



Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem
Villamosmérnöki és Informatikai Kar

Aktív zajcsökkentést demonstráló rendszer tervezése

Diplomaterv

Horváth András

2007

Nyilatkozat

Alulírott, **Horváth András**, a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem hallgatója kijelentem, hogy ezt a diplomatervet meg nem engedett segítség nélkül, saját magam készítettem, és a diplomatervben 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.

.....
Horváth András

Tartalomjegyzék

Kivonat.....	5
Abstract.....	6
1. Bevezetés.....	7
1.1. Jelenlegi és lehetséges alkalmazások.....	9
1.2. Aktív zajcsökkentő rendszerek tervezéséhez szükséges megfontolások ^[1] ...	10
1.3. Demonstrációs rendszer.....	11
2. Aktív zajcsökkentő rendszerek alaptípusai ^[1]	13
2.1. Előreccsatolt rendszer.....	13
2.1.1. Szélessávú előreccsatolt rendszer.....	13
2.1.2. Keskenysávú előreccsatolt rendszer.....	14
2.2. Visszacsatolt rendszer.....	15
2.3. Többcsatornás rendszer.....	16
3. Adaptív szűrők.....	18
3.1. Az LMS-algoritmus ^{[4],[6]}	20
3.2. A másodlagos út hatása és az FXLMS-algoritmus ^{[1],[5]}	22
3.2.1. Off-line identifikáció.....	24
3.2.2. On-line modellezés.....	26
3.3. Az FXLMS kiterjesztése.....	27
3.3.1. Leaky FXLMS ^[7]	27
3.3.2. Az akusztikus visszacsatolás kiküszöbölése ^[8]	27
4. Bemutató aktív zajcsökkentő eszköz rendszerterve.....	28
5. A megtervezett és megépített hardver eszközök.....	30
5.1. Mikrofon előerősítő.....	30
5.2. Teljesítményerősítő.....	32
5.3. Akusztikus rendszer.....	35
6. A felhasznált hardver és szoftver eszközök.....	37
6.1. ADSP BF537 EZ-KIT Lite.....	37
6.2. A BF537 jelfeldolgozó processzor ^{[14],[15]}	37
6.3. VisualDSP++.....	39
7. Aktív zajcsökkentő szoftver.....	41
7.1. DSP programok felépítése.....	41
7.2. Az implementáció kérdései.....	44
7.2.1. Időzítés.....	44
7.2.2. Decimálás.....	45
7.2.3. Interpolálás.....	45
7.2.4. Keretrendszer.....	48
7.2.5. Beavatkozás a program működésébe.....	48
7.2.6. Telítések, véges szóhossz hatásai.....	50
7.3. A program felépítése.....	51
8. Mérések és eredmények.....	54
9. Összefoglalás.....	61
Irodalomjegyzék.....	62
Függelék.....	63

Kivonat

Az alacsony frekvenciás tartományban a hagyományos elveken működő zajcsökkentő eljárások nagy méretük és ebből adódó költségeik miatt sok helyen nem használhatóak. Az aktív zajcsökkentés jó hatásfokkal képes elnyomni a káros zajt éppen az alacsony frekvenciákon. A dolgozat egy olyan rendszer tervezéséről és megvalósításáról szól, amely a közönség számára képes bemutatni az aktív zajcsökkentés hatásosságát. A hatásosságot nagyban befolyásolja az elnyomandó hangtér akusztikája. A demonstrációhoz szükséges előzetes méréseket laboratóriumi műszerekkel és körülmények között lehet elvégezni. Az általam készített rendszer a bemutatóhoz szükséges minden járulékos elemet tartalmaz és akusztikusan izolált térben valósít meg elnyomást, így a használatakor nem szükséges előzetes méréseket és beállítást végezni.

A zajcsökkentést megvalósító szoftver az Analog Devices ADSP-BF537 EZ-KIT Lite fejlesztőkártyáján található fixpontos Blackfin processzorra készült. A demonstrációt megvalósító hangtér egy T alakú cső, amelyet esztétikai okokból átlátszó plexiüvegből építettem. Elkészült továbbá a zajforrást szimuláló és az elnyomást végző hangszóró teljesítményerősítője, és a zajcsökkentő algoritmus számára hibajelet és referenciát szolgáltató mikrofon előerősítője.

A rendszer a megvalósított szoftverrel az FXLMS-re alapuló egycsatornás előrecsatolt zajelnyomó struktúrát valósítja meg, a meglévő elemekkel azonban bármilyen egycsatornás zajelnyomó eljárás tesztelésére és bemutatására alkalmas, anélkül, hogy egyéb járulékos elemeket igényelne.

A rendszerrel periodikus és keskenysávú zavarjelek esetén átlagosan 14 dB, maximálisan 29 dB elnyomást sikerült elérni, 150 Hz sávszélességű véletlenszerű zaj esetében átlagosan 15 dB elnyomás volt tapasztalható. A cső akusztikája jelentősen befolyásolja a zajcsökkenés mértékét, emiatt szélessávú elnyomás csak korlátozott feltételekkel, a cső akusztikai viszonyainak figyelembevételével érhető el.

A demonstráció azért hatékony, mert a zajforrás által keltett hanghullámok még azelőtt kioltásra kerülnek, mielőtt elhagynák a hangteret, így a zajcsökkentés nem koncentrálódik pusztán a berendezés közvetlen környezetére.

Abstract

At low frequencies passive noise reduction techniques are oversized and expensive, they can not be used due to their inefficiencies. However active noise control can effectively eliminate disturbing noise in the low frequency region. The effectiveness of these systems is highly affected by the acoustics of the sound space. Besides this, a successful active noise control system needs special instruments and previous measurements in order to properly cancel noise.

This Master Thesis is about a design and realization of a system, which is able to demonstrate to the audience the effectiveness of active noise canceling. The designed system contains all required instruments and cancels sound in an acoustically isolated space. This isolation makes the demonstration reliable.

The noise canceling program was designed to the Analog Devices Blackfin high-performance fix-point processor, located on an ADSP-BF537 EZ-KIT Lite development board. The system uses the FXLMS algorithm to implement a single channel feedforward noise canceling structure. The sound space for the demonstration is a cylindrical tube forming a „T”, built from transparent acrylic glass. The power amplifier for the noise source and canceling loudspeakers, and the pre-amplifier for the error signal microphone were built specific for the demonstration. With the existing elements, all single channel noise control structures and algorithms can be tested.

With periodic and narrowband signals, a maximum 29 dB and an average 14 dB noise reduction could be attained. For 150 Hz bandwidth pseudo random noise an average 15 dB reduction was achieved. The maximum reachable reduction is highly influenced by the acoustic effects in the tube. Broadband canceling could only be achieved within certain frequency intervals.

An effective demonstration of active noise canceling can be made with the system, as noise is eliminated before it leaves the tube. This insures that the noise canceling is not localized to the neighborhood of the system, but is also effective for areas further away.

1. Bevezetés

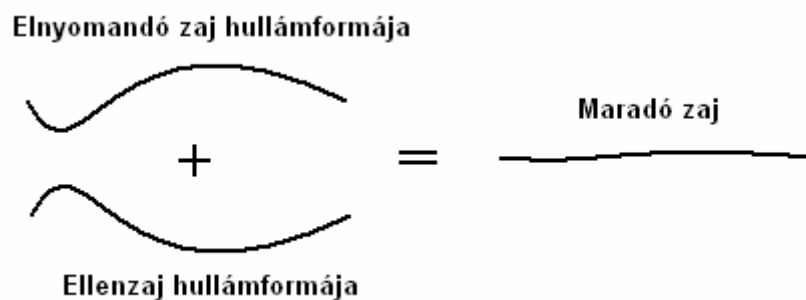
A környezeti zajterhelés napjainkban folyamatosan növekszik. Az ipar fejlődésével egyre nagyobb számban jelennek meg a nagyméretű és hangos zajt keltő motorok, turbinák, transzformátorok, kompresszorok és a hűtéshez szükséges ventilátorok, légkondicionálók. A településszerkezet folyamatos átalakulásával, sűrűsödésével a lakosság zajterhelése fokozatosan növekszik, különösen a járművek közelsége miatt. A háztartásokban is fokozatosan emelkedik a zajkeltő háztartási eszközök száma. Tehát a zaj egyre fokozódó problémát okoz, aminek megoldása igen fontos feladat.

Kétféle akusztikus zaj létezik környezetünkben. Az egyik a turbulencia által keltett zaj, amely a frekvenciatartományban egyenletesen széles sávban szórja szét az energiáját. Példaként említhető a sugárhajtású repülőgépek hangjának alacsony frekvenciás tartománya (a magas frekvencia a hajtómű által keltett zaj), vagy a robbanásokkor keletkező lökéshullám zaja. A másik fajta zaj keskeny sávú, energiája bizonyos frekvenciákon koncentrálódik. A tipikus keskenysávú zaj a forgó gépekhez köthető, így ez a zaj periodikus vagy majdnem periodikus. Ilyen a belsőégésű motorok által keltett zaj, a kompresszorok, hűtőszekrények, vákuumpumpák által keltett zaj és a transzformátorok zaja. A keskenysávú és a szélessávú zaj gyakran együtt van jelen, például egy repülőgép fedélzetén.

A zajcsökkentésnek kétféle megközelítése létezik: passzív és aktív [1]. Tradicionálisan passzív zajcsökkentő megoldás a zajvédő fal, hangszigetelés, fülvédő használata. A passzív rendszerek két csoportra oszthatók: reaktív és rezisztív zajcsökkentőkre. A reaktív tompítók terelő gátak és csövek segítségével változtatják meg az akusztikus impedanciát. A rezisztív tompítók hangelnyelő anyaggal szigetelt csőben vezetik a zajt, így csökkentik annak energiáját. Reaktív eszközök a belsőégésű motorok kipufogóiban használt hangtompító dobok, míg rezisztív hangtompító a megfelelően kialakított légkondicionáló csőhálózat és az azt borító hangszigetelés, amely a ventilátor és a turbulencia zaját csökkenti. A passzív eszközök nagyfokú elnyomásra képesek a teljes frekvenciatartományban. Hátrányuk, hogy viszonylag nagy helyet foglalnak, nagy lehet az anyagszükségletük, emiatt az áruk is. A passzív hangcsökkentő anyagok csillapítása ugyanis addig hatékony, amíg a hang hullámhossza jóval kisebb a csillapító

kiterjedésénél. Tehát alacsony frekvenciás csillapításhoz vastag anyag szükséges. További probléma lehet az általuk okozott nyomásnövekedés olyan helyen, ahol légáramlás van a csőben.

A fenti problémák miatt van egyre nagyobb igény az aktív zajcsökkentés (Active Noise Control, ANC) használatára. Az aktív zajcsökkentő rendszer tartalmaz egy olyan elektroakusztikus eszközt, amely a nem kívánt hangot azonos amplitúdójú, de ellentétes fázisú ellenhang (ellenzaj) generálásával oltja ki. Az eredeti (nem kívánt) hang és az ellenhang akusztikus kombinációja mindkettő elnyomását eredményezi. Az első ábra mutatja az elnyomandó és az elnyomó zaj szuperpozíciójának eredményét. A működés hatékonysága az amplitúdó és a fázis pontosságától függ.



1. ábra. Az aktív zajcsökkentés fizikai koncepciója

Az első aktív zajcsökkentő rendszer terve Paul Lueg nevéhez köthető. Ebből az ötletből 1936-ban szabadalom is született [2]. A szabadalom vázolta a destruktív elnyomás alapötletét és tartalmazott egy mikrofont és egy hangszórót tartalmazó rendszertervet. Kivitelezése azonban abban az időben, azon a technikai színvonalon nem volt sikeres, így az ötlet valós alkalmazására sem kerülhetett sor. Mivel az akusztikus zaj karakterisztikája és a környezete nem konstans, a zaj frekvenciatartalma, fázisa és amplitúdója sem stacionárius. Ezek miatt adaptív rendszerre van szükség, amely az időben változó paramétereket is képes feldolgozni. Az első adaptív szűrőkön alapuló zajcsökkentő a 80-as évek közepéből származik. Ekkor már rendelkezésre álltak olyan processzorok, amelyekkel aktív zajcsökkentő rendszerek megvalósíthatóak voltak. Az

elmélet lényege, hogy egy digitális szűrő együtthatóinak változtatásával minimalizálja a hibajelet, ami a kívánt jel és az aktuális jel különbsége, általában a kívánt jel nulla.

A digitális jelfeldolgozó processzorok (Digital Signal Processor, DSP) kifejezetten a valós idejű jelfeldolgozási feladatok megoldására készültek, jó hatásokkal lehet rajtuk adaptív algoritmusokat futtatni. A 80-as években a nagy teljesítményű DSP-k megjelenésével az aktív zajcsökkentéssel kapcsolatos kutatások és fejlesztések száma jelentősen megnőtt. A 90-es években már több helyen alkalmazták az iparban. A technológia mára érte el azt a szintet, hogy megfizethető áron lehessen hozzájutni aktív zajcsökkentést alkalmazó fejhallgatókhoz.

1.1. Jelenlegi és lehetséges alkalmazások

Az aktív zajcsökkentő rendszereket több területen használják, fejlesztik, illetve tervezik használatukat.

Elsőként említhető a járművek és munkagépek területe. Egycsatornás (egydimenziós) rendszer a kipufogó és a gyújtási rendszer elektronikus hangtompítója. Többcsatornás (háromdimenziós) rendszerek az utastérben, az operátorfülkében, vagy a motorfelfüggesztésen, mobiltelefon kihangosítón használt zajelnyomók.

Másodikként említhető az otthoni berendezések csoportja. Itt is megkülönböztethetünk egy- és többcsatornás rendszereket. Egycsatornás a légkondicionáló cső, hűtőszekrény, mosógép, kazán, tűzhely, szárítógép, többcsatornásaként pedig a fűnyíró, porszívó, szobában kialakított csendes térrész, stb.

A zajcsökkentés fontos területe továbbá az ipar, ahol a nagy munkagépek, ventilátorok, levegőztető csövek, kémények és erőművek által keltett zajokat kell csökkenteni, és szükség van az irodákban csendes térrészek kialakítására, fülvédőkre, fejhallgatókra.

Végül fontos megemlíteni a járművek: repülőgép, hajó, csónak, helikopter, motorkerékpár, dízelmozdony, stb. által keltett zajokat, melyek a mindennapi életben az átlagembert talán leginkább érintő zajforrások.

Az aktív zajcsökkentés algoritmusai felhasználhatók rezgés csökkentésre is. Ezzel motorok, gépek stabilizálhatók, és a rezgéseik által keltett hanghatás is csökkenthető.

Megszüntethető továbbá több egymás mellett működő forgó gép csatolt rezgéseiből származó káros rezonancia.

1.2. Aktív zajcsökkentő rendszerek tervezéséhez szükséges megfontolások ^[1]

Egy adott DSP-vel megvalósítandó rendszer teljesítményanalízise és a megfelelő zajcsökkentő algoritmus kiválasztása fontos része az optimális tervezésnek. A legfontosabb alapkérdések a következők:

- Alapvető teljesítményigény felmérése (Mekkora zajelnyomást akarunk elérni?)
- Milyen tényezők korlátozzák a rendszer teljesítményét?
- A teljesítmény és eléréséhez szükséges rendszer komplexitása.
- A célszerű felépítés és tervezési eljárás.

A zajcsökkentés elve egyszerű, megvalósításához azonban a következő kérdések megfontolása szükséges:

- Melyik algoritmust célszerű használni?
- Hogyan célszerű elhelyezni a mikrofonokat és hangszórókat?
- Hogyan csökkenthetők a mikrofont érő káros zajhatások?
- A hangszórók teljesítménye hogyan állítható be megfelelő szintre?
- Hogyan növelhető a mikrofonok és hangszórók megbízhatósága?
- Hogyan csökkenthető a rendszer ára? (szabályozó, mikrofon, hangszóró, erősítők, szűrők)

Az iparban és a hétköznapi életben használt aktív zajcsökkentő rendszereknek több feltételnek kell megfelelniük. Talán a legfontosabb feladat, hogy a hatékonyságot maximalizálni kell az elnyomandó frekvenciasávban. Fontos, hogy a környezet ne befolyásolja a rendszer telepítését, illetve, hogy könnyen illeszkedjen azok fizikai paramétereire, mint például a hőmérséklet, légáramlás és páratartalom változásai. Jelentős továbbá a rendszer alkalmazhatósága érdekében a robusztus alkatrészek méretének csökkentése, valamint a vezérlő elektronika egyszerűsítése és az alkatrészek megbízhatóságának növelése.

1.3. Demonstrációs rendszer

Felvetődött, hogy a tanszék Digitális Jelfeldolgozás Laboratóriumában folyó munkát látványos eszközökkel lehessen demonstrálni elsősorban a hallgatóság számára. Egy megfelelően összeállított rendszer lehetőséget ad a jelfeldolgozás során felmerülő érdekes problémák bemutatására. Az aktív zajcsökkentés valós idejű alkalmazás, amely valós idejű jelfeldolgozást igényel. Hatékony működése látványos illusztrációja lehet a jelfeldolgozó eljárások sikerességének, segítségével bemutatatható a nagysebességű jelfeldolgozó processzorok működése. Egy sikeres ANC rendszer tervezése és demonstrálása azonban több nehézségbe ütközik:

Az első és legnehezebben kiküszöbölhető probléma, hogy az adott helyre kihelyezett mikrofon-hangszóró párra egyedi az átviteli függvény, melynek identifikálása nehézségekbe ütközhet. Ez veszélyezteti az ANC sikeres működését.

Másodikként felvethető a hatótávolság kérdése. Alapszabályként elmondható, hogy a zajelnyomás a hibajelet vevő mikrofontól negyed hullámhossznyi távolságon belül hatásos. Ennél nagyobb távolságban a visszaverődések miatt bekövetkező fázistolás megszünteti vagy csökkenti az elnyomást. Ez azt jelenti, hogy például egy 340 Hz-es hanghullám elnyomása körülbelül 25 cm-en belül hatásos. Ahhoz, hogy az aktív zajcsökkenés hallhatóvá váljon, a közönségnek ezen a távolságon belül kellene tartózkodnia. Ez természetesen nem megoldható. Megoldásként felmerülhet többcsatornás rendszer kiépítésének lehetősége, mivel egy ilyen rendszerrel nagyobb térrészben is lehet zajelnyomást produkálni. A többcsatornás rendszer megvalósítása, azonban jóval több problémát vet fel, és kiépítéséhez is sokkal több időre van szükség.

A harmadik probléma, hogy az aktív zajcsökkentő rendszerek felépítésüknél fogva sok járulékos eszközt tartalmaznak. Szükség van erősítőkre, jelkondicionálókra, hangszórókra, mikrofonokra. Ezek gyakran nagy méretűek, emiatt nehezen hordozhatóak, és esetleg hiányoznának a laborban folyó munkához.

Ezen okok miatt olyan rendszert kellett létrehozni, amely:

- Akusztikailag majdnem zárt, annak érdekében, hogy a mérhető átviteli függvényeket a környezet csak minimális mértékben befolyásolja.
- Lehetőség szerint minél több, a működéshez szükséges kiegészítő eszközt tartalmaz.

A következő két fejezetben ismertetem az ANC típusait, a dolgozat szempontjából fontos zajelnyomó technikát és megoldást ([1],[5]), valamint az alkalmazott algoritmusokat. Először a zajcsökkentő rendszerek felépítését mutatom be, majd az adaptációt megvalósító algoritmusokat tárgyalom. Ismertetem az adaptív digitális zajcsökkentés területén széles körben alkalmazott LMS-algoritmust, majd rátérek annak egy módosítására, az FXLMS-algoritmusra.

Ezután azokat a kérdéseket és szempontokat tárgyalom, amelyeket a zajcsökkentés bemutatásához és a bemutató rendszer tervezéséhez fontos volt tisztázni. Ismertetem a megépített hardver eszközöket, utána a felhasznált fejlesztőkörnyezetet és processzort.

A rendszerben használt eszközök után ismertetem a zajelnyomó programban alkalmazott megoldásokat, és a jelfeldolgozás során felmerülő problémákat. A 6. fejezet mutatja be a zajelnyomó programot. A dolgozat végén találhatóak a mérési eredmények és azok értékelése.

A függelékben található leírás ismerteti a demonstráció összeállításához szükséges tudnivalókat, és képeket mutat az elkészült eszközökről.

2. Aktív zajcsökkentő rendszerek alaptípusai ^[1]

Az aktív zajcsökkentő eljárásokat az elnyomandó zaj tulajdonságaihoz kell igazítani. A szélessávú zajelnyomás igényli a zajforrás teljes ismeretét az ellenzaj létrehozásához. A zajforrást a szabályzó referenciajelként használja. A keskenysávú zajelnyomáshoz (például motorok által keltett periodikus zaj) nagyon hatékony algoritmusok léteznek, amelyek nem igénylik a kauzalitást, mivel a priori tudással rendelkeznek a zajról. Ilyen jeleknél tehát nem szükséges referenciamikrofont használni, mivel egy gyorsulásmérő jele is képes elég információt szolgáltatni a zajforrásról. Ezt a megoldást célszerű használni egy jármű kabinjában, ahol az elnyomandó jel a motor periodikus hangja, viszont a vészjelzéseket, a külső hangokat és a beszédhangot nem akarjuk elnyomni.

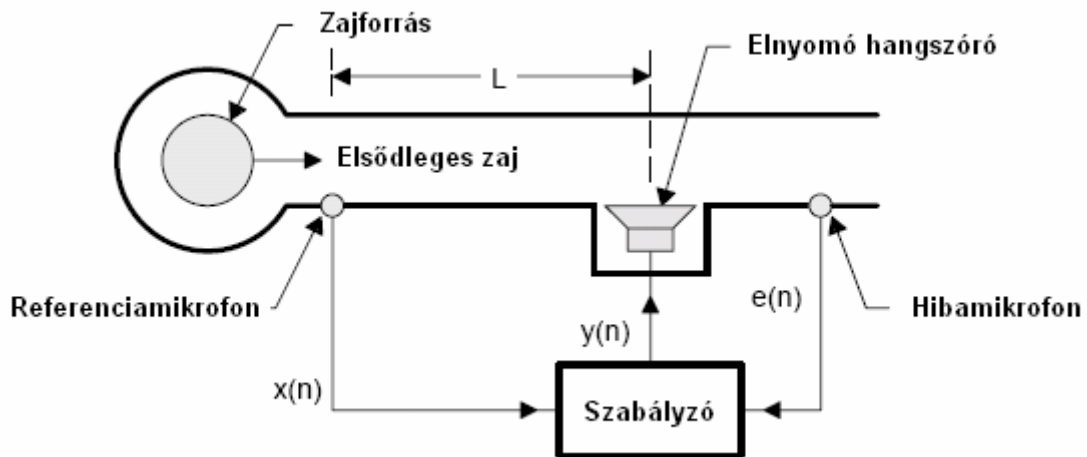
Az aktív zajcsökkentő rendszerek két alapvető módszert használnak. Az egyik változat az előrecsatolt rendszer, ahol a koherens referencia jelet (zajt) az elnyomó hangszóró előtt mintavételezzük. A másik fajta, visszacsatolt rendszerrel, a feldolgozás a referenciajel nélkül, pusztán a hibajel figyelembevételével történik. A szabályzó az adaptív algoritmus számára szükséges referenciajelet a hibajelből számítja.

2.1. Előrecsatolt rendszer

Az előrecsatolt rendszer alapelve, hogy a zajcsökkentéshez használt algoritmus számára a referenciajelet a zajforráshoz közel veszi, még azelőtt, hogy az elérné az ellenzajt szolgáltató hangszórót. Stabilabb, mint a visszacsatolt rendszer. A zaj spektrumától függően két változata létezik. Szélessávú zaj elnyomásakor a referenciajel maga az érzékelt hang, keskenysávú zaj elnyomásakor pedig a referenciajel előállítására más technikák is léteznek, amelyek stabilabb struktúrát eredményeznek.

2.1.1. Szélessávú előrecsatolt rendszer

A 2. ábrán látható a szélessávú előrecsatolt rendszer felépítése. A hibamikrofon méri a hibajelet ($e(n)$), amely az adaptálandó szűrő együtthatóit változtatja saját maga csökkentése érdekében. Ez a jel nem képez visszacsatolást a rendszerben, mivel a kimenetben nem jelenik meg közvetlenül.



2. ábra. Szélessávú előrecsatolt ANC rendszer

A szélessávú rendszer alapelve az, hogy a hang terjedési ideje a mikrofon és az elnyomó hangszóró között nagyobb, mint az elektromos jelút átviteli ideje, ezért lehetőség van a referenciapontban érzékelt zaj ellenfázisú kiadására azon a helyen, ahol az elnyomást el akarjuk érni. A távolságnak a mikrofon és a hangszóró között ki kell elégítenie a kauzalitás feltételét, ami azt jelenti, hogy mire a kioltandó zaj eléri a hangszórót, addigra a szabályzónak a beolvasott referenciajelből elő kell tudnia állítani az ellenhangot. A referenciamikrofonba visszajutó másodlagos hang nemkívánatos és instabilitást okozó visszacsatolást vihet a rendszerbe. Alkalmazási példája a csőben terjedő hang elnyomása (légkondicionáló, levegőztető rendszer).

