



**BUDAPESTI MŰSZAKI ÉS GAZDASÁGTUDOMÁNYI EGYETEM
REPÜLŐGÉPEK ÉS HAJÓK TANSZÉK**

Bicsák György

**Aktív zajcsökkentés lehetőségének vizsgálata sugárhajtóműves
repülőgépeken**

SZAKDOLGOZAT

BUDAPEST

2009

SZAKDOLGOZAT - FELADAT

Bicsák György

Repülőgépezés ágazat

Aktív zajcsökkentés lehetőségének vizsgálata sugárhajtóműves repülőgépeken

Ismertesse a közlekedési zajok emberre gyakorolt hatásait!

Jellemezze a repülési zaj által okozott problémákat!

Milyen a repülési zaj felépítése?

Milyen zajcsökkentési módok vannak?

Ismertesse az aktív zajcsökkentés elvét, alkalmazott struktúráit!

Mik az aktív zajcsökkentés legfőbb területei?

Milyen zajtípusok vannak?

Hozzon létre egy mérőrendszert, mely alkalmas a zajok felépítésének meghatározására!

Végezzen méréseket sugárhajtóművek zajemissziójáról!

A rögzített adatokat rendszerezze, értelmezze!

Értékelje a mérést!

Tanszéki konzulens: Dr. Rohács József

Külső konzulens: dr. Sujbert László

Tanszéki szakdolgozat felelős: Dr. Veress Árpád

Záróvizsga tárgyak:

első: Járművek hő- és áramlástan berendezései I.-II.

második: Repülőgép szerkezettan

harmadik: Repülőgép hajtóművek I.-II.

.....
hallgató aláírása

.....
tanszékvezető aláírása

KONZULENSI VÉLEMÉNY

A hallgató neve: Bicsák György

A konzulens véleménye:

Budapest, 2009.

.....
a konzulens aláírása

SZAKDOLGOZAT BÍRÁLAT

bíró

A hallgató neve: Bicsák György

A bíráló véleménye és a jelölthöz intézett kérdései:

További vélemény (esetleges konkrét oldalakra vonatkozó megjegyzések):

Budapest, 2009.

.....
bíró aláírása

Nyilatkozat

Alulírott Bicsák György a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem Közlekedésmérnök Karának hallgatója kijelentem, hogy ezt a szakdolgozatot meg nem engedett segítség nélkül, saját magam készítettem, és a dolgozatban csak a megadott forrásokat használtam fel. Minden olyan részt, melyet szó szerint, vagy azonos értelemben, de átfogalmazva más forrásból átvettem, egyértelműen a forrás megadásával megjelöltem.

Budapest, 2009. december 11.

.....
Bicsák György

Köszönetnyilvánítás

Szeretném köszönetemet kifejezni dr. Sujbert Lászlónak, a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem Villamosmérnöki Kar Méréstechnika és Információs Rendszerek Tanszék docensének, hogy késői segítségkérésem ellenére felkarolva munkámat, végig segítette azt. Nélküle ez a szakdolgozat nem születhetett volna meg.

Köszönettel tartozom Dr. Rohács Józsefnek, a BME Közlekedésmérnöki Kar Repülőgépek és Hajók Tanszék tanszékvezetőjének, aki elfoglaltságai ellenére szakított időt a velem való konzultációra, s kapcsolataival segítette munkámat.

Továbbá köszönettel tartozom Rácz Jánosnak, Fischer Ottónak, illetve a Lufthansa Technik Budapest munkatársainak, akik lehetővé tették számomra, hogy egy hajtóműpróba adatokat rögzítsek, illetve a helyszínen segítették munkámat.

Szintén köszönettel tartozom Beneda Károlynak BME Közlekedésmérnöki Kar Repülőgépek és Hajók Tanszék tanársegédjének, és Csomor Vilmosnak, a BME Közlekedésmérnöki Kar Repülőgépek és Hajók Tanszék labormunkatársának, akik egy hideg péntek reggel beüzemelték számomra a TKT-1 kísérleti gázturbinás segédhajtóművet.

Abstract

Aktív zajcsökkentés lehetőségének vizsgálata sugárhajtóműves repülőgépeken

Bicsák György

Konzulensek: dr. Sujbert László, Dr. Rohács József

Dolgozatom témájával a képzés során tanultakból próbáltam kitekintés nyújtani, mondhatni a „thinking out of the box” gondolkodásmódot felvenni.

Napjainkban a közlekedéssel szembeni elvárások rohamosan nőnek, mind az utazási sebesség, mind a komfort terén. A repülés halmozottan küszködik ezzel a problémával (gondoljunk csak a repülőtereket érintő feljelentések okozta „károkra”), hiszen a legnagyobb zajteljesítményű közlekedési ágazatról van szó. A repülőgépeken számtalan zajcsökkentési módszert próbáltak ki, főleg a passzív eljárások terén. Nyáron, szakmai gyakorlatom alatt figyeltem fel arra, hogy egy repülőgépnek a szívócsatorna síkjától előre, illetve a fúvócsöve síkjától hátra sokkal nagyobb a zajkibocsátása, mint a két sík között. Következésképpen ezen a területen a passzív zajcsökkentési eljárások igen jó hatásfokkal üzemelnek, viszont e két sík közötti területen kívül nincs lehetőség passzív abszorberek elhelyezésére. Ellenben az aktív zajcsökkentési eljárásokkal talán valamekkora százalékban lehet csökkenteni a zajt. Dolgozatomban először a repülési zaj felépítésével, majd az aktív zajcsökkentési eljárások rövid ismertetésével foglalkozom, rámutatva arra, hogy mely az a struktúra, mely alkalmazható lenne a repülőgépeken, illetve a zajok, mint speciális fizikai folyamatok (jelek) csoportosítási módját ismertetem. A szakdolgozat következő része egy mérés összeállítása, illetve végrehajtása, majd kiértékelése – zajspektrumok elkészítése, mely során a sugárhajtóművek által kibocsátott zaj összetételét próbálom meg megállapítani – mekkora részben periodikus, sztochasztikus – s következtetéseket levonni.

Kulcsszavak: repülési zaj; aktív zajcsökkentés; feedforward struktúra; LMS algoritmus; periodikus-, sztochasztikus jelek; zajspektrum

Tartalomjegyzék

KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS.....	7
ABSTRACT.....	8
ÁBRAJEGYZÉK.....	10
TÁBLÁZATJEGYZÉK.....	11
JELÖLÉSJEGYZÉK.....	12
1. BEVEZETÉS.....	14
1.1. A KÖZLEKEDÉSI ZAJ, HATÁSAI AZ EMBERRE.....	14
1.2. REPÜLŐGÉPEK ZAJA.....	16
1.2.1. Történelmi áttekintés.....	16
1.2.2. Repülési zaj okozta problémák.....	17
1.2.3. A repülési zaj felépítése.....	18
2. AKTÍV ZAJCSÖKKENTÉS.....	22
2.1. ZAJCSÖKKENTÉSI MÓDOK.....	22
2.1.1. Aktív zajcsökkentés alapjai.....	23
2.1.2. A feedback struktúra.....	25
2.1.3. A feedforward struktúra.....	26
2.1.4. Az LMS algoritmus.....	28
2.1.5. Az xLMS algoritmus.....	30
2.1.6. Az aktív zajcsökkentés főbb alkalmazási területei.....	31
2.1.7. Zajtípusok, egyes gépek zajemissziójának felépítése.....	34
2.1.7.1. Determinisztikus jelek.....	35
2.1.7.2. Sztochasztikus jelek.....	38
2.1.7.3. Determinisztikus és sztochasztikus jelek keveréke.....	39
3. REPÜLŐGÉP HAJTÓMŰVEK ÁLTAL KIBOCSÁTOTT ZAJOK MÉRÉSI FOLYAMATA	42
3.1. MÉRŐESZKÖZÖK IMPLEMENTÁLÁSA.....	42
3.2. A TKT-1-ES KÍSÉRLETI GÁZTURBINÁS SUGÁRHAJTÓMŰ ZAJKIBOCSÁTÁSÁNAK MÉRÉSE.....	44
3.3. A BOEING 737-300 TÍPUSÚ REPÜLŐGÉP ZAJKIBOCSÁTÁSÁNAK MÉRÉSE.....	46
4. A MÉRÉSI EREDMÉNYEK KIÉRTÉKELÉSE.....	49
5. ÖSSZEFOGLALÁS.....	57
FELHASZNÁLT IRODALOM.....	58
1. SZÁMÚ MELLÉKLET.....	60
2. SZÁMÚ MELLÉKLET.....	63
3. SZÁMÚ MELLÉKLET.....	70
4. SZÁMÚ MELLÉKLET.....	80

Ábrajegyzék

1. ábra: Tu-154-es repülőgép zajszint-idő függvényének egy részlete felszálláskor és leszálláskor közvetlenül a repülési útvonal alatt mérve	19
2. ábra: Sugárhajtású repülőgépek hajtóműve által kibocsátott főbb jellemző zajok....	20
3. ábra: Nagy kétáramúsági fokkal rendelkező repülőgépek hajtóműve által kibocsátott jellemző zajok.....	21
4. ábra: Paul Lueg által 1936-ban kiadott publikációjának az aktív zajcsökkentés alapjait bemutató sematikus ábrája.....	23
5. ábra: Az aktív zajcsökkentés alapsémája nagyteljesítményű jelfeldolgozó processzor(ok) használatával	24
6. ábra: Aktív zajcsökkentés rendszerének blokkvázlata	24
7. ábra: A feedback struktúra blokkvázlata	25
8. ábra: A feedforward struktúra blokkvázlata	26
9. ábra: Feedforward struktúra átviteli függvényeinek szemléltetése	27
10. ábra: Az LMS algoritmus blokkvázlata.....	29
11. ábra: Az xLMS algoritmus blokkvázlata.....	31
12. ábra: LMS algoritmussal végzett rendszeridentifikáció	31
13. ábra: Aktív zajcsökkentés megvalósításának vázlatrajza fejhallgatókban	32
14. ábra: Aktív zajcsökkentés megvalósításának vázlatrajza zárt csőben	32
15. ábra: Aktív zajcsökkentés megvalósításának vázlatrajza zárt térben	33
16. ábra: A kültéri zajcsökkentés legjellemzőbb „alanya”, a nagy teljesítményű transzformátor, mivel zajemissziója nagy mértékben periodikus	33
17. ábra: Szenzorhálózat beltéri (bal oldali ábra) illetve kültéri (jobb oldali ábra) zajcsökkentéshez.	34
18. ábra: A determinisztikus jelek osztályozása.....	35
19. ábra: A sztochasztikus jelek osztályozása	38
20. ábra: A kalibrátor által kibocsátott szinuszos jel rögzítése az Audacity program segítségével, 100x-os nagyítással	43
21. ábra: A TKT-1-es gázturbinás sugárhajtómű fékpadra szerelve	45
22. ábra: A TKT-1-es hajtómű kilépő gázsebességét szabályozó mechanizmus	45
23. ábra: A CFM56-3-as nagy kétáramúsági fokú sugárhajtómű.....	46
24. ábra: A Boeing 737-300-as Garrett GTCP 85-129[E] típusú segédhajtóműve.....	47
25. ábra: A Boeing 737-300 hajtóműpróbája során felvett mérési pozíciók ábrázolása	48
26. ábra: A Boeing 737-300-as repülőgép felszálló teljesítményen üzemelése során rögzített regisztrátumának (2. számú melléklet 21. ábra) 1000x-es nagyítása.	49
27. ábra: A TKT-1-es gázturbinás sugárhajtómű 95-100%-os fordulatszámon, terhelés nélkül mikrofonnal mért regisztrátum zajspektruma.....	51
28. ábra: A TKT-1-es gázturbinás sugárhajtómű 95-100%-os fordulatszámon, terhelés nélkül mikrofonnal mért regisztrátum zajspektrumának 0 és 1 kHz közötti intervalluma kinagyítva	51
29. ábra: A TKT-1-es gázturbinás sugárhajtómű 95-100%-os fordulatszámon, terhelés nélkül mikrofonnal mért regisztrátum zajspektruma.....	52
30. ábra: A TKT-1-es gázturbinás sugárhajtómű 95-100%-os fordulatszámon, terhelés nélkül zajszintmérővel mért regisztrátum zajspektrumának 0 és 1 kHz közötti intervalluma kinagyítva	52
31. ábra: A TKT-1-es gázturbinás sugárhajtómű 85-90%-os fordulatszámon, terheléssel, mikrofonnal mért regisztrátum zajspektrumának 0 és 1 kHz közötti intervalluma kinagyítva	53

32. ábra: Boeing 737-300 típusú repülőgép hajtóművei alapjáraton - jobb-előlről felvéve - 2. mérés folyamán rögzített regisztrátum spektruma.....	53
34. ábra: Boeing 737-300 típusú repülőgép hajtóművei alapjáraton - jobb-előlről felvéve - 2. mérés zajspektrumának 0 és 1 kHz közötti intervalluma kinagyítva.	55
35. ábra: Boeing 737-300 típusú repülőgép hajtóművei felszálló üzemmódon - előlről felvéve - 2. mérés zajspektrumának 0 és 1 kHz közötti intervalluma kinagyítva.	55
36. ábra: Boeing 737-300 típusú repülőgép hajtóművei felszálló üzemmódon - jobb-előlről felvéve - 1. mérés zajspektrumának 0 és 1 kHz közötti intervalluma kinagyítva.	56

Táblázatjegyzék

1. táblázat Közlekedési gépek által kibocsátott zaj összetétele.....	40
2. táblázat Zajcsökkentés szempontjából a négy alapeset zajösszetétele	41

Jelölésjegyzék

Latin betűk, jelölések:

- a_i szűrő együtthatók
- A primer hangforrás
- $A_0(z)$ hibamikrofon és a DSP összeköttetésének átviteli függvénye
- $A_1(z)$ elsődleges átviteli függvény
- $A_2(z)$ másodlagos út (átviteli függvény) – *secondary path*
- $A_3(z)$ parazita visszacsatolás átviteli függvénye
- $\hat{A}_2(z)$ $A_2(z)$ modellje
- C_n Fourier együtthatók
- $d(n)$ elnyomandó jel
- $e(n)$ hibajel
- $E(f)$ energiasűrűség spektrum
- $H(z)$ additív szűrő
- J minimalizálandó költségfüggvény
- L másodlagos hangforrás - hangfal
- M hibamikrofon
- $R_x(t_1, \tau)$ véletlen folyamat autókorrelációs függvénye t_1 időpontban
- t idő
- $u(n)$ beavatkozó jel
- V elektromos átalakító
- w szűrő impulzusválaszát tartalmazó vektor
- $W(z)$ adaptív szűrő
- $x(n)$ referencia jel
- $x(t)$ szinuszos jelek leírására szolgáló függvény
- X amplitúdó
- $X(f)$ tranziens jel frekvenciasíkon vett Fourier transzformáltja
- $y(n)$ zajelnyomó struktúra kimenő jele
- $y(t)$ additív zajszűrés során a jel-zaj keverék periodikus átlagoltja

Görög betűk, jelölések:

- α lépés mérete az $N+1$ dimenziójú parabolafelületen
- λ hullámhossz
- μ konvergencia együttható
- $\mu_x(t_1, \tau)$ véletlen folyamat középértéke t_1 időpontban
- φ fázisszög
- τ időlépték
- Ψ_x^2 a jel átlagos négyzetes értéke

Rövidítések:

- ANS Active Noise Cancelling
- D/A Digital/Analóg átalakító
- DSP Digital Sign Process
- FFT Fast Fourier Transformation
- LMS Least Mean Square Method
- psd Power Spectral Density
- xLMS Filtered-x Least Mean Square Method

1. Bevezetés

Az embert körülvevő környezet egyik alapvető meghatározó része a zaj. Napjainkban számtalan zajforrással találkozunk mindennapjaink során, bár ezek túlnyomó többségét már észre sem vesszük, hiszen életünk velejárója lett. A zajokat általában véve ritkán érezzük elviselhetetlennek, viszont ezek lélektani hatása viszonylag rövid idő alatt is jóval nagyobb, mint az „alapzajoké”. A zajok, amiket napjaink során hallunk, sok részről tevődnek össze, például háztartási gépek, számítógépek, emberek okozta zajok, de a legnagyobb részt mégis a közlekedési zajok teszik ki.

A közlekedési zajok köszönhetően az utóbbi évtizedek motorizációs fejlődésének nagy ugrása következtében sokkal nagyobbak lettek, az ENSZ felmérései szerint az úgynevezett civilizációs zajterhelés évtizedenként 1 dB-lel nő, például a nagyvárosi zaj körülbelül 30-szor akkora, mint az 1930-as években. Mivel a növekedés fokozatos, ezért közvetlenül nem is annyira könnyű érzékelni, viszont élettani hatásai határozottan észrevehetőek: napjainkban egyre sűrűbb az öregkori-, sőt, lassacskán már a középkori halláscsökkenés, tudósok kimutatták, hogy a zajterhelés összefüggésben van az érrendszeri, keringése megbetegedésekkel, és a mai kor egyik legelterjedtebb pszichoszomatikus betegségével, a depresszió kialakulásával.

A dolgozat bevezetéseképpen a zaj általánosan vett emberre való hatásait mutatom be röviden, ezzel is próbálva rámutatni arra, mennyire fontos probléma napjainkban.

1.1. A Közlekedési zaj, hatásai az emberre

Tulajdonképpen mi is a zaj? A zaj az emberi (élő) környezetet zavaró, kellemetlen, vagy káros, de bizonyos esetekben, bizonyos szempontból figyelmet felhívó hang. Környezetszennyezési forma, de nincs tárgyiasult formája, csak az élő szervezetben. A zaj alapvető jellemzőjeként említendő, hogy a terjedési sugara kicsi, ennek ellenére tipikusan a civilizált kultúrára jellemző, az élet- és lakóter beszűkülése miatt.

Milyen zaj keletkezik a közlekedés során? Az emberi környezet minőségének egyik meghatározó eleme a zaj, ezen belül elsősorban a közlekedési zaj, pontosabban annak nagyságrendje. Tehát alapvetően minden olyan zajt, amely a közlekedéssel kapcsolatos, közlekedési zajnak nevezünk. A közlekedési zaj fő forrásai a közúti gépjárművek, a vasúti járművek és a repülőgépek. E források számos közös hasonló zajösszetevőt tartalmaznak, azonban eltérnek a zajteljesítményt, irányítottaságot és a frekvenciaspektrumot illetően.

Ezen zajok emberre irányuló hatásai elsősorban a zaj fizikai jellemzőitől függ, de ezeket hatásokat sok, az egyéni érzékenységet meghatározó tényező befolyásolja.

Általában a közlekedési zajok a halláskárosodási kockázat alsó értékét jelentő 85 dB-t csak rövid ideig haladja meg, emiatt a közvetlen egészségkárosító hatással nem kell számolni, viszont vannak más igen kedvezőtlen hatásai:

- fizikai és pszichikai közérzet zavarása
- munkatevékenység zavarása
- alvás zavarása.

Ez utóbbi orvosi szempontból a legjelentősebb, mivel a munkaképesség megőrzésének feltétele az éjszakai nyugodt, pihentető alvás, továbbá az egészség megőrzésének egyik alapvető feltétele. A zajterhelés alvásra gyakorolt hatása megmutatkozik

- a felébredések gyakoriságában;
- az alvásminőség megváltozásában (az ún. „mély” alvásidő lecsökken, az ébren töltött pedig növekszik);
- a vegetatív működés megváltozásában (szívfrekvencia-változás, érösszehúzóadás);
- az agyi áramkép megváltozásában (az agykéreg aktivitása fokozódik).

Az alvás-zavarás következményei a krónikus fáradtságérzés, idegesség, ingerlékenység.

A közlekedési zaj hatása a munkatevékenységre megmutatkozik a figyelem zavarásában; a beszédérthetőség romlásában és a koncentrációképesség csökkenésében. Következésképpen a hibák elkövetése sokkal valószínűbb lesz, ebből következőleg a balesetek száma növekszik. A zavaró hatás a szellemi munkát tekintve a legnagyobb.

A fizikai és pszichikai közérzet zavarása az alábbi formákban mutatkozik meg:

- szubjektív zavarás;
- a rekreációs tevékenység zavarása (üdülés, pihenés, szabad idő eltöltése)
- kommunikációs tevékenység zavarása (beszélgetés, telefon, televízió)
- reakciók és magatartás-változások (ablakok becsukása, nyugtató-altató tabletták szedése, lakás zajszigetelése, költözködési szándék, napjainkban perelési szándék)

A zavarást alapvetően két tényező befolyásolja:

- egyéni tényezők: életkor, egészségi állapot, fáradtsági állapot, idegállapot, társadalmi-gazdasági viszonyok, életvitellel kapcsolatos szokások, törekvések stb.;
- környezeti tényezők: a lakáskörnyezet minősége (levegőszennyezés, biztonság), a lakás helye (városközpont, külváros, vidék), közlekedési ellátottság stb.

Ezen felüli sokat vitatott, és vizsgált befolyásoló tényező a zaj megszokása – alkalmazkodás és az érzékenység fokozódása.

A befolyásoló tényezők nagy száma miatt azonos nagyságú közlekedési zaj az érintettek különböző mértékű zavarását idézi elő. Ez ugyanakkor megnehezíti a különböző zavaró hatások és a közlekedési zaj fizikai nagysága közötti kapcsolat egyértelmű összerendelését, azaz a zavaró hatásokhoz tartozó konkrét számérték megadását. Felmérések kimutatták, hogy az éjszakai zavarás mindig nagyobb a nappalihoz viszonyítva. Másik érdekesség, hogy a zaj és levegőszennyezés miatti zavarás mértéke nagyon szoros kapcsolatban áll egymással, annak ellenére, hogy a ténylegesen mért kipufogógáz-összetevő (szén-monoxid, szénhidrogének, nitrogén-oxid) mennyiségek alátámasztanak. Jogosan feltételezhető, hogy a levegőszennyezés zavaró hatásának megítélését a magas közlekedési zajszintek befolyásolják.[7]

Ezek alapján a közlekedési zaj zavaró hatását nem szabad elszigetelten vizsgálni, azaz a városrészléptékű közlekedési rekonstrukció és terület-felhasználás tervezésekor az egyéb befolyásoló tényezőkre is tekintettel kell lenni.[1]

1.2. Repülőgépek zaja

Ebben a fejezetben a polgári repülés rövid áttekintése után a repülőgépek keltette különböző zajokra térek ki. Ennek fejezetnek még nem témája a zaj elemi részekre való bontása, sokkal inkább a repülőgép egyes részei okozta zajok főbb csoportosítási szempontjai.

1.2.1. Történelmi áttekintés

Ezen fejezetben nem szeretném túl részletesen taglalni a repülés kialakulásának történetét, hiszen megannyi fontos mérföldköve volt, inkább a repülés fejlődésének a zaj emissziójára vonatkoztatott fő állomásait szeretném kiemelni.

Az emberiség számára a legnagyobb kihívást az égbolt meghódítása jelentette az idők kezdetétől fogva. Az ókorból fennmaradt mítoszok is jelzik, hogy történtek próbálkozások, de siker nem koronázta őket. A kereszténység és inkvizíció térhódításának köszönhetően a repülés ördögi tettnek lett titulálva, ezért majdnem ezer évig „jegelve” lett a repülés problematikája. A tudományos megalapozása a repülésnek az 1800-as években kezdődött el, viszont Pilâtre de Rozier és D' Arlandes 1783. November 21-én a Montgolfier fivérek hőlégballonján végrehajtották az első repülést Párizsban. De az első igazi repülésnek egységesen mindenki a Wright fivérek építette, „levegőnél nehezebb” repülőgépeinek 1903. december 17-i felszállását tekinti. A fivérek építette Flyer névre hallgató szerkezet nem hosszú repülésre lett tervezve, viszont nagy áttörést jelentett. Ezen a szerkezeten egy 12 lóerős motor foglalt helyet, s ez hajtotta a propellert. Mondhatni az első repülés során megszületett az első repülési zaj is. Az elkövetkezendő évtizedben épített repülőgépek hasonlóak voltak a Flyerhez, és kis lépésekkel próbáltak meg minél több időt a levegőben tölteni, illetve minél irányíthatóbb gépet létrehozni. Az első világháború fellendülést jelentett a repülés számára, habár ekkor hitték azt, hogy a repülés jövője a léghajókban van. Ekkor készült el Hugo Junkers teljesen fémből készült repülőgépe, s 1915. december 12-én szállt fel. A háború által felállított követelményeknek megfelelő egyre nagyobb és nagyobb teljesítményt kellett a levegőbe repíteni, hiszen ekkor jött divatba a földi célpontok levegőből történő megtámadása. A légelhárítás fejlődése következtében a repülőket egyre vastagabb páncélzattal kellett ellátni, így levegőben maradásukhoz is egyre nagyobb teljesítmény volt szükséges. A Sikorsky tervezte Ilja Muromec bombázó például már négy motorral rendelkezett. A háború után a repülés fejlődése töretlen maradt, 1923-ban emelkedett levegőbe az első autogíró, 1927-ben Charles Lindbergh átrepülte az Atlanti-óceánt, s a 30-as évekre elkezdődött a polgári repülés is.

Hans von Ohain neve a dolgozatomból szempontjából egy nagyon fontos mérföldkö, hiszen az általa tervezett Heinkel He S3 típusú gázturbinás sugárhajtómű segítségével 1939. augusztus 27-én egy Heinkel He 178-as repülőgép végrehajtotta a világ első sugárhajtású repülését. A teljesítménye ennek a hajtóműnek még nem volt elegendő, ezért a második világháború idején még a légszavaros repülőgépeket alkalmazták elsősorban, viszont a háború végén, 1944-ben már harci repülőkre is alkalmazták, a német Messerschmitt Me 262 és a brit Gloster Meteor repülőgépekben. A sugárhajtóművek bár nagyon hasznosak, és napjainkban is nagyobb arányban alkalmazzák őket nagy repülőgépeknél, zajkibocsátásuk sokkal nagyobb, mint a légszavaros repülőgépeké, főleg az akkor tervezett hajtóműveké. Nagyjából azóta

foglalkoznak a repülési zajjal is. A háború után tovább tökéletesítették a sugárhajtóműveket, és az 1950-es évekre a polgári repülésben beköszöntött az úgynevezett jet-korszak. A cél a sebesség növelése volt. 1947-ben sikerült először elérni a szuperszonikus sebességhatárt, melyet a polgári repülésben 1976-ban sikerült bevinni, az első szuperszonikus sebességgel repülő utasszállítóval, Concorde-dal. A hidegháború következtében a katonai repülésben számos további fejlesztés történt, mely aztán lassan átszivárgott a polgári repülésbe is, az utóbbi évtizedekben pedig a számítógépek elterjedése, illetve méreteinek egyre nagyobb mértékben való csökkenése. Mindezek lehetővé tették a robotpilóta-, fly-by-wire rendszer alkalmazását. Napjaink fejlesztései a polgári repülésben a gazdaságosság növelése, illetve az utazási komfort növelésére irányulnak.[4]

1.2.2. Repülési zaj okozta problémák

A már említett (1.1. fejezetben taglaltak) problémák a repülésre még inkább igazak, hiszen az egyik közlekedési ágazatról van szó. Bár az ágazatokat összehasonlítva sokszor megdöbbentő eredmény mutatkozik, a közvélemény megítélése ettől teljesen független életet él. A repülés, mint egy gazdasági ágazat mögött hihetetlen nagy pénzek mozognak, aminek következtében a társadalom szeret minden egyes réteget lehúzni róla. Meglepő módon például a Ferihegyi zajszint alacsonyabb, mint a Bartók Béla út nap közbeni zajterhelése, mégis a közvélemény az elsőt tartja hangosabbnak. A repülőterek kialakításánál, tervezésénél alapvető szempont a várható zajemisszió, illetve ennek hatása a környező településekre. A légitársaságokat, reptereket nagyon komoly szabályok kötelezik a zajkibocsátás minimális szintre csökkentésére, s amennyiben ez ellen vétének, polgári perek során milliókat bukhatnak. A repterek innovatív feladata a zajkibocsátás egy szinten tartása, vagy annak csökkentése.

Az alábbi eljárások például a Ferihegy lépései a zajhatások csökkentése érdekében:

- **Az emelkedési szög megnövelése**

A minimális emelkedés mértékének 3,25 százalékról 5,5 százalékra történő emelése. Ez azt eredményezi, hogy a repülőgépeknek felszálláskor meredekebb szögben kell emelkedniük, így hamarabb érnek el olyan magasságot, ahol a zajhatások már nem zavarják a lakosságot.

- **A szabvány műszeres indulási útvonal (standard instrument departure – SID) betartatása**

Minden repülőgépnek szigorúan ragaszkodnia kell majd az előírt indulási útvonalakhoz, vagyis SID-ekhez. A minimális magasságot, amelyet elérve a repülőgépek lefordulhatnak a SID-ekről, 3000 lábról (1000 méter) 7000 lábra (2100 méter) emelik. Jelenleg számos repülőgép korán lefordul a SID-ekről, és ily módon olyan lakott területek felett halad el, amelyeknek nem kellene repülési zajt tapasztalniuk. A SID-ek szigorú betartatása jelentősen csökkenteni fogja a zajhatások elterjedését ezeken a nagyobb területeken. A Budapest Airport és a HungaroControl szorososan felügyelni fogja a betartatást és együttműködik a légitársaságokkal annak érdekében, hogy minden pilóta értesüljön az új eljárásról.

- **A TORNO3D SID használatának felfüggesztése**

A TORNO3D elnevezésű SID, ami a budai hegyek fölé irányítja a város irányában felszálló repülőgépeket, felfüggesztésre kerül. Ez az útvonal jelenleg olyan lakott területek fölé vezet repülőgépeket, amelyek akár 500 méterrel magasabban helyezkednek el, mint más lakott területek. Ez a módosítás jelentősen csökkenteni fogja a felszálló repülőgépek által keltett zajhatásokat a budai kerületekben, különösképpen a XII. és II. kerületben.

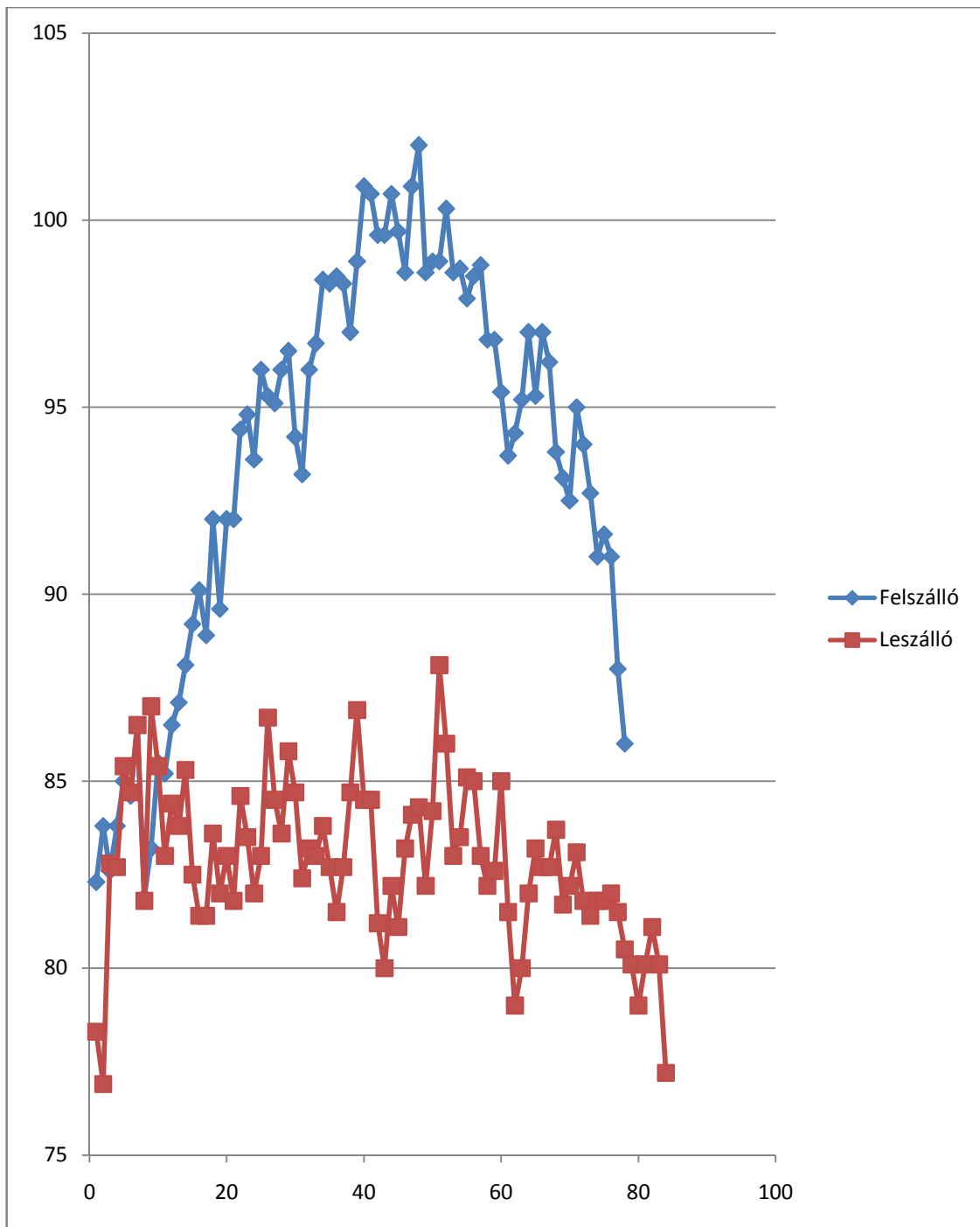
– **Lassú repülőgépek kitiltása csúcsidőszakokban**

A csúcsforgalmi időszakokban tilalmat fogunk bevezetni a könnyű turbulencia kategóriájú piszton/turboprop hajtóművel felszerelt repülőgépekre, amelyek nem képesek 130 csomós minimális sebesség tartására. Ezek a korlátozások megakadályozzák, hogy csúcsidőben a leglassabb, kisméretű repülőgépek feltartóztassák a nagyméretű utasszállítókat. Ez körülbelül 10-15 járatot érint majd naponta. Mivel ezek a repülőgépek lassabbak, az utasszállítóknak tovább kell várakozniuk felszállás előtt, illetve csúcsidőben, forgalomtorlódás esetén a kisméretű gépeket arra utasítják, hogy korán forduljanak le a SID-ekről, hogy minél hamarabb felszabadítsák az útvonalakat a nagy személyszállító gépek előtt. A kisméretű gépek ezáltal olyan lakott területek felett haladnak el, amelyeknek nem kellene repülési zajt tapasztalniuk. A csúcsforgalmi időszakokra vonatkozó tilalom bevezetése közre fog játszani abban, hogy minden repülőgép szigorúbban betartsa a SID-eket, ezáltal csökkentve a zajhatások elterjedését az érintett nagyobb területeken. Ez az előírás természetesen nem vonatkozik majd a rendőrségi, illetve állami repülésekre.[25]

1.2.3. A repülési zaj felépítése [1]

Amint azt az 1.1. fejezetben már említettem, a repülési zajjal, illetve annak csökkentésével a sugárhajtóművek megjelenésével kezdtek el foglalkozni. Az ötvenes évek közepétől kezdve mind a gépteljesítmények, mind a repülési műveletszámok gyors növekedésnek indultak. A közvélemény reakciója ezt némi késéssel követte, így a zajcsökkentéssel kapcsolatos munkálatok is csak később kezdődtek el, és érdemi eredményt csak a hatvanas évek közepe körül értek el. Ekkor jelentek meg az úgynevezett mellékáramú sugárhajtóművek, amelyeknél valószínűleg a teljesítménynövelés, propulziós határfoknövelés illetve gazdaságos üzemeltetés szempontjai még megelőzték a zajcsökkentési célkitűzéseket. Az azóta bekövetkezett kedvező változás ellenére a repülőgépek mind a mai napig a legnagyobb hangteljesítményű közlekedési eszközök: a sugárhajtású gépek által lesugárzott hangteljesítmény néhány 10 kW. Kedvező szempont viszont, hogy a gépek üzemidejük jelentős részét a településektől távoli helyen töltik, így a zajjal kapcsolatos dolgok elsősorban a repülőterek környékére korlátozódnak.

A földön lévő megfigyelő szempontjából a repülőgépzaj a környezeti zajból kiemelkedve fokozatosan növekszik egy nagyobb értékig, majd a gép távolodásakor egészen addig csökken, amíg teljesen el nem tűnik a környezeti zajban. Egy felszálló és leszálló TU-154-es repülőgép közvetlenül a repülési útvonal alatt mért zajszint-idő függvényének egy részlete látható a következő ábrán.



1. ábra: Tu-154-es repülőgép zajszint-idő függvényének egy részlete felszálláskor és leszálláskor közvetlenül a repülési útvonal alatt mérve
 forrás: Dr. Buna Béla: A közlekedési zaj csökkentése 4.63. ábra [1]

Szembetűnő, hogy a zajszint nagysága az idő függvényében főként a földi reflexiók által okozott interferenciajelenség miatt erősen változó jelleget mutat.

Az egyes időpontokban mért zajspektrumok eltérőek a felszálló és leszálló gépek esetében: a közeledő gép zaját túlnyomóan a nagyfrekvenciás (magas hangú), a távolodót túlnyomóan a kisfrekvenciás (mély hangú) összetevők határozzák meg. Különösen a felszálló gép által zajspektrumában követhető a magas és mély hangú

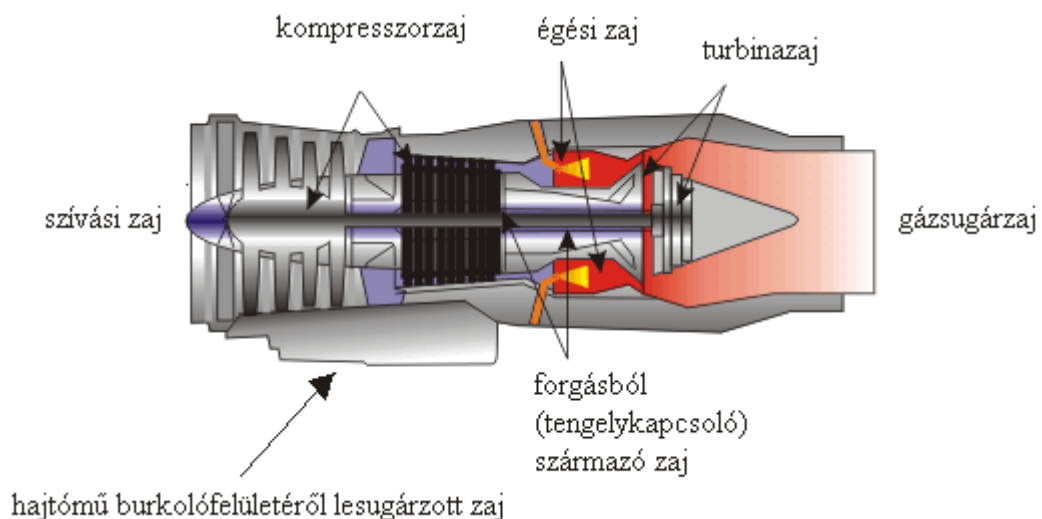
összetevők nagyságában bekövetkező változás. A jelenséget a Doppler-effektus mellett elsősorban a repülőgép különböző rész-zajforrásainak elhelyezkedése és a sugárzási jellemzői magyarázzák. A maximális zajszint ugyanezen okok miatt nem közvetlenül abban a pillanatban jelentkezik, amikor a gép és a megfigyelő közötti távolság a legkisebb, hanem egy kicsit később.

A korszerű repülőgépeknél főként a hajtórendszer és a gép repülése közben kialakuló aerodinamikai hatások okozzák a zajt.

A keletkező zaj nagysága, spektruma, irányítottsága nagymértékben függ a gépfajtától, azaz a légcsavaros, a szabad sugárhajtású, a turbóventillátoros repülőgépek és a helikopter zajjellemezői közös sajátosságuk ellenére, eltérnek egymástól.

Napjainkban legnagyobb jelentőségűek mind a teljesítmény, mind a zajadatokat tekintve a mellékáramú sugárhajtású repülőgépek. A korábbi egyáramú gépeknél a beszívott levegőt kompresszor sűríti és juttatja az égéstérbe. Az elégett, nagy hőmérsékletű gáz – levegő keverék átáramlik a kompresszort hajtó turbinán, majd a fúvókán keresztül nagy sebességgel kiáramlik a hajtóműből.

E repülőgépfajta hajtóművének fő zajforrásait vázlatosan az alábbi ábra tünteti fel.



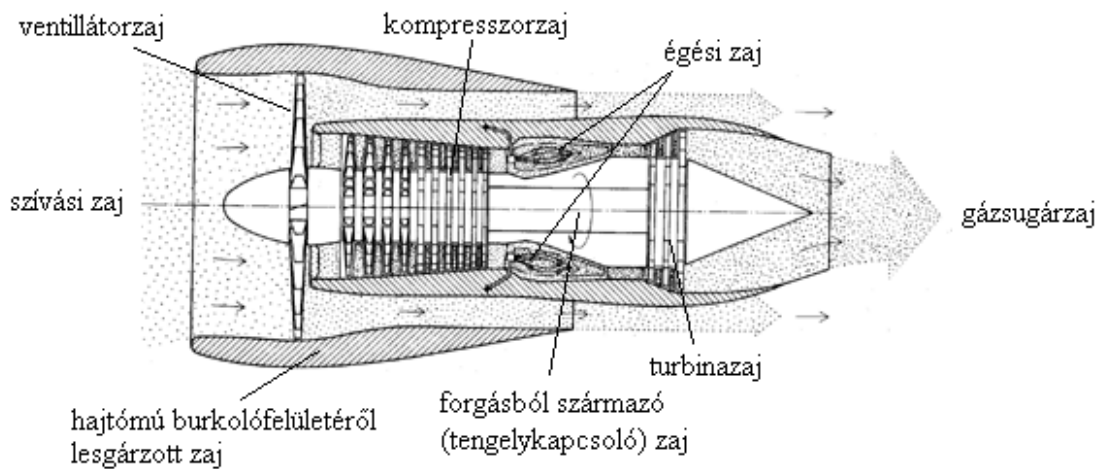
2. ábra: Sugárhajtású repülőgépek hajtóműve által kibocsátott főbb jellemző zajok

Ezek a gép elejétől hátrafelé haladva sorrendben a következők:

- szívási zaj
- kompresszor zaj
- forgásból (tengelykapcsoló) származó zaj
- égsi zaj
- turbina zaj
- hajtómű burkolófelületéről lesugárzott (a hajtóműrezgésekkel gerjesztett) zaj
- aerodinamikai (repülőgépváz) zaj
- gázsugár-zaj.

