

Pécsi Tudományegyetem
Pollack Mihály Műszaki és Informatikai Kar

A fül természetes torzításának kutatása

Konzunlens:

Máthé Kálmán

Intézeti oktató

Írta:

Gardánfalvi András

Villamosmérnök hallgató

Pécs, 2013.

TARTALOMJEGYZÉK

1. Témaválasztás	
1.1. Hallásküszöb emelkedése hangos zenehallgatás következtében.....	1
1.2. A NaSDi projekt bemutatása	5
1.3. A kutatás célja	7
2. Tudományos háttér	
2.1. Audiológiai alapok (A fül működése)	8
2.2. Akusztikai alapok (A hang mint fizikai jelenség)	12
2.3. Zenei alapok (különleges hangszerek).....	14
3. A fül becsapásának elmélete: A felharmonikus vizsgálat	
3.1. Korábbi tények összerendezése.....	16
3.2. Felharmonikus képzés fizikai, és matematikai alapja.....	17
4. Az eszköz elkészítése	
4.1. A matematikai formula elektronikai kivitelezése	18
4.2. Nyák terv	26
5. Alkalmazás	
5.1. Az eszköz alkalmazása	27
5.2. Az algoritmus alkalmazása.....	27
6. Köszönetnyilvánítás	28
7. Irodalomjegyzék	29

1. Témaválasztás

1.1. Hallásküszöb emelkedése hangos zenehallgatás következtében

A zene szeretete ősidőktől kezdve az ember elhagyhatatlan jellemzője. Miközben a zenei műfajok, stílusok, kifejezésmódok és eszközkészletek változnak, formálódnak, az a tény változatlan marad, hogy szeretjük a gyomrunkig hatoló mélyhangokat. A modern technológiák fejlődésével egyre több lehetőségünk van a zenehallgatásra, illetve annak minőségében is válogatósak lehetünk.

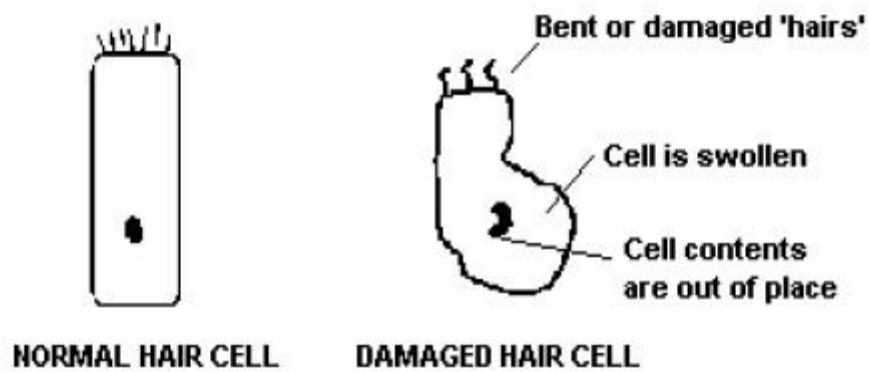
Már akárki megteheti, hogy útközben vagy otthon ülve, esetleg sportolás közben is zenét hallgasson hordozható lejátszóján.

Amerikai kutatók kezdték az emberek hallásának alsó küszöb értékét vizsgálni. Az amerikai kutatások alapján elmondhatjuk, hogy az emberek hallás küszöbe egyre magasabbá válik, tehát romlik az emberek (különösen a fiatalok) hallása. Ezért leginkább a hangos zenehallgatás okolható, de az utcai forgalom zaja, és számos egyéb zajforrás is közrejátszik. Legveszélyesebb a fejhallgatós zenehallgatás, hiszen itt a hangerő fokozásával próbálunk elérni jobb tér érzetet, jobb basszus élményt. A zene spektrumának hiányossága több okra vezethető vissza. Az átviteli eszköz az első szembetűnő probléma. A fülhallgatók ~1cm átmérőjű membránján elég nehéz 20 Hz körüli frekvenciát megszólaltatni, pontosabban szólva nem is lehet. A fülünk a mélyebb hangok felharmonikusait érzékeli, és ezekből az információkból „pótolja ki” a hiányzó alapharmonikust.

Másik lehetséges ok, hogy a fülhallgató csak a hallójáratainkra hat. Ezt kifejteném. Egy koncerten, hangversenyen a hangrezgések nem csak a fülünket érik, hanem teljes testünket. A karunkon lévő szőrszálaktól kezdve a csontjainkon át még a gyomrunk is érzékeli a rezgéseket. Tehát a teljes testünk részt vesz a hallásban.

A fülhallgatón keresztüli zenehallgatás talán még a kisebb probléma, hiszen annak ellenére, hogy a zeneszeretet a hangerő fokozásába hajszol minket, mégis csak a mi döntésünk a hangerő megválasztása. Komolyabb probléma a koncertek, vagy a discok hangosítása, ahol nagyon gyakran a 130 dB-es fájdalom küszöböt is átlépik. Arról nem beszélve, hogy 90dB felett a térérzékelés és a fül felbontóképessége is drasztikusan csökken.

Mi történik hangos zenehallgatás közben? A nagy hangnyomás a baziláris membrán szőrsejtjeit károsítja, amelyek felelősek a rezgések, impulzusok átviteléért a hallóidegre. A sérült szőrsejtek nem lesznek képesek az impulzusok korrekt átvitelére.



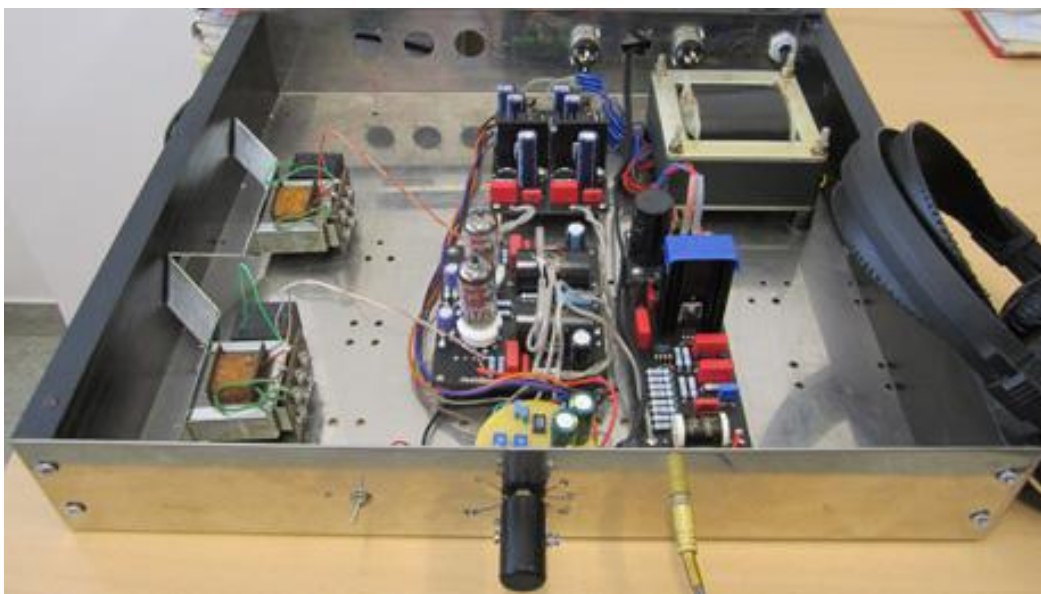
1. ábra. Normális (baloldali) és egy sérült (jobboldali) szőrsejt.
Kép forrása: Victorian Deaf Society: EFFECTS OF LOUD MUSIC ON HEARING.

Tehát kijelenthetjük, bár jelentős fejlődésen mentek át a zenelejátszó eszközök, velük együtt jelentős hiba is kiburjánzott, hiszen a fiatalok körében terjedő hallásküszöb emelkedés egyre erősödő probléma, amire fokozott figyelmet kell fordítani.

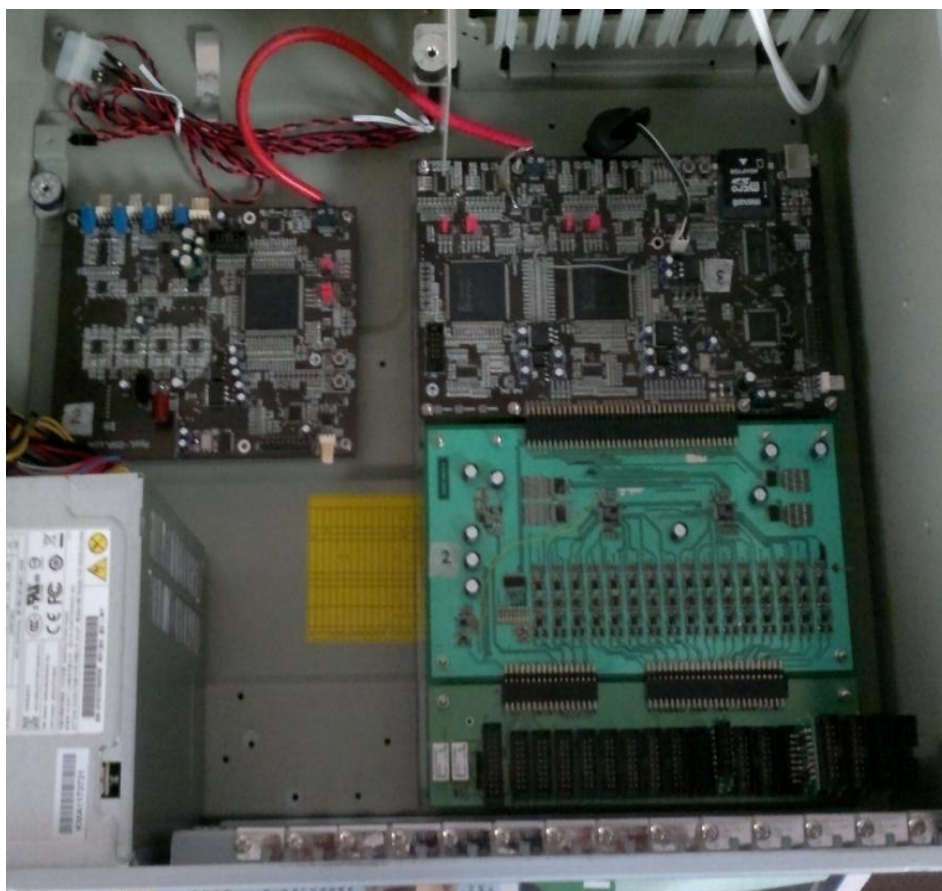
1.2. A NaSDi Projekt bemutatása

Ami miatt elkezdett érdekelni a probléma, az Máthé Kálmán Tanár Úr idevonatkozó szabadalma volt. Máthé Kálmán először körülbelül 40 éve vette észre, hogy csöves erősítők kisebb teljesítmény mellett is ugyanolyan jól, vagy még jobban szólnak, mint nagyobb teljesítményű tranzistoros testvéreik. Összehasonlított egy adott teljesítményű csöves, és egy nála nagyobb teljesítményű tranzistoros erősítőt. Meglepő eredménnyel zárult a kísérlet; a csöves erősítő jobban szólt. Megismételte a kísérletet, és megmérte az erősítők kimenő teljesítményét. Még meglepőbb eredmény jött ki, habár hangosabbnak hallatszik a csöves erősítő, alacsonyabb hangnyomás volt mérhető, mint a tranzistoros erősítőnél. Ez igazolta ugyan az eszközök teljesítményének arányát, viszont felvetette a kérdést: miért szól jobban a csöves erősítő?