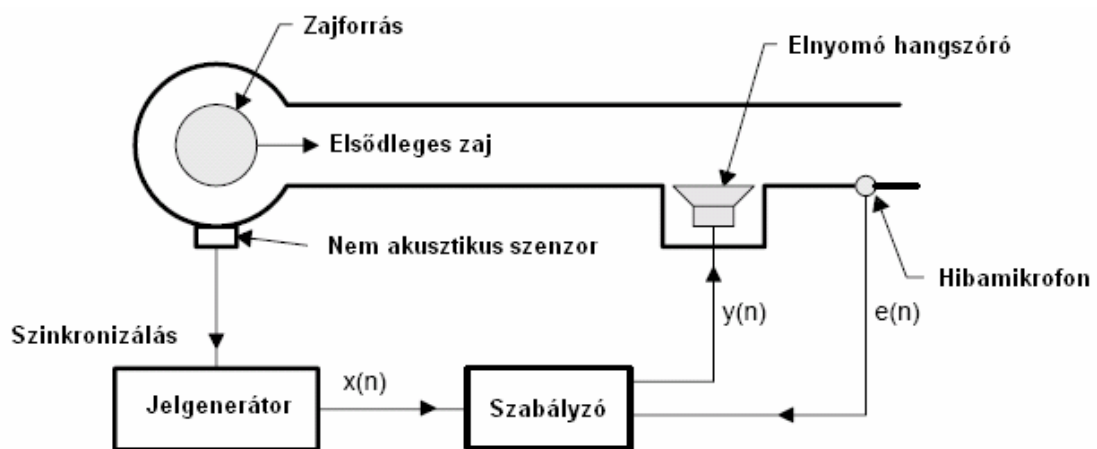
2.1.2. Keskenysávú előrecsatolt rendszer

Olyan alkalmazásokban, ahol a zajforrás keskenysávú és periodikus (vagy majdnem periodikus), a mikrofon helyettesíthető nem akusztikus szenzorral (pl. rezgésérzékelő, gyorsulásérzékelő jele vagy a zajforrásra jellemző elektromos jel). Ez azért előnyös, mert nem jön létre akusztikus visszacsatolás az elnyomó jel és a referenciajel között. A nem akusztikus szenzor jele szinkronban van a zajforrással és szimulálja a bemenő jel alaphérfkvenciáját és felharmonikusait. Az adaptívan szűrt, szintetizált referenciajel az elnyomó jel. Sok eszközben rendelkezésre áll a fordulatszámjel, amely használható referencia

jelként. A keskenysávú rendszerek előnyös tulajdonságai:

- Kauzalitás nem szükséges a működéshez. A zaj frekvenciataralma konstans, elegendő csak a fázist és az amplitúdót állítani. Emiatt a szabályzó számítási ideje hosszabb lehet.
- Szelektív elnyomás lehetséges a szintetizált referenciajel használata miatt.
- Alacsonyabb foksámú FIR szűrő használata elegendő, ez növeli a rendszer sebességét.
- A káros akusztikus visszacsatolás elkerülhető.

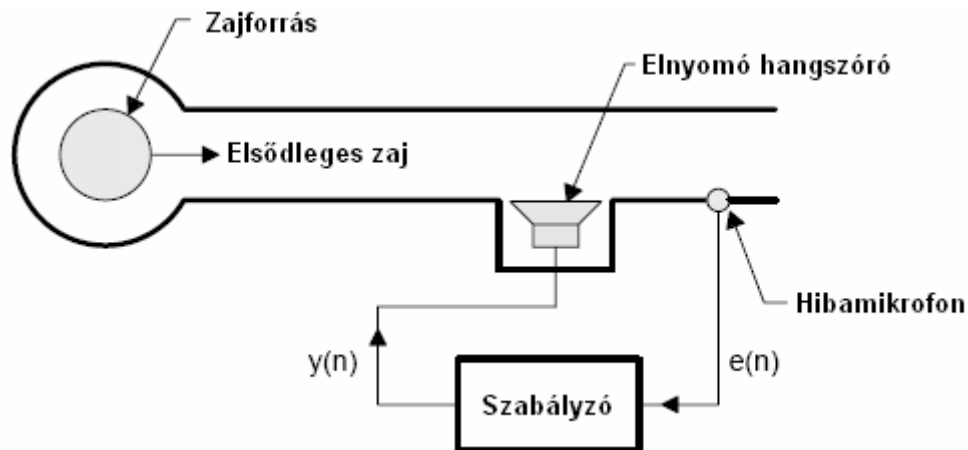
A rendszer modellje a 3. ábrán látható.



3. ábra. Keskenysávú előre-csatolt ANC rendszer

2.2. Visszacsatolt rendszer

Az aktív zajcsökkentő rendszerek első megvalósítási formája a visszacsatolt megoldás volt, mivel analóg elektronikus áramkörökkel is megvalósítható visszacsatolt ANC. A visszacsatoláskor a referenciajelet a hibajelből állítja elő a szabályzó. A rendszer vázlata a 4. ábrán látható.



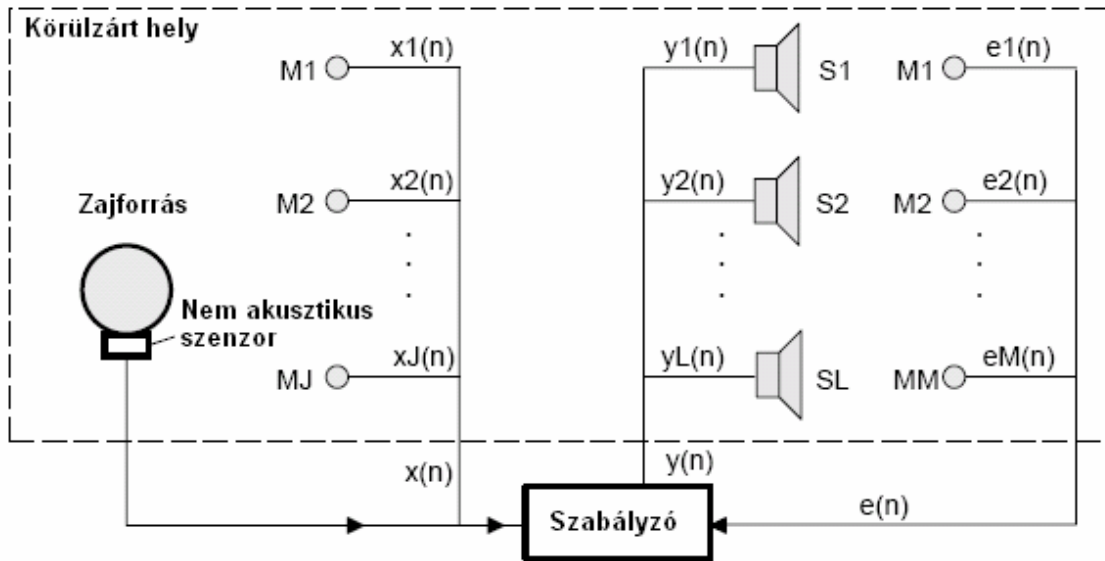
4. ábra. Visszacsatolt ANC rendszer

A referenciajel előállításához FXLMS-algoritmus használatkor (3.2. fejezet) a másodlagos út átviteli függvényére van szükség, tehát nincs újabb szűrő elem a rendszerben. A stabilitás növelésére különböző súlyozási módszerekkel van lehetőség [5], erre a 3.3. alfejezetben olvasható egy példa.

2.3. Többcsatornás rendszer

A legtöbb alkalmazásban nem elegendő egy helyen koncentrált elnyomást megvalósítani. Általános esetben a tér geometriai viszonyai bonyolultak, a visszaverődések, állóhullámok kialakulása miatt a hangtér is komplikált lesz. Az egycsatornás rendszer hatékonysága nem megfelelő. A többcsatornás rendszer több forrást, referenciaszenzort és hibamikrofont használ. A cél a teljes tér akusztikus energiájának csökkentése, amely arányos a hibamikrofonok által vett jelek négyzetösszegével. Bizonyos frekvenciákon lineáris függőség alakulhat ki a rendszerben, ennek elkerülése egy vagy több elnyomó hangforrás vagy hibamikrofon kiiktatásával lehetséges [5].

A többcsatornás rendszer vázлата az 5. ábrán látható.

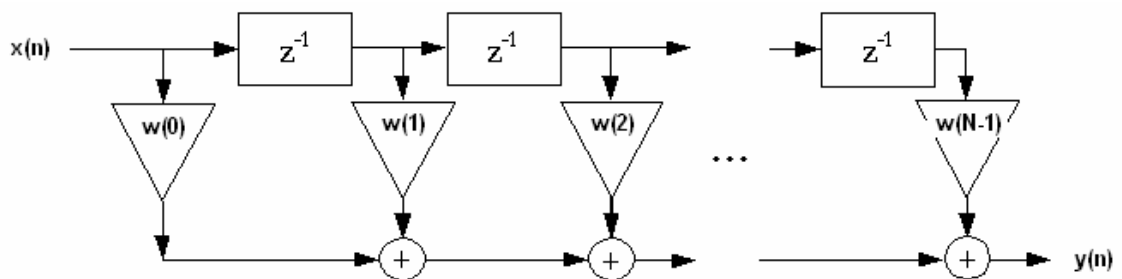


5. ábra. Többcsatornás ANC rendszer

A sokcsatornás rendszer (5. ábra) egyik alkalmazási példája az autóban vagy repülőgépben kialakított csendes utastér.

3. Adaptív szűrők

A legelterjedtebb aktív zajcsökkentő algoritmusok adaptív szűrők használatán alapulnak. Az adaptív szűrés olyan jelfeldolgozási eljárás, amely során a szűrő paramétereit valamilyen szempontból optimális kimenet elérése érdekében változtatjuk. Általánosságban az adaptív szűrők két részből állnak: egy szűrőből, amely felépítése olyan, hogy teljesíteni tudja az elvárt átviteli tulajdonságokat, és egy adaptív algoritmusból, amely úgy állítja a szűrő együtthatóit, hogy annak válasza a kívánt legyen. Az adaptív szűrők többféleképpen realizálhatók, legegyszerűbb változatuk a transzverzális, véges impulzusválaszú (FIR) szűrő (6. ábra).



6. ábra. FIR szűrő struktúra

Egy lineáris diszkrét idejű rendszer átviteli függvénye z-tartományban racionális törtfüggvény:

$$H(z) = \frac{B(z)}{A(z)}, \quad (1)$$

ahol $A(z)$ és $B(z)$ polinomok. A $H(z)$ -vel jellemzett szűrő véges vagy végtelen impulzusválaszú lehet. IIR esetben $A(z)$ és $B(z)$ tetszőleges lehet, ha $A(z)$ eleget tesz a stabilitási kritériumnak. FIR esetben $A(z) = z^{M-1}$, ahol $M-1$ a polinom fokszáma. Az adaptív FIR szűrő kimenő jele a következőképpen számítható:

$$y(n) = \sum_{i=0}^{N-1} w_i(n) \cdot x(n-i), \quad (2)$$

ahol

- $\mathbf{x}(n) \equiv [x(n) \ x(n-1) \ x(n-2) \ \dots \ x(n-N+1)]^T$
- $\mathbf{w}_i(n) \equiv [w_0(n) \ w_1(n) \ w_2(n) \ \dots \ w_{N-1}(n)]^T$
- $y(n) = \mathbf{w}^T(n) \cdot \mathbf{x}(n) = \mathbf{x}^T(n) \cdot \mathbf{w}(n)$

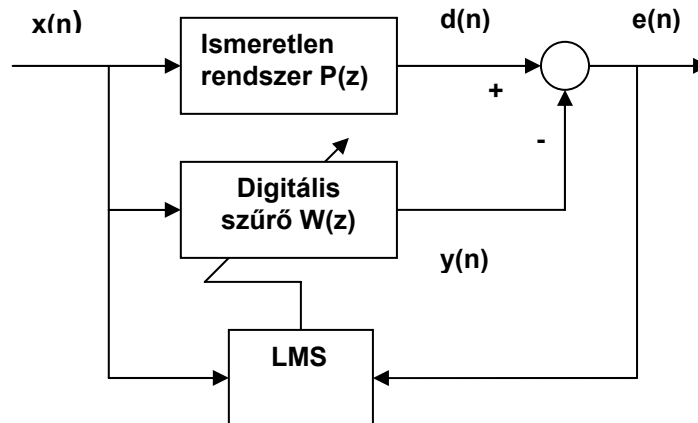
$x(n)$ a gerjesztés, $y(n)$ pedig a válasz mintái az n . időpillanatban, w_i konstans pedig a $B(z)$ polinom i . együtthatója. M a szűrő fokszáma. Ezen egyenlet szerint tehát, a kimenet a bemenet és w_i együtthatók diszkrét konvolúciójaként áll elő. Ez azt is jelenti, hogy a w_i együtthatókészlet tulajdonképpen a szűrő impulzusválasza is egyben. A szűrő adaptálását, vagyis a w_i együtthatókészlet változtatását aktív zajcsökkentő rendszerekben leggyakrabban a legkisebb négyzetes hiba alapján optimalizáló LMS-algoritmus végzi. Az algoritmus úgy állítja be az együtthatókat, hogy az átvitel a lehető legjobban (legkisebb négyzetes hibával) modellezze az akusztikus csatornát. Az adaptív szűrőknek sok fajtája létezik, ezek a struktúrák és algoritmusok általában nagyobb teljesítményűek, mint az általam használt LMS, megvalósításuk azonban bonyolultabb. Az adaptív szűrők komplexitását az általuk használt vektorok tárolásához szükséges memóriaterület méretével és a felhasznált műveletek számával mérhetjük. Az adaptív szűrők másik fajtája a rekurzív, végtelen impulzusválaszú (IIR) szűrők. Többfajta adaptív szűrőstruktúráról és implementálásukról olvashatunk a [7] irodalomban.

3.1. Az LMS-algoritmus [4],[6]

Az LMS-algoritmus célja a hibajel négyzetének, tehát a teljesítményének minimalizálása. Az LMS-algoritmus főbb tulajdonságai, amelyek miatt elterjedten használt:

- Könnyen implementálható jelfeldolgozó processzorra
- A paramétereinek kisebb változtatására stabil marad
- Viszonylag kicsi a számításgénye, emiatt egyszerűbb processzoron is megvalósítható
- Kis maradó hibával tud működni és konvergenciasebessége viszonylag nagy

A 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 [4].



7. ábra. Az LMS-algoritmus blokkvázlata

A 7. ábrán látható az LMS blokkvázlata. Az ábrán lévő digitális szűrő és az LMS blokk együttesen egy adaptív szűrőt alkotnak. A bejövő $x(n)$ jelet szűri a $W(z)$ átvitelű digitális szűrő. A szűrő kimenete $y(n)$. Az algoritmus a szűrő súlyainak változtatásával próbálja minimalizálni $e(n)$ hibajelet a kimenet és az elérni kívánt $d(n)$ jel között. A rendszert a következő egyenletekkel írhatjuk le:

$$y(n) = \mathbf{w}^T(n) \cdot \mathbf{x}(n) \quad (3)$$

$$e(n) = d(n) - y(n) = d(n) - \mathbf{w}^T(n) \cdot \mathbf{x}(n), \quad (4)$$

ahol:

- $y(n)$: $d(n)$ becslője, az adaptív szűrő kimenete
- $\mathbf{w}(n)$: a $W(z)$ adaptív szűrő N db együtthatóit tartalmazó vektor, jelen esetben $W(z)$ FIR szűrő
- $\mathbf{x}(n)$: a referenciajel legutolsó N mintáját tartalmazó vektor
- $e(n)$: a hibajel, a valódi és a becslő jel különbsége
- $d(n)$: az adaptálandó jel
- ' n ': az adott változó n . időpontbeli értéke

Az LMS-algoritmus a hibanégyzet várható értékét minimalizálja. Ezért a \mathbf{w} szűrőegyütthatókat úgy állítja, hogy az adaptálandó és a becslő jel különbségének, vagyis a hibajel négyzetének pillanatnyi értéke csökkenjen. Tehát a következő egyenlet minimumát keresi:

$$e^2(n) = (d(n) - y(n))^2 = (d(n) - \mathbf{w}^T(n) \cdot \mathbf{x}(n))^2 \quad (5)$$

A szűrőnek elegendően hosszúnak kell lennie, hogy pontosan modellezze a fizikai rendszer választ. A \mathbf{w} szűrőegyütthatókat úgy módosítja az algoritmus, hogy a hibanégyzet az adott pillanathoz tartozó \mathbf{w} szerinti negatív gradiense irányába mozduljon el. A pillanatnyi gradiens kiszámítása:

$$\begin{aligned} \nabla(e^2(n)) &= \frac{\partial e^2(n)}{\partial \mathbf{w}(n)} = \frac{\partial (d(n) - \mathbf{w}^T(n) \cdot \mathbf{x}(n))^2}{\partial \mathbf{w}(n)} = \\ &= -2 \cdot [y(n) - \mathbf{w}^T(n) \cdot \mathbf{x}(n)] \cdot \mathbf{x}(n) = -2 \cdot e(n) \cdot \mathbf{x}(n) \end{aligned} \quad (6)$$

A minimumkeresést iteratív módon a legmeredekebb lejtő módszeréhez hasonlóan számítja az algoritmus, mely alapján $W(z)$ új együtthatói a következőképpen alakulnak:

$$\mathbf{w}(n+1) = \mathbf{w}(n) - \mu \cdot \nabla(e^2(n)) = \mathbf{w}(n) + 2 \cdot \mu \cdot e(n) \cdot \mathbf{x}(n), \quad (7)$$

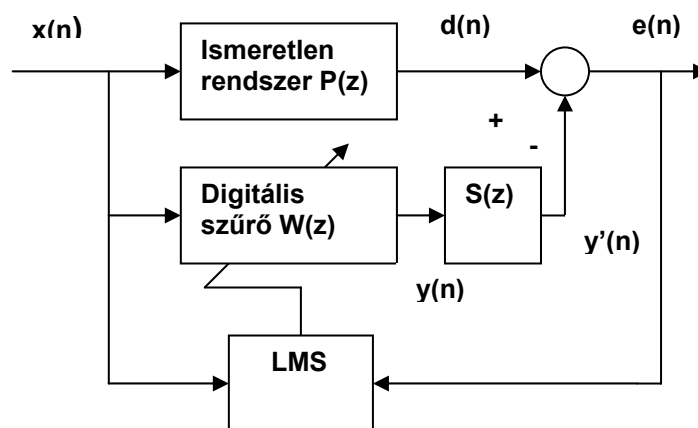
ahol:

- μ : bátorsági tényező

Ez az LMS-algoritmus. Megfelelő μ választása esetén a megoldás bizonyíthatóan az optimum felé konvergál. Az eljárásban a pillanatnyi becslés miatt a módosítás is nagyon pontatlan lesz, gyakorlatilag előfordul, hogy közel sem a negatív gradiens irányába mozdulunk el a hibafelületen. A pontatlan korrekciók időbeli sokasága azonban átlagolódik és eredőben az optimum felé vezet [4].

3.2. A másodlagos út hatása és az FXLMS-algoritmus ^{[1],[5]}

Amennyiben az LMS-algoritmust aktív zajcsökkentő rendszerekben használjuk, a 7. ábrán látható összegző csomópont a hangtérbeli akusztikus szuperpozíciót jelöli, ahol az adaptív szűrő kimenete és az elődleges zaj találkoznak. Ez az elrendezés nem veszi figyelembe a szűrő kimenetétől ($y(n)$) a hibajelig ($e(n)$) tartó átvitelt, amelyet másodlagos útnak neveznek. Stabilitási okokból ez az elrendezés nem használható közvetlenül zajcsökkentésre. A másodlagos úttal kiegészített LMS-algoritmus vázlata látható a 8. ábrán. A másodlagos út z-beli jelölése $S(z)$. Ez az átvitel magában foglalja a digitális-analóg (D/A) konverter, visszaállító szűrő, teljesítményerősítő, hangszóró átvitelét, valamint az akusztikus út átvitelét a hangszórótól a hibamikrofonig, a mikrofon előerősítő, az átlapolásgátló szűrő és az analóg-digitális (A/D) átalakító átvitelét.



8. ábra. Az LMS-algoritmus blokkvázlata kiegészítve a másodlagos úttal ($S(z)$)

Z-tartományban vizsgálva a hibajelét, a következő egyenlőséget kapjuk:

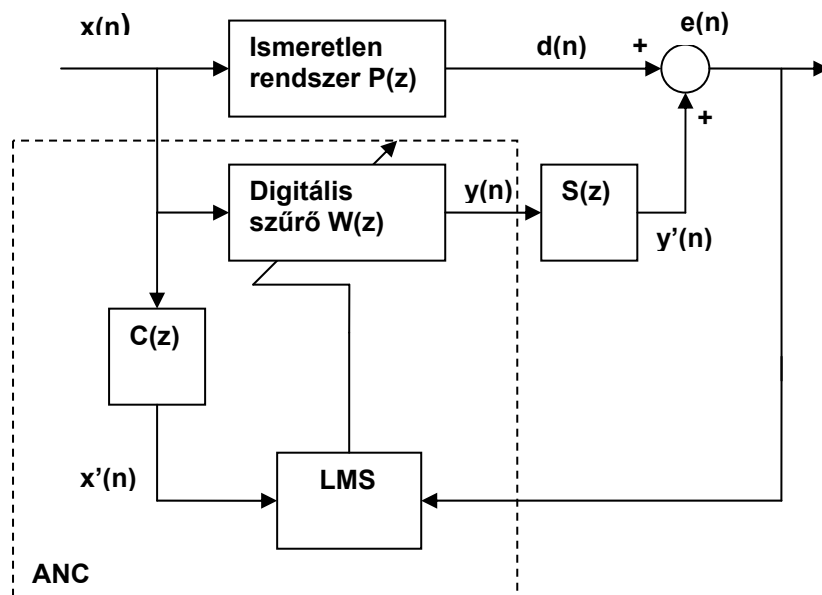
$$E(z) = [P(z) - S(z) \cdot W(z)] \cdot X(z) \quad (8)$$

Tételezzük fel, hogy működik az elnyomás, állandósult állapotban vagyunk és a maradó hiba ideálisan nulla. ($E(z) = 0$). Ekkor

$$W(z) = \frac{P(z)}{S(z)} \quad (9)$$

Vagyis az adaptív szűrőnek egyszerre kell modelleznie $P(z)$ -t és a másodlagos út inverzét. Ez a felépítés több problémát vet fel. Lehetetlen a feladat abban az esetben, ha $P(z)$ átviteli út nem tartalmaz legalább akkora késleltetést, mint $S(z)$. A szabályozási kör instabillá válik, ha létezik olyan ω frekvencia, amelyre $S(\omega)=0$, valamint hatástalan

abban az esetben, ha létezik olyan ω frekvencia, amelyre $P(\omega)=0$. A hagyományos LMS-algoritmust használó kontrollor általában instabil lesz, mivel a másodlagos út jelenléte miatt a hibajel nincs összehangolva a referencia jellel. A másodlagos út kompenzálására több javaslat is létezik [5]. Az egyik lehetséges megoldás egy inverz szűrő $1/S(z)$ elhelyezése a másodlagos úttal sorosan. A másik megoldás egy azonos átvitelű szűrő beiktatása a referencia jel útjába, úgy, hogy az hatással legyen az LMS-algoritmust végző egység működésére, azonban az adaptív szűrő számára ne súlyozza a referenciajelet. Ezt nevezzük szűrt (filtered) XLMS-algortmusnak vagy FXLMS-nek (9. ábra). $C(z)$ tag az $S(z)$ másodlagos út becselője. Általában ez a megoldás a leghatékonyabb megközelítés, mivel ahogy már említettem, $S(z)$ inverze nem feltétlenül létezik.



9. ábra. Az FXLMS-algoritmus blokkvázlata

Az FXLMS kimenő jele az adaptív szűrő kimenete az n . időpontban:

$$y(n) = \sum_{i=0}^{N-1} w_i(n) \cdot x(n-i). \quad (10)$$

A szűrőegyütthatók módosítása:

$$\mathbf{w}(n+1) = \mathbf{w}(n) - \mu \cdot e(n) \cdot \mathbf{x}(n) \cdot \mathbf{s}(n), \quad (11)$$

ahol $s(n)$ $S(z)$ impulzusválasza. Tehát $\mathbf{x}(n)$ -t szűrjük az $S(z)$ szűrővel, mielőtt beállítjuk az új együtthatókat. Gyakorlati alkalmazásokban azonban $S(z)$ ismeretlen, csak $C(z)$ -vel tudjuk becsülni. Ekkor:

$$\mathbf{w}(n+1) = \mathbf{w}(n) - \mu \cdot e(n) \cdot \mathbf{x}'(n), \quad (12)$$

ahol:

$$\mathbf{x}'(n) = \mathbf{c}^T \cdot \mathbf{x}(n) = \sum_{i=0}^{M-1} c_i \cdot x(n-i) \quad (13)$$

Vagyis az új együtthatók a következőképpen számíthatók:

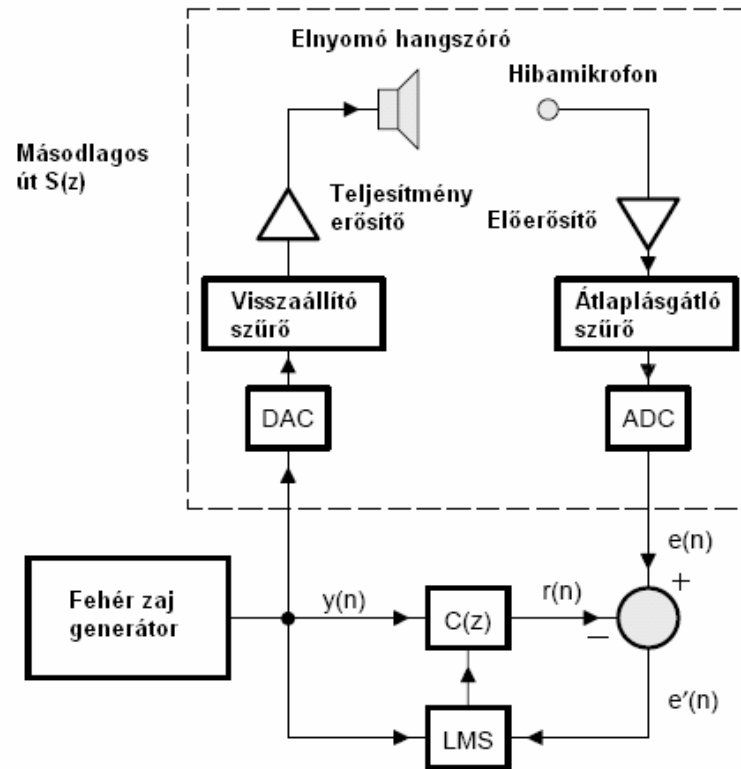
$$w_i(n+1) = w_i(n) + \mu \cdot e(n) \cdot x'(n-i) \quad i = 0, 1, 2, \dots, N-1 \quad (14)$$

Az FXLMS stabilitásának feltétele, hogy $C(z)$ az eredeti átviteli függvény fáziskarakterisztikáját adott frekvencián legalább 90° -os pontossággal megközelítse, de 40° -os eltérése belül már kielégítő a rendszer működése [5]. Fontos különbség az LMS-algoritmushoz képest, hogy a (12) kifejezésben összeg helyett kivonás szerepel. Ez azért van mert aktív zajcsökkentő rendszerekben a hibajel $e(n) = d(n) - y'(n)$, annak az egyszerű ténynek köszönhetően, hogy a hibajel akusztikus szuperpozíció, összeadás eredménye elektromos jelek kivonása helyett. $S(z)$ átviteli függvény ismeretlen és időben változó az alkatrészek paramétereinek változása (pl.: hangszóró öregedése), hőmérsékletváltozás, légáramlás megváltozása miatt. Emiatt vannak olyan aktív zajcsökkentő rendszerek, ahol on-line mérik a másodlagos utat. $S(z)$ viszonylagos állandósága és az algoritmus robusztussága miatt erre nincs mindig szükség. Sokszor elegendő a zajcsökkentés megkezdése előtt mérni, majd a mérés után fixálni a becslés eredményeként kapott $C(z)$ szűrőt. Ha nem változnak lényegesen a fentebb említett paraméterek, akkor akár egy korábban identifikált másodlagos átviteli út betöltése is elegendő lehet.

