

Tartalomjegyzék

1. Bevezetés.....	2
2. Elméleti rész	3
2.1. Elektromos jelek erősítésének szerepe a mindennapjainkban	3
2.2. Hangfrekvenciás erősítők felépítése és működése.....	4
2.2.1. Passzív alkatrészek	6
2.2.2. Aktív építőelemek	10
2.2.3. Az erősítők mérhető és szubjektív paraméterei	13
2.2.4. Hangfrekvenciás erősítők napjainkban	20
2.3. A gömbsugárzó	23
3. A gyakorlati feladat bemutatása.....	26
3.1. A megépítés munkafázisai	26
3.1.1. Tervezés.....	26
3.1.2. Próbaverzió megépítése és beállítása	44
3.1.3. A nyomtatott áramkör megtervezése	49
3.1.4. A végleges erősítőmodulok megépítése és bedobozolása.....	51
3.2. Az elkészült erősítő műszaki adatai	56
3.3. Az erősítő szubjektív összehasonlítása egy gyári készülékkel	57
4. Összefoglalás.....	59
5. Irodalomjegyzék.....	61

1. Bevezetés

Napjainkban nagy jelentősége van az erősítéstechnikának, hiszen az élet számos területén igény van a jó minőségű, felerősített hangjelekre. A mai rohanó, stresszes világban különösen fontos a kikapcsolódás és szórakozás, amely elképzelhetetlen zene nélkül. Mind a könnyűzenében, mind a komolyzenében rendkívül nagy szerepet játszik a magas hangzashűség, melynek megvalósítására a rohamosan fejlődő technika egyre több lehetőséget nyújt.

A zenei élmény biztosításában az egyik legnagyobb szerepet az erősítő tölti be. Az évtizedek során a konstrukciók számos változáson, fejlődésen mentek keresztül, melyek közül jelenleg a digitális technikára épülő készülékek dominálnak. De emellett még az analóg típusokat sem szüntették meg, hiszen ezeknek van néhány előnye a digitális eszközökkel szemben. Ugyanis a digitális erősítők hangminőségét számos szakember kevésbé jónak ítéli, mint az analóg készülékekét. Emellett nem elhanyagolható az analóg típusok egyszerűbb felépítése és házi elkészíthetősége sem.

Szakdolgozatom feladata egy megfelelő paraméterekkel rendelkező analóg hangerősítő tervezése, elkészítése és specifikálása. A megvalósításnál fő cél, hogy a készülék alkalmas legyen a Széchenyi István Egyetem Audio- és Videotechnikai Laboratóriumában lévő gömbsugárzó hangszóró meghajtására.

A dolgozat felépítését illetően fontosnak tartom mindenekelőtt áttekinteni a hangfrekvenciás erősítők felépítésével, működésével kapcsolatos alapvető információkat. Az elméleti háttér elemzésénél a félvezető technika alapjait ismertetem, különös hangsúlyt fektetve a hangfrekvenciás erősítők tervezésénél nélkülözhetetlen tudnivalókra. Érintőlegesen bemutatom a passzív, illetve aktív áramkörü elemeket, melyek egy áramkör megépítéséhez rendelkezésre állnak.

Fontosnak tartom ismertetni az erősítő mérhető és szubjektív paramétereit, amelyek egy konstrukció minősítésénél a legfontosabb szerepet játsszák.

Érdekességgként említést teszek a mai, modern technika helyzetéről, a fejlődési trendekről.

A dolgozat második részében a készülék technikai megvalósításának lépéseit mutatom be, figyelembe véve az erősítők építése során alkalmazott legfontosabb szabályokat.

Munkám első lépéseként a megtervezett áramkör kapcsolását elemzem, és kitérek a hangzás szempontjából lényeges részletekre.

Következő lépésként fontosnak tartom a próbaverzió megépítését, amely alapján megtervezhetem a végleges áramkört.

A fő munkafázis a készülék készre szerelése, és legfontosabb paramétereinek lemérése.

Munkám befejezéseként egy szubjektív összehasonlítást is tervezek elvégezni az általam épített készülék és egy gyári erősítő között.

2. Elméleti rész

2. 1. Elektromos jelek erősítésének szerepe mindennapjainkban

Az erősítéstechnika a modern elektronika egyik legfontosabb ágazata. Amióta az emberiség megvalósította a hang átalakítását elektromos jellé, és azt vezetéken továbbította, rendkívüli mértékben fejlődésnek indultak a kisszintű jeleket felerősítő technikák. Az 1900-as évek első felében e fejlődés az elektroncsövek elterjedésével kezdődött, és ez a folyamat még ma is jelentős lépésekben halad előre. A fejlődés során jobbnál jobb hangerősítő-konstrukciók születnek, amelyeknél ma már alapkövetelmény, hogy egyrészt a hangfrekvenciás sávot a teljes teljesítménytartományban átvigye, másrészt a harmonikus- és intermodulációs torzítás jelentősen 1% alatt maradjon. Az elektroncsövekkel ezeket az elvárásokat nagyon nehéz volt megvalósítani, illetve csak kis kivehető teljesítmény mellett volt élvezhető a kellemes „csöves hangzás” [5].

A mai konstrukciók ezzel szemben szinte kivétel nélkül félvezetős eszközök, legalábbis ami a konzumelektronikát illeti. Léteznek persze elektroncsöves erősítők ma is, de azok a rendkívül magas ár miatt inkább a magukat „audiofil”-nek nevező egyének számára készülnek.

Az 1950-es évektől kezdve a tranzisztor elterjedésével a csövek egyértelműen a háttérbe szorultak. A félvezetők számos előnnyel rendelkeznek. Ilyenek például:

- sokkal alacsonyabb tápfeszültségről is működtethetők
- kisebb a hőtermelésük
- kisebb a fizikai méretük
- nagyobb kimeneti teljesítményt érhető el segítségükkel

A hangosítás területén nem ritka a több 10000 Watt-os hangfrekvenciás teljesítmény, s még a házi felhasználók körében sem mondható túlméretezettnek egy 100W-os végfokozat. A félvezetők tették lehetővé többek között azt, hogy a lelkes amatőrök vagy a zenekedvelők otthon készítsék el a hangátviteli lánc egyik legfontosabb elemét, a hangerősítő berendezést. Az elektroncsöves eszközökben vannak olyan alkatrészek (pl. kimenőtrafó), amelyek sokak számára gyakorlatilag kivitelezhetetlenek házilag. Ezzel szemben a félvezetős erősítőket jóval egyszerűbb otthon megépíteni, nem is beszélve az alacsonyabb tápfeszültségről, ami életvédelmi szempontból rendkívül fontos. Ezen kívül még számos érv szól amellett, hogy érdemes belevágni a konstrukciós munkákba. Az alkotó számára különösen nagy élmény, amikor az ellenállások, kondenzátorok és tranzisztorok sokaságából egy gombnyomásra kilép kedvenc előadónk hangja. Előfordul, hogy az elkészült berendezés nem a tervezett szerint fog működni, de a kitartó munkával elérhető a kívánt eredmény. A legtöbb erősítőépítő nem elégedett azzal, hogy egy kapcsolást szolgai módon megépít.

Fő cél a lehető legjobb hangot kihozni az adott konstrukcióból, de ez legtöbbször sok esetben számos, méréssel, korrigálással, továbbfejlesztéssel jár. Ezeket az elveket követve választottam diplomamunkám témájaként az erősítőépítést, ezért szakdolgozatom hátralévő részében ennek technikai hátterét, illetve a kivitelezés menetét ismertetem.

Különösen érdekesnek találtam azt a feladatot, hogy a Széchenyi Egyetem audio laboratóriumában már megkonstruált gömbsugárzóhoz egy megfelelő erősítőt építsek. Ezért választottam szakdolgozatomnak témájaként e készülék megvalósítását. A feladat gyakorlati részének ismertetése előtt az erősítőtechnika néhány elméleti kérdésével foglalkozom.