Az elektroncső erősítése, illetve annak torzítása hasonlít a fül természetes torzítására. A fül torzítása lineárisan nő a nagyobb hangerő hatására, és az elektroncső torzításáról is elmondható ez. A NaSDi projektben létrehozott prototípussal kipróbálható a torzítás okozta hangérzet, és ez összemérhető a normális torzításmentes erősítéssel. Tehát az elv bizonyított. Viszont a NaSDi kutatás résztvevői nem elégednek meg ezzel az eredménnyel, a fül torzításának pontos függvényét szeretnék megismerni. Terveik közt szerepel a fül belsejének vizsgálata, a dobhártya, illetve az egyes szőrszálak viselkedésének megfigyelése, hanghatásokra adott reakciójuk tanulmányozása. Erre az Otoakusztikus Emisszió (OAE) mérésének technológiáját választották. Egy hangingerrel mozgásba hozzák a szőrszálakat, majd azok elkezdenek lengeni. Ezt a lengést lehet mérni egy lock-in erősítő mérőműszerrel. A lock-in erősítő azért szükséges, hogy az általunk kiküldött hangot, illetve egyéb zajokat kivonja a mért jelből. Ezáltal leszünk képesek nagyon alacsony jelszinteket is pontosan mérni. Az így kapott jelekből tomográfiás módszerrel képet alkothatunk a szőrszálak mozgásáról. A szőrszálak viselkedéséből kiderülhet a torzított hangok pszichoakusztikus hatásának oka.



2.ábra. Fotó a torzítási jelenség prototípusáról.
Forrás: Máthé Kálmán fotója.



3. ábra. 8 csatornás mérőműszer.
Forrás: Máthé Kálmán fotója.

1.3. A kutatás célja

A csöves erősítők példája tehát kiútnak látszik a fülünk haláltusájához vezető folyamatból, hiszen kisebb hangnyomással tudunk jobb térélmény, hangosabb érzetet kelteni a fülben. Ha megtaláljuk a fül pontos torzítását leíró függvényt, azt utánózva jóval felülmúlhatjuk bármely csöves erősítőt, és alacsony hangnyomással érnék el kitűnő hangérzetet.

A technológia nem ismeretlen mások számára sem. Például mióta jogszabály van a TV reklámok hangerejére, azóta a TV adók is hasonló technológiával próbálják fokozni a reklámok hangerő érzetét. Másik példával élve több gyártó alkalmaz Bass Booster technológiát, amikor is a mélyebb hangok felharmonikusainak kiemelésével próbálják a mélyhangok érzetét erősíteni. Ezekkel az a probléma, hogy mivel a fül torzítását csak közelítik, túl nagymértékben rontják az eredeti jelet. Hallhatóan rossz minőségűvé válik a jel, recsegősek lesznek a hangok.

A cél tehát megtalálni a fül természetes torzítását, hogy később ezzel az algoritmussal modulálva a zenét jobb hanghatást érzünk el. A dolgozatom célja egy olyan eszköz megtervezése, amellyel közelebbi értéket kapunk a fül torzítására.

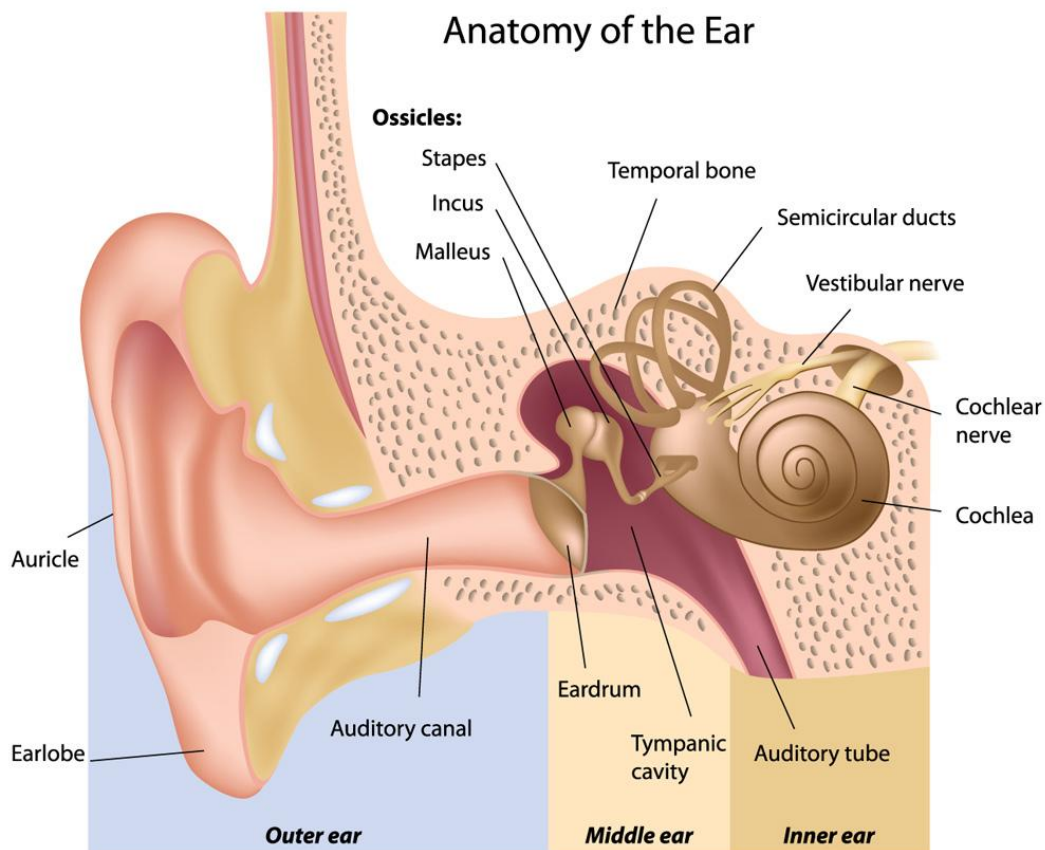
Ha elkészül egy ilyen eszköz, akkor pár száz, vagy ezer emberen elvégezve a kísérletet átlagolt értéket kaphatnánk, ami az emberek nagy részének javítaná a zenehallgatás élményét, oly módon hogy alacsonyabb hangnyomással, nagyobb hangérzetet érnénk el.

2. Tudományos háttér

2.1. Audiológiai alapok: A fül működése

Fontosnak tartottam hogy ne legyen homályos terület a kutatással kapcsolatban, így először a fület tanulmányozom.

A fül 3 fő részre tagolható. Ez a külső fül, a középfül, és a belfül. A külső fül a 4. ábrán késsel jelzett szakasz, feladata a hang bevezetése a belfülhöz, illetve a hang irányának felismerése. Védi a középfület és a belfület. A külsőfül 2.5-4 kHz-en rezonátorként működik, tehát az ezen tartományba eső hangokat körülbelül 10-15dB-el erősíti.

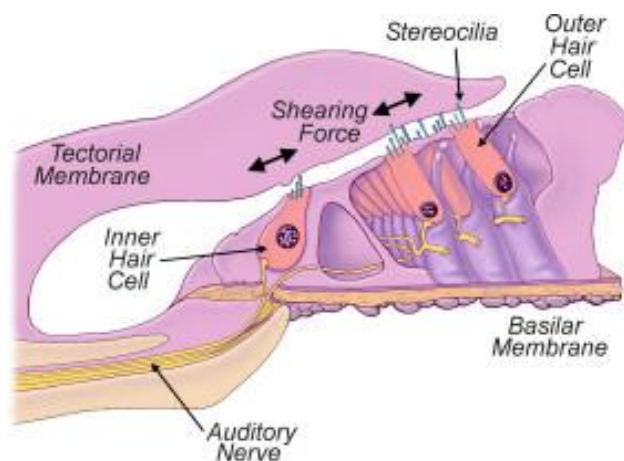


4. ábra. A fül anatómiája.

Forrás: Scott and White healthcare

A középfül feladata a külső és belfül illesztése. Ez nem egyszerű feladat, hiszen a külsőfülben még levegőben terjed a hang, a belfülben pedig már folyadékban halad tovább a hangrezgés. Mint tudjuk, folyadékokban jóval nehezebben terjednek a rezgések, ezért a középfülnek erősítő szerepe is van. Erősítése van egyrészt a dobhártya és a kengyeltalp