3.2.1. Off-line identifikáció

Az FXLMS-algoritmus alkalmazásához a másodlagos út átviteli függvényének identifikációja szükséges. Az off-line identifikáció, az általam épített rendszerben LMS alapú és a 7. ábrának megfelelő struktúra. A másodlagos út az $S(z)$ átviteli csatornának felel meg. A gerjesztő jelnek olyannak kell lennie, hogy a zajcsökkentésben használt frekvenciatartományon le tudjuk mérni a csatornát.

A 10. ábrán látható az off-line modellezés blokkvázlata.



10. ábra. Off-line másodlagos út identifikációja LMS-algoritmussal

Off-line identifikáció lépései:

1. Fehérszaj minták generálása és kiadása $y(n)$ kimenetre, az elnyomó hangszóróra. A generált zajminták a bemenetei a szűrőegyütthatókat állító LMS-algoritmussal és a $C(z)$ adaptív szűrőnek is.
2. Másodlagos út válaszában beolvasása a hibamikrofonról ($e(n)$)
3. Az adaptív modell válaszában kiszámítása ($r(n)$):

$$r(n) = \sum_{i=0}^{M-1} c_i(n) \cdot y(n-i), \quad (15)$$

ahol $c_i(n)$ az M -ed rendű $C(z)$ adaptív szűrő i . együtthatója az n . időpillanatban.

4. A különbség számítása:

$$e'(n) = e(n) - r(n) \quad (16)$$

5. A $C(z)$ együtthatóinak frissítése az LMS-algoritmussal:

$$c_i(n+1) = c_i(n) + \mu \cdot e'(n) \cdot y(n-i), \quad i = 0, 1, 2, \dots, M-1 \quad (17)$$

μ a bátorsági faktor, melynek ki kell elégítenie a stabilitási kritériumot:

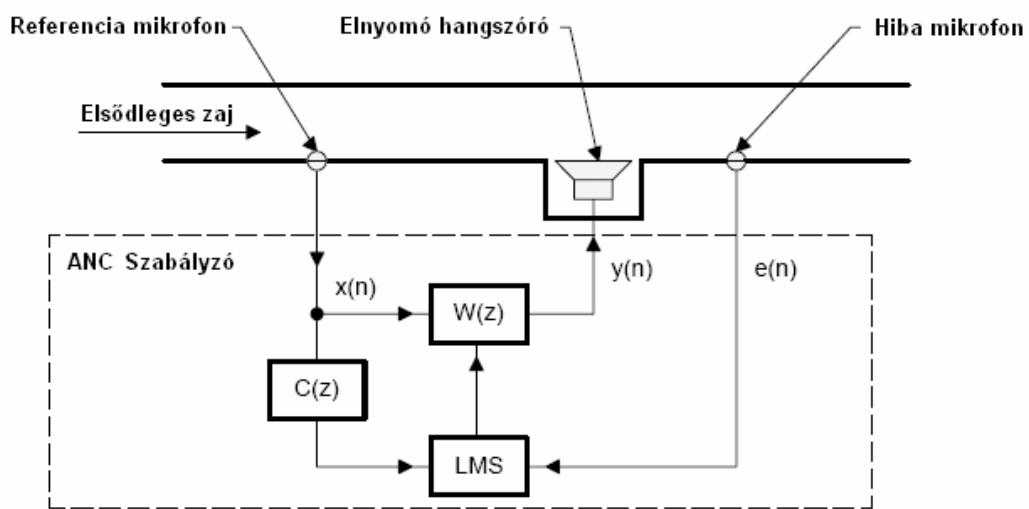
$$0 < \mu < \frac{1}{M \cdot P_y}, \quad (18)$$

Ahol P_y a generált fehér zaj ($y(n)$) teljesítménye.

6. Az eljárást addig kell ismételni, amíg $C(z)$ együtthatók már elfogadhatóan becslik $S(z)$ -t. Ez a gyakorlati alkalmazásoknál körülbelül 10 másodperc.

3.2.2. On-line modellezés

Amikor az off-line identifikálás befejeződött, a rendszer készen áll az aktív zajelnyomásra. Ennek vázlatát látható az 11. ábrán.



11. ábra. Aktív zajcsökkentés az FXLMS-algoritmus használatával

Az FXLMS-algoritmus lépései:

1. A referenciajel ($x(n)$ a referenciamikrofonról) és a hibajel ($e(n)$ a hiba mikrofonról) beolvasása.
2. Ellenzaj számítása ($y(n)$):

$$y(n) = \sum_{i=0}^{N-1} w_i(n) \cdot x(n-i), \quad (19)$$

ahol $w_i(n)$ az N -ed rendű $W(z)$ adaptív szűrő i . együtthatója az n . időpillanatban.

3. Az ellenzaj kiadása ($y(n)$) az elnyomó hangszóró meghajtásához.
4. A bemenő jel ($x(n)$) szűrése a másodlagos út becslőjével:

$$x'(n) = \sum_{i=0}^{M-1} c_i(n) \cdot x(n-i) \quad (20)$$

5. A $W(z)$ együtthatóinak frissítése az LMS-algoritmussal:

$$w_i(n+1) = w_i(n) + \mu \cdot e(n) \cdot x'(n-i), \quad i = 0, 1, 2, \dots, N-1 \quad (21)$$

6. Az iteráció következő lépése, ugrás az 1. pontra

3.3. Az FXLMS kiterjesztése

3.3.1. Leaky FXLMS ^[7]

Fixpontos processzorokon a kerekítési pontatlanságból adódó zaj visszacsatolódik a szűrő együtthatókba és akkumulálódik. Ez a szűrősúlyok túlsordulásához vezethet, ami csökkenti a szűrés pontosságát. A probléma megoldására az egyik lehetséges megoldás egy konstans szorzó beiktatása az FXLMS-algoritmusba, amely a szűrő súlyait úgy módosítja, hogy azok értéke minden iteráció után kisebb legyen („szivárogon” nullához).

$$\mathbf{w}(n+1) = \nu \cdot \mathbf{w}(n) - \mu \cdot e(n) \cdot \mathbf{x}'(n), \quad (22)$$

ahol ν egynél alig kisebb szám. Megfelelő ν választása esetén az együtthatók szivárgása megoldást jelenthet a telítésének elkerülésére. Azonban a felejtés miatt az algoritmus maradék hibája megnő, és a zajcsökkentés kevésbé lesz hatásos.

3.3.2. Az akusztikus visszacsatolás kiküszöbölése ^[8]

Az előrecsatolt ANC rendszerben a másodlagos forrás által kibocsátott kioltó hang a referenciamikrofonhoz visszajutva visszacsatolást létesít a rendszerben. A probléma kompenzálására sokféle megoldás létezik (irányított hangszórók és mikrofonok használata, kétmikrofonos referenciaérzékelés, IIR adaptív szűrő alkalmazása). Az FXLMS alapú megoldás a következő: jelölje $F(z)$ az adaptív szűrő kimenetétől a referenciamikrofonig terjedő átviteli utat. A kontrolleren belül beiktatunk egy új szűrőt ($D(z)$) amely az adaptív szűrő kimenőjelét szűri és a kapott jelet kivonja a referenciajelből. Ha $D(z)$ az $F(z)$ pontos becslője, akkor a referenciajelből kiküszöböli a visszacsatolás hatását. A $D(z)$ átviteli út lemérése hasonlóan történik a korábban ismertetett másodlagos út méréséhez, célszerű a két mérést egy időben, ugyanazzal a fehérzaj jellel végezni.

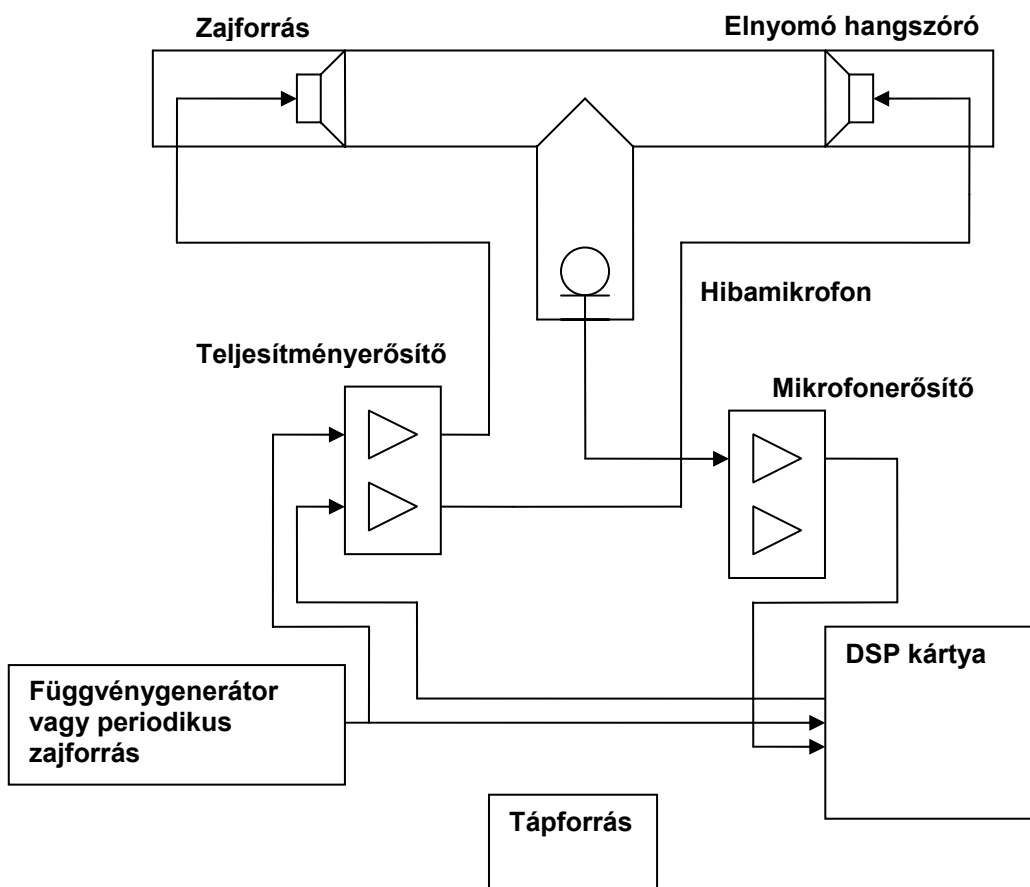
4. Bemutató aktív zajcsökkentő eszköz rendszerterve

Ahhoz, hogy aktív zajcsökkenést előidézzünk, és közönség számára hallhatóvá tegyünk, több járulékos eszközre van szükség. Feladatom kiindulási pontja, hogy a megvalósítandó eszköz demonstrációs célokat szolgáljon. A megvalósítandó eszközöknek esztétikusnak, könnyen és értelemszerűen kezelhetőnek és a lehetőségekhez képest hordozhatónak kell lennie. Az előzetes rendszerterv elkészítésékor ezeket a szempontokat figyelembe kellett venni az aktív zajcsökkentéshez szükséges számítási teljesítmény és pontosság mellett. A kialakított struktúrának, amely alatt a zajforrás, az elnyomó hangszóró és a mikrofonok elhelyezkedését értem, olyannak kell lennie, hogy megfelelő hangerőt biztosítson a jó hallhatóság érdekében valamint, figyelembe kell vennie a jó hatásfokú zajelnyomáshoz szükséges akusztikai viszonyokat. A következő fejezetekben ismertetem a rendszer tervezése során felmerült kérdéseket és problémákat, az azokra adott válaszokat és megoldásokat.

Választásunk a legegyszerűbb kísérleti aktív zajcsökkentő rendszerre, az egy dimenziós előrecsatolt struktúrára (2. ábra) esett. Ennél érhető el a legnagyobb elnyomás és ehhez kell a legkevesebb eszközt felhasználni, ami a bemutató célokat szolgáló berendezés hordozhatósága szempontjából fontos. Szabad térben a zajelnyomás a hibamikrofon néhány 10 cm-es környezetére korlátozódik, és a különböző visszaverődésekből adódó fázistolások miatt jelentősen csökkenhet a hatékonysága. A biztos siker érdekében a zajelnyomáskor számunkra fontos akusztikus teret célszerű volt előre kijelölni. Ez nem jelent mást, minthogy a zajelnyomást egy zárt (csak egy végén nyitott) csőben valósítottam meg. Egy ilyen cső a gyakorlati alkalmazásokban szellőzőrendszernek vagy kipufogónak lehet a modellje. Felmerült, hogy az elnyomandó zaj egy kellően hangos ventilátor legyen a cső egyik végén, mivel ez modellezné legjobban az ipari berendezéseket. Ez a megoldás azonban nem jelentene elég szabadságot a zajcsökkentő rendszerek kipróbálásához. Így mind az elnyomandó zajforrás, mind az elnyomó hang egy-egy kellően nagy teljesítményű hangszóró lett. A rendszer látványossá tétele miatt úgy döntöttem, hogy a cső átlátszó lesz. A szóba jöhető anyagok közül a plexi (polimetil-metakrilát, akril üveg) bizonyult a legjobb választásnak. Megfelelő a sűrűsége és szilárdsága, tehát akusztikus impedanciája nagy és beszerezhető volt kellő vastagságú kivitelben. Ez azért fontos, hogy a keletkező hang lehetőleg minél kevésbé

sugározzon a cső oldalfalán. A megvalósított rendszer a cső átmérője, és keresztirányú geometriája által meghatározott első keresztirányú módus frekvenciája alatti tartományban képes hatékony zajcsökkentésre [3].

A járulékos hardver eszközök megtervezésénél a legfontosabb szempontok a teljesítmény, a rendszerbe integrálhatóság és a hordozhatóság voltak. Ezek bővebben a 4. fejezetben kerülnek ismertetésre. Az előzetes rendszertervezés során a vezérlő program futtatására választásunk az Analog Devices ADSP BF537 EZ-KIT Lite nagyteljesítményű DSP kártyájára esett, melynek bővebb leírása a 6. fejezetben olvasható. A kártya kiválasztásánál fontos szempont volt, hogy a kártyából több példány rendelkezésre áll a laboratóriumban, melyekből egy darab általában nélkülözhető a bemutató megtartásához. A rendszer a zajjelet kívülről kapja, tehát igényel még egy járulékos eszközt, amely meghajtja a zajforrást, illetve referenciajelet szolgáltat a DSP számára. Ezt függvénygenerátor felhasználásával oldottam meg, de a szoftver, illetve a DSP kártya audio bemenetei lehetőséget adnak bármilyen zajforrás alkalmazására (pl.: zaj mp3 lejátszóról). A rendszer blokkvázlata a zajcsökkentéshez szükséges eszközökkel a 12. ábrán látható.



12. ábra. Bemutató ANC rendszer blokkvázlata

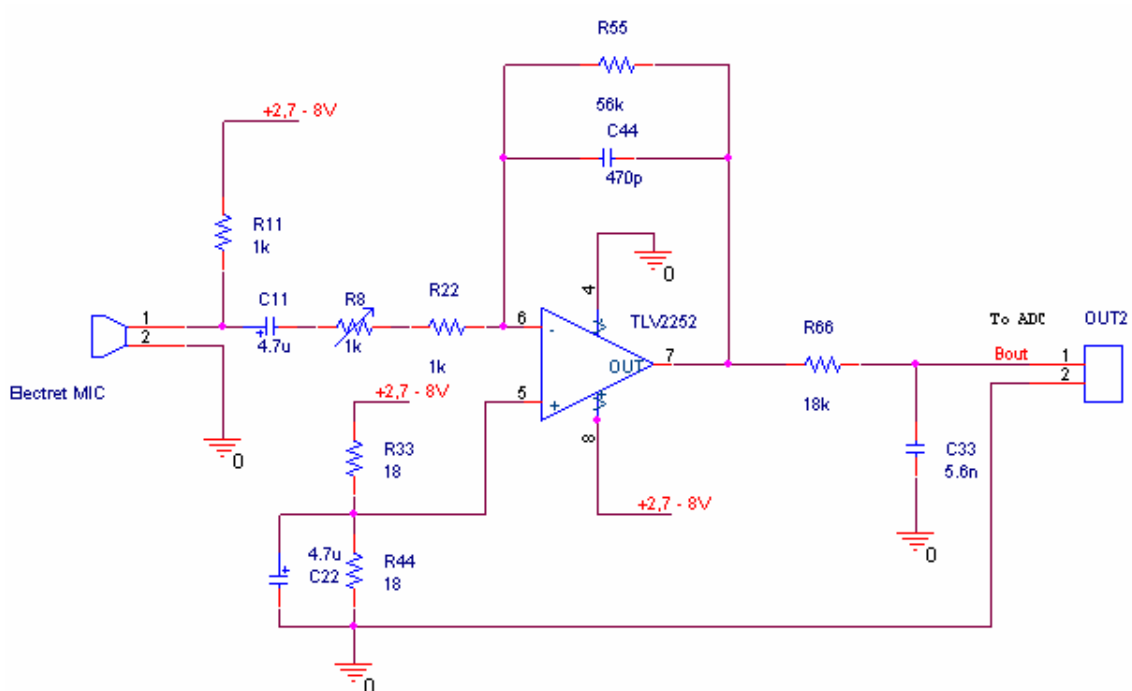
5. A megtervezett és megépített hardver eszközök

Az aktív zajcsökkentő rendszer sikeres működése erősen függ az alkalmazott és vett jelek erősségétől. Ezért fontos szempont volt, hogy a mikrofon előerősítő kimenő jelének szintje szabályozható legyen. Hasonlóan fontos, hogy a teljesítményerősítés is szabályozható legyen.

Mindkét kártyát az OrCad 9-es program segítségével terveztem. Első lépésként áramköri kapcsolást kellett elkészíteni a Capture programrészben. A kapcsolásból a program netlistát generál, amely az egyes alkatrészek összekötését és tokozását tartalmazza. Ezután következett a huzalozás a Layout szerkesztőben.

5.1. Mikrofon előerősítő

A 13. ábra mutatja az előerősítő áramkör kapcsolását. A kapcsolást a függelékben található leírások [9][10] segítségével terveztem.

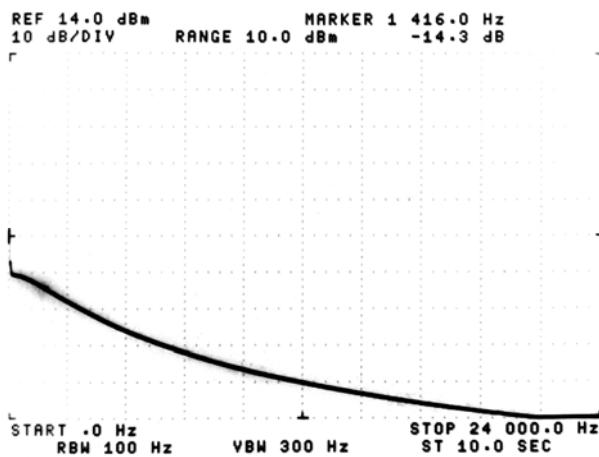


13. ábra. Mikrofonerősítő áramköri kapcsolása

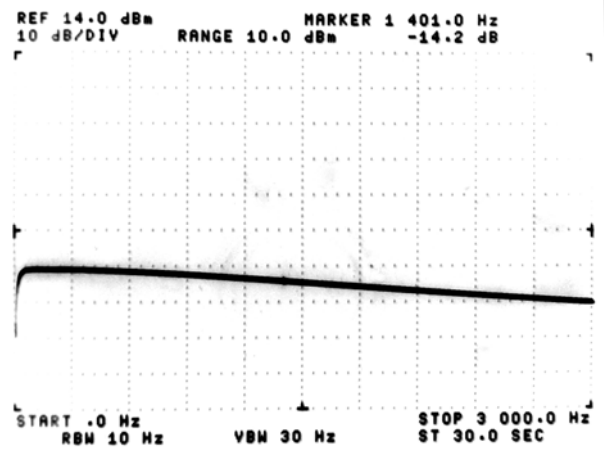
Az elektrét mikrofon veszi a zajt és konvertálja elektromos jellé. A felhúzó ellenállás végzi a mikrofon előfeszítését. Az áramkör alapja a Texas Instruments által gyártott TLV2252 műveleti erősítő [10]. A TLV2252 egy kisműködésű kis teljesítményű 2 csatornás műveleti erősítő. Kiválasztásánál fontos szempont volt, hogy képes 2,7 V

tápfeszültségről üzemelni, kis áramfelvétellel. Ez lehetővé teszi a táplálását 2 db ceruzaelemről, így a mikrofonerősítő doboz nem igényel külön tápforrást. A kimeneten található RC tag sávkorlátozza a felerősített zajjelet. A törésponti frekvenciája 1570 Hz. A visszacsatolásban lévő C4 kondenzátor is csökkenti a nagyfrekvenciás komponensek amplitúdóját. Az erősítőt invertáló kapcsolásban használok, a feszültségerősítési tényező a maximális esetben 56-szoros, az erősítés potenciométerrel szabályozható véghelyzetében 5-szörös feszültségerősítésig. A beállítható erősítéssel az A/D átalakító telítése és a DSP-ben esetlegesen jelentkező véges számábrázolási pontosság miatti telítés elkerülhető. A két csatorna felépítése teljesen azonos. Az alapkonfigurációban az egyik csatorna a hibajel felvételét végzi, a másik kihasználatlan, mivel a referenciajelet a függvénygenerátorról vesszük. A két csatorna miatt lehetőség van a külső referencia használatára. Ekkor a második erősítő csatorna veszi a referenciajelet, a mikrofont célszerű a zajforrást képező hangszóró közvetlen közelében elhelyezni az akusztikus visszacsatolás kiküszöbölése érdekében (lásd: 3.3.2. fejezet).

Az előerősítő átvitele a hangfrekvenciás tartományban (14. ábra) és az rendszer által használt frekvenciatartományban (15. ábra) a következő: Az átviteli függvényen jól látható a kimeneti R-C tag szűrő hatása.



14. ábra. Mikrofonerősítő átvitele 0-24 kHz



15. ábra. Mikrofonerősítő átvitele 0-3 kHz

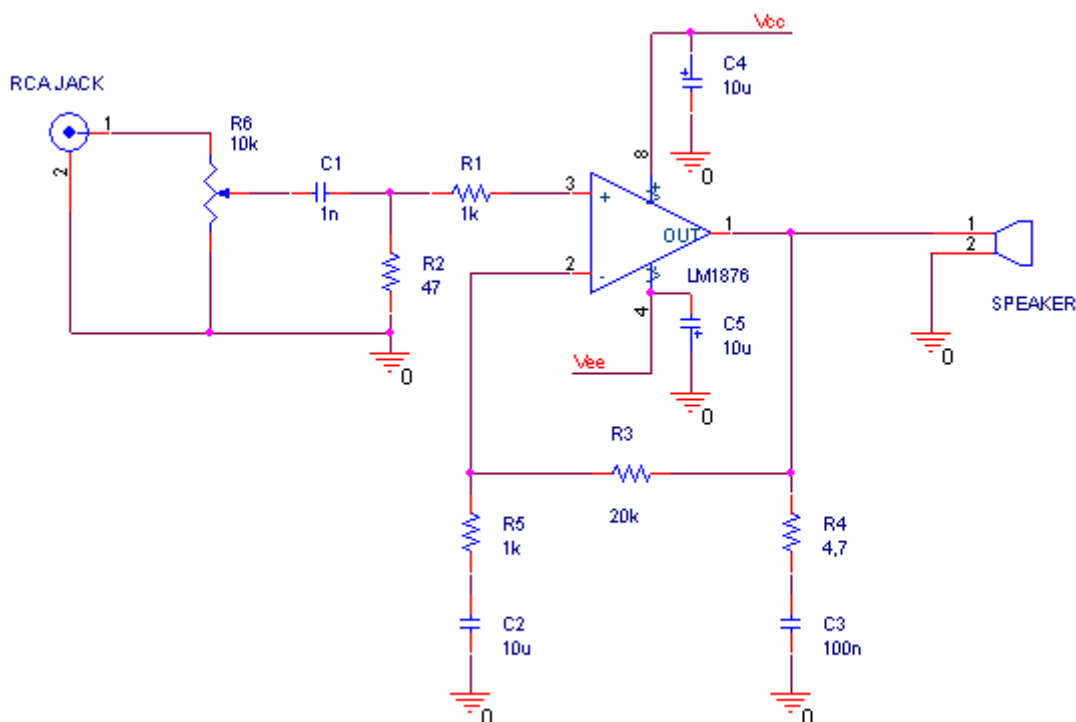
5.2. Teljesítményerősítő

A zajcsökkentés demonstrációja akkor kellően hatásos, ha az elnyomandó zaj teljesítménye megfelelően nagy, tehát elég hangos a zaj. A megvalósított rendszer szimmetrikus felépítése miatt az elnyomó hangszóróból kijövő hangteljesítménynek legalább akkorának kell lennie, mint a zajforrásként szolgáló hangszóróból kijövő hangteljesítménynek, zajelnyomásakor a kettő megegyezik. Tapasztalataink alapján a 15W zenei teljesítmény már kellő hangerőt tud biztosítani a demonstrációhoz. Az átfogandó frekvenciatartomány az 50 Hz – 3000 Hz. A felső határ a 6000 Hz-es mintavételi frekvenciából adódik. A frekvencia alsó korlátját a kiválasztott hangszóró átvitele adja, amely az adatlap alapján 60 Hz-től 20 kHz tartományban képes hang kiadására. A mérési tapasztalatok alapján az alsó határ 50 Hz. A erősítő tervezésénél az is szempont volt, hogy a laborban egyéb kísérletek céljára is felhasználható legyen, így legkézenfekvőbb megoldás egy általános célú audio erősítő megépítése volt.

Mivel a két hangszórót kell meghajtani, így két erősítőre volt szükség, összesen körülbelül 30 W teljesítménnyel. A könnyen beszerezhető általános audio erősítők kínálatának áttekintése után választásom a National Semiconductor LM1876-os erősítőjére esett [11]. A választás során szempontjaim a következők voltak:

- Sztereó erősítő, tehát mindkét hangszóró meghajtása lehetővé válik egy IC segítségével.
- Csatornánként 20 W teljesítmény
- 4 és 8 Ω -os terhelést is képes meghajtani.
- Beépített védelmek
 - Ha a hőmérséklet átlépi a működési tartományt, az IC lekapcsol. Helyreáll a működés, ha a hőmérséklet visszaesik normál szintre.
 - Be- és kikapcsoláskor a kimenet tranziensekkel szembeni védelme
 - Túlfeszültség-védelem
 - Speciális ún. SPiKe protection áramkör, amely a biztonságos működési tartományon (SOA) belül tartja az IC-t.

