

GÁZTURBINÁS SUGÁRHAJTÓMŰVEK ÁRAMLÁSTANI VIZSGÁLATA A LÉGIJÁRMŰVEK ÁLTAL KELTETT ZAJ CSÖKKENTÉSE CÉLJÁBÓL

NEMZETKÖZI SZABÁLYOZÁS A LÉGIJÁRMŰVEK ÁLTAL KELTETT ZAJ VONATKOZÁSÁBAN

Az egyes országok kormányai, légügyi hatóságai egyre nagyobb gondot fordítanak a repüléssel járó — sokszor a lakosság közérzetét rontó — környezeti légi jármű zajhatások csökkentésére. Mindennapi munkájuk során a repüléssel járó kellemetlen fizikai hatásoknak vannak kitéve a légi járműveken szolgálatot teljesítők, a repülőterek dolgozói és a karbantartást végzők.

A Nemzetközi Polgári Repülési Szervezet (ICAO) 1971. óta foglalkozik a közforgalmú repülőgépek által kibocsátott zaj mértékének meghatározásával, annak limitálásával és az egységesen alkalmazott zajkorlátozó intézkedések kidolgozásával. A ma 185 tagországot magában foglaló ENSZ szakosított szervezeteként működő — 1944-ben életre hívott — szervezet szabályozása szolgál alapul az egyes nemzeti szabályok megalkotásánál. A 20/1997. (X. 21) KHVM. Rendelettel kihirdetett un. Chicagói egyezmény a nemzetközi polgári repülésről 16. Függelékének I. kötete tartalmazza a légi járművek által keltett zaj korlátozásait, amit 1993. november 1-től kell a tagországoknak minimális követelményszintként alkalmazni az alábbiak szerint:

- a légi járművek zajminősítési eljárásai. E témakörben kell megemlíteni az 1997. október 06-a előtt típusminősített szubszonikus, sugárhajtóművekkel felszerelt repülőgépek minősítését és az ezen időpont után minősítettek. 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-, felszálló és oldalirányból mért zajértéke az előírásban 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 01-e utáni időszakra a jelenleg érvényes legszigorúbb előírással értékek 10%-os csökkentését határozta el, amit végül az illetékes testület változatlan határidővel 8%-os értékekkel léptetett hatályba.

A következmények. Az európai gyártók kedvezőbb helyzetben vannak ebben az új feltételrendszerben, bár a követelmények teljesítése jelentős fejlesztésekkel jár majd. Amerikai gyártók reménykednek, hogy az amerikai Szövetségi Légügyi Hivatal (FAA) a korábbi gyakorlatot folytatva enyhíteni fogja az illetékességi területén a szabály alkalmazását, pl. átalakítások a légi jármű zajcsökkentés érdekében, amit az európaiak az első pillanattól kezdve elleneztek.

Az amerikai szabályozás követi az ICAO előírásait, azonban az FAA lehetőséget talált arra, hogy az érvényes nemzeti szabályozás (FAR) teljesíthető legyen műszaki állapot megváltoztatásával egy adott légi jármű típusnál, tehát zajcsökkentés céljából a már típusminősített repülőgépet átalakítva tegyen eleget a zajnormáknak.

2006. január 01-ig az amerikai gyártók és üzleti partnereik, vásárlói nem tudják az új szabályozásnak megfelelő légi jármű parkot kialakítani. Így a szabályozás a realitások figyelembe vételével kell, hogy alakuljon majd illetékességi területükön.

Az új légi jármű típusok megjelenésével a nemzetközileg előírt legszigorúbb követelményeket már teljesíteni lehet itt is, mivel a felkészülési idő elegendőnek bizonyul erre. Természetesen ez is plusz ráfordításokat igényel majd. Érthető, hogy az új ICAO szabályozás során az amerikai fél a még szigorúbb 10%-ot meghaladó zajcsökkentés mellett foglalt állást.

Az európai országok elsősorban az Európai Unió tagállamai légügyi hatóságainak a ciprusi megállapodás kereteiben kidolgozott és saját nemzeti jogrendszerükbe iktatott zajkövetelmény rendszerét alkalmazzák, nevezetesen a JAR—36¹ követelményeit. E rendszer magában foglalja az ICAO vonatkozó eljárásait és normatív előírásait, de ezen túlmenően szigorítások is fellelhetők egy-két területen. Az előírás rendszer Subpart-B követelményei tartoznak az előadás témakörébe.