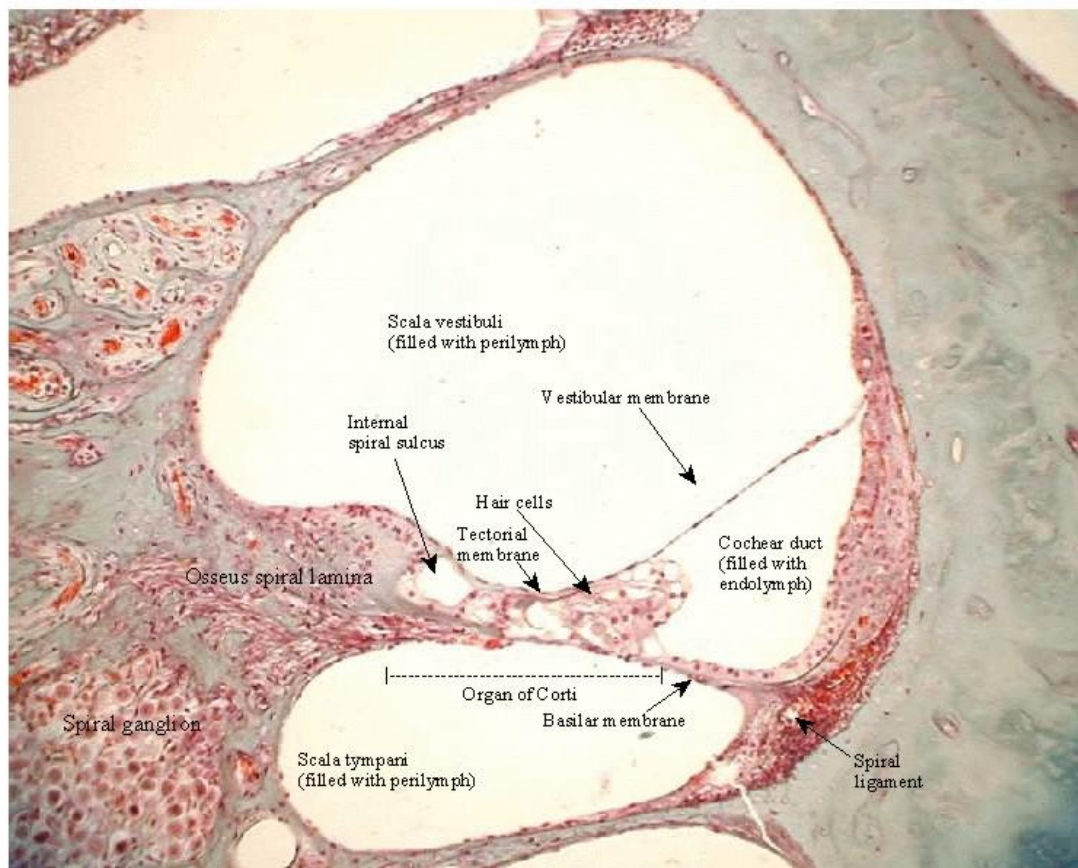
együttes működésének. Az emberi dobhártya körülbelül 55mm^2 -es hasznos felülettel rendelkezik. Az itt összegyűjtött rezgéseket közvetíti a megközelítőleg 3.2 mm^2 -es kengyeltalpra, ami az oválisablakon közvetíti a rezgéseket a belfülbe. Tehát egy ~ 17 szer kisebb felületre közvetíti a rezgéseket. A $P=F/A$ összefüggésből kiindulva láthatjuk, hogy ha a felület 17-edére csökken, akkor a nyomás 17-szer nagyobbá válik. Tehát ez 17-szeres erősítésnek felel meg, ami körülbelül 24,5 dB-el erősíti a hangrezgéseket. Továbbá a 3 hallócsont (kalapács, üllő és kengyel), egy kétkarú emelőrendszert alkot, ami további 1,3-1,5-szörös erősítést eredményez. Tehát a középfül összességében mintegy 26,7 dB-el erősíti a dobhártyára érkező rezgéseket. A kengyeltalp pedig a belfül ovális ablakán adja át a rezgéseket. Fontos hogy a középfül impedancia illesztő szerepe csak akkor érvényesül, ha a dobüreg légtartó és a dobüregi nyomás azonos a külső légnyomással. A belfül felcsavarodott csontos csőhöz hasonlít, ami 3 fő részre oszlik. A kengyeltalp oválisablaknál leadott rezgései a scala vestibuli-n haladnak tovább, ami mellett a ductus cochlearis van. Kettő járatot csak a Reissner-membrán választja el (6. ábra). Harmadik járat a scala tympani, ami a kerek ablak útján van kapcsolatban a dobüreggel, és gyakorlatilag nyomáskiegyenlítő szerepe van. A ductus cochlearis-ban a Membrana tectoria és a Membrana basilaris között helyezkedik el a Corti-szerv, ami a hallóideg végkészülékének felel meg. A Membrana tectoria fizikai kontaktusba van a szőrsejtekkel (5. ábra).



The Organ of Corti

5. ábra A Corti szerv

Forrás: <http://www.neurophys.wisc.edu/auditory/johc.html>



6. ábra. A csiga járatának metszete.

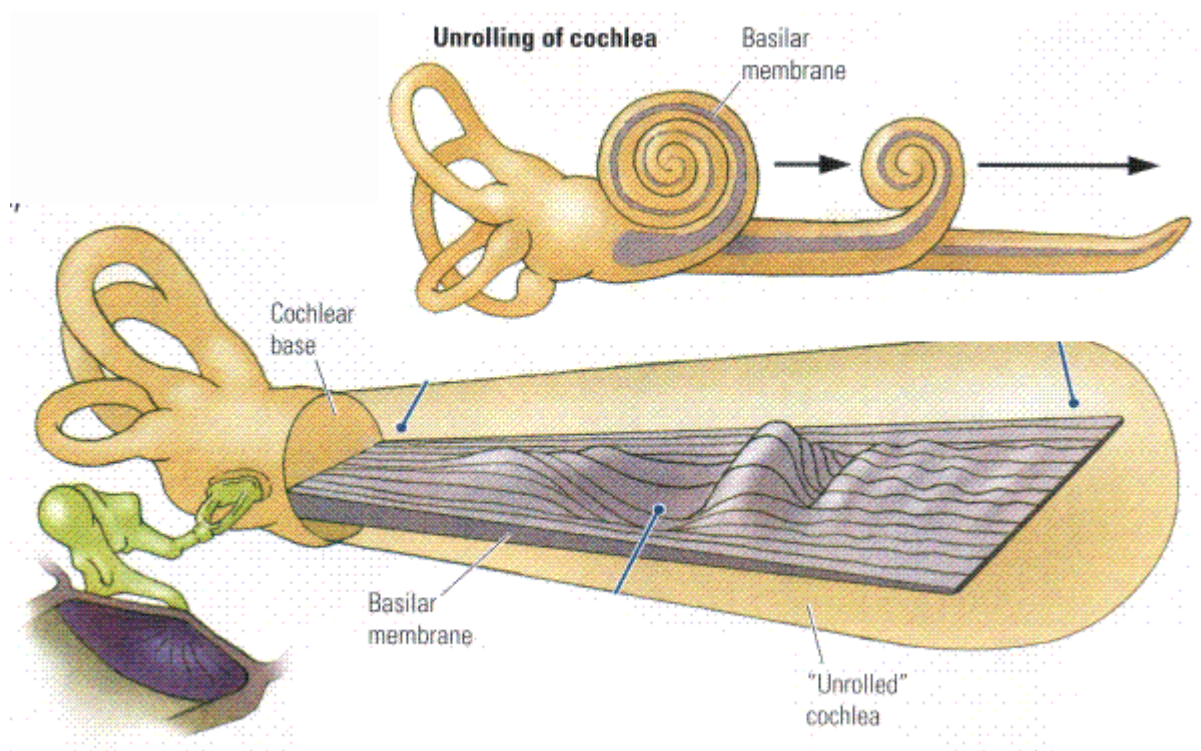
Forrás: HISTOLOGY OF THE INNER EAR

©David B. Fankhauser, Ph.D.,

Professor of Biology and Chemistry

University of Cincinnati Clermont College

A Corti szervet 100 mikron széles, és 32 mm hosszú spirálisan futó szalagként kell elképzelni. A külső szőrsejtek három sorban, a belsők egy sorban vannak. A Corti szervben alakulnak a hangrezgések elektromos jelekké, amelyeket agyunk dolgoz fel. Egész pontosan a belső-szőrsejtek felelősek a mechanikai inger elektromos jellé való átalakításáért. A külső szőrsejtek pedig egy aktív mozgással felerősítik az adott frekvenciájú hangot. Mint pár sorral feljebb írtam, a Corti szervet egy szalagként kell elképzelnünk. Hanghatásra ezen szalagon végig fut a hanghullám, minden szőrsejt reagál rá valamilyen szinten, viszont minden frekvenciához egy adott szakasz kapcsolható, és ezen a szakaszon érzékeljük a legerősebben a jelet (7. ábra).



7. ábra. a Corti szerv „kiterítve”

Forrás: <http://www.cs.indiana.edu/~port/teach/641/hearing.for.linguists.html>

Tehát a fül így érzékeli a hangmagasságot, és ebből az is következik, hogy a fülünk érzékeny a felharmonikusokra.

2.2. Akusztikai alapok (A hang mint fizikai jelenség)

A hang nem más, mint a levegő részecskék rezgése, amit a fülünk elektromos jellé alakít és juttat az agyunkba. A levegő részecskék rezgésbehozásához kell egy hangforrás. Hangforrás lehet gyakorlatilag bármilyen rugalmas test, amelyet rezgésbe hozunk. A hangforrás rezgése, mint nyomáshullám terjed a levegőben. A hangtér, amiben terjed a hang; szintén rugalmas, és ettől függ a hang terjedési sebessége. A hang tehát egy longitudinális, hangtérben terjedő fizikai jelenség, ami nyomáskülönbségként is felfogható. A hangok frekvenciáját tekintve 4 részre oszthatóak:

- infrahangok (16Hz alatt)
- hallható hangok (16Hz-20Hz és 20 kHz között)
- ultrahangok (20kHz és 100kHz között)
- hiperhangok (100kHz fölött).

A hangot három fizikai paraméter jellemzi. A frekvencia, amplitúdó, fázis.

Egy ciklusnak nevezzük a rezgés egy felfelé és egy lefelé kitérő hullámpárját. A frekvencia a rezgés időfüggvényét nézve egy ciklus T periódusidejének reciproka, azaz azt adja meg, hogy egy másodperc alatt hány ciklus zajlik le. A hang frekvenciáját, mint hangmagasságot érzékeljük. A hang amplitúdója, a hullámok intenzitásával egyenlő. Gyakorlatban ez kicsit bonyolultabb, mivel a hang egy nyomáshullám, tehát a hang amplitúdója az a nyomáskülönbség, ami a rezgés okozta nyomás és a légnyomás közt lép fel. A fázist nem ismertetem, mert témám szempontjából nem releváns.

Ezen két fő jellemző mellett még számos egyéb tényező szól bele abba hogy a hangot milyennek halljuk. A hang fizikai erősségét hangintenzitásnak nevezzük. A hangintenzitás az egységnyi felületen egységnyi idő alatt átáramló hanghullám teljesítményének középértéke, aminek jele a $[I]$, mértékegysége: 1 W/m^2 .

Az emberi fül érzékenysége megkívánja a logaritmizálást, hiszen a legalacsonyabb hang amit még hall a fül, az 10^{-12} W/m^2 , ennél a kiabálás 100 milliószor és a sziréna 100 billiószor erősebb intenzitású. Ezért a hang mértékegységeként végül a Bel-t választották – Alexander Graham Bell tiszteletére. A Bel két intenzitás közti viszony 10-es alapú logaritmusát jelenti.