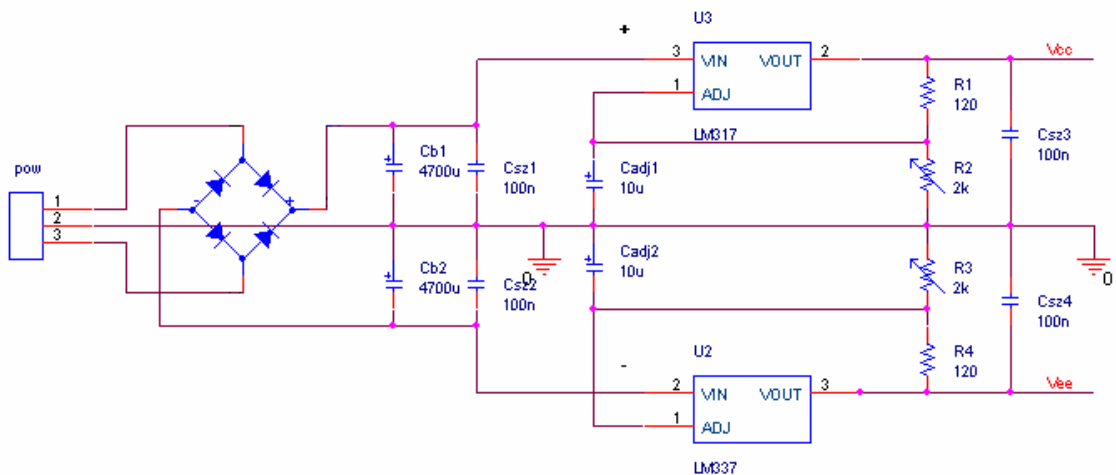
A beépített védelem hatékony működéséről az IC végleges beültetése előtt teszteléssel is meggyőződtem.



16. ábra. Teljesítményerősítő áramköri kapcsolása

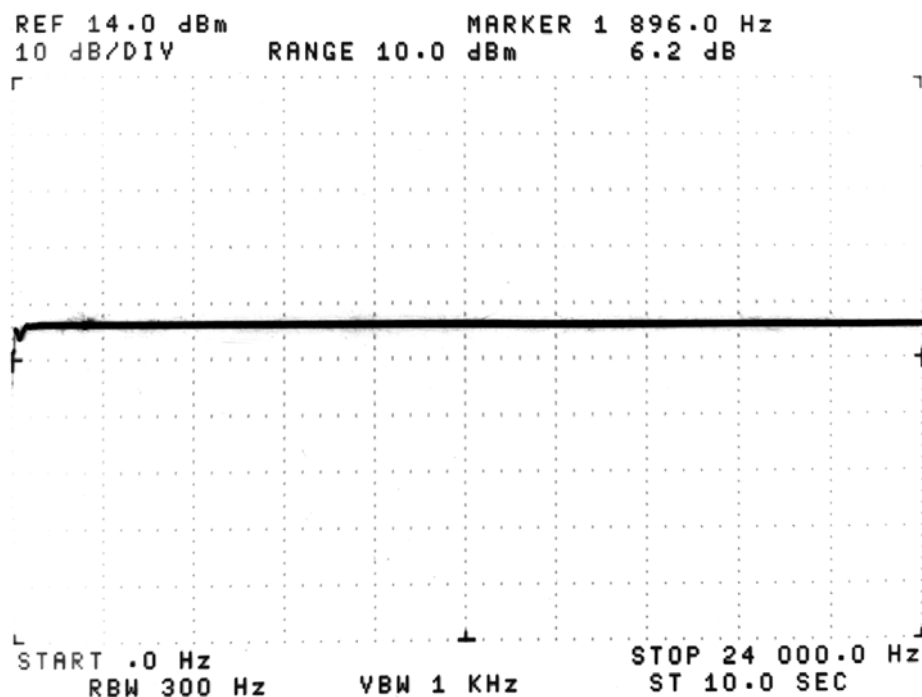
A 16. ábrán látható a teljesítményerősítő egyik csatornájának áramköri kapcsolása. A két csatorna megegyezik. A teljes kapcsolás a függelékben található. A tervezés az IC adatlapjában [11] található kiegészített erősítő alkalmazás áramkör alapján történt. A neminvertáló erősítés mértékét az R5, R3 ellenállások arányával lehet beállítani. C1 kondenzátor és R2 ellenállás a bemenő jel DC leválasztását és az erősítő bemenőellenállását határozzák meg. R4 és C3 a kimenet nagyfrekvenciás stabilizálását valósítják meg, R5 és C2 együtt nagyfrekvenciás szűrőt képeznek. A C4 és C5 elektrolit kondenzátorok a tápfeszültség alacsony frekvenciás szűrése miatt fontosak. Velük párhuzamosan 100 nF-os kondenzátorok vannak az IC lábaihoz közel elhelyezve, a nagyfrekvenciás gerjedések megakadályozására.

Az LM1876 IC szimmetrikus tápellátást igényel. A működéshez szükséges tápfeszültség +/-10 V és +/-32 tartományba esik. A jelenlegi kapcsolásban elérhető 15W teljesítmény eléréséhez 8 Ω terhelés esetén +/-22 V tápfeszültség szükséges. Az IC tápellátását úgy oldottam meg, hogy a teljesítményerősítő működhet megfelelő feszültségű és áramú szimmetrikus tápegységről, de lehetőség van 25 V-ra letranszformált váltakozófeszültségű üzemeltetésre is. A tápfeszültséget stabilizáló és szűrő áramkör a 17. ábrán látható.



17. ábra. Tápfeszültség stabilizáló és szűrő áramköri kapcsolása

A bejövő tápáramot a Graetz-híd egyenirányítja, ezután a két 4700 μF -os kondenzátor simítja és pufferelem. Az LM317 IC állítható pozitív feszültségstabilizátor, szimmetrikus párja az LM337 pedig negatív. Mindkettő 1,5 A maximális áramot képes leadni. A kimenő feszültségük beállítása az Adjust bemeneten, két ellenállás segítségével történik. A jelenlegi konfigurációban $V_{ee} = -22\text{ V}$, $V_{cc} = 22\text{ V}$, amennyiben a bemenőfeszültség legalább $\pm 25\text{ V}$. Az LM337 és LM317 adatlapját lásd a [12] és [13] referenciákban. A teljesítményerősítőnél figyelni kellett a tápellátásért felelős stabilizátorok és az erősítő szeparálására. A földpontot az IC számára a stabilizátorok lába jelenti. A föld- és tápvezetékek, valamint az erősítő kimeneteinek felületét a lehető legkisebb ellenállás elérése érdekében megnöveltem. Mindkét áramkör dobozba került, így a NYÁK méretét annak méreteihez kellett igazítani. Az erősítő IC és a stabilizátorok megfelelő hűtését is meg kellett oldani, így azokat úgy helyeztem el a NYÁK-on, hogy a doboz falához könnyen hozzáragaszthatók legyenek. A hűtőborda a doboz falára van ráerősítve, a felületek közti megfelelő hőátadásról szilikonos hővezető paszta gondoskodik. Az erősítő átvitele a hangfrekvenciás tartományban a következőképpen alakul:



18. ábra. Teljesítményerősítő átvitele 0-24 kHz

A mérést 10-edére leosztott erősítéssel, 8 Ω -os terheléssel végeztem, az így adódó 2,1-szeres feszültségerősítési tényezőhöz tartozik a 6 dB erősítés. A 3 dB-es felső törésponti frekvencia 140 kHz, az alsó pedig 20 Hz-nél van. Az erősítés a használt tartományban kis ingadozású, egyenletes.

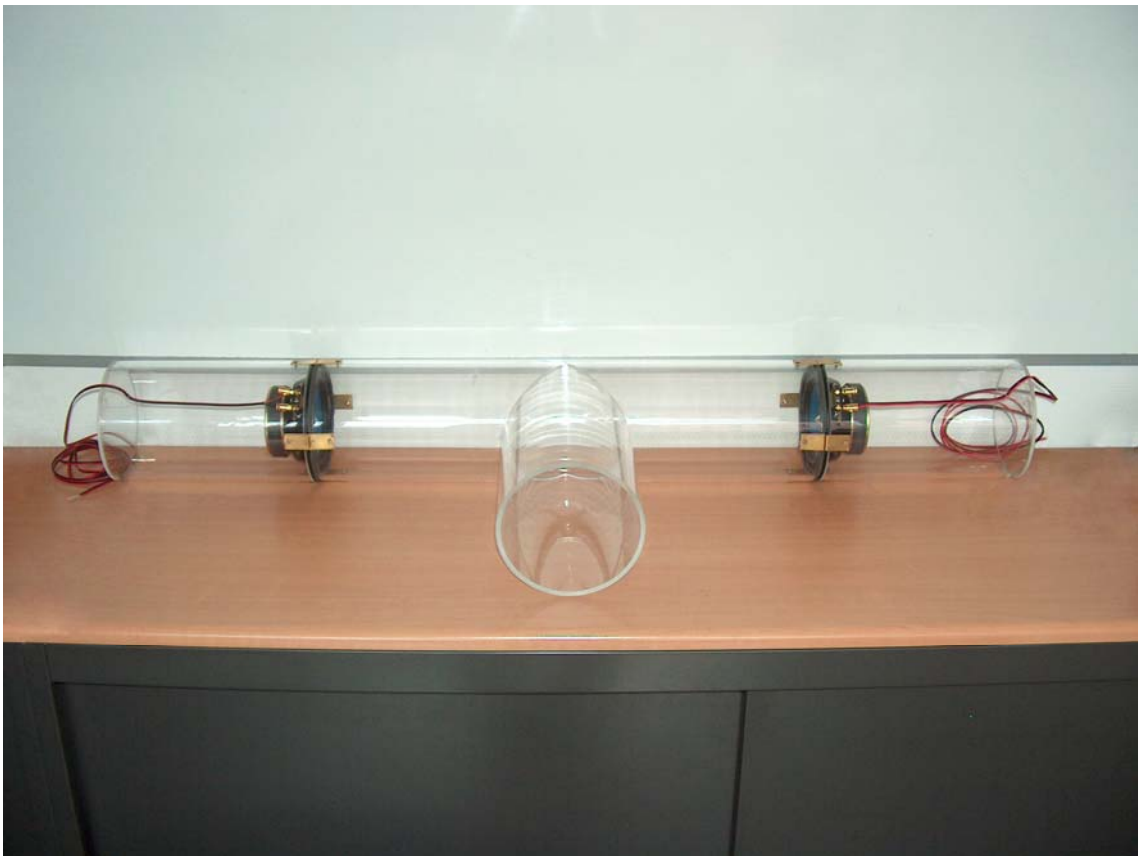
5.3. Akusztikus rendszer

Az akusztikus rendszer tulajdonképpen a hangszórókat tartalmazó, plexicsőből kialakított szerkezet. A zajforrásként szolgáló és az ellenzajt adó hangszórók lehetséges elhelyezésének mérlegelése után, a „T” alakú elrendezés tűnt a legjobb megoldásnak. A két hangszóró egymással szemben helyezkedik el a cső két végén, a „T” szára nincs lezárva, ide rögzíthető a hibamikrofon. A cső méretének meghatározásánál kompromisszumot kellett kötni a viszonylag kis méret és a kellően nagy hangerő között. Túl hosszú és nagy átmérőjű cső nehezen hordozható, ezért nagyjából 1,5 méteresnél hosszabbra nem volt célszerű méretezni. A hangszóró és a cső kiválasztásánál fontos esztétikai szempont volt, hogy a hangszóró külső peremének átmérője megegyezzen a cső külső átmérőjével. Emiatt a hangszóró mérete meghatározta a cső átmérőjét. 15 cm átmérőben mindkettő rendelkezésre állt és egy ekkora átmérőjű hangszóró már elegendő

hangteljesítmény leadására képes. A cső, amelyre a hangszórók rögzítve vannak, 60 cm, a „T” szára 30 cm hosszú. A két csődarab illesztését házilag kellett megoldani, mivel a profil kivágását nem vállalta el a piacon résztvevő egyetlen cég sem. Erről a műveletről a függelékben található leírás.

A hangszórók hátrafelé is sugározzák a hangot, ezzel pedig a csövön belül létrejövő elnyomás kifelé mutatott hatásfokát jelentősen lerontanák. Ezért a hangszórók mágnes felőli oldalát le kellett zárni. A lezárás célszerűen a cső meghosszabbítása egy kellően merev körlappal lezárva. A lezárás úrtartalmának elég nagyra kell lennie, mivel a bent lévő levegő összenyomásához és kitágításához szükséges erő a hangszóró membránjának szabad mozgását gátolja, ez a hangnyomás és a hatásfok csökkenéséhez vezet. A hangszóró által végzett térfogati munka annál kisebb, minél nagyobb térfogatú a lezárás. A lezárás mindkét hangszórónál 25 cm hosszú csődarab, melyek a végükön plexiből kivágott körlappal vannak bezárva.

A hangszórók elhelyezkedése a csőben, a lezárások és a hangkimenet a 19. ábrán látható.



19. ábra. A demonstrációt szolgáló akusztikus rendszer

6. A felhasznált hardver és szoftver eszközök

6.1. ADSP BF537 EZ-KIT Lite

Az előzetes rendszertervezés során a választás az Analog Devices ADSP BF537 EZ-KIT Lite nagyteljesítményű DSP kártyájára esett. A kártyán az Analog Devices Blackfin BF537 fixpontos, 600 MHz-es processzora található [14]. A kártya USB porton csatlakozik a PC-hez. A kártya tartalmaz egy AD1871 sztereo DA-átalakítót és egy AD1854 sztereo AD-átalakítót, amelyek 48 kHz mintavételi frekvencián üzemelnek. A bemenő jeleket 24 bites kettes komplementes kóddá konvertálja a szigma-delta elven működő AD-átalakító. Ezt kódot a processzor soros vonalon kérheti le. A DA-átalakító pedig a processzortól sorosan küldött 24 bites számokat, szintén szigma-delta modulációval alakítja analóg jellé. Mindkét konverter jelei sztereo jack aljzatokra vannak kivezetve. A kártyán 4 db általános célú nyomógomb található, amelyekkel lehetőség nyílik a processzor számára megszakítást generálni. A gombok mellett 6 db LED kapott helyet, melyek a processzor általános I/O lábaira vannak kötve. A LED-ek és nyomógombok használata lehetőséget ad egyszerűbb beavatkozásokra és a futó program állapotának monitorozására.. A kártya sok más funkcionális egységet tartalmaz, ezek a feladatom szempontjából nem lényegesek.

6.2. A BF537 jelfeldolgozó processzor ^{[14],[15]}

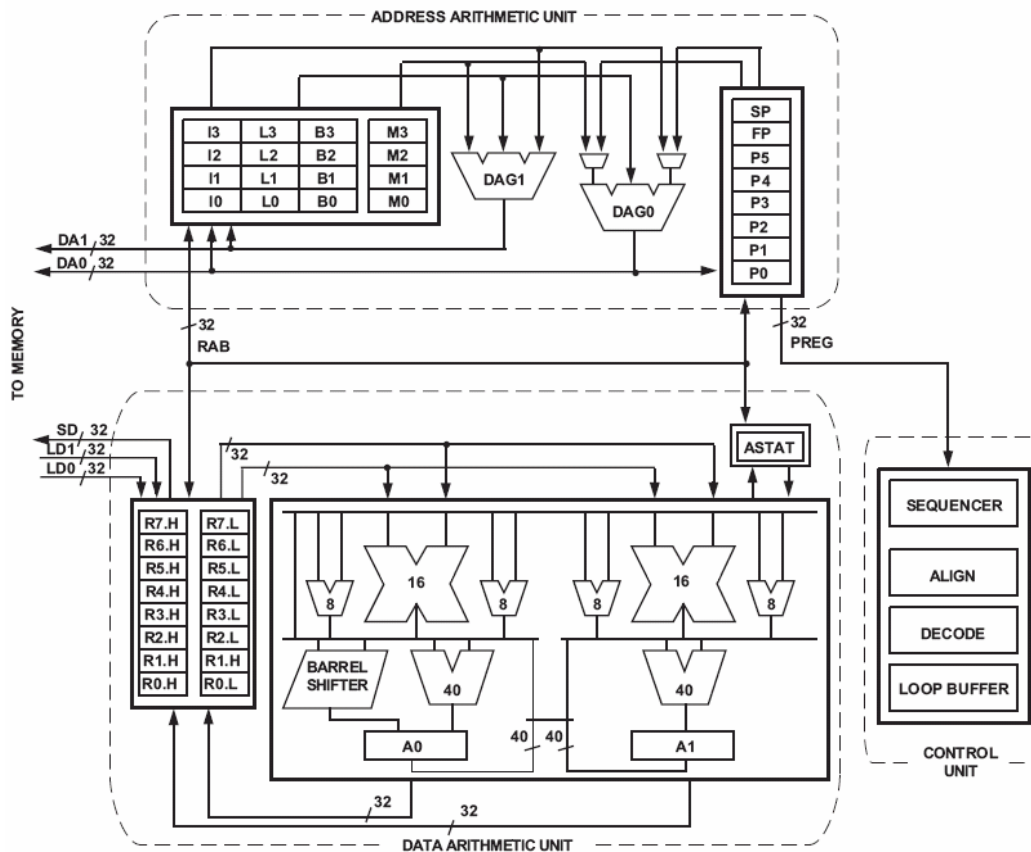
A BF537 a Blackfin processzorcsalád tagja. Kód- és lábkompatibilis a BF534 és BF536 típusokkal. A processzor főbb jellemzői:

- Módosított Harvard-architektúra: ez azt jelenti, hogy a memória két részre van felosztva. Az egyik része az adatmemória, a másik pedig a programmemória. Míg az adatmemória csak adatokat tartalmazhat, a programmemória a programkód mellett adatokat is tartalmaz. Ez a szervezés lehetővé teszi, hogy egy utasításciklus alatt egyszerre két adatszóhoz férjünk hozzá. Például FIR szűrés esetén a bemenő adatokat és a szűrőegyütthatókat célszerű külön memóriaterületen tárolni.

- Összesen 132 kbyte on-chip SRAM, amely a processzor órajelén működik. Ez valósítja meg a Harvard-architektúrát. 48 kbyte programmemóriát és 64 kbyte adatmemóriát tartalmaz.
- Fixpontos jelfeldolgozás, 600 MHz órajelfrekvencia.
- Párhuzamosan működő 2 db 16 bites MAC műveleti egység, 2 db 40 bites akkumulátor. A MAC jelentése Multiply and Accumulate. Ez egy olyan modul, amely lehetővé teszi a szorzatintegrálás egy utasításciklusban történő végrehajtását. Egyszerre szorzást végez, és az előző szorzás eredményét hozzáadja az eredményhez. Ezzel a művelettel elsősorban a transzverzális szűrők megvalósítását és más jelfeldolgozó algoritmusokat (pl. Fourier transzformáció) tehetünk gyorsabbá.
- 8 db 32 bites általános regiszter, melyek mindegyike kezelhető 2*16 bitesként.
- 2 db független címaritmetikai egység
 - 4 db cirkuláris buffer kezelése
 - 8 db általános pointer regiszter.
- 8, 16, 32 bites adatok.
- 16, 32 bites utasítások.
- Debug funkciók, teljesítménymonitorozás és nyomkövetés lehetősége a JTAG interfészen keresztül.
- RISC utasításkészlet, rövid kódot eredményező utasítások.

A processzor műveletvégző és címaritmetikai egysége a 20. ábrán látható.

Cirkuláris bufferek a B0...3, L0...3, I0...3 és az M0...3 regiszterekkel valósíthatók meg. A B báziscím tárolja a buffer kezdőcímét, a hozzá tartozó hosszat L. A léptetés értékét az M (modify) regiszterben kell megadni, I tárolja az aktuális memóriacímét, értéke léptetéskor M regiszter értékével változik. Az indirekt címzésre a P0...5 regiszterek használhatók.



20. ábra. A Blackfin processzor műveletvégző és címaritmetikai egysége

6.3. VisualDSP++

A DSP programozása a VisualDSP++ integrált fejlesztőkörnyezettel történt. A fejlesztői környezet tartalmaz egy editort, amelyben a forrásfájlok szerkesztése történik. A forrásfájlok szerkesztése történhet C, C++ és assembly nyelven. Ezek vegyesen, egymásba ágyazva is használhatóak. A program másik fontos része a debugger, amely segítségével kipróbálhatóak és tesztelhetőek a DSP-re írt programok. A debugger tartalmaz egy szimulátort, amellyel a processzor működését a személyi számítógépen szimulálni lehet. Ez a szimuláció a processzor minden részletére kiterjed, így a várható működés vizsgálható. Természetesen a perifériák szimulálása nincs megoldva, így ennek a használhatósága korlátozott. A debugger másik fontos része az emulátor. Ennek használatához szükség van a DSP-re is. A lefordított programok a DSP-re USB porton keresztül tölthetők le. Az emulációra pedig a Blackfin JTAG interfésze ad lehetőséget. A program futása megszakítható, töréspontok helyezhetők el, lehet léptetve végrehajtani az utasításokat, és ami a legjobban megkönnyíti a fejlesztést, hogy a memóriaterületek

és az egyes regiszterek állapota folyamatosan nyomonkövethető. A futás megszakítása után lehetőség van a processzor regisztereinek és a memóriatartalomnak a megváltoztatására (fill). Ezután a futtatás folytatható az újonnan betöltött adatokkal. Ilyenkor léptetve futtatva a processzort lehetőség van például különböző aritmetikai műveletek vizsgálatára, a túlcserdülések könnyebben észrevehetőek. A futtatás megállításakor a memória a megadott címtől kezdve adott méretig lementhető fájlba (dump). A fájl formátuma különböző lehet, hogy megkönnyítse a feldolgozásukat. Ez a funkció nagyon hasznos Matlabbal történő vizsgálatok elvégzésére.

A 16 bites processzor C-ben történő programozása esetén a fordító elrejtje előlünk a számábrázolásból adódó problémákat, amennyiben szabványos C adattípusokat használunk (float, double, int, long, short). Ezek használata azonban közel sem optimális a DSP-n. Például egy 32 bites lebegőpontos szám (float) szorzása a 16 bites fixpontos processzoron akár több száz assembly utasításra fordul le. A 16 bites fixpontos processzorhoz leginkább a 16 bites előjeles egész, a short típus használata illeszkedik [15]. Jelfeldolgozási feladatoknál az A/D-D/A átalakítók tartományán belül lévő jelet legcélszerűbb előjeles törtszámmal ábrázolni, ugyanis ez illeszkedik legjobban a fizikai képhez. Az előjeles törtszám számábrázolási tartománya:

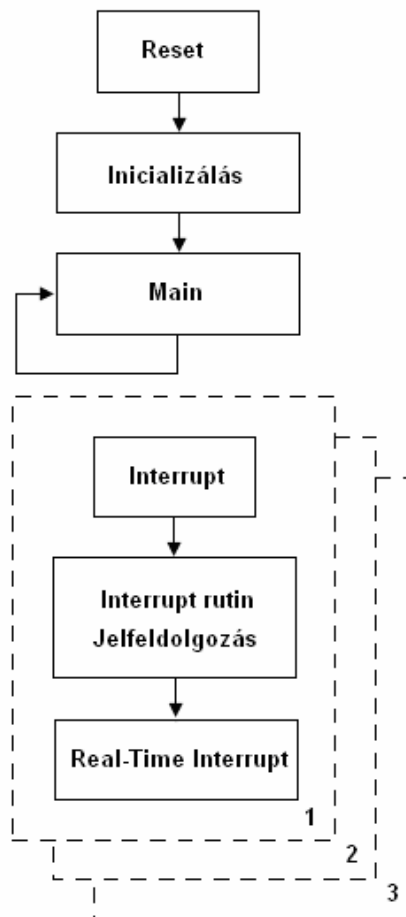
$$-1..1-2^{-15}$$

Az előjeles számokat kettes komplementum módban ábrázolják. A legfelső bit az előjelbit, az ezt követő bit értéke $\frac{1}{2}$, a legalsó bit helyi értéke pedig 2^{-15} . A szabványos C-ben nincs meg ez előbb ismertetett törtszámábrázolás, ezért az Analog Devices definiálta a fract16 és fract32 típusokat, amelyek 16 és 32 bites törtszámok ábrázolását teszik lehetővé. A fract16 és fract32 számokkal végzett műveletek helyes végrehajtására a fejlesztőkörnyezet biztosít C könyvtári függvényeket.

7. Aktív zajcsökkentő szoftver

7.1. DSP programok felépítése

A megvalósított aktív zajcsökkentő szoftver ismertetése előtt bemutatom a jelfeldolgozó programok általános felépítését [16] alapján. A DSP programok általános felépítése látható a 21. ábrán. A program futása reset után az inicializálással kezdődik. Ekkor történik a processzor beállításainak rögzítése, a flagek, IO portok beállítása, az interrupt prioritások beállítása, a változók kezdőértéket kapnak. Külső áramkörök, például az A/D-D/A konverterek elindítását kezdeményezi a processzor. Az inicializálás alatt a külső megszakítások le vannak tiltva.



21. ábra. Jelfeldolgozó programok általánosan alkalmazott struktúrája

Miután a beállítások megtörténtek, és a megszakítások engedélyezve vannak, elindul a főprogram. Nagyon gyakori eset, hogy a főprogramban csak egy végtelen while ciklus van, amely nem tartalmaz műveletet. A processzor várakozik a megszakításra.