2. 2. Hangfrekvenciás erősítők felépítése és működése

Felépítés, fokozatok

A hangfrekvenciás erősítő egy olyan berendezés, amely a bemenetén fogadja a kisszintű hangfrekvenciás, elektromos jelet a lejátszóberendezés felől, és külső energia segítségével a kimenetén előállítja a hangsugárzók meghajtására a megfelelő szintű és teljesítményű hangjelet. Ez a jel egy 20 Hz-től 20 kHz-ig terjedő sávszélességű elektromos rezgés, amely ezen a tartományon belül véletlenszerűen vesz fel frekvenciaértékeket. Tehát ezt tekinthetjük úgy is, hogy egy zaj jellegű mennyiséggel van dolgunk. Ez a későbbiekben fontos szempont lesz a hangfrekvenciás erősítők dinamikai vizsgálatánál.

A jel amplitúdóértéke általában néhány 100 mV, ami leginkább attól függ, hogy milyen lejátszóról kívánjuk az erősítőt meghajtani. A vonalszintű kimenettel rendelkező eszközök (pl.: CD-játszó) maximális kimenőszintje 1 V körüli érték, míg egy mágneses hangszedőjű hifi lemezjátszó csak 2-5 mV amplitúdójú jelet szolgáltat. Mindezekből látszik, hogy különböző lejátszók esetén az erősítő bemenetének illeszkedni kell a jelforráshoz, ami legtöbbször szükségessé teszi előerősítő beépítését. Ezt sok készüléknél egybeépítik a bemeneti fokozattal, ami így megfelelően nagyimpedanciás illesztést biztosít a lejátszó felé, és a feszültség szintet is a kívánt értékre állítja be.

Ezek szerint egy hangfrekvenciás erősítőben a jelfeldolgozás a bemeneti fokozattal kezdődik. Alapkövetelmény a lehető legkisebb zaj, ugyanis itt a legrosszabb a jel/zaj viszony (az alacsony jelamplitúdó miatt).

Emellett biztosítani kell, hogy a bemenet a lejátszó kimenetét jelentős mértékben ne terhelje, azaz nagy ellenállást képviseljen. Ez a gyakorlatban azt jelenti, hogy legalább 10 kOhm-os bemeneti impedanciára van szükség. Elterjedt még a 22 kOhm, illetve a 47 kOhm-os érték is (utóbbi inkább a lemezjátszó fogadására alkalmas bemenetnél használatos).

Fontos követelmény még a fokozat a nagymértékű linearitása, ami azt jelenti, hogy a fokozat nem vihet a jelbe jelentős mértékű nemlineáris torzítást, ami egyébként a kisamplitúdójú vezérlés miatt a legtöbb esetben teljesül.

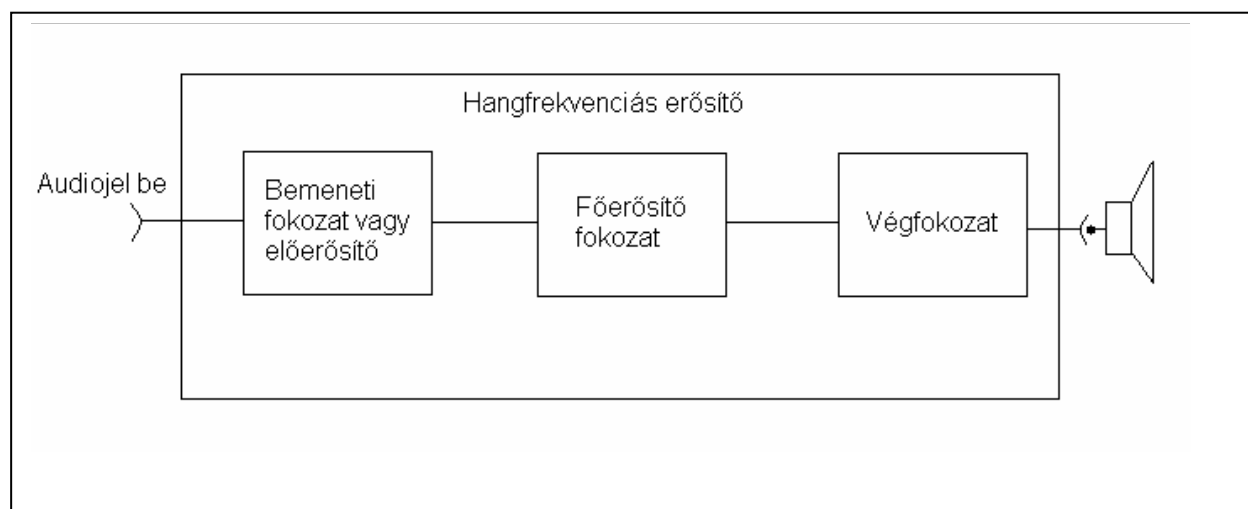
Az erősítők torzítására a 2.2.3. fejezetben részletesen kitérek, e részben csak annyit említenék meg, hogy a teljes erősítőláncra nézve a harmonikus- és intermodulációs torzítás értékének jóval 1% alatt kell lennie a teljes átviteli- és kivezérlési tartományban, ami a mai félvezetőkkel viszonylag könnyen teljesíthető.

Tovább vizsgálva a jel útját az erősítőben az egyik legfontosabb fokozathoz érünk el, amelyet feszültségerősítő vagy főerősítő fokozatnak nevezünk. Ennek feladata a hangszórók számára szükséges feszültség szintű jel előállítása nagyfokú linearitás mellett. A jel/zaj viszony ebben az esetben már nem annyira kritikus, mint a bemeneti fokozatnál, mert itt már nagyszintű jel van. Ebben a fokozatban történik a tényleges feszültségerősítés, illetve itt állíthatjuk be az erősítő eredő nagyfrekvenciás menetét (stabilitás kérdése, lásd: később).

Ettől a fokozattól kezdve már nagyszintű jellel dolgozunk, amely azonban még ilyen állapotban nem alkalmas a hangszórók meghajtására, ugyanis azok kisimpedanciás terhelést képviselnek. Ezért szükség van egy fokozatra, amely elvégzi ezt az illesztést, illetve teljesítményerősítést valósít meg.

A feladatot a hangfrekvenciás végfokozat oldja meg. Itt nagyteljesítményű eszközöket alkalmazunk megfelelő hűtés mellett, mert a kisimpedanciás terhelés miatt nagymértékű disszipáció (hőtermelés) lép fel, amely hűtés nélkül az eszköz tönkremenetelét idézheti elő. A fokozat feszültségerősítése általában 1-szeres, vagy annál valamivel kevesebb.

Összefoglalásképpen a jelfeldolgozási lépéseket az 1. ábrán bemutatott blokkvázlat szemlélteti.



1. ábra: Hangfrekvenciás erősítő felépítése

Mindezekon kívül erősítőnek szüksége van tápfeszültségre is a működéshez. A tápegység tervezésénél fontos szempont, hogy teljesítménye legalább kétszer akkora legyen, mint az erősítő kimenő teljesítménye csatornánként. Ez a látszólagosan ésszerűtlen túlméretezés a hangminőségben jelentős javulást okozhat, ugyanis így a táp megfelelő energiát lesz képes leadni, ha a hangfrekvenciás vezérlésben hirtelen szintugrás lép fel (jó dinamika!).

A fentiek alapján már látható, hogy az erősítő milyen fő egységekből épül fel. A következőkben vizsgáljuk meg, hogy milyen alkatrészek állnak rendelkezésünkre a megépítéshez.

A következő fejezetekben röviden bemutatom az egyes eszközöket és azok legfontosabb jellemzőit.