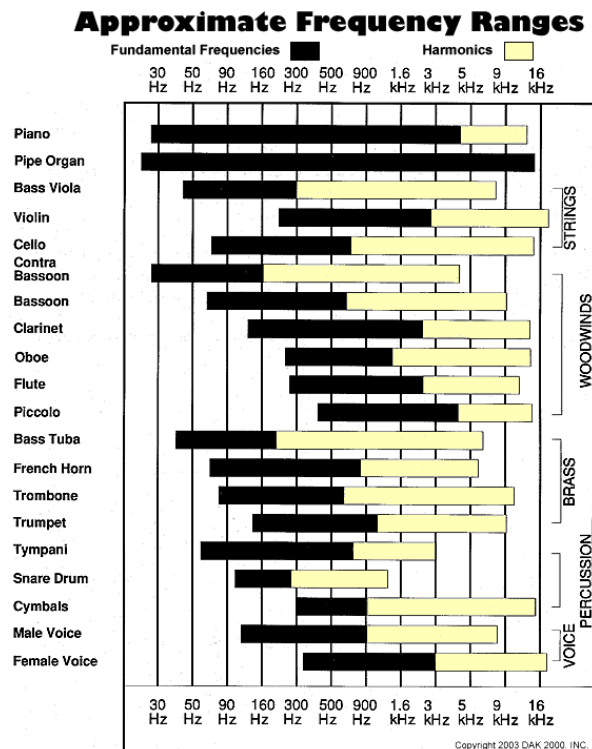
Ez a két intenzitás: a mérendő hang és a nulla dB, mint referencia érték; egy Jel/Zaj arányt adnak meg. A nemzetközi standard szerint a nulla dB SI intenzitása:

$$I_0=10^{-12} \text{ Watt/m}^2$$

Ha egy hang képe szinuszos, tiszta hangnak nevezzük. Ilyen hangot ad ki például a hangvilla. A leggyakrabban viszont összetett hangokkal találkozunk, ezek különböző frekvenciájú, fázisú és amplitúdójú hangok összességeként foghatóak fel Fourier elmélete szerint. Ha egy hang összetett hang, az hallásunkban hangszínezetként nyilvánul meg. Egy összetett hang képződhet a tisztahangból, és annak felharmonikusaiból. Egy összetett hang tisztahangjának és felharmonikusainak aránya határozza meg a hangszínképét. Ezekből a jellemzőktől válik egy hang egyedivé, ettől válik megkülönböztethetővé egy hegedű egy gitár vagy egy fuvola.

2.3. Zenei alapok (különleges hangszerek)

A hangszerek valójában nagyon széles spektrumot fognak át a keltett rezgések frekvenciáját vizsgálva. A hallható tartományba eső hangok így is számottevőek, mintegy tíz oktávot tudunk fülünkkel érzékelni. Persze ez életkortól és sok egyéb tényezőtől is függhet. Egy csecsemő vagy kisgyermek 20-25 kHz frekvenciájú hangokat is meghallhat. A zenében hét oktávot használunk ki általában 32 – 4200 Hz tartományban (8. ábra). Az európai zenekultúrában csupán félhangokra osztódnak a zenei hangok, viszont érdekes, hogy az indiai zene ennél kifinomultabb ugyanis negyedhangokra osztja. Ezt ki is tudják énekelni, vagy például szitárjátékban is alkalmazzák.

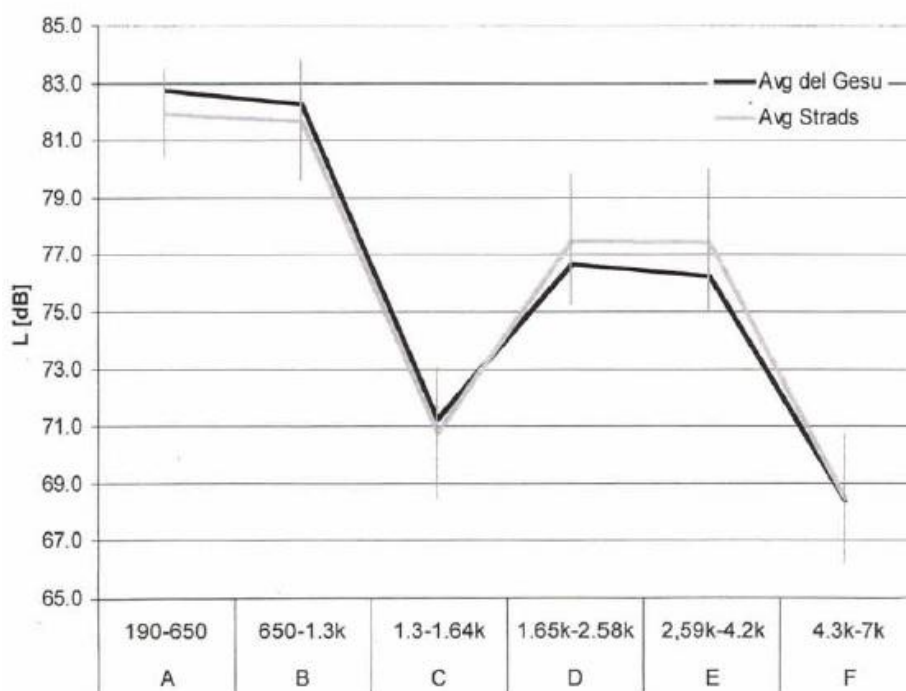


8. ábra: Hangszerek frekvenciatartománya

Forrás: <http://djfrobot.blogspot.hu/2010/04/eq-frequency-chart-for-instruments.html>

Hangszerek tárgyalásánál nagyon fontos megemlíteni a Stradivari hegedűket. Antonio Stradivari az 17-18. században élt olasz hangszerkészítő. A mester hegedűiről lett világhírű, de számos más hangszert is készített. A hegedűi – amelyeket Stradivari latin nevéreől,

Stradivariusnak is hívnak – egyedülálló hangkarakterekkel büszkélkedhetnek, és a többi hegedűhöz képest sokkal nagyobb hangérezetet tudnak kelteni a hallgatók számára. Hogy mitől lettek ilyen különlegesek ezek a hangszeresek? Stradivari nagyon precízen válogatta meg az alapanyagokat. Saját maga utazott Trentínóba hogy kiválassza a legjobb fenyőfákat, amelyek később különleges pácolást, és lakkozást kaptak. Azonban tudományos szempontból még mindig magyarázat nélkül maradtunk a Stradivarius-ok pszichoakusztikus hatásával kapcsolatban.



9. ábra: A Stradivari hegedűk, és a Guarneri del Gesù hegedűinek dB skálán való összehasonlítása

Forrás: Anders Buen:

On Timbre Parameters and Sound Levels of Recorded Old Violins

Az ábrán látható hogy a szintén jó hangzású Giuseppe Guarneri del Gesù hegedűit csak néhány decibellel múlja felül bizonyos tartományokban. Ezzel szemben pszichoakusztikus élménye nagyobbak bizonyul az elmondások szerint. Egy hagyományos hegedűvel való összehasonlítása során pedig egyértelműnek bizonyul, hogy a decibelben mért értékeket határozottan felülmúlja a tapasztalt hangérezet.

Az előző fejezetben a hangszeresek hangszínképénél fejeztük be, ami mint mondtam volt; a hangszeresek ujjlenyomataként fogható fel. Tehát ha elfogadjuk a Stradivariusok pszichoakusztikus előnyét, akkor belátható, hogy a felharmonikus színezetnek tudható be valószínűleg.

A fül becsapásának elmélete: A felharmonikus vizsgálat

3.1. Korábbi tények összerendezése

Több aspektusból próbáltam vizsgálni a témát, hogy minél teljesebb képet kapjunk. A felharmonikusok jelentősége többször is fontossá vált az adott témákat tárgyalva; a fülünk különösen érzékeny a felharmonikusokra, a hangok megkülönböztetőségéről is a felharmonikusok aránya gondoskodik és a hangszerek meghatározó jellemzője a felharmonikus színezet. Hogy mi lehet az oka annak hogy bizonyos hangszerek, illetve csöves erősítők hangérzete felülmúlja a mért hangnyomás értékeket nem tudjuk. De azt gondolom első sorban a felharmonikusokat kell vizsgálnunk, hiszen ez a legszembeötlőbb tulajdonsága az általunk vizsgált témáknak.

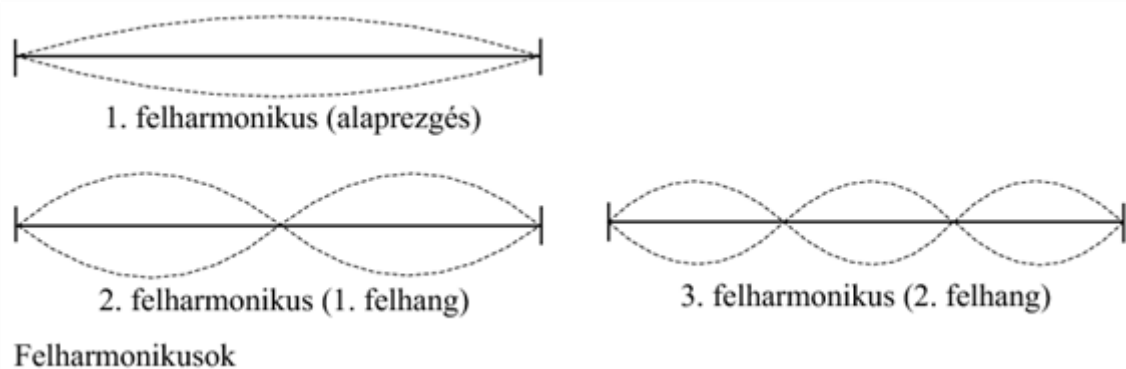
A felharmonikusok vizsgálatához szükség van egy olyan eszközre, amellyel a bizonyos frekvenciák felharmonikusainak arányát állíthatjuk. Mivel a fül torzítása lineáris, és valószínűleg frekvenciafüggő is, szükséges hogy a vizsgálatot külön-külön végezzük el minden frekvencián. A vizsgálat alanya potenciométerekkel állíthatná be az adott frekvenciájú hang felharmonikusait, aszerint hogy hogyan hallja a lehangosabbnak a hangot. Ha ezt a vizsgálatot elvégeznénk kellően sok emberen, kellő finomságú léptetésekkel az adott frekvenciák között, akkor az így kapott értékek átlagát véve egy olyan –frekvenciafüggő - felharmonikus színezet függvényt kapnánk, amivel modulálva akármilyen hangot, annak hangosabbnak kell lennie az eredeti hangnál. Ha ez bebizonyosodik, akkor nem csak azt állapítjuk meg, hogy a felharmonikusok a felelősek a jelenségért, de addigra a rendelkezésünkre fog állni a fül frekvenciafüggő torzítási függvénye.

3.2. Felharmonikus képzés fizikai és matematikai alapja

Előreugranék a dolgozat azon részéhez ahol a készülék működését tárgyalom. A készülékben az AD633 típusú analóg szorzó áramköröket fogjuk alkalmazni. Amelynél ha mindkét bemeneten szinusz jel van, akkor egy frekvencia duplázót kapunk;

$$\frac{(E \sin \omega t)^2}{10 V} = \frac{E^2}{20 V} (1 - \cos 2 \omega t)$$

Tehát a 2. felharmonikus előállításánál csak az alapharmonikust kell szorozni önmagával. A 3. felharmonikus előállításához a 2. felharmonikust kell az első felharmonikussal szorozni. A 4. felharmonikusnál a 2. felharmonikust kell négyzetre emelni. Az 5. felharmonikushoz a harmadikat és a másodikat (vagy a negyediket és az elsőt) kell összeszorozni. A 6. felharmonikus megkapásához pedig a 3. felharmonikust kell négyzetre emelni. Egy ilyen szorzásnál gyakorlatilag a bemeneten lévő 2 jel frekvenciái összeadódnak.