Megszakítás esetén a processzor a kérést kiszolgálja, majd visszatér a főprogramba. Jelfeldolgozó programoknál az adatvesztés úgy kerülhető el, hogy az interrupt rutin biztosan hamarabb lefut, mint hogy a következő A/D felől érkező megszakítás megérkezne. Ez másképpen fogalmazva azt jelenti, hogy a jelfeldolgozási idő (t) kisebb, mint a mintavételi idő (T):

$$t < T = \frac{1}{f_s}, \quad (23)$$

ahol f_s a mintavételi frekvencia, amelynek ki kell elégítenie a Nyquist-kritériumot. Az AD/DA-átalakító általában összehangoltan működik, ezért az időzítési feltétel betartása esetén a jelfeldolgozó rutin által kiszámolt adatok egy mintavételnyi idő késleltetés után jelennek meg a kimeneten. A jelfeldolgozási algoritmusok (átlagolás, szűrés, szabályozási feladat) mindig felírhatók úgy, hogy egy tetszőleges időpontban a bemenet aktuális és korábbi mintáiból hogyan határozható meg a kimenet aktuális értéke. A megszakítás rutinnak ezt az algoritmust kell megvalósítani. A fejlesztőkörnyezet lehetőséget ad a C nyelven történő programozásra. A reset után lefutó inicializálást, amely csak egyszer fut le, célszerű C nyelven megírni, mivel ez jóval egyszerűbb és jelentősen csökkenti a fejlesztésre fordított időt. A jelfeldolgozást végző rutin esetében azonban kritikus a futási idő. Lehet, hogy a C-ben írt kód nem tudná teljesíteni a kritériumot (23). Ekkor szükség van assembly-ben történő fejlesztésre, a processzor párhuzamosítási és egyéb hardver gyorsítási lehetőségeinek kihasználására.

A fontosabb gyorsítási lehetőségek a következők:

- Hardveres ciklusszámláló: használatkor nem kell gondoskodni külön ciklusváltozóról, csak a ciklus elejét és végét, valamint a ciklus lefutásainak számát kell megadni. C-ben történő fejlesztés esetén for ciklusoknál a fordító megpróbálja kihasználni ezt a lehetőséget.
- Cirkuláris buffer: tulajdonképpen egy egyszerű memóriatömb, de a bufferen belüli címeket egy adatszűrő egység úgy számítja ki, hogy a bufferhez egy mutatót rendel hozzá, amely segítségével a címzés történik. A mutató a buffer kezdőcíméhez képesti eltolást mutatja. Értéke maximálisan a buffer hossza lehet. Ha a mutató a bufferen túlmutató címet ér el, az adatszűrő egység kivonja (inkrementálás esetén hozzáadja) értékéből a buffer hosszát. Ez az elrendezés

nagyban megkönnyíti olyan alkalmazások megvalósítását, ahol folyamatosan érkező adatfolyamból mindig csak a legutolsó N db mintára van szükség.

- Párhuzamos utasítások: olyan utasítások, amelyek külön buszt használnak párhuzamosan is végrehajthatóak.
- MAC utasítás (lásd 6.2. fejezet)

7.2. Az implementáció kérdései

A zajcsökkentési algoritmusok közül a 3. fejezetben ismertetetett FXLMS-t valósítottam meg. A választásnál szempont volt, hogy ez viszonylag könnyen implementálható, kellően stabil rendszert eredményez, és a zajelnyomás várható értéke is elég nagy lesz. A program felépítésében a kiindulópontom az előző fejezetben ismertetetett struktúra volt. Az FXLMS megvalósításához azonban ennek átszervezésére volt szükség.

7.2.1. Időzítés

Célszerű megvizsgálni a jelfeldolgozó program maximális hosszát, amely még biztosítja az adatvesztés elkerüléséhez szükséges működést (lásd 7.1.). A számítások a processzor sebességéből és a futtatandó rutinok számításigényéből kell kiindulni. A processzor 600 MHz-es órajele 1,66 ns-os műveletvégzési sebességet jelent 1 órajelciklus alatt végrehajtható utasítások számára. A 48 kHz körülbelül 21 μ s mintavételi időnek felel meg. Ez az jelenti, hogy ezen a frekvencián 12500 utasítás fér két mintavétel közé. Az alkalmazott program két számításigényes része az identifikáló és az FXLMS-t megvalósító ciklus. Az FXLMS N együtthatót tartalmazó adaptív szűrő és M együtthatós másodlagos út becselő esetén $M+3*N$ utasítást igényel. Ha mindkét szűrőt egyenlő hosszúnak tekintjük, és a többi programrész overhead-jét a ehhez képest kétszeresnek vesszük, maximum 1500 együtthatós szűrőket használhatunk. Ekkora szűrőhosszra zajcsökkentő alkalmazásokban általában nincsen szükség.

A fenti körülmény nem indokolja, hogy a jelfeldolgozásra rendelkezésre álló időt növeljük. A program esetleges jövőbeni kibővíthetősége érdekében és a szükségtelen túlmintavételezés elkerülésére decimálást alkalmaztam. Erről a módszerről a következő alfejezetben olvashatunk.

7.2.2. Decimálás

A decimálás a túlmintavételezést követő szűrést és mintaritkítást jelent. Az általam elnyomni kívánt zaj frekvenciatartománya jóval kisebb a szigma-delta A/D-D/A-átalakítók 48 kHz mintavételi frekvenciájából adódó 24 kHz-es sáv szélességnél. A 2 - 3 kHz-nél nagyobb frekvenciákon a korábban említett okok miatt nem várható zajnyomás, ezért a 6 kHz-nél nagyobb mintavételi frekvencia használata szükségtelen. 6 kHz mintavételi frekvencián a maximális feldolgozási idő 166 μ s. Ez az idő a 7.3.1.-ben ismertetett számítások alapján bőven elég idő a zajcsökkentő rutin lefutásához.

A mintavételi frekvencia csökkentése miatt decimáló szűrő beépítésére van szükség. A Nyquist-kritérium szerint, ahhoz, hogy visszaállítsuk az eredeti időtartománybeli jelet a mintáiból, a teljes spektrumának a mintavételi frekvencia felénél kisebb sáv szélességűnek kell lennie. Ha ez nem teljesül, akkor a Nyquist frekvenciánál magasabb komponensek átlapolódnak a jel frekvenciasávjába. Ennek elkerülésére a szigma-delta AD-átalakítóban van egy beépített szűrő, amely a 24 kHz-nél nagyobb komponenseket nem engedi belapolódni a spektrumba. Ezek a szűrők azonban hardveresen vannak megvalósítva, így törésponti frekvenciájuk nem változtatható. A szűrő megvalósításától eltekinthetünk, ha feltételezzük, hogy a spektrumban nincsenek az új mintavételi frekvencia felénél magasabb komponensek. Ez a tervezett rendszerrel nem feltétlen teljesül. Külső, nagy frekvenciás hangok előfordulhatnak a bemutató rendszer használata közben, így szükségesnek bizonyul átlapolódás elleni szűrő használata. Az egyik lehetőség, hogy mintavételezés után digitális szűrőt használunk. A másik pedig, hogy még a 48 kHz-es mintavételezés előtt analóg tartományban szűrjük a jelet. Én az utóbbi megoldást választottam, a mikrofon előerősítő áramkör kimenetének aluláteresztő szűrésével. Ennek határfrekvenciája 1570 Hz-nél van. A szűrő elnyomása nem túl jelentős, de feltételeztem, hogy nagy amplitúdójú, ezáltal jelentős zavart okozó nagyfrekvenciájú zavar nem lesz jelen a működéskor.

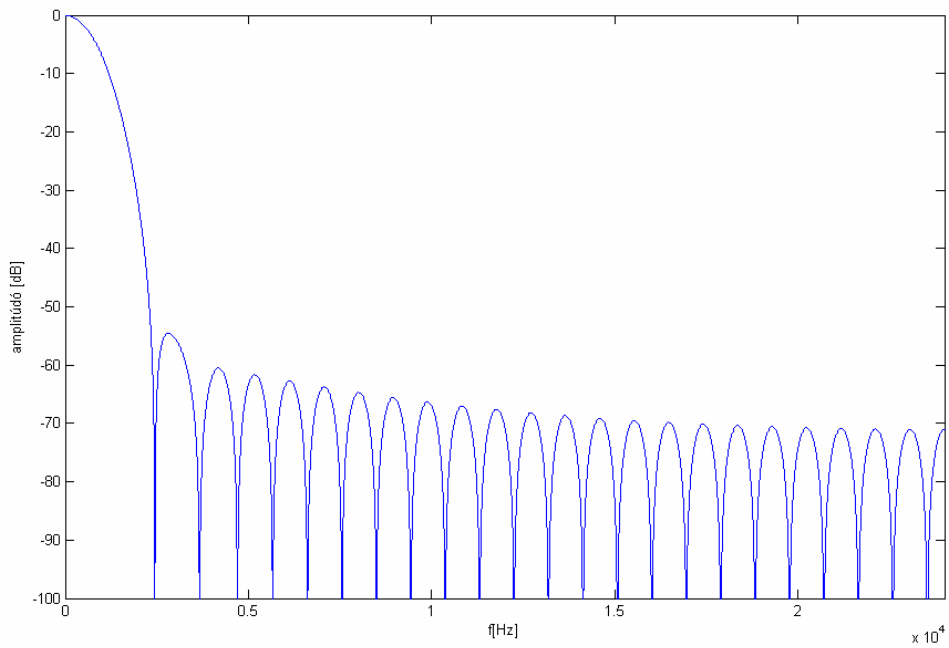
7.2.3. Interpolálás

A jel decimálása után következik a jelfeldolgozás, amely a másodlagos út identifikálását és a zajelnyomó algoritmus futtatását jelenti. A kiadandó jel azonban a decimálás miatt

az alacsonyabb, $f_s=6000$ Hz mintavételi frekvencián értelmes. Ezt a jelet aluláteresztő szűrés nélkül kiadva a 48 kHz-en működő D/A átalakítóra a $k*f_s$ frekvenciákon spektrumismétlődések jelennek meg. Ezt elkerülendő szükség van interpoláló szűrőre. Az interpolációra is több lehetőség van. Az egyik alternatíva analóg szűrő használata. Ebben az esetben szükséges lett volna egy külön szűrő áramkört készíteni. Ha az interpolálást a teljesítményerősítőben valósítom meg, hasonlóan a mikrofonerősítőben létrehozott szűrőhöz, az akadályozta volna az erősítő általános célú alkalmazását. A rendszertervezésnél fontos szempont volt, hogy az elkészült eszközök önmagukban is felhasználhatóak legyenek, így az analóg szűrő megvalósításától eltekintettem. Az általam választott megoldás a programban megvalósított digitális interpoláló szűrő alkalmazása. Erre a FIR szűrő struktúrát választottam. Az IIR szűrő használatát elvettem, mivel bár kisebb számításigényű és emiatt kisebb a késleltetése, fixpontos processzoron a számábrázolás pontatlansága miatt bonyolult realizálni.

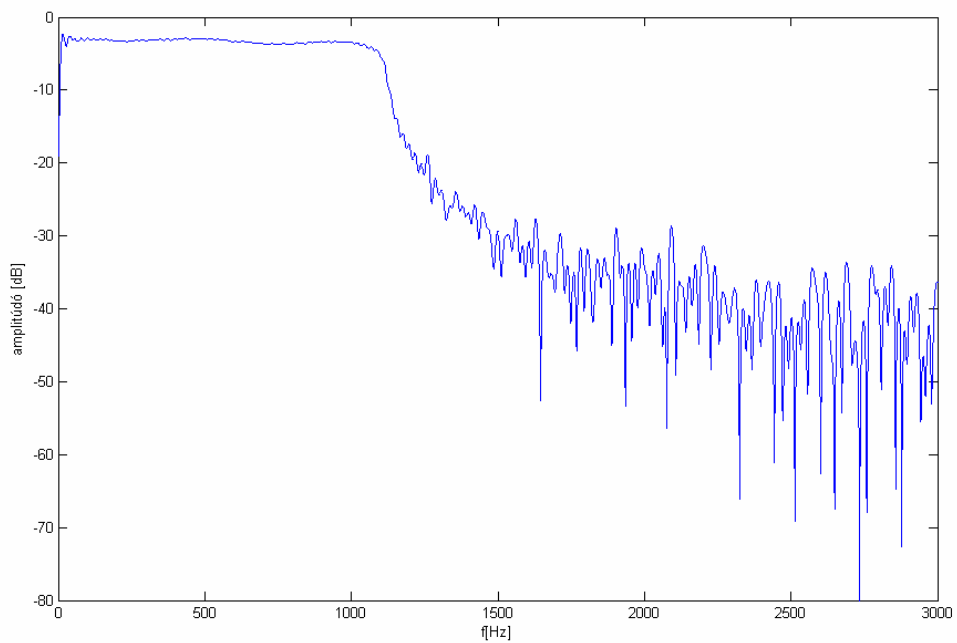
A decimáló és interpoláló szűrőknek ideális esetben lineárfázisúnak és egyenletes átvitelűnek kellene lennie. Az eredeti 48 kHz mintavételhez képesti kis mintavételi frekvencia azt eredményezi, hogy a megfelelő specifikációjú (elég meredek levágású) szűrőnek magas fokszáma, és emiatt viszont nagy a csoportkésleltetése lesz. Ez a késleltetés szélessávú zajelnyomó rendszerekben problémát jelenthet, ugyanis a szélessávú elnyomáshoz fenn kell állnia a második fejezetben ismertetett kauzalitási feltételnek.

A 22. ábrán látható interpoláló szűrőt a Matlab `fir1` függvényével terveztem, amely ablakozó eljárást használ a szűrőegyütthatók kiszámítására. A magasabb fokszám és az erős specifikáció kompromisszumaként 51 együtthatós szűrőt terveztem, melynek törésponti frekvenciája 1500 Hz. Az elnyomás a zárótartományban 60 dB. A szűrő lineárfázisú, csoportkésleltetése 25 minta.



22. ábra. Interpoláló szűrő átvitele

Az interpoláló szűrő hatása jól látszik az identifikációval készült mérés eredményén (23. ábra). A mérést során a D/A átalakító kimenetét visszakötöttem az A/D bemenetére és off-line identifikáltam az átviteli utat. A letörés 1150 Hz környékén következik be.



23. ábra. Visszacsatolt DA/AD-átalakító off-line identifikálással mért átvitele

7.2.4. Keretrendszer

A decimálás és interpolálás miatt célszerű volt átrendezni a DSP programok 7.1.-es pontban bemutatott struktúráját. A jelfeldolgozó rutin átkerült a főprogramba és csak akkor fut le, ha egy változó értéke jelzi, hogy megérkezett a következő feldolgozandó adat. Az A/D-átalakító megszakítását kiszolgáló rutin minden megszakításkor növeli a változó értékét, a főprogram pedig akkor indítja a jelfeldolgozó algoritmust, ha az aktuális megszakításkor érkező adat az N-edik. Ezzel a megoldással rendelkezésre áll jelfeldolgozásra a teljes mintavételi időköz. Mivel az interpoláló szűrő 48 kHz frekvencián fut, ez is az A/D megszakítást kiszolgáló rutinban kapott helyet. Az egyes függvények a globális változókat használják a kiküldendő és beolvasandó minták átadására.

7.2.5. Beavatkozás a program működésébe

A zajcsökkentő program teszteléséhez célszerű, a demonstrációhoz pedig szükséges, hogy valamilyen módon be tudjunk avatkozni a program működésébe. Sajnos a fejlesztőkártyán a 4 nyomógombon és a 6 db LED-en kívül nem áll rendelkezésre más kijelző és beavatkozó egység. Későbbi továbbfejlesztési lehetőség lenne a kártyán található RS-232 portra illeszteni valamilyen egyszerűbb kijelző és vezérlő modult, amely lehetőséget adna a menü bővítésére. A nyomógombokkal a következő funkciókat valósítottam meg:

- Zajelnyomás ki-és bekapcsolása
- Identifikálás újraindítása
- Az adaptív szűrő együtthatóinak nullázása
- μ változtatása

A nyomógombok és a LED-ek a processzor F portjára vannak huzalozva. Bármely gomb megnyomása megszakítást küld a processzornak. A program a megszakításrutinban beolvassa, hogy melyik gombot nyomták meg, majd egy állapotgépet megvalósítva (1. táblázat) lépked a különböző funkciók között. Az aktuális állapotot a LED-eken jelzi. Hat állapot és hat LED lévén mindig az aktuális állapotnak megfelelő LED gyullad ki.

gombok	1	2	3	4
állapotok				
A zajelnyomás kikapcsolva	B	D	E	F
B identifikáló μ változtatása	A	C	B $\mu ++$	B $\mu --$
C μ változtatása	A	B	C $\mu ++$	C $\mu --$
D identifikálás	B	A	E	F
E együtthetők nullázása	B	D	A	F
F zajelnyomás bekapcsolva	B	D	E	A

1. táblázat. Az egyszerű vezérlést megvalósító állapotábra

A reset után a processzor az **A** állapotból indul. Ezután a gombok megnyomásának hatására a megfelelő állapotba ugrik.

A működésre példa lehet a következő:

Bekapcsolás (reset) után az **A** állapotból kiindulva identifikálást akarunk végezni. A 2-es gomb megnyomására a **D** állapotba ugrunk, elkezdődik az identifikáció. A művelet befejezése után (körülbelül 5-10 másodperc) elkezdődhet a zajelnyomás. A 4-es gomb megnyomására az identifikálás befejeződik és átugrunk az **F** állapotba. Elindul az zajelnyomás megvalósító FXLMS futása. Ha úgy tapasztaljuk, hogy μ értéke nem megfelelő, az 1-es majd ezután a 2-es gomb megnyomására átugrunk először a **B**, innen a **C** állapotba, ahol a 3-as gombbal növelni, a 4-es gombbal pedig csökkenthetjük azt. Ezután az 1-es gombbal visszatérhetünk az **A** alapállapotba amivel a zajelnyomást is kikapcsoljuk. Hasonlóan történik a szűrőegyütthetők nullázása is. **F** állapotból (zajelnyomás) a 3-as gomb megnyomásával átugrunk az **E** állapotba és nullázzuk az elsődleges utat becsülő szűrőegyütthetőkét. Visszalépés a zajelnyomásra az 4-es gombbal történhet.

7.2.6. Telítések, véges szóhossz hatásai

Fixpontos processzoron a véges szóhossz által okozott problémák okai a következők lehetnek:

- Kvantálási hibák
- Aritmetikai hibák
 - Telítés,
 - Túlsordulás

A kvantálási hiba nagyobb szóhossz használatával (tehát a felbontás növelésével) csökkenthető. Például a 16 bites szorzásról áttérünk a 32 bites szorzásra. Ekkor azonban a műveletvégző sebesség csökken, mivel a processzorban csak 16 bites beépített szorzó egység van.

Amennyiben a (14) egyenlet bemenő adatait és szűrőegyütthatóit a $[-1 \ 1)$ tartományban 15 bites törtszámként ábrázoljuk, előfordulhat olyan eset, hogy két szám összeadásakor kikerülünk az ábrázolt számtartományból. Ezt hívjuk túlsordulásnak.

Az aritmetikai hibák közül a túlsordulás mindenképp elkerülendő, hiszen az eredmény előjelének megváltozását okozza. Bekövetkezése ellen olyan utasítások használatával lehet védekezni, amelyek túlsordulás helyett telítésbe viszik az adott művelet végeredményét. Megfelelő skálázással lehet a telítés valószínűségét csökkenteni. A jel amplitúdójának a csökkentése azonban a jel-zaj viszony növekedését vonja magával.

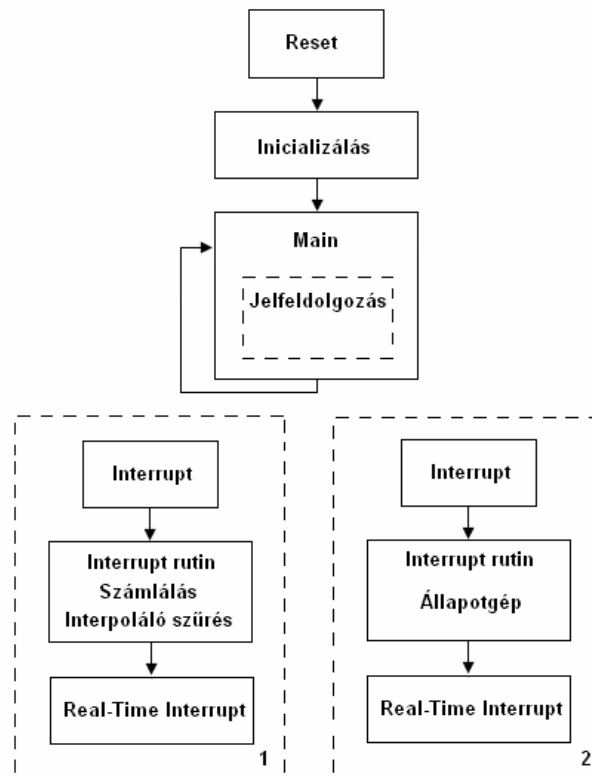
A rendszer helyes működésének egyik feltétele, hogy ne alakuljon ki telítés a jelút egyetlen pontján sem. Az AD-átalakító a mikrofon feszültségét konvertálja digitális számmértékké. Az A/D telítését tehát úgy lehet megakadályozni, ha a mikrofon-előerősítő jelét a legnagyobb előforduló zaj szintjéhez állítjuk. A mikrofonerősítő kimenetén lévő szűrő csökkenti az olyan feszültségtüskék amplitúdóját, amelyek impulzusszerű hatások esetén telítésbe vihetik az A/D-t.

A D/A-átalakítót a jelfeldolgozó algoritmus tudja telítésbe vinni. Ez olyankor következhet, ha amikor a mikrofon a maximálisan kioltható zajnál nagyobb jelszintet detektál. Az algoritmus egyre nagyobb jelet ad a D/A-átalakítóra, amely egy idő után túlvezérlődik. Ekkor a hangszórón nemcsak a zavarjel kioltását eredményező frekvenciakomponensek, hanem káros felharmonikusok is megjelennek.

A zajcsökkentés működtetése előtt meg kell győződni arról, hogy a mikrofon és a teljesítményerősítő nem vezérelhető-e túl.

7.3. A program felépítése

A megvalósított zajelnyomó program az előző pontokban ismertetett megfontolásokkal készült. A felépítése a következő ábrán látható:



24. ábra. Zajcsökkentő program struktúrája

A program a következő fájlokból áll:

ANC.h: a felhasznált függvények prototípusait, a globális változók deklarációját tartalmazza.

Initialize.c: a processzor indulásakor szükséges függvények definícióját tartalmazó fájl. Beállítja a flag-eket, a megszakításvektorokat és elindítja az audio kodeket. Inicializálja a DMA-t. A DMA azért kell, hogy az AD/DA átalakítók közvetlenül hozzáférhessenek a memóriához.

ISR.c: ez a fájl tartalmazza a megszakításokat kiszolgáló rutint. Az A/D felől érkező megszakítás meghívja a Decimate() függvényt. A nyomógombok felől érkező megszakítás kezelését ebben a fájlban oldottam meg. A függvény megvizsgálja, hogy melyik gombot nyomta le a felhasználó és ettől függően léptet az állapotgépben. A főprogrambeli funkciókat flageken keresztül aktiválja. Ezek a következők:

- ident_mode: másodlagos út mérése
- fxlms_mode: zajelnyomás aktiválása
- coef0_mode: adaptív szűrő együtthatóinak nullázása

Main.c: a főprogram, reset után ez fut le először. A jelfeldolgozáshoz szükséges függvény és változó deklarációkkal kezdődik. A változó definícióknál feltölti $W(z)$ adaptív szűrő tömbjét a coefs_w.dat, a másodlagos út $C(z)$ szűrőjét pedig coefs_c.dat fájlból. Ezeket a fájlokat a projekt könyvtárából olvassa be. Az identifikálás hangos és zajos folyamat, ha a demonstrációnál nem kívánjuk elindítani, lehetőség van a korábban identifikált és elmentett becslő betöltésével kezdeni a zajcsökkentést. A beolvasandó identifikálás eredményét a coefs_c.dat fájlban fract16 formátumban kell tárolni (lásd: Függelék). A főprogram először meghívja az inicializáló függvényeket, majd belép egy végtelen while ciklusba. A cikluson belül három egység van, egyszerre csak egy indulhat el. Az egységeket elindító flagek állapotát a megszakításrutin állítja.

A főprogram felépítése:

```
#Include
Változó és függvény deklarációk
Változó definíciók
Szűrőegyütthetők betöltése
Void main(void)
{
Inicializálás
while(1)
{
    if(ident_mode) //identifikálás
    {
        identifikáló fehér zaj generálás
        identifikáló zaj szűrése átlapolódás ellen
        tesztelt rendszer kimenetének beolvasása
        az adaptív modell válaszának számítása
    }
}
```

```

        különbség képzés a rendszer és a modell között
        új koefфициensek számítása LMS-el
    }
    if(coef0_mode)
    {
        szűrőegyütthetők nullázása
    }
    if(fx1ms_mode)
    {
        input beolvasás
        ellenzaj generálása
        ellenzaj kiadása
        referenciajel szűrése a másodlagos út becselőjével
        új koefфициensek számítása LMS-el
    }
}
}

```

Conv_asm.asm: assembly nyelven készült, annak érdekében, hogy kihasználja a processzor párhuzamosítási lehetőségeit a számítás során. FIR szűrést megvalósító assembly függvény. Paramétereit a főprogramtól programtól kapja.

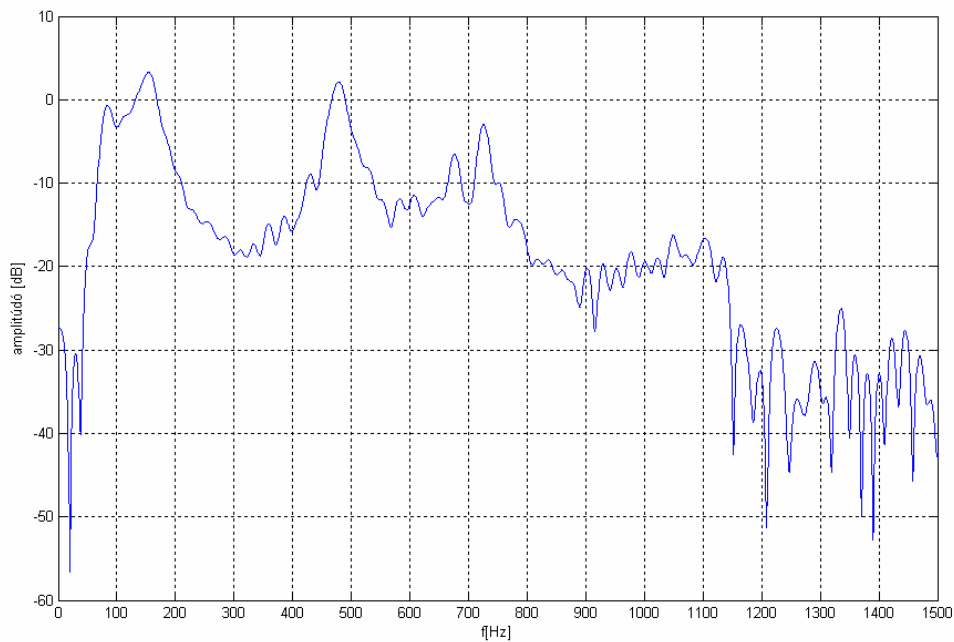
Lms_asm.asm: assembly nyelven készült, hasonló okokból mint a conv_asm függvény. LMS algoritmust megvalósító assembly függvény. Paramétereit a főprogramtól kapja.