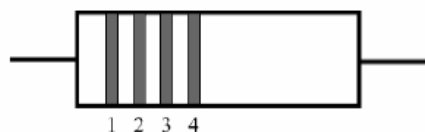
2. 1. Passzív alkatrészek

Az ellenállás

A fizikából ismeretes, hogy az ellenállás az adott két pont között lévő feszültség és az annak hatására átfolyó áram hányadosaként meghatározott mennyiség. Képlettel:

$$R = U / I \text{ [Ohm]}$$

A gyakorlatban azonban, ha ellenállásról beszélünk, legtöbbször a fizikailag megvalósított alkatrészt gondolunk. Számos típusuk létezik, melyek közül a leggyakrabban használt az állandó értékű rétegellenállás. Ennél a típusnál kis hőtágulási együtthatójú kerámiarúdra viszik fel a szén, fém vagy fémoxid réteget, amelynek ellenállása még kisebb a névleges értéknél. Ezután egy spirál alakú árkot köszörülnek bele a rétegbe, amellyel viszonylag pontosan beállítható az érték. Az elkészült eszközt védőlakkba mártják, majd színkóddal látják el, amely alapján táblázatból kikereshető a névleges érték és a tűrés a 2. ábrának megfelelően [1].



Szín/gyűrű	1	2	3	4
Fekete	-	0	*1	-
Barna	1	1	*10	-
Piros	2	2	*100	± 2%
Narancs	3	3	*1k	-
Sárga	4	4	*10k	-
Zöld	5	5	*100k	-
Kék	6	6	*1M	-
Ibolya	7	7	-	-
Szürke	8	8	-	-
Fehér	9	9	-	-
Arany	-	-	*1/10	± 5%
Ezüst	-	-	*1/100	± 10%
Kétértékes számjegy		Szorzó		Tűrés

2. ábra: Ellenállások színkódjai

Az ellenállásoknál fontos tulajdonság a maximálisan megengedett hődisszipáció. Nem célszerű az eszközt huzamosabb ideig ezen az értéken működtetni, mert a tartós magas hőmérséklet miatt maradandó értékváltozást szenvedhet az alkatrész.

A gyakorlatban ez azt jelenti, hogy fémréteg ellenállások esetén néhány 100 mW-os, szénréteg ellenállásoknál csak 2 W-os maximális teljesítmény a megengedett. Ha nagyobb teljesítményre van szükségünk, akkor huzalellenállást kell beszerezni, amelynél azonban számolni kell a tekercselésből adódó káros (vagy esetenként hasznos) viszonylag nagy induktivitással.

Az ellenállásoknak van egy talán kevésbé fontos, de semmiképp sem elhanyagolható problémája, amely nem más, mint a zaj. Ez általában termikus zaj vagy un. Johnson-zaj, amely függ az eszköz hőmérsékletétől, ellenállásértékétől, illetve a mérés során alkalmazott sávszélességtől. A mai modern eszközök esetén azonban ez a zaj általában elhanyagolható, és nem okoz problémát, különösen, ha jó minőségű fémréteg ellenállásokat használnak az áramkörökben.

Ellenállások másik típusa az un. változtatható értékű ellenállások vagy más néven potenciométerek, melyeknél egy harmadik kivezetés (csúszóérintkező) gondoskodik a jel bizonyos hányadának elvezetéséről. Ezek is készülhetnek réteges és huzalos kivitelben egyaránt.

A réteges kivitelű potenciométereknek két fajtája ismeretes:

- szénréteg: rossz kopásállóság, érzékeny a nedvességre és hőmérsékletre, viszont olcsó
- cermetréteg: sokkal jobb kopásállóság, tartós, megbízható működés

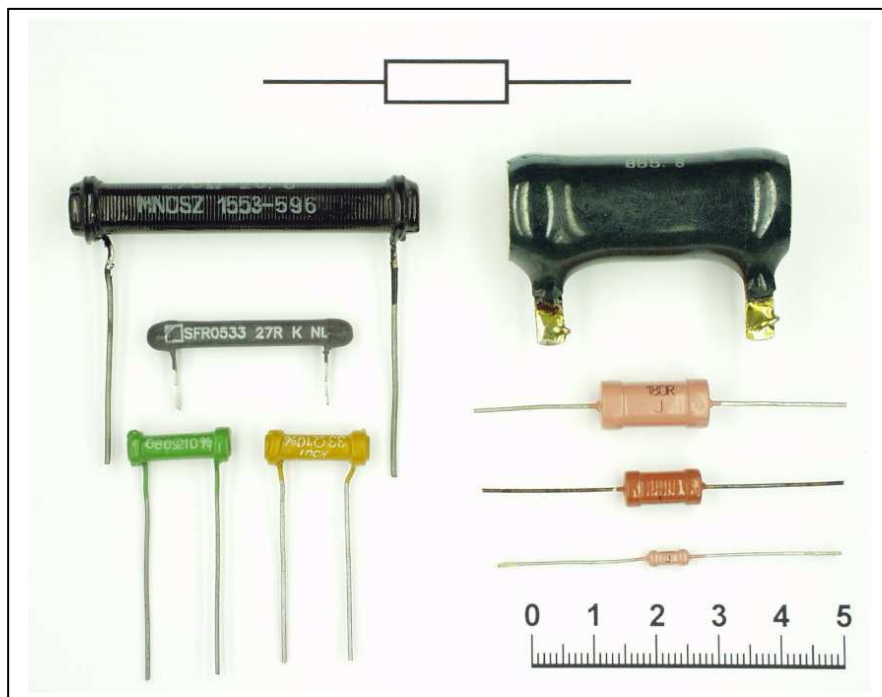
A potenciométerek másik típusa a **huzalpotenciométerek**, amelyeket inkább az ipari berendezéseknél használják, mert nagy az induktivitásuk, ami nem megengedhető a hifi hangerősítők bemeneténél. Előnyük viszont, hogy nagy teljesítményben kaphatók (akár 100 W is lehet).

A potenciométereket a kiviteltől függően felhasználhatjuk szabályozó elemként (pl.: hangerő beállítása) vagy beállítóként (trimmer).

A hifi hangerősítőkben mindenképp célszerű jó minőségű hangerőszabályzó potenciométert alkalmazni, mert ez javítja a hangminőséget, és évek múlva is megbízhatóan fog működni, „sercegésmentes” hangerőbeállítást tesz lehetővé. Ezeknél az eszközöknél fontos kritérium továbbá, hogy alacsony zajjal rendelkezzen.

A beállítópotenciométerek vagy más néven „trimmer”-ek egyszeri beállítással szolgálnak (pl.: hangerősítőkben a végfokozat nyugalmi árama, kimeneti offszet, stb.). Ezeknél az a cél, hogy hosszú ideig megbízhatóan tartsa a beállított értéket.

Néhány ellenállástípus látható a 3. ábrán (legfelül a rajzjel látható):



3. ábra: Ellenállások gyakorlati kiviteli formái

A kondenzátor

A hangerősítők talán egyik legfontosabb passzív alkatrésze a kondenzátor. Felépítését tekintve két vezetőlemez (fegyverzet) helyezkedik el egymással szemben, és közöttük szigetelőréteg található. A lemezek felületétől és a felületek közötti távolságtól függően az eszköz különböző mértékben képes a töltés tárolására, azaz más-más kapacitással rendelkezik. A kapacitást az alábbi képlettel fejezhetjük ki [1]:

$$C = \epsilon (A / d)$$

Ahol A: a lemezek felülete,

d: a lemezek távolsága,

ϵ : a szigetelőanyag dielektromos tényezője (relatív dielektromos állandó $[\epsilon_r]$ * vákuum dielektromos állandója $[\epsilon_0]$).

A gyakorlatban alkalmazott kondenzátorokat két nagy csoportra oszthatjuk: **polarizált** és **polarizálatlan** kondenzátorok.

A **polarizált** csoportba tartoznak az elektrolitkondenzátorok, melyekkel igen nagy kapacitásértékek érhetők el (ma már nem ritka a **néhány Farad** érték sem) viszonylag nagy feszültség mellett.