Lényeges szempont, hogy ezen szabályozás szerint nem lehetséges a zajcsökkentés érdekében átalakított, korábban típusminősített repülőgépeket üzemeltetni az illetékességi körbe tartozó országok polgári repülésében. Feltehetően ez fennmarad a 2006. január 01. után életbe lépő szigorítás során is. Az EU gyártói a szigorúbb előírások teljesítésére képes típusokon dolgoznak, a sorozatgyártás a határidőt megelőzően be fog indulni.

Az ICAO szigorításnak megfelelően természetesen a JAR—36 is módosításra kerül majd. Figyelembe véve hazánk EU csatlakozási törekvéseit nemzeti szabályozásunkba célszerű fentiek mérlegelése. Nem kizárt annak a lehetősége sem, hogy a módosítás EU előírásként automatikusan lép majd érvénybe csatlakozásunk során.

¹ JAR—36 — Joint Aviation Requirements

AKUSZTIKAI ÉS GÁZDINAMIKAI ALAPFOGALMAK, VIZSGÁLATI MÓDSZEREK

A légi járművek esetén a hangtérben mozgó zajforrásról beszélünk. A zajforrás gerjesztő energiája elsősorban a hajtóműveknél, a légi jármű körüli áramlásoknál keresendő. Akusztikai és gázdinamikai alapfogalmak:

ZAJHATÁS. A mi esetünkben ez a légi jármű, ami adott időpontban rögzítve gömbhullámformájában sugározza energiáját, ami a távolság négyzetével arányosan csökken.

HANGSEBESSÉG (c), FREKVENCIA (f) és HULLÁMHOSSZ (λ)

$$c = \lambda f$$

A hang terjedési sebessége Laplace egyenletével:

$$c = \sqrt{\frac{p_s \cdot k}{\rho}}$$

ahol:

p_s — statikus nyomás

$k = \frac{c_p}{c_v}$ — fajhőviszony

ρ — sűrűség

Laplace egyenlete adiabatikus állapotváltozásra igaz, ezért a mi esetünkben a környező közeg hőmérsékleti változásait figyelembe véve:

$$c_{\Theta} = c_0 \sqrt{\frac{\Theta + 273}{273}}$$

ahol:

Θ — hőmérséklet

c_0 — hangsebesség 0 °C-nál

Zajszigetelések, zajjelvezetések szempontjából fontos a szilárd testekre jellemző hosszanti-, haránt-, tágulási- és hajlítási hullámok terjedési sebességének meghatározása:

$$c_{hossz} = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \cdot \sqrt{\frac{1-\sigma}{(1+\sigma)(1-\sigma)}}; c_{har} = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \cdot \sqrt{\frac{1}{2(1+\sigma)}}; c_{tág} = \sqrt{\frac{E}{\rho}};$$
$$c_{hajl} = 1,35 \sqrt{c_1 f d}$$

ahol:

- E — rugalmassági együttható;
- ρ — sűrűség;
- σ — Poisson féle együttható;
- c_1 — hosszanti hullám terjedési sebesség lemezben;
- d — lemez vastagság.

Intenzitás (I), hanggátlás (R), hangsebesség (α). Intenzitás csillapítása Stokes-Kirchoff szerint:

$$I_x = I_0 \cdot e^{-2\beta x}$$

ahol:

- x — kérdéses távolság
- β — közeg elnyelési tényező

Akusztikai keménység:

$$q = \frac{\rho_1 \cdot c_1}{\rho_2 \cdot c_2}$$

ahol:

- ρ — közeg sűrűség
- c — a hang terjedési sebesség

Hanggátlás:

$$R = 10 \lg \left(\frac{53,6}{106} M^2 f^2 \right)$$

ahol:

- M — szigetelő fajlagos tömege
- F — frekvencia

Vagy ugyan az R. Berger tapasztalata alapján

$$R = 18M + 12 \lg f - 25$$

Elnyelési fok Crandall szerint:

$$\alpha = 1 - \frac{2Q^2 - 2Q + 1}{2Q^2 + 2Q + 1}$$

ahol: $Q = 0,29 \frac{1}{r} \sqrt{\frac{1}{f}}$

- r — pórusok sugara
- f — frekvencia

Effektív hangnyomás (p_{eff}) és hangteljesítmény (W)

$$p_{eff} = \sqrt{\frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} p^2(t) dt}$$

ahol:

$p(t)$ — nyomásingadozás

$t_2 - t_1$ — időintervallum

$$W = \iint I \cdot dF$$

ahol:

I — hangintenzitás

dF — felület elem

A hangteljesítmény (mértékegysége: dB) másképp felírva:

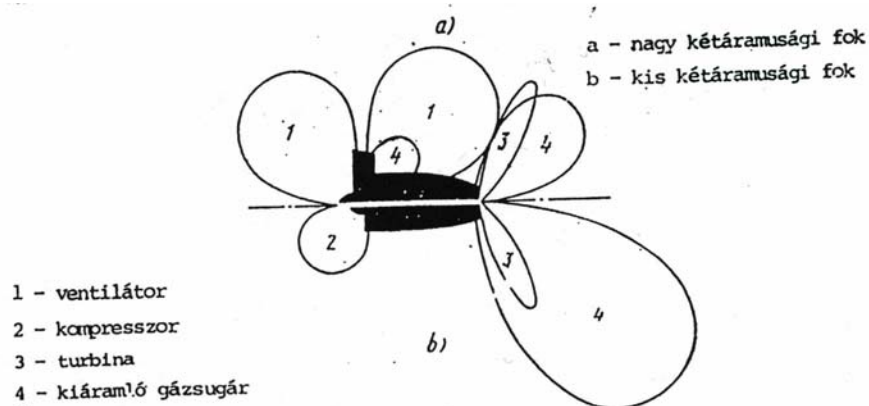
$$L = 10 \lg \frac{W_1}{W_2} = 10 \lg \frac{I_1}{I_2} = 20 \lg \frac{p_1}{p_2}$$

Vizsgálati módszerek

Minden elfogadott vizsgálati módszer alapjául szolgál a mérés során a légi jármű mozgásának meghatározása és a mérési partok kijelölése. Fontos szempont a légi jármű tömege. Elengedhetetlen követelmény a mérő eszközök hitelesítése az adott mérési tartományokban és a szükséges korrekciók (hőmérsékleti, páratartalom, légnyomás és szélviszonyok szerinti) számítógépes bevitele. Az előző fejezetben ismertetett zajminősítési eljárás légi jármű típusra vonatkozik. Az egyedi légi járművek által kibocsátott pillanatnyi zajterhelések mérése ún. monitoring rendszereket alkalmaznak az egyes zajérzékeny körzeteken, melyeknek a mérési eljárásai, eszközei alapvetően eltérnek a típusminősítéseknél alkalmazottaktól.

GÁZTURBINÁS SUGÁRHAJTÓMŰ RÉSZEGYSÉGEINEK VIZSGÁLATA

Gázturbinás sugárhajtóművekkel szerelt közforgalmú repülőgépek esetében légi jármű zajkibocsátása szempontjából meghatározó szerepe van a hajtóművek részegységei által keltett zajnak. Ezek tételesen a ventilátor, kompresszor, turbina, mint lapátos gépek, a szívó- és kiáramló csatorna és az égéstér. A hajtóművek részegységei által keltett egyenhangnyomású zajképet az 1. ábra mutatja.



1. ábra. A hajtóművek részegységei által keltett egyenhangnyomású zajkép

A hajtóművek gázdinamikai paramétereit és az egyes részegységek által generált zaj mértéke között empirikus képletekkel leírt, mérésekkel alátámasztott összefüggések vannak. A szakirodalom által javasolt számítási módszerek a következők.