Az assembly függvényeket a C program egyszerű függvényként látja. A fejlesztőkörnyezet előírja, hogy a C függvény argumentumait az assembly függvény a processzor R0, R1, R2 regiszterekben kapja meg. Háromnál több argumentum átadása mutatókkal valósítható meg.

8. Mérések és eredmények

A rendszer mérési összeállítása megfelelt a bemutatónál alkalmazandó összeállításnak. A zajszintek megállapításához zajszintmérőt használtam, a hibajelek és beállási idő mérésére a kártya egyik audio csatornájára kivezetett hibajelét, illetve a mikrofonerősítő kimeneti jelét (hibajelét) oszcilloszkópra kötöttem. Az átviteli függvényt a másodlagos út impulzusválaszának lementésével („dump” parancs, lásd 6.3. fejezet), majd Fourier-transzformálásával kaptam.

A mérést a másodlagos út átvitelének meghatározásával kezdtem. A mérés során úgy tapasztaltam, hogy 200 együtthatónál rövidebb $C(z)$ szűrő nem elég hosszú a csatorna modellezésére. A 300 hosszú szűrő impulzusválasza elegendő hosszúnak bizonyult a másodlagos út becslésére. Ez a hossz az elsődleges út modellezésére is megfelelőnek bizonyult. A másodlagos út átvitelén megfigyelhetőek a csőben kialakuló rezonanciák által okozott kiemelések és leszívások hatása (26. ábra).



25. ábra. Másodlagos út off-line identifikációval mért átvitele

A legerősebb kiemelés 155 Hz környékén van. 340 m/s hangterjedési sebességet feltételezve, a

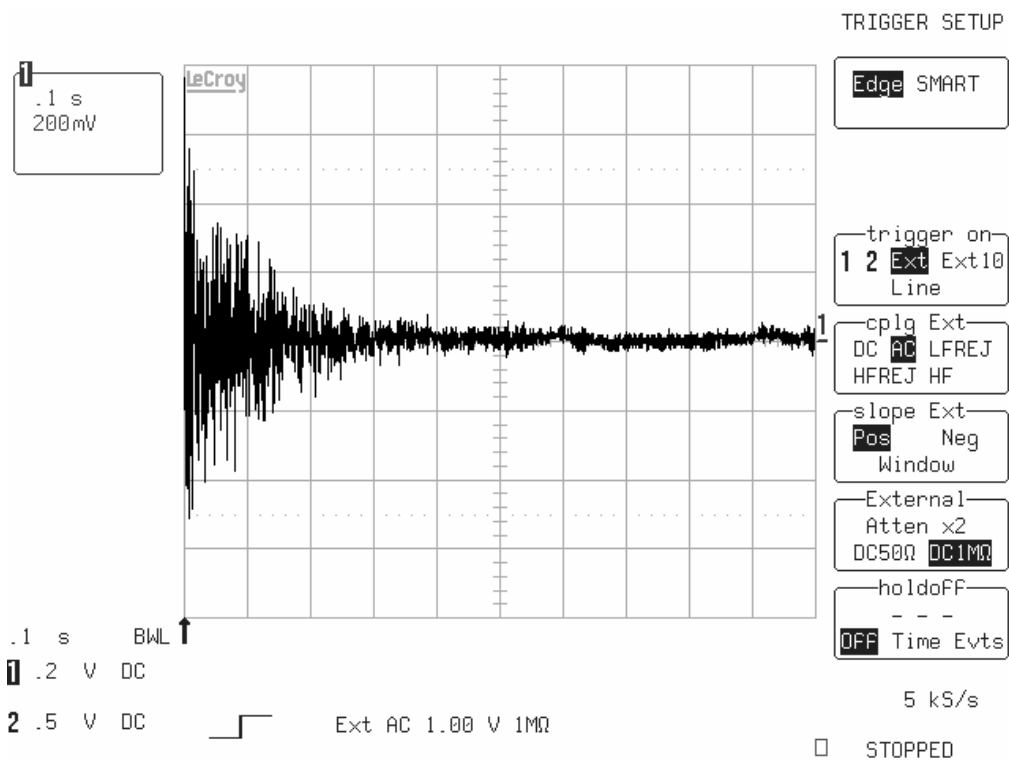
$$c = f \cdot \nu$$

képlet alapján ez a 2,2 m hullámhosszú hangnak felel meg. Ez a hossz éppen kétszerese cső teljes hosszának, vagyis ezt a kiemelést a cső első hosszirányú módusa okozza.

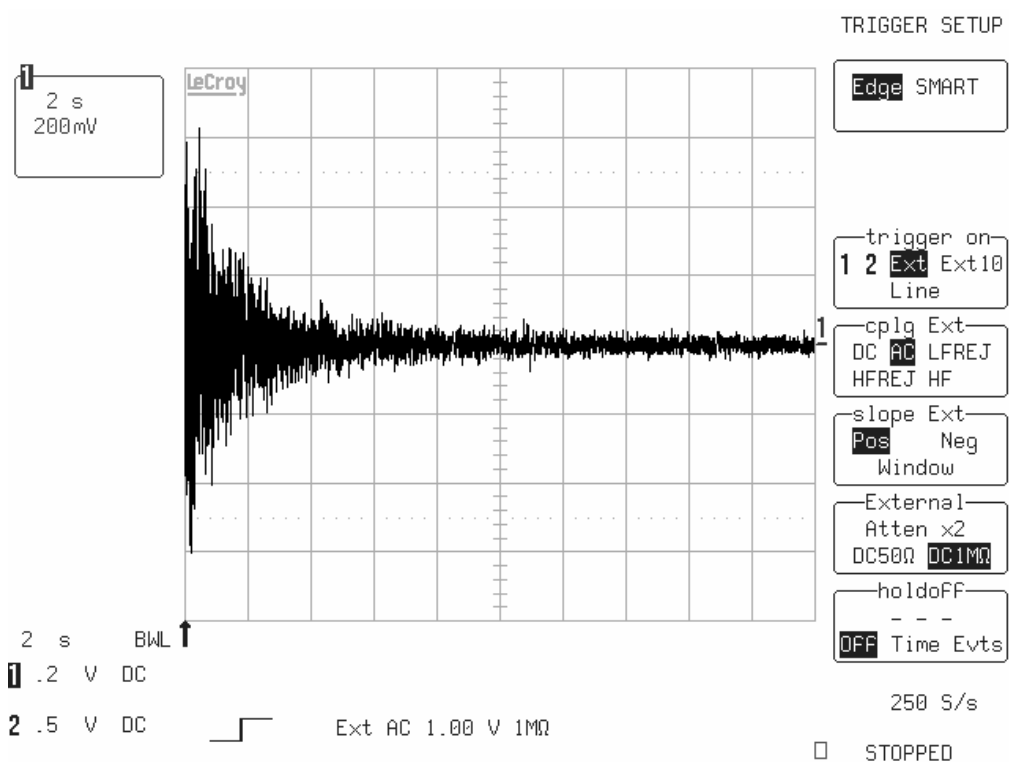
Hasonlóképpen számolva a 320 Hz körüli leszívás oka a második módus, a 470 Hz-nél található kiemeléért pedig a harmadik módus felelős. További érdekes következtetések vonhatók le a hangterjedésre vonatkozóan, az átviteli függvény és a cső adatainak ismeretében.

A mérés során a megfelelő szűrőhossz kiválasztása után a bátorsági tényező beállítása következett. A bátorsági faktor, μ értéke nagyban befolyásolja a rendszer beállási idejét és stabilitását. Meghatározásánál a következő megfontolásokat kell tenni: μ túl alacsony értéke esetén a számábrázolás pontatlanságából eredő hiba miatt az algoritmusban szereplő szorzat értéke nulla lesz és emiatt az iteráció megáll, mielőtt az optimumot elérné. μ felső határát a stabilitási korlát szabja meg (18). Megfelelően nagy μ használata esetén az iteráció gyorsan eljut a minimum közelébe, de a nagy lépésköz miatt túlugrik a minimumon, tehát az optimum körül fog bolyongani. Kis μ használata pontos adaptációt eredményez, de ehhez több iteráció szükséges, vagyis lassabban jutunk el az optimumhoz.

Az optimális μ beállítása leginkább próbálgatással történt. A következő két ábrán látható az identifikáció hibajelének alakulása a művelet kezdetétől mérve. Az első esetben (27. ábra) μ értéke fixpontos törtszámként ábrázolva 100 (ez 0,0078-nak felel meg), a másik esetben pedig 10 (0,00048 vagyis az előző érték 1/16-a) (28. ábra). Látható, hogy a nagyobb μ -höz kisebb beállási idő tartozik, ugyanakkor a maradó hiba mértéke nem növekszik jelentősen. Emiatt célszerű volt a nagyobbat választani, amihez a kisebb beállási idő tartozik. A mérési eredmények azt mutatták, hogy 100-nál nagyobb μ esetén a hibajel nem csökken le a kellő szintre, így identifikáláshoz a 100-as értéket használtam.



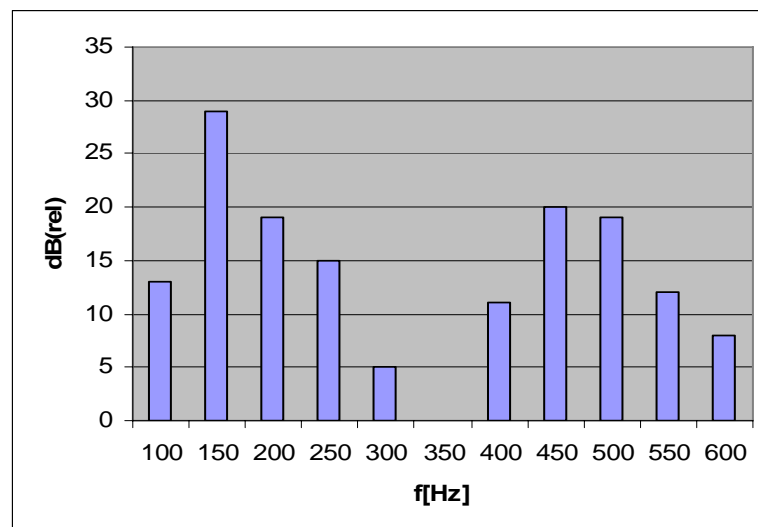
26. ábra. Off-line identifikáció hibajele $\mu=0,0078$



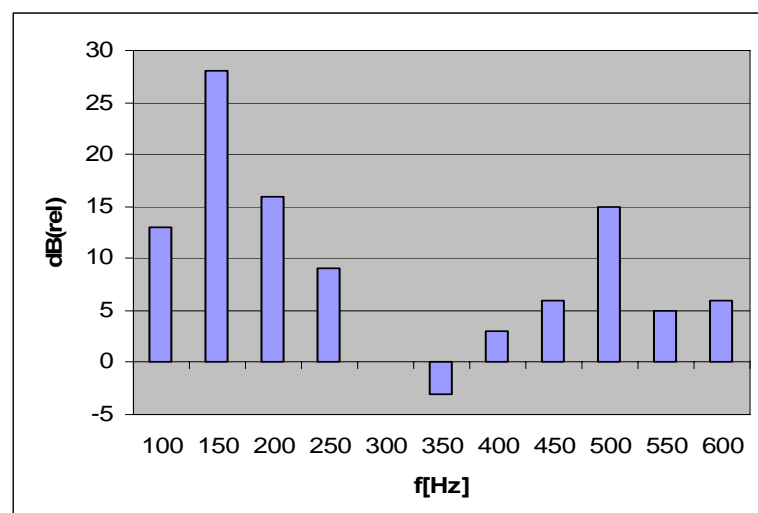
27. ábra. Off-line identifikáció hibajele $\mu=0,00048$

A beállási idő arányos μ értékével. $\mu=100$ esetén 0,35 másodperc, $\mu=10$ esetén pedig 6 másodperc.

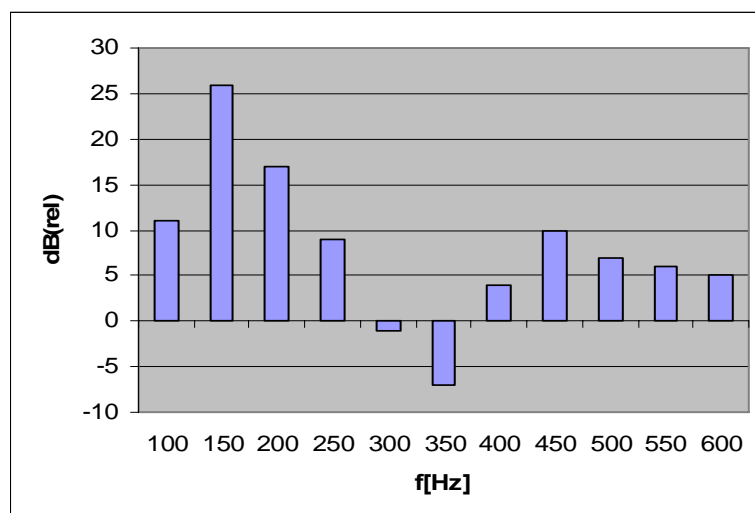
A zajcsökkentés mérése abszolút zajszintmérővel történt. A mérés célja az volt, hogy a zajcsökkentés hatásfokáról és bemutatható hatásosságáról képet kapjunk. Ezért a zajszintmérőt a berendezéstől távolabb helyeztük el, hogy a helyiségben tapasztalható zajelnyomást értékelni tudjuk. A zajszintmérő a demonstrációs eszköztől körülbelül 3 m távolságban helyezkedett el. A mérést 3 különböző periodikus gerjesztő jellel 100 Hz-től 600 Hz-ig 50 Hz-es felbontásban végeztem. 600 Hz felett nem volt tapasztalható számottevő zajelnyomás. A mérési eredmények lentebb láthatók és az adott alapharmonikusú jelre vonatkozó elnyomást mutatják:



28. ábra. Zajcsökkentés mértéke szinuszejel gerjesztés esetén



29. ábra. Zajcsökkentés mértéke adott alapharmonikusú háromszögjel gerjesztés esetén



30. ábra. Zajcsökkentés mértéke adott alapharmonikusú négyszögjel gerjesztés esetén

A legszembetűnőbb hasonlóság a három esetben, hogy a másodlagos út kiemelésénél hatásos, míg a 320 Hz körüli leszívásnál nem érhető el zajcsökkenés. A szubjektív hangérzet változása szinuszos jel elnyomásakor megfelel a mért értékeknek. Elmondható, hogy a 100, 150, 200 Hz-es és az 500 Hz-es szinuszjel elnyomásakor a teljes laboratóriumi helyiségben alig hallhatóvá vált a zajforrás. A négyszögjelnél és a háromszögjelnél bizonyos frekvenciákon az összes felharmonikus elnyomása tapasztalható volt, azonban egyes esetekben a felharmonikusok nem csillapodtak kellő mértékben, ez pedig a hangérzetet nagyban rontotta. Ennek a hatásnak tudható be a 300 Hz-nél jelentkező zajnövekedés.

A szélessávú elnyomást zajgenerátorral teszteltem. A mérés során különböző hosszúságú és sávzélességű álvéletlen sorozatokkal hajtottam meg a zajforrásként szolgáló hangszórót. Az ekkor tapasztalható elnyomás mértéke a következő táblázatban látható:

Álvéletlen sorozat hossza	Sávzélesség [Hz]	Zajcsökkenés relatív mértéke [dB]
127	150	19
255	500	22
511	150	10
2047	150	10

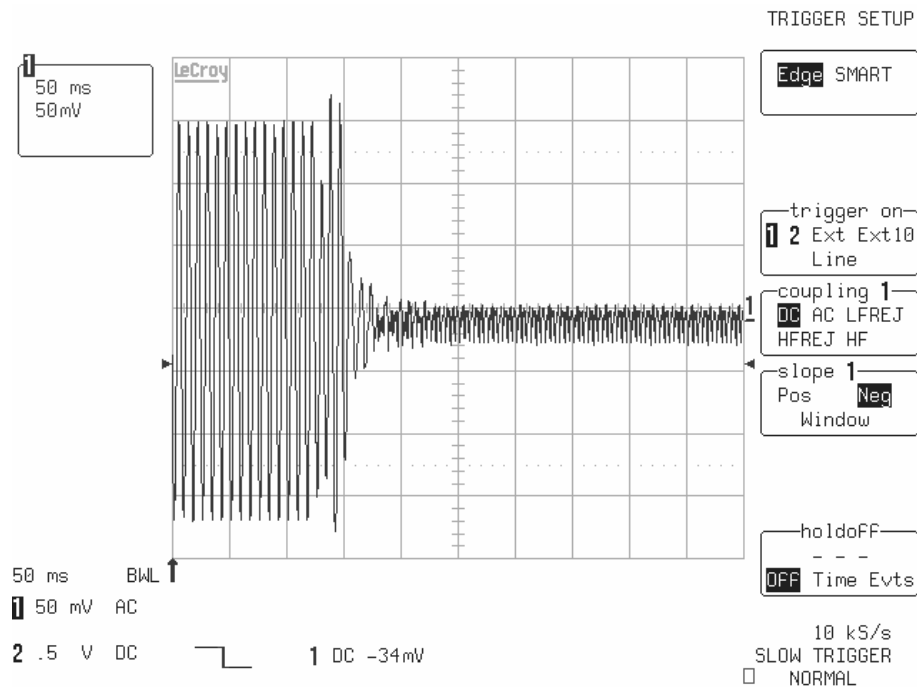
2. táblázat. Zajelnyomás mértéke szélessávú gerjesztés esetén

Ennél hosszabb sorozatok és nagyobb sávszélesség esetén a szubjektív hangérzet a felharmonikusok jelenléte miatt nem csökkent jelentősen, a fenti esetekben azonban jól hallható volt a zajcsökkentés, különösen hatásos volt az 500 Hz-es sávszélességű sorozat esetében.

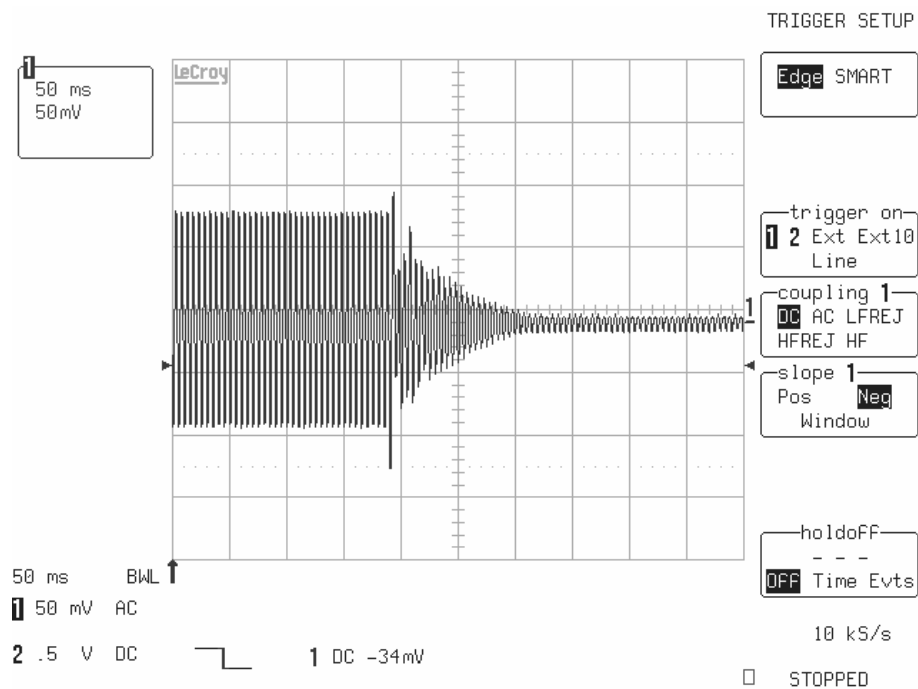
A bátorsági tényező beállításánál hasonló megfontolások szükségesek, mint a fentebb ismertetett identifikálásnál. Ezek alapján, valamint a próbálgatás eredményeként 800-ra állítottam μ értékét (ez 0,0625-nek felel meg).

A rendszer beállási ideje μ -tól, a becslő szűrő hosszától és az elnyomandó jel amplitúdójától függ. A becslő szűrő hossza növeli a rendszer késleltetését, emiatt nagyobb beállási időt eredményez. A jel amplitúdója hasonló hatással van a beállításra, mint μ értéke. Nagy amplitúdó esetén kevesebb iteráció kell az optimum eléréséhez, tehát a beállítás gyorsabb.

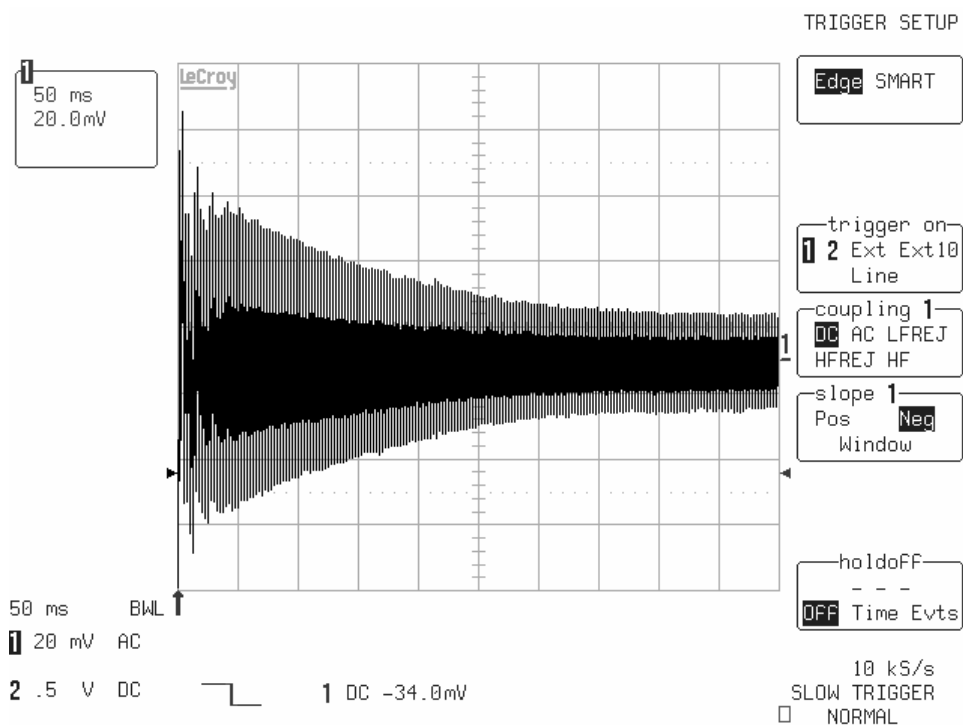
Három különböző frekvencián három különböző beállási időt mértem. Az eltérés annak tudható be, hogy a nagyobb frekvenciás jel kisebb amplitúdóval kerül a mikrofon bemenetére, emiatt hosszabb beállási idő tartozik hozzá. A következő ábrákon látható a hibamikrofon jele az elnyomás bekapcsolása alatt.



31. ábra. A hibamikrofon jelének változása a zajelnyomás bekapcsolásakor ($f=120$ Hz)



32. ábra. A hibamikrofon jelének változása a zajelnyomás bekapcsolásakor ($f=200$ Hz)



33. ábra. A hibamikrofon jelének változása a zajelnyomás bekapcsolásakor ($f=400$ Hz)

A rendszert mindhárom esetben alapállapotból, vagyis nullákat tartalmazó modellszűrővel indítottam. A rendszer indítása akkor történt, amikor a jel amplitúdója kis mértékben megemelkedett. (A 400 Hz-es esetben ez látszik az ábra bal szélén) Látható, hogy az eltérő frekvenciákhoz eltérő beállási idő tartozik.

9. Összefoglalás

Diplomamunkám keretében sikeresen megvalósítottam egy olyan rendszert, amely a közönség számára képes hatékonyan demonstrálni az aktív zajcsökkentés működését, anélkül, hogy ehhez laboratóriumi műszereket és berendezéseket valamint előzetes méréseket igényelne.

A feladat megoldása során megismerkedtem az aktív zajcsökkenés elméleti hátterével és az LMS alapú zajcsökkentő algoritmusokkal. Megszereztem a kiválasztott jelfeldolgozó processzor programozásához szükséges ismereteket, majd implementáltam a kiválasztott algoritmust. Megterveztem és megépítettem a rendszer működtetéséhez szükséges teljesítményerősítőt és mikrofonerősítőt, valamint a demonstrációhoz szükséges akusztikus rendszert.

Dolgozatomban bemutattam az aktív zajcsökkentés felhasználási területeit és alapvető struktúráit. Ezek után rátértem az adaptív tranzverzális szűrők elméletével kapcsolatos fogalmakra és ismertettem az implementált FXLMS-algoritmust. A bemutató rendszer tervezéséhez szükséges megfontolások ismertetése után a megtervezett hardver eszközök működését mutattam be. Ismertettem a jelfeldolgozó programok működését és a tervezésükhöz szükséges megfontolásokat, valamint a megvalósított zajcsökkentő szoftvert. A rendszer működését mérési eredményekkel támasztottam alá.

Elmondható, hogy sikerült olyan rendszert létrehozni, amely működése a kiírásban megfogalmazott céloknak megfelel. A rendszer a hibamikrofon helyétől távol is képes zajcsökkentésre, amely mértéke a várakozásnak megfelel. Továbbá a megvalósított hardver eszközök egyéb célokra is felhasználhatók.

A jövőt illetően szóba jöhet a felhasznált algoritmus javított változatainak használata a zajelnyomás mértékének növeléséhez, illetve más alapokon működő zajcsökkentő algoritmusok implementálása a meglévő rendszerre. A rendszer felépítése lehetőséget ad akusztikai kísérletek elvégzésére is.