Ezek a típusok sajnos érzékenyek a rákapcsolt feszültség polaritására, ezért főleg a tápegységben szűrőként való felhasználásuk esetén körültekintően kell eljárni az első rákapcsoláskor. Az időbeli állandóságuk sem jó, mert az évek múlásával az elektrolit kiszáradása miatt a kapacitásérték csökken, így ezt

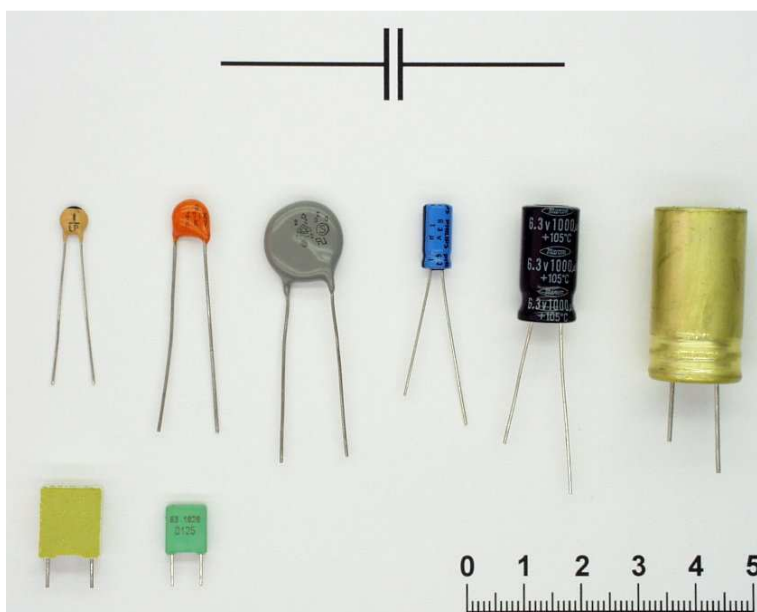
mérlegelni kell a felhasználás során. Másik nagy probléma az ilyen eszközöknél a viszonylag nagy soros veszteségi ellenállás, ami tápegységeknél a leadott áramot korlátozhatja, ezért célszerű a nagykapacitású elektrolitkondenzátorokat kisveszteségű kondenzátorokkal „hidegíteni”. A tápegység-konstrukciónál erre látunk majd példát a későbbiekben. Hangerősítőkben a nagy szivárgási áram korlátozhatja a fokozatok közötti csatolóként való felhasználását az elektrolitkondenzátoroknak [5].

Összefoglalásként elmondhatjuk, hogy az ilyen eszközöket ott célszerű használni, ahol nagy kapacitásértékekre van szükség, de az egyéb paraméterek (pl.: veszteség) kiváló értéke nem kritérium. Tehát hangfrekvenciás erősítők esetén legjobb, ha csak a tápegység tartalmaz ilyen alkatrészeket. Megjegyzendő, hogy ez nem minden esetben teljesíthető.

Kondenzátorok másik nagy csoportja az ún. **polarizálatlan** típusú eszközök. Ezek a nevükből adódóan nem érzékenyek a rákapcsolt feszültség polaritására. Szerkezeti megoldásuk rendkívül sokféle lehet, mindig a célnak megfelelőt kell kiválasztani a katalógusból. Ezek közül néhányat példa [5]:

- Léteznek kicsi, de nagyon pontos értékű kerámiakondenzátorok kis soros veszteségi ellenállással és induktivitással. Az ilyen eszközöket általában a frekvenciamenet-módosító, illetve nagyfrekvenciás hidegítő áramkörökben használjuk.
- A legelterjedtebb típus a fóliakondenzátorok csoportja, amelynél a dielektrikum valamilyen műanyag (pl.: poliészter, polipropilén, polisztirol). A hangerősítőkben ezeket fokozatok közötti csatolóként használjuk fel ott, ahol a DC-szint leválasztása elengedhetetlen.

Néhány kondenzátortípus látható az alábbi ábrán (legfelül a rajzjel):



3. ábra: Kondenzátorok gyakorlati kivitelei

2. 2. 2. Aktív építőelemek (félvezetők)

A tranzisztor

Az elektronikus erősítőáramkörökben, mint azt már az előzőekben említettem, külső energia segítségével a bemenőjel teljesítményét megemeljük, és azt a kimeneten felhasználjuk céljainknak megfelelően, immár nagyszinten. Látható, hogy az áramköröknek tartalmazniuk kell valamilyen elemet vagy elemeket, amelyek elvégzik az erősítést.

Ezeket az alkatrészeket, aktív elemeknek nevezzük, mivel a működésükhöz tápfeszültségre van szükségük. Fizikai megvalósításuk az ún. félvezetők, melyek valamilyen félvezető anyagból készülnek. A végső felhasználásuktól függően a félvezető anyaga szennyezőanyagot tartalmaz, melyet adott struktúrájára alakítanak ki. A szennyezés itt azt jelenti, hogy idegen atomokat visznek a félvezető kristályrácsába, ami ennek hatására vagy elektrontöbbslettel, vagy elektronhiánnyal (lyuktöbbslettel) rendelkezeni a bevitt anyagtól függően. Az előbbi N típusú, míg az utóbbit P típusú szennyezésnek nevezzük. Két ilyen réteget egymás mellé rakva félvezetőt kapunk (dióda), amely nyitóirányú előfeszítés esetén áramvezetésre képes, és például szilícium alapú eszköz esetén kb. 0,6-0,7 V esik rajta [2] [4] [5].

E két félvezetőtípus különböző kombinációjával számos félvezető elemet tud létrehozni a modern mikroelektronika.

Az egyik legelterjedtebb ezek közül a **szilícium alapú bipoláris tranzisztor**. Ebben az eszközben három félvezetőréteg található, amely alapján az alábbi kialakítások lehetségesek:

- NPN tranzisztor
- PNP tranzisztor

A fentiek alapján a tranzisztornak három kivezetése van.

NPN eszköz esetén az egyik N réteg a **kollektor**, a középső a bázis, s a másik N az **emitter**.

PNP eszköz esetén ugyanez az elrendezés, csak a szennyezés sorrendje más. Ahhoz, hogy az alkatrész megfelelően működjön, az alábbi előfeszítést kell alkalmazni az egyes rétegeken (NPN): az emitter a legnegatívabb pont, ennél kb. 0,6-0,7 V-tal magasabb szinten legyen a bázis (nyitott PN-átmenet), és a legpozitívabb a kollektor.

Ilyen kialakítás mellett az eszköz erősítésre képes. A gyengén szennyezett bázisrétegbe befolyó (NPN), vagy az abból kifolyó (PNP) áram hatására elektronok (vagy lyukak) fognak kilépni az emitterből. A kollektorpotenciál hatására az elektronok a bázison átszáguldv a kollektorba lépnek és ott rekombinálódnak. Így hozzák létre a kollektoráramot. A töltéshordozók egy része a bázisrétegben rekombinálódik, és ott létrejön a bázisáram, ami csekély mértékű a kollektoráramhoz képest.

Végeredményben a bázisréteg áramának kismértékű megváltozása a kollektor- és ezzel együtt az emitteráram nagymértékű megváltozását idézi elő. Így valósul meg a jelerősítés [2] [4] [5].

A bipoláris tranzisztor tehát egy áramvezérelt eszköz. Fontos megjegyezni, hogy az erősítőtervezésnél ez egy lényeges tulajdonság, az egyes fokozatok méretezésénél ezt mindenképpen figyelembe kell venni.

Másik tranzisztortípus az un. **térvezérlésű tranzisztor**. Ezt az eszközt elektromos tér segítségével vezéreljük. Két fajtája van:

- záróréteges térvezérlésű tranzisztor (J-FET)
- szigetelt vezérlőelektródás térvezérlésű tranzisztor (MOS-FET)

Mindkét eszközből létezik a vezetőcsatorna kialakításától függően N illetve P csatornás típus. Kivezetéseik elnevezése:

- GATE (vezérlőelektróda)
- DRAIN (nyelő, a bipoláris tranzisztornál ez felel meg a kollektornak)
- SOURCE (forrás, amely bipoláris tranzisztornál megfelel az emitternek)

A térvezérlésű tranzisztorok működése:

J-FET esetén a vezérlőfeszültséggel a vezetőcsatorna szélességét (elzáródásának mértékét) tudjuk befolyásolni, így annak vezetőképessége változik. A vezérlés alapfeltétele a záróirányú gate-source előfeszítés, ami azt jelenti, hogy N csatornás esetben a gate negatívabb potenciálon kell legyen a source-höz képest. Ilyen feltételek mellett a csatorna árama (draináram) a vezérlőfeszültség változásait követi.