10. ábra: Harmonikusok

Kép forrása: Fizikai kislexikon Patkós András (2007)

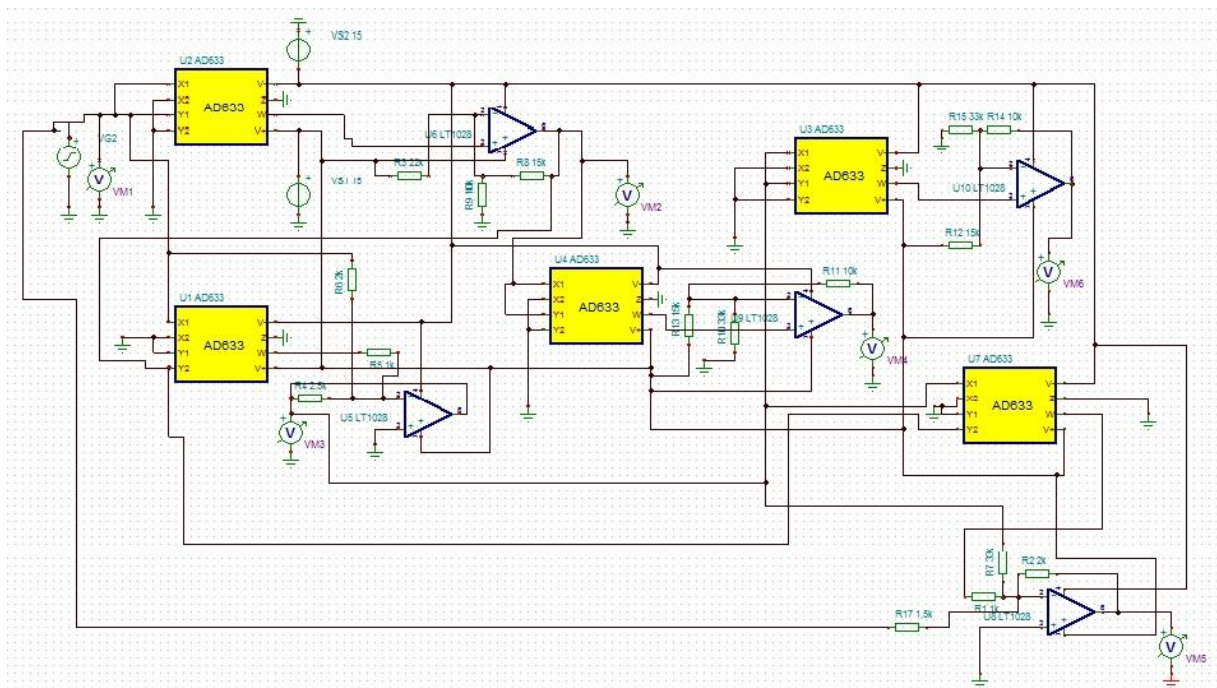
Az eszköz elkészítése

4.1. A matematikai formula elektronikai kivitelezése

A kapcsolási rajzban látható lesz, hogy adott fokozatoknál szükség volt az alapjel, vagy valamely harmonikus kivonására a fokozat kimenetéből, vagy a jel pozitív feszültséggel való eltolására. Erre azért volt szükség, mert a :

$$\frac{(E \sin \omega t)^2}{10 \text{ V}} = \frac{E^2}{20 \text{ V}} (1 - \cos 2 \omega t)$$

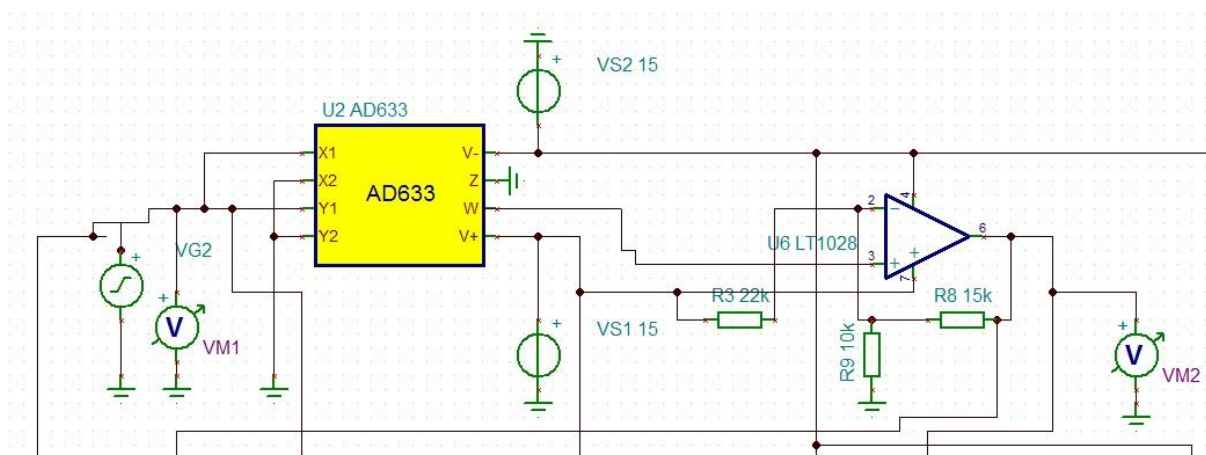
képlet értelmében pozitív feszültséggel eltolódik. Illetve a képzett felharmonikus képét oszcilloszkóppal vizsgálva valamely harmonikus dominanciáját lehetett felismerni. Így az elkészült kapcsolási rajz ezen az ábrán látható:



11. ábra: A kapcsolási rajz

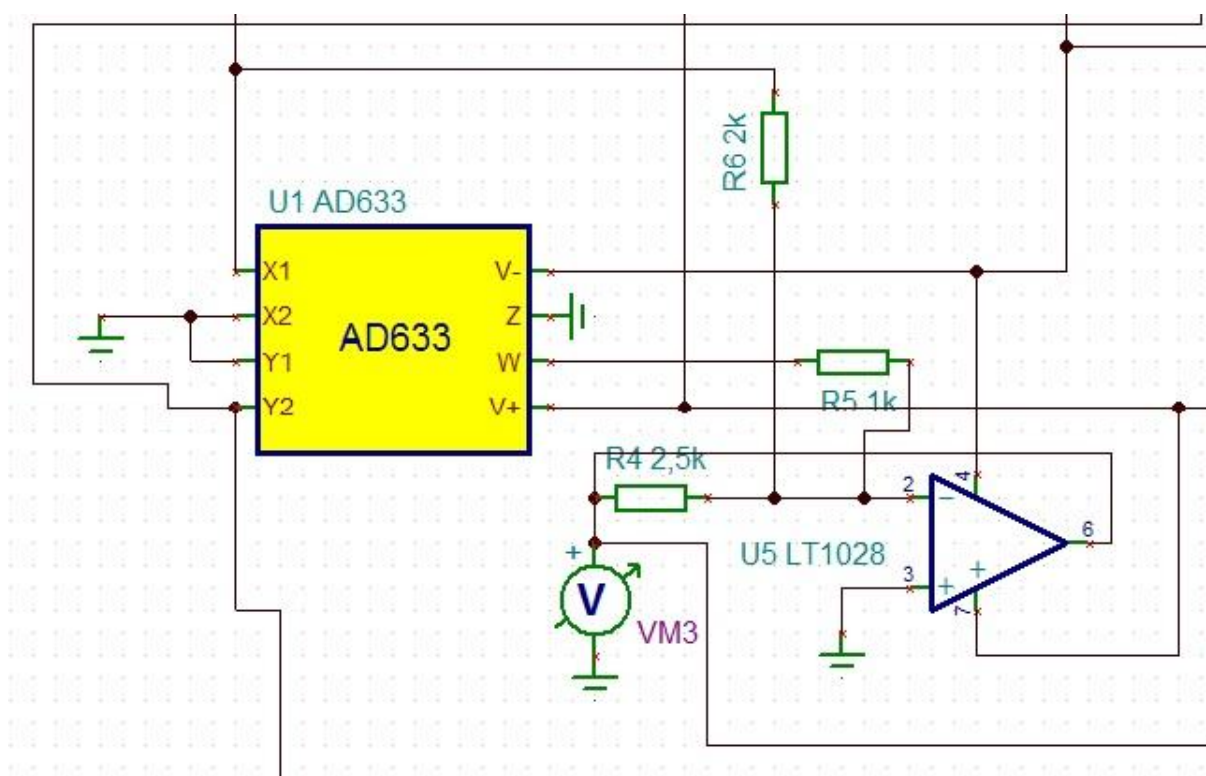
A kapcsolási rajz adott részeit nagyobbban is láthatjuk.

A második felharmonikust képző részegység itt látható:



12.ábra Kapcsolási rajz: Második felharmonikus

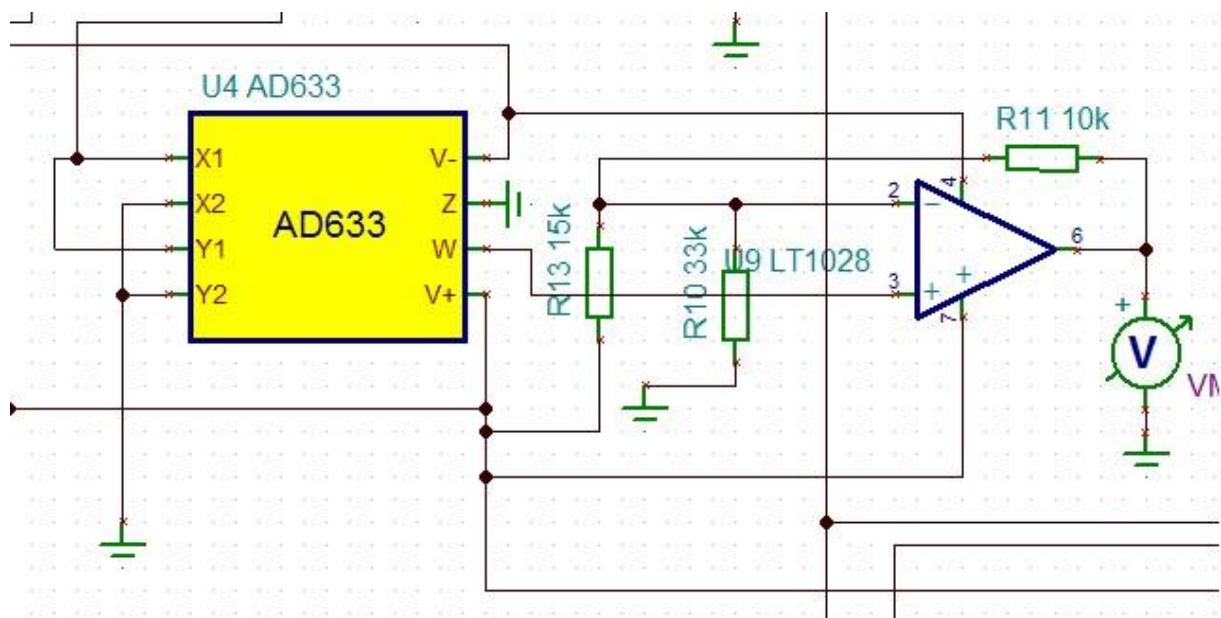
A bemenetére kétszeresen jön az alapjel, az utána kötött erősítő pedig csak egy eltolást végez. A VM2 feszültségmérőnél pedig már az első felharmonikust mérhetjük. A harmadik felharmonikust képző részegység:



13. ábra: Kapcsolási rajz: a harmadik felharmonikus

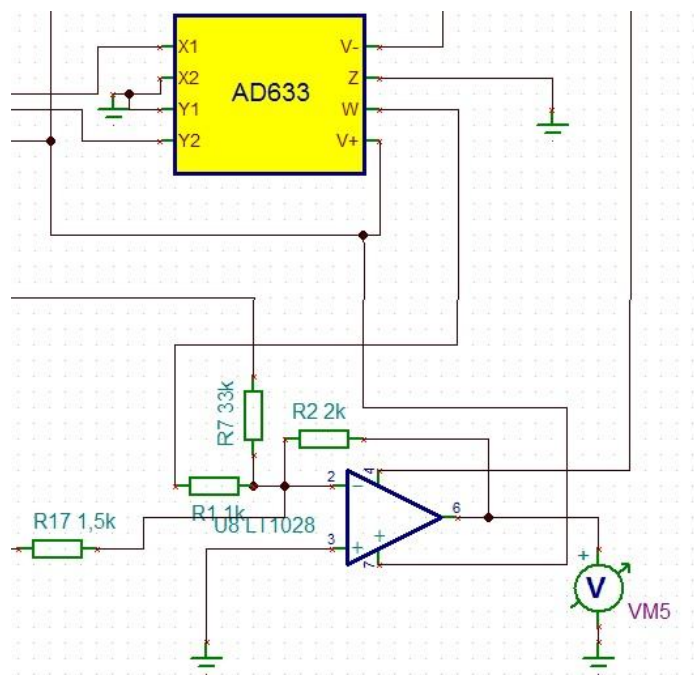
Bemenetére pedig a már korábban megbeszélt értékek csatlakoznak, fázisfordítottnak, majd az invertáló erősítő visszafordítja a jelet. Itt nem volt szükség a jel eltolására, de kikeltett belőle vonnunk az alapjel $R4/R6=2,5$ szörösét

A negyedik felharmonikust képző részegység:



14. ábra: Kapcsolási rajz: negyedik felharmonikus

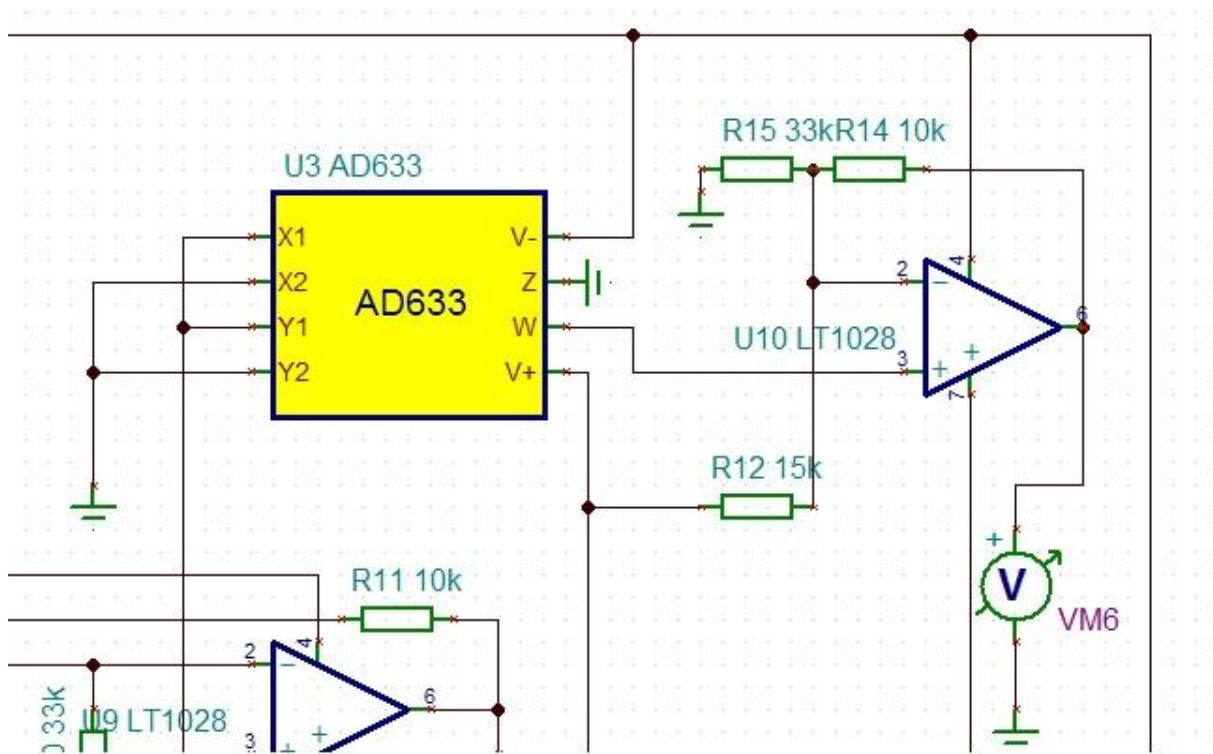
Bemenetén a második harmonikust láthatjuk, ez emelkedik négyzetre. Itt ismételtlen szükség volt feszültség eltolásra. Az ötödik harmonikust (negyedik felharmonikust) képző részegység:



15. ábra: Kapcsolási rajz: A ötödik felharmonikus

Itt az első, és a harmadik felharmonikus is kivonásra került a kimenetből, más-más arányban.

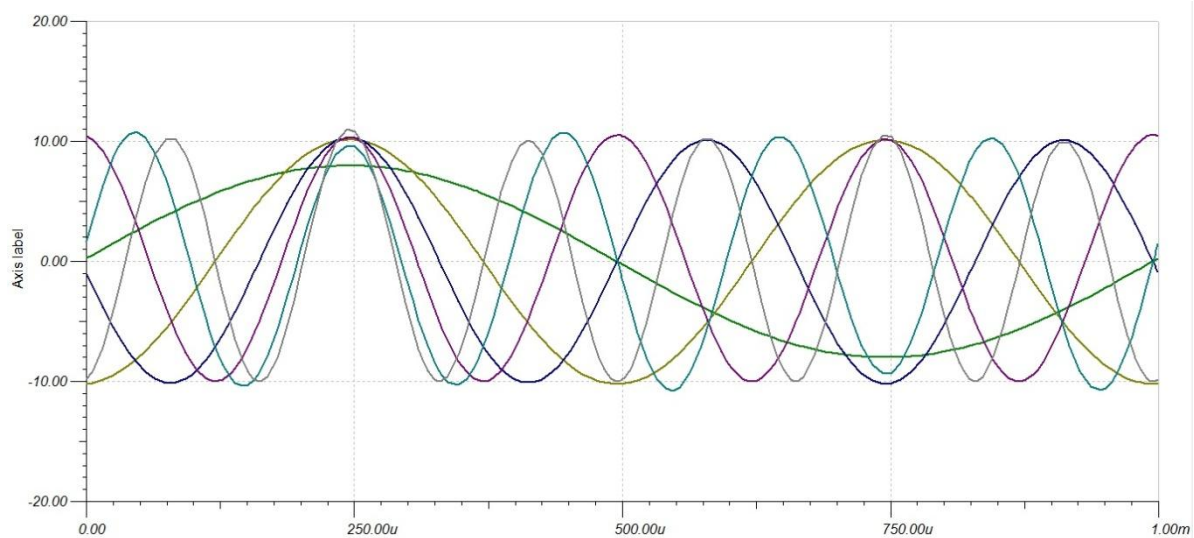
Ezek után csak a 6. harmonikus maradt hátra:



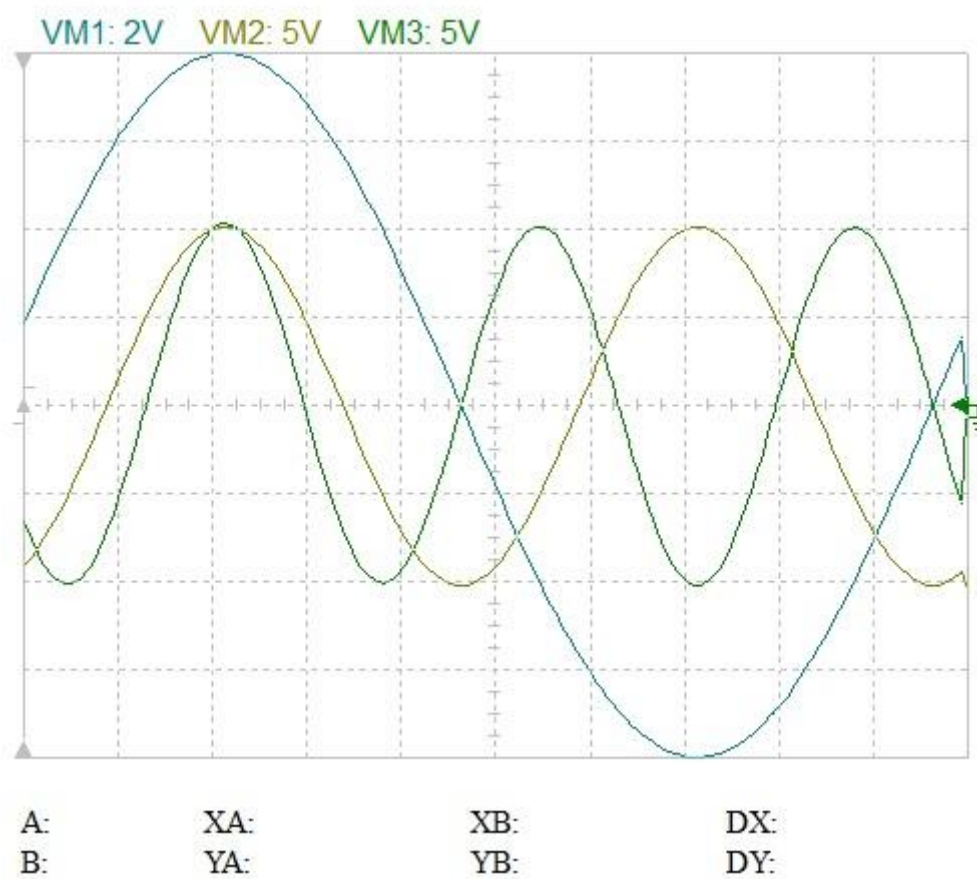
16. ábra: Kapcsolási rajz: A hatodik felharmonikus

A harmadik harmonikus négyzetre emelésével, és némi eltolással sikerült a jelet normalizálni. Így elértem hogy a mindegyik felharmonikus egy feszültségszinten van. Az alapharmonikust nem hoztam egy szintre a többivel, hiszen azt külön kezeli az összegző áramkör.