Irodalomjegyzék

- [1] S. M. Kuo, I. Panahi, K. M. Chung, T. Horner, M. Nadeski, and J. Chyan, „*Design of active noise control systems with the TMS320 family*”, Application note, Texas Instruments, 1996.
- [2] P. Lueg, „*Process of silencing sound oscillations*”, United States Patent Office, 1936
- [3] Mócsai Tamás „*Aktív zajcsökkentő rendszer megvalósítása laphangszórókkal*”, Diplomaterv, 2004.
- [4] Kollár I., Németh J., Sujbert L. „*Digitális jelfeldolgozás (Hallgatói segédlet)*” BME, Méréstechnika és Információsrendszerek Tanszék, 2001
- [5] S. M. Kuo – R. Morgan, „Active Noise Control: A Tutorial Review”, *Proceedings of the IEEE*, Vol.87, No. 6, June 1999, 944-954. o.
- [6] Widrow, B., S.D. Stearns, „*Adaptive Signal Processing*”, Prentice Hall, Inc., 1985.
- [7]. Kuo, S. M., and C. Chen, “Implementation of Adaptive Filters with the TMS320C25 or the TMS320C30,” *DSP Applications with the TMS320 Family*, Vol.3
- [8] S. M. Kuo and D. R. Morgan, „*Active Noise Control Systems*”. John Wiley and Sons, Inc., 1996.
- [9] „*Solid State Voice Recorder Using Flash MSP430*” Application Report Texas Instruments, 2001
- [10] Advanced LinCMOS Rail-to-Rail Very Low-Power Op Amps Very Low-Power Operational (Rev. D), tlv2252.pdf
- [11] LM1876 Overture™ Audio Power Amplifier Series Dual 20W Audio Power Amplifier with Mute and Standby Modes, LM1876.pdf
- [12] LM137/LM337 3-Terminal Adjustable Negative Regulators, LM337.pdf
- [13] LM117/LM317A/LM317 3-Terminal Adjustable Regulator, LM337.pdf
- [14] ADSP-BF534 ADSP-BF536 ADSP-BF537 Blackfin Embedded Processor Data Sheet (Rev. C).pdf
- [15] C/C++ Compiler and Library Manual for Blackfin Processors
- [16] Molnár Károly, Sujbert László, „*Jelfeldolgozó processzor alkalmazása, Mérési útmutató*”, 2006.
- [17] Lőrincz Pál, Petrich Géza, „*Ábrázoló geometria*”, Egyetemi tankönyv, Tankönyvkiadó vállalat, 1976

Függelék

Függelék

I. A rendszer üzembe helyezése

A következő eszközök kellene a zajcsökkentés demonstrálásához:

- ADSP BF537 EZ-KIT Lite fejlesztőkártya – F19. ábra
- Cső, a két hangszóróval – F16. ábra
- Mikrofon – F20. ábra
- Mikrofon előerősítő – F13. ábra
- Hangszóró erősítő – F13. ábra
- Fügvénygenerátor vagy zajgenerátor
- Szimmetrikus tápegység vagy transzformátor

A rendszer összeállítása a program feltöltésével kezdődik. A DSP kártyát csatlakoztatni a tápegységhez valamint a számítógép USB portjához. Ezután el kell indítani a VisualDSP 4.0. fejlesztőkörnyezetet. A szükséges fájlok, amelyek a CD mellékleten találhatóak, a következők:

- Projektfájl:
 - ANC.dpj
- Forrásfájlok:
 - conv_asm.asm
 - Decimate.c
 - Initalize.c
 - ISR.c
 - lms_asm.c
 - main.c
 - ANC.h
- Szűrőfájlok:
 - coefs_w
 - coefs_c
 - coefs_nf
 - coefs_if

A projekt betöltéséhez meg kell nyitni az ANC.dpj projektfájlt. A projekt betöltése után a Build project parancs hatására a projekt feltöltődik a DSP-re. A másik megoldás az, hogy létrehozunk egy új projektet a VisualDSP-ben és hozzáadjuk a forrásfájlokat valamint a szűrőfájlokat. A szűrőfájloknak a projekt könyvtárában kell lenniük. A letöltés ekkor is úgy történik mintha egybe nyitottuk volna meg a projektet. A Build project parancs lefordítja és az emulátorral letölti a futtatható fájlokat a processzorba. A futtatás a Run menüponttal indítható el. A program flash-be töltésének mikéntjét lásd a <http://www.analog.com/ee-notes> oldalon.

A rendszerben a mikrofonerősítő kimenetét a DSP kártya bal audio bemenetére kell csatlakoztatni. A kártya jobb audio bemenetére kell csatlakoztatni a zajforrásból érkező referencia jelet. A teljesítményerősítő egyik bemenetére a kártya bal audio kimenetét kell kötni, ez lesz az elnyomó jel, illetve másodlagos út mérésnél a gerjesztés. Az erősítő másik bemenete a zajforrás erősítésére szolgál.

A DSP kártya ki- és bemenetei sztereó jack csatlakozók.

A teljesítményerősítő kimenetei banán hüvely, bemenetei pedig RCA csatlakozók.

A mikrofonerősítő bemenetei RCA csatlakozók, kimenete sztereó jack csatlakozó.

A mikrofont fel kell helyezni a cső szájához és mikrofonerősítőt be kell kapcsolni. A teljesítményerősítőre rá kell kapcsolni a +/- 25 V tápfeszültséget és kimeneteit csatlakoztatni kell a hangszórókhoz.

Ezután kezdődhet a működés. A DSP kártyán található nyomógombok segítségével a program kimozdítható az alapállapotból. Először célszerű identifikálni az átviteli utat. Ehhez meg kell nyomni a 2-es gombot. Az identifikálás után bekapcsolható a zajforrás. A 4-es gomb megnyomásával lehet be- és kikapcsolni az elnyomást. A részletes működtetéshez az F1. táblázat nyújt segítséget.

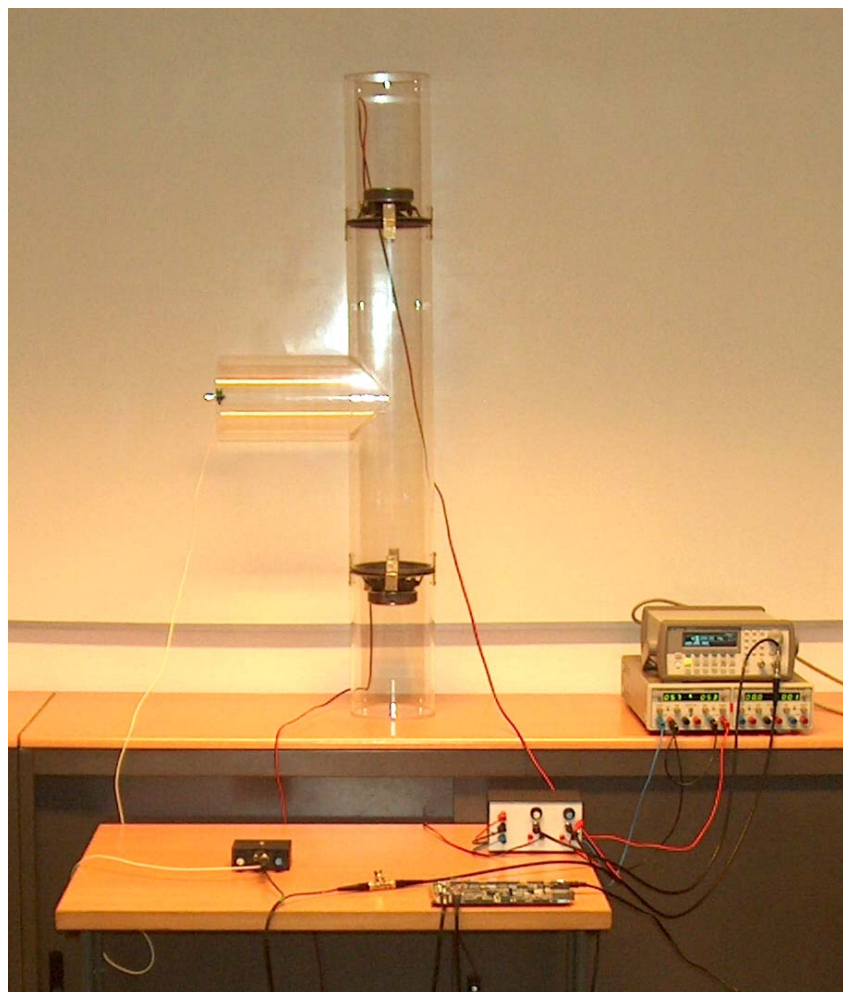
Az összeállított rendszer felépítése az F1. ábrán látható.

A CD mellékleten található fájlok:

- Forrásfájlok, projektfájl és szűrőfájlok
- Üzembe helyezési útmutatók
- Képek

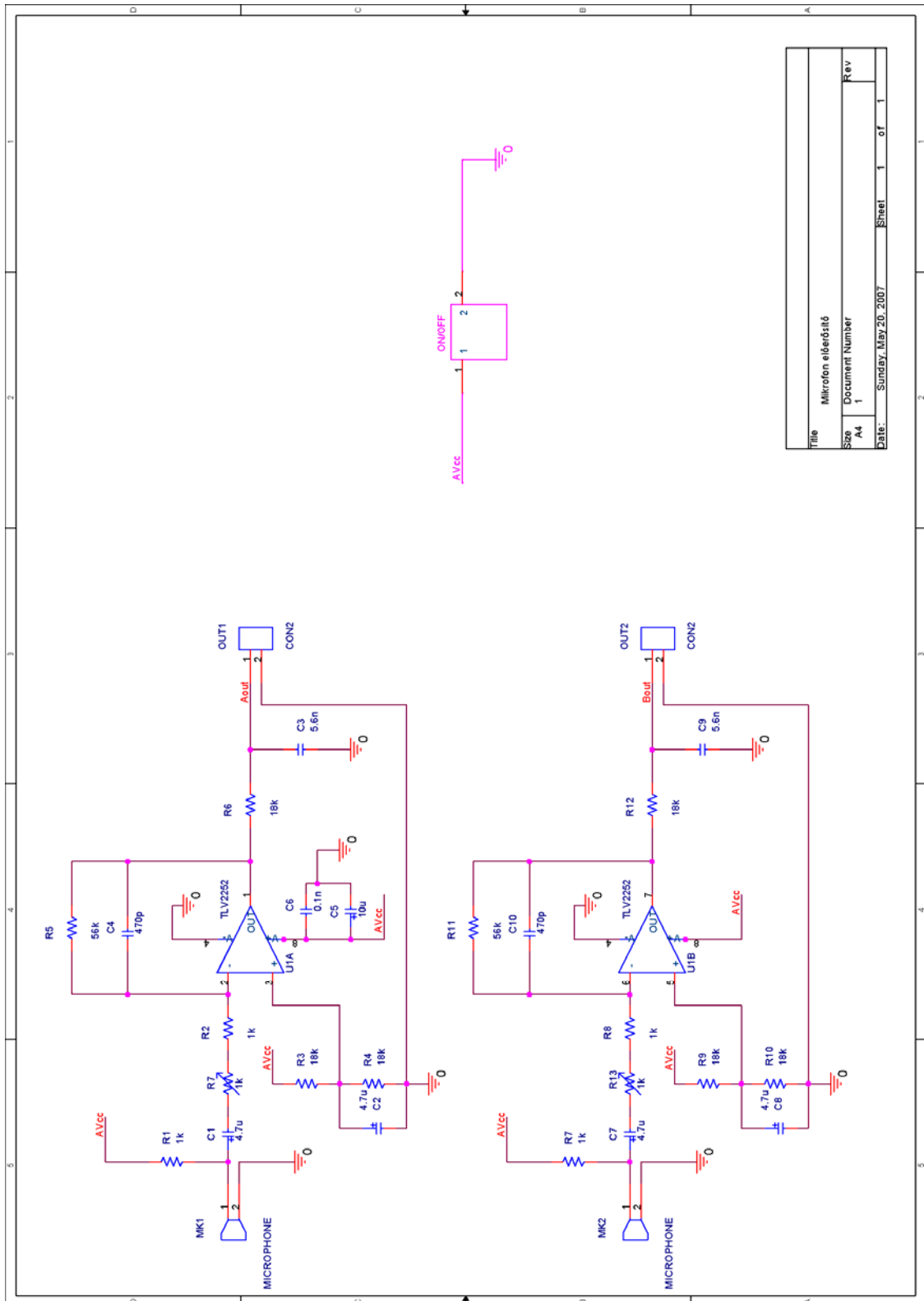
gombok	1	2	3	4
állapotok				
A zajelnyomás kikapcsolva	B	D	E	F
B identifikáló μ változtatása	A	C	B $\mu ++$	B $\mu --$
C μ változtatása	A	B	C $\mu ++$	C $\mu --$
D identifikálás	B	A	E	F
E együtthetők nullázása	B	D	A	F
F zajelnyomás bekapcsolva	B	D	E	A

F1. táblázat. A zajcsökkentő szoftver vezérlése

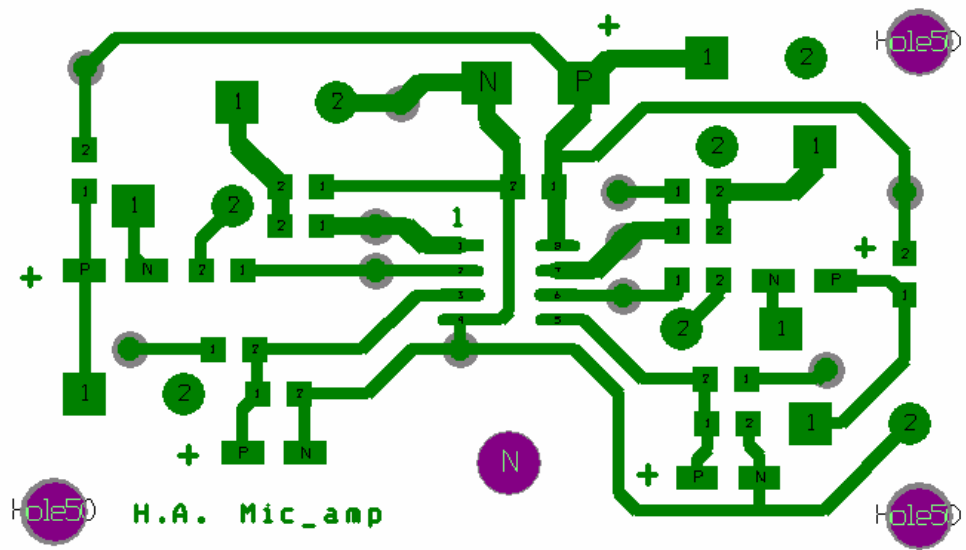


F1. ábra. Összeállított demonstrációs rendszer

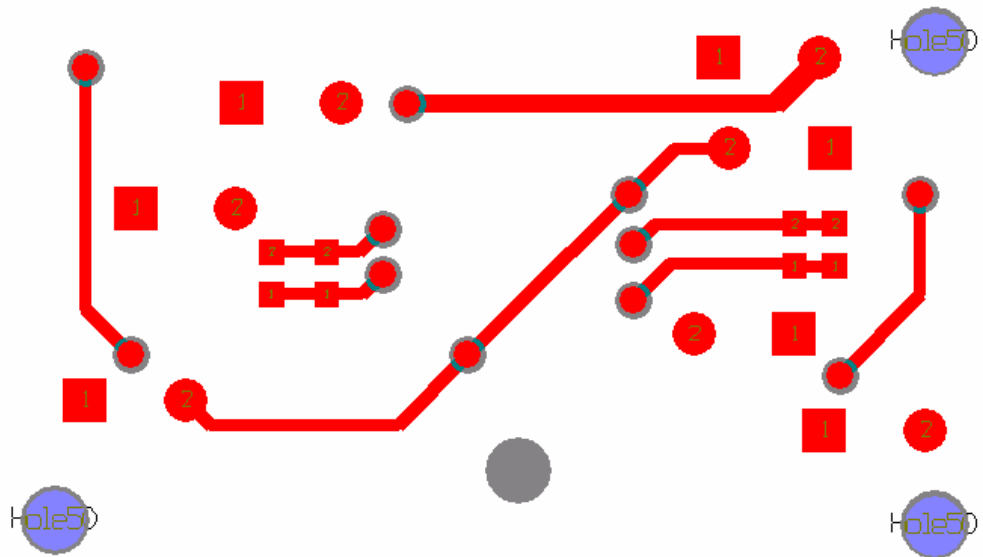
II. Kapcsolások



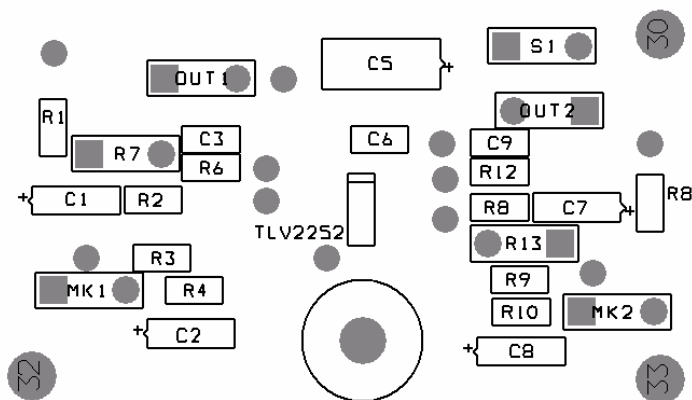
F2. ábra. Mikrofonerősítő kapcsolási rajza



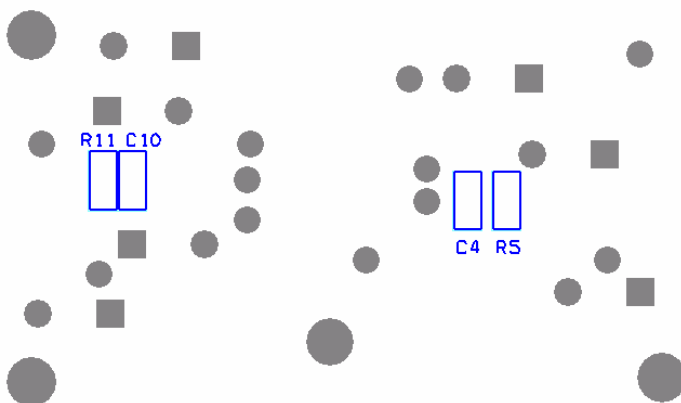
F3. ábra. Mikrofonerősítő alkatrész oldali huzalozása



F4. ábra. Mikrofonerősítő forrasztás oldali huzalozása



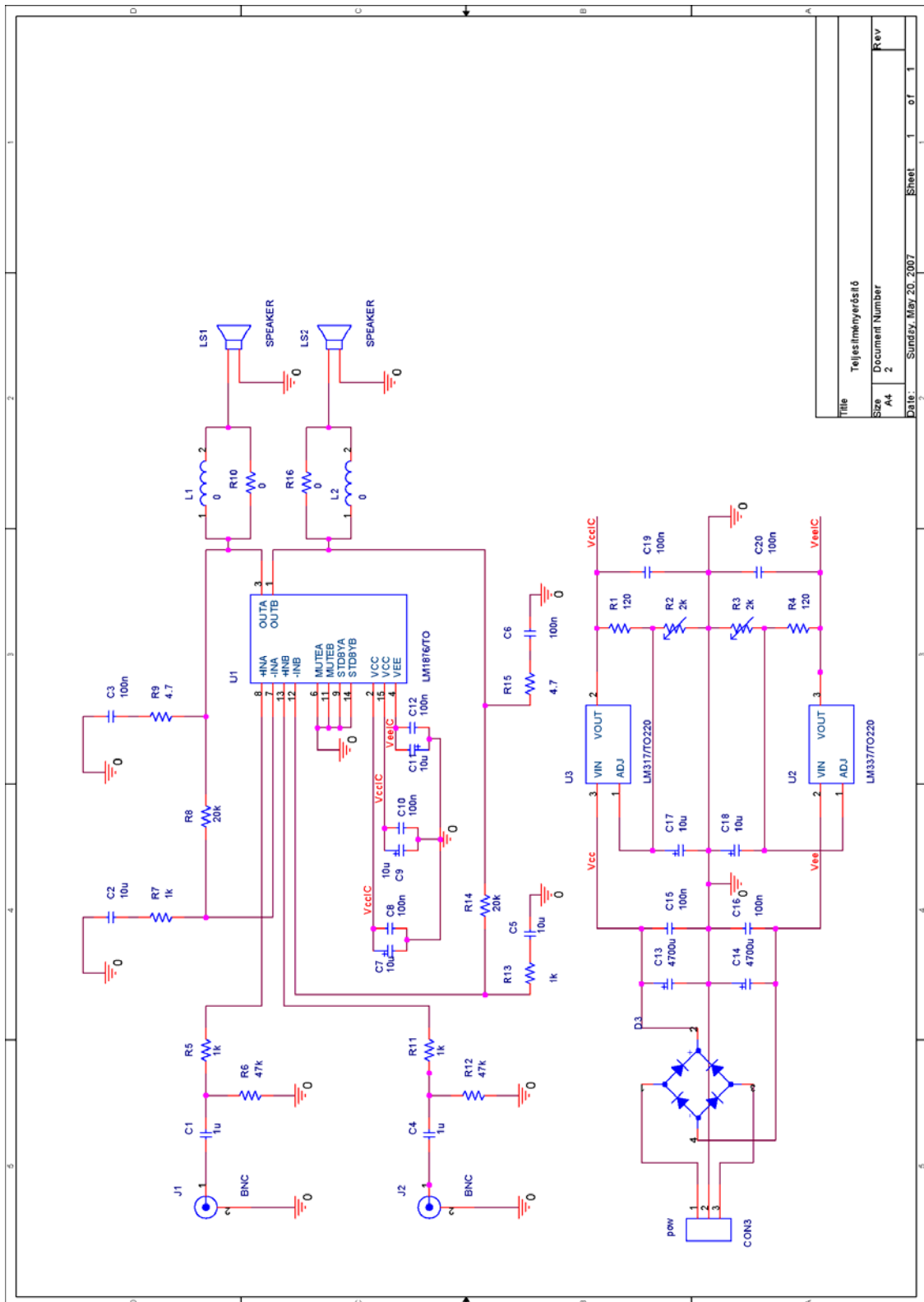
F5. ábra. Mikrofonerősítő alkatrész oldali beültetési rajza



F6. ábra. Mikrofonerősítő forrasztás oldali beültetési rajza

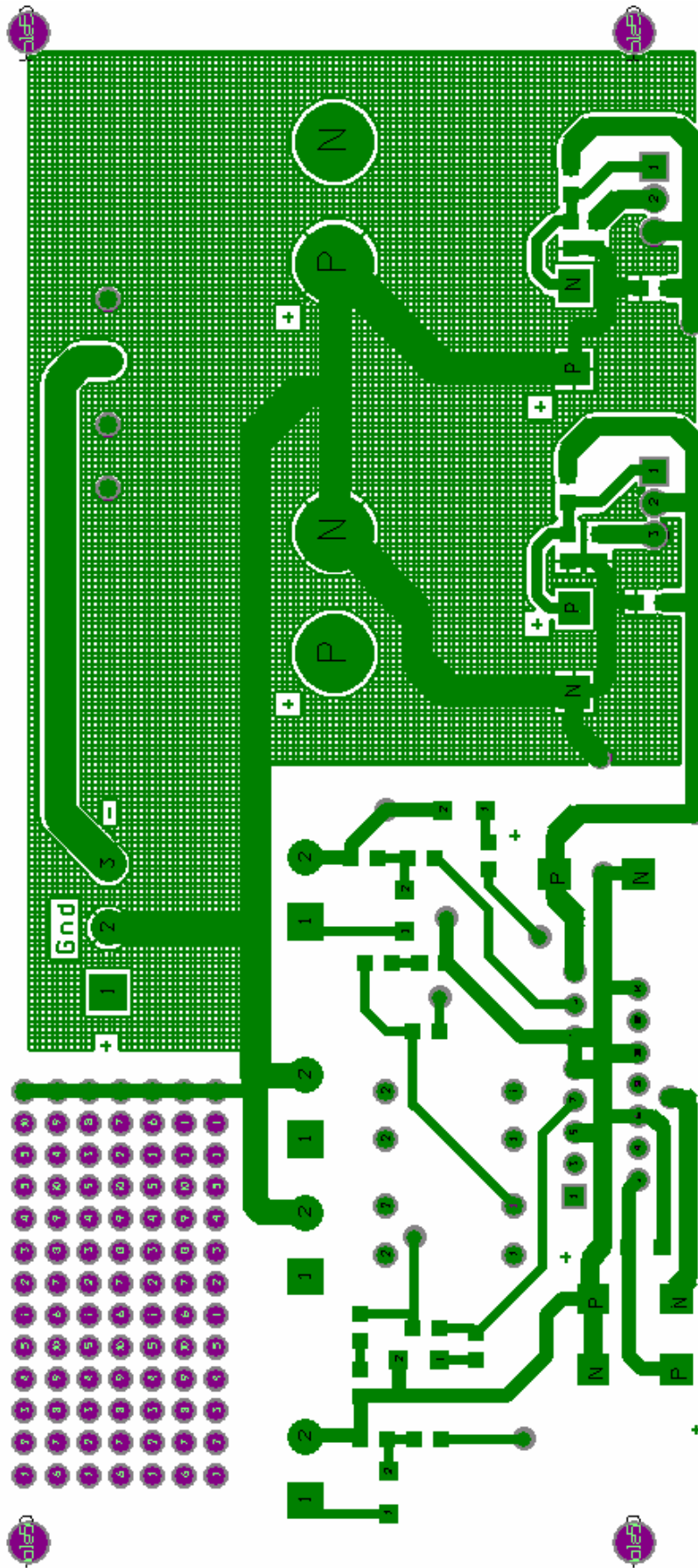
Alkatrészlista a mikrofonerősítőhöz

Sorszám	Mennyiség	Alkatrész	Érték
1	4	C1,C2,C7,C8	4.7u
2	2	C9,C3	5.6n
3	2	C4,C10	470p
4	1	C5	10u
5	1	C6	0.1n
6	2	MK1,MK2	Mikrofon
7	1	ON/OFF	ON/OFF kapcsoló
8	5	R1,R2,R7,R8,R13	1k
9	6	R3,R4,R6,R9,R10,R12	18k
10	2	R5,R11	56k
11	1	U1	TLV2252