A **MOS-FET** tranzisztoroknál két típust különböztetünk meg:

- növekményes
- kiürítéses

Növekményes eszközben 0 V gate-feszültségnél nem folyik áram a vezetőcsatornában, az teljesen el van zárva. N csatornás esetben a gate-re kapcsolt pozitív feszültség (source-höz képest) megindítja az áramot.

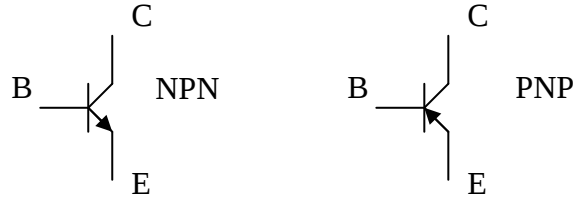
A **kiürítéses eszköz** annyiban különbözik ettől, hogy gate-feszültség hiányában is folyik valamekkora csatornaáram, tehát mind pozitív, mind negatív gatefeszültségű vezérlés lehetséges.

A fentiekből kitűnik az a rendkívüli tulajdonsága ezeknek az eszközöknek, hogy a vezérlésükhöz teljesítmény nem kell, csak feszültség szükséges hozzá (a gate elektródán áram nem folyik). Ez olyan helyeken nagyon előnyös, ahol a helyes működés feltétele, hogy az eszköz ne terhelje az előtte lévő fokozatokat.

A hangerősítők tervezésénél erre is rendkívül nagy figyelmet kell fordítani a kis torzítás és nagy linearitás elérése érdekében [5].

A tranzisztorok áramköri jelölései:

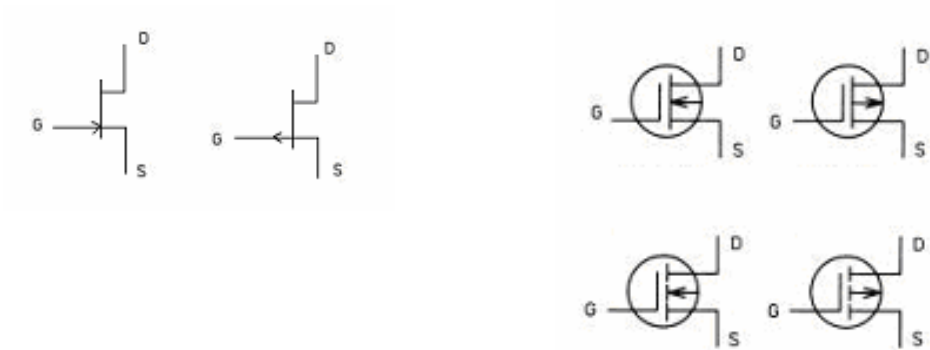
Bipoláris típusok:



FET típusok:

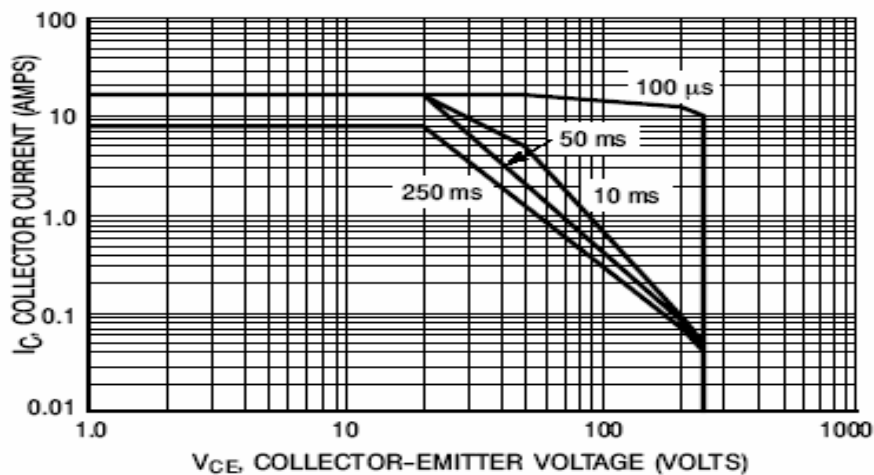
J-FET

MOS-FET (felül a kiürítéses, alul a növekményes):



A tranzisztoros erősítők tervezésénél rendkívül fontos, hogy az alkalmazott félvezetők katalógusban megadott határadatait semmiképp se lépjük túl. Ilyen adatok például a maximálisan megengedett kollektor-emitter (drain-source) feszültség, a maximális kollektoráram (draináram), valamint az eszközre megengedett maximális disszipáció. Ez utóbbit a katalógusok diagram formájában adják meg, ahol látható, ahogy adott kollektor-emitter feszültséghez mekkora kollektoráram tartozik. Ez kijelöl a diagramban egy görbét, amely aztán megadja azt a területet, amelyen belül az eszköz biztonságosan működtethető [4] [5].

A 4. ábrán egy ilyen diagram látható. A határadatok az MJE 15032 típusú hangfrekvenciás bipoláris teljesítménytranzisztorra vonatkoznak.



4. ábra: Bipoláris tranzisztor biztonsági működési tartományai

Tranzisztorok esetén a határérték görbe általában három jól elkülönülő részből tevődik össze.

Az első szakasz az **áramhatárérték szakasza** (az ábrán a vízszintes vonal), a következő a **hődisszipációs határérték szakasza** (első töréspont utáni ferde vonal), majd az utolsó a **feszültség-határérték szakasza** (a függőleges vonal). Ez tervezérlésű tranzisztoroknál minden esetben így van.

Bipoláris eszközöknél azonban fellép egy negyedik korlátozó jelenség is, ez pedig az ún. másodlagos letörés.

Ez látható a 4. ábra 10ms-os görbéjénél, ahol a ferde vonal 2 részből áll, s második rész a másodlagos letörés tartománya. A jelenség oka: a bipoláris tranzisztorban az emitter-bázis pn-átmenet küszöbfeszültsége a hőmérséklet emelkedésével csökken, tehát állandó előfeszültség esetén a kollektoráram a hőmérséklet emelkedésével folyamatosan nőni fog. Ez a folyamat öngerjesztő jellegűvé válhat, ha nem megfelelő az eszköz hűtése. A megnövekedett áram hatására ugyanis a tranzisztor melegszik, amely tovább növeli az áramot egészen addig, amíg az alkatrész tönkre nem megy. Ezt más néven „hőmegfutásnak” nevezzük. Hangerősítők tervezésénél mindenképpen biztosítani kell, hogy a bipoláris tranzisztoros, nagyáramú végfokozatokban ez a jelenség ne lépjen fel [5].

Szakdolgozatom gyakorlati részében ismertetek egy egyszerű és tapasztalataim szerint a gyakorlatban nagyon jól működő megoldást e probléma kiküszöbölésére.

Ha a fent említett korlátozásokat és szabályokat betartjuk az áramkör tervezése során, valamint úgy alakítjuk ki a rendszert, hogy megfelelő tartalékokkal rendelkezzen még szélsőséges működési körülmények között is, akkor a mai modern félvezetők segítségével évtizedeken keresztül megbízhatóan működő készüléket építhetünk.

2. 2. 3. Erősítők mérhető és szubjektív paraméterei

Hangfrekvenciás erősítők esetén egy sor fizikai (mérhető) paraméter van, amely alapján minősíteni lehet az adott konstrukciót. Nyilvánvalóan a tervezéskor arra törekszünk, hogy e mennyiségek a lehető legjobban közelítsék meg az ideális értékeket. Mai modern eszközökkel nagyon jól meg lehet közelíteni az ideális állapotot. A gyakorlat azonban sokszor azt mutatja, hogy a kiváló mért paraméterek ellenére az adott erősítő hangja nem hozza az elvárt szintet. Ebből következik, hogy nemcsak jó áramköri terv szükséges a jó hanghoz, hanem minden egyéb kiszolgáló egységet korrektül meg kell tervezni és építeni (pl. tápegység két-, háromszoros túlméretezése).