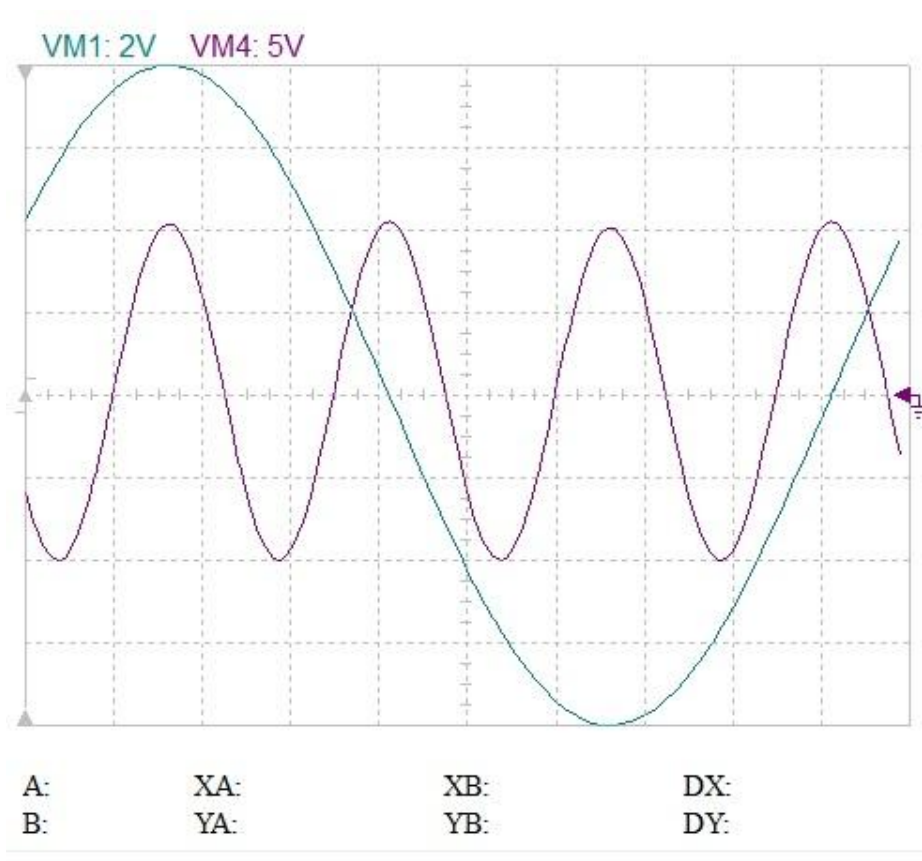
Az oszcilloszkópon vizsgálva a kimeneti jeleit:



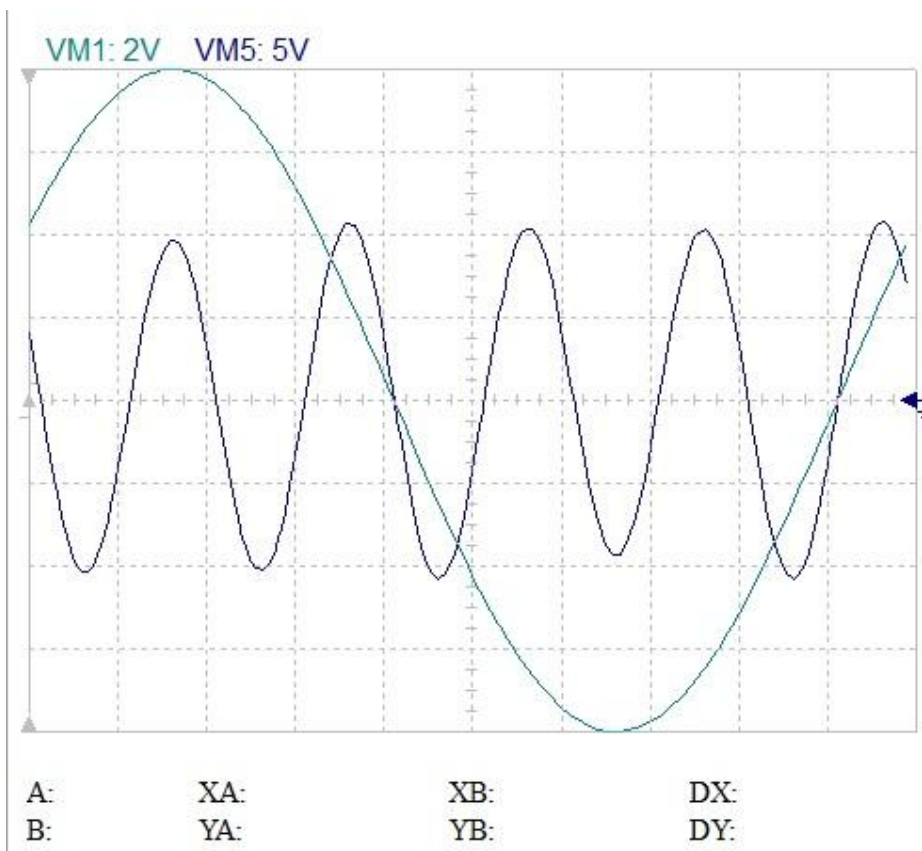
17. ábra: Az összes kimenő jel oszcilloszkópon ábrázolva



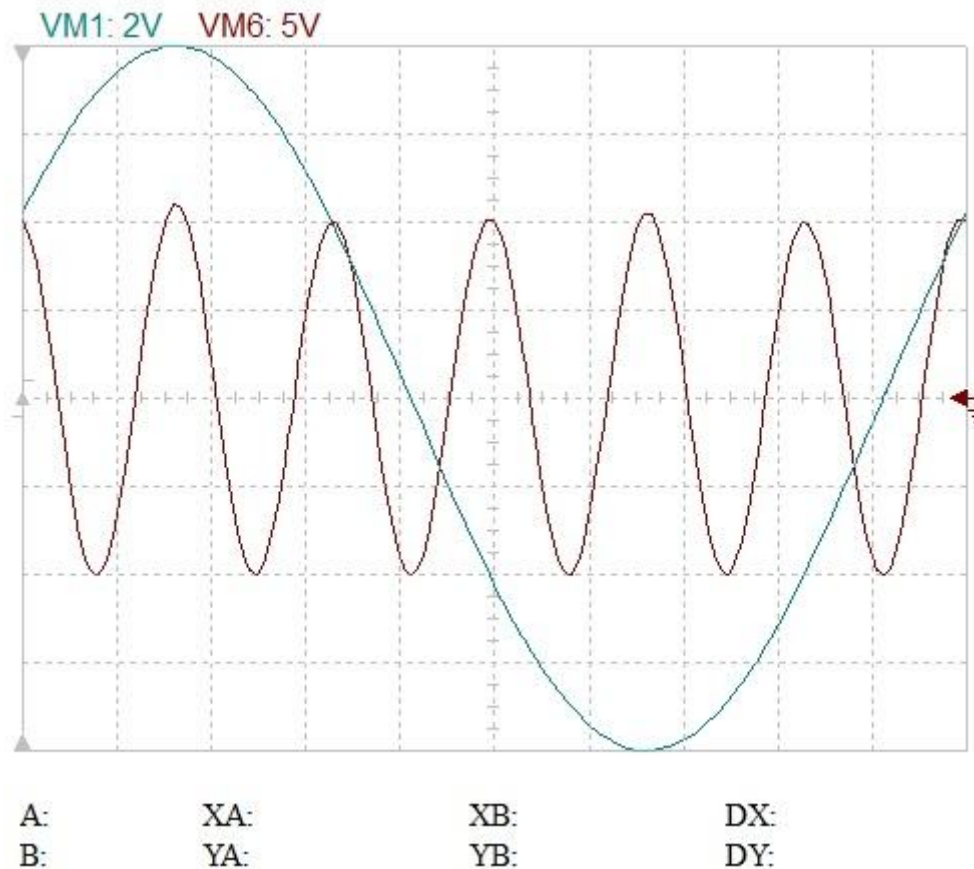
18. ábra: Az első, második és harmadik felharmonikus



19. ábra: Az első és a negyedik felharmonikus



20. ábra: Az első és az ötödik felharmonikus



21. ábra: Az első és a hatodik felharmonikus

Ezek mögé még be kellett raknom egy összegző áramkört, ami nem csak összegzi, de az adott felharmonikus jelenlétét szabályozhatóvá is teszi.

Ugyanazt a műveleti erősítőt használtam erre a célra is. A felharmonikusok 25%-al nagyobb amplitúdóval rezegnek, így ezt kompenzálnom kell itt, úgy hogy a kimenő jelben maximum 1/3-ad arányban legyenek felharmonikusok. Viszont a műveleti erősítőt sem vezérelhetem túl. Ha R1 az erősítő visszacsatolása, R2 az első harmonikus bemeneti ellenállása, R3 az összes többi harmonikus bemenő ellenállása és X a kimeneti jel maximum amplitúdója akkor az alábbi egyenletek írhatóak fel:

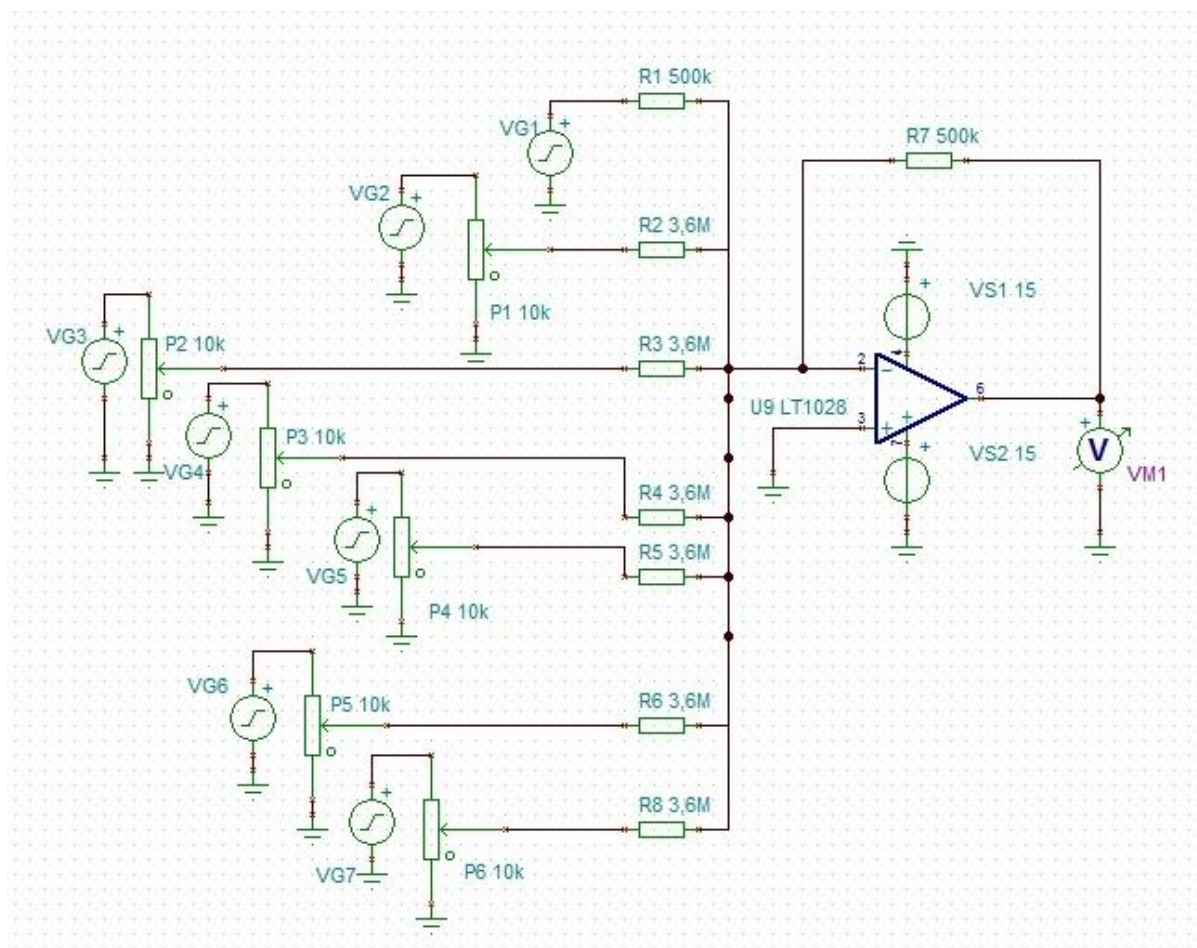
$$(R1/R2) \cdot 8V = X$$

$$(R1/R3) \cdot 10V = X/3$$

$$\text{Egyszerűsítés után: } R3/R2 = 15/4$$

A műveleti erősítőt ismerve a következő értékeket adtam: R1= 500k R2=500k (így a kimeneti jelünk amplitúdója is 8V-os lesz), és ezen értékek alapján R3-nak és a többi felharmonikusnak 3750k ohm értéket kellett volna adjak, de mivel ilyen érték nincs az ehhez legközelebbit 3,6M ohmosat választottam.

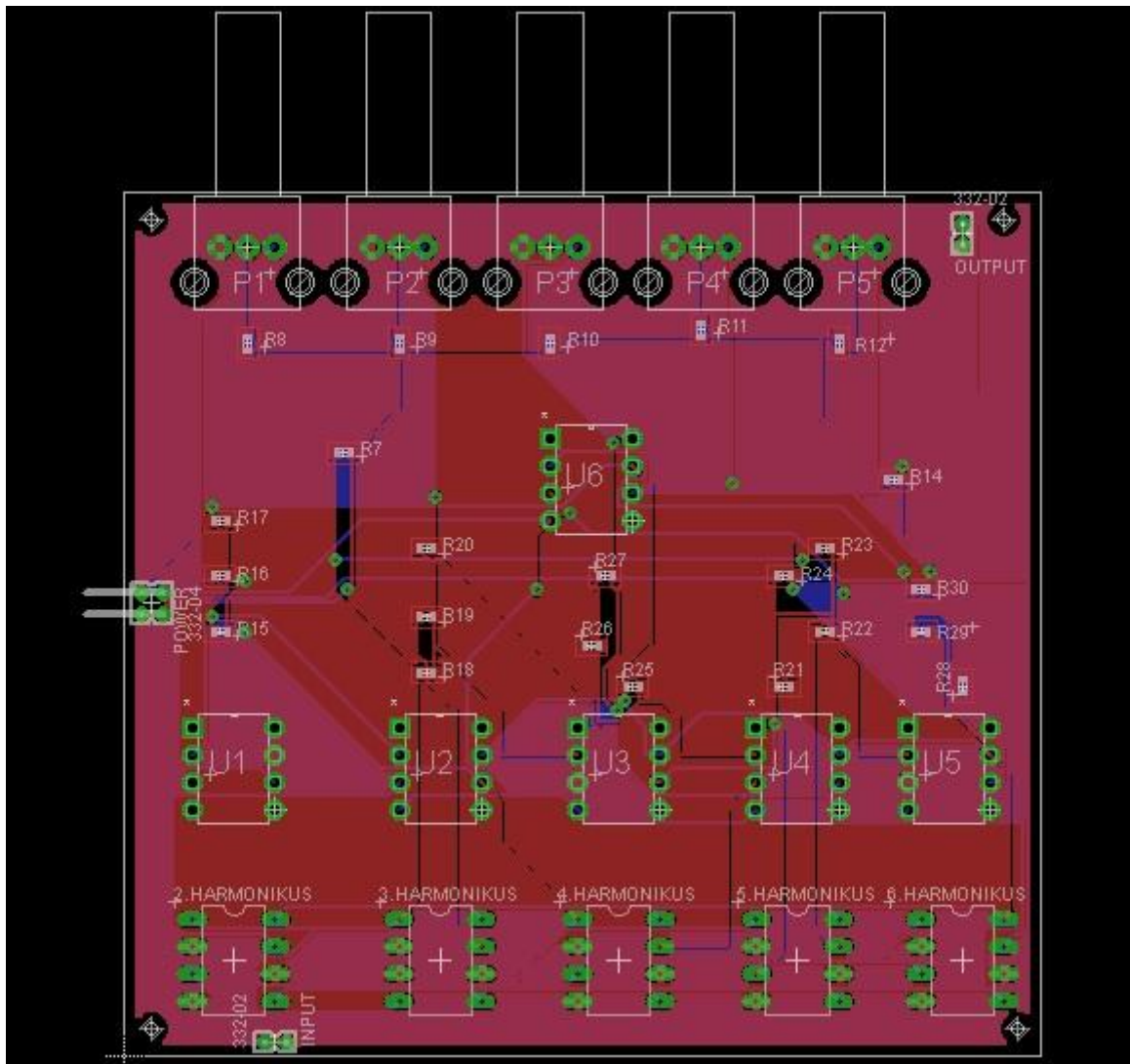
Az 1/3-os felharmonikus jelenlét nagyon soknak tűnik, azért nem csökkentettem le, hogy fizikai korlátai ne legyenek a kutatásnak. De mivel a potenciométerek logaritmikusak, finom állítási lehetőségünk lesz a felharmonikus jelszint alacsonyabb tartományaiban.



22. ábra: Az összegző áramkör

4.2. Nyák terv

A nyáktervet az Eagle nevű szoftverben készítettem el. Először végignéztam milyen alkatrészek lennének alkalmasak a feladat megoldására, és ezeknek könyvtárát beszereztem a szoftverhez.



23. ábra: A nyákterv

Az alkatrészek elhelyezésénél figyeltem az átláthatóságra, a hő eloszlására. A bemeneti és kimeneti jel csatlakozóinak egyaránt egyszerű pineket választottam, ezekre lengőcsatlakozók kapcsolódhatnak majd. A táp csatlakozó pedig a +-15V és a földet is tartalmazza. Kétrétegű nyák lesz mint ahogy az ábrán is látható, és próbáltam minél kevesebb via-t használni. Az áramkör a 4 sarkán lévő furatokkal lehet rögzíteni a műszerdobozba.

Alkalmazás

5.1. Az eszköz alkalmazása

A kísérletet több száz, lehetőleg több ezer emberen ajánlott elvégezni. A kísérletet végző alany a műszeren lévő potenciométerekkel tudja állítani a hallgatott hang felharmonikus tartalmát. És így döntheti el mi az a felharmonikus színezet ami mellett a leghangosabbnak hallja a hangot. Ezekből a mérésekből egy átlagolt értéket kapnánk, amelyet a későbbiekben felhasználhatunk. A műszeren lévő 5 potenciométerrel lehet az adott felharmonikusok arányát keverni. Ha pedig elértük a maximális hangérzetet, akkor a dobozon lévő skáláról leolvasható az adott felharmonikus színezet, amit rögzíthetünk a későbbi adatfeldolgozáshoz.

A kísérlet elvégzése előtt érdemes hallásvizsgálatokat végezni hogy csökkenthessük a hiba százalékos arányát. Illetve érdemes lenne a tesztalanyokról több információt feljegyezni. Például tanult-e valaha zenét, ha igen mennyi ideg?

5.2. Az algoritmus alkalmazása

Ha megkaptuk az ideális harmonikus színezetet, akkor akár egy chip-be integrálva a technológiát; mp3-lejátszóba, media player-ekbe és mindenféle zenelejátszó eszközökbe integrálhatnánk. Nyilván senki nem fogja kidobni ezért a már meglévő zenelejátszóját, tehát készíthetnénk olyan eszközt is ami a zenelejátszó és a fülhallgató csatlakozó közé lépne be, és modulálná a zenét. Az eszközt szórakozóhelyeken és gyakorlatilag akárhol alkalmazhatnánk, ahol nagy hanghatásra van szükség, de védeni akarják a hallgatóság dobhártyáit.

Orvosi alkalmazásra is lehetőség nyílik. Beépíthető lenne hallókészülékekbe, ezzel javítva a halláskárosultak zenehallgatási élményét.

6. Köszönetnyilvánítás

Szeretném megköszönni konzulensemnek Máthé Kálmán Tanár Úrnak, akinek a kutatásában lehetőségem volt részt venni, és betekinteni a korábban elért eredményeibe is, és segített megérteni a számomra homályos részeket.

Köszönöm Dr.Pytel József professzornak, akinek a könyve nagyban segítette a téma orvosi részének megértését.

7. Irodalomjegyzék

Könyvek:

Dr. Pytel József, *Audiológia*. Budapest 1996.

Herpy Miklós, *Analóg integrált áramkörök*. Budapest 1974.

Sheingold, D., H., *Nonlinear circuits handbook: designing with analog function modules and IC's*. California 1974.

Dr. Házman István, *Integrált áramköri eszközök*. Budapest 1970.

Folyóiratok és publikációk:

Bilotti, A., *Applications of a Monolithic Analog Multiplier*. IEEE J. Solid-State Circuits, 1968.

Buen, A., *On Timbre Parameters and Sound Levels of Recorded Old Violins*. Journal of The Violin Society of America, 21.1, 2007.

Prof. David de Kretser, A.O. Governor of Victoria & Mrs Jan de Kretser, *Effect of Loud Music on Hearing*. Melbourne 1968.

Internetes források:

<http://hearinghealthmatters.org/hearthemusic/>