Kompresszorok vizsgálata és nagy kétáramúsági fokkal rendelkező hajtóművek sajátosságai

Kétáramú hajtóműveknél a hangnyomásszint a gázsugár belső kontúrjában:

$$L_{A_b} = 24 \lg T_b^* + 4 \lg \pi_b^* + 38 \left(1 - \frac{1}{\pi_b^{*\frac{k-1}{k}}} \right) + 6 \lg P_b + 49,5$$

ahol:

T_b^* — abszolút hőmérséklet a belső kontúrban

π_b^* — sűrítési viszony a belső kontúrban

k — adiabatikus kitevő

P_b — tolóerő a belső kontúrban

Kétáramú hajtóműnél a hangnyomásszint a gázsugár külső kontúrjában:

$$L_{A_k} = 24 \left[1 + \left(\pi_k^{*\frac{k-1}{k}} - 1 \right) \frac{1}{\eta_k} \right] + 3,5 \lg \pi_k^* + 38 \lg \left(1 - \frac{1}{\pi_k^{*\frac{k-1}{k}}} \right) + 6 \lg P_k + 108,5$$

ahol:

π_k^* — sűrítési viszony a külső kontúrban

- k — adiabatikus kitevő
- η_k — kompresszor hatásfok
- P_k — tolóerő a külső kontúrban

Hangnyomásszint terelő lapátsorral ellátott egyfokozatú ventilátornál:

$$L_{A_v} = 47,5 \lg v_v + 7,5 \lg m_l - 22,5$$

ahol:

- v_v — kerületi sebesség
- m_l — levegő fogyasztás

Égésterek zajvizsgálata:

$$L_{A_\varepsilon} = 40 \lg \left[(T_g^* - T_k^*) \cdot \sqrt{D_\varepsilon c_{köz}} \left(1 - \frac{m_{ii}}{m_l} \right) \sqrt{\frac{P_g^*}{T_g^*}} \right] - 33$$

ahol:

- T_g^* — abszolút hőmérséklet a turbina belépésénél
- T_k^* — abszolút hőmérséklet az égéstérbe belépéskor
- D_ε — égéstér átmérő
- $c_{köz}$ — közepes sebesség az égéstérben
- m_{ii} — üzemanyag fogyasztás
- m_l — levegő fogyasztás
- P_g^* — turbina előtti nyomás

Turbinák vizsgálata:

$$L_{A_t} = 40 \lg \left(1 - \frac{1}{\pi_t^* \frac{k-1}{k}} \right) - 20 \lg v_t + 10 \lg F_c + 195$$

ahol:

- π_t^* — turbina nyomásviszonya
- v_t — kerületi sebesség
- k — adiabatikus kitevő
- F_c — átáramlási keresztmetszet a turbinából kilépve

Hangnyomásszint az áttételháznál:

$$L_{A_d} = 20 \lg n + 20 \lg D - 12,5$$

ahol:

n — fordulatszám

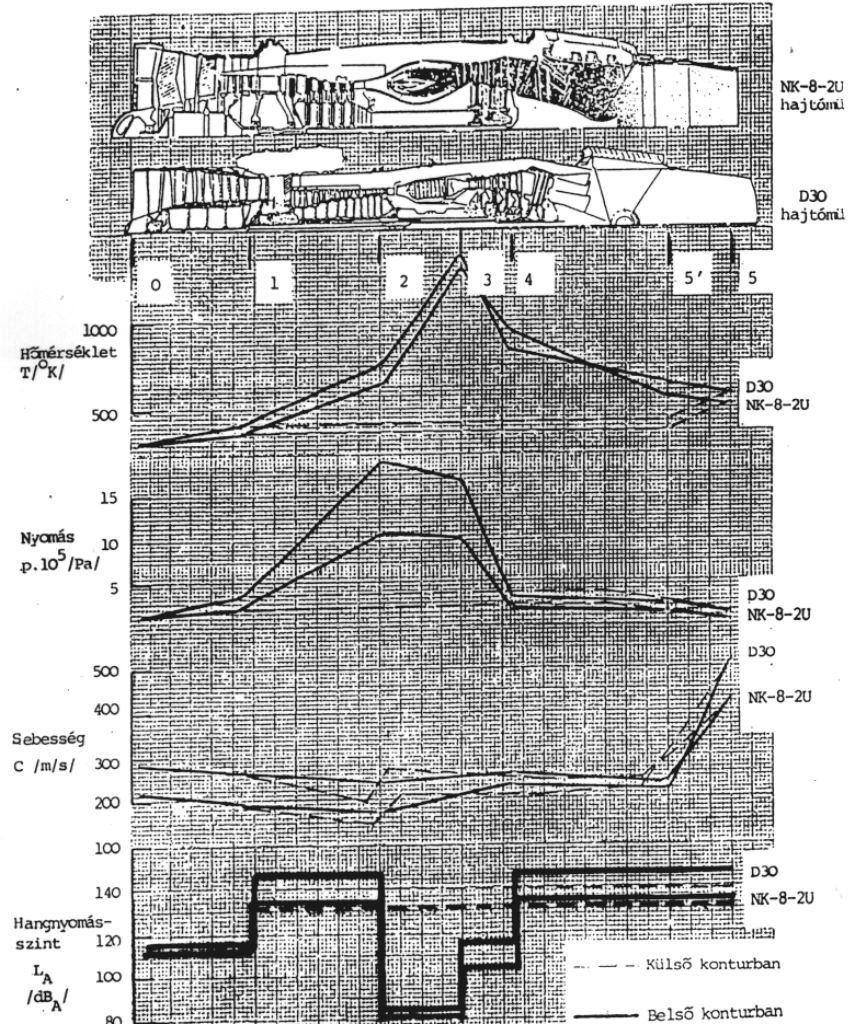
D — átmérő

Hangnyomásszint a hajtómű vázszerkezeténél:

$$L_{A_{Vá}} = 10 \lg E + 24$$

ahol: E — hajtómű teljesítmény

Hajtóművek gázdinamikai paramétereinek és akusztikai jellemzőinek bemutatása a 2. ábrán látható.



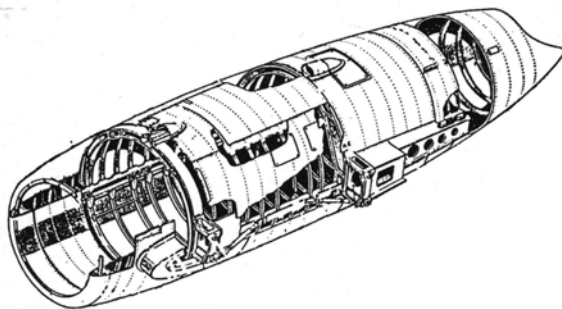
2. ábra. Nk—8—2U és D—30 hajtóművek gázdinamikai és akusztikai paramétereinek bemutatása

HAJTÓMŰVEK ELHELYEZÉSE A LÉGIJÁRMŰBEN

A közforgalmú szubszonikus repülőgépek esetében az ezredfordulón és az azt követő időszakban kizárólagosan pilonokra függesztett hajtóműveket alkalmaznak. Ezen elhelyezés előnyei közül a karbantartási, technológiai áramlástani, biztonsági és zajcsökkentési szempontok emelhetők ki.

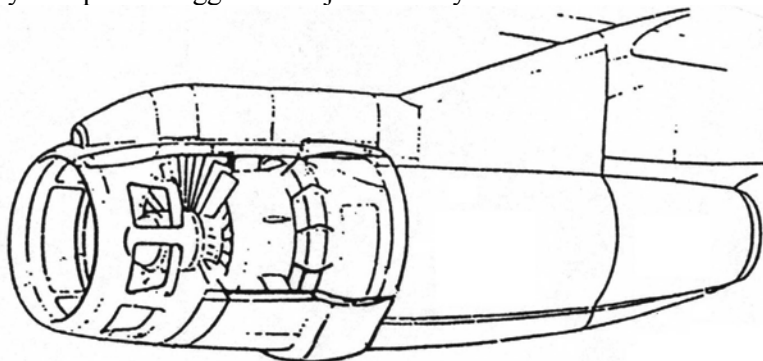
ZAJKIBOCSÁTÁS SZEMPONTJÁBÓL OPTIMALIZÁLT SZÍVÓCSATORNÁK, FÚVÓCSÖVEK, HAJTÓMŰ GONDOLÁK

A előzőekben már felvetett és tárgyalt zajvizsgálatok alapján lehetőség van az egyes részegységeknél hangelnyelés, szigetelés és akusztikailag optimalizált áramlástani viszonyok megvalósítására a hajtóműveknél és azok környezetében. A törzs oldalához illesztett hajtóműgondola kerül bemutatásra a 3. számú ábrán.