Ennél a gépfajtánál ez utóbbi névleges és teljes terhelésnél általában az eredő zajszintet döntő módon meghatározó zajösszetevő.

A nagy kétáramúsági fokú hajtóművel rendelkező repülőgép fő zajforrásait vázlatosan a következő ábra szemlélteti.



3. ábra: Nagy kétáramúsági fokkal rendelkező repülőgépek hajtóműve által kibocsátott jellemző zajok

Noha a gázsugár-zaj összetevő teljes terhelésnél még ennél a géptípusnál is jelentős nagyságú lehet, az eredő zajt gyakran a hajtómű más szerkezeti egységei (főként a ventilátor és a turbina) határozzák meg.

A viszonylag kis sebességű, dugattyús motorral, vagy gázturbinával hajtott légsaváros repülőgépeknél a motor vagy gázturbina és a légsavár jelenti a fő zajforrást, és gyakran az utóbbi hatása dominál. Hasonló mondható a helikopter zajáról is: főként a fő- és a mellék rotorok és a rotor hajtás eredő zajában a légsavarak zaja dominál.

2. Aktív zajcsökkentés

A zaj megismerése, feltérképezése egy igen komplex feladat. A zajnak, mint hullámjelenségnek, sokban eltérő – viszont sokban megegyező tulajdonságai vannak, mint az elektromos hullámoknak. A zaj feltérképezéséhez, tulajdonságainak leírásához szükséges megismerkedni a jelfeldolgozással, mint tudománnyal, az aktív zajcsökkentéshez nélkülözhetetlen ezen ismeretek megléte. Az következő fejezetek a jelfeldolgozás és aktív zajcsökkentés későbbiekhez nélkülözhetetlen alapjait taglalja.

2.1. Zajcsökkentési módok

A zaj csökkentése nagy kihívást jelentett a tudomány számára. Számos ötlet, szabadalom született, de elmondható, hogy a konvencionális módszerek a zajcsökkentés elérésére két fő részre tagolódnak: a passzív, illetve aktív zajcsökkentésre.

Passzív zajcsökkentés során energiabefektetés nélkül, a zajforrást a zajtól védeni kívánt helyet a hangforrás által kibocsátott hang hullámhosszával összemérhető vastagságú elnyelő (abszorber) vagy visszaverő anyaggal választjuk el egymástól. Ezen technika igen jó hatásfokkal alkalmazható, emiatt mai napig – és még biztosan sokáig is – széles körben fogják alkalmazni, viszont fontos megemlíteni, hogy több hátrányos tulajdonsággal is rendelkeznek, melyek közül a számunkra két legfontosabb:

- A megfelelő zajszigetelés kialakításához szükséges anyagok beszerzése, installálása igen költséges lehet, ráadásul esetünkben a szigetelő anyag tömege egyenes arányos mértékben növeli a repülőgép fogyasztását.
- Akármilyen korszerű anyagokról is van szó, a hanghullámelnyelő képességük a hang frekvenciájának csökkenésével együtt csökken, hiszen a hang hullámhossza összemérhetően nagyobb lesz, mint az abszorber vastagsága.

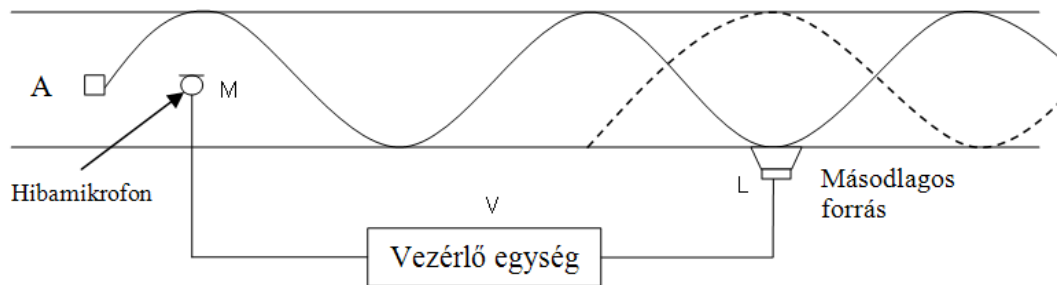
Ezen hátrányos tulajdonságok teszik lehetővé az aktív zajcsökkentés használatát, melynek szintén vannak korlátai, de a passzív zajcsökkentési módokkal együtt megfelelően összekomponálva kiváló zajvédelmi eljárások készíthetőek.

Az aktív zajcsökkentés során az úgynevezett elsődleges zajforrás által kibocsátott zajt egy másik, aktív, másodlagos zajforrással – ellenzajjal –, a szuperpozíció elvén próbáljuk meg kioltani. Mivel az akusztikai rendszerek jó közelítéssel igen nagy dinamikatartományban lineárisnak tekinthetőek, ezért a szuperpozíció számunkra elégségesnek tűnik. Másodlagos forrásnak leggyakrabban mozgómembrános hangszórót alkalmaznak, bár volt rá példa, hogy sűrített levegővel is próbálkoztak a '70-es években, viszont a szükséges teljesítmény miatt ez technikailag nagyon nehezen kivitelezhető megoldás volt. Minden esetben a másodlagos forrás kimenetét egy elektromos jel vezérel, emiatt van szükség jelfeldolgozási ismeretekre.[6]

A dolgozatomban megpróbálom összefoglalni az aktív zajcsökkentéshez szükséges alapismereteket, az akusztikus és elektronikus törvényszerűségeket, és módszereket, illetve megjelölni az aktív zajcsökkentés határait is.

2.1.1. Aktív zajcsökkentés alapjai

Az aktív zajcsökkentés (ANS = active noise cancelling) ötlete nem az utóbbi évtizedekben született meg, Paul Lueg 1936-ban egy publikációjában közölte a téma alapjait. Az alapelv az volt, hogy zárt csőben, egy hangmezőt mikrofonnal megmérve az eredményt egy elektromos jellé alakítjuk, mely segítségével egy másodlagos elektroakusztikus forrással létrehozunk egy másik, destruktív hanghullámot.

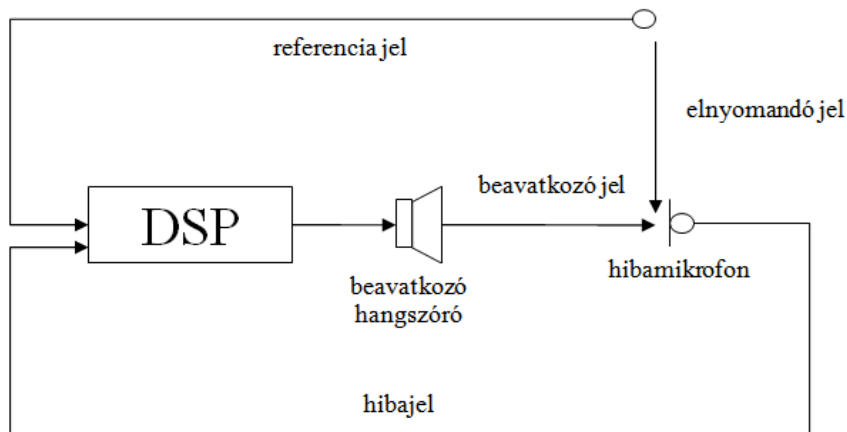


4. **ábra:** Paul Lueg által 1936-ban kiadott publikációjának az aktív zajcsökkentés alapjait bemutató sematikus ábrája

Mint az ábrán is jól látható, az „A” hangforrás által kibocsátott szinuszos hanghullámot az „M” jelű mikrofon segítségével detektáljuk, ami egy elektromos jellé alakítja. Ez a jel keresztülhalad egy „V” elektromos irányítón, mely azt a másodlagos forráshoz „L” továbbítja, mely egy, az eredeti jellel teljesen ellenfázisban lévő hanghullámot generál, mely létrehozza a destruktív interferenciát. Elviekben eszerint a jobb oldalon csendet hoz létre. Ezt a kísérletet azért fontos kiemelni, mivel a későbbiekben az ANS egy klasszikus alapproblémájává vált.

Innentől fogva a '60-as évekre az elméleti háttér teljesen ki lett dolgozva, viszont a technológia nem tartott azon a szinten, hogy az elméletet meg is lehessen valósítani. Az ANS-re szolgáló rendszerek gyakorlati alkalmazása a nagyteljesítményű jelfeldolgozó processzorok (DSP = digital signal processing) megjelenésével vált lehetségessé.[6]

A folyamat szemléltetése a következő módon történhet:



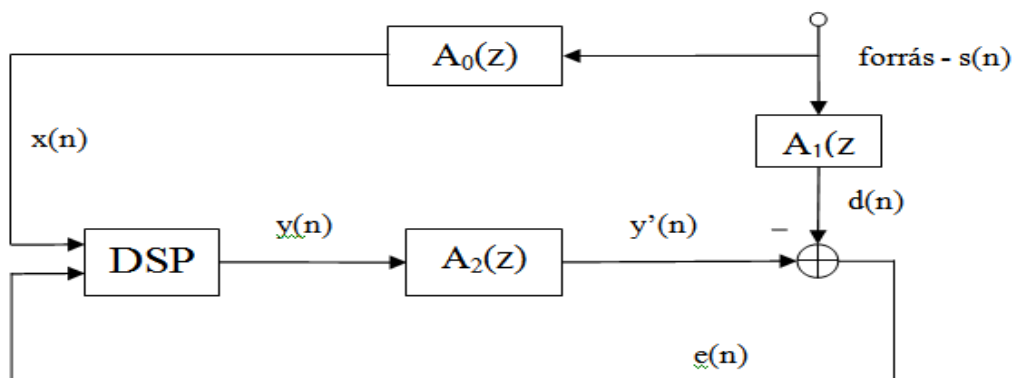
5. ábra: Az aktív zajcsökkentés alapsémája nagyteljesítményű jelfeldolgozó processzor(ok) használatával

A rendszer célja, hogy egy adott pontban, vagy pedig egy adott pont körül valamekkora területen (csöndes zóna) az elsődleges zajt elnyomjuk. E terület nagysága elsősorban a hullámhossztól függ. Emiatt az aktív zajcsökkentés az 1kHz frekvenciatartomány alatti hangok elnyomására alkalmas. Amennyiben az eredeti hangforrás szinuszos jellegű, a probléma viszonylag könnyen kezelhető, ellenben sztochasztikus, jelek esetén igen nehéz. A DSP feladata, hogy az ismert frekvenciájú primer jelhez egy megfelelő amplitúdójú és fázisú jelet generáljon, késleltetéssel, csillapítással.

Gyakorlatban nagy szerepe van a becslésnek, mivel a hibamikrofon, és beavatkozó hangszóró között lévő szállító közeg (mely legtöbbször levegő), rendelkezik egy saját csillapítással, illetve fáziseltoló képességgel, mely igen erősen hőmérséklet, illetve pára, távolság stb. függő. Másrészt a primer hangforrás csak ritkán bocsát ki stacioner jellegű jeleket. Ezek miatt a rendszer hatásfoka szinte sosem érheti el a 100 %-ot, tehát teljes „csönd” nem hozható létre. A rendszer működőképessége tehát igen erősen függ a primer zaj jellegétől.

A hibamikrofon segítségével detektáljuk az elnyomandó $d(n)$ jelet (elsődleges hangforrástól d – távolságra lévő mikrofonnál lévő zajt), illetve az eredményt is, melyet betáplálva a DSP-be, létrehozzuk a kívánt szabályozási kört. Változó hangforrás esetén digitális szűrőket kell alkalmaznunk.

A rendszer blokkdiagramja a következőképpen épül fel:



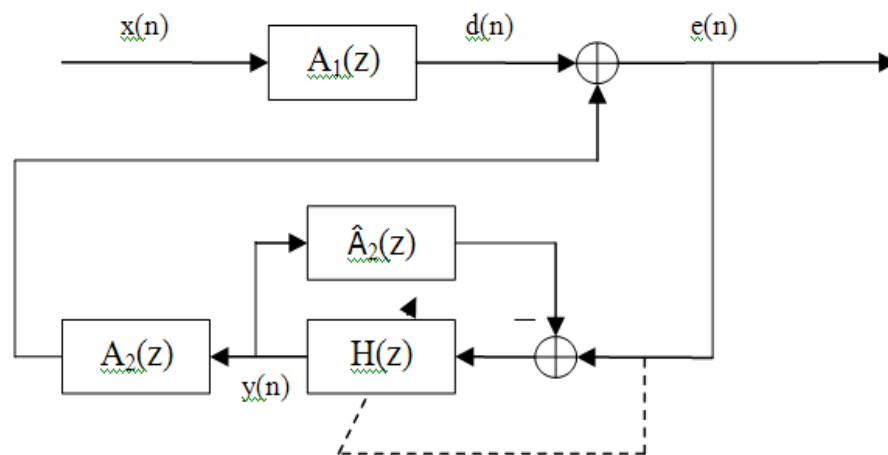
6. ábra: Aktív zajcsökkentés rendszerének blokkvázlata

A rendszerben a primer hangforrástól az $A_1(z)$ elsődleges úton (átviteli függvényen) keresztül érkezik a hang a hibamikrofonhoz, amely itt egy logikai összegzőként működik. A hibamikrofon által létrehozott jel a befut a DSP-be, ahova a primer hangforrásnál elhelyezett referencia mikrofon jele $x(n)$ is befut $A_0(z)$ átviteli függvényen keresztül. A referenciamikrofon szerepe, hogy már azelőtt legyen információ a primer hangforrásról, mielőtt az a hibamikrofonhoz ér – a hang és elektronok sebessége közötti különbséget kihasználva. A zajelnyomó struktúra kimenőjelét $y(n)$ -nel jelöljük, mely az $A_2(z)$ másodlagos út (átviteli függvény) z-transzformációjú átviteli függvényén keresztül jut el a hibamikrofonhoz, ahol, mint ahogy már említettem, összegzésre kerül az elnyomandó jellel.

Ez a rendszer az úgynevezett *feedforward* struktúra, amennyiben az $A_0(z)$ átviteli függvény nincs a rendszerben, *feedback* struktúráról beszélünk. Ezeket később tárgyalom.

2.1.2. A feedback struktúra

A visszacsatolt struktúra alapjai Harry Olson és Everest May által lettek lefektetve. Az idealizált folyamat blokksémája a következőképpen néz ki:



7. ábra: A feedback struktúra blokkvázlata

A 7. ábrán láthatóan az $A_1(z)$ jelöli a zajforrás és a hibamikrofon között lévő út átviteli függvényét, $A_2(z)$ jelöli a struktúra kimenetétől a hibamikrofonig terjedő út átviteli függvényét. Hasonlóan az eddigi jelölésekhez $x(n)$ az elsődleges hangforrásnál mérhető jel, $d(n)$ a csillapítandó jel – mely az $x(n)$ jel szűrt változata –, $e(n)$ pedig a hibajel. $\hat{A}_2(z)$ átviteli függvény $A_2(z)$ -nek úgynevezett modellje, ezt szükséges identifikálni. Ha valamilyen identifikációs eljárás eredményeként $\hat{A}_2(z)$ adott, a rendszer sokkal szélesebb körben alkalmazható. $H(z)$ adaptív szűrőt a filtered-X LMS (xLMS) algoritmussal adaptálják. Lehetőség van arra is, hogy $H(z)$ -t és $\hat{A}_2(z)$ -t a rekurzív LMS algoritmussal egyszerre adaptálják.[15]

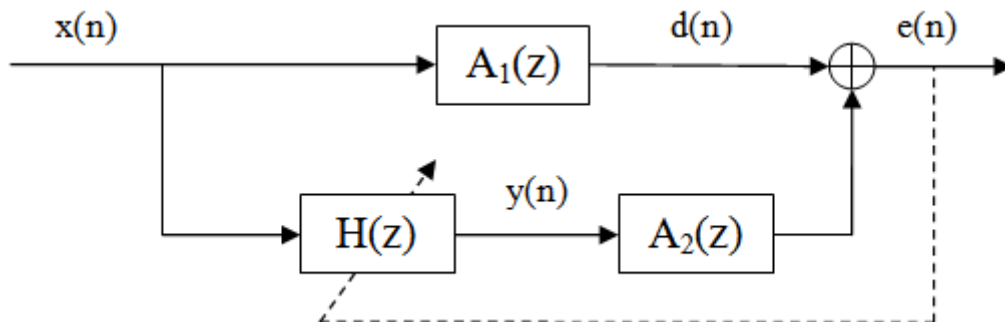
Mindezeket együttvéve, a hibamikrofon jelével állítva $H(z)$ adaptív szűrő együtthatóit, a visszacsatolt struktúra az ábráról leolvasható.

A *feedback* struktúra legfőbb jellemzőjének mondható, hogy nem használ fel a zajforrásból érkező referenciajelet. Ebből következik, hogy állandósult állapot esetén a zajcsökkentő struktúrának nulla, vagy nullához nagyon közeli hibajelből kell előállítani a nem nulla beavatkozójelet. Szintén ebből következik, hogy a beavatkozójel frekvenciáját szintén a hibajel segítségével kell beállítani. Mindezek megvalósítása csak a rendszer sebességének csökkentésével érhető el, ennek következtében elmondható, hogy a *feedback* struktúrák általában lassabbak, mint a *feedforward* struktúrák.[15]

2.1.3. A feedforward struktúra

Mint az előbb taglaltuk, a feedback struktúra kellő biztonsággal alkalmazható egy zárt csőben, viszont egy zárt szobában a kialakuló állóhullámok, interferenciák miatt alkalmazásuk már kétes eredménnyel járna.

Ezen probléma megoldására alkalmazzák a feedforward struktúrát. Mint neve is mutatja, egy előreccsatolás segítségével próbálunk meg valamilyen plusz információhoz jutni, esetünkben az elsődleges hangforrásról. Blokkvázlata az alábbi ábrán látható:



8. ábra: A feedforward struktúra blokkvázlata

A két fejezettel korábban tárgyaltakkal a jelölések megegyeznek: $d(n)$ jelöli az elnyomandó jelet, mely $A_1(z)$ átviteli függvénnyel (elsődleges út) módosítva lett; $x(n)$ az elsődleges forrástól érkező referencia jel; $y(n)$ az elsődleges forrás által kibocsátott hanggal ellenfázisban lévő hanghullám; $A_2(z)$ pedig a másodlagos út – *secondary path*.

A lényegi különbség a feedback struktúrához képest, hogy az adaptív szűrő bemeneti paraméterként megkapja az $x(n)$ referenciajelet is.[15] Ennek két módja lehetséges, vagy egy referenciamikrofont helyezünk el az elsődleges forrás mellett közvetlenül, vagy pedig valamilyen más ismert paraméterét adjuk meg a forrásnak, például egy hajtómű esetén a fordulatszámát, melyből előkalibrálással következtetni tudunk az elnyomandó zaj jellegére.

Az előbbi megoldás hátránya, hogy a mikrofon nem csak az elsődleges zajt rögzíti, hanem az általunk vezérelt másodlagos hangforrást is érzékeli. Ez a parazita hurok a

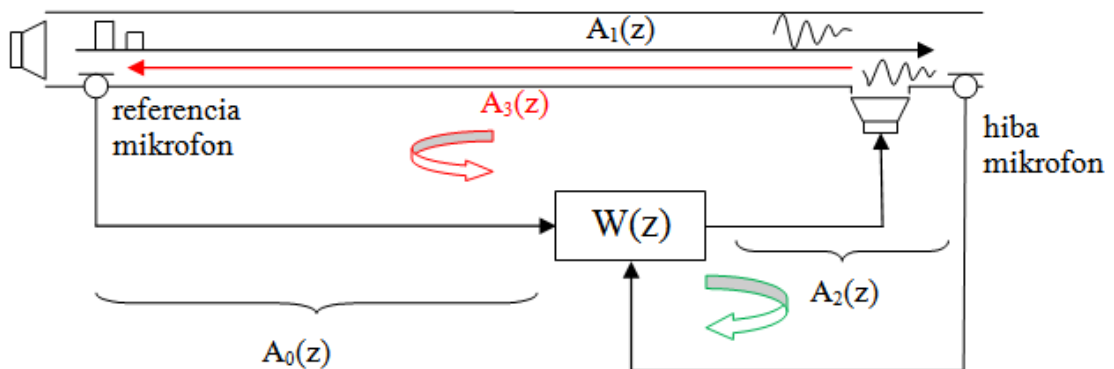
rendszer instabilitását okozhatja. Viszont ha $|A_3(z)|$ elegendően kicsi, akkor a másodlagos forrás visszahatását elhanyagolhatjuk.

Az utóbbi megoldás természetesen főként periodikus zajok esetén áll fenn. Ez esetben a referencia jel és az elnyomandó jel között nem feltétlenül az ábrának megfelelő kapcsolat áll fenn. Például egy fordulatszám mérő esetén a fordulatszám mérő akusztikus jeléből hiányozhatnak a felharmonikusok). Viszont ebben az esetben nem kell tartani a parazita hurok kialakulásától, mivel a másodlagos hangforrás nem hat vissza a referencia jelre.

A *feedforward* struktúra nagy előnye, hogy megfelelő kalibrálás esetén az előrecsatolás segítségével a szabályozás hibája konvergáljon 0-hoz. Ebben az esetben $H(z)$ -nek a $-\frac{A_1(z)}{A_2(z)}$ -t kell megvalósítania, ami csak akkor lehetséges, ha $A_2(z)$ minimálfázisú. Amennyiben az előző feltétel mellett a késleltetést is megengedjük, akkor megoldható feladathoz jutunk. Ez akusztikus esetben azt jelenti, hogy a hibamikrofon és referenciamikrofon között elegendően nagy késleltetésnek kell lennie. Ezt a megoldást használják például klímaberendezések légcsatornáiban. Viszont ebben az esetben figyelni kell arra, hogy a két mikrofon között áramló levegő a referenciajellel nem korrelált zajt kelt.[15]

Az eddig leírtak alapján látszik, hogy a referenciajel megfelelő megválasztása kulcsszerepű a rendszer működéséhez. Kiválasztásánál törekedni kell arra, hogy az átvitele lineáris legyen, ne legyenek felesleges felharmonikusok, illetve gerjesztés ne lépjen fel. Periodikus jel esetén elegendő ismernünk a jel amplitúdóját és fázisát, a referenciajel esetén viszont a frekvencia ismerete létfontosságú.

A következő ábra az átviteli függvények fizikai jelentését hivatott megmagyarázni:



9. ábra: Feedforward struktúra átviteli függvényeinek szemléltetése

Mint látható, a rendszerben ideális esetben egy hurok van, a digitális szűrő $W(z)$, másodlagos hangforrás, hibamikrofon körrel – $A_2(z)$ hurok. Kedvezőtlen esetben még egy hurok kialakul $W(z)$, másodlagos hangforrás, referencia mikrofon által, viszont megfelelő referenciajel adaptálással – mint már említettem – $A_3(z)$ minimálisra csökkenthető, ezzel ez a parazita visszacsatolás kiküszöbölhető.

A rendszerben $A_0(z)$, $A_1(z)$ előre nem ismertek, viszont nem is lényegesek, előzetes mérésekkel meghatározhatóak. A rendszer működéséhez viszont lényeges $A_2(z)$ ismerete, az $A_2(z)$ hurok stabilitása pedig kulcsfontosságú.

A két struktúra közül ez utóbbi az, ami későbbi számítások, kísérletek folyamán szóba jöhet.

2.1.4. Az LMS algoritmus [17]

Az adaptív szabályzók számtalan típusát kifejlesztették az évek során, de máig klasszikusnak számítanak az LMS, illetve a belőlük továbbfejlesztett algoritmusok. Az eljárás célja az, hogy a hibajel teljesítményét a legkisebbre csökkentse (Least Mean Square). Az LMS alapú megoldások elterjedtségének az az oka, hogy néhány igen jó jellemzőjük kiemeli a másfajta megvalósítások közül:

- Robusztusság: a paraméterek kismértékű változására stabilak maradnak
- Egyszerűség: számításigényük a többi megbízhatóságában, pontosságában az LMS algoritmushoz mérhető eredményt produkáló eljárásokhoz képest alacsony, így egyszerűbb, ezért olcsóbb processzorral is implementálhatók
- Maradó hiba: megfelelő paraméterválasztással alacsony értéken tartható
- Konvergenciasebesség: viszonylag nagy, gondot jelenthet, hogy a sebesség növelése a maradó hiba növekedése és a stabilitás csökkenésének irányába hat

Az emellett matematikailag is igen jól leírt, könnyen kezelhető eljárások további előnyös tulajdonsága, hogy az iteratív modellillesztés elméleti levezetésében előírt, de a gyakorlatban nehezen kezelhető statisztikai paramétereket pillanatnyi értékekkel helyettesítik, ezáltal a bonyolult számítások, illetve az információhiány megkerülhető.

Az LMS algoritmus (8.1. ábra) a beavatkozó jelet a referencijel adott számú késleltetett mintájának súlyozásával állítja elő. Így központi eleme egy N együtthatós transzverzális FIR szűrő, amelynek együtthatóit úgy adaptáljuk, hogy a négyzetes hiba minimális legyen. Az $u(n)$ beavatkozó jel ezért a következő formában áll elő:

$$(1) \quad u(n) = \sum_{i=0}^{N-1} w_{n-i} x(n),$$

$$(2) \quad u(n) = w * x(n),$$

ahol w a szűrő impulzusválaszát tartalmazó vektor. Az algoritmus másik bemenőjele a rendszerben jelenlévő zavarjel, amelyet az eljárással csökkenteni szándékozunk, oly módon, hogy a két jelet különbségképzőbe vezetve megvizsgáljuk, hogy az algoritmus az adott ütemben mekkora hibával közelítette a $d(n)$ jelet az $u(n)$ beavatkozó jellel, majd az ábrán LMS címkével jelölt blokk az $x(n)$ referencijel és az $e(n)$ hibajel segítségével számolt mértékű korrekciót végez az adaptív szűrő együtthatóin, és a következő ütemben ezzel az új készlettel számolja a beavatkozó jelet. Az algoritmus helyes működése esetén a hiba csökken, a rendszer egyre jobban követi a $d(n)$ jelet. A hibajel a $d(n)$ zavar és az $u(n)$ beavatkozó jel összegeként írható fel:

$$(3) \quad e(n) = d(n) - u(n)$$

$$(4) \quad e(n) = d(n) - w * x(n)$$

$$(5) \quad e(n) = d(n) - \sum_{i=0}^{N-1} w_{n-i} x(n)$$

Mivel a hibajel teljesítményét szeretnénk a lehető legkisebbre csökkenteni, ezért a minimalizálandó költségfüggvény a hibajel négyzetének várható értéke:

$$(6) \quad J = E\{e^2(n)\}$$

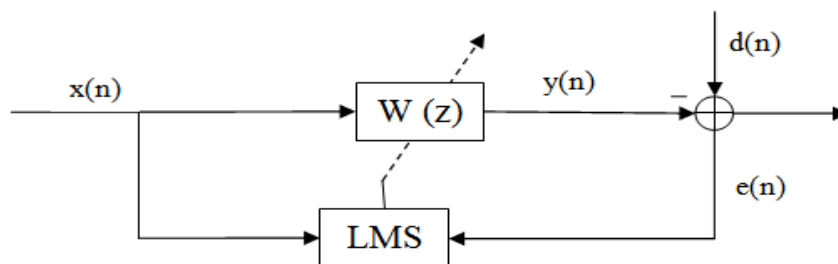
Mivel e kifejezés paramétereinek értéke a legtöbb esetben nem ismert, a minimumot meg kell keresni, amelyre adaptív algoritmust alkalmaznak. A négyzetes hibát minimalizáló w értékét egy $N+1$ dimenziós parabolafelületen keressük (ennek oka, hogy a hibajel négyzetének kifejezésébe $e(n)$ fenti definícióját megfelelően behelyettesítve w együtthatóban N négyzetes kifejezéshez jutunk), így a minimumot egy egyszerű, a legmeredekebb úton leereszkedő algoritmus megtalálja:

$$(7) \quad w(n+w) = w(n) + \alpha \frac{dJ}{dw(n)}$$

ahol α a lépés mérete az $N+1$ dimenziós parabolafelületen. A fenti egyenletbe J , illetve $e(n)$ definícióját behelyettesítve a rekurzív algoritmus

$$(8) \quad w(n+1) = w(n) + \mu * e(n) * x(n)$$

alakúra változik, ahol $\mu = 2\alpha$ a konvergencia-együttható. Ez az algoritmus az LMS algoritmus.



10. ábra: Az LMS algoritmus blokkvázlata

2.1.5. Az xLMS algoritmus [17]

Az LMS algoritmus hátránya, hogy nem alkalmazható olyan esetekben, amikor nem közvetlenül használható (esetleg nem hozzáférhető) a kimenete, például, ha egy mikrofont alkalmazunk két akusztikus jel különbségének képzésére (ellentétes fázisú jelek összegzésére), akkor a különbségképzőbe nem a hangszórót meghajtó jel kerül, hanem annak az elektromos-akusztikus átalakítás, illetve az akusztikus átvitel során módosult változata. Ezt a problémát oldja meg az XLMS algoritmus, amely az LMS algoritmushoz hasonlóan az $x(n)$ referenciajelből a W adaptív szűrő segítségével számítja az $u(n)$ beavatkozó jelet. Az ily módon előállított beavatkozó jelet ezután D/A átalakítóval villamos jellé alakítják, majd aluláteresztő szűrővel simítják. A kapott jelet felerősítik, majd a megfelelő beavatkozó szerven keresztül a szabályozni kívánt A rendszert hajtják meg vele. A hibaérzékelő által mért jelet is erősíteni kell, majd D/A átalakítóban az átlapolást kerülendő aluláteresztő szűrővel szűrik. Az így kapott jelet mintavételezik és kvantálják. A rendszer tehát számos késleltetéssel és egyéni átvittel rendelkező elemből épül fel, amely összességében lineárisnak tekinthető, ha az elemek teljesítenek bizonyos feltételeket: az erősítők torzítása és zaja legyen kicsi, mind az erősítők mind az analóg-digitális és a digitális-analóg átalakítók esetében kerülni kell a túlvezérlést, mivel az jelentős nemlinearitást vinne a rendszerbe. A minél magasabb jel-zaj viszony érdekében az átalakítók felbontása legyen elegendően nagy, és a bemenő jelek minél jobban közelítsék a maximális kivezérlést, ellenkező esetben a felső bitek a felhasználás szempontjából értéktelenek lesznek. Amennyiben a rendszer bemenetén nem szigma-delta A/D átalakítót alkalmazunk, a vezérlő jel spektrumát a Nyquist-frekvencia alatti tartományra kell korlátoznunk. Most is a $d(n)$ jel hordozza a környezetből származó zavarjelet, ezt a referenciajellel összegezve áll elő az $e(n)$ hibajel, ennek négyzetét minimalizálja az eljárás úgy, hogy az LMS algoritmus a hibajel mellett most az A rendszert modellező \hat{A} szűrővel szűrt $r(n)$ jelet használja (neve is innen adódik: filtered-x LMS). Ekkor az algoritmus rekurzív formulája az alábbi alakúra változik:

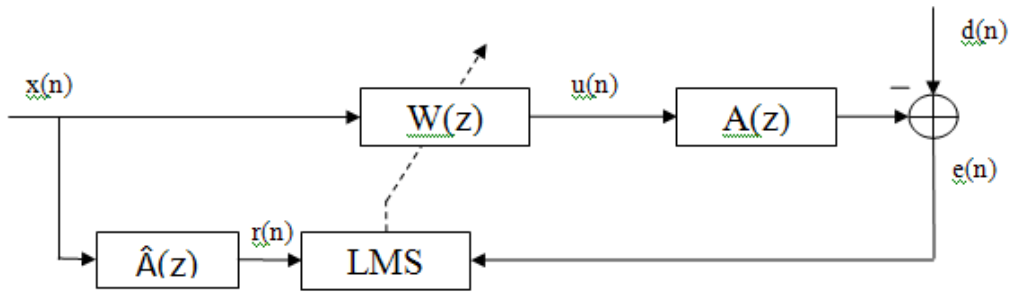
$$(9) \quad w(n+1) = w(n) + \mu * e(n) * r(n)$$

ahol $r(n)$ a referenciajelből az

$$(10) \quad r(n) = \sum_{i=0}^{J-1} a_{n-1-i} x(n)$$

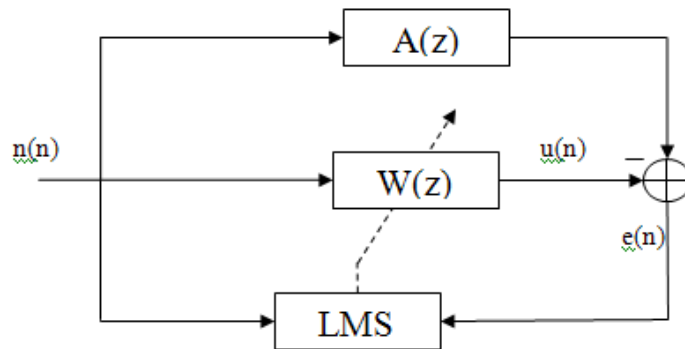
egyenlettel számítható.

Ezen a szűrőegyütthatók az xLMS végrehajtása előtt alkalmazott, az A rendszeren végzett identifikáció eredményeként állnak elő.



11. ábra: Az xLMS algoritmus blokkvázlata

Az identifikáció során olyan gerjesztő-jelet kell alkalmazni, amely a rendszert minden olyan frekvenciapontban gerjeszti, ahol azt későbbiekben az xLMS algoritmussal használni kívánjuk, legelterjedtebb esetben ez lehet kellően egyenletes spektrumú zaj vagy multiszínuszos jel.



12. ábra: LMS algoritmussal végzett rendszeridentifikáció

Az identifikáció történhet például LMS algoritmus segítségével. Ekkor az LMS a W adaptív szűrővel modellezi az A rendszert, oly módon, hogy ütemenként úgy frissíti a szűrő paramétereit, hogy azok egyre pontosabban közelítik rendszer impulzusválaszának együtthatóit.

Az xLMS algoritmus előnye az LMS algoritmussal szemben, hogy a referenciajelet hozzákéslelteti, illetve fázisban is illeszti az akusztikai/mechanikus rendszer átvitelével módosult hibajelhez, így az algoritmus stabilitása biztosítható. Ezt használja fel a későbbiekben ismertetett aktív zajszűrő algoritmus is.

2.1.6. Az aktív zajcsökkentés főbb alkalmazási területei

Az eddigi fejezetek alapján belátható, hogy bár igen sok előnnyel rendelkeznek az aktív zajcsökkentési eljárások, mégis vannak korlátai, melyek meghatározzák alkalmazási területüket. Annak ellenére, hogy az AMS igen elterjedt módszer a zajcsökkentésre,

felhasználási területeit mégis be lehet sorolni négy fő csoportba, melyek alapvetően jól jellemzik az adott problémát, területet. Ebben a fejezetben e négy csoportot mutatom be.

A négy alapvető alkalmazási terület:

Fejhallgató:

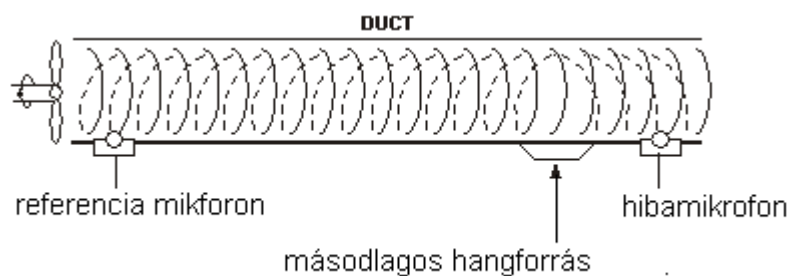
Egyre több cég alkalmazza az aktív zajcsökkentést fej- és fülhallgatóinál, például: Sony, Sennheiser, illetve a gyógyászat is a legújabb hallókészülékeiben ANS-t használ. Egy igen ideális állapot, mivel ebben az esetben az $A_2(z)$ átviteli függvény egyszerű, kis késleltetést okoz, és közel állandó. Ebben az esetben *feedback* struktúrát alkalmaznak leginkább, mivel a fül közelében elhelyezett hibamikrofon megfelelő jelet tud biztosítani a másodlagos hangforrás számára, mely így kellően destruktív jelet tud kibocsátani.



13. ábra: Aktív zajcsökkentés megvalósításának vázlatrajza fejhallgatókban

Zárt cső:

Mint már említettem, az aktív zajcsökkentés egyik alapproblémájává vált, számtalan tudományos munka értekezik róla. Itt $A_2(z)$ átviteli függvény már viszonylag bonyolult, viszont még mindig állandónak tekinthető. Légh Kondicionáló berendezések zajcsökkentése esetén találkozhatunk vele a gyakorlatban legsűrűbben.

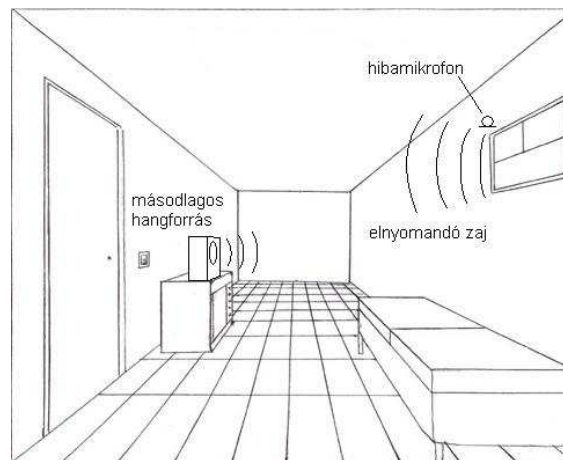


14. ábra: Aktív zajcsökkentés megvalósításának vázlatrajza zárt csőben

Szoba (zárt tér):

Talán a legnehezebben megvalósítható eset az aktív zajcsökkentés számára. Egy szoba 3 dimenziós kiterjedése, gyakran változó belső geometriája (például kinyitott ajtó,

odébb helyezett szék) számos interferenciát okoz, melyeket dinamikusan kell kezelni, nagyon nehezen kivitelezhető feladat. $A_2(z)$ átviteli függvény igen bonyolult, és nem állandó.



15. ábra: Aktív zajscsökkentés megvalósításának vázlatrajza zárt térben

Kültéri zajscsökkentés:

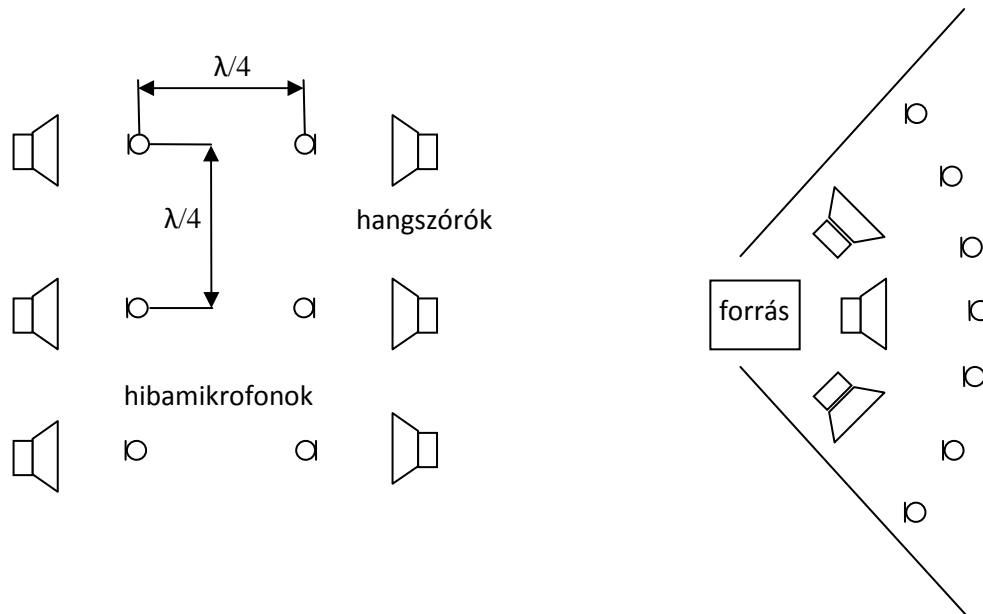
Kültéri zajscsökkentés esetén előnynek számít, hogy legtöbbször nem kell minden irányba végrehajtani a zajscsökkentést, hanem csak egy bizonyos szögtartományban. Igen befolyásoló tényező az időjárás (hőmérséklet, szél, páratartalom...), emiatt $A_2(z)$ átviteli függvény viszonylag bonyolult, változékony. Nagy teljesítményű transzformátoroknál alkalmazzák, mivel ezek zajkibocsátása kimondottan periodikus jellegű.



16. ábra: A kültéri zajscsökkentés legjellemzőbb „alánya”, a nagy teljesítményű transzformátor, mivel zajemissziója nagy mértékben periodikus
forrás: <http://gopenengineering.com/electric-power-transformer.jpg>

Az utóbbi két esetben nem elegendő a rendszer jó hatásfokának biztosításához, ha egy mikrofont, illetve egy hangfalt helyezünk el. Ebben az esetben egy hálózatot

úgynevezett szenzorhálót kell telepíteni ahhoz, hogy megfelelően nagy csendes zónát hozzunk létre. Egy ilyen rendszer az alábbi módon nézhet ki:



17. ábra: Szenzorhálózat beltéri (bal oldali ábra) illetve kültéri (jobb oldali ábra) zajcsökkentéshez.

Zárt szobában (17. ábra bal oldala) amennyiben M jelöli a hibamikrofonok számát, illetve L a másodlagos hangforrások számát jelöli. Ebben az esetben elmondható, hogy hatásos zajcsökkentés csak az $L \leq M$ esetben jöhet létre, vagyis elmondható, hogy $L = M$ esetén jöhet létre az ideális $\underline{e}(n) = 0$ eset, bármilyen $L < M$ esetre pedig $\underline{e}(n)$ lehet minimális, de 0 értéket nem vehet fel.

Hasonló eset áll fenn kültéri zajcsökkentés esetén (17. ábra jobb oldala), viszont ekkor a már említett szögtartomány „lefedéséhez” elegendő számszerűleg kevesebb hibamikrofont és másodlagos hangforrást elhelyezni.

2.1.7. Zajtípusok, egyes gépek zajemissziójának felépítése [5]

A további elemzések előtt fontosnak tartom, hogy pár mondatban említést tegyek az egyes zajtípusokról.