Mielőtt azonban a szubjektív jellemzőkre rátérnénk, tekintsük át röviden az erősítők mérhető, fizikai paramétereit valamint az áramkörökkel szemben támasztott követelményeket.

Átviteli frekvenciatartomány

Az első és a hangzás szempontjából az egyik legfontosabb paraméter az **átviteli frekvenciatartomány**. Ez azt jelenti, hogy melyek azok a frekvenciák, amelyeket az erősítő át tud vinni, tehát adott teljesítmény mellett le tud adni a hangsugárzóra. Az ember által érzékelt hangok frekvenciája 20 Hz-től kb. 20 kHz-ig terjed (életkortól függően), tehát ezt a tartományt egy modern hifi erősítőnek mindenképpen le kell tudni sugározni. Ezen belül az ingadozás maximum $\pm 0,5$ dB lehet, ami azt jelenti, hogy gyenletes amplitúdómenetet kell biztosítani e tartományon belül.

Régebben gyakran használtak a tervezők frekvenciamenet-módosító áramköröket (un. equalizer-eket) annak érdekében, hogy a konstrukció hiányosságait e téren csökkentsék. Ez leginkább a csöves erősítők korszakára volt jellemző.

Ma már azonban az equalizer-ek kezdik elveszíteni a jelentőségüket. Ez nem vonatkozik a professzionális hangtechnikára illetve stúdiótechnikára, mert a modern áramkörök gond nélkül teljesítik ezt a kritériumot. Itt említeném meg, hogy ma már nem ritka az olyan erősítő, amely akár a 100 kHz-es frekvenciát is képes átvinni (DVD-Audio Ready készülékek).

Zajforrások az erősítőkben

Másik paraméter az ún. **jel/zaj** viszony. Ez alatt azt a viszonyszámot értjük (dB-ben megadva), amelyet a maximális kimeneti jelszint (U_{kimax}) és a jel hiányában mért zajszint (U_z) hányadosaként kapunk az alábbiak szerint:

$$\text{Jel/zaj [dB]} = 20 \cdot \log(U_{kimax} / U_z)$$

Egyértelmű, hogy minél nagyobb ez a számadat, annál jobb a konstrukció. A csatornazajt teljesen eltüntetni nem lehet a félvezetők fizikai felépítéséből adódóan (pl.: termikus zaj), azonban az megfelelő kapcsolástechnikával és kis zajú félvezetőkkel nagymértékben csökkenthető. Emellett ez tovább javítható a tápegység jó szűrésével a brumm-mentes tápfeszültség érdekében.

A jel/zaj viszony a gyakorlatban 60-80 dB között fordul elő kommersz készülékek esetén, míg a professzionális hangtechnika területén nem ritka a 100 dB fölötti érték sem.

Torzítások az erősítőkben

Elérkeztünk a hangfrekvenciás erősítők legfontosabb paraméteréhez, amely nem más, mint a **torzítás**. Ennek több fajtája van, de e fejezetben csak a **nemlineáris torzításokkal** foglalkozom, mert úgy gondolom, ennek van nagyobb jelentősége a hangminőséget illetően.

Sajnos a félvezetők karakterisztikája nemlineáris jellegű, így a hangerősítőkben elkerülhetetlenül fellép bizonyos mértékben ez a fajta torzítás. Fontos követelmény annak biztosítása, hogy ez a hallhatósági szint alatt maradjon a jellevágás alatti teljes teljesítménytartományban.

Ennek érdekében a kapcsolást úgy kell megtervezni, hogy a félvezetők ebben a tartományban ne kerüljenek karakterisztikájuk nemlineáris szakaszaira.

A nemlineáris torzításoknak alapvetően két nagy csoportja van: a **harmonikus torzítások**, illetve az **intermodulációs torzítások**.

Harmonikus torzítás:

Erről akkor beszélünk, ha az áramkört egy szinuszos jellel vezérelve a kimeneten megjelennek a jel felharmonikusai (frekvenciájának egész számú többszörösei) valamekkora amplitúdóval. Értékét a torzítási tényezővel (k) fejezzük ki, amely megadja a torzítási termékek illetve a torzítatlan kimeneti jel (alapharmonikus) amplitúdójának hányadosát %-ban kifejezve. Gyakorlati értékét tekintve elvárás, hogy 1 % alatt maradjon a teljes kivezérlési tartományban (hallhatóság határa). Ma már azonban inkább elterjedt, ha a k tényezőt egy nagyságrenddel lejjebb szorítjuk, mely így a 0,1 %-ot sem haladhatja meg. Látható, hogy ez rendkívül kis érték, tehát körültekintő tervezést igényel.

Ezekből következik, hogy minél kisebb k értéket sikerül elérnünk a tervezés során, valószínűleg annál szebb lesz az erősítő hangja. Bár véleményem szerint egy bizonyos alacsony érték alatt már nem lényeges, mekkora a torzítás számszerű értéke (pl.: 0,001 % vagy 0,0001 %).

A hangminőség egyébként attól is függ, hogy a konstrukció torzítása milyen harmonikus összetevőkből áll. Félvezetős áramkörök túlvezérlése esetén például a jellevágás miatt a páratlan rendű felharmonikusok fognak dominálni a jelben (a szinusz „négyyszögesezni” kezd). Ez szubjektíve rendkívül zavaró tud lenni, nem is beszélve arról, hogy a hangsugárzót is tönkretelheti az ilyesfajta tartós üzem. Ezzel szemben, ha a jel páros rendű felharmonikusokban dúsul, elviselhetőbb a torzítás. Sokan állítják azt, hogy az elektroncsöves erősítőknek azért van kellemesebb, lágyabb hangjuk, mert inkább ezek a harmonikusok játszanak szerepet a kimeneti jelükben, ami kevésbé fülsértő [14].

Itt megemlítenék egy fontos szempontot a félvezetős erősítők tervezésénél. Mindenfajta félvezetős konstrukciónak tartalmaznia kell negatív visszacsatolást a megfelelő működés biztosítására és a paraméterszórások ellen, melyről részletes információkat adok a gyakorlati részben.

De annyit megemlítek, hogy minél nagyobb ennek mértéke, annál inkább csökken az erősítő átvitelének mindenfajta hibája (torzítás, zaj, tranziens átviteli hiba, stb.) [5].

Célszerű ezt szem előtt tartva kialakítani az áramkört a minél alacsonyabb torzítás érdekében mérlegelve azt, hogy ez egyéb gondokat is felvet (pl.: stabilitási problémák). Összegezve azt mondhatjuk, hogy a tervezésnél sok tényezőt kell figyelembe venni, és összhangba hozni a megfelelő minőség érdekében.

Intermodulációs torzítás és egyéb tranziens hibák:

A nemlineáris torzítások másik fajtája az ún. **intermodulációs torzítás**. Ennek mérésénél az erősítőt legalább két szinuszos jellel hajtjuk meg. A torzítás értéke megadja, hogy milyen mértékben vannak jelen a kimeneten a bemenő jelekből képzett összeg- illetve különbségi frekvenciák. Az ilyen összetevők amplitúdója is egy adott érték alatt kell, hogy maradjon (ez a határérték általában ugyanakkora, mint a harmonikus torzítás esetében). Az intermodulációs torzítás alacsony értéke fontos például beszédátvitel esetén a beszéd érthetősége miatt, de zenénél is rendkívüli jelentőséggel bír.

Erősítőmérésnél nagyon fontos az ún. **tranziens vizsgálat**. Ez általában abból áll, hogy a bemenetet pl.: 1 kHz-es négyszögjellel vezérelve figyeljük a kimeneti jelet rezisztív vagy reaktív terhelés esetén. Megjegyzendő, hogy hangszóró szimulációja esetén mindenképpen reaktív terhelést kell használnunk. Jó tranziens viselkedés esetén a kimenőjelben nem lehet sem túllövés vagy berezgés, sem tetőesés, illetve rövid idő alatt fel kell, hogy vegye a jel a névleges értékét. Ez a mérési módszer sok átviteli problémára fényt deríthet.