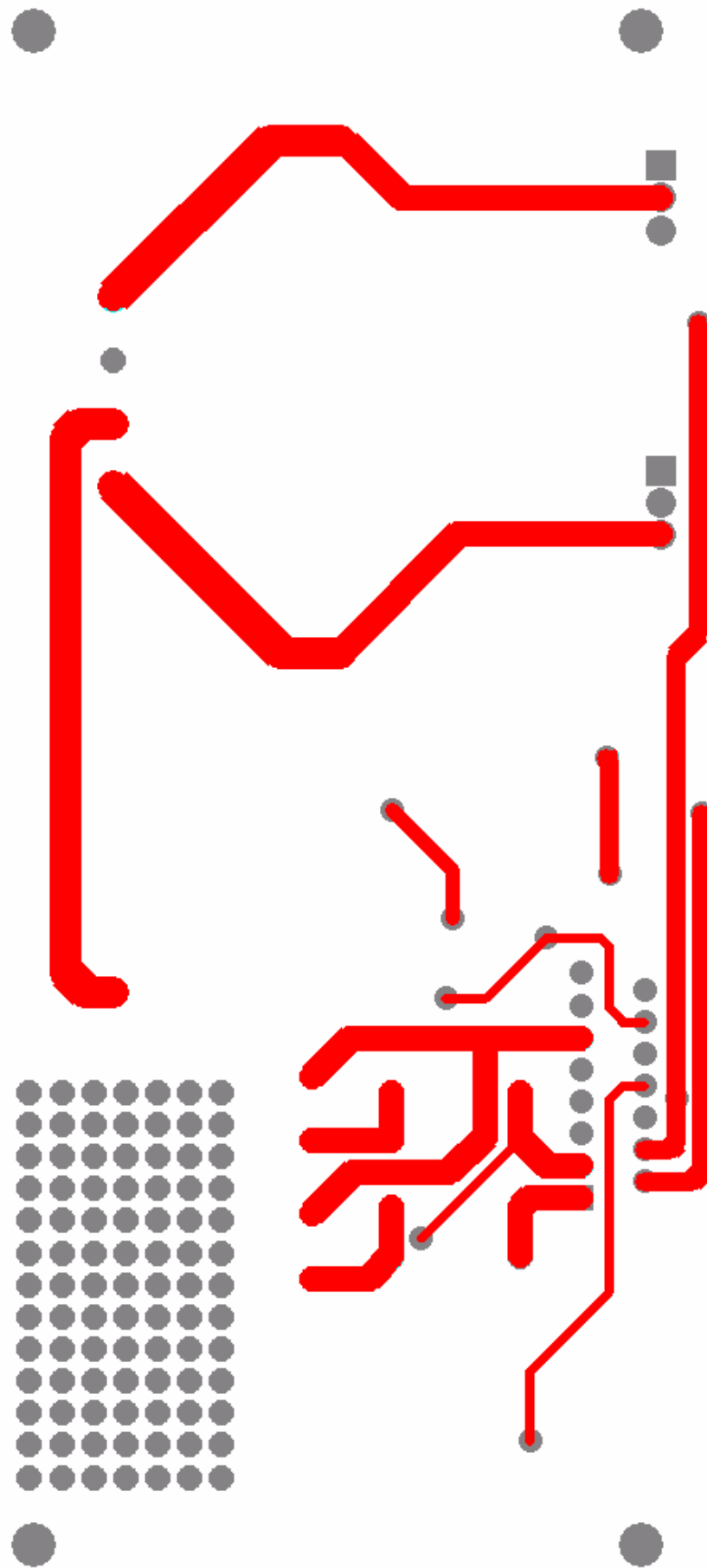


Title		Teljesítményerősítő	
Size		Document Number	
A4	2		
Date		Szerkeszt. Máj.20. 2007	
Sheet		1 of 1	

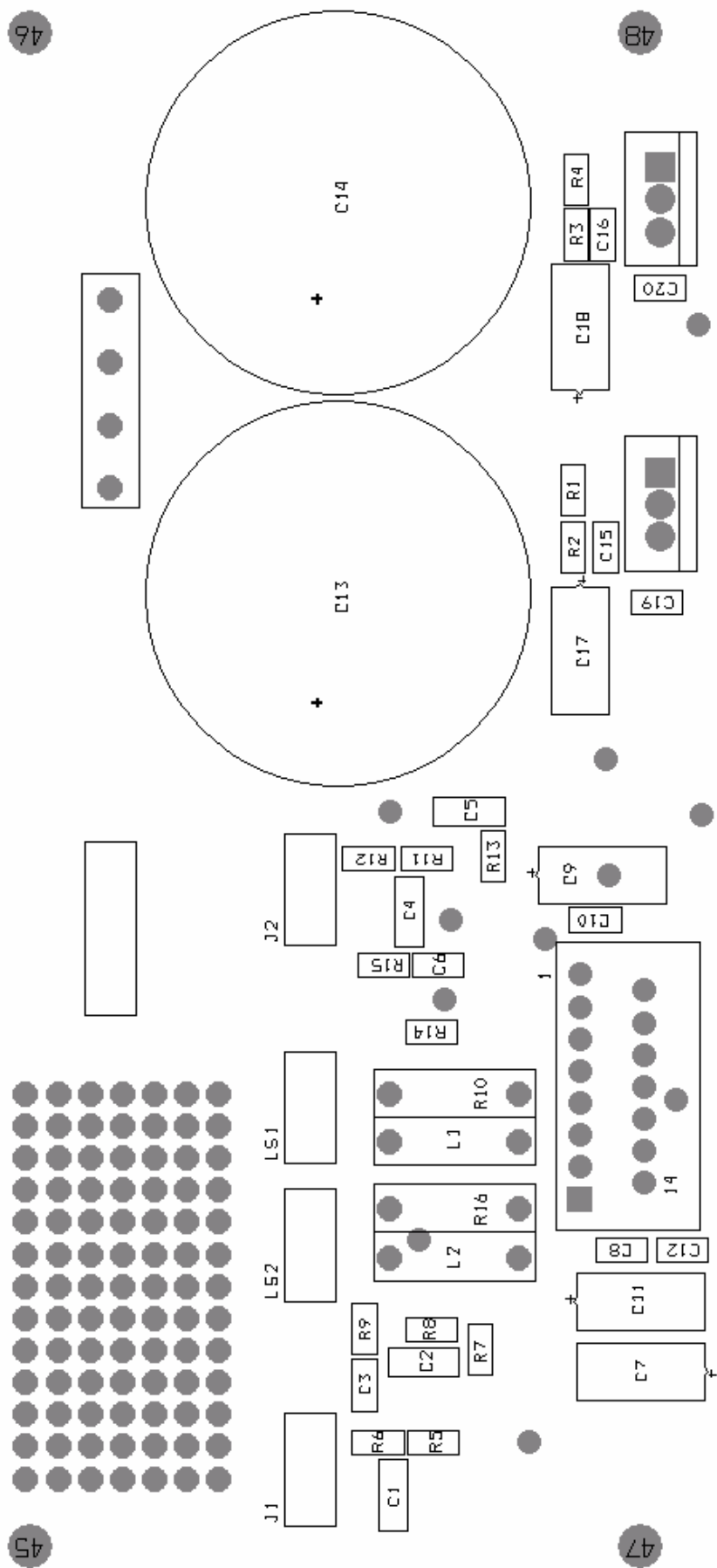
F7. ábra. Teljesítményerősítő kapcsolási rajza



F8. ábra. Teljesítményerősítő alkatrész oldali huzalozása



F9. ábra. Teljesítményerősítő forrasztás oldali huzalozása



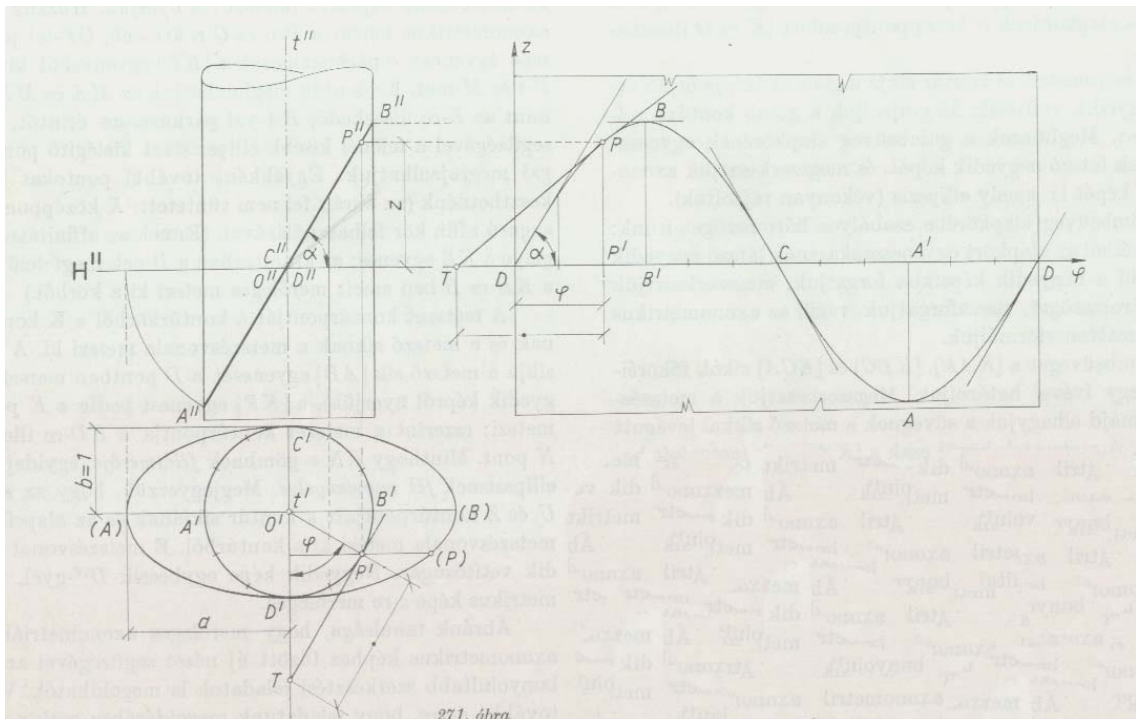
F10. ábra. Teljesítményerősítő beültetési rajza

Alkatrészlista a teljesítményerősítőhöz

Sorszám	Mennyiség	Alkatrész	Érték
1	2	C1,C4	1u
2	7	C2,C5,C7,C9,C11,C17,C18	10u
3	9	C3,C6,C8,C10,C12,C15, C16,C19,C20	100n
4	2	C14,C13	4700u
5	1	D3	Graetz-híd B80 6A
6	4	L1,L2,R10,R16	0
7	2	R4,R1	120
8	2	R2,R3	2k
9	4	R5,R7,R11,R13	1k
10	2	R6,R12	47k
11	2	R8,R14	20k
12	2	R15,R9	4.7
13	1	U1	LM1876/TO
14	1	U2	LM337/TO220
15	1	U3	LM317/TO220

III. A két csődarab toldása

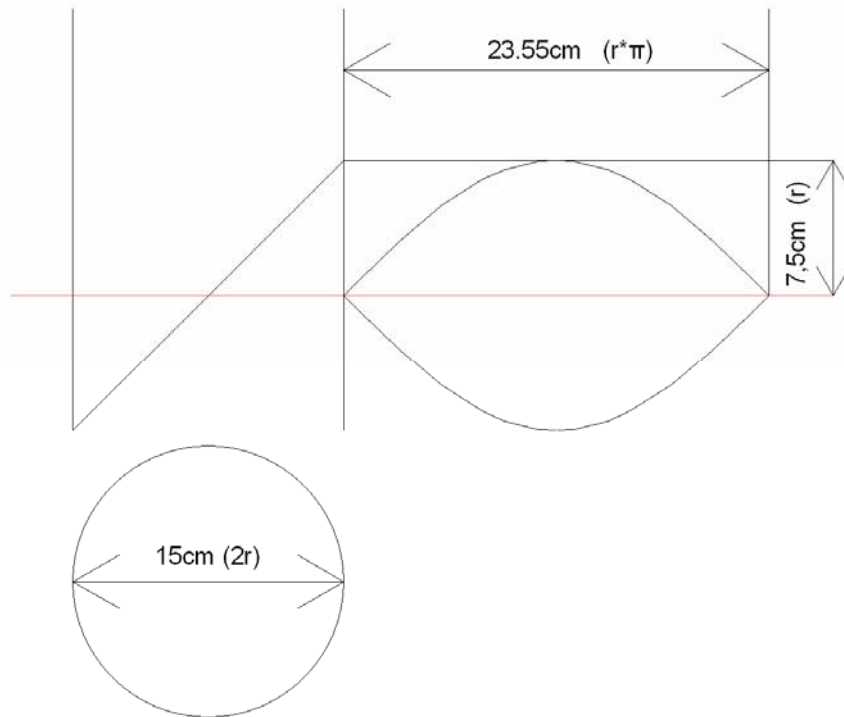
A két csődarabot a tervnek megfelelően derékszögben kellett összetoldani (F18. ábra). A két csődarabon két hasonló vágást kellett ejteni. Nem állt rendelkezésünkre olyan automata fűrészgép, amelybe a csöveget befogva a kívánt profilt le lehet vágni. A módszerünk az volt, hogy a síklapra kivetített vágási profil ráfektettük a cső oldalára és a vágást e mentén a vezető vonal mentén kézi fűrészsel ejtettük. A profil oldalnézetben két egymásra merőleges egyenes, amely vágása automata fűrészsel látszólag nem jelentett volna problémát. Kézzel vágva azonban szükség volt egy olyan vezető vonalra amelyhez a fűrészst igazítani lehetett. A vágási profil meghatározásához a [17] hivatkozás nyújtott segítséget. Innen származik a következő ábra:



F11. ábra. Egyenes körhenger síkmetszése és kifejtése [17]

Az ábrán látható szinuszcörbe fél periódusa az síkba kiterített metszet, amelyet megfelelően méretezve, kinyomtatva és ráfektetve a cső oldalára, megkaptuk a keresett vezető vonalat.

A kifejtetett metszési sík a 15 cm átmérőjű csőhöz a következő:



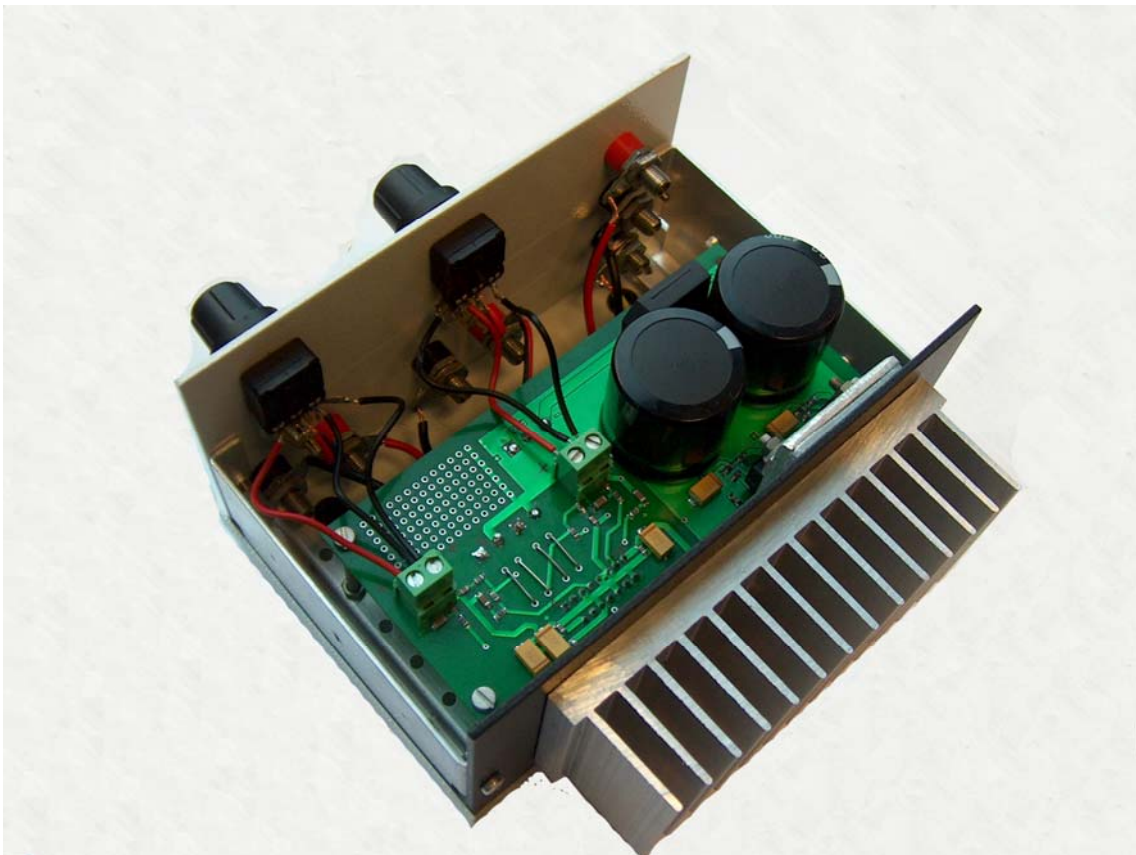
F12. ábra. A cső oldalnézete a kiterített áthatással

A kép bal oldalán látható a cső oldalnézete, mellette a kiterített áthatás, amely egy 7,5 cm amplitúdójú szinuszhullám fél periódusa. A méretarányosan kinyomtatott vonalat ráfektetve a cső oldalára megkaptuk a vezető vonalat.

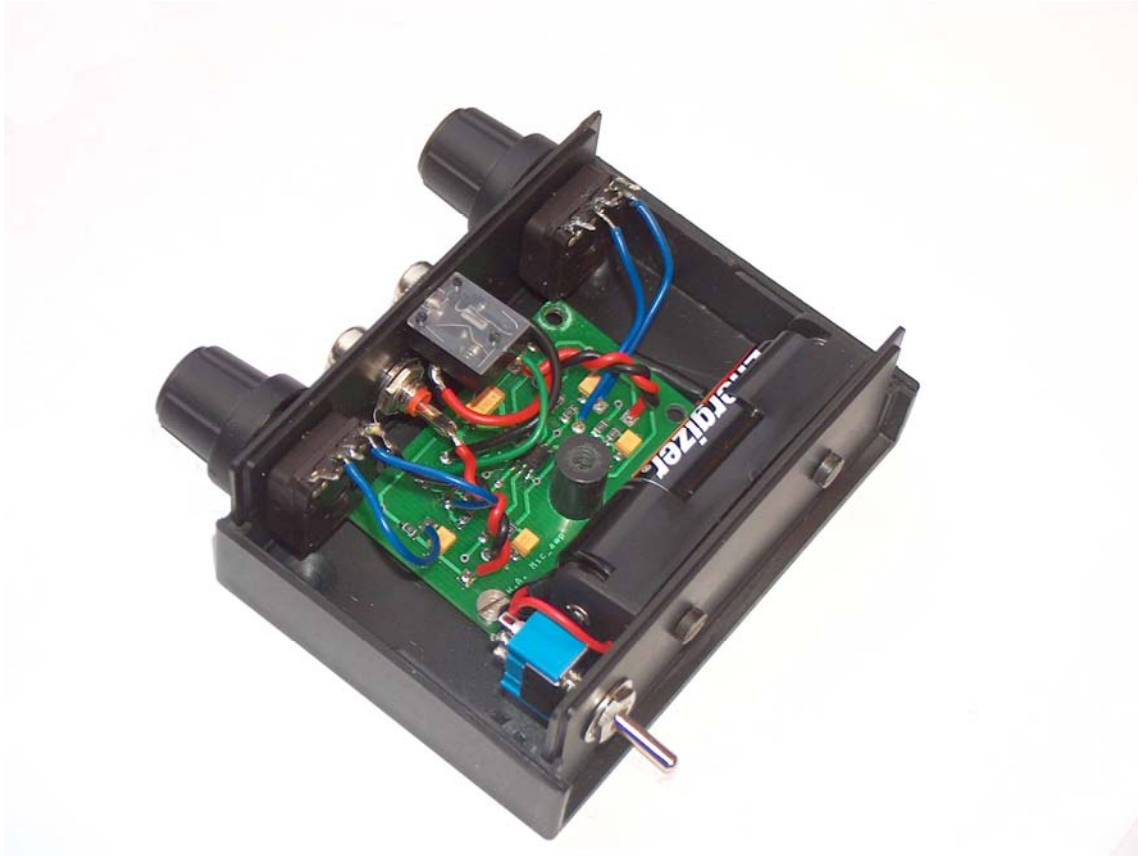
IV. Képek



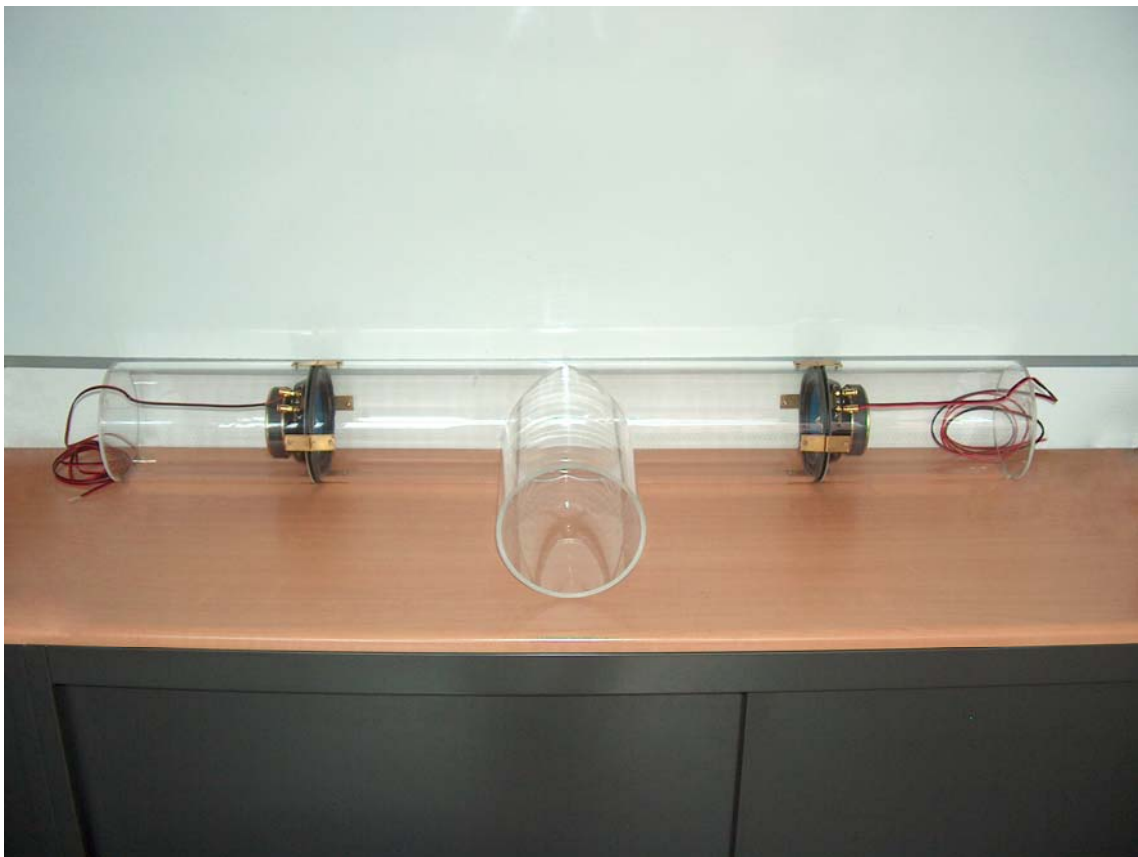
F13. ábra. Mikrofonerősítő és Teljesítményerősítő



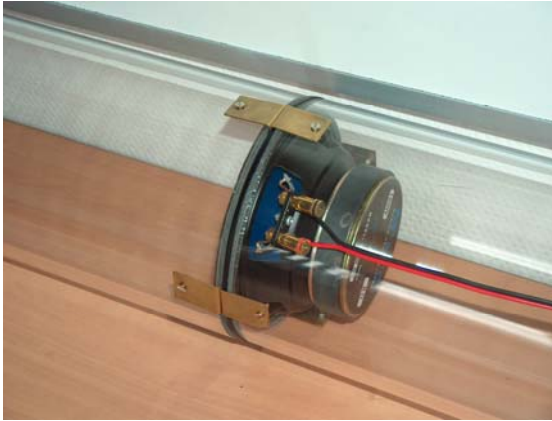
F14. ábra. Teljesítményerősítő



F15. ábra. Mikrofonerősítő



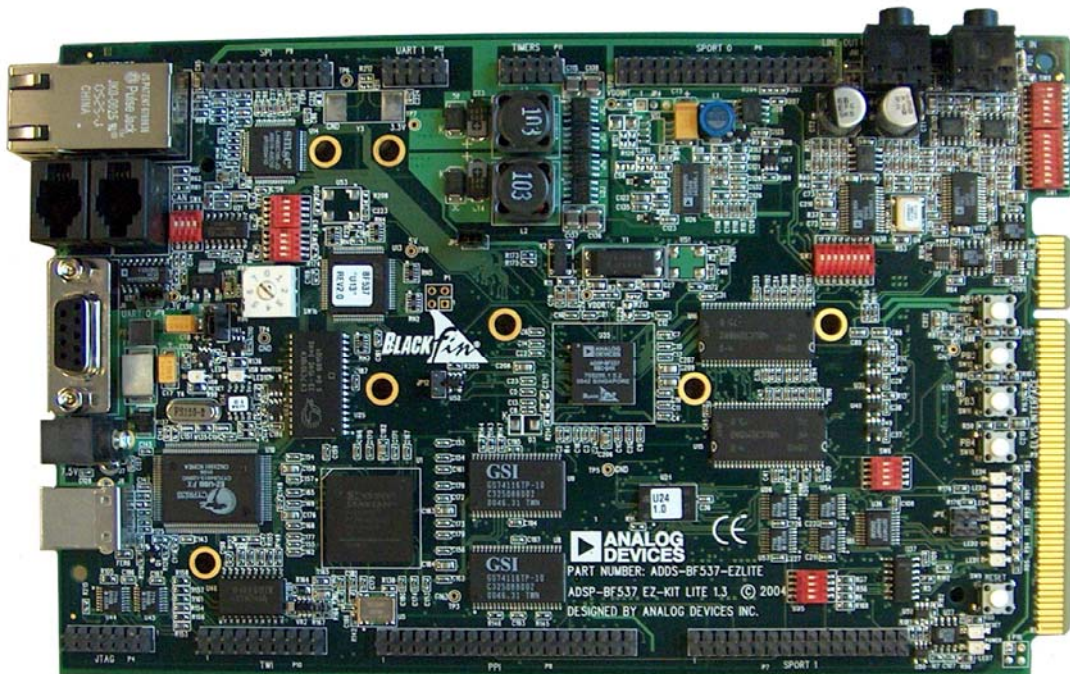
F16. ábra. Akusztikus rendszer



F17. ábra. A hangszóró rögzítése



F18. ábra. A két csódarab illesztése



F19. ábra. BF537-EZLITE fejlesztőkártya



F20. ábra. Mikrofon