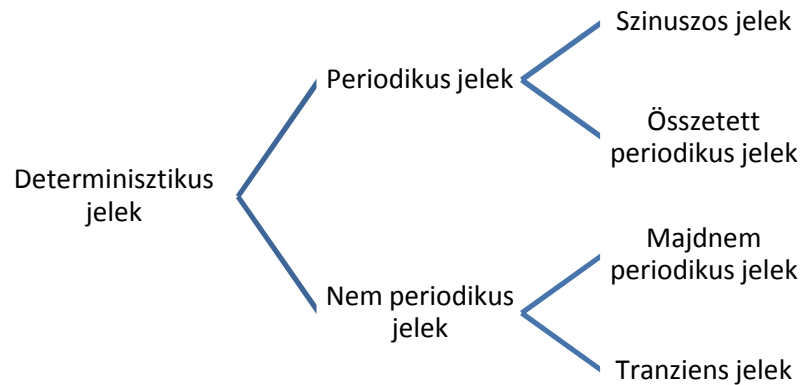
A zajtípusok speciális fizikai folyamatok, s így a mérés technikához hasonlóan nevezhetőek jeleknek. Ezen jeleknek két fő csoportját különböztetjük meg:

- Determinisztikus jelek
- Sztochasztikus jelek

2.1.7.1. Determinisztikus jelek

A determinisztikus jelek legfőbb jellemzője, hogy leírhatóak valamilyen matematikai függvénnyel, melynek ismeretében bármelyik múlt- vagy jövőbeli időpillanatban viselkedése, értéke meghatározható; vagyis ha a determinisztikus jelet eredményező kísérletet többször megismételjük azonos körülmények között, akkor a mért jel időbeli lefolyása mindig ugyanolyan lesz.

A determinisztikus jelek az alábbi módon oszthatóak tovább:



18. ábra: A determinisztikus jelek osztályozása

a) A szinuszos jelek tulajdonságai

A szinuszos jeleket matematikailag a következőképpen tudjuk leírni:

$$(11) \quad x(t) = X \sin(2\pi f_1 t + \varphi)$$

ahol X az amplitúdó; f_1 a frekvencia; φ a fázisszög.

Komplex alakjában felírva egy másik leírási módhoz jutunk:

$$(12) \quad \begin{aligned} x(t) &= X \frac{1}{2i} \{ \exp[i(2\pi f_1 t + \varphi)] - \exp[-i(2\pi f_1 t + \varphi)] \} \\ &= C_1 * \exp(i2\pi f_1 t + \varphi) + C_{-1} * \exp(-i2\pi f_1 t) \end{aligned}$$

ahol:

$$(13) \quad C_1 = \frac{X}{2i} * \exp(i\varphi) = C_{-1}^*$$

Az f_l frekvencia és az együtthatók a jelet egyértelműen meghatározzák. Az együtthatók abszolút értékét és fázisszögét a frekvencia függvényében felrajzolva kapjuk meg az úgynevezett kétoldalas spektrumot.

A jel átlagos négyzetes értéke a jel által szállított teljesítménnyel hozható kapcsolatba:

$$(14) \quad \Psi_x^2 = \frac{1}{T} \int_0^T x^2(t) dt = \frac{X^2}{2} = |C_1|^2 + |C_{-1}|^2$$

b) Összetett periodikus jelek tulajdonságai

Egy jel periodikus, ha $x(t + \tau) = x(t)$ bármilyen t esetén.

A periodikus jel komplex Fourier-sorával írható le:

$$(15) \quad x(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} C_n e^{j2\pi n f_1 t}$$

ahol:

$$(16) \quad C_n = \frac{1}{T} \int_0^T x(t) e^{-i2\pi n f_1 t} dt$$

A C_n együtthatók és az f_l frekvencia meghatározza a jelet.

A jel által szállított teljesítmény:

$$(17) \quad \Psi_x^2 = \frac{1}{T} \int_0^T x^2(t) dt = \sum_{j=-\infty}^{\infty} |C_j|^2$$

c) A majdnem periodikus jelek tulajdonságai

A majdnem periodikus jelek periodikus komponensekből tevődnek össze, de a komponensek frekvenciáinak arányai nem mindig racionális számok:

$$(18) \quad x(t) = \sum_{j=-\infty}^{\infty} C_j e^{+i2\pi f_j t}$$

és van olyan f_n és f_m , hogy f_n/f_m nem racionális szám.

A majdnem periodikus jelek is komplex spektrumaikkal írhatóak le, mely vonalas és nagyon hasonló a periodikus jel spektrumához, egyedül a vonalak helyei nem képezhetőek úgy, mint valamilyen alapfrekvencia egész számú többszörösei.

d) A tranziens jelek tulajdonságai

Az előző csoportokba nem sorolható determinisztikus jelek tartoznak ide. Tranziens jelre egy kikötést tesznek:

$$(19) \quad \int_{-\infty}^{\infty} |x(t)| dt < P$$

tehát legyen abszolút integrálható.

A tranziens jelet a frekvencia síkon a Fourier transzformáltja írja le:

$$(20) \quad X(f) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t) e^{-i2\pi f t} dt$$

$X(f)$ komplex, leggyakrabban abszolút értékét és fázisszögét ábrázolják. $|X(f)|^2$ -nek a frekvencia függvényében felrajzolt görbéjét az $x(t)$ jel energiasűrűség-spektrumának nevezzük:

$$(21) \quad E(f) = |X(f)|^2$$

Az energiasűrűség-spektrum alatti terület a jel által szállított energiával egyenlő (Parseval-tétel szerint):

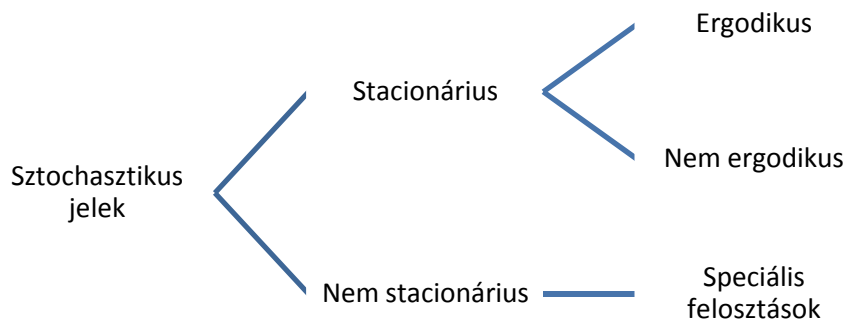
$$(22) \quad \int_{-\infty}^{\infty} |X(f)|^2 df = \int_{-\infty}^{\infty} x(t)^2 dt$$

2.1.7.2. Sztochasztikus jelek

A sztochasztikus jelek jellemzője, hogy időbeli lefolyása nem adható meg definiált matematikai formában, tehát a folyamatot eredményező kísérlet megismétlésénél (rögzített feltételek között) nem kapunk azonos eredményeket.

Egy lehetséges, a sztochasztikus folyamatot reprezentáló időfüggő jelet minta függvénynek nevezzük, a minta függvényből kivágott véges időtartamú szakaszt pedig minta regisztrátumnak. A mintafüggvények összessége hozza létre a sztochasztikus folyamatot.

A sztochasztikus jelek az alábbi módon osztályozhatóak:



19. ábra: A sztochasztikus jelek osztályozása

A mintafüggvényekből álló véletlen folyamat középértéke valamilyen t_1 időpontban a következőképpen számítható ki:

$$(23) \quad \mu_x(t_1, \tau) = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N x_j(t_1)$$

A véletlen folyamat autókorrelációs függvénye t_1 időpontban:

$$(24) \quad R_x(t_1, \tau) = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N x_j(t_1) * x_j(t_1 + \tau)$$

Abban az esetben, ha a középérték és az autókorrelációs függvény változik t_1 függvényében, a sztochasztikus folyamatot nemstacionáriusnak nevezzük. Ezeknek a folyamatoknak végtelenül sokféle változata képzelhető el, ezért osztályozásuk szinte lehetetlen. Léteznek speciális osztályozások, de ezek taglalása egy külön diplomamunkát érne.

Ha a középérték és az autókorrelációs függvény értéke t_1 -től független, tehát: $\mu_x(t_1) = \mu_x$ és $R_x(t_1, \tau) = (R_x(\tau))$, akkor a sztochasztikus folyamatot gyengén stacionáriusnak

nevezzük. Ha a sztochasztikus folyamat összes momentuma és kapcsolt momentuma t_1 -től független, a folyamatot erősen stacionáriusnak nevezzük.

2.1.7.3. Determinisztikus és sztochasztikus jelek keveréke

A sztochasztikus jeleket leíró függvények segítségével a periodikus és sztochasztikus jel keverékében meg lehet különböztetni a két összetevőt. Ez abból a szempontból fontos, mivel esetünkben mindkét jeltípus (zajtípus) jelen lesz a mérés során, viszont jó hatásfokkal csak a periodikus jeleket tudjuk eliminálni.

A periodikus jel elkülönítésének egyik módja (a sok közül) az úgynevezett additív zajszűrés. A jel-zaj keveréket periodikusan átlagolják:

$$(25) \quad y(t) = \frac{1}{N} \sum_{j=0}^{N-1} x(t + jT) = \frac{1}{N} \sum_{j=0}^{N-1} [n(t + jT) + \cos(2\pi f_1 t + jT)]$$

A szemlélet feltételezése, hogy a zavaró zaj teljesítménye csökken az átlagolás során, a periodikus jelé pedig változatlan marad. Végtelen sok összegzés esetén a zavaró zaj „eltűnik”, a periodikus jel pedig megmarad. Általában az átlagolt jel autókorrelációs függvénye:

$$(26) \quad R_y(\tau) = P \left[\frac{1}{N^2} \sum_{j=0}^{N-1} x(t + jT) \sum_{k=0}^{N-1} x(t + kT + \tau) \right] = \\ = \frac{1}{N^2} \sum_{j=0}^{N-1} \sum_{k=0}^{N-1} R_x((k - j) * T + \tau)$$

Ebből a teljesítmény-sűrűségfüggvény:

$$(27) \quad G_y(f) = \frac{G_x(f)}{N^2} \sum_{j=0}^{N-1} \sum_{k=0}^{N-1} \exp(i(k - j)2\pi fT) = G_x(f) |H(f)|^2$$

Az additív zavaró zaj-szűrés tehát egy olyan szűrőnek felel meg, melynek átvitele:

$$(28) \quad |H(f)|^2 = \frac{1}{N^2} \sum_{j=0}^{N-1} \sum_{k=0}^{N-1} \exp(i(k - j)2\pi fT) = \left| \frac{e^{-i2\pi fNT} - 1}{N(e^{-i2\pi fT} - 1)} \right|^2 = \\ = \left[\frac{\sin \pi N f T}{N \sin \pi f T} \right]^2$$

Példának összegyűjtöttem pár közlekedéssel kapcsolatos gép zajtípusainak felépítését egy táblázatban.

A jelölések a következők:

- az adott zajtípus nagy mértékben jellemző az adott gépre
- az adott zajtípus kis mértékben jellemző az adott gépre
- x az adott zajtípus nem jellemző az adott gépre

1. táblázat

Közlekedési gépek által kibocsátott zaj összetétele

	zaj felépítése	
	periodikus	sztochasztikus
nagy teljesítményű transzformátor	●	x
belső égésű motor	●	○
jármű futóművének érintkezése a talajjal	○	●
aerodinamikai zaj	x	●
forgó mozgást végző gép	○	○
légcsavaros repülőgép	●	○
sugárhajtású repülőgép	○	●
közlekedési zaj általában – utcai zaj	○	●
üzemcsarnok zaja	x	●

Mint látható, egyes esetekben, a várttól eltérően nem feltétlen a periodikus jellegű zajok dominálnak, annak ellenére, hogy hallás után erre lehet következtetni. A sugárhajtású repülőgép által kibocsátott zajban például sokkal nagyobb szerepe van a fúvókában fellépő áramlási zajnak, mint a lapátsorok forgásából származó zajnak.

Miért fontos a zajok ilyen szintű feltérképezése? Mint már említettem, az aktív zajcsökkentés rendelkezik bizonyos korlátokkal. Míg periodikus zajcsökkentés terén jobb eredményeket tudunk elérni, addig a sztochasztikus jellegű zajok esetében a kimenetel kétséges, *feedback* struktúrával szinte lehetetlen bármilyen eredményt is elérni, és *feedforward* struktúrával sem biztos a siker. Az előző fejezetben említett négy példa esetén a következő eredmény várható:

2. táblázat
Zajcsökkentés szempontjából a négy alapeset zajösszetétele

	zaj jellege	
	periodikus	sztochasztikus
fejhallgató	●	○
cső	●	●
szoba	●	○
kültéri	●	?

Hasonlóan az előző jelölésrendszerhez:

- a zajcsökkentés hatásos
- a zajcsökkentés kevésbé (vagy egyáltalán nem) hatásos

Külön kalap alá kell venni a kültéri sztochasztikus jellegű zajokat, mivel ezeknél az aktív zajcsökkentés hatásosságát nagyon sok tényező befolyásolja, mint például hőmérséklet, páratartalom, talaj visszatükröző képessége, terepviszonyok, stb., ezért itt nem lehet előre tudni, hogy milyen eredményt lehet elérni, mivel még eltérő napszakokban is más-más eredményt kaphatunk.

3. Repülőgép hajtóművek által kibocsátott zajok mérési folyamata

A szakdolgozatom másodlagos célja, az aktív zajcsökkentési eljárások és szükséges alapismeretek felkutatása, összehasonlítása után a repülőgépek legnagyobb hangkibocsátó szerkezeti eleme – hajtóműve által kibocsátott zaj jellegének feltérképezése oly módon, hogy azt később elemezni lehessen.

A mérést két hajtóművön végeztem el: a Repülőgépek és Hajók Tanszék TKT-1-es kísérleti gázturbinás sugárhajtóműve, illetve egy Boeing 737-300-as repülőgép CFM56-3-as hajtóművei által realizált zajemissziót mértem. A fő mérés a Boeing 737-es volt, mivel ez egy közvetlen információ arról, hogy milyen zaj keletkezik egy repülőgép üzeme során. A másodlagos mérés pedig a tanszéki gázturbina mérése volt, abban a reményben, hogy a zajspektrumuk között hasonlóság fedezhető fel. Amennyiben ez igaz lenne, a későbbiekben laboratóriumi körülmények között lenne lehetőség további mérések elvégzésére, a tényleges aktív zajcsökkentés megvalósítására. Ez egy repülőgép esetén túlságosan komplikált, idő- és főleg pénzigényes feladat lenne.

A sugárhajtóművek működési elve szerint a közeg (levegő) a szívócsatornán keresztül jut be a ventillátorfokozatba, majd a kisnyomású, azt követően pedig a nagynyomású kompresszorba. Itt történik meg a munkabevitel, mivel a közeg a forgó- és állólapatokon irányeltérítést szenved, ennek következtében nyomása, sűrűsége, hőmérséklete megnő. Az égéstérben hőt közlünk a munkaközeggel, üzemanyag befecskendezésével – elégetésével. Ettől hőmérséklete ugrásszerűen megnő. Ezután az égéskor keletkezett gázok expanzió mennek keresztül a turbinában, a leadott hőenergia pedig mechanikai munkává alakul. Az ezután megmaradó nyomásviszony (turbina nyomásviszonya mindig kisebb, mint a kompresszoré) pedig tolóerőt hoz létre a fúvócsőben.

Zaj akkor keletkezik, amikor egy rugalmas közeget mechanikus úton mozgásra kényszerítünk. Az előbbi folyamat során látható, hogy zaj fog keletkezni a szívócsatornába történő beszíváskor, a kompresszió, és expandálás során, az égés miatt, a fúvócsőbeli állapotváltozás miatt, és természetesen a forgó- és súrlódó alkatrészek miatt.

Ebben a fejezetben a két említett mérés menetét ismertetem e zajok regisztrálására.

3.1. Mérőeszközök implementálása

A zajméréshez használatos eszközök tárháza igen széles. Számomra a megfelelő eszközök kiválasztásánál alapvető szerepet játszott a mérőberendezés mobilitása; mindenképpen olyan berendezésekre volt szükségem, amely az amplitúdó időbeli eloszlását képes rögzíteni; több mérési eredményt képes tárolni; a zajszint – mely várhatóan igen magas – nem vezérli túl, illetve nem ad fals mérési eredmény; és nem utolsó sorban olcsó.

Az első elképzelés az volt, hogy egy olyan zajszintmérővel, mely rendelkezik vonalszintű kimenettel, illetve egy laptop segítségével próbálom meg rögzíteni az adatokat. Sajnos az ilyen típusú zajszintmérőknek csupán a pár napos bérlete is több

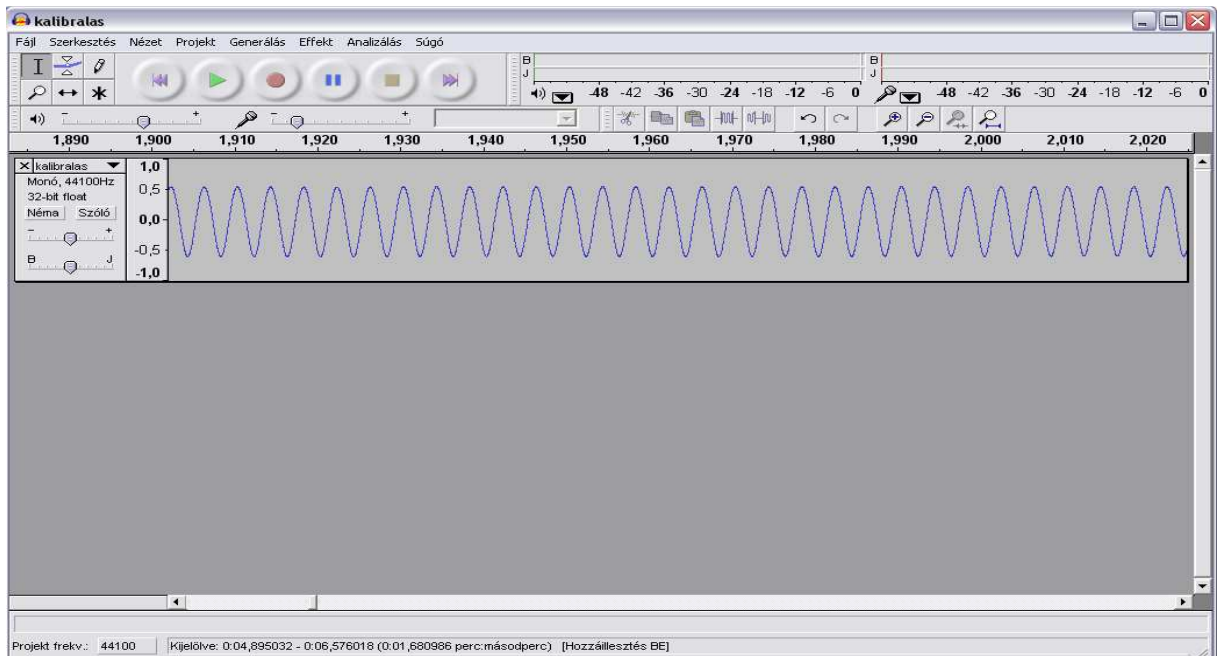
százezer forintot tesz ki, s legolcsóbb ajánlatként 600000 Ft-ot kaptam új vásárlása esetén, így ezt a megoldási lehetőséget el kellett vetnem.

A második elképzelés az volt, hogy egy nagyobb teljesítményű mikrofont csatlakoztatva egy erősítőhöz, szintén lappal lehet rögzíteni a mérési eredményeket. Ebben az esetben viszont nagy problémát okozott volna, hogy a B737-300-as hajtóműpróbájának színhelyén nem található hálózati feszültség, ezért az erősítőt maximum egy aggregátorról tudtam volna üzemeltetni, ami viszont kedvezőtlenül befolyásolta volna a mérési eredményt.

A harmadik – végül megvalósuló megoldás pedig az volt, hogy egy egyszerű multimédiás mikrofon, egy laptop, illetve rajta az Audacity nevű ingyenesen hozzáférhető hangrögzítő-szerkesztő program segítségével készítsem el a regisztrátumokat. Emellett a megoldás mellett szól, hogy nagyon olcsó, egyszerű, teljes mértékben mobil (ez főleg a B737-300-as hajtóműpróbán volt fontos, mivel így több pontról is tudtam mérni), illetve a laptop akkumulátorának kapacitásától függően hálózati feszültség sem szükséges működéséhez, s mint a későbbi méréseken látható, a számunkra fontos információk feltérképezéséhez elegendő.

Ahhoz, hogy ez a konstrukció megfelelően működjön, a mikrofont (mely nem rendelkezett gyári számmal) össze kellett kalibrálni Asus A3HF típusú laptopommal. A kalibrálást egy CA250-es típusú, 2542-es modellszámú Larson Davis hangnyomásszint kalibrátorral végeztem, mely tiszta, 250 Hz-es, 114 dB-es zajt állít elő. Ahhoz, hogy a mikrofon ne vezérelje túl a jelet, 0,1-es erősítést kellett beállítani a programban, mely érték az összes mérési eredmény alatt megmarad.

A következő ábrán látható, hogy a szinuszos hullámot megfelelően rögzíteni tudjuk, tehát ezzel a kalibrálási folyamat befejeződött.



20. ábra: A kalibrátor által kibocsátott szinuszos jel rögzítése az Audacity program segítségével, 100x-os nagyítással

Ahhoz, hogy a kiértékelést el tudjam végezni, a regisztrátumoknak 10-20 másodperc hosszúnak kell lenniük, mivel ezzel a mérési hibák is kiküszöbölhetőek (indoklás a későbbiekben).

3.2. A TKT-1-es kísérleti gázturbinás sugárhajtómű zajkibocsátásának mérése

Az első mérést a Repülőgépek és Hajók Tanszék tulajdonában lévő TKT-1-es gázturbinán végeztem.

A hajtómű egy TSz-21 indító gázturbinából lett átalakítva. Fő rendeltetése hallgatói mérések lebonyolítása. Eredetileg 40, maximum 50 másodpercig üzemeltették maximum, ezért figyelemre méltó, hogy a mérés során majdnem 10 percig üzemelt egyhuzamban.

A hajtómű egyfokozatú, félaxiális kompresszorral, – melynek nyomásviszonya névleges üzemmódon 3,5 – illetve egyfokozatú, axiális turbinával rendelkezik. Égéstera négyfűvókás, gyűrűs-csőves elrendezésű égéstér. A hajtómű száraz tömege körülbelül 40 kg, a teljes fékpad össztömege pedig körülbelül 150 kg, hossza pedig 1000 mm.

A hajtómű üzemmódjai: felszálló, névleges, földi alapjárat, légi alapjárat. Ezeknél az üzemmódoknál a hajtómű eltérő fordulatszámokon üzemel. Felszálló üzemmódban 50500 1/min, névleges üzemmódban 45000 1/min, földi alapjáraton illetve légi alapjáraton jellemzően 35000 1/min. A hajtómű eredetileg 530 N tolóerő kifejtésére képes, esetünkben ez körülbelül 200 N-ra csökkent. A hajtómű számára meg van határozva, hogy az egyes üzemmódokon hány másodpercet tölthet el, ezért a mérés egy előre megbeszélte terv szerint haladt.[24] Sajnos a tervezetthez képest a gyújtórendszer folyamatos hibái miatt, illetve az elfogyasztott kerozin mennyisége miatt nem tudtuk végig érní, viszont ennek ellenére is sikerült 10 mérési eredményt regisztrálni. A mérés idejére kölcsönkaptam egy Brüel&Kjaer 2232-es típusú zajszintmérőt (1777816-os sorszámmal), mellyel vonali bemeneten is tudtam regisztrálni a zajt.

A mérés 2009. november 20-án (péntek) reggel 9:15-től 9:50-ig került sor az Ae labor előtti udvaron. A külső hőmérséklet 7°C-fok volt, a páratartalom 100%.

A mérésen jelen voltak: Beneda Károly – a Repülőgépek és Hajók Tanszék tanársegédje, Csomor Vilmos a Repülőgépek és Hajók Tanszék labormunkatársa, illetve Bicsák György.

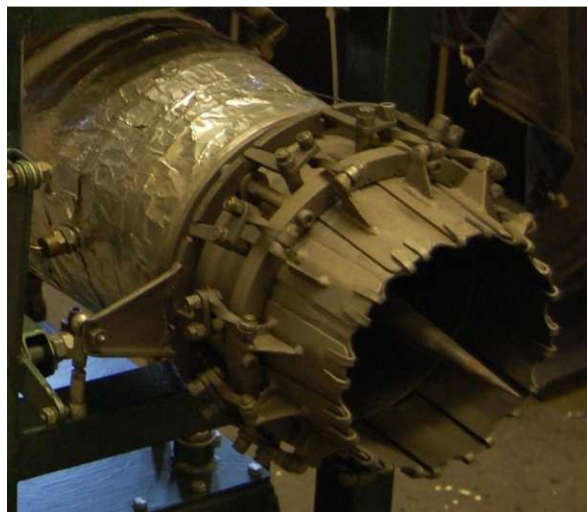
A mérés során az alábbi üzemmódokon üzemeltettük a hajtóművet:

- normál alapjárat
- emelt alapjárat
- 85-90%-os fordulatszámon a felszálló üzemmódhoz képest terheletlenül
- 85-90%-os fordulatszámon a felszálló üzemmódhoz képest terhelten
- 95-100%-os fordulatszámon a felszálló üzemmódhoz képest terheletlenül



21. ábra: A TKT-1-es gázturbinás sugárhajtómű fékpadra szerelve

A terhelést a gázsebesség-fokozó vezérlőkar szabályozásával lehet állítani, mellyel a fúvóka kilépő keresztmetszetét tudjuk befolyásolni.



22. ábra: A TKT-1-es hajtómű kilépő gázsebességét szabályozó mechanizmus

A mérés során az udvarra kitolt gázturbina mellett helyezkedtem, el 3,5 m távolságra a kilépő keresztmetszet síkjában. A mért regisztrátumok során nem változtattam pozíciómon, így a mérések elméletben hasonló eredményt kell, hogy mutassanak.

A mérés során 10 regisztrátumot sikerült készíteni, ezeket az 1. számú melléklet tartalmazza. Látható, hogy míg a mikrofon a bekalibrált 0,1-es erősítéssel a mérés során nem vezérelte túl a jelet, addig a zajszintmérő esetében két alkalommal is szükséges volt csökkenteni az erősítést. Sajnos a zajszintmérő által mért zajszintet nem tudtam rögzíteni, mivel – sajnos azóta sem tisztázott oknál fogva – nem mutatott konstanshoz

közeli értéket, hanem folyamatosan ingadozott igen nagymértékben: 100 és 130 dB között. Mivel az Ae udvara viszonylag zárt, ezért elképzelhető, hogy a falakról történő visszaverődés okozta a problémát, de ez is csak feltételezés.

3.3. A Boeing 737-300 típusú repülőgép zajkibocsátásának mérése

A második mérést a Budapesti Ferihegyi Repülőtéren végeztem a Lufthansa Technik Budapest munkatársai segítségével, akik lehetővé tették, hogy jelen legyek a Boeing 737-300 G-TOYC jelzésű repülőgép hajtóműpróbáján.

A Boeing 737 a világ legnépszerűbb közepes hatótávolságú, keskenytörzsű utasszállító repülőgépe. Az 1967 óta gyártott gépből jelen pillanatban több mint 6200-et rendeltek meg és adtak el. Ezek közül több, mint 4000 még ma is üzemben van. A típussal az összes levegőben töltött órák száma megközelíti a 300 millió órát.

Az általam mért repülőgép egy D-check utáni hajtóműpróbán esett át, mely során a két hajtóművet tesztelték az előírások szerinti üzemmódokon.

A Boeing 737-300 típusú repülőgép két darab CFM56-3-as hajtóművel rendelkezik.



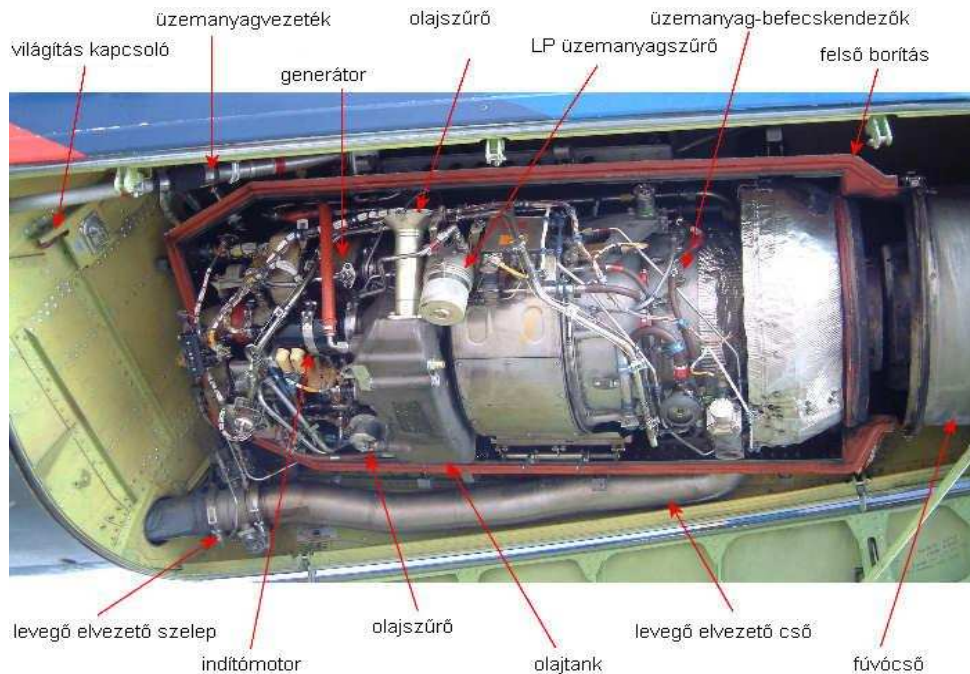
23. ábra: A CFM56-3-as nagy kétáramúsági fokú sugárhajtómű

forrás: <http://218.6.160.223/eng/images/e-3.jpg>

A CFM56-3-as hajtómű nagy kétáramúsági fokkal rendelkezik (~6). Két forgórészes szerkezet, mely forgórészek egymástól mechanikailag függetlenek. Tagolását tekintve 1 ventilátorfokozatból, 3 fokozatú kisnyomású kompresszorból, illetve 9 fokozatú nagynyomású kompresszorból, gyűrűs elrendezésű égéstérből, egy egyfokozatú nagynyomású turbinából, illetve 4 fokozatú kisnyomású turbinából épül fel. A hajtómű teljes hossza 2,5 m, belépő keresztmetszetének átmérője 1,55 m, száraz tömege 1950 kg. Maximálisan 110 kN tolóerő kifejtésére képes – természetesen felszálló üzemmódon.

A hajtómű maximális – felszálló teljesítményen a ventilátorfokozat és kisnyomású kompresszor (+kisnyomású turbina) 5175 1/min; míg a nagynyomású kompresszor (+nagynyomású turbina) 14460 1/min fordulatszámmal forog.

Fontos megemlíteni a Boeing 737-300-as repülő segédhajtóművét is, mivel ez a mérés során folyamatosan üzemelt (reptéri vontatás alatt ez biztosította az alapvető elektromos berendezések áramellátását). Esetünkben egy Garrett GTCP (Gas Turbine Compressor Power unit) 85-129[E] berendezésről van szó, melyet éppen a 737-300-as típusú gép CFM56-3-asához fejlesztettek ki.



24. ábra: A Boeing 737-300-as Garrett GTCP 85-129[E] típusú segédhajtóműve
forrás:

http://3.bp.blogspot.com/_bgEkhgPJIUc/SgRJyogOGFI/AAAAAAAAAAU/lyGzIBN6GUE/s320/apu_labelled.jpg

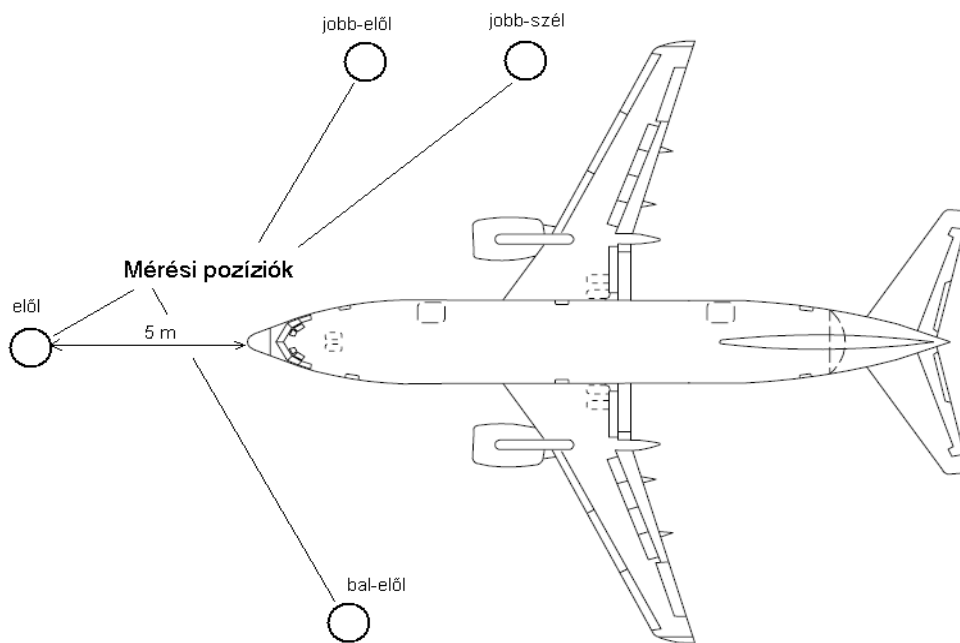
A Garrett 85-129[E] felépítése hasonló a TKT-1-hez, egyfokozatú, félaxiális kompresszorral, illetve egyfokozatú, axiális turbinával rendelkezik. Száraz tömege 40,82 kg, terhelés alatt fogyasztása elérheti a 115 kg/órát is. 100%-os fordulatszáma 41800 1/s, a 110%-os pedig 46000 1/s.

A mérésre 2009. november 29-én (vasárnap) 16:10 és 17:22 között került sor, az Ferihegyi Repülőtér irányítótornya melletti hajtóműpróbákra kijelölt területen. A mérés ideje alatt a külső hőmérséklet 1°C volt, páratartalom 70%.

A hajtóműpróbát Fischer Ottó vezette. A mérés során sajnos nem voltam összeköttetésben a pilótafülkével, ezért nem tudtam konkrét méréstervet készíteni. A mérést követő egyeztetések után az alábbi üzemmódokon sikerült eredményt regisztrálni:

- alapjárat
- 60%-os terheltség
- 70%-os terheltség
- felszálló üzemmód

Természetesen ezeket az üzemmódokat lehetőségeimhez mérten (baleseti és egyéb rendszabályokat betartva) több mérési ponton rögzítettem adatokat. Ezeket az alábbi ábrán szemléltetem:



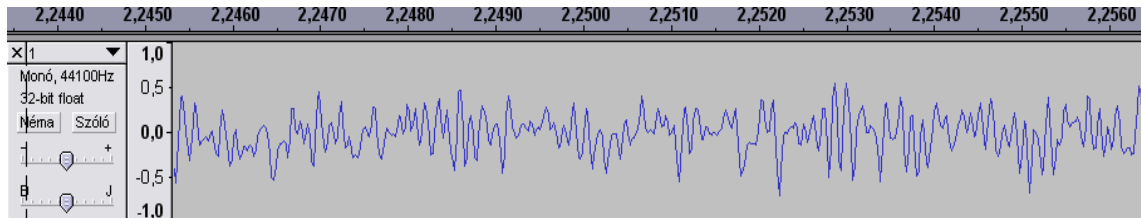
25. ábra: A Boeing 737-300 hajtóműpróbája során felvett mérési pozíciók ábrázolása

Mint látható, a mérés során többször helyet cseréltem. Erre több okból is szükség volt: egyrészt a mérés során közepes erősségű keleti szél fújt, amitől a mikrofont megpróbáltam a lehető leginkább takarásba helyezni; másrészt a felszálló teljesítményű üzemmódon a két hajtóművet egyesével is kipróbálták, ekkor csak az adott oldalon készítettem felvételt; harmadrészt a zaj szempontjából nagyjából mindegy, hogy honnan készítem, viszont így a mérési zajok – zavaró jelek kiküszöbölhetőek. Továbbá nehezítette a mérést a felszálló gépek zaja, mivel a kettes felszállópálya csupán 2-300 méter távolságban helyezkedik el a mérőhelytől. A felszálló gépek zaja által keltett interferenciák kiküszöbölése végett ezekben az időszakokban nem tudtam felvételeket készíteni.

A mérés során a mikrofon egyszer sem vezérelte túl a jelet (az eredetileg kalibrált 0,1-es erősítés végig kielégítően működött), így sikerült 27 db jó (20 másodpercnél hosszabb) felvételt készíteni, melyeket a 2-es számú melléklet tartalmaz.

4. A mérési eredmények kiértékelése

A mért amplitúdó-idő függvények önmagukban nem hordoznak számunkra elégséges információt. Habár megfelelő nagyítással (zoom-olással) valamivel látványosabb a mérési eredmény, illetve a túlvezérlést lehet ellenőrizni, a jel sztochasztikusságot, a jelen levő periodicitást nem tudjuk megállapítani.



26. ábra: A Boeing 737-300-as repülőgép felszálló teljesítményen üzemelése során rögzített regisztrátumának (2. számú melléklet 21. ábra) 1000x-es nagyítása

Mint az ábrán is látható, a zaj eléggé kaotikus ebben a formájában. Az ábrákon felül látható skála az eltelt másodperceket jelenti.

A további elemzésekhez spektrumanalízist hívtam segítségül. MATLAB környezetben készítettem egy scriptet konzulensem, Sujbert László útmutatása alapján. A spektrum elkészítéséhez a psd (power spectral density) függvényt – teljesítmény spektrumot használtam.

A jelek spektrumanalízisének legnépszerűbb módszere a Fourier transzformáció. Ennek alapfeltevése, hogy az analízist $-\infty$ és $+\infty$ közötti időintervallumban végezzük el. A psd függvény paraméterének a diszkrét Fourier transzformáció pontszámát 16384-re vettem a rövidebb lefutási idő érdekében. Második hatványokra nagyon gyors algoritmus írható, ezt nevezik Fast Fourier Transformation-nek (FFT – gyors Fourier transzformáció). A mintavételi frekvencia 44100 Hz mellett ez körülbelül 3Hz-es felbontást jelent.

$$(29) \quad df = \frac{fs}{N}$$

ahol fs a mintavételi frekvencia pontszáma.

Az eljárás a teljes regisztrátumot N méretű szegmensekre bontja, majd ezeken a szegmenseken külön-külön futtatja a diszkrét Fourier transzformációt (DFT). Az így kapott eredményeket pontonként átlagolja. Ez a mérési szórás csökkentése miatt szükséges. Mivel mintavételezett jelsorozat véges kiterjedésű, ezért a DFT és FFT saját hibáinak, az úgynevezett szivárgás és tetőesés kiküszöbölése céljából iktattam be a Hanning-ablakot.

A zajspektrumot kirajzoló script az alábbi alakban írható fel:

```
figure(1)
x=wavread('d:\zajmeres\b737\alap\elol\1');
psd(x,16384,44100,hanning(16384));
title('B737-300 alapjárat')
```

Az első sor a készített fájl neve, erre azért van szükség, mivel ugyanez megismétlődik 37-szer. A második sor beolvassa a *.wav* kiterjesztésű regisztrátumot, melynek forrását a zárójelben kell megadni. A harmadik sor a már részletezett *psd* függvény futtatása a mintavételezett jelsorozaton, a negyedik sorban pedig a kirajzolt spektrumnak lehet nevet adni.

Az így készített spektrumokat a TKT-1-es hajtóműről a 3-as számú melléklet, a Boeing 737-300-as repülőgépről pedig a 4-es számú melléklet tartalmazza.

Mivel összesen 38 regisztrátumot, és ugyanennyi zajspektrumot készítettem, az összes spektrum elemzésébe nem bonyolódok bele, hanem megpróbáltam az általános tapasztalatokat levonni, illetve az érdekességekre, lehetőségekre felhívni a figyelmet.

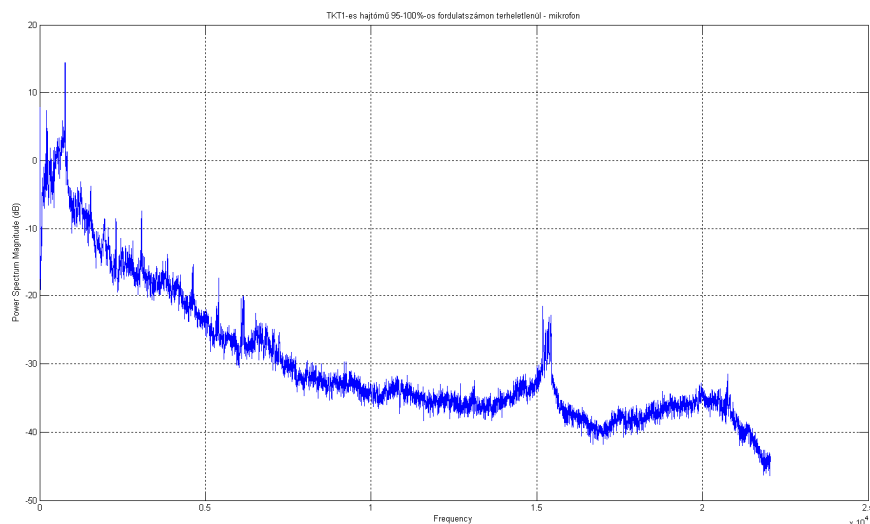
Ahogy az már a korábbi fejezetben „sejtettem”, a zajfelépítése alapvetően sztochasztikus, s igen széles frekvenciatartományban van jelen: általában 10 kHz sáv szélesség a minimum, de legtöbbször a 22,5 kHz-et is eléri. Ezen a frekvenciatartományon az egyre rövidebb hullámhossz miatt kijelenthető, hogy a passzív zajcsökkentő elemekre mindenképpen szükség van. Aktív zajcsökkentés hatásosan 1 kHz alatti frekvenciatartományban érhető el, mivel a hullámhossz ekkor olyan hosszú, hogy a destruktív interferencia által létrehozott csöndes zóna elegendően nagy ahhoz, hogy érdemi módon foglalkozni lehessen vele.

Az elemzés során elsősorban az éles csúcsok feltárása fontos, mivel ezek utalnak periodikus komponens jelenlétére, ami pedig az aktív zajcsökkentés alanya lehet.

További érdekesség, hogy mindkét helyszínen történt mérés során adódott egy csúcs 5 kHz körül. Ez több helyen is úgy néz ki, mintha 5 kHz-re szimmetrikus két csúcs lenne, ami arra enged következtetni, hogy egy amplitúdó-modulált jellel van dolgunk, ami a mérőrendszer hibájára utal. Ennek ellenőrzésére készítettem egy „üres” felvételt, vagyis egy olyat, amikor a mikrofon bemeneti jelét letiltom, ez esetben viszont nem jelent meg az említett két csúcs.

Megállapítható a TKT-1-es hajtómű mérési eredményei alapján, hogy a mikrofon és a zajszintmérő közel azonos mérési eredménnyel szolgál, így a Boeing 737-300-as zajkibocsátásának mérése során a mikrofon nagy valószínűséggel megfelelő pontossággal rögzítette a regisztrátumokat.

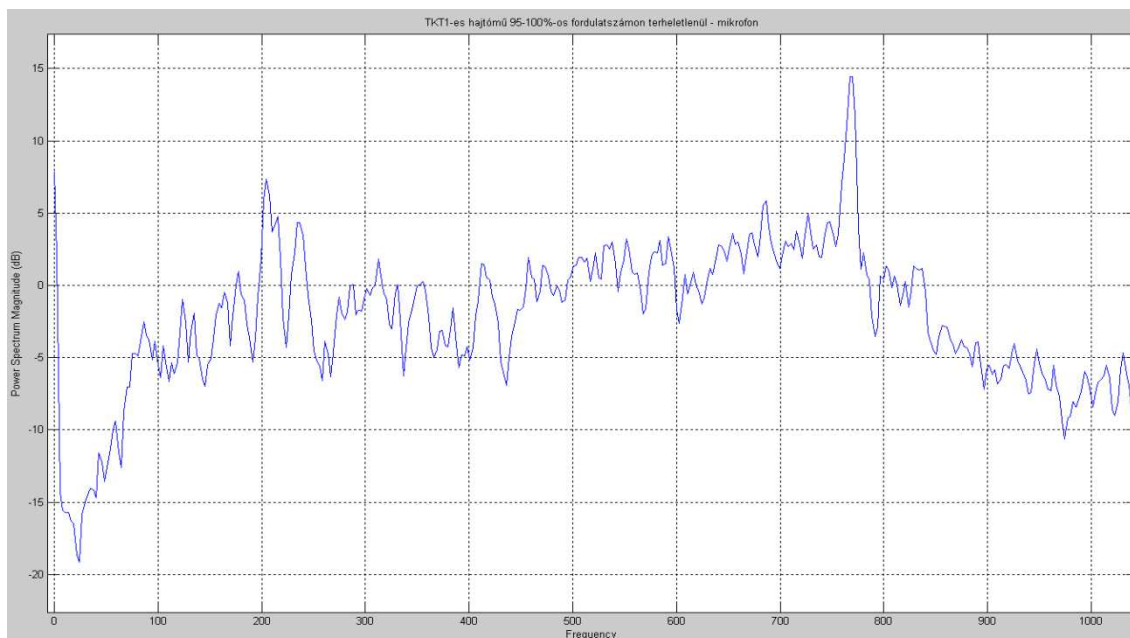
Elsőként a TKT-1-es sugárhajtómű 95-100%-os fordulatszám, terhelés nélkül mért zajspektrumát nézzük meg közelebbről!



27. ábra: A TKT-1-es gázturbinás sugárhajtómű 95-100%-os fordulatszám, terhelés nélkül mikrofonnal mért regisztrátum zajspektruma
(3. számú melléklet 5. ábra)

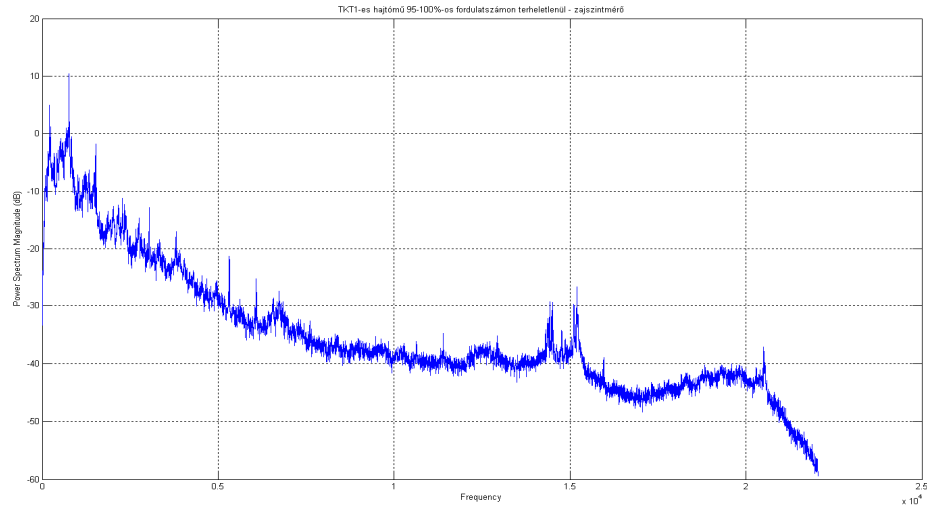
Habár a spektrum rendelkezik több éles csúccsal is, ezek sajnos a kívánt frekvenciatartományon kívül helyezkednek el. Látható, hogy a fordulatszám (mely körülbelül $47900 \text{ 1/min} = 798,3 \text{ Hz}$) frekvenciája megjelenik a spektrumon, illetve 200 Hz körül adódik egy periodikus komponens.

A számunkra fontos részt felnagyítva:



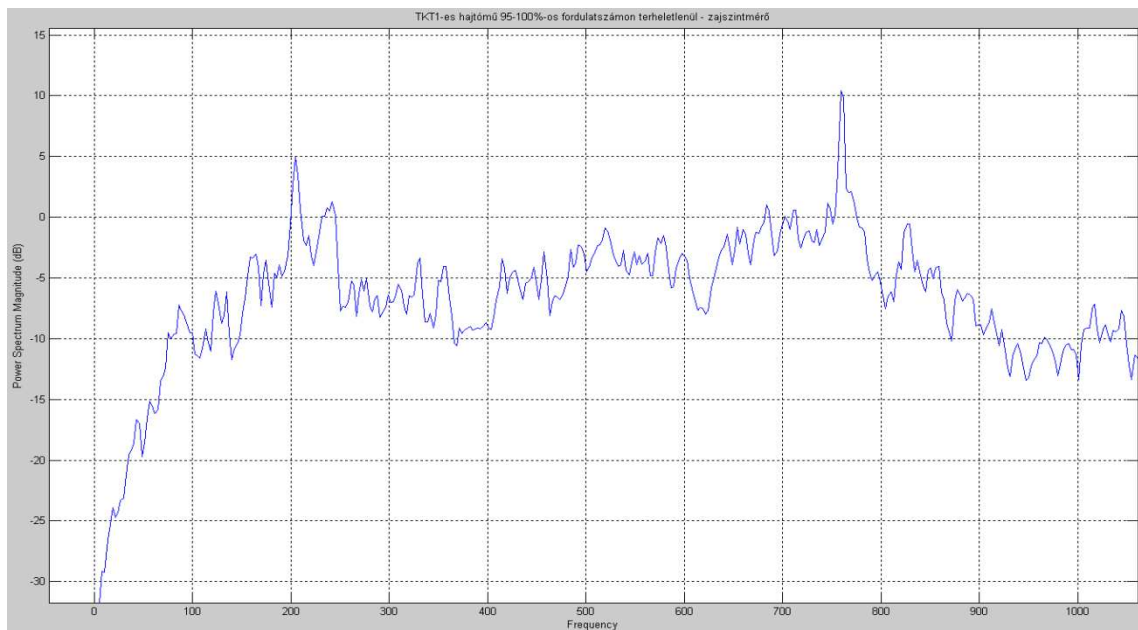
28. ábra: A TKT-1-es gázturbinás sugárhajtómű 95-100%-os fordulatszám, terhelés nélkül mikrofonnal mért regisztrátum zajspektrumának 0 és 1 kHz közötti intervalluma kinagyítva
forrás: 3. számú melléklet 5. ábra

Összehasonlítva az ugyanezen az üzemen zajszintmérővel rögzített eredménnyel, jól látható, hogy az éles csúcsok, közel azonos helyen vannak a mikrofonnal mért-, illetve a zajszintmérővel mért eredménnyel, s frekvenciatartománybeli lefutásuk is hasonló, tehát a mikrofon valószínűleg jó mérési eredményt fog adni a későbbi mérésen, ahol csak az állt rendelkezésemre a regisztrátumok elkészítéséhez.



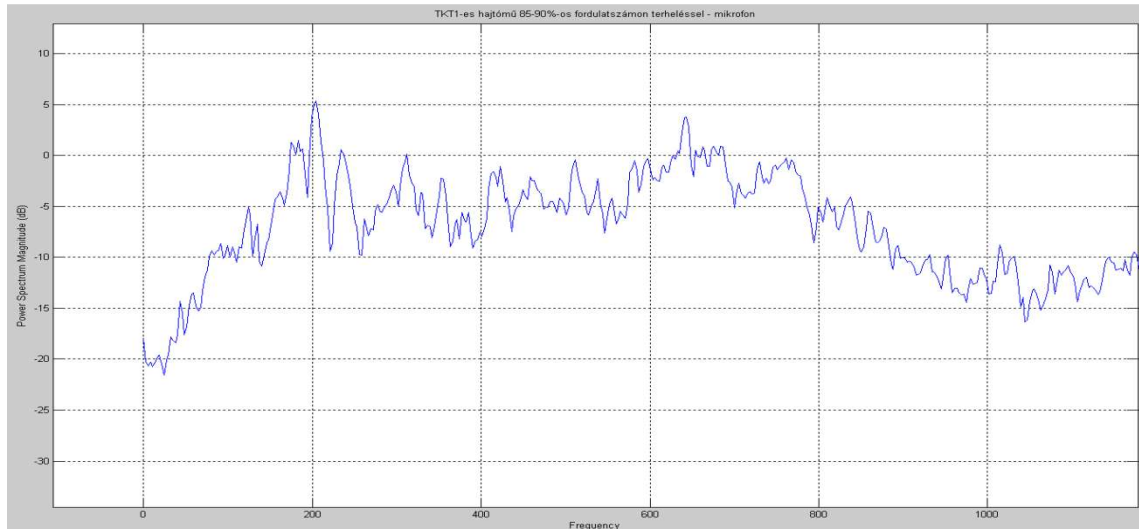
29. ábra: A TKT-1-es gázturbinás sugárhajtómű 95-100%-os fordulatszám, terhelés nélkül mikrofonnal mért regisztrátum zajspektruma
forrás: 3. számú melléklet 10. ábra

A 0-1000 Hz-es intervallum kinagyítva ezen az eredményen is:



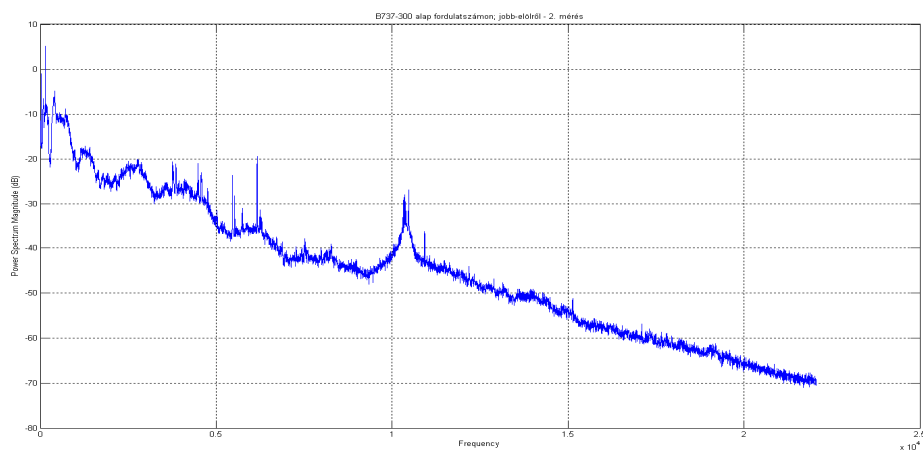
30. ábra: A TKT-1-es gázturbinás sugárhajtómű 95-100%-os fordulatszám, terhelés nélkül zajszintmérővel mért regisztrátum zajspektrumának 0 és 1 kHz közötti intervalluma kinagyítva
forrás: 3. számú melléklet 5. ábra

Itt is 770 Hz körül jelenik meg a fordulatszám okozta periodikus komponens. Ezen felül 200 Hz körül ismét van egy komponens, mely periodikusságra utal. Érdekes, hogy ezen a frekvencián a legtöbb mérési eredményen ez a komponens fellép, míg a kalibrálás és üres mérés során nem volt jelen.



31. ábra: A TKT-1-es gázturbinás sugárhajtómű 85-90%-os fordulatszámon, terheléssel, mikrofonnal mért regisztrátum zajspektrumának 0 és 1 kHz közötti intervalluma kinagyítva
forrás: 3. számú melléklet 4. ábra

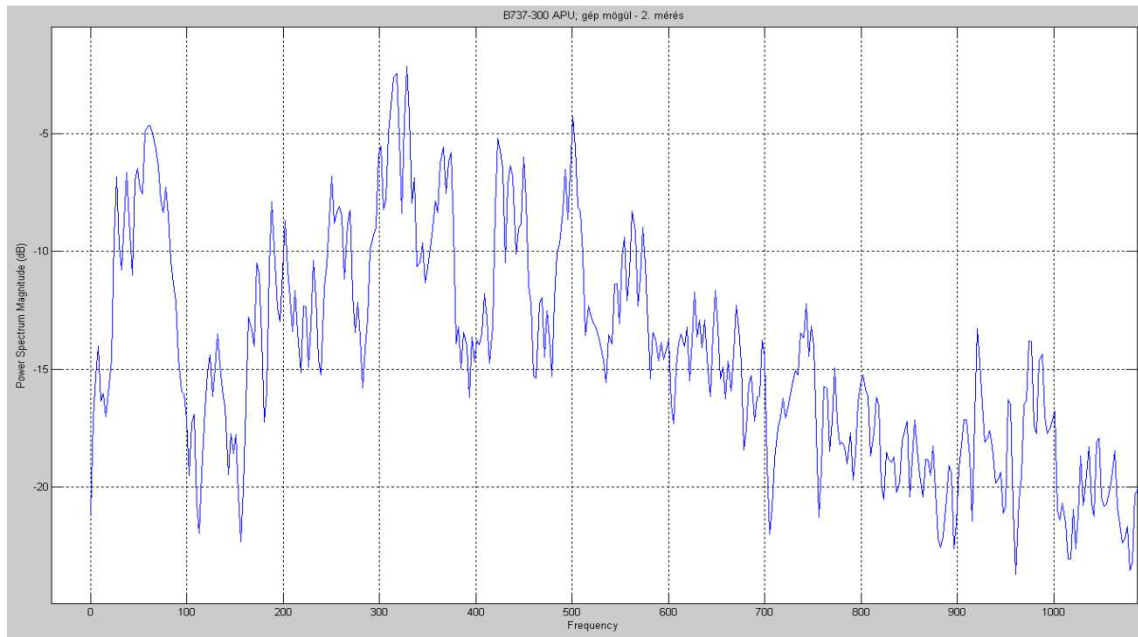
A 85-90%-os fordulatszámon a 200 Hz-es komponens még mindig jelen van, pedig más fordulatszámon, eltérő terhelésen üzemelt a sugárhajtómű. Viszont sem ennek, sem pedig a fordulatszám okozta periodikus komponensnek nem jelennek felharmonikusai. A következő ábrát összehasonlítva a TKT-1-es zajspektrumaival, meglepően sok közös vonás található bennük.



32. ábra: Boeing 737-300 típusú repülőgép hajtóművei alapjáraton - jobb-előlről felvéve - 2. mérés folyamán rögzített regisztrátum spektruma
forrás: 4. számú melléklet, 8. ábra

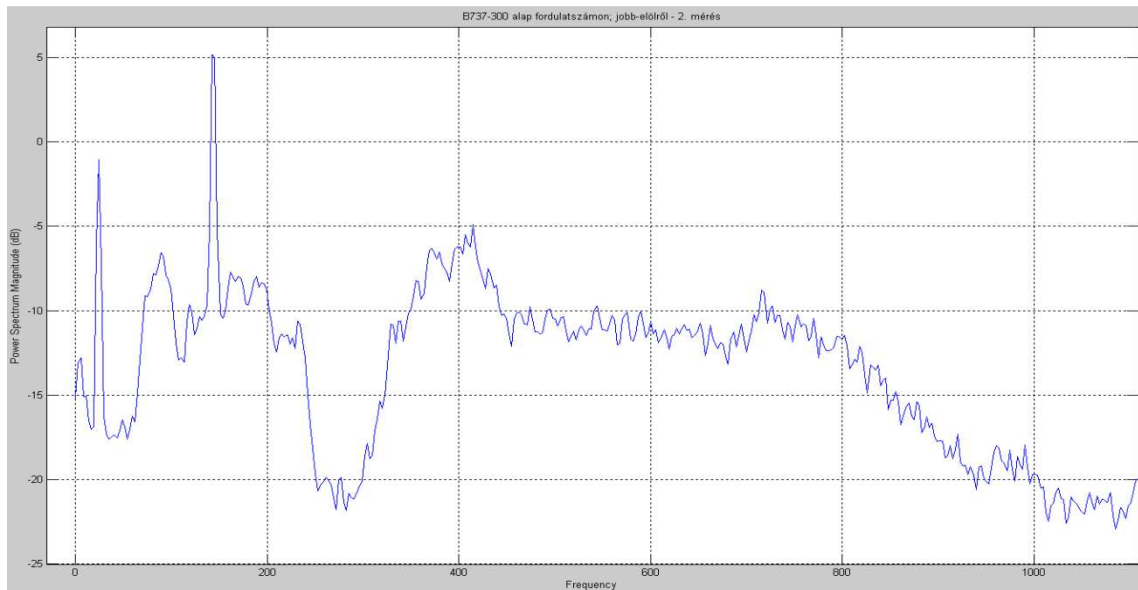
Mindkét mérési esetben a zaj erősen sztochasztikus jellegű, a 0-1 kHz sávszélességben pedig megjelenik egy, a fordulatszámmal kapcsolatos periodikus komponens, illetve legalább egy, attól teljesen független periodikus komponens.

A Boeing 737-300 esetében a teljes spektrumokat nem illesztettem be, mivel a 4. számú melléklet tartalmazza ezeket, illetve jól látható, hogy nem tartalmaz plusz információt. A segédhajtómű (Garrett GTCP 85-129[E]) spektrumát mindenképpen érdemes megvizsgálni, mivel a mérés alatt folyamatosan üzemben volt, bár kibocsátott hangteljesítménye csak töredéke a két CFM56-3-as hajtóműnek.



33. ábra: Boeing 737-300 típusú repülőgép segédhajtóműve földi-üzemi fordulatszámon - 2. mérés zajspektrumának 0 és 1 kHz közötti intervalluma kinagyítva.
forrás: 4. számú melléklet 2. ábra

Habár hasonló sáv tartományban mozog a teljesítmény, mint a TKT-1-esnél, megfigyelhető, hogy a spektrum sokkal „szabálytalanabb”, ugyanakkor több periodikus komponens is fellelhető benne, melyek ráadásul nem egymás felharmonikusai. Ez aktív zajcsökkentés szempontjából egy igen kedvező helyzet, amennyiben be tudjuk határolni a periodicitások elsődleges okait.

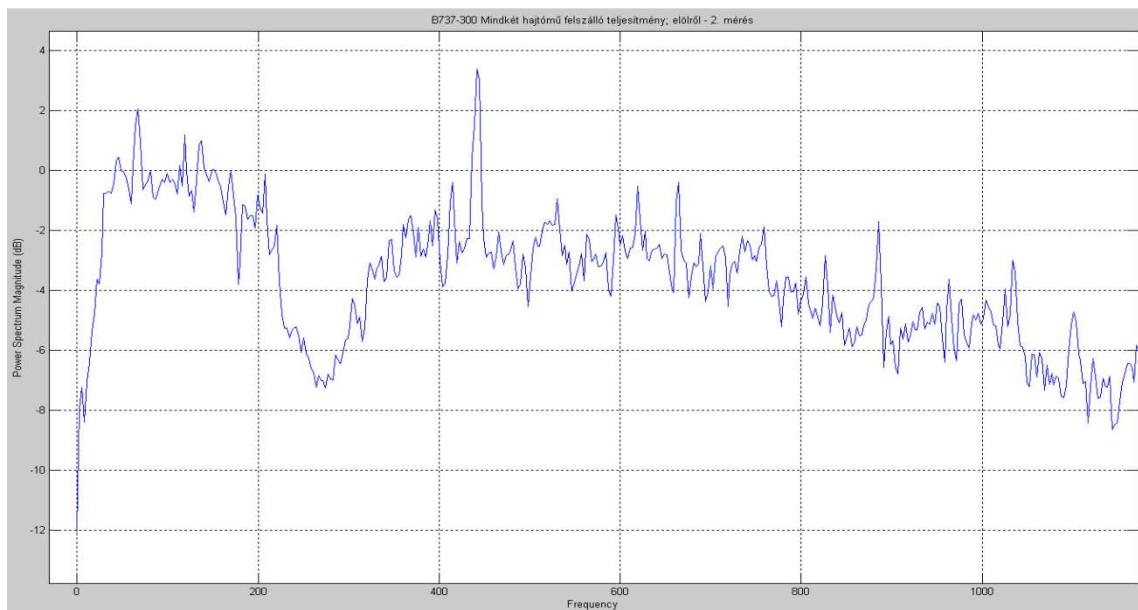


34. ábra: Boeing 737-300 típusú repülőgép hajtóművei alpjáraton - jobb-előlről felvéve - 2. mérés zajspektrumának 0 és 1 kHz közötti intervalluma kinagyítva.

forrás: 4. számú melléklet 8. ábra

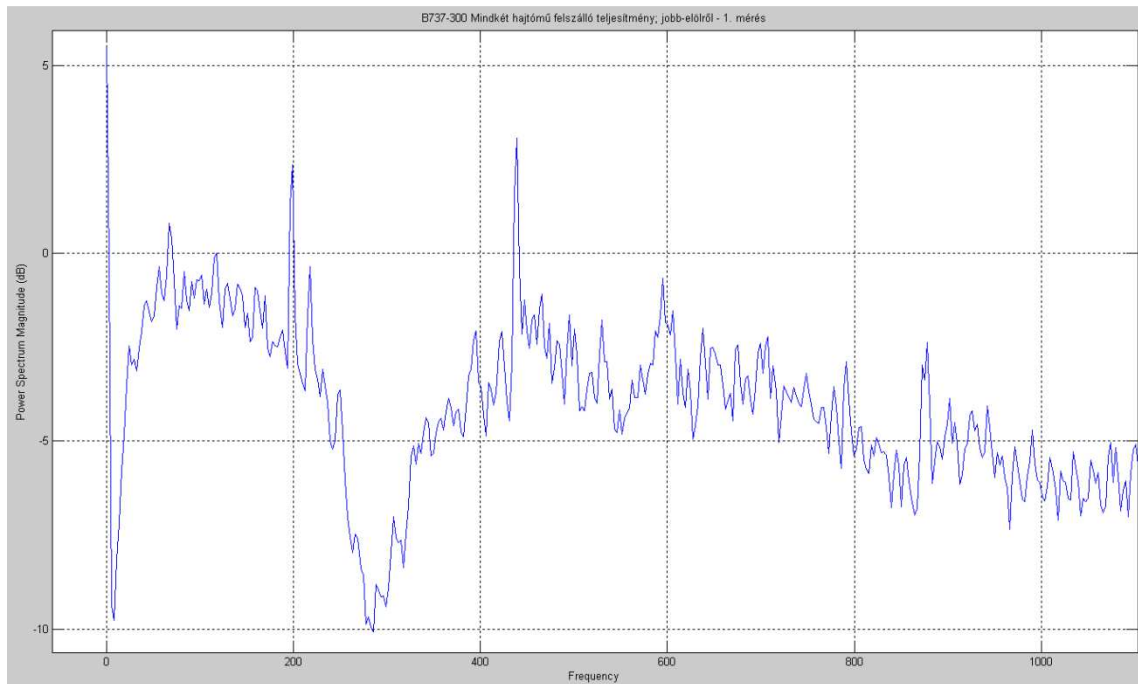
A repülőgép hajtóműveinek alpjáraton történő üzemeltetése során rögzített regisztrátum spektrumán látható, hogy a két CFM56-3-as hajtómű alpjáraton zajemissziója meglehetősen sztochasztikus, egyedül 50 Hz, illetve 150 Hz környékén lép fel egy-egy erősebb periodikus komponens.

Viszont az utasok, környezet szempontjából leginkább a magasabb fordulatszámok, elsősorban a felszálló üzemmódon történő zajkibocsátás a legfontosabb, melyekre példa a következő két diagram.



35. ábra: Boeing 737-300 típusú repülőgép hajtóművei felszálló üzemmódon - előlről felvéve - 2. mérés zajspektrumának 0 és 1 kHz közötti intervalluma kinagyítva.

forrás: 4. számú melléklet 22. ábra



36. ábra: Boeing 737-300 típusú repülőgép hajtóművei felszálló üzemmódon - jobb-előlről felvéve - 1. mérés zajspektrumának 0 és 1 kHz közötti intervalluma kinagyítva.
forrás: 4. számú melléklet 24. ábra

A két felszálló teljesítményen mért regisztrátum spektrumán látható, hogy a már említett 200 Hz (± 20 Hz) körül ezeken a méréseken is megtalálható egy periodikus komponens, továbbá 67 Hz környékén van még egy jelentősebb, illetve 440 Hz-nél (melynek felharmonikusa 880 Hz-nél megtalálható). Egy jól identifikált *feedforward* struktúra esetén az aktív zajcsökkentés terepet kaphat. Érdekes viszont, hogy ventilátorfokozat és nagynyomású kompresszorfokozat fordulatszámából (5175 1/min = 86,25 1/s), illetve a nagynyomású kompresszorfokozat fordulatszámából (14460 1/min = 241 1/s) várt frekvenciákon nem jelennek meg periodikus összetevők, hanem pont egy úgynevezett beszakadás lép fel. Ennek okát sajnos nem találtam meg semmilyen idevágó irodalomban.

5. Összefoglalás

A két mérés eredménye a vártaknak megfelelően nagymértékben sztochasztikus összetételű zajt eredményezett, viszont elmondható, hogy mindkét helyszínen előfordult majdnem mindegyik mérés folyamán olyan 1 kHz alatti frekvencia, ahol egy-egy erősebb periodikus komponens is jelen volt. Ezek kiküszöbölésére ad lehetőséget egy megfelelően identifikált *feedforward* struktúra. Sajnos az aktív zajcsökkentési eljárások megismerése túl sok időbe telt, így a dolgozat végén már nem volt lehetőség számításokat végezni arra vonatkozóan, hogy amennyiben ezek a periodikus komponensek megszűnnének, ez összességében körülbelül hány dB zajszint-csökkenést eredményezne, illetve hogy ehhez mekkora teljesítményű rendszerre lenne szükség, továbbá a létrejött csendes zóna mekkora lenne. A (22)-es egyenlet (Parseval tétel) segítségével az a közelítő megállapítás tehető, hogy a zajszint körülbelül 1-4 dB-el csökkenhetne. Ez a teljes spektrumot figyelembe véve nem túl nagy százalék, viszont a logaritmikus skála miatt nem elhanyagolható. Ezen felül érdemes lenne további kutatásokat folytatni az eredeti, illetve az esetlegesen módosuló zaj pszichoakusztikus hatásairól. Vagyis lehetséges, hogy a fül számára egy olyan zavaró komponens sikerülne kiiktatni, mely következtében a teljes zaj érzékelése/tolerálása megváltozna.

A mérés igen fontos eredménye, hogy a TKT-1-es és a Boeing 737-300-as két CFM56-3-as hajtóműveinek zajspektruma sok hasonlóságot mutatott, tehát további vizsgálatok, mérések, fejlesztések céljából a tanszéki gázturbina megfelelő alany lenne.

Érdemes a témában további kutatásokat folytatni, az előbb felsorolt, ki nem számolt adatok pontosítását illetően, illetve kísérleti összeállításokat készíteni egy-egy konstrukció kipróbálására, vagyis gyakorlattal igazolni az elméletben kidolgozott állításokat.

Ezennel a szakdolgozatot befejezettnek tekintem.

Budapest, 2009. december 11.

Bicsák György

Felhasznált Irodalom:

Könyv:

- [1] *Dr. Buna Béla A közlekedési zaj csökkentése* - Műszaki könyvkiadó, 1982 ISBN 963 10 3880 7.
- [2] *Bálint István, Murányi Mihály Munkalélektan* – Táncsics Könyvkiadó, Budapest 1973, MSZ 5601-59
- [3] *Bokor József, Gáspár Péter Irányítástechnika járműdinamikai alkalmazásokkal* – Typotex Budapest, 2008 – ISBN 978 963 279 001 5
- [4] March, Peter R. **A repülés története** – ISBN 978-963-327-456-9
- [5] *Osváth Péter, Sztipánovits János Méréstechnika* – Műszaki Egyetem Kiadó, 1980 – ETO 681.513.6.012

Folyóirat:

- [6] *S.J. Elliott, P.A. Nelson Active Noise Control* – IEEE Signal Processing Magazine, october 1993
- [7] *Tulipánt Gergely A zajhatások vizsgálata* – Közlekedéstudományi szemle, LIV. évfolyam 1. szám

Konferencia kiadvány:

- [8] *Fülöp Augusztinovicz Inter Noise 97 Volume I, 1977 august 25-27 Hungary, Budapest* – Stádium Nyomda Kft, Budapest 1997 – ISBN 963 8241 62 2

Kormányzati és egyéb igazgatási szervek kiadványai:

- [9] *ICAO – Noise Assessment for Land-use Planning* – Circular 116-AN/86 – 1974

Kutatási jelentések:

- [10] *Széchy Béla Légiközlekedési zajok vizsgálata Közúti Közlekedési Tudományos Kutató Intézet, Járműkísérleti Osztály, Akusztikai Kutatócsoport* – témaszám: 242-71-11-07

Elektronikus dokumentumok:

- [11] *dr.Sztraka Lajos Méréselemélet és számítógép orientált mérés technika* – BME Vegyész mérnöki Kar (1995)
URL: oktatas.ch.bme.hu/oktatas/konyvek/fizkem/elektron/kepek/vkerdesAA.doc
- [12] *Edwin Langberg Active Sound Absorber* – Appl. No.: 794,449, Nov. 19, 1991
URL: <http://www.freepatentsonline.com/5267321.pdf>
- [13] *dr. Bite Pálné Zaj- és rezgésvédelmi szakértői vélemény a Ferihegyi-Csepel irányú repülőgép forgalomtól származó zaj csökkentésére* – VIBROCOMP témaszám: 143/2007 URL:
http://www.budapest21.hu/portal/server.pt/gateway/PTARGS_0_76295_25753_0_0_18/Szakvelemeney_1wva.pdf

- [14] *Lasztovicza László* **Tanítóval történő ellenőrzött tanulás**
 URL: http://home.mit.bme.hu/~laszto/web_data/neural/supervised.PDF
- [15] *Sujbert László* **Periodikus zavarhatások csökkentésének aktív módszerei** – 1997
 URL: <http://mycite.omikk.bme.hu/search/slist.php?lang=1&AuthorID=10001368>
- [16] *Muhammad TahirAkhtar, MasahideAbe, MasayukiKawamata, WataruMitsuhashi*
Signal Processing
 URL: www.elsevier.com/locate/sigpro
- [17] *Bogár István, Faragó Ákos, Molnár Károly* **Nyolccsatornás jelfeldolgozó rendszer fejlesztése** – TDK dolgozat, 2007
 URL: <http://dsp.mit.bme.hu/userfiles/tdk/molnartdk02.pdf>
- [18] *C. McNeilage, E. N. Ivanov+, P. R. Stockwell*, J. H. Searls* **Review of feedback and feedforward noise reduction techniques** – 1998 IEEE Frequency Control Symposium
 URL: <http://www.psi.com.au/Pages/LibraryPublished/fcs98-noisered-a4.pdf>
- [19] *Orosz György* **Adaptív jelfeldolgozó eljárások megvalósítása szenzorhálózatban** – Diplomamunka, 2006
 URL: <http://home.mit.bme.hu/~orosz/Pubs/diploma.pdf>
- [20] *Bharath M Siravara* **Subband feedback active noise cancellation**, The University of Texas at Dallas, August 2002
 URL: http://www.utdallas.edu/~loizou/thesis/bharath_ms_thesis.pdf
- [21] *Czene Gábor, Szilágyi László* **Akusztikus visszacsatolás kompenzálása hangosító rendszerekben**, 2008:
 URL: http://www.muszeroldal.hu/measurenotes/akusztikus_visszacsatolas.pdf
- [22] *Zbigniew Hanzelka & Andrzej Bien* **Közbenső harmonikusok** - AGH University of Science and Technology, 2004. július
 URL: <http://www.rezinfo.hu/files/file/311.pdf>
- [23] *Illényi Tamás* **Érzeti akusztikai mérések, Hangsugárzók szubjektív akusztikai vizsgálata**, Bevezető előadás - a Hangtechnikai Laboratórium II. tárgyhoz
 URL: http://vibac.hit.bme.hu/documents/109hangtani_meresek-ii.pdf

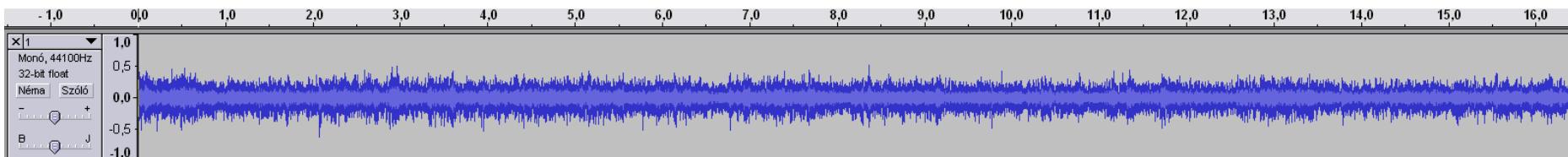
Üzembentartási kézikönyv

- [24] **ATKT-1 kísérleti gázturbinás sugárhajtómű üzembentartási kézikönyve**, 2008
 URL: http://rht.bme.hu/index.php?option=com_docman&task=doc_download&gid=98&Itemid=44

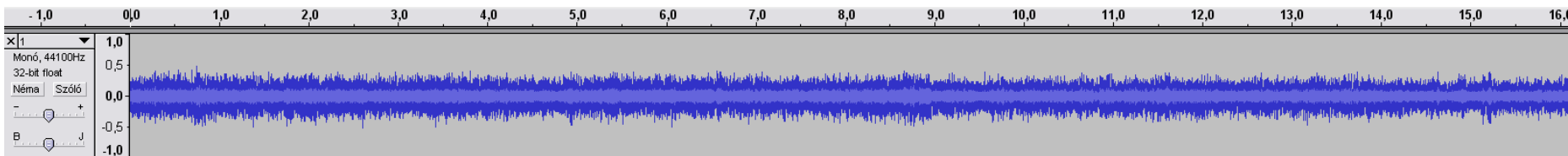
Sajtóközlemény

- [25] *Szollár Domokos* **Ferihegy megteszi az első lépéseket a helyi közösségeket érintő zajhatások csökkentése érdekében** - 2006
 URL: http://www.bud.hu/sajtoszoba/kozlemenyek/?article_hid=1290

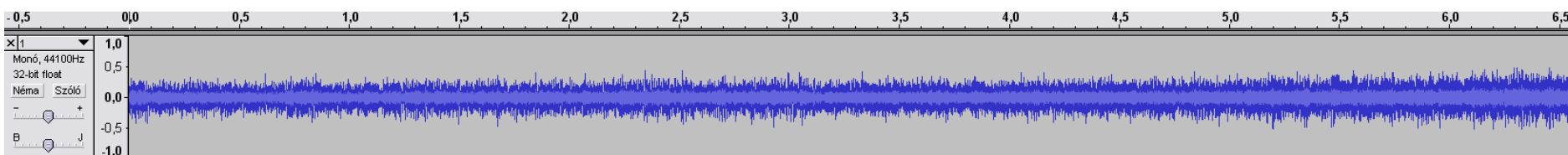
1. számú melléklet: TKT-1-es gázturbinás sugárhajtómű zajkibocsátásának regisztrátumai



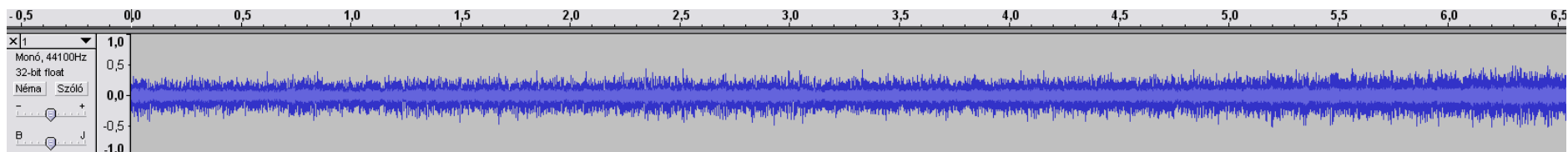
1. ábra: TKT-1-es gázturbinás sugárhajtómű normál alapjáratú üzeme, mikrofonnal rögzítve



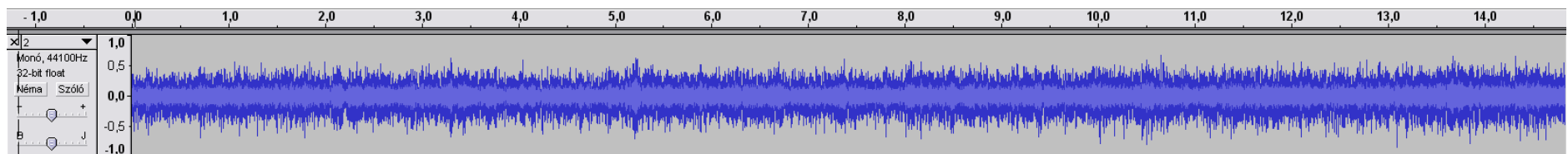
2. ábra: TKT-1-es gázturbinás sugárhajtómű normál alapjáratú üzeme, zajszintmérővel rögzítve



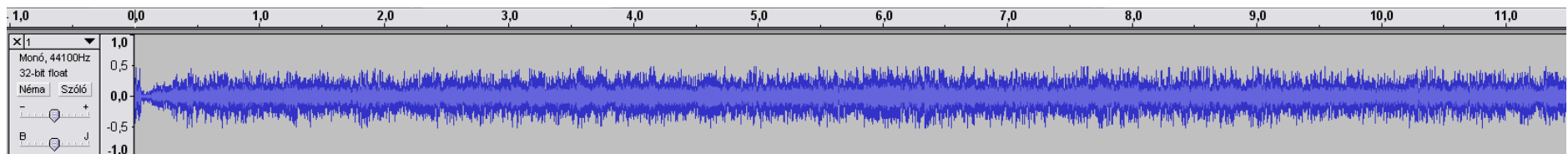
3. ábra: TKT-1-es gázturbinás sugárhajtómű emelt alapjáratú üzeme, mikrofonnal rögzítve



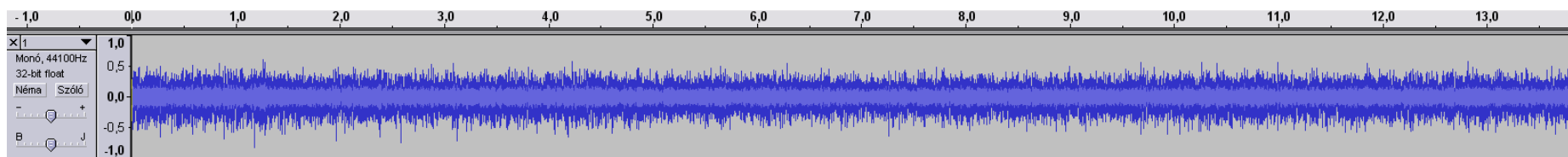
4. ábra: TKT-1-es gázturbinás sugárhajtómű emelt alapjáratú üzeme, zajszintmérővel rögzítve



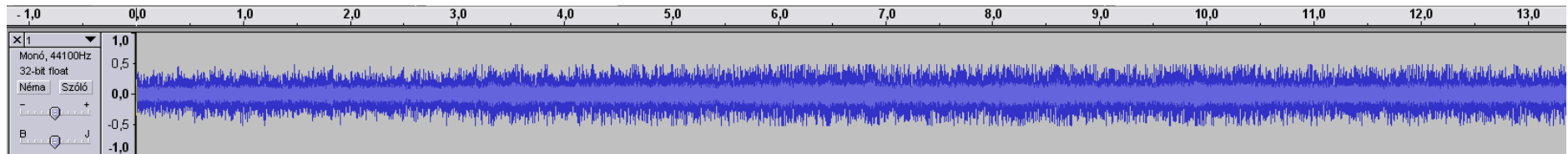
5. ábra: TKT-1-es gázturbinás sugárhajtómű maximális fordulatszámhoz képest 85-90%-os fordulaton, terhelés nélkül üzemeltetve, mikrofonnal rögzítve



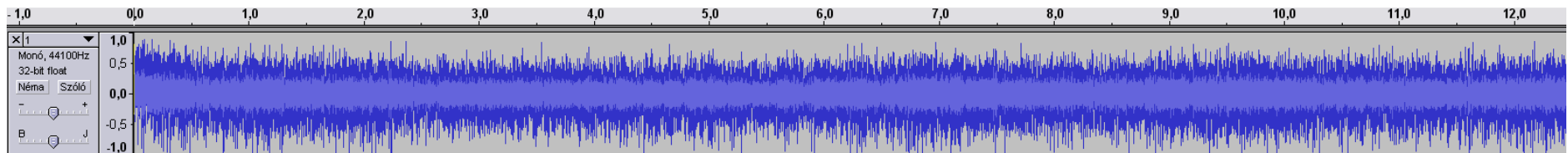
6. ábra: TKT-1-es gázturbinás sugárhajtómű maximális fordulatszámhoz képest 85-90%-os fordulaton, terhelés nélkül üzemeltetve, zajszintmérővel rögzítve



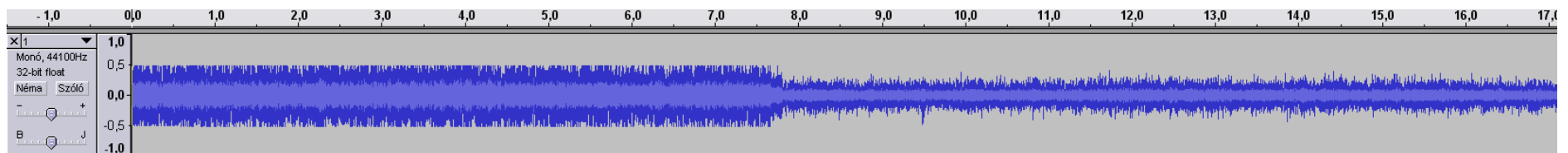
7. ábra: TKT-1-es gázturbinás sugárhajtómű maximális fordulatszámhoz képest 85-90%-os fordulaton, terheléssel üzemeltetve, mikrofonnal rögzítve



8. ábra: TKT-1-es gázturbinás sugárhajtómű maximális fordulatszámhoz képest 85-90%-os fordulaton, terheléssel üzemeltetve, zajszintmérővel rögzítve

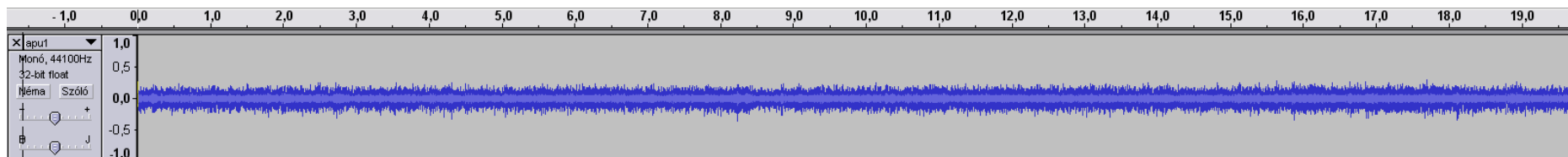


9. ábra: TKT-1-es gázturbinás sugárhajtómű maximális fordulatszámhoz képest 95-100%-os fordulaton, terhelés nélkül üzemeltetve, mikrofonnal rögzítve

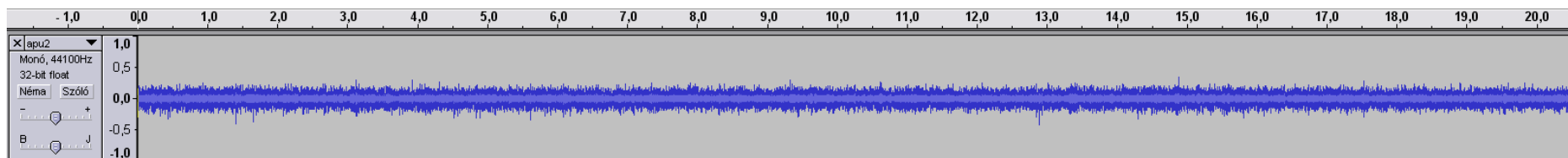


10. ábra: TKT-1-es gázturbinás sugárhajtómű maximális fordulatszámhoz képest 95-100%-os fordulaton, terhelés nélkül üzemeltetve, zajszintmérővel rögzítve

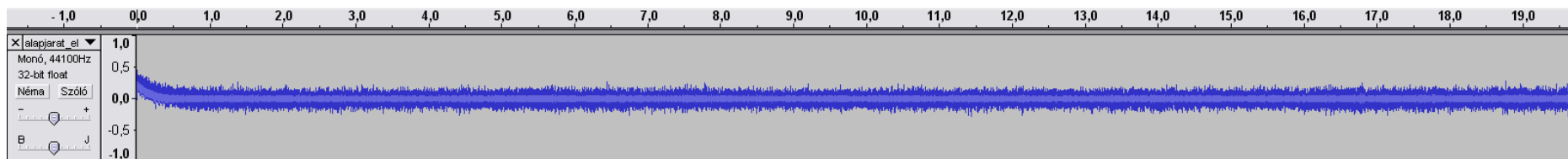
2. számú melléklet: A Boeing 737-300 típusú utasszállító repülőgép zajkibocsátásának regisztrátumai



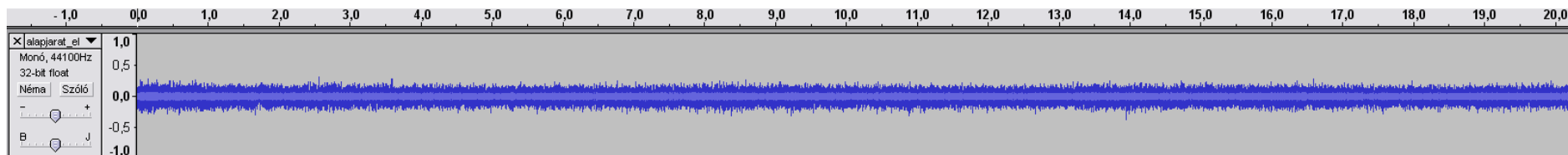
1. ábra: Boeing 737-300 típusú repülőgép segédhajtóműve földi-üzemi fordulatszámon - 1. mérés



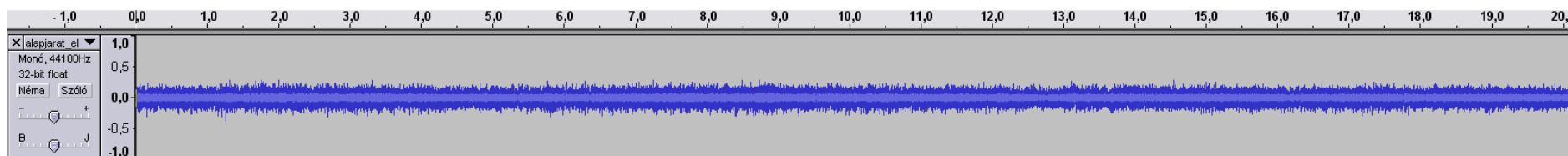
2. ábra: Boeing 737-300 típusú repülőgép segédhajtóműve földi-üzemi fordulatszámon - 2. mérés



3. ábra: Boeing 737-300 típusú repülőgép hajtóművei alajjáraton - szemből felvéve - 1. mérés

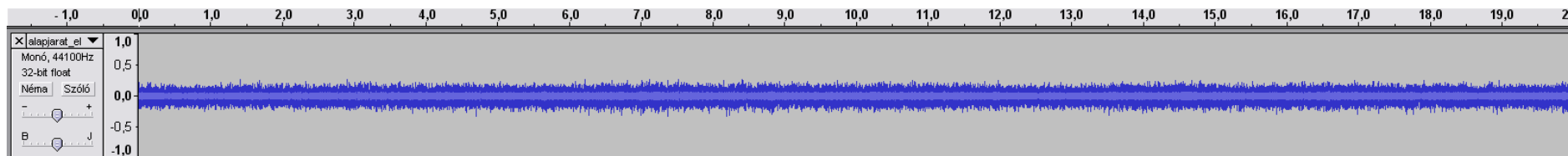


4. ábra: Boeing 737-300 típusú repülőgép hajtóművei alapjáraton - szemből felvéve - 2. mérés

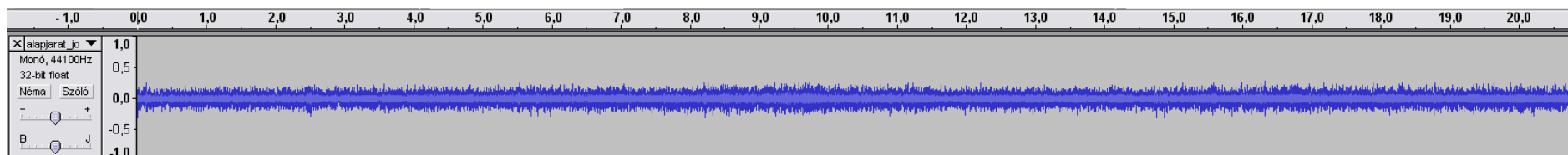


5. ábra: Boeing 737-300 típusú repülőgép hajtóművei alapjáraton - szemből felvéve - 3. mérés

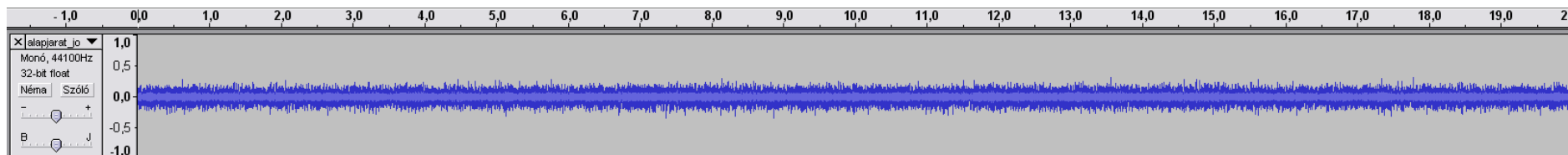
64



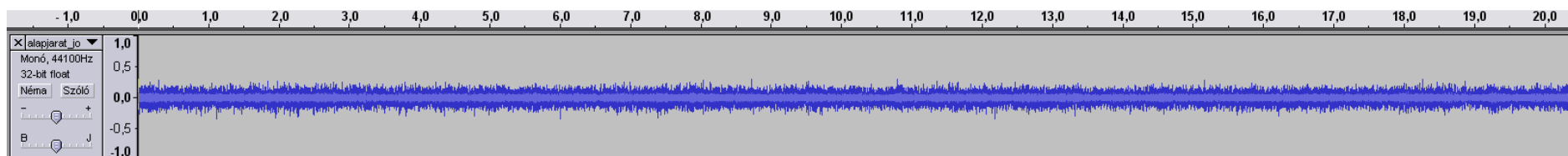
6. ábra: Boeing 737-300 típusú repülőgép hajtóművei alapjáraton - szemből felvéve - 4. mérés



7. ábra: Boeing 737-300 típusú repülőgép hajtóművei alapjáraton - jobb-előlről felvéve - 1. mérés

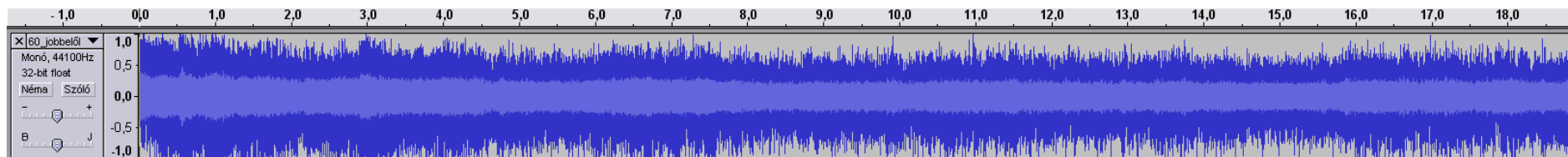


8. ábra: Boeing 737-300 típusú repülőgép hajtóművei alajáraton - jobb-előlről felvéve - 2. mérés

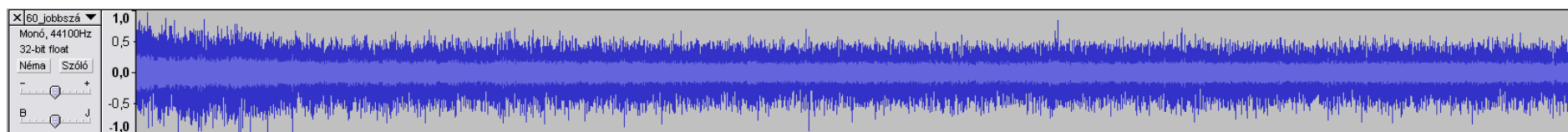


9. ábra: Boeing 737-300 típusú repülőgép hajtóművei alajáraton - jobb-előlről felvéve - 3. mérés

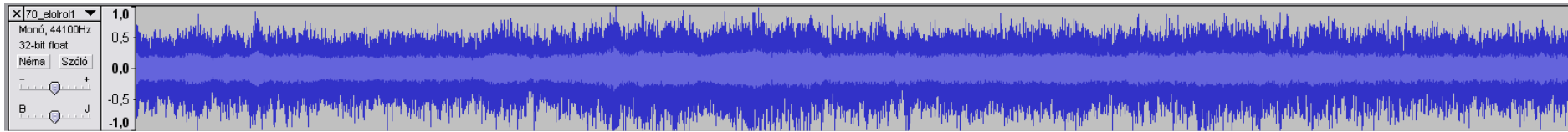
65



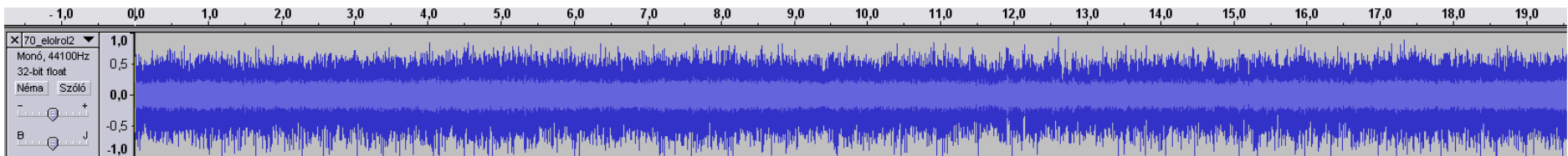
10. ábra: Boeing 737-300 típusú repülőgép hajtóművei 60%-os terhelésen - jobb-előlről felvéve



11. ábra: Boeing 737-300 típusú repülőgép hajtóművei 60%-os terhelésen - jobbszárnyvégen felvéve

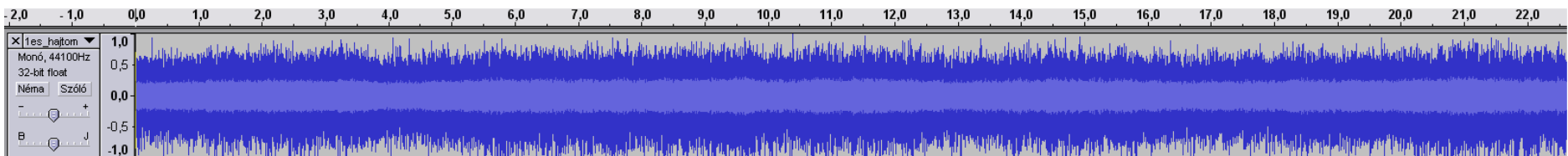


12. ábra: Boeing 737-300 típusú repülőgép hajtóművei 70%-os terhelésen - előlről felvéve - 1. mérés

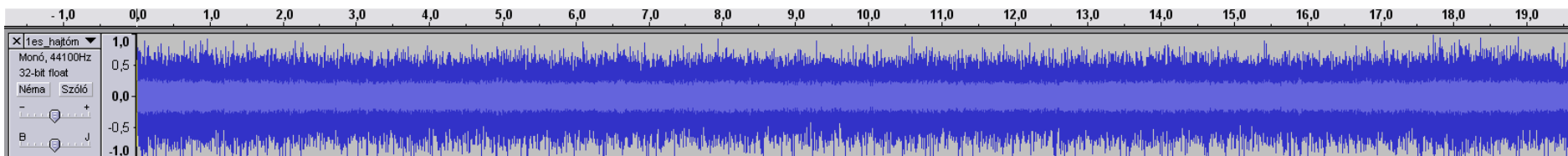


13. ábra: Boeing 737-300 típusú repülőgép hajtóművei 70%-os terhelésen - előlről felvéve - 2. mérés

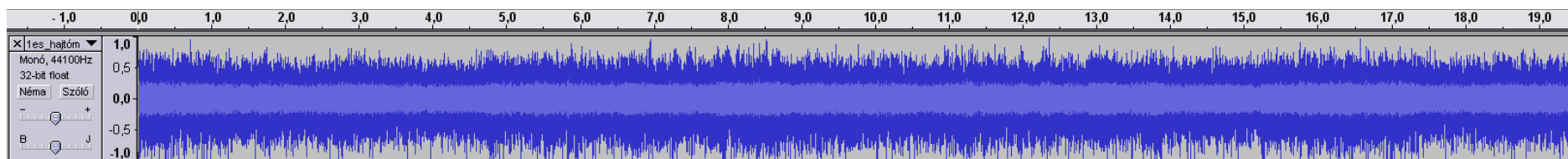
66



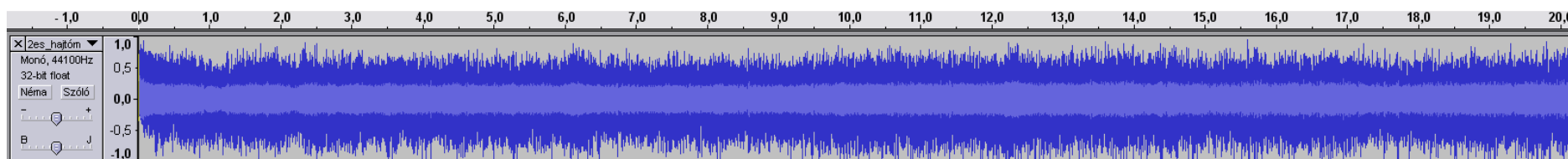
14. ábra: Boeing 737-300 típusú repülőgép 1-es hajtóműve felszálló üzemmódon - bal-előlről felvéve - 1. mérés



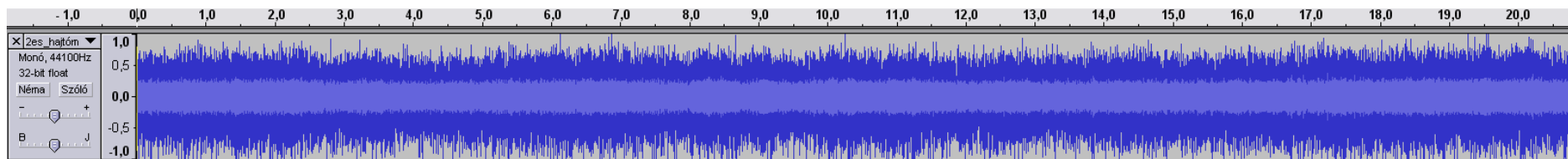
15. ábra: Boeing 737-300 típusú repülőgép 1-es hajtóműve felszálló üzemmódon - bal-előlről felvéve - 2. mérés



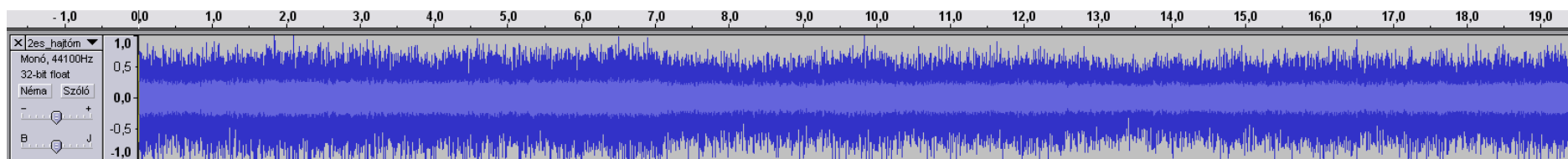
16. ábra: Boeing 737-300 típusú repülőgép 1-es hajtóműve felszálló üzemmódon - bal-előlről felvéve - 3. mérés



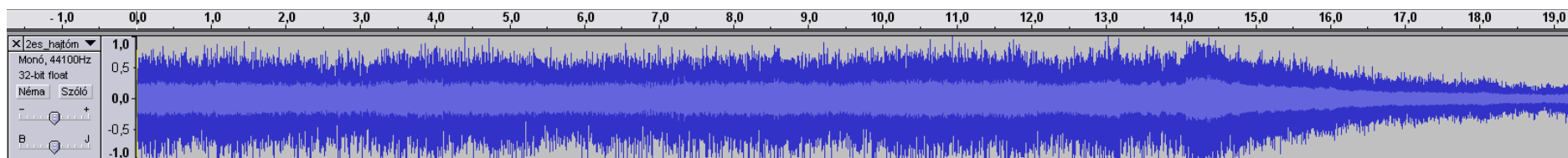
17. ábra: Boeing 737-300 típusú repülőgép 2-es hajtóműve felszálló üzemmódon - jobb-előlről felvéve - 1. mérés



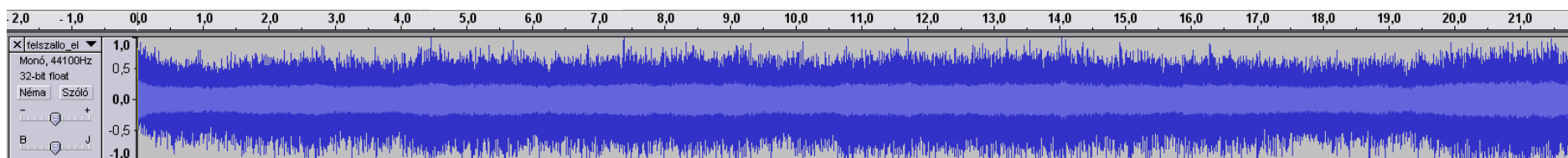
18. ábra: Boeing 737-300 típusú repülőgép 2-es hajtóműve felszálló üzemmódon - jobb-előlről felvéve - 2. mérés



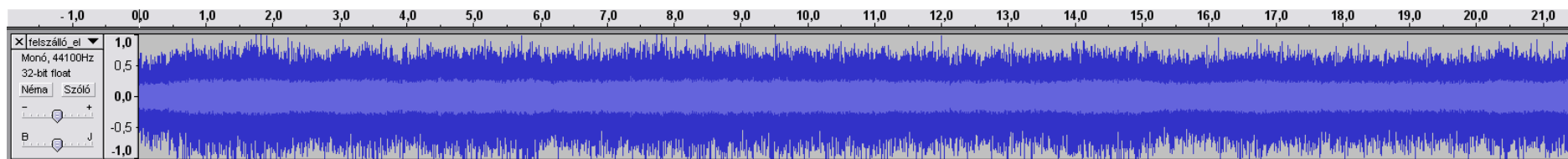
19. ábra: Boeing 737-300 típusú repülőgép 2-es hajtóműve felszálló üzemmódon - jobb-előlről felvéve - 3. mérés



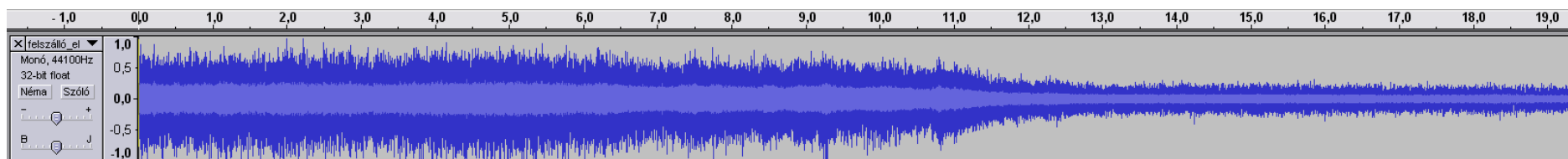
20. ábra: Boeing 737-300 típusú repülőgép 2-es hajtóműve felszálló üzemmódról alapjáratra történő lefutása - jobb-előlről felvéve



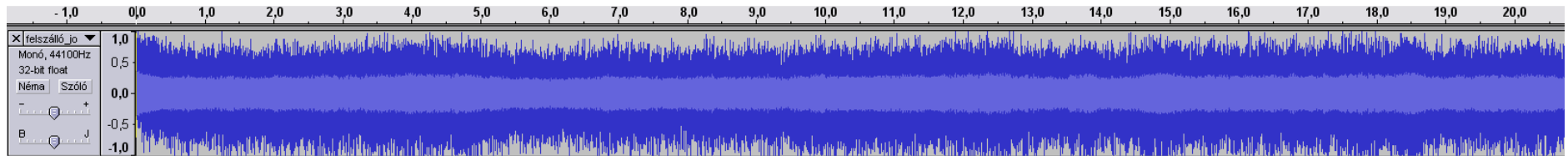
21. ábra: Boeing 737-300 típusú repülőgép hajtóművei felszálló üzemmódon - előlről felvéve - 1. mérés



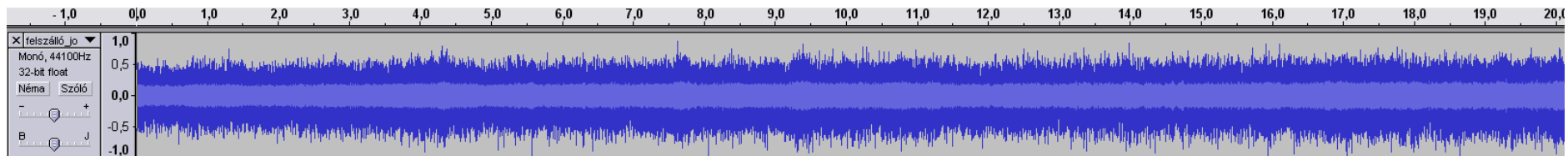
22. ábra: Boeing 737-300 típusú repülőgép hajtóművei felszálló üzemmódon - előlről felvéve - 2. mérés



23. ábra: Boeing 737-300 típusú repülőgép hajtóművei felszálló üzemmódról alapjáratra történő lefutása - előlről felvéve

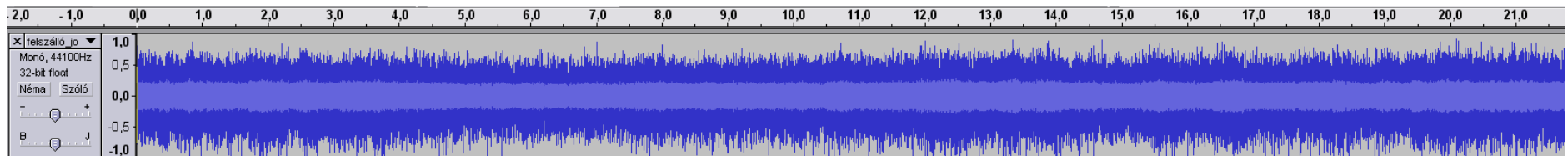


24. ábra: Boeing 737-300 típusú repülőgép hajtóművei felszálló üzemmódon - jobb-előlről felvéve - 1. mérés

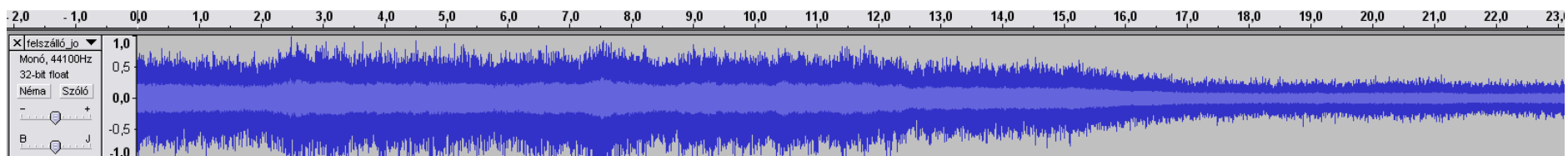


25. ábra: Boeing 737-300 típusú repülőgép hajtóművei felszálló üzemmódon - jobb-előlről felvéve - 2. mérés

69



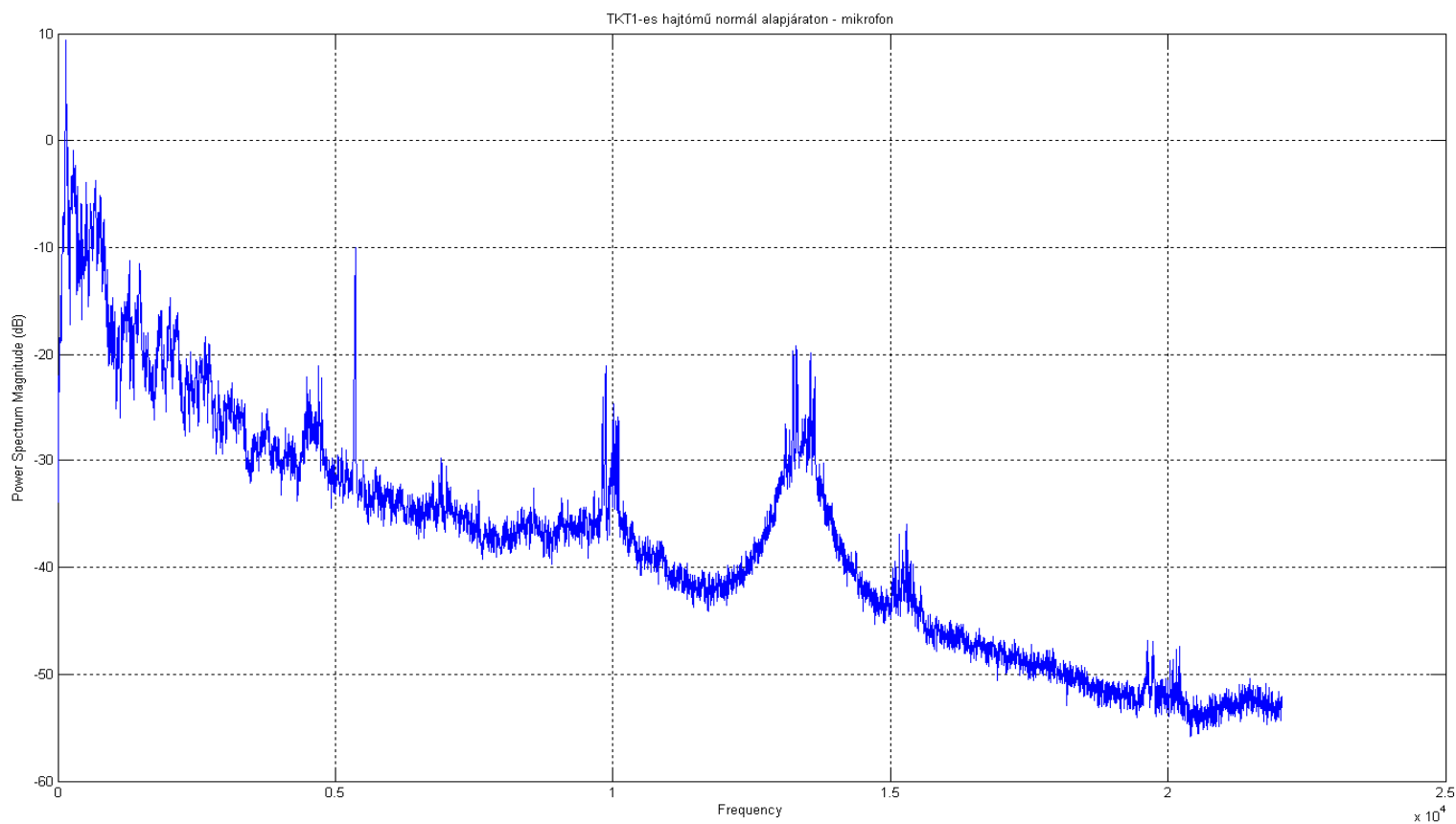
26. ábra: Boeing 737-300 típusú repülőgép hajtóművei felszálló üzemmódon - jobb-előlről felvéve - 3. mérés



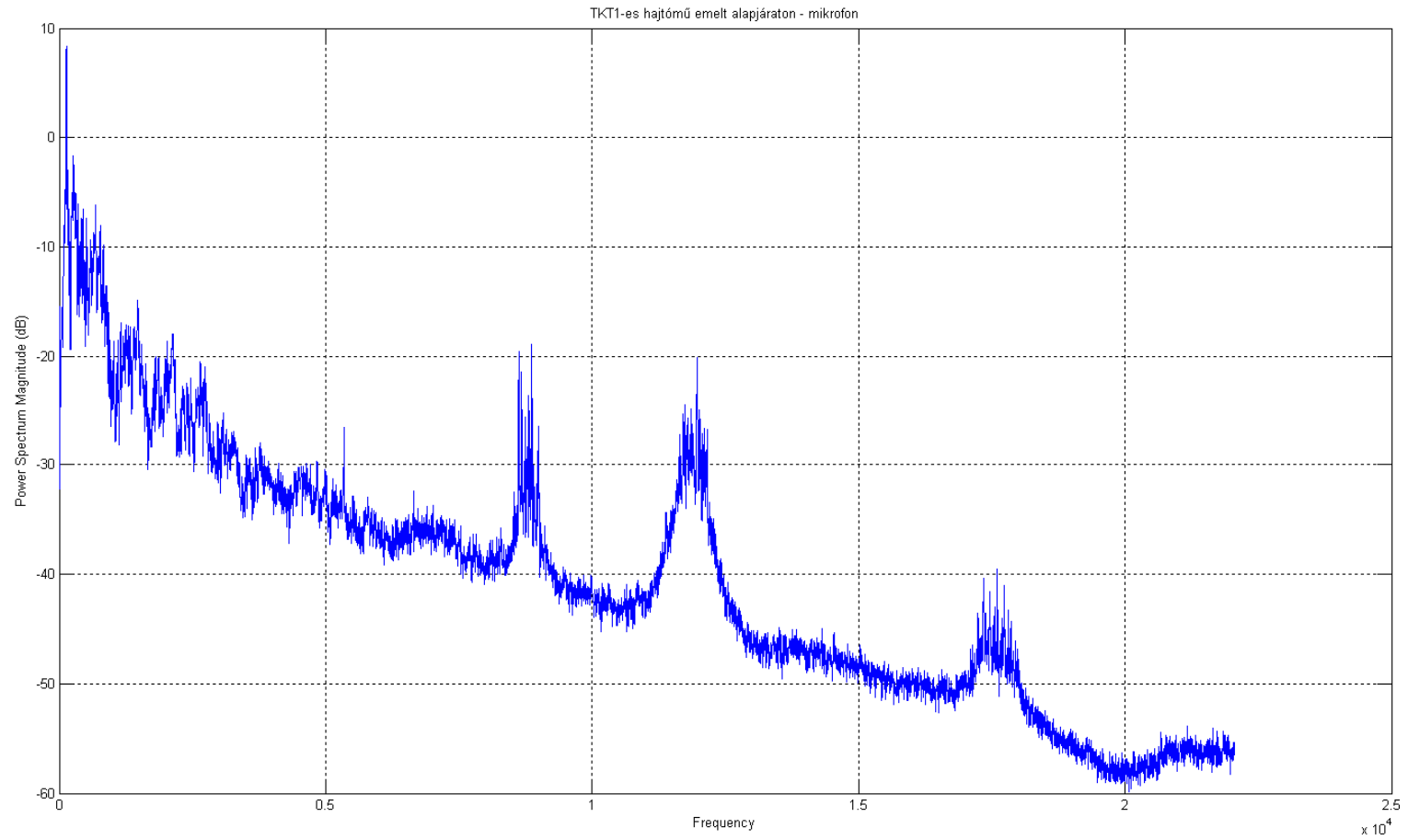
27. ábra: Boeing 737-300 típusú repülőgép hajtóművei felszálló üzemmódról alapjáratra történő lefutása - jobb-előlről felvéve

3. számú melléklet: TKT-1-es gázturbinás sugárhajtómű zajkibocsátásának zajspektrumai

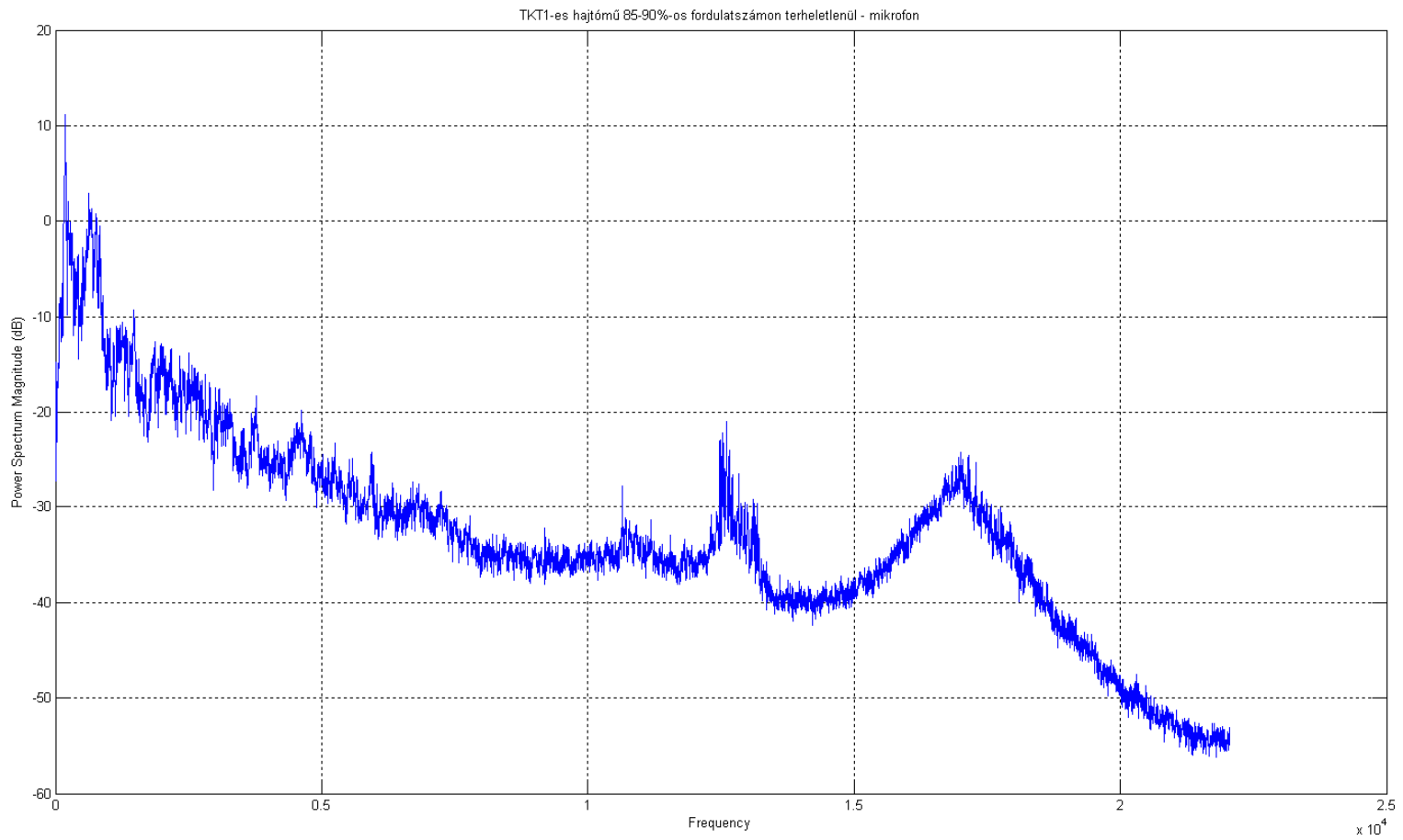
70



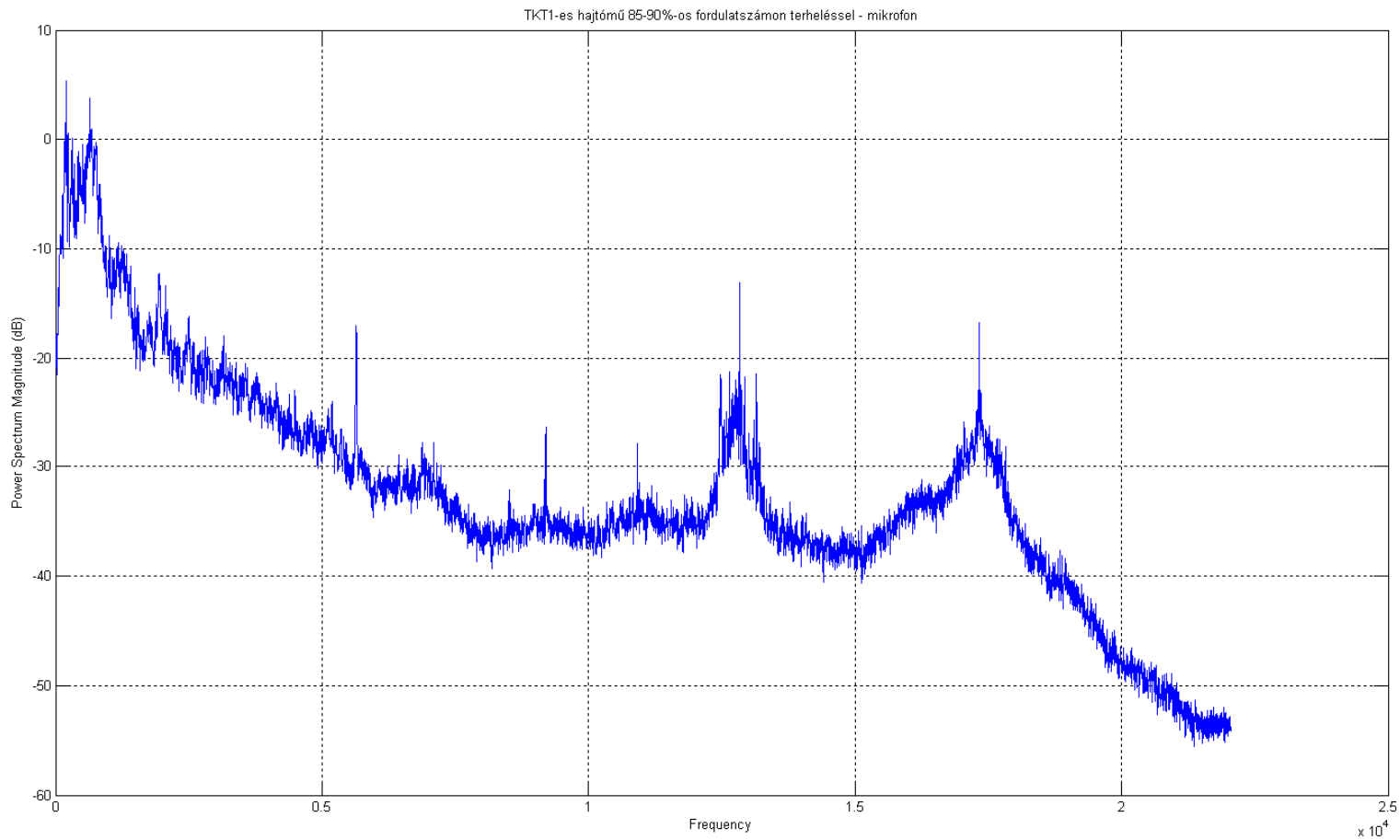
1. ábra: TKT-1-es gázturbinás sugárhajtómű normál alapjáraton üzemeltetése, mikrofonnal rögzítve



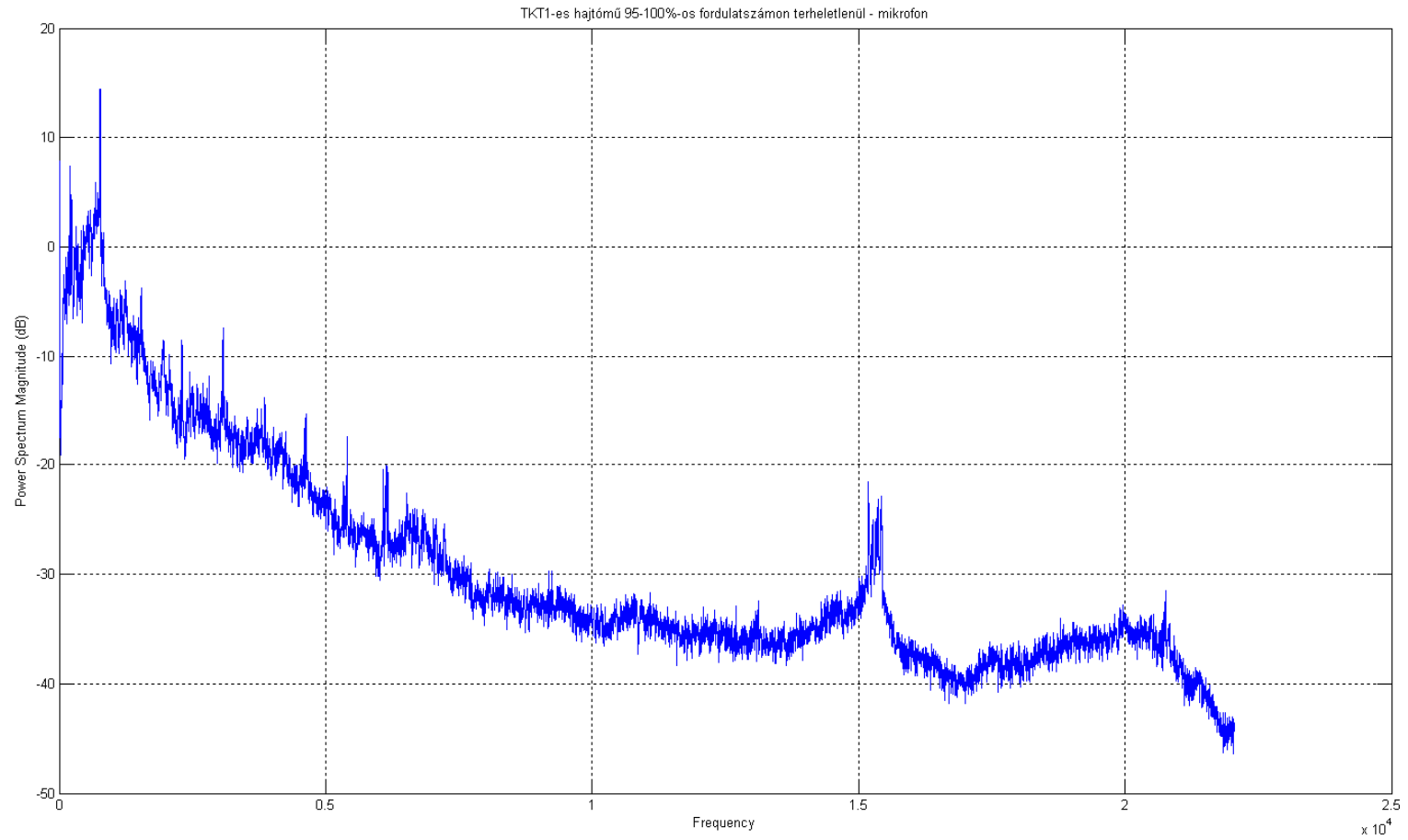
2. ábra: TKT-1-es gázturbinás sugárhajtómű normál alapjárati üzeme, zajszintmérővel rögzítve



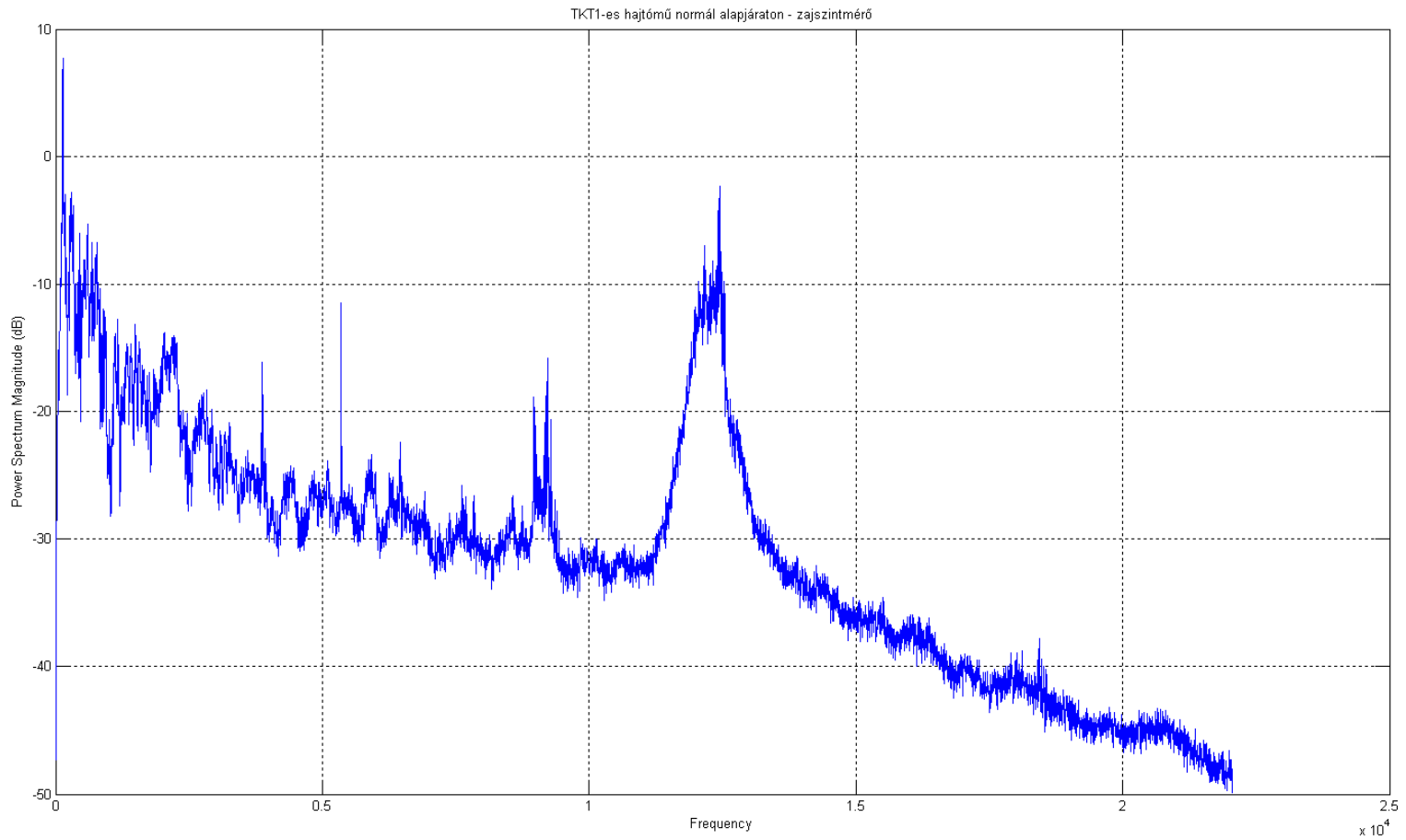
3. ábra: TKT-1-es gázturbinás sugárhajtómű emelt alpjárati üzeme, mikrofonnal rögzítve



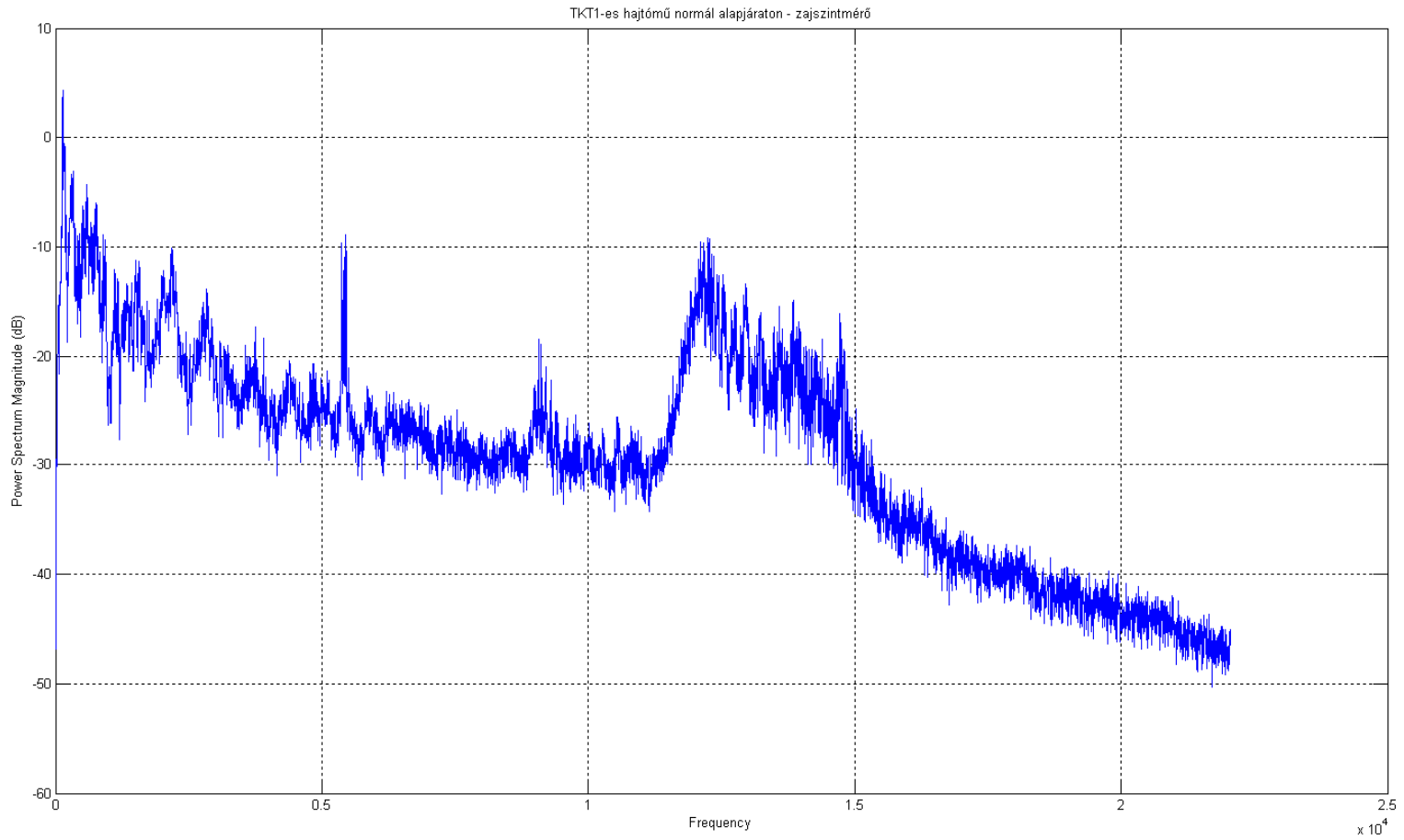
4. ábra: TKT-1-es gázturbinás sugárhajtómű emelt alapjáratú üzeme, zajszintmérővel rögzítve



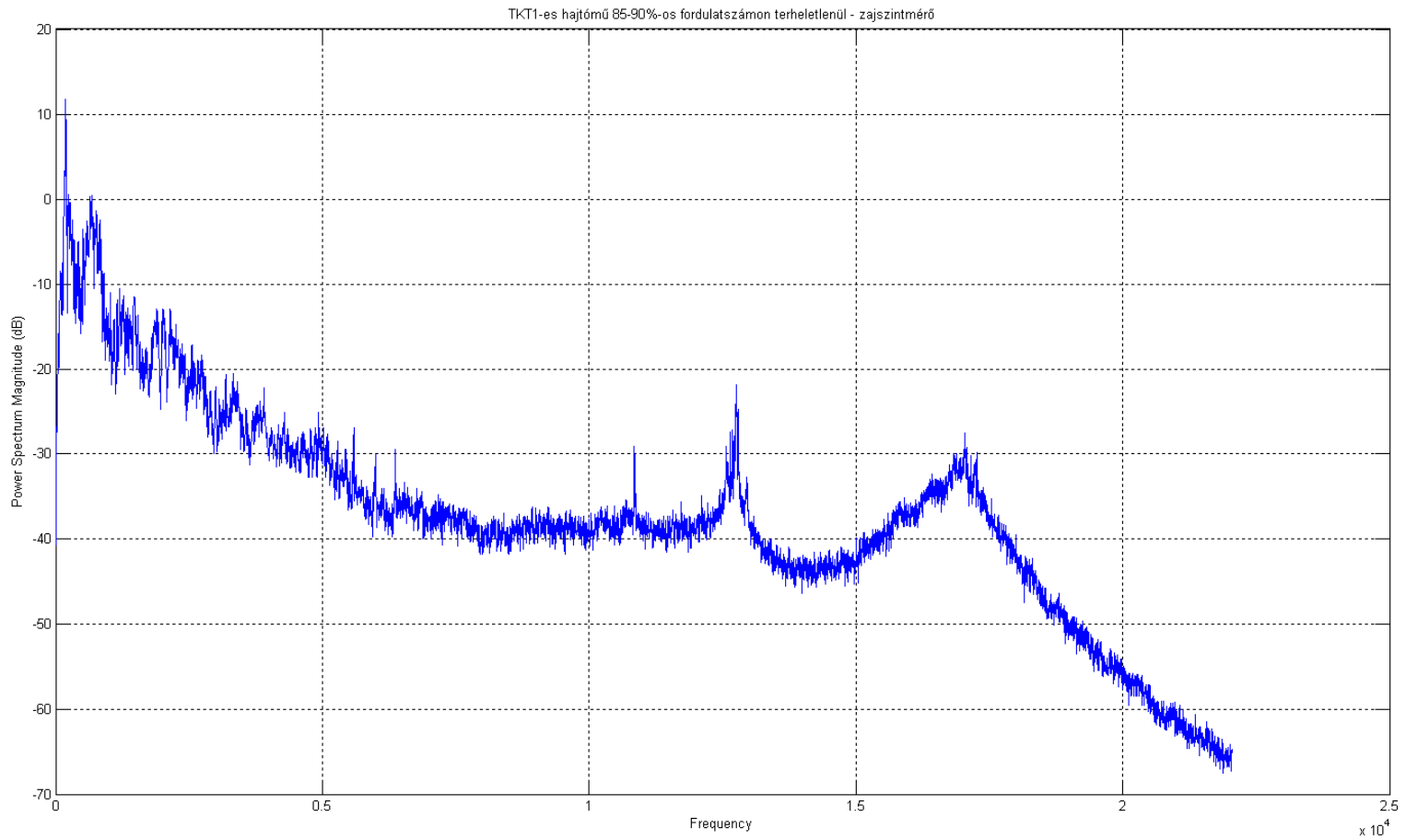
5. ábra: TKT-1-es gázturbinás sugárhajtómű maximális fordulatszámhoz képest 85-90%-os fordulaton, terhelés nélkül üzemeltetve, mikrofonnal rögzítve



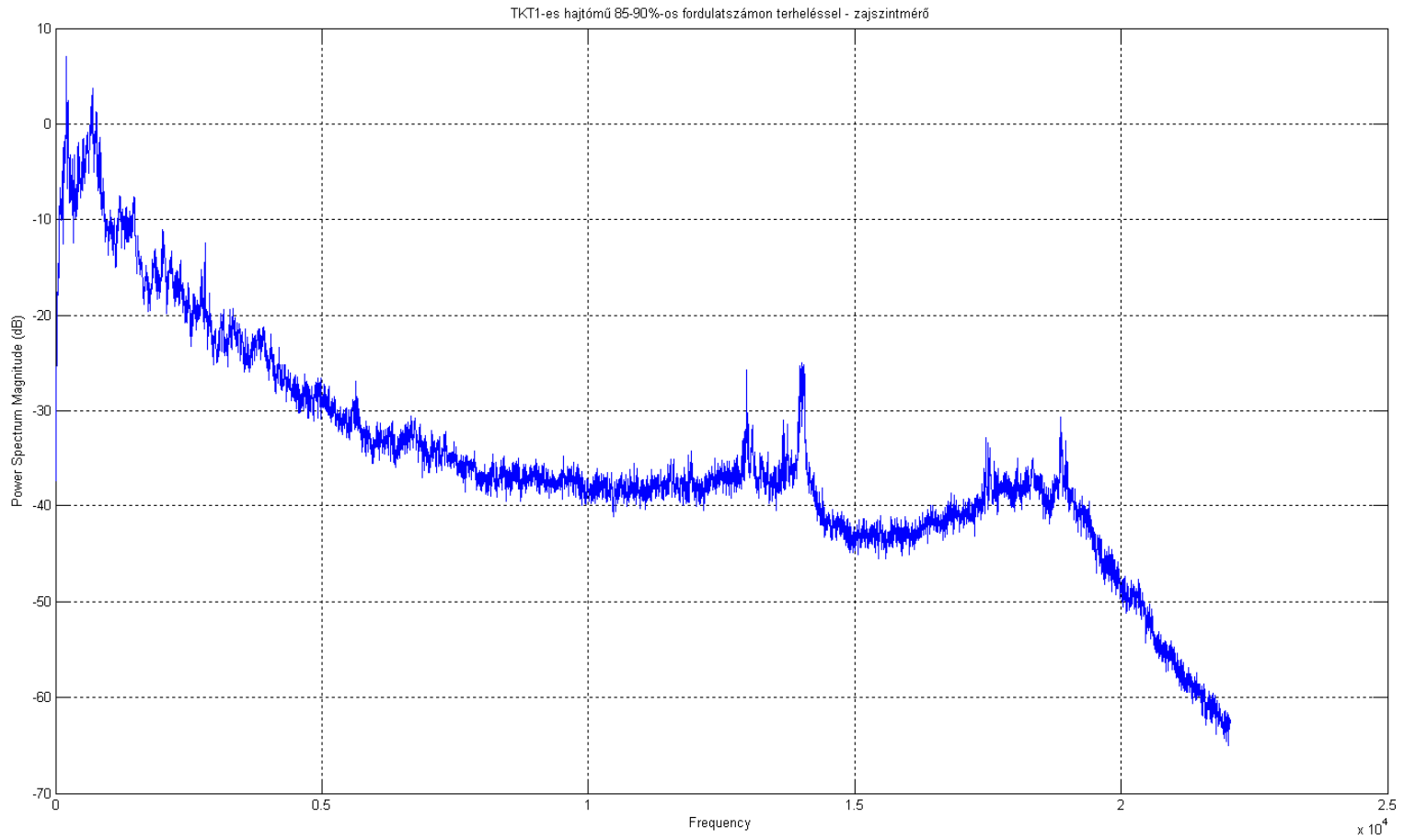
6. ábra: TKT-1-es gázturbinás sugárhajtómű maximális fordulatszámhoz képest 85-90%-os fordulaton, terhelés nélkül üzemeltetve, zajszintmérővel rögzítve



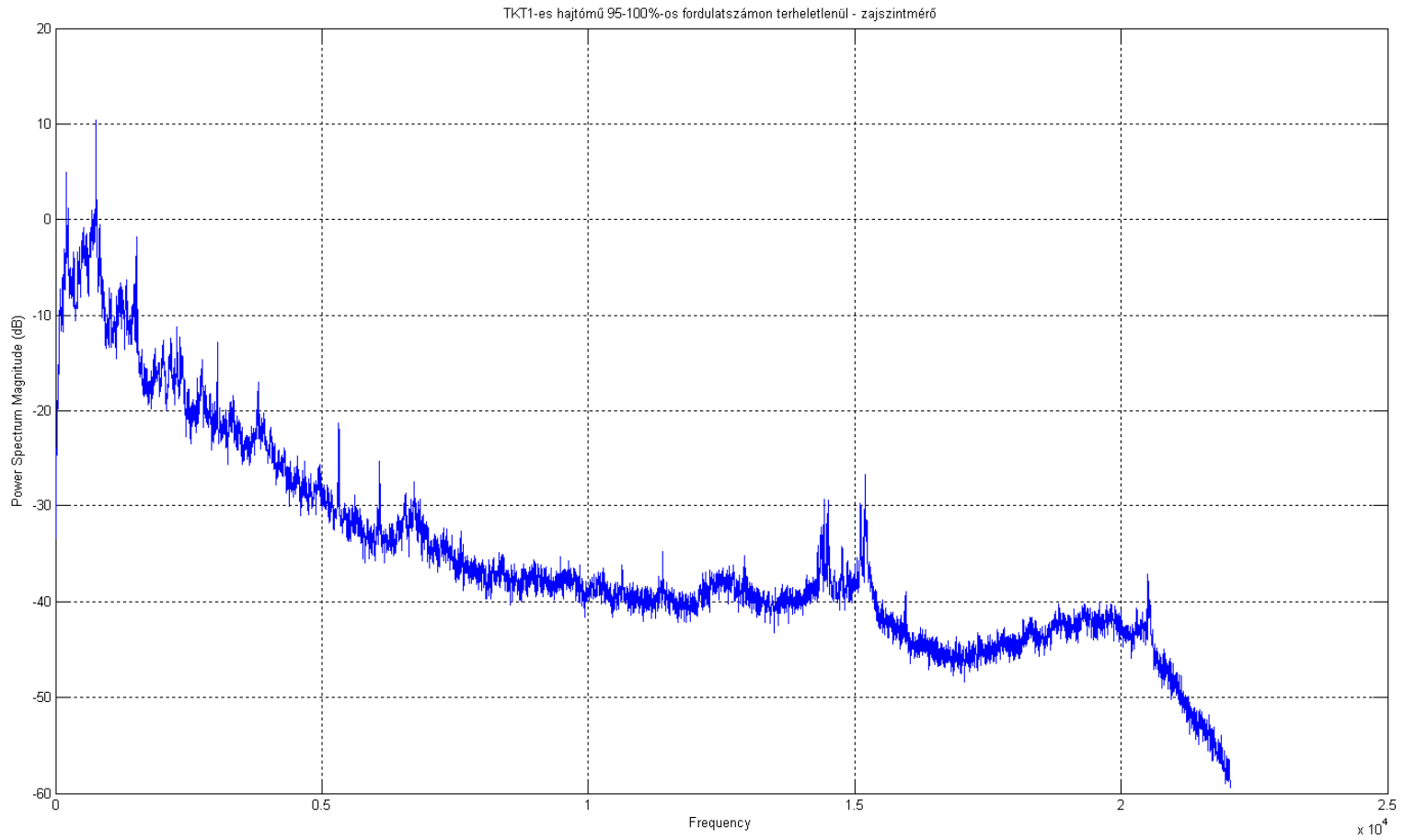
7. ábra: TKT-1-es gázturbinás sugárhajtómű maximális fordulatszámhoz képest 85-90%-os fordulaton, terheléssel üzemeltetve, mikrofonnal rögzítve



8. ábra: TKT-1-es gázturbinás sugárhajtómű maximális fordulatszámhoz képest 85-90%-os fordulaton, terheléssel üzemeltetve, zajszintmérővel rögzítve



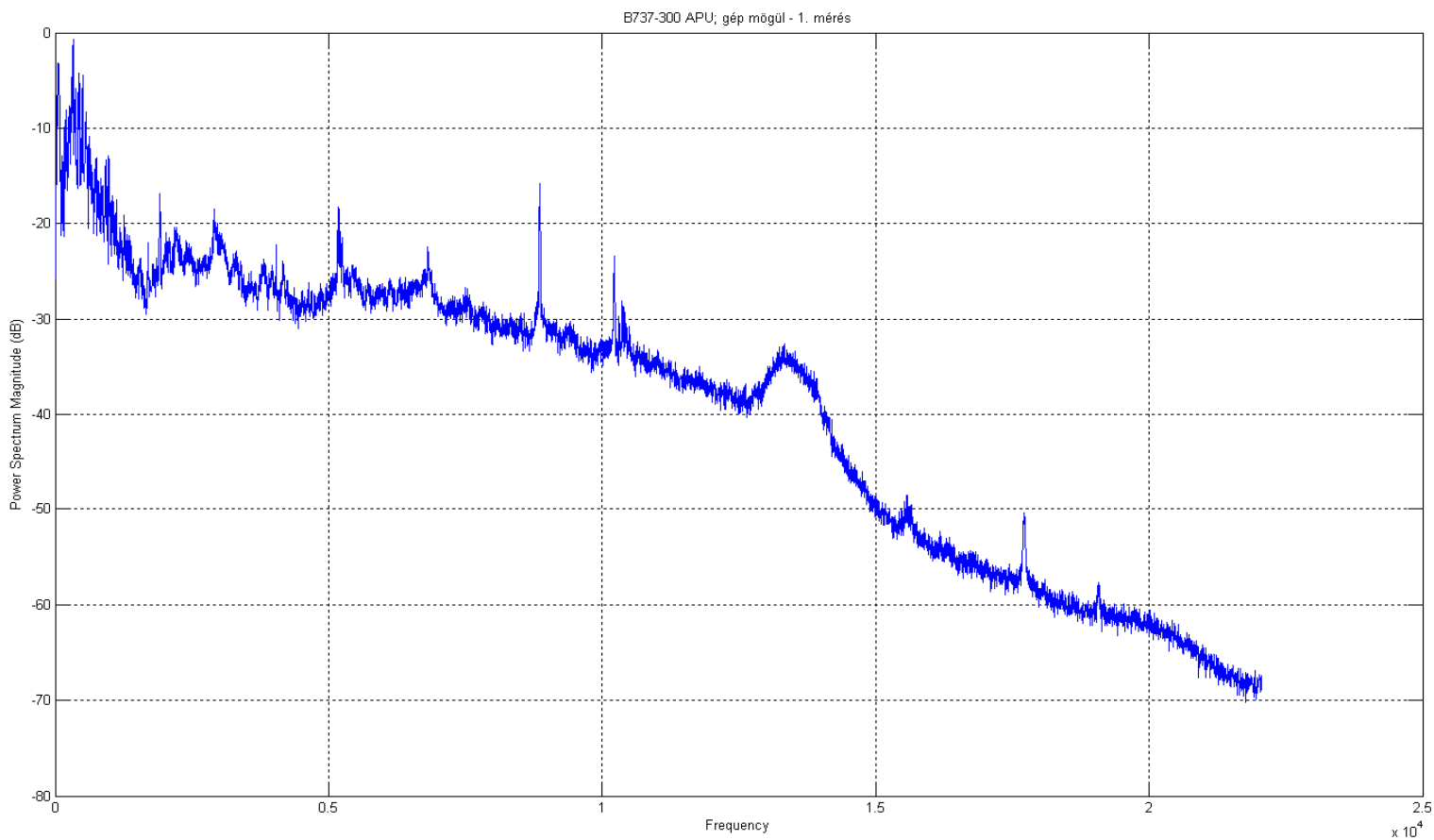
9. ábra: TKT-1-es gázturbinás sugárhajtómű maximális fordulatszámhoz képest 95-100%-os fordulaton, terhelés nélkül üzemeltetve, mikrofonnal rögzítve



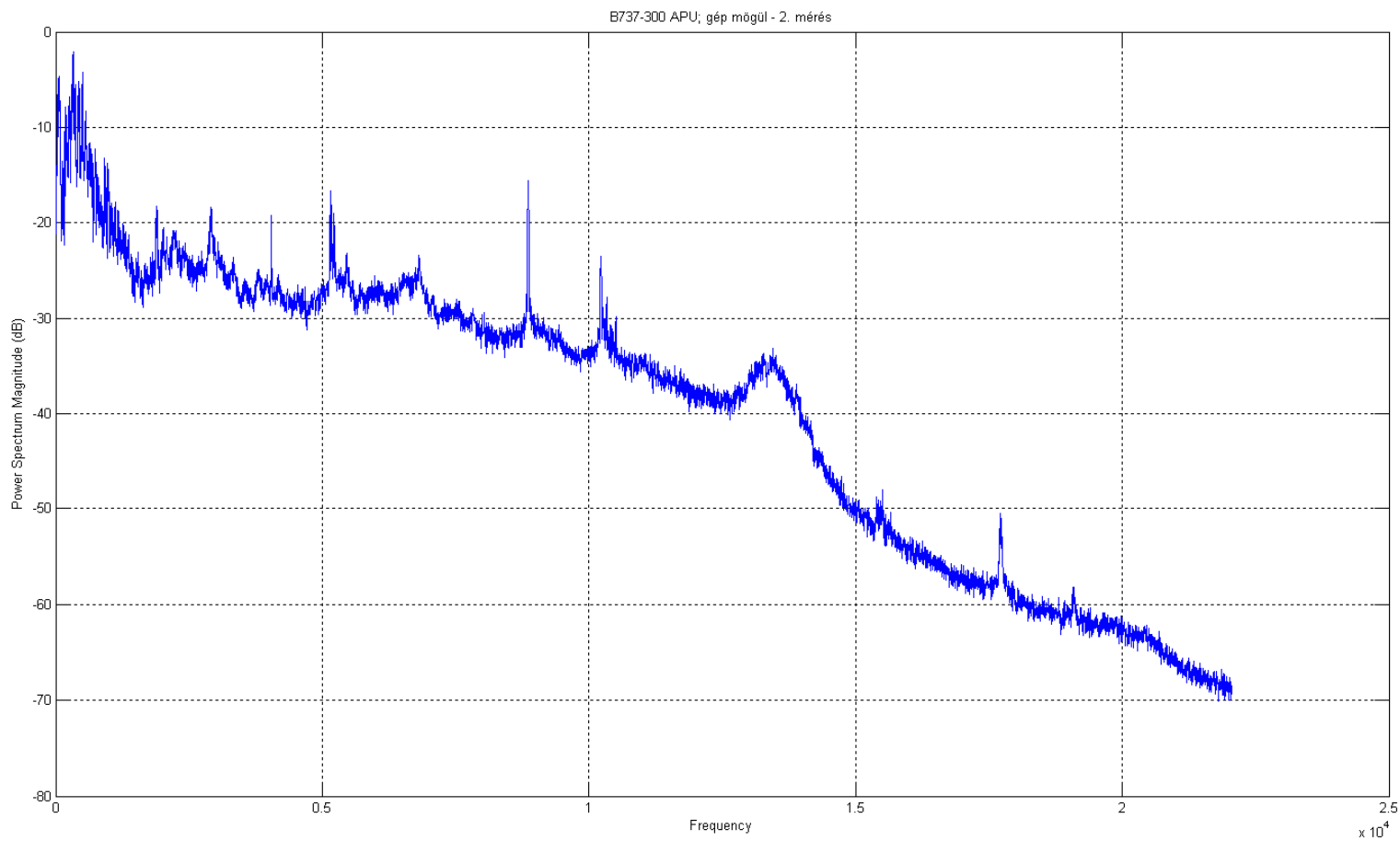
10. ábra: TKT-1-es gázturbinás sugárhajtómű maximális fordulatszámhoz képest 95-100%-os fordulaton, terhelés nélkül üzemeltetve, zajszintmérővel rögzítve

4. számú melléklet: A Boeing 737-300 típusú utasszállító repülőgép zajkibocsátásának zajspektrumai

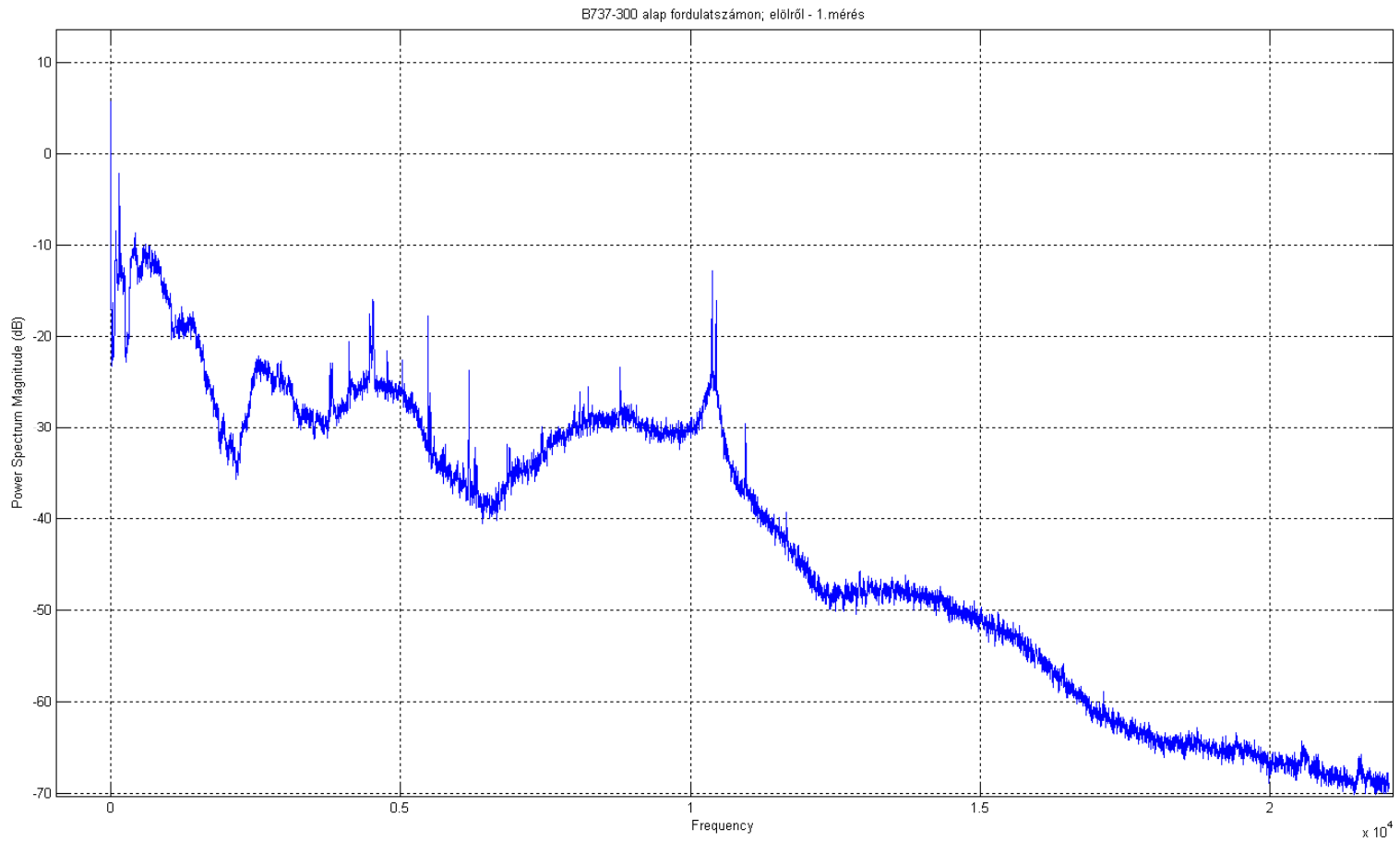
08



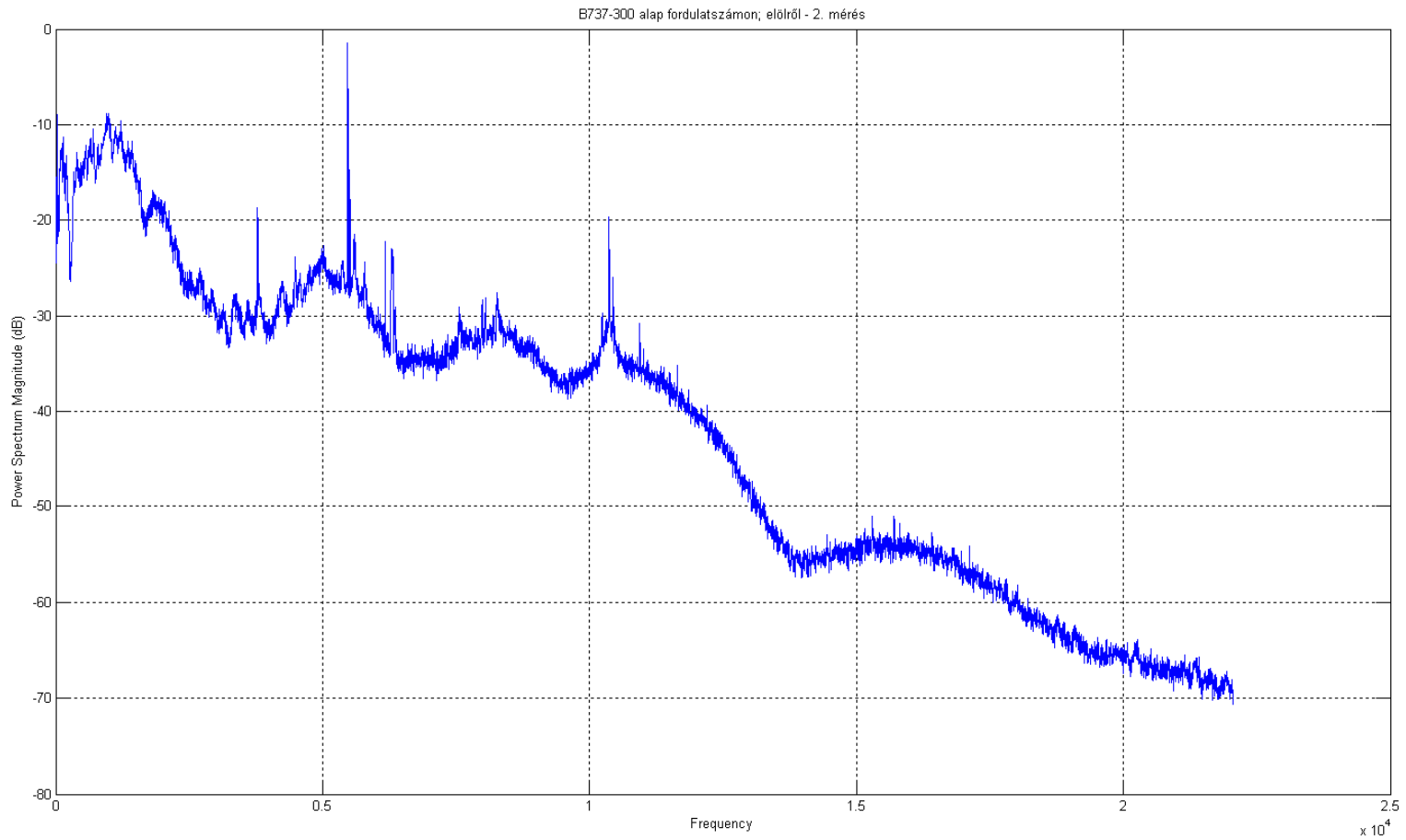
1. ábra: Boeing 737-300 típusú repülőgép segédhajtóműve földi-üzemi fordulatszámon - 1. mérés



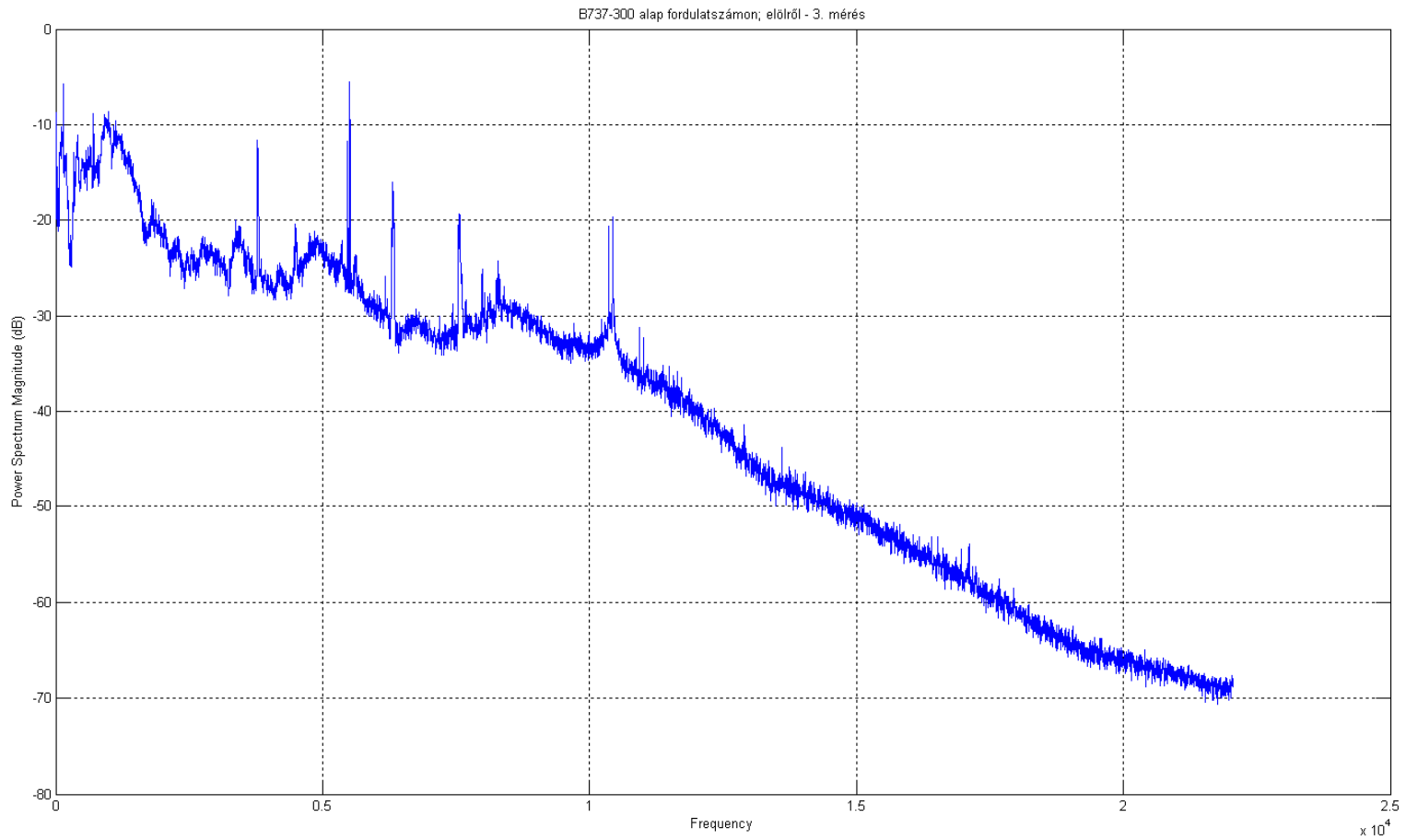
2. ábra: Boeing 737-300 típusú repülőgép segédhajtóműve földi-üzemi fordulatszámmon - 2. mérés



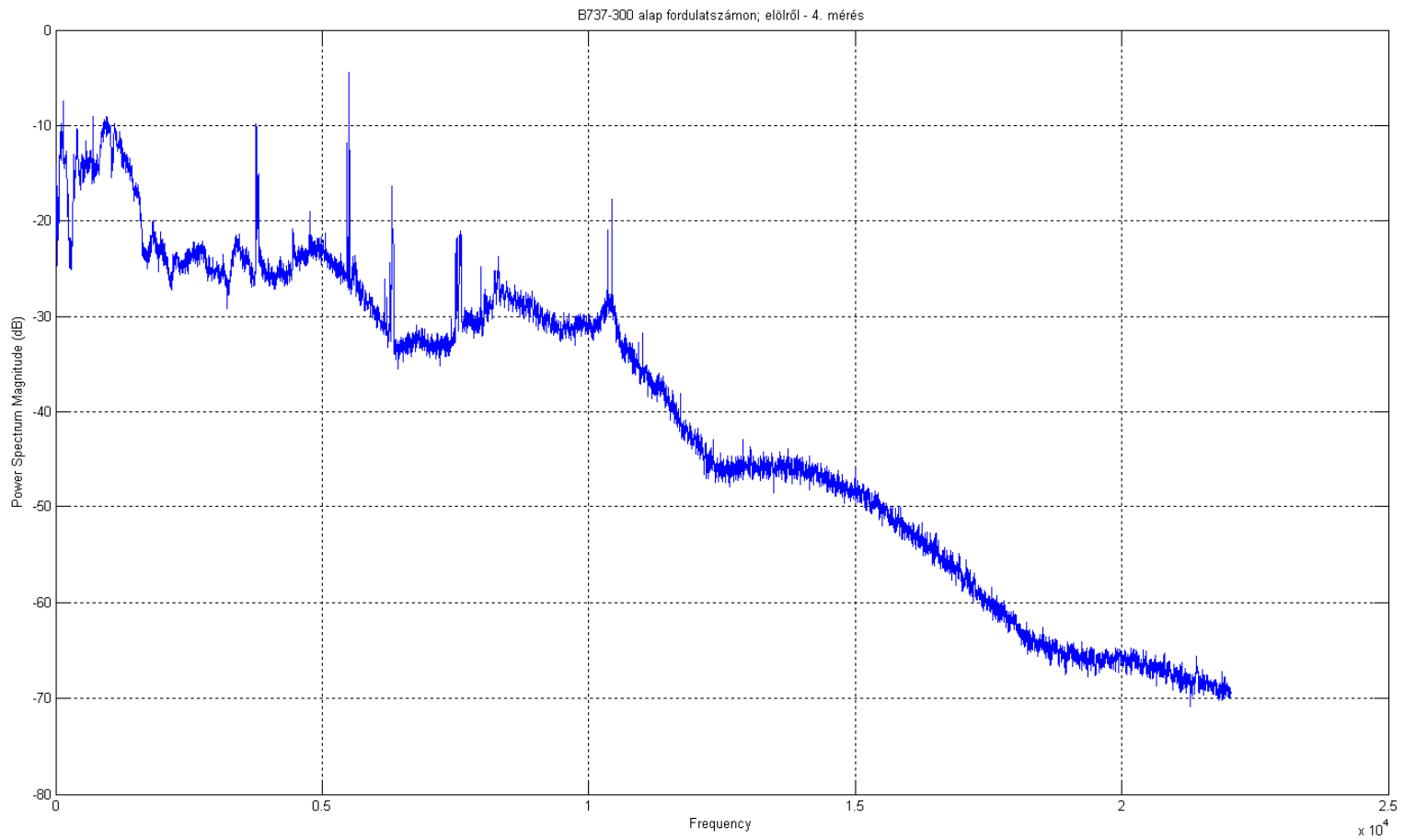
3. ábra: Boeing 737-300 típusú repülőgép hajtóművei alajáraton - szemből felvéve - 1. mérés



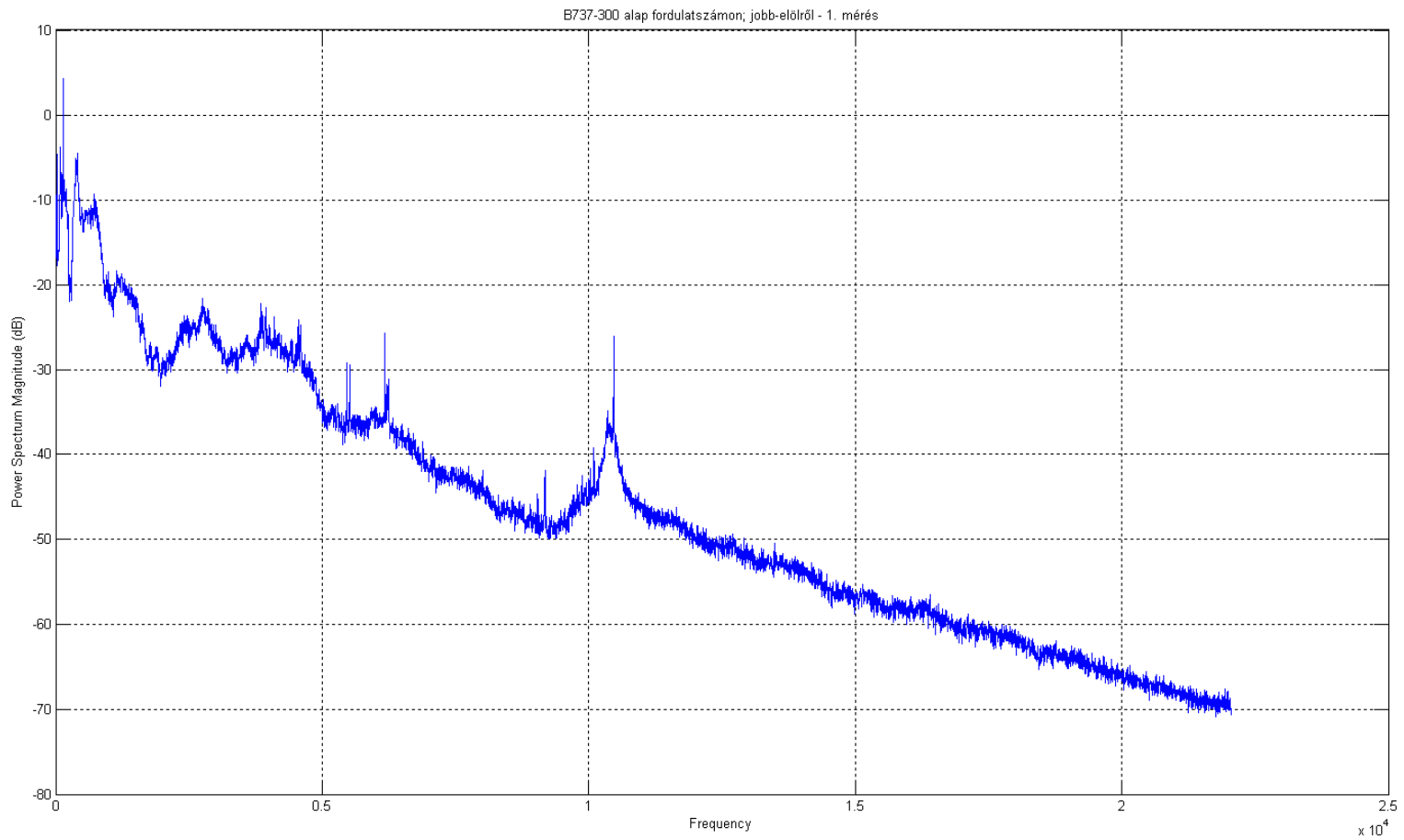
4. ábra: Boeing 737-300 típusú repülőgép hajtóművei alajáraton - szemből felvéve - 2. mérés



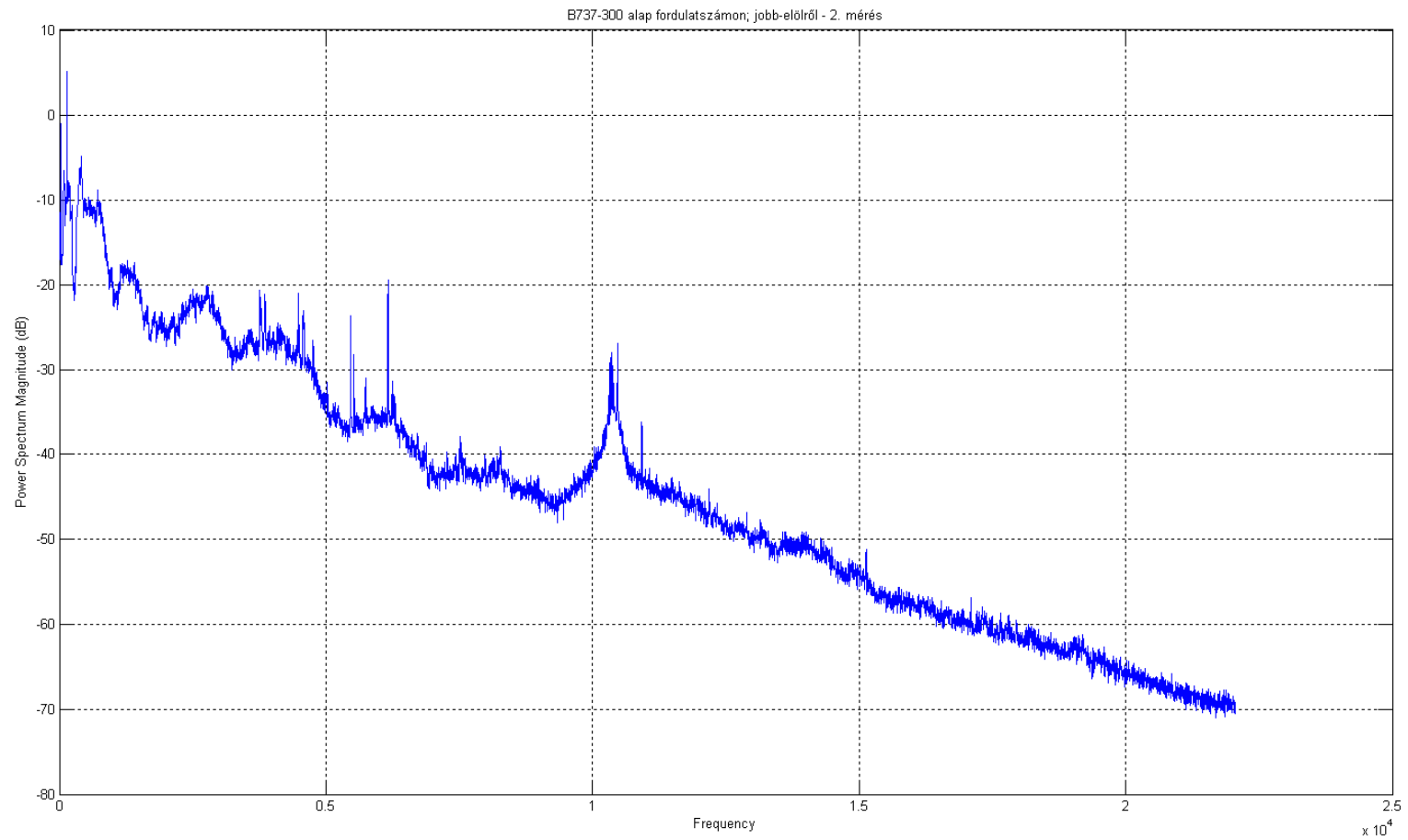
5. ábra: Boeing 737-300 típusú repülőgép hajtóművei alajáraton - szemből felvéve - 3. mérés



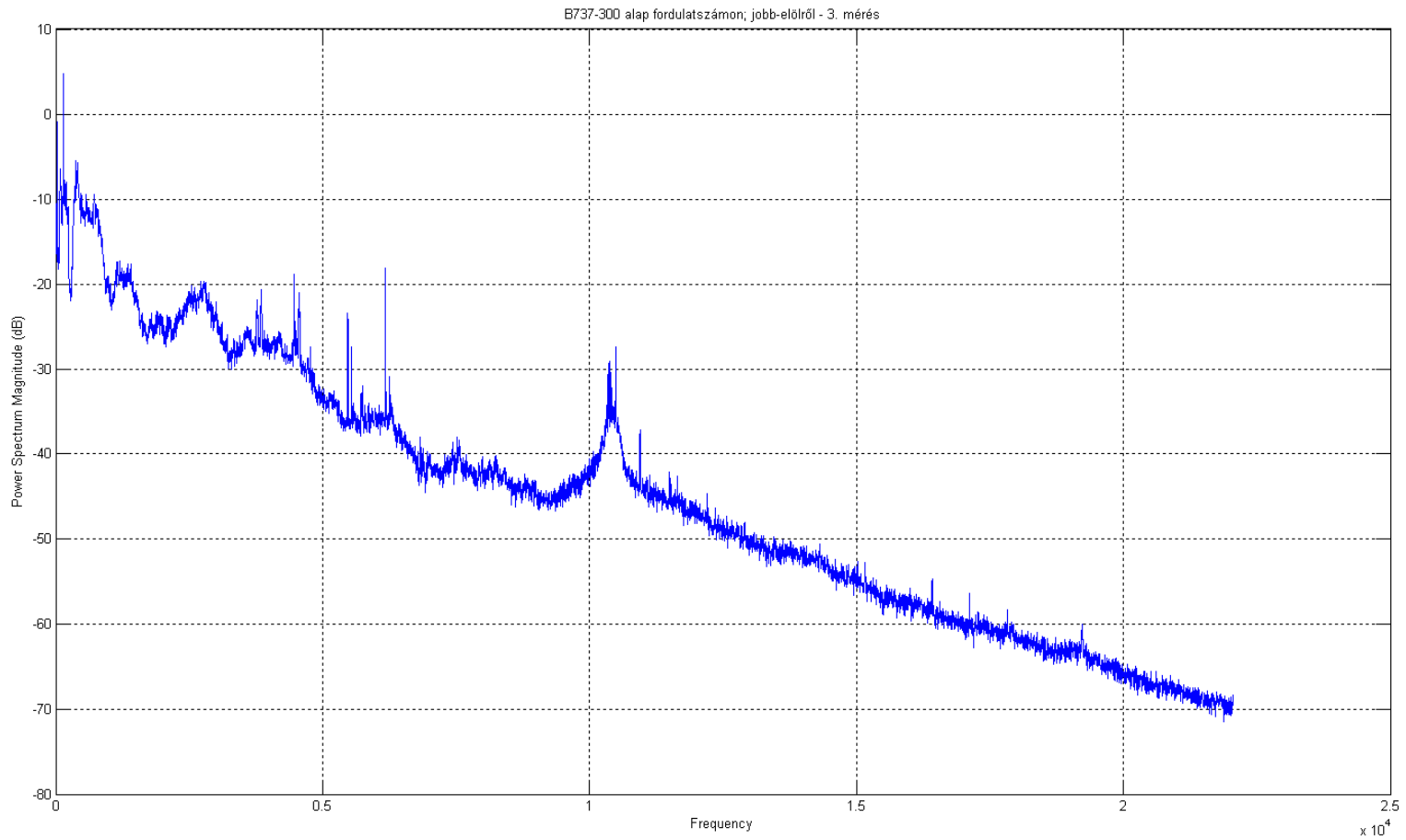
6. ábra: Boeing 737-300 típusú repülőgép hajtóművei alajáraton - szemből felvéve - 4. mérés



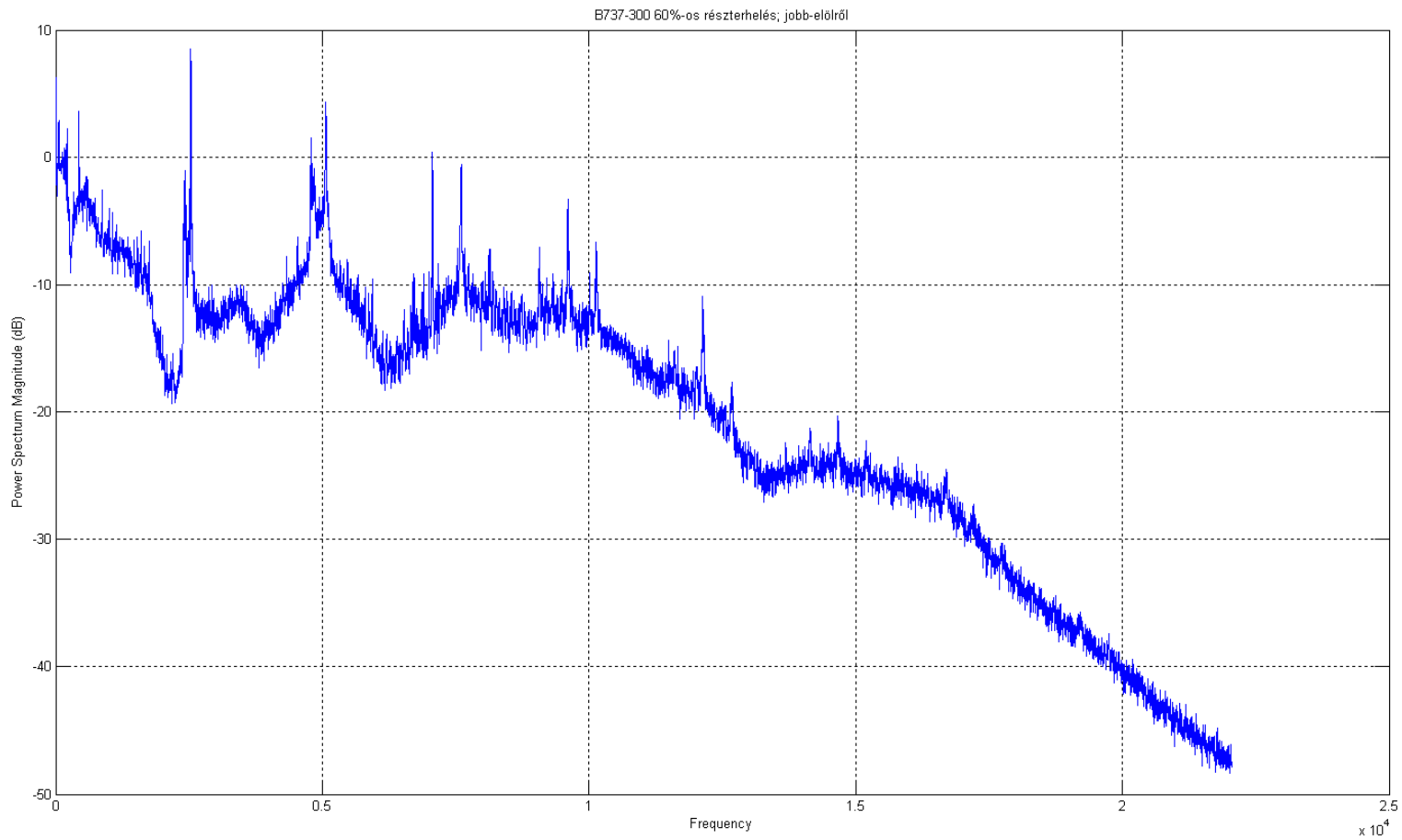
7. ábra: Boeing 737-300 típusú repülőgép hajtóművei alpjáraton - jobb-előlről felvéve - 1. mérés



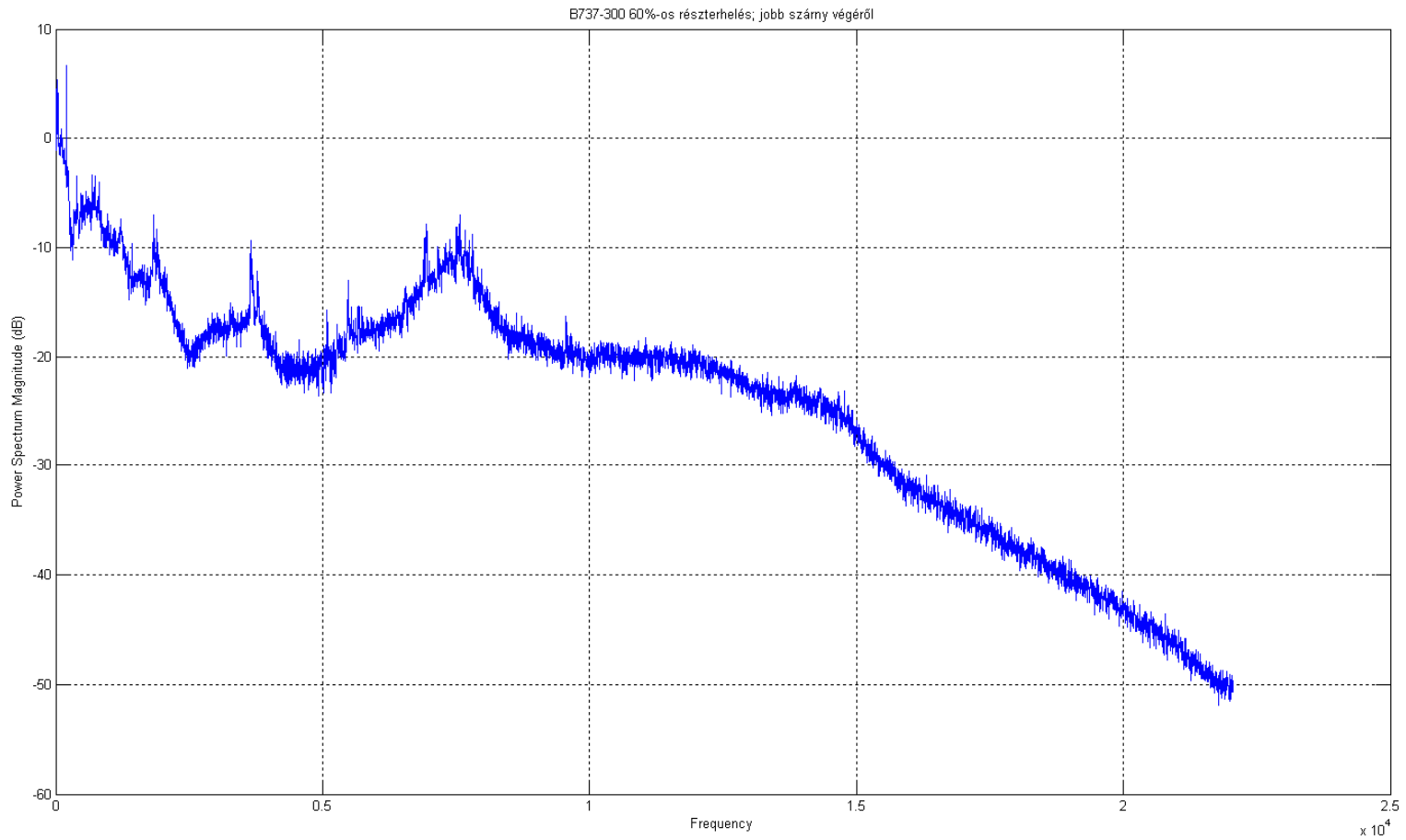
8. ábra: Boeing 737-300 típusú repülőgép hajtóművei alpjáraton - jobb-előlről felvéve - 2. mérés



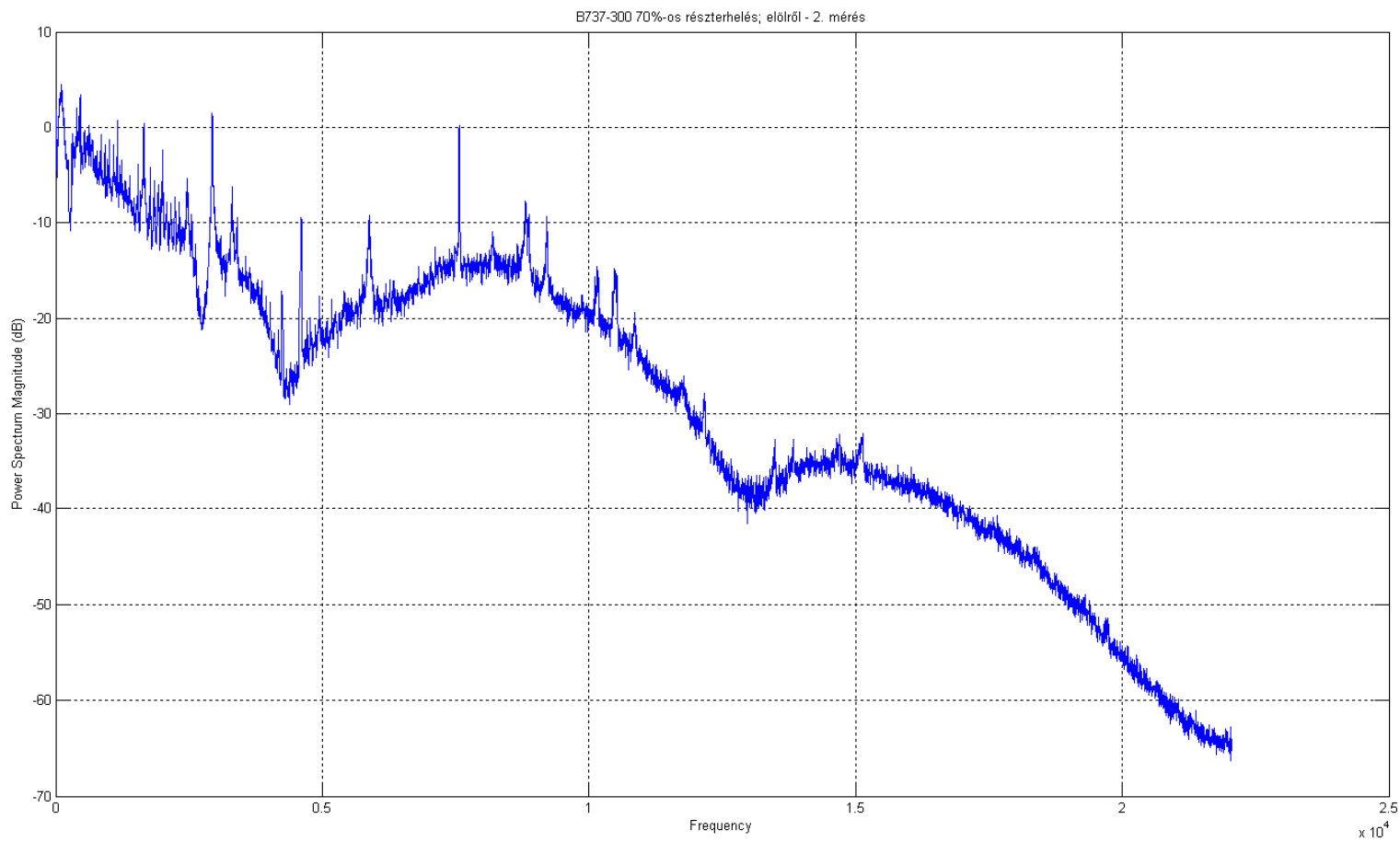
9. ábra: Boeing 737-300 típusú repülőgép hajtóművei alajáraton - jobb-előlről felvéve - 3. mérés



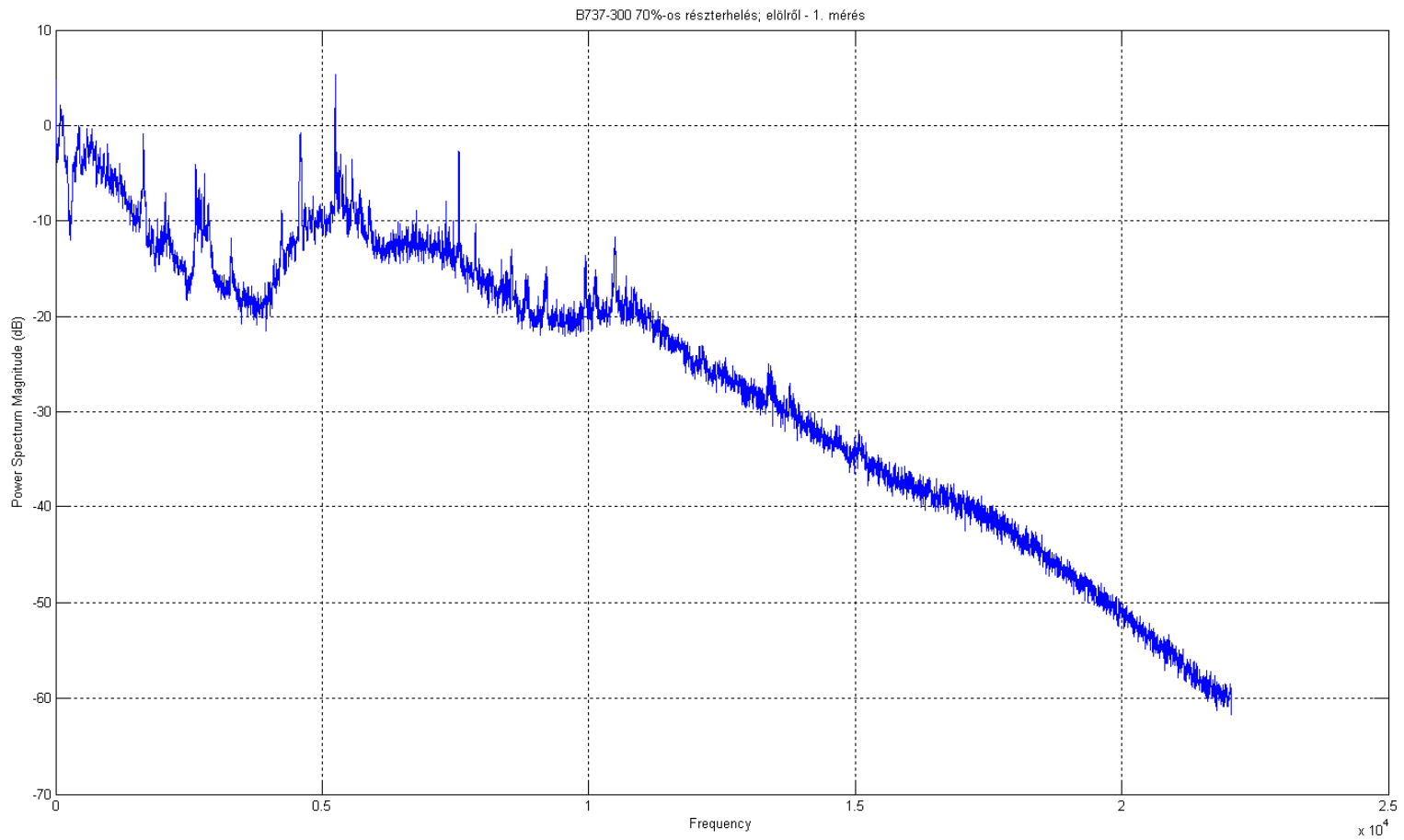
10. ábra: Boeing 737-300 típusú repülőgép hajtóművei 60%-os terhelésen - jobb-előlről felvéve



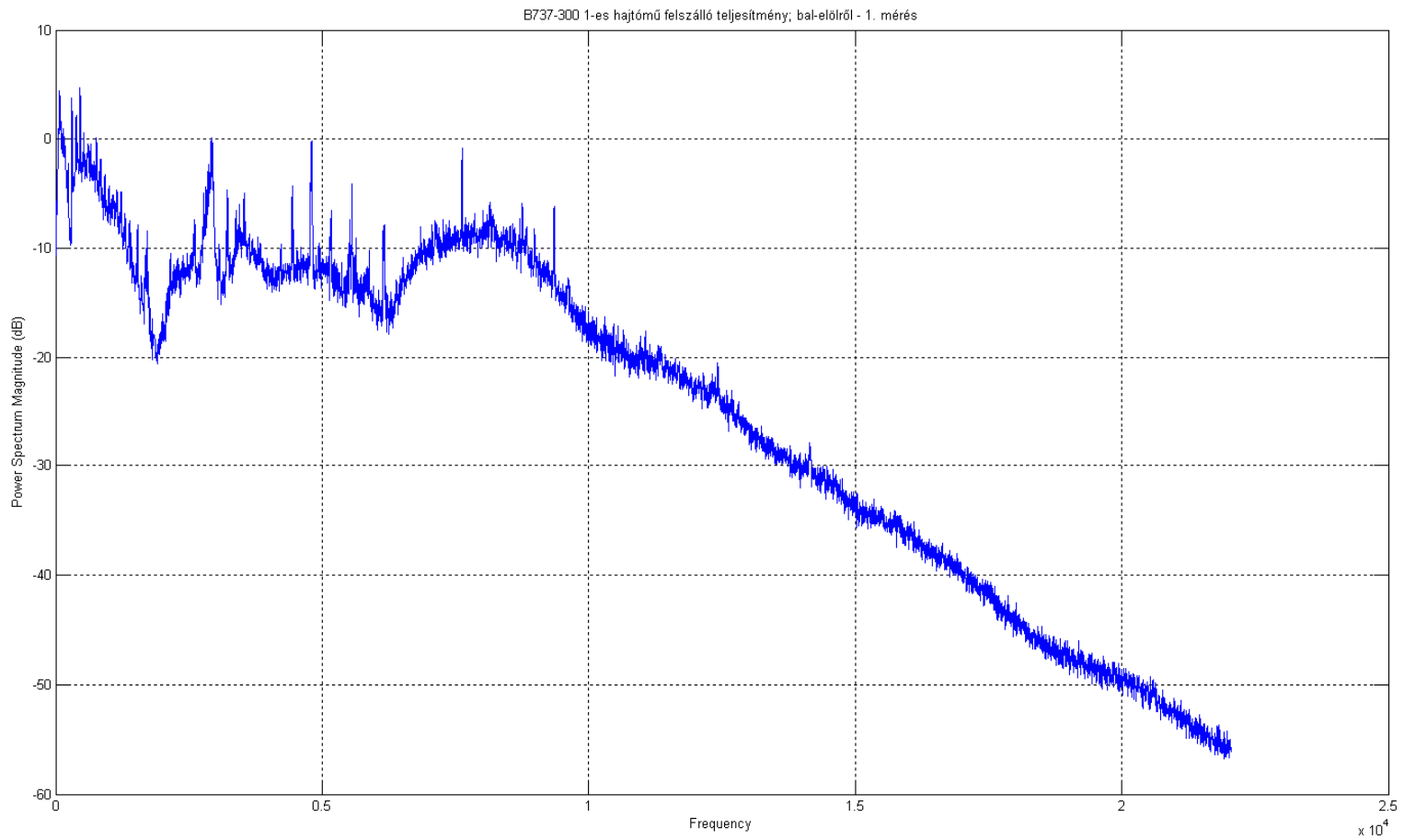
11. ábra: Boeing 737-300 típusú repülőgép hajtóművei 60%-os terhelésen - jobbszárnyvégen felvéve



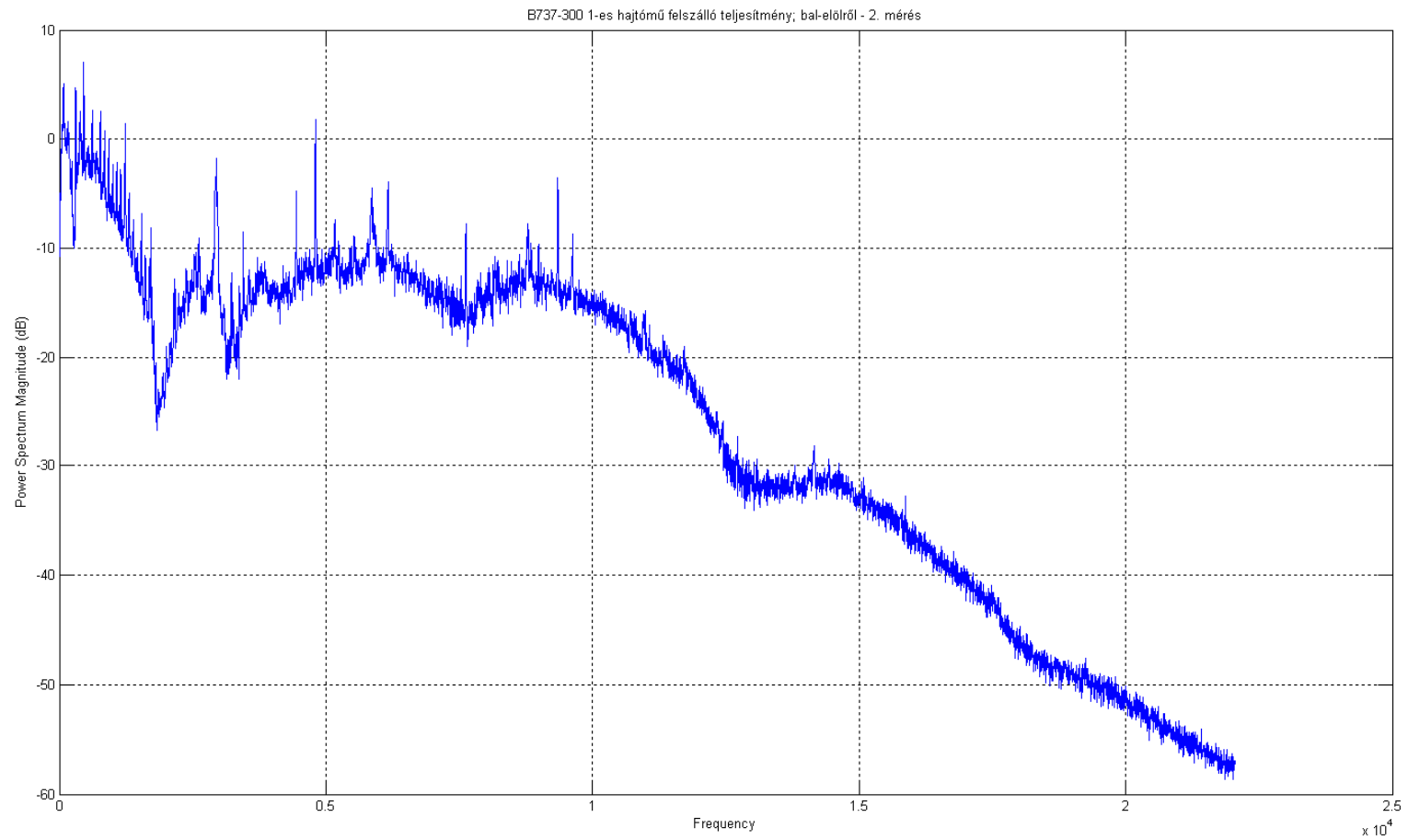
12. ábra: Boeing 737-300 típusú repülőgép hajtóművei 70%-os terhelésen - előlről felvéve - 1. mérés



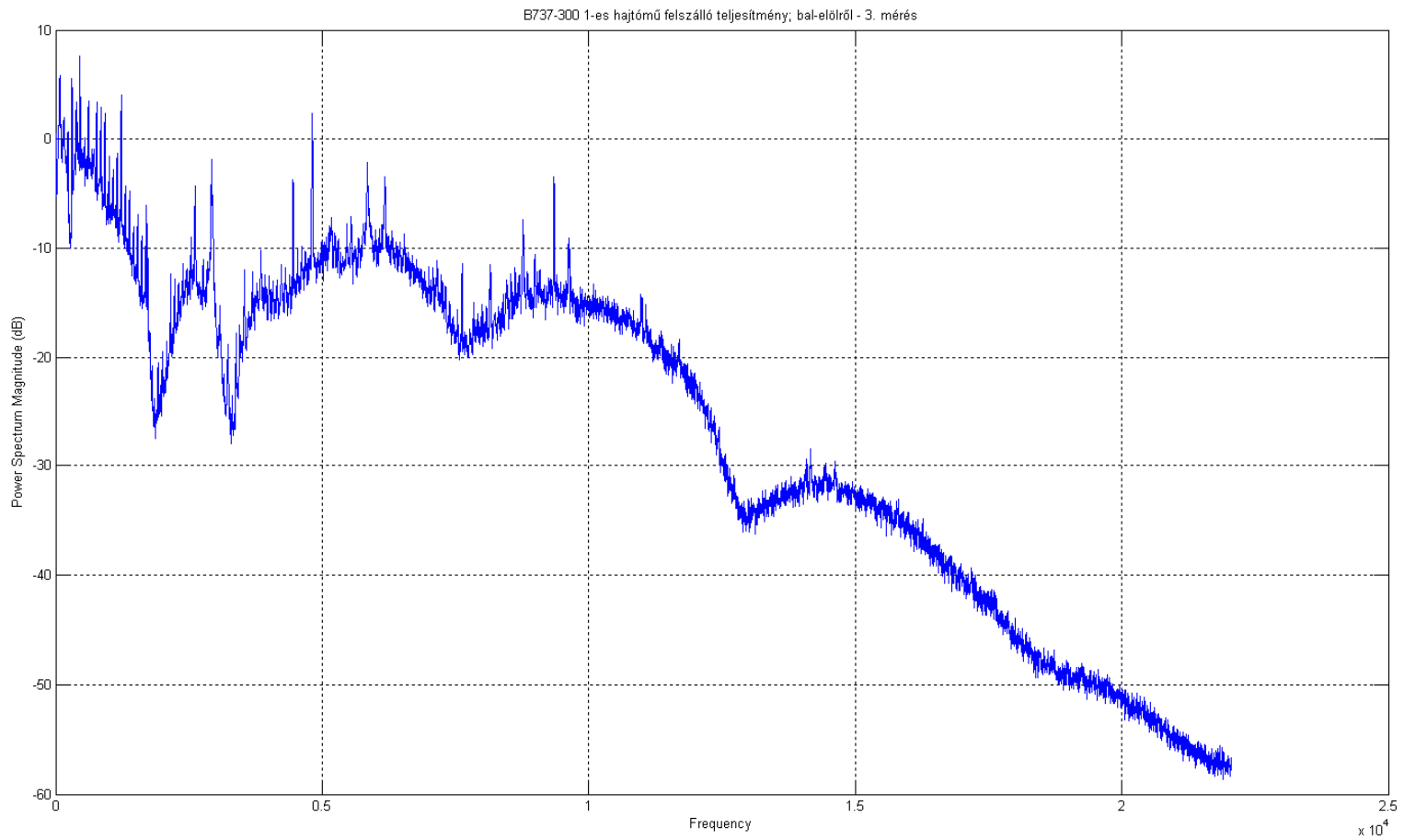
13. ábra: Boeing 737-300 típusú repülőgép hajtóművei 70%-os terhelésen - előlről felvéve - 2. mérés



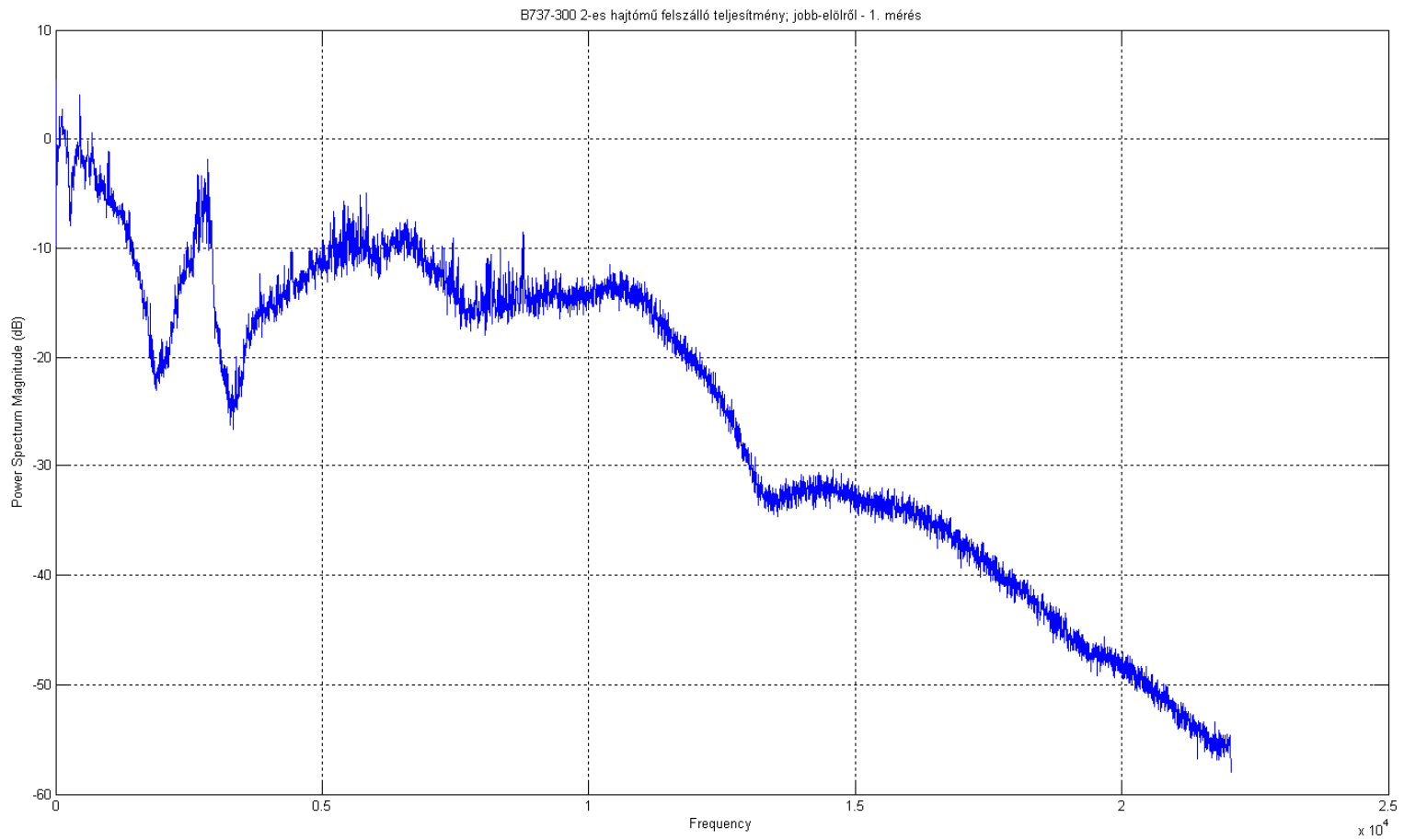
14. ábra: Boeing 737-300 típusú repülőgép 1-es hajtóműve felszálló üzemmódon - bal-előlről felvéve - 1. mérés



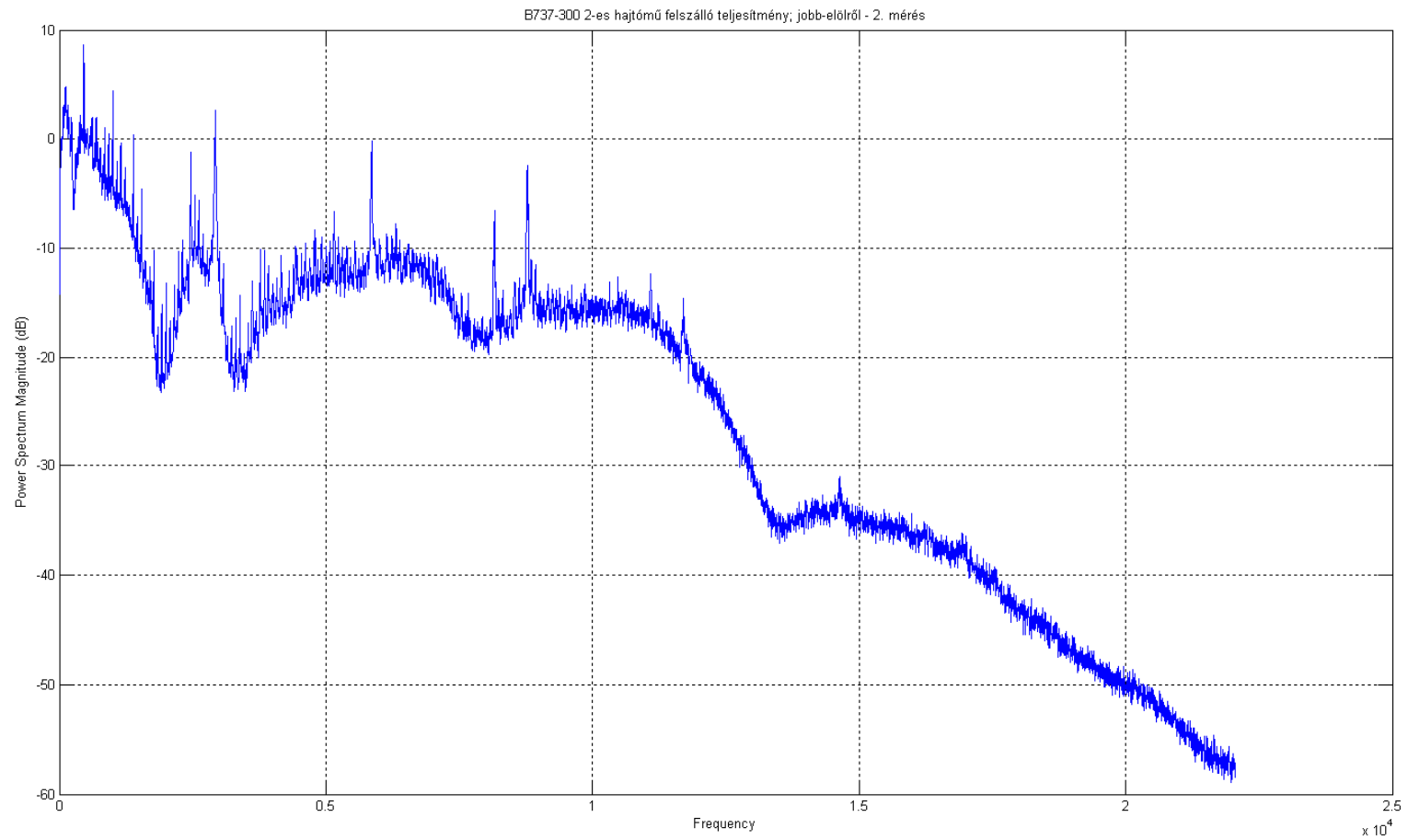
15. ábra: Boeing 737-300 típusú repülőgép 1-es hajtóműve felszálló üzemmódon - bal-előlről felvéve - 2. mérés



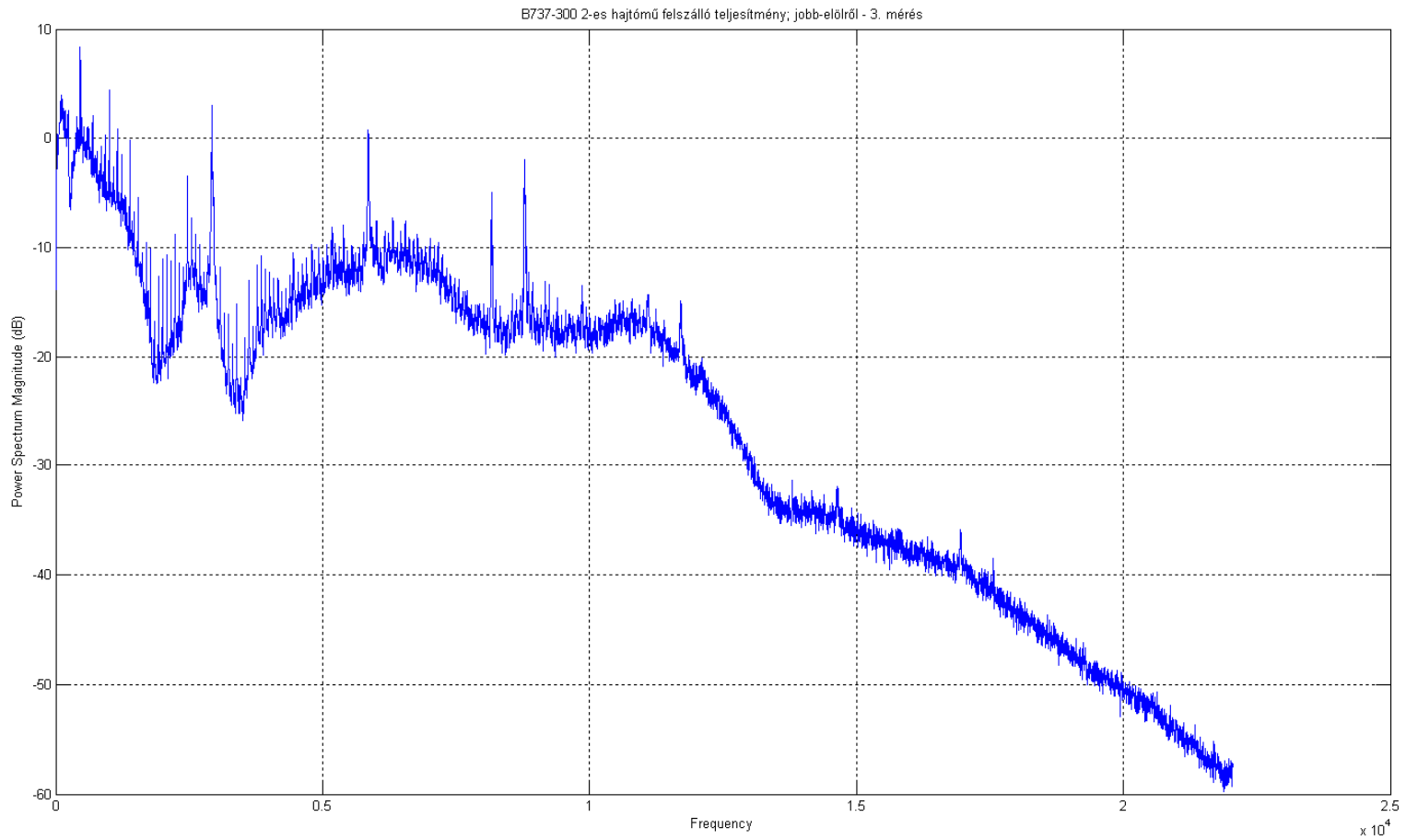
16. ábra: Boeing 737-300 típusú repülőgép 1-es hajtóműve felszálló üzemmódon - bal-előlről felvéve - 3. mérés



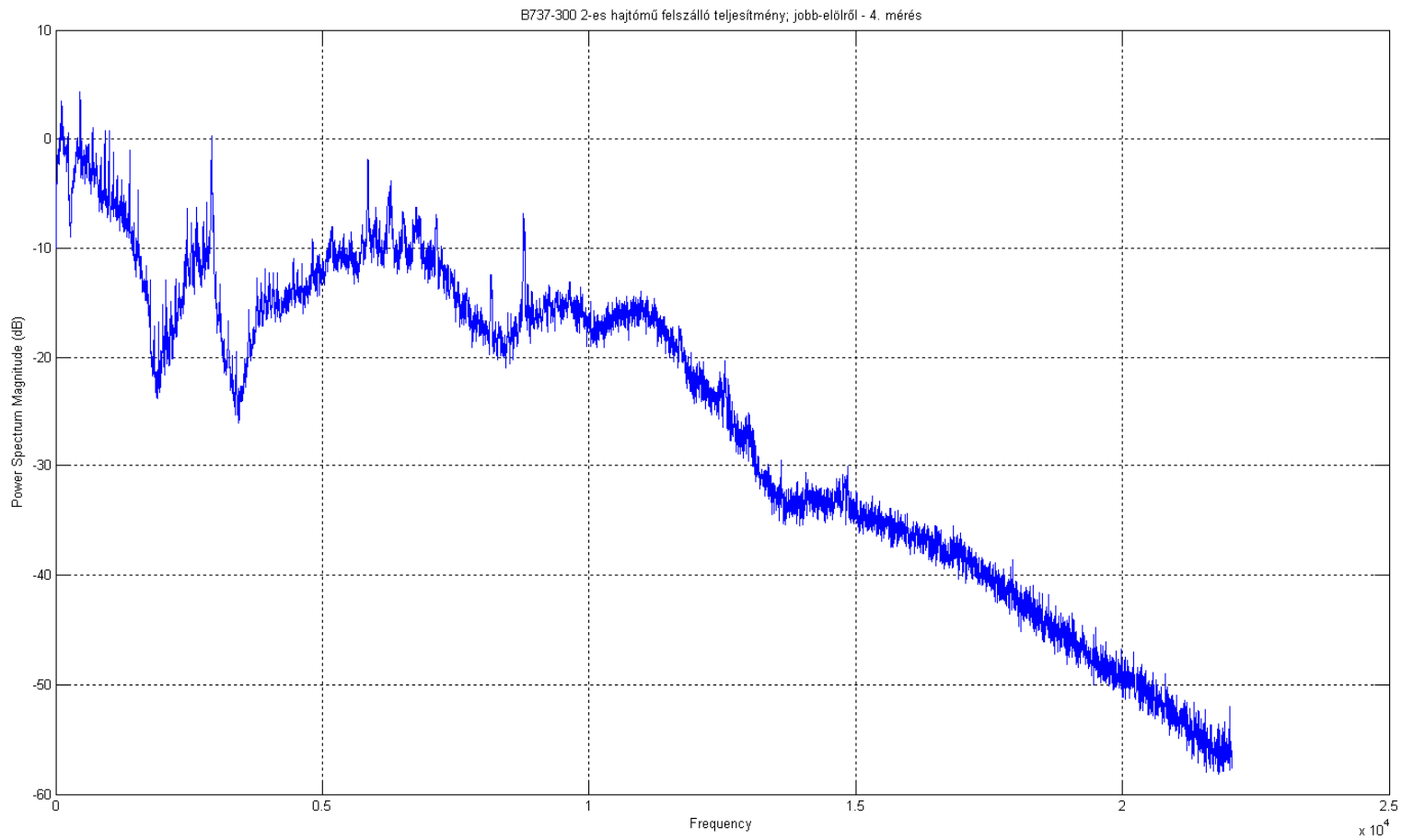
17. ábra: Boeing 737-300 típusú repülőgép 2-es hajtóműve felszálló üzemmódon - jobb-előlről felvéve - 1. mérés



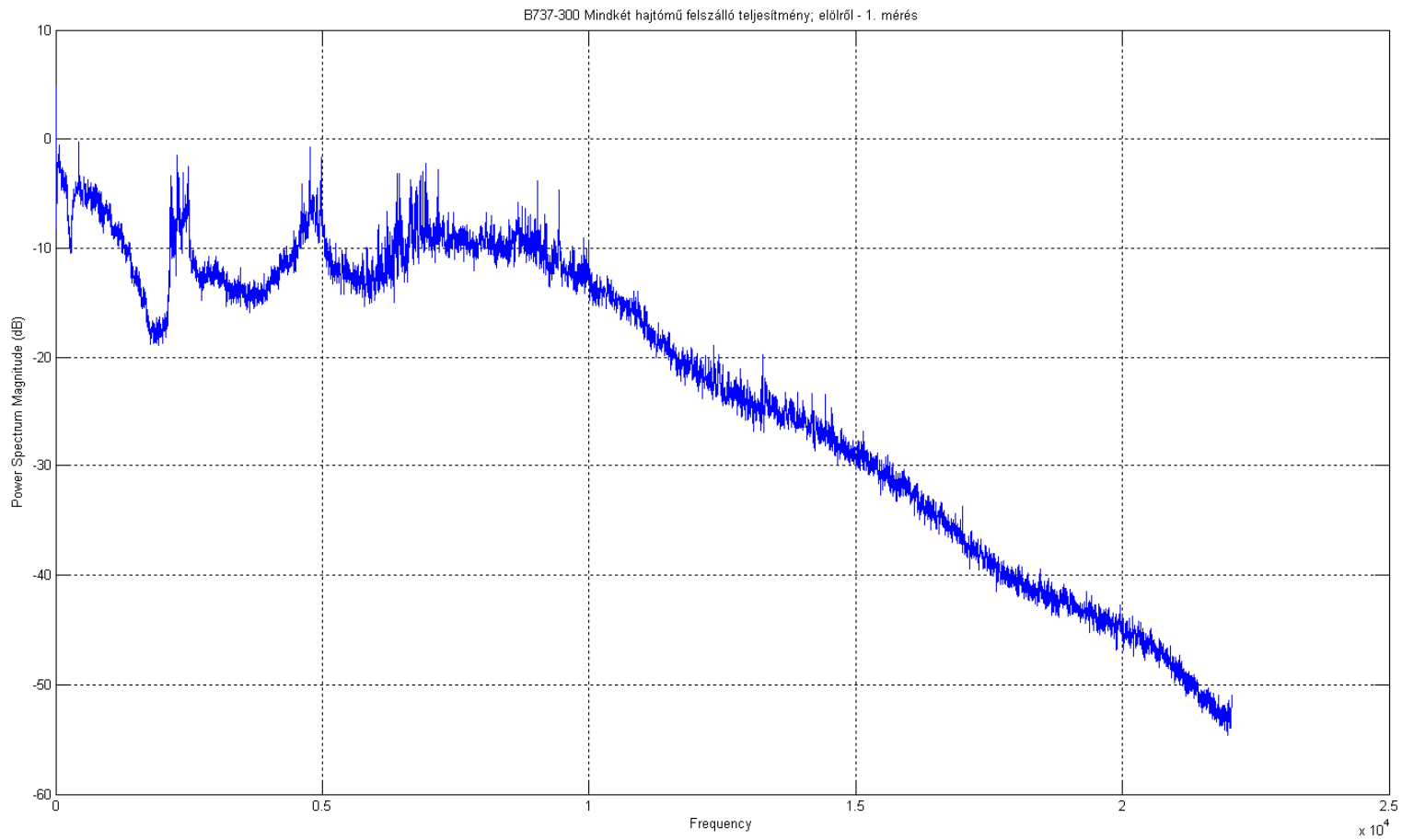
18. ábra: Boeing 737-300 típusú repülőgép 2-es hajtóműve felszálló üzemmódon - jobb-előlről felvéve - 2. mérés



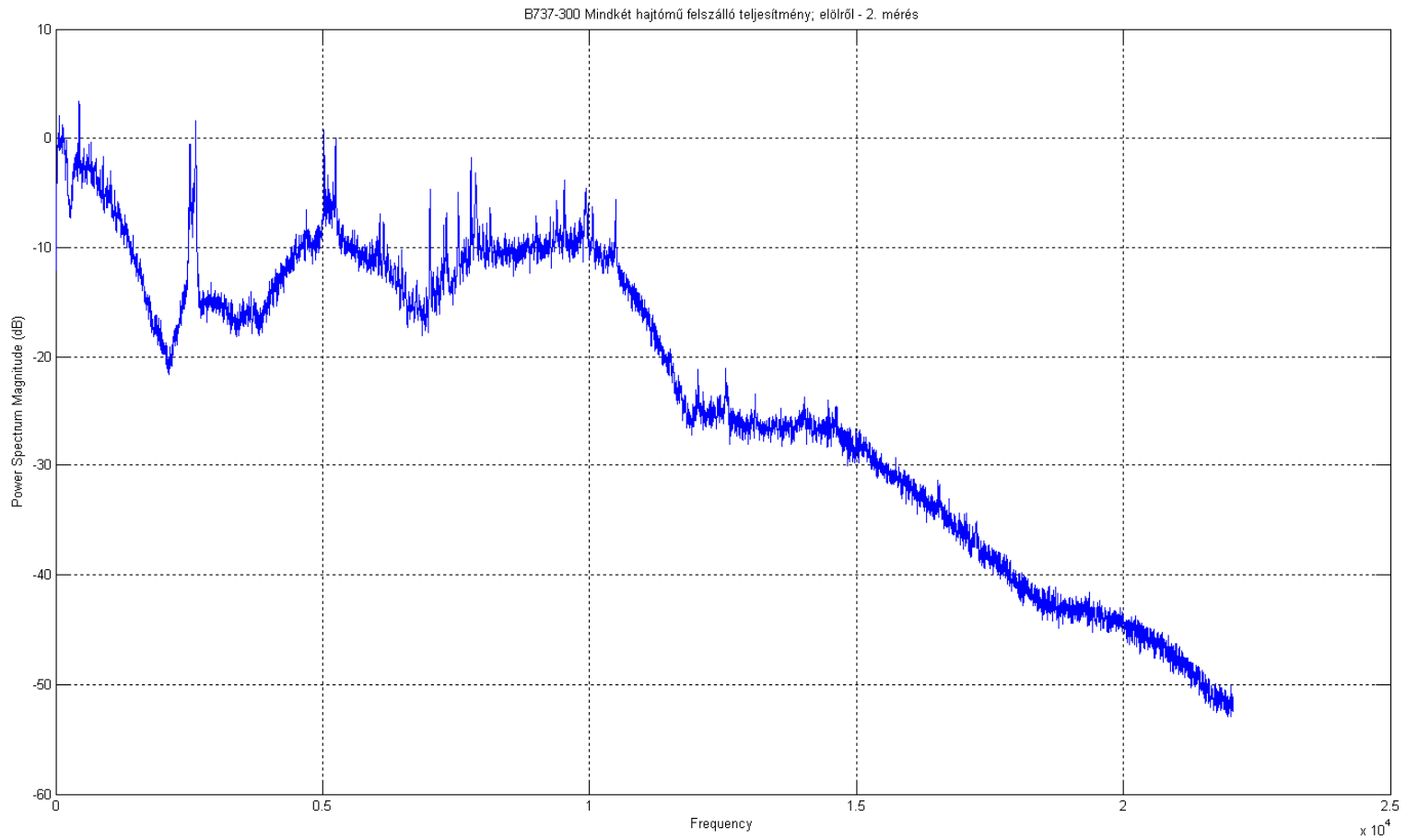
19. ábra: Boeing 737-300 típusú repülőgép 2-es hajtóműve felszálló üzemmódon - jobb-előlről felvéve - 3. mérés



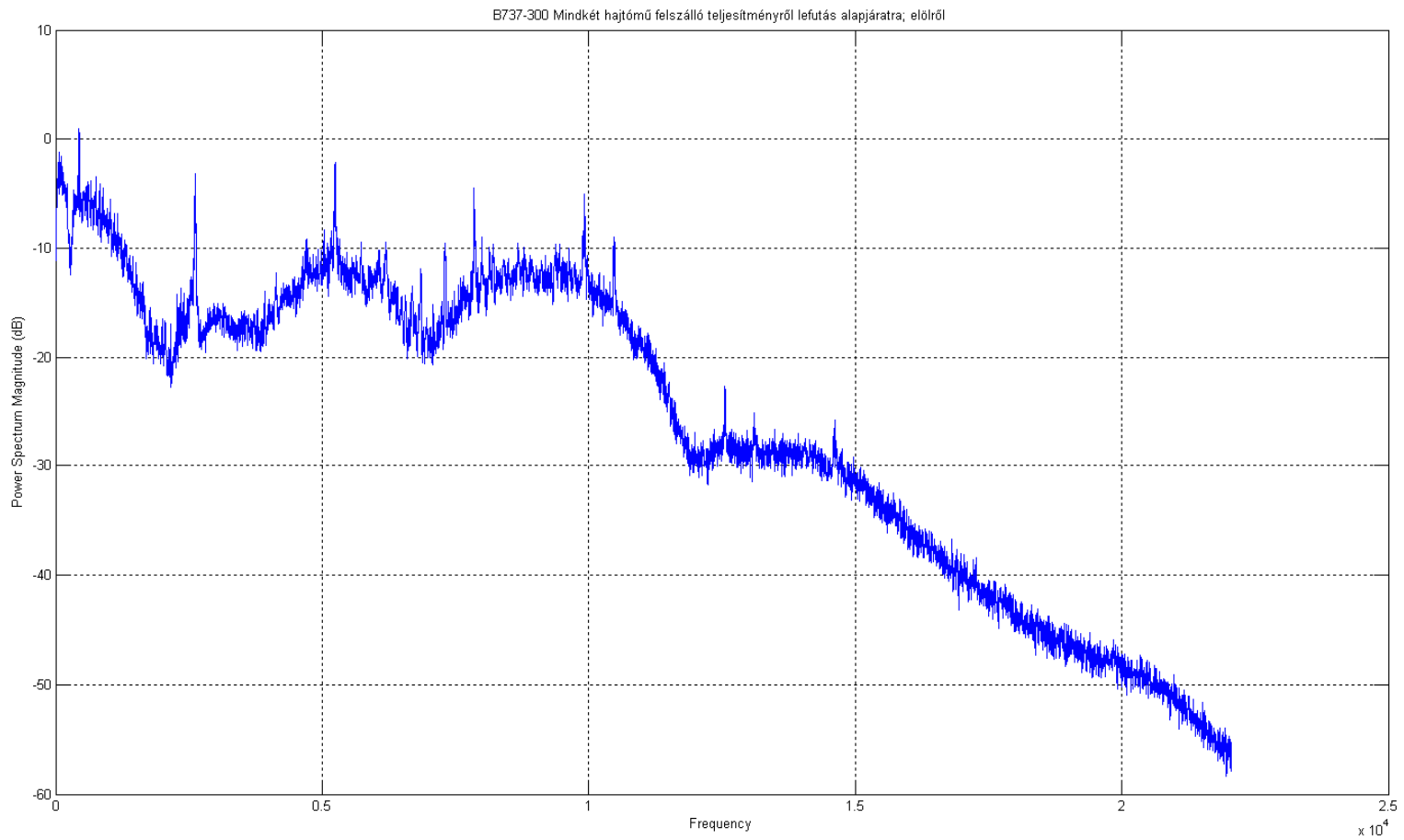
20. ábra: Boeing 737-300 típusú repülőgép 2-es hajtóműve felszálló üzemmódról alapjáratra történő lefutása - jobb-előlről felvéve



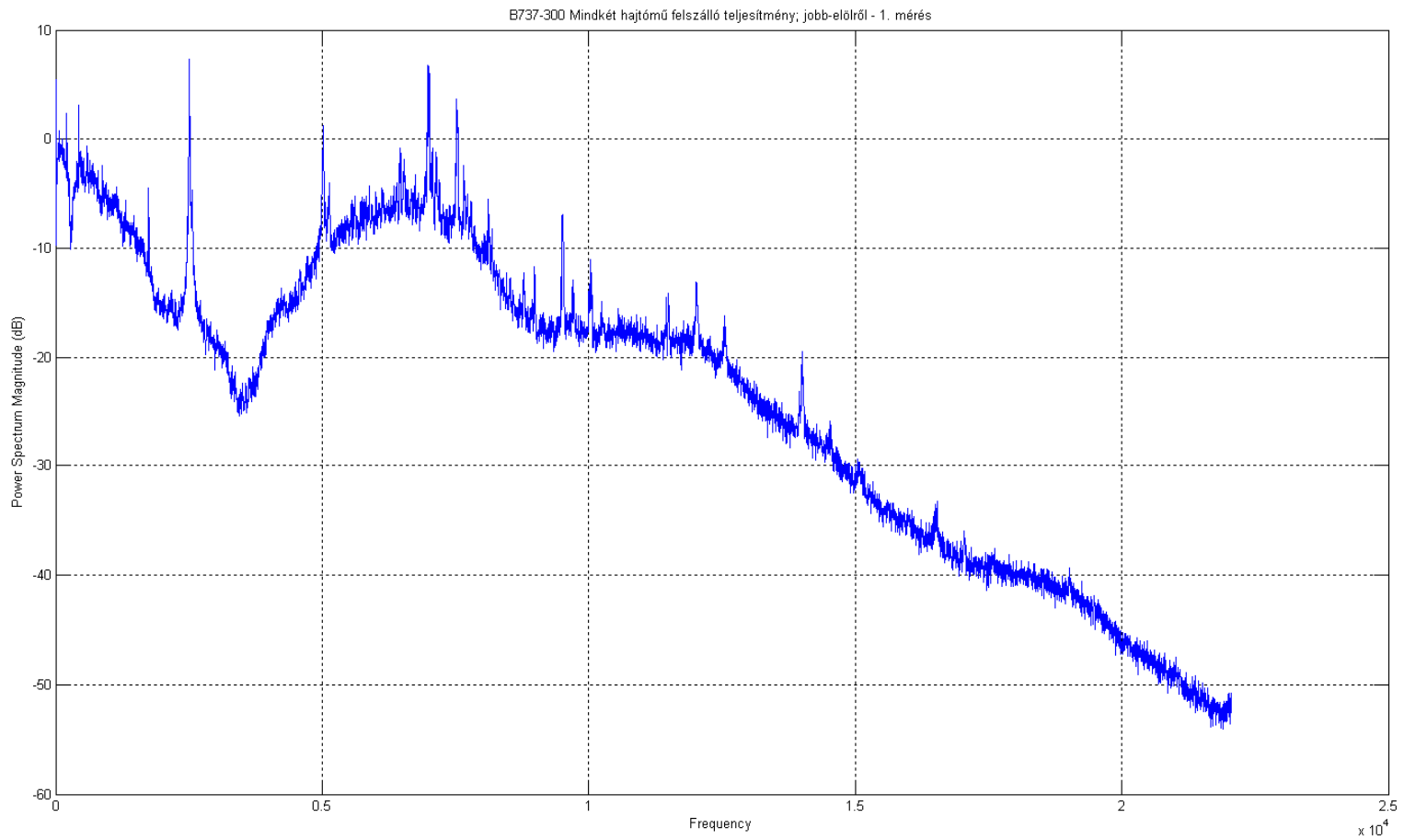
21. ábra: Boeing 737-300 típusú repülőgép hajtóművei felszálló üzemmódon - előlről felvéve - 1. mérés



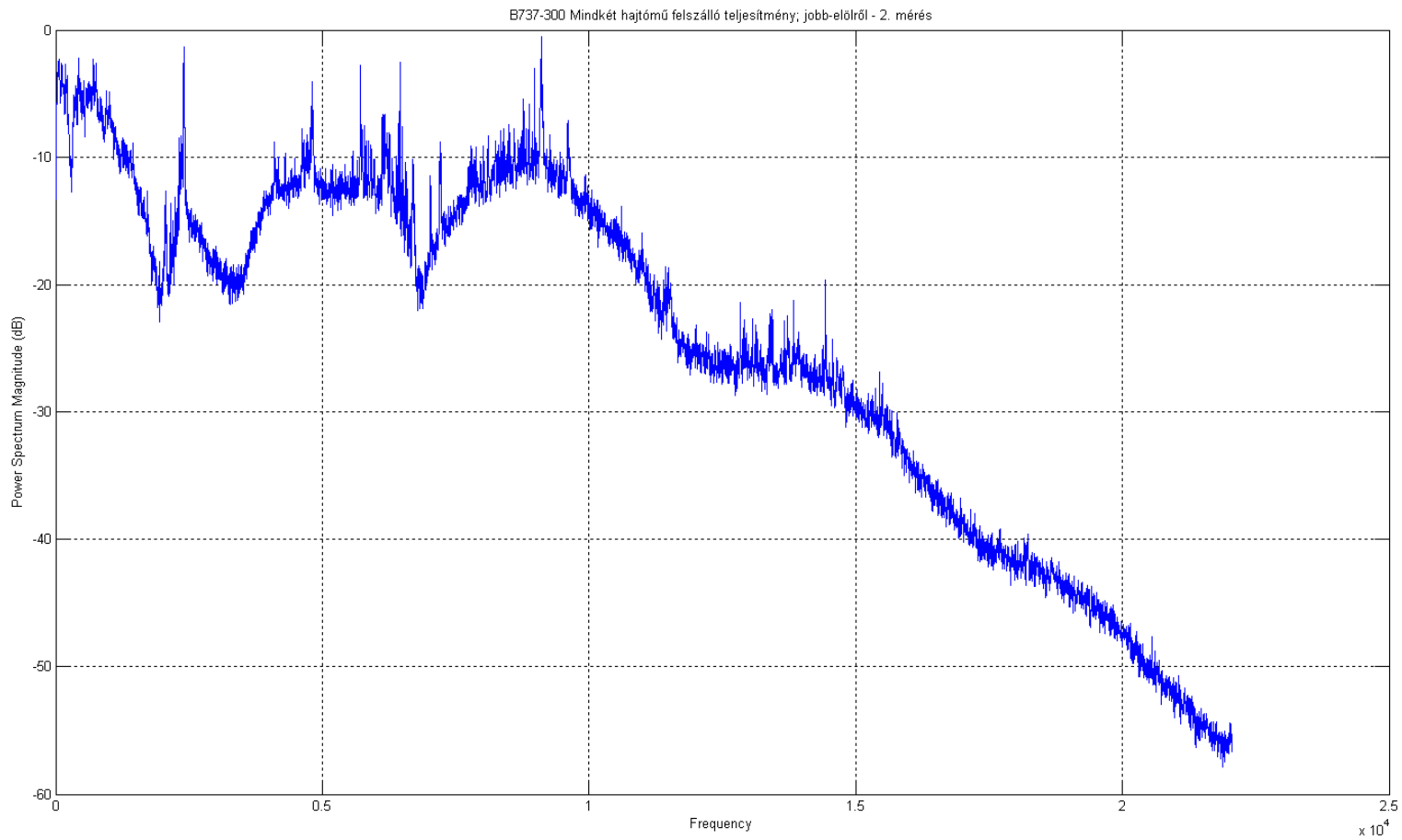
22. ábra: Boeing 737-300 típusú repülőgép hajtóművei felszálló üzemmódon - előlről felvéve - 2. mérés



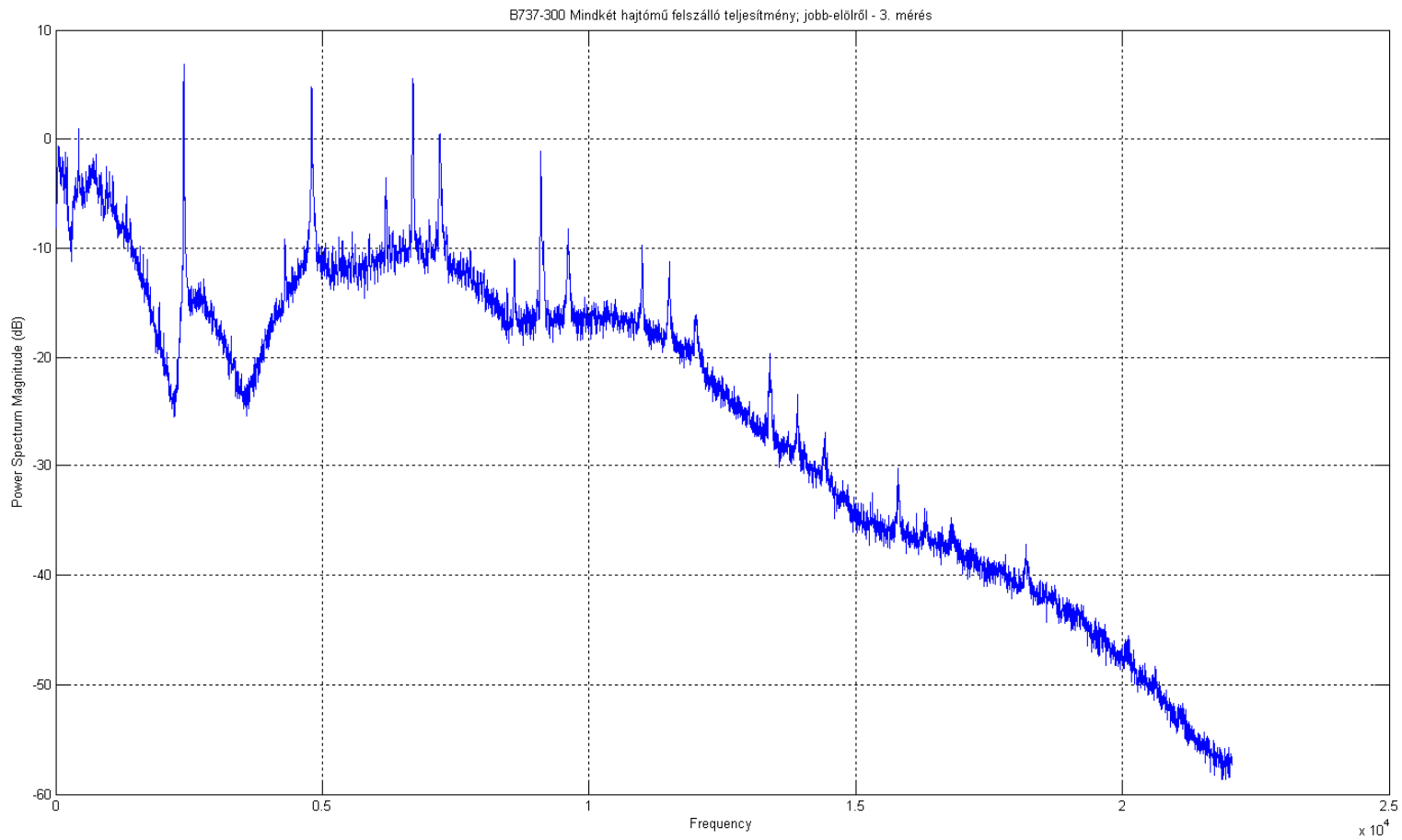
23. ábra: Boeing 737-300 típusú repülőgép hajtóművei felszálló üzemmódról alapjára történő lefutása - előlről felvéve



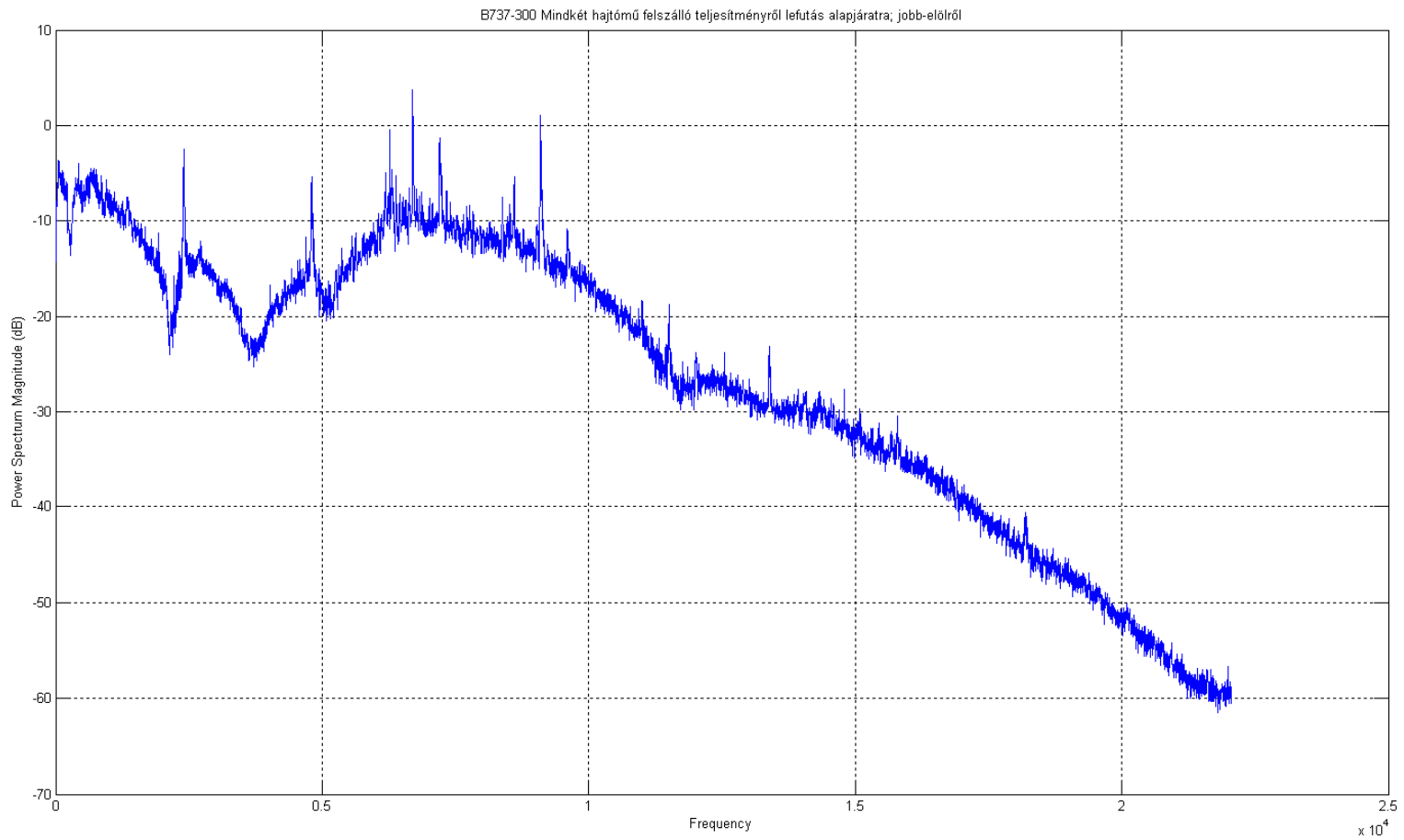
24. ábra: Boeing 737-300 típusú repülőgép hajtóművei felszálló üzemmódon - jobb-előlről felvéve - 1. mérés



25. ábra: Boeing 737-300 típusú repülőgép hajtóművei felszálló üzemmódon - jobb-előlről felvéve - 2. mérés



26. ábra: Boeing 737-300 típusú repülőgép hajtóművei felszálló üzemmódon - jobb-előlről felvéve - 3. mérés



27. ábra: Boeing 737-300 típusú repülőgép hajtóművei felszálló üzemmódról alapjáratra történő lefutása - jobb-előlről felvéve