolgál a mérés során a légi jármű mozgásának meghatározása és a mérési pontok kijelölése. Fontos szempont a légi jármű tömege, a hajtóművek száma, elhelyezkedése és a légköri viszonyok. Elengedhetetlen követelmény a mérőeszközök hitelesítése az adott mérési tartományokban és a szükséges korrekciók (hőmérséklet, páratartalom, légnyomás és szélviszonyok szerint) bevitele. Az egyedi légi járművek által kibocsátott pillanatnyi zajterhelések mérésére ún. monitoring rendszert alkalmaznak az egyes zajérzékeny körzetekben, melynek mérési eljárásai, eszközei alapvetően eltérnek a típusminősítéseknél alkalmazottaktól.

Manapság új kihívások jelennek meg a helikopter gyártók számára is, és ez a kihívás az üzemeltetés során keltett zaj csökkentése. A 90-es években jól ismert volt, hogy a helikopter egy igen zajos berendezés és a polgári lakosság növekvő zajérzékenysége valamint az igény, hogy harcterületet a harci helikopterekkel a leghalkabban lehessen megközelíteni, amennyire csak lehet, nagy erőket mozgósított a fejlesztésekbe a mérhető és érzékelhető külső zajszint csökkentése terén.

Korábban a helikopter által keltett zajt egy egyszerű átrepülés során úgy mérték, hogy mikrofont helyeztek el a föld felett 500 lábbal (150 méter), figyelmen kívül hagyva a légi jármű össztömegét. Később a mérési gyakorlat megváltozott, amely már figyelembe vette a helikopter össztömegét is. Jelenleg, ha a helikopter össztömege meghaladja a 6000 fontot (kb. 2720 kg), egy sor kiemelt üzemeltetési (felszállás, átrepülés, leszállás) és meteorológiai körülmények közötti vizsgálaton kell átesnie, ahol a mérőberendezés három sor mikrofonból áll. Ez a megközelítés a repülőgép által keltett zaj objektívebb mérését teszi lehetővé. Más esetben a térbeli frekvencia eloszlást és a keltett zaj frekvenciáját veszik figyelembe a számításban, amely a zaj szubjektív értékét adja. Ezt valóban érzékelhető zajszintnek nevezünk (EPNL – Effective Perceived Noise Level) és EPNdB-ben mérünk.

Általánosan elmondhatjuk, hogy a jelentősebb légügyi hatóságoknál, mint az egyesült államokbeli FAA (Federal Aviation Authority), az európai JAA (Joint Airworthiness Authority) és az ENSZ szakosított szerve, az ICAO (International Civil Aviation Organization) a helikopter zaj normákat mind külön is rögzíti, és az előírások egyre szigorodnak.

Minden fajta helikopter egyedi zajjellemzőkkel bír, ezért most az általános, fő- és farok rotoros elrendezés kerül ismertetésre, ahol a keltett zaj az alábbi összetevőkből áll:

- főrotoron:
 - nagy forgószárny vég sebesség (nagysebességű repülésnél);
 - lapátvég örvény keltette zaj (kissebességű repülésnél, fordulásnál);
- nyomaték kiegyenlítő rendszeren:
 - a farokrotor keltette zaj;

- a farokrotornak a főrotor keltette örvénybe történő behatolása okozta zaj;
 - hajtómű(vek), reduktor, segédberendezések által keltett zaj.
- Konstrukciós zajcsökkentési megoldások a főrotoron:
- a lapátvég sebesség csökkentése:
 - a forgószárny fordulatszámának, vagy hosszának csökkentésével;
 - rotorlapátok számának növelésével;
 - lapátvég örvény mérséklése:
 - lapátvég hátranyilazással;
 - lapátvég profil elkeskenyítésével.

A farokrotornál:

- fenestron kialakítás (csőlégcsvár);
- NOTAR (farokrotor helyett levegőfúvató megoldás).

Összességében megállapítható, hogy zajcsökkentés szempontjából az ICAO által is ajánlottan a legkedvezőbb kialakítás 5 illetve 6 lapátos forgószárny, NOTAR rendszerű nyomatékkiégéssel. [6]

Környezetünk óvása nem csak technológiai kérdés, hanem annak meg kell mutatkoznia az üzemeltetési költségek csökkenése terén is. Egyaránt vonatkozik ez a földi és légi üzemeltetésre, valamint az üzembentartásra is. Az utóbbira mutat példát a következő módszer.