Néhány példát megemlítve az átviteli hiányosságokra:

- a kimeneti négyszögjel túllövése esetén valószínűleg nagyfrekvenciás kiemelése van az áramkörnek, ami akár stabilitási problémát is okozhat
- tetőesésnél az alacsonyfrekvenciás átvittel van gond (túl magas alsó határfrekvencia)
- az áramkör lassúságára utal, ha a négyszögjel felfutási ideje túl nagy (alacsony Slew Rate érték), amelynek oka valószínűleg az alacsony felső határfrekvenciában keresendő.

Ideális esetben ezek a problémák nem jelentkeznek, azaz a határfrekvenciák rendben vannak, s az erősítő megfelelően gyors is. Ezekből következik, hogy a későbbi hangfrekvenciás jellel történő vezérlés esetén a hirtelen bekövetkező szintugrásokat az áramkör kellő dinamikával fogja tolerálni, így a hangminőség nagymértékben javulni fog.

Stabilitási problémák

A gyakorlatban szinte minden félvezetős hangerősítő tartalmaz negatív visszacsatolást. E kapcsolási megoldás úgy állítható elő, hogy a kimeneti jel bizonyos részét visszavezetjük a bemenetre egy frekvenciafüggetlen osztó segítségével. A visszacsatolás attól lesz negatív, hogy az erősítő bemeneti jele és a visszacsatolt jel ellenkező polaritású (úgy is mondhatjuk, hogy közöttük a fáziskülönbség éppen 180°). Ez azt eredményezi, hogy a bemeneti aktív eszközt a visszacsatolás ellenkező értelemben vezérli, tehát ellene hat a bemenő (és a kimenő) jelnek. Ez látszólag hátrányos, ugyanis így a visszacsatolásban lévő fokozat (vagy fokozatok) feszültség-erősítése lecsökken. Ennek ellenére nem hagyhatjuk ki a konstrukcióból, mert rendkívül sok előnye van ennek a megoldásnak.

Néhányat megemlítve:

- csökken a torzítás
- csökken a zaj,
- alacsonyabb tranziens átviteli hibák
- csökken a kimeneti ellenállás
- nő a bemeneti ellenállás
- erősítőelemek paramétereinek szórása kevésbé fog dominálni, stb.

Azt mondhatjuk, hogy a visszacsatolás hatására az erősítő szinte minden paramétere javulni fog. Ennek mértéke függ az alkalmazott negatív visszacsatolás mértékétől, azaz minél nagyobb a visszacsatolt jel amplitúdója, annál nagyobb mértékű lesz a visszacsatolás, s annál inkább javulnak a mérhető paraméterek. Jogosan vetődik fel bennünk, hogy alkalmazzuk a lehető legnagyobb visszacsatolást az erősítő tervezésénél. Ez helyes megközelítés lenne, azonban a gyakorlatban nem mindig lehet realizálni a stabilitás megőrzése mellett. Ilyenkor a rendszer eredő fázistolása elfogadhatatlan mértékű lesz a magasabb frekvenciákon, s ez gerjedést okozhat az alábbiak miatt:

Egy visszacsatolást tartalmazó erősítő csak akkor lesz stabil (gerjedésmentes), ha az egész rendszer eredő feszültségerősítése 0 dB alá esik, még mielőtt a rendszer fázistolása eléri a -180° -ot. Ha adott frekvencián a fázistolás eléri ezt az értéket, akkor a visszacsatolás miatt amúgy is fázisfordított jel ismét szenved egy fázisfordítást, így a bemenőjellel azonos fázisú visszacsatoló jel fog érkezni a bemeneti eszközre. Ez a fokozaterősítést növeli, majd a visszacsatolás hatására ez a megnövekedett amplitúdójú jel ismét visszakerül a bemeneti elemre. Így egy öngerjesztő folyamat indul meg, ami miatt egy folyamatosan növekvő amplitúdójú jelet kapunk, s az addig növekszik, míg a tranzistorok tönkre nem mennek (vagy a védelem be nem avatkozik). Ha viszont biztosítjuk, hogy a nagyfrekvenciás fázismenet úgy alakuljon, hogy a -180° -hoz tartozó frekvenciaértéken a teljes erősítőrendszer már csillapítson (erősítése 0 dB alatt legyen), akkor nem alakulhat ki ilyen öngerjedés [2] [5].

A kialakuló rezgés lecsillapodik, ill. ki sem alakul. Magától értetődik, hogy minél jobban csillapít a rendszer az adott frekvencián, annál stabilabb lesz a működése, azaz annál nagyobb lesz az un. amplitúdó- és fázistartalék. A tervezésnél törekedni kell a minél nagyobb tartalék elérésére.

Rosszul tervezett áramköröknél sajnos gyakran előfordul, hogy ohm-os terhelésre dolgozva semmi probléma nem jelentkezik, viszont amint a hangszóróterhelést rákapcsoljuk (reaktív terhelés), azonnal begerjed és tönkremegy az erősítő (rosszabb esetben a hangszóró is). Ennek oka, hogy a reaktív hangszóróterhelés többlet-fázistolást visz a rendszerbe. Ilyenkor valószínűleg a kicsi amplitúdó-és fázistartalék okozza problémát.

Sokszor előfordul olyan eset is, hogy az erősítő a stabil és instabil állapot között „billeg” vagy kis amplitúdójú gerjedésbe kezd, és ez sajnos a hangjára rendkívül rossz hatással van [5].

Gyakorlati munkám során tapasztaltam, hogy e jelenség nemcsak, hogy „elkeni” a hangot, de még a kivezérelhetőséget is korlátozza.

Ahhoz, hogy a fent említett hatásokat kiküszöböljük, biztosítani kell, hogy az áramkör amplitúdója legalább a 0 dB pontig -20 dB/dekád-dal essen. Ez azt jelenti, hogy frekvenciadekádanként maximum 20 dB-el csökkenhet az erősítés, azaz egyetlen domináns nagyfrekvenciás töréspontja lehet a kapcsolásnak.

Ha 0 dB alá ér a frekvenciamenet, akkor már bejöhet a következő töréspont is (pl. valamely gyártási ill. szórt kapacitás miatt), aminek hatására -40 dB/dekád-dal fog esni a karakterisztika. E feltételek biztosítása esetén a fáziskarakterisztika menete elég lapos lesz, és a -180° -ot csak 0 dB alatt fogja elérni, tehát a rendszerünk megőrzi stabilitását még reaktív terhelés esetén is. Erre kell törekednünk a tervezés során.

Szakdolgozatom gyakorlati részében bemutatom az általam tervezett áramkörben a stabilitást biztosító kapcsolási részleteket is.

Erősítők szubjektív értékelése

Az előző fejezetekben áttekintettük az erősítők bemérése során leggyakrabban használt paramétereket. Ezek a mai félvezetőkészlettel kiváló értékűek lehetnek, melyekkel sokszor jól megközelíthetjük az ideális erősítőre jellemzőket. Fontos megállapítani azonban, hogy sok esetben nem kizárólag e paraméterek kiváló értékén múlik egy áramkör hangminősége [6].

Sokan állítják, hogy a túlbonyolított áramkörök semmiképp sem szólhatnak jól [14].

Véleményem szerint ez nem teljesen így van. Egy sor egyéb dolog is befolyásolhatja a hangzást.

Ilyen például:

- A tápegység - amely rendkívüli jelentőséggel bír - minél inkább túl van méretezve, annál könnyebben tudja kezelni a bemenő jelben hirtelen bekövetkező szintugrásokat, és így a végfokozat megnövekedett áramigényét.
- A jó szűrés és a túlméretezett pufferkondenzátorok hatására a tápfeszültség is kevésbé esik le nagy terheléskor, és így elkerülhetők a munkapont eltolódásából adódó nemkívánatos torzítások. Ebből következik, hogy az erősítő dinamikája nagymértékben növelhető a túlméretezéssel.
- A megfelelő megépítéssel is javítható a hangzás (pl.: rövid jelutak, nagy keresztmetszetű vezetékek használata, minőségi csatlakozók, potméterek, egypontföldelés a nemkívánt kiegyenlítőáramok elkerülésére, stb.).

Összefoglalásképpen elmondható, hogy egy tranzisztoros erősítőt nemcsak jóra kell tervezni, hanem gondos építést is igényel annak érdekében, hogy elérjük a számunkra legmegfelelőbb hangélményt.

A gyakorlatban nem az számít, hogy milyen alacsony torzítást tudtunk elérni, vagy milyen szabályos négyszögjelet kaptunk az oszilloszkópon, hanem hogy mennyire természetes a konstrukció hangja, mert a végső és legfontosabb mérőműszer az emberi fül [6].

Az, hogy egy áramkör mennyire szól jól, a szubjektív értékelés dönti el. Ez azonban többek között az egyéntől is függ, ami miatt nem lehet egyértelműen kijelenteni, hogy egy erősítő jól szól-e vagy sem. Sokszor hosszú ideig kell hallgatni a hangját, mire felfedezzük benne az esetleges hiányosságokat (ha egyáltalán érzékelhető).

Saját tapasztalatom szerint ez egyáltalán nem könnyű dolog. Az elkészült áramkört pl. heteken keresztül hallgattam, mire ki tudtam jelteni, hogy egy kicsit másképp szól, mint a házi-mozi erősítőm (ami mellesleg MOS-FET-es végfokozatot tartalmaz). Hozzá kell tenni, hogy ez az értékelés erősen szubjektív.

Dolgozatom befejező részében bemutatom a saját készítésű erősítőnek és a gyári készüléknek a szubjektív összehasonlítását hangzás szempontjából.

Mindezek mellett jelentős befolyásoló tényező lehet az, hogy erősítőnk milyen környezetben üzemel. Gondolok itt arra, hogy milyen külső eszközöket használunk jelforrásként illetve hogy milyen hangsugárzókat hajtunk vele. Véleményem szerint az adott hangrendszer hangja legalább olyan mértékben függ a használt hangsugárzótól (illetve hangdoboztól), mint az erősítő kapcsolástechnikájától illetve felépítésétől.

Tapasztalatom szerint a hangdobozok közötti hangzásbeli különbséget adott esetben könnyebb felismerni. Éppen ezért a hangsugárzó-rendszert is az erősítő alkatrészeként kellene kezelni a tervezés során, ami a sorozatgyártású erősítők esetén gyakorlatilag megoldhatatlan feladat. Nem lehet ugyanis előre tudni, hogy milyen hangsugárzót fog meghajtani az adott konstrukció.

Egyedi tervezésnél esetleg megoldható lenne, de itt sincs egyszerű dolgunk, mert rendkívül nehéz olyan reaktív műterhelést készíteni, ami a hangfrekvenciás tartományban hasonlóan működik, mint az a hangsugárzó, amivel az erősítőt a későbbiekben használni fogjuk. Az erősítők ugyanis a tisztán rezisztív jellegű terheléseket „szeretik”, és arra dolgozva képesek leadni a legnagyobb teljesítményt a legkisebb torzítás mellett.

Ennek megvalósulásához azt kellene elérni, hogy a teljes frekvenciatartományban kompenzáljuk a hangszóró reaktív jellegét, ez azonban rendkívül nehéz, sőt nem is lehetséges kompromisszumok nélkül.

Mindezekből az következik, hogy a tervezés során sokat kell tesztelni a konstrukciót, és próbálgatással kell beállítani a számunkra megfelelő hangzást. Ez gyakran sok időt vesz igénybe, de meglátásom szerint érdemes rászánni a munkaórákat, mert így az igényeinknek megfelelő berendezést hozhatunk létre.

Információim szerint napjainkban azonban az otthoni erősítőépítők száma eléggé lecsökkent. Szerintem ez annak is köszönhető, hogy ma már a hifi boltok polcain jobbnál-jobb készülékeket lehet kapni, és ki lehet választani az igényeinknek megfelelő típust. Van bőven választék, és nevesebbnél nevesebb gyártók versengenek egymással a piaci pozícióért.

A következő fejezetben egy rövid bepillantást adnék a mai, modern hangfrekvenciás erősítők világába, valamint kiemelném a jelentősebb technikai újításokat.

2. 2. 4. Hangfrekvenciás erősítők napjainkban

A hangfrekvenciás erősítő napjainkra az egyik legszélesebb körben elterjedt szórakoztató-elektronikai terméké vált. A hangtechnikai boltokban mindenki megtalálja az igényeinek leginkább megfelelő típust.

Sok gyártó már csak úgynevezett házi-mozi erősítőket gyárt, ami manapság rendkívül népszerű. E termékek legalább 5 független hangcsatornával rendelkeznek, és van rajtuk kimenet az extra mélysugárzó számára is. Külön ismertetőjelük a hátlapjukon elhelyezkedő csatlakozóaljzatok számának zavarba ejtő mennyisége.

A drágább eszközök gyakorlatilag minden, a manapság elterjedt médiaformátumot képesek kezelni, illetve dekódolni. Ebből is látszik, hogy a digitális technika az erősítők világába is betört.

Sorra jelentek meg a jobbnál jobb A/D és D/A átalakítók, melyek segítségével kódolhatók és dekódolhatók a zenei formátumok. Nem ritka az optikai bemenet az ilyen készülékeken, amivel a rézvezetékek jelre gyakorolt káros hatásai kiküszöbölhetők. A legtöbb lejátszóberendezésen is találunk optikai kimenetet, amit üvegkábelrel az erősítőhöz csatlakoztatva, gyakorlatilag zajmentes átviteli utat biztosíthatunk. Így szinte mindent meg tudunk valósítani, ami az otthoni mozi-élményhez szükséges.

A technikai háttérrel szemügyre véve kiderül, hogy a legtöbb „kommersz” készülék végfokozata valamilyen integrált áramkörrel készül. Ennek vannak előnyei és hátrányai egyaránt. Előnyként említeném, hogy kis méretűek, így a sokcsatornás erősítés viszonylag kis méretben megvalósítható, és egyszerűbb a sorozatgyártás is.

Hátrány viszont a magas ár, melynek oka, hogy általában ezek a végfok-IC-k speciálisan az adott erősítőbe készülnek vagy a gyártó saját keze által, vagy valamilyen neves félvezetőgyár közreműködésével. További hátrányuk, hogy az adott készülék csak a hozzávaló alkatrészrel javítható, ami például japán gyártók esetén beszerzési nehézségekkel is járhat. A hangminőséget illetően nem mondhatnám, hogy az élvonalba tartoznak ezek az eszközök (pl: áthallási problémák léphetnek fel a többcsatornás integrált áramkörök miatt), kivételt képeznek a drágább típusok, ahol sokszor IC-k helyett diszkrét alkatrészekből felépített erősítőfokozatokat találunk (talán nem véletlenül).

Példaként az 5. ábra szemlélteti a neves Pioneer cég egyik készülékét [8]:



5. ábra : A Pioneer VSX-916-S készülék elő- és hátlapja

Ahogy az eddigiekből látható, a csak sztereó készülékek ma már elég ritkák. Ezeket legtöbbször a professzionális hangtechnika területén használják. Ezek az eszközök kimenő teljesítménye több 1000 W is lehet a hangosítási feladattól függően. Kialakításuk szinte kivétel nélkül szabvány méretű rackdobozba történik. Igaz ez a stúdiótechnikai berendezésekre is, ahol nem elsődleges cél a nagy teljesítmény, sokkal fontosabb a kifogástalan hangvisszaadás. A professzionális készülékek ára gyakran elérheti a konzumeszközök árának többszörösét is. A 6. ábrán bemutatok két professzionális készüléket [10] [15].



6. ábra : Crown CE sorozat (max. 2400W !) és az Alesis RA500 stúdióvégfok

A fenti berendezések kivétel nélkül **analóg technikára** épültek. Manapság azonban a **digitális eszközök** egyre nagyobb számban jelennek meg mind az otthoni felhasználásra szánt erősítők körében, mind a professzionális hangtechnikában.

Gyakori az úgynevezett D-osztályú végfokozati megoldás, ami azt jelenti, hogy az erősítőelemek az analóg technikától