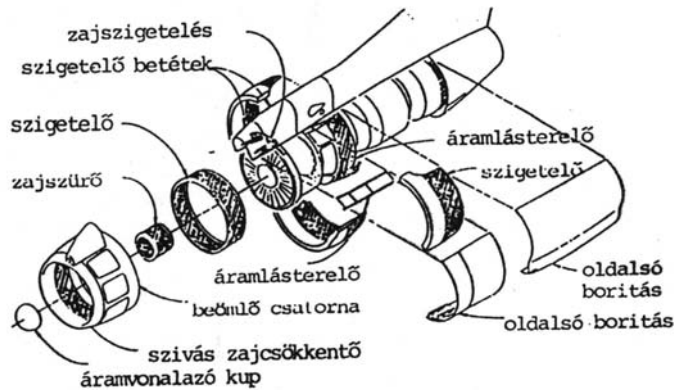
3. ábra. A törzs oldalához illesztett hajtóműgondola

A szárny alatt pilonra függesztett hajtómű elhelyezést szemléltet a 4. számú ábra.



4. ábra. A szárny alatt pilonra függesztett hajtómű elhelyezése

Akusztikailag optimalizált hajtómű gondola látható az 5. számú ábrán.



5. ábra. Akusztikailag optimalizált hajtómű gondola

ZAJCSÖKKENTÉSI MÓDSZEREK A HAJTÓMŰVEK VONATKOZÁSÁBAN

A beömlő csatorna áramlástanai szempontok szerinti optimalizálása a kétáramúsági fok növelése a kiáramló gázsugár áramlástanai feltételeinek javítása, a kompresszor, turbina, ventilátor, égéstér és áttételház zajszigetelése lehet a leghatékonyabb eszköz a légi járművek által keltett zaj csökkentésére, ahogy az előzőekben ez már bemutatásra került. Fentiek közül 1-1 elem külön megoldása nem lehet elégséges, a kérdéskör komplex kezelése történik a tervező irodák napi munkája során. Külön figyelmet érdemel ezen a területen az amerikai kontinensen és üzemeltetési környezetben alkalmazott módszer, melynek keretében a korábban típusminősített légi járművek esetében a zajcsökkentés érdekében módosított hajtómű gondolák felszerelésére kerül sor, így az egyszer szigorodó zajszabályozások követhetők egy-egy légi jármű részegységeinek cseréjével bizonyos karbantartások végrehajtása során. Minden bizonnyal az 1. fejezetben tárgyalt normatív szigorítások új teret nyitnak a fejlesztések előtt és az eljövendő időszakban.

LE ÉS FELSZÁLLÁS PARAMÉTEREINEK MEGVÁLASZTÁSA, ZAJKIBOCSÁTÁS SZEMPONTJÁBÓL OPTIMALIZÁLT ELJÁRÁSOK

A korábban tárgyaltak alapján megállapítható, hogy a hajtóművek teljesítménye, a légi jármű tömege és a le- és felszállás pályája döntően befolyásolja a

légijárművek által keltett káros zaj mértékét. Az adott kialakítású légijármű üzemeltetése során olyan környezetkímélő eljárásokat kell típushoz kötötten kidolgozni, melyek a fel-, leszálló tömeg figyelembevételével legoptimálisabb hajtómű teljesítmény megválasztását teszik lehetővé a repülőterek körzetében. Ezekre találunk példát a földi számítógépes előkészítés, illetve a fedélzeti számítógépek alkalmazása során egyes légijárműveknél. Jelen tanulmány a terjedelem adta határokon belül nem érintette az aerodinamikai zajforrásokat s azok csökkentési lehetőségeit, a repülőterek és azok környezetében működtetett zajmonitor rendszerek kérdéseit és a repülőgépek segédhajtóműveinek zajkibocsátását. A tanulmány kizárólagosan a címben jelzett repülőgép típusok specifikus zajjellemzőit volt hivatva feldolgozni.