A hajtóművek belső áramlási felületeinek durvulása és elszennyeződése következtében a sugárhajtómű paraméterek (tolóerő, tüzelőanyag-fogyasztás) romlanak. Az áramlási veszteség növekedéséből adódó kedvezőtlen hatásokat a munkafolyamat legnagyobb hőmérsékletének (turbina előtti gázhőmérséklet) növelésével egy ideig még lehet ellensúlyozni a megengedett maximális érték eléréséig. A tüzelőanyag-fogyasztás és a károsanyag kibocsátás természetesen ilyenkor már növekszik.

Amikor a munkafolyamat maximális hőmérséklete tovább már nem emelhető, az áramlási veszteség további növekedésekor a tolóerő már csökken.

Elsősorban a kompresszor belső felülete érzékeny a kvarc (por) szemcsék okozta koptató hatásra és a szennyeződésre. A szennyeződés jelentősen növekszik abban az esetben, ha a felületekre olajgőzök csapódnak le.

Tisztítással csak a szennyeződés távolítható el, az áramlási felületek (döntően a lapátok felületei) durvulása nem állítható meg. Ennek következtében a hajtóművek paramétereinek romlása a leggondosabb tisztítás mellett sem akadályozható meg, csupán mérsékelhető. A tisztítás során elsősorban a kompresszor jellemzői javulnak, mivel a kompresszor-lapátokra az olajgőzökkel dúsított szennyeződés oldható formában rakódik le. a kompresszor utáni áramlástechnikai részegységekre a szennyeződés kocsz formájában ráég, azt a hajtómű megbontása nélkül nehéz eltávolítani.

Az üzemeltető a tisztítástól elsősorban a turbinák körüli hőmérséklet csökkenésén kívül a tolóerő növekedését és az üzemanyag-fogyasztás csökkenését várhatja. [3]

A légi üzemeltetés terén a repülési szakemberek kiterjedt kutatási tevékenységek keretében folyamatosan keresik az optimális repülési eljárásokat, és azok bevezetésével igyekeznek minimálisra csökkenteni a keletkező zajt és levegőszennyezést.

Az elméleti kutatások és a gyakorlati tapasztalatok alapján megállapítható, hogy a hajtóművek teljesítménye, a légi járművek tömege, a le- és felszállás pályája döntően befolyásolja a légi járművek által keltett káros zaj mértékét. Az adott kialakítású légi jármű üzemeltetése során olyan környezetkímélő eljárásokat kell a típushoz kötötten kidolgozni, mely a fel- és a leszállótömeg figyelembevételével optimális hajtómű teljesítmény megválasztását teszi lehetővé a repülőterek körzetében.

Az új, harmonizált követelményrendszert mindenkinek el kell fogadnia, hiszen akkor léphetünk előbbre, ha a légi közlekedés résztvevői mind belátják ennek jelentőségét. Az alábbi követelményrendszernek való megfelelés a légi utasforgalom és szállítási igény évi 5%-os növekedése mellett különösen nagy feladatot ad az áramlásszervező szakemberekre:

- futómű kiengedés röviddel a leszállás előtt;
- alapjáratú hajtóműves bejövetelek;
- meredek kezdeti emelkedési szög;
- a pillanatnyi összsúlyhoz és légköri viszonyokhoz kapcsolódó tolóerő szabályozás;
- minimális gurulási idő;
- az optimális utazómagasságon való tartózkodás növelése;
- az indulási- és célállomás közötti legrövidebb távolság repülése (a szabad útirányok repülése több mint 6%-os üzemanyag megtakarítást jelentene).

Ezek olyan peremfeltételek, amelyek optimális üzemeltetési körülményeket feltételeznek. Cél tehát ezen feltételeket mind jobban megközelíteni. Ezekre találunk példát a földi számítógépes előkészítés, illetve a fedélzeti számítógépek alkalmazása során egyes légi járműveknél. [5]

Hazánkban a polgári légi közlekedés zajvédelmi kérdései sürgetően a 70-es évek végén kerültek előtérbe Ferihegy repülőtér fejlesztése vonatkozásában. Az akkor megfogalmazott irányelvek, módszerek mind a mai napig érvényesek, csak a különböző zajemissziós határértékek módosultak a kornak megfelelő műszaki szinthez igazodva.

A ferihegyi repülőtér körzetében a zajterhelés csökkentési lehetősége, a folyamatosan növekvő forgalmat is figyelembe véve alapvetően két módon lehetséges. Egyik eset a korszerű, alacsony zajkibocsátású hajtóművek üzemeltetése,

másik eset a fel- és leszálló repülőgépek repülési módjának és a forgalmi irányoknak célszerű megválasztása. A repülési mód alatt például a siklósözög megfelelő megválasztását lehet érteni.

A forgalom napszak szerinti szabályozása szintén hozzájárul a lakossági zajterhelés csökkentéséhez.

A zajövezetek kiszámítására Magyarországon a 70-es években egy teljesen új módszert dolgoztak ki a Repüléstudományi és Tájékoztató Központ szakemberei. A módszer lényege a repülőgépmozgás és zajkeltés szimulációja. A repülőgépmozgás modellezése megoldásként akkor fogadható el, ha a repülőgép tényleges térbeli mozgásai arra alkalmas matematikai formában leírhatók. Ezt a lehetőséget a repülőgép mozgásegyenletei biztosítják. A nagyszámú differenciálegyenletek megoldása az akkori számítástechnika fejlettsége mellett azonban rendkívül nehézkes volt, ezért a mozgás bonyolult differenciálegyenleteinek megoldása helyett az egyenleteket, differencia egyenletekké alakították át és időlépcsőket választva, a repülés teljes időtartamát pontosan végigkövethették.

A differenciálegyenletek változóit a repülőgép térbeli helyzetváltozásainak, valamint a hajtómű teljesítményének megfelelően kellett megadni. Így lehetővé vált a repülés közbeni manőverezés leképezése is.

Ezzel a módszerrel szemléletváltás történt a magyar polgári légi közlekedésben is, melynek eredményeképpen a légi forgalomból eredő zajhatást vizsgálták, mértékét szabályozták. [7]

A légszennyezés elleni küzdelem területén a légi járművek által kibocsátott emisszió jelentősége egyre nő. Igen nagy forgalmú repülőterek környezetében a légi járművek emissziója összemérhető az ipari emisszióval.

Az égéstermék emissziójának csökkentésében jelentősebb eredményt elsősorban a tüzelőterek fejlesztésével lehet elérni.

Azonban van egy másik lehetőség is. A repülőgépek földi és földközeli mozgásainak, valamint e mozgásokhoz tartozó hajtómű üzemállapotok emissziójának elemzésével a repülőgépeknek olyan mozgása határozható meg, mely biztosítja azt, hogy az egyes manőverek alatt (pl. nekifutás, emelkedés, vagy gurulás a repülőtér kijelölt pontjai között) a teljes emisszió értéke minimális legyen.

A gázturbinás repülőgép-hajtóművek emissziója a tüzelőtérben lejátszódó égésfolyamat tökéletlenségével kapcsolatos. A gázturbinák égéstermékeit a következő kémiai összetevők alkotják:

- NO_x (nitrogénoxidok);
- CH (szénhidrogének);
- CO (szénmonoxid);
- szilárd anyagrészek (korom);
- SO_x (kénoxidok) elhanyagolható mennyiségben.

Bármelyik fajta emisszió-komponens adott tüzelőtér konstrukció esetében a következő jellemzők függvénye:

- a tüzelőtérbe belépő levegő hőmérséklete és nyomása;
- a levegő-tüzelőanyag viszony (légviszony), ill. a turbina előtti maximális gázhőmérséklet;
- a tüzelőtérben felszabaduló hőmennyiség, ill. a tüzelőtér fajlagos vagy abszolút hőterhelése;
- a tüzelőtérben keletkező lég- és gázsebességek, ill. a tüzelőtérbe beáramló levegőmennyiség;
- a környezeti levegő hőmérséklete, nyomása, nedvességtartalma.

A nedvességtartalom kivételével a többi jellemző a hajtómű, ill. a sárkány üzemi állapotának egyértelmű függvénye, ezért létezik korreláció a hajtómű emissziója és üzemi állapota között.

Az NO_x emisszió a szénhidrogének égési folyamatára jellemző sajátosságokkal függ össze. A tüzelőtér átlagos és maximális hőmérsékletein kívül – melyek egyértelműen a tüzelőtér légviszonyával, tehát a hajtómű üzemi állapotával függenek össze – az NO_x keletkezése összefügg a nagyhőmérsékletű zónák égőtérben belüli elhelyezkedésével, a láng hőmérsékletével, a kémiai reakciók sebességével, a tüzelőanyag N_2 tartalmával, valamint a beszívott levegő nedvességtartamával.

Az NO_x emisszió mind fajlagos, mind abszolút értéke a hajtómű maximális terhelésénél lesz a legnagyobb és üresjáratban (alacsony tüzelőtér hőmérséklet) gyakorlatilag nincs NO_x emisszió.

A CO emisszió a nem tökéletes égés, a CO_2 disszociációja következtében jön létre. Az egyenlőtlen minőségű keverékképződés, az égőtér falainak alacsony hőmérséklete, vagy hirtelen lehűlése szintén elősegíti a CO emisszió keletkezését. Ezek a jelenségek elsősorban az üresjáratú üzemi módokban jelentkeznek, különösen vonatkozik ez a megállapítás a keverékképzésre.

A CH emisszió szintén a rossz keverékképződés, a tüzelőanyag tüzelőtérben történő egyenlőtlen eloszlása, valamint a tüzelőtér falainak hirtelen lehűlése következtében jön létre. Ezek a jelenségek szintén a hajtómű üresjáratú vagy ahhoz közel eső üzemi állapotokban jönnek jelentős mértékben létre, így megállapítható, hogy mind a CO, mind a CH emisszió a hajtómű terhelése csökkenésekor növekszik, legnagyobb fajlagos és legtöbb esetben legnagyobb abszolút értéküket is az üresjáratú üzemi állapotban érik el.

A füstgáz szilárd részecskéi lényegében kisméretű szénrészecskék, melyek kis mennyiségben szerves anyagokat tartalmaznak. A füst a tüzelőtér azon térszeiben keletkezik, ahol a tüzelőanyagban túl gazdag keverék található. A füst abszolút értéke maximumát teljes terhelés esetén éri el, míg a fajlagos füstmennyiség maximuma inkább 50% körüli terheléseknél jelentkezik.

A gázturbinás hajtóművekből kiáramló égéstermékek emissziója és a hajtóművekben megvalósuló munkafolyamat, ill. hajtóműterhelés között egyértelmű korrelációs összefüggések mutatkoznak. Ezek felállításának lehetőségét, ill. a különböző típusú hajtóművek emissziós karakterisztikáinak hasonlóságát az biztosítja, hogy az emissziót létrehozó égésfolyamat (izobar hőközlés) alapvetően a körfolyamat függvénye. A hajtómű körfolyamatának, ill. üzemállapotának (terhelésének) megváltoztatása csak a tüzelőtér utáni (turbina előtti) munkaközeg hőmérsékletének, ill. a tüzelés légviszonyának változása árán lehetséges. Ez maga után vonja a teljes égési folyamat, így az emissziós jellemzők változását is.

Az emisszió különbözőképpen értelmezhető. Emisszionak tekinthető az adott manőver alatt kibocsátott égéstermék mennyisége, vagy az égéstermék egyes szennyező komponensei, ill. az emisszió-komponensek összege.

A következőkben tekintsük át, hogy egy teljes repülési ciklus alatt, az egyes fázisokban hogyan alakul a környezeti emissziós terhelés és milyen lehetséges megoldások vannak annak csökkentésére.

A repülőgép nekifutásakor a hajtómű teljes terhelése mellett ($\varphi = 1$) keletkezik a minimális égéstermék, valamint a CO, CH és szilárd tartalom. A kibocsátott NO_x mennyisége folyamatosan nő a hajtómű terhelésekor, míg az emisszió-komponensek összegének minimális értéke $\varphi \approx 0,85$ -nél áll be, de elképzelhető, hogy nem alakul ki minimum hajtómű részterheléskor (fojtáskor).

A repülőgép emelkedő repülésénél a megállapítások hasonlóak, mint nekifutásnál, azzal a különbséggel, hogy az emisszió-komponensek összegének minimális értéke is a teljes terheléskor adódik. Tehát emelkedő repülést emissziós szempontból mindig névleges gázkar-állással kell végrehajtani, de nagy NO_x háttérszennyezés esetén – a repülőtér körzetét tekintve – a lehető legkisebb φ értékkel.

A repülőgép leszállása alatt siklórepüléskor a hajtómű üresjárási üzemállapotakor kialakuló siklási szög mellett lesz bármilyen szempont szerint értelmezett emisszió minimális. A tényleges siklási szögek ennél lényegesen kisebbek, így a valóságban végrehajtott siklórepülés az emissziók szempontjából nem optimális.

A földetérés utáni kiguruláskor a hajtóművek üresjáratban üzemelnek, az emisszió 99%-ban CO-t és CH-t tartalmaz. Az emisszió csökkentésének egyedül lehetséges módja a kigurulási idő csökkentése, amely elsősorban reverzálható (sugárfékkal épített) hajtóművek alkalmazásával lehetséges.

A repülőgép gurulásakor a hajtómű közel üresjárási üzemmódban üzemel, ezért az emisszió csökkentésének egyik módja a gurulás közbeni hajtómű üzemidő csökkentése, amely a repülőgép vontatásával lenne megvalósítható. Azonban ez jelentősen lelassítaná egy nagyforgalmú repülőtéren az áramlást ezért nem alkalmazzák, noha a repülőtér környezetének légszennyezése így jelentősen csökkenthető lenne. A gurulás közben kibocsátott emisszió csökkentésének má-

sik lehetséges módja a gurulási sebesség növelése, melyet forgalombiztonsági szempontok korlátoznak. [2]

Azon módszerek közül, amelyek lehetővé teszik az NO_x kibocsátás csökkentését, mindenképpen meg kell említeni az ún. hígító befecskendezést az égéstérbe, ami mérsékli a láng hőmérsékletét. Ennek során az égési zónába vizet fecskendeznek, vagy levegőt áramoltatnak.

A gázturbinák NO_x kibocsátásának szabályozásával kapcsolatban a legtöbb tapasztalat az égési zónába történő befecskendezés terén gyűlt össze. Az elsődleges paraméter, ami hatással van az NO_x kialakulására, a befecskendezett víz. Ez lehűlést eredményez, ami csökkenti az égési zóna hőmérsékletét. Amint a tüzelési hőmérséklet növekszik, az NO_x is intenzívebben termelődik.

Az eljárás során két olyan szempontot kell figyelembe venni, ami korlátozza a befecskendezés mennyiségét, ami szükségképpen meghatározza a kiáramló gáz NO_x szintjét. A gyártók a hajtóművek fejlesztése során folyamatos erőfeszítéseket tesznek olyan gépelemek kifejlesztéséért, amelyek mind magasabb égési hőmérsékletet viselnek el, ezáltal is növelve a termikus hatásfokot. Mivel ismert, hogy magas égési hőmérsékleten több NO_x keletkezik, ezért szükségképpen nagyobb mennyiségű befecskendezés szükséges ugyanakkora NO_x emissziós szint megvalósításához, ami a turbina előtti gázhőmérséklet csökkenésével is együtt jár.

Másik szempont, ami a megengedett NO_x emissziós szint elérését ugyancsak megnehezíti, a hajtómű szabályozása és a kívánt alacsony NO_x szint. Ez szintén több befecskendezést feltételez. A megnövelt befecskendezés csökkenti az égési folyamat termikus hatásfokát, amit a hajtómű szabályozása úgy tekint, hogy növelni kell a légviszonyt (több tüzelőanyag adagolás). Az égési gázok energia veszítése miatt, csökken a körfolyamat hatásfoka, amely energia valójában a turbinán munkát adott volna le. Ez az energia a befecskendezett víz, ill. a beáramoltatott levegő felmelegítésére fordítódik.

Mindezekén túl amint a befecskendezést növeljük, az égéstérben dinamikus nyomáslengések is megjelennek (zaj), melynek eredményeképpen a belső rész elhasználódása fokozódik. A CO szint, ami jelzi az égési folyamat tökéletlenségét, szintén növekszik a befecskendezési arány növelésével. Alapjában véve, ha mind több és több vizet juttatunk be az égőtérbe, hogy csökkentsük a láng hőmérsékletét, a láng stabilitását is befolyásoljuk, és ha elérünk egy bizonyos mennyiséget, akkor a víz szó szerint eloltja a lángot.

Éppen ezért olyan kompromisszumot kell hoznunk, ahol egyik oldalon meg kell határozni az égési hőmérséklet növelését, ami az égési folyamat hatásfokát növeli, és ez sajnálatosan több NO_x -et termel, másik oldalon a szükséges mennyiségű befecskendezést, amely csökkenti a termikus hatásfokot, és elősegítve több CO keletkezését. [10]

És most tekintsük át, hogy a hajtóműfejlesztések során milyen szempontok érvényesülnek, és ezek milyen összhangban vannak a környezetvédelemmel.

Az első gázturbinás sugárhajtóművek 10 kN tolóerővel és 0,15 kg/Nh fajlagos fogyasztással rendelkeztek. Jelenleg a sugárhajtóművek tolóereje meghaladja a 150 kN értéket, míg a fajlagos fogyasztás 0,07-0,08 kg/Nh értékű. Kétáramú hajtóművek esetében a maximális felszálló tolóerő nagyobb, mint 450 kN, amihez 0,03-0,035 kg/Nh fajlagos fogyasztás párosul. A turbólégcsavaros hajtóművek teljesítménye mára eléri a 11000kW értéket, míg a fajlagos fogyasztás 0,15 kg/kWh.

A tüzelőanyag-fogyasztás további mérséklése céljából alkalmazzák és fejlesztik a légcsvár-ventillátoros hajtóműveket 850 km/h (0,8 M) repülési sebességre, melyek tüzelőanyag-fogyasztása 20-25%-kal kisebb, mint a korszerű kétáramú hajtóműveké.

A fel- és leszállások számának csökkentése érdekében jelenleg egyre nagyobb befogadóképességű repülőgépeket terveznek a hangsebességhez közeli 900-950 km/h repülési sebességekre (B747-500, B747-600, A380).

Összességében a fejlesztés a hasznos tömeg növelése, a sárkány, a hajtóművek és berendezések relatív tömegének csökkentése, a repülőgép aerodinamikai karakterisztikáinak javítása irányába mutat.

A repülőgép hajtása vonatkozásában jelenleg nem várható a gázturbinás hajtómű alternatívájaként megjelenő, más fizikai elven alapuló hajtómű.

A gázturbinás repülőgép hajtóművek fejlődése a következő generációknál is alapvetően a fajlagos tüzelőanyag-fogyasztás csökkentését, a körfolyamat termikus hatásfok, a fajlagos munka, illetve a propulziós hatásfok növelését jelenti. Fontos feladat a zaj és a káros anyag kibocsátás csökkentése.

Ezen célkitűzések teljesítése érdekében szükséges:

- új, könnyű, nagyszilárdságú anyagok alkalmazása;
- magas hőmérsékletű, nagy nyomásviszonyú hajtóművek kifejlesztése, intenzív lapáthűtés kialakítása;
- zajcsökkentés;
- új égéstér kialakítások a káros-anyag kibocsátás csökkentése céljából, ahol kedvező áramlás miatt a pangó közeg mennyisége minimálisra csökkenthető.

Az újonnan létrehozott technikával szemben alapvető követelmény a megbízhatóság, a repülési karakterisztikák állandósága, az élettartam növelése a gyártás és üzemeltetés költségeinek egyidejű csökkentése mellett.

A Fejlett Szubszonikus Technológia Program (Advanced Subsonic Technology Program) 1993 októberében kezdődött a GE Aircraft Engines és a NASA együttműködésével, amely a gazdaságosságra, a környezetre, a biztonság

ságra és megbízhatóságra fordítja a fő figyelmet. A projekt által a technológiák bevezetésére megcélzott határidő 2005.

A GE definiálta az ún. E⁵ hajtóművet (Economical, Environmentally Friendly, Energy Efficient Engine), mellyel kapcsolatos célkitűzések a következők:

- 50%-os csökkentés a hajtómű relatív költségei vonatkozásában;
- 50%-os NO_x, CO és HC csökkentés;
- 25 EPNdB csökkentés a FAR 36 st. 3-hoz viszonyítva.

A nagy hajtóművek teljes nyomásviszonya 50 fölött várható, míg a kétáramúsági fok a közvetlen ventilátorhajtás esetén 10 fölött lesz.

2015-re várhatóan megháromszorozódik a légi közlekedés, amely megnöveli a kumulálódó zajt.

A fejlett szubszonikus technológia fő irányai:

- Nagyobb szekunder tolóerő-képzés:
 - alacsony zajszintű ventilátor kifejlesztése;
 - továbbfejlesztett könnyűszerkezetek;
 - a nagy kétáramúsági fokú hajtóművek kenőrendszer- és állapot-, valamint elhasználódás megfigyelése;
 - ventilátor szekunder áram optimalizálása.
- Jobb áramlástanai jellemzőkkel rendelkező primer áram:
 - fejlett turbógép-aerodinamika, a fellépő aeroelasztikus jelenségek figyelembevétele és fejlett film-hűtés módszerek alkalmazása;
 - nagy hő- és mechanikai ellenállóképességű anyagok kifejlesztése;
 - fejlett szabályozástechnika;
 - csökkentett szennyezőanyag kibocsátású égéstér;
 - kis NO_x kibocsátású, nagynyomású, magas hőmérsékletű égéstér.

Az égéstér kialakításban egyrészt a kétlépcsős égéstér, másrészt a keveredés szabályozása kerül alkalmazásra. Az utóbbiak előnye, hogy régi égéstér cseréjekor is használható.

A környezetszennyezés csökkentése érdekében vizsgálják az állandó térfogatban történő égés lehetőségét, az ilyen égéstérben ugyanis rövidebb ideig tartózkodik a közeg, s így kevesebb NO_x keletkezik. A pulzáló égés azonban anyagfáradási és vibrációs problémákat vet fel.

A fejlesztések fontos eleme a részegység-hatásfokok és az alkatrészek hőmérséklet-tűrésének növelése. Különös figyelmet fordít a fejlesztés a szabályozásellenőrzés integrálására. [4]

BEFEJEZÉS

A környezetvédelem, a levegőszennyezés és zajkibocsátás csökkentése mind fontosabb szerepet játszik az emberi tevékenységek során. A környezettudatos repülőgép és hajtóműtervezés, gyártás, üzemeltetés és újrahasznosítás remélhetőleg elsődleges szempontokká válnak a 21. században.

A mérnökök felelősége abban áll, hogy a döntési pozícióban lévő laikus vezetők gondolkodásában, mindennapi praxisában olyan szemléletet teremtsenek, hogy megértsék, a környezetvédelem olyan tényező, amit a légi járművek üzemeltetése és üzemeltetése során, elemi módon figyelembe kell venni. Ez nem tekinthető gazdasági szempontból veszteségi tényezőnek, hiszen a környezetvédelemben való beruházás a jövőnket alapozza meg.

FELHASZNÁLT IRODALOM

- [1] Brodszky Dezső: Repülőgép hajtóművek II. Gázturbinák, Tankönyvkiadó Budapest, 1954.
- [2] Dr. Pásztor Endre – Dr. Rácz Elemér: Repülőgépek minimális emissziót okozó földi és földközeli manőverei, Járművek, Mezőgazdasági Gépek 24. évfolyam 1977. 6. szám.
- [3] Dr. Pásztor Endre: Gázturbinás hajtóművek jellemzőinek javulása az áramlási felületek tisztításakor, a javulás meghatározása, Repüléstudományi Közlemények, XII. évf. 29. szám.
- [4] Dr. Sánta Imre: A gázturbinás repülőgép hajtóművek fejlesztési tendenciái, a várható jövő, Repüléstudományi Közlemények, XI. évf. 27. szám.
- [5] Dr. Pokorádi László – Bera József: A jövő század repülésének környezeti kihívása, Repüléstudományi Közlemények, XI. évf. 26. szám.
- [6] Varga Béla: Noise reduction methods of modern single rotor helicopters, Bulletins in Aeronautical Sciences XIV. Vol.1. 2002. ISSN 1417-0604.
- [7] Ábrahám Imre: A légi közlekedés zajvédelmi kérdései, Járművek, Mezőgazdasági Gépek 26. évfolyam 1979. 12. szám.
- [8] Német Márton: Gázturbinás sugárhajtóművek áramlástani vizsgálata a légi járművek által keltett zaj csökkentése céljából, Repüléstudományi Közlemények, Különszám I. 2001.
- [9] Vass Balázs: Repülőgép-hajtómű szerkezettan III. Műszaki Könyvkiadó 1991. ISBN 963 10 7620 2.
- [10] Marvin M. Schorr: NO_x Emission Control For Gas Turbines, Turbomachinery International, Nov/Dec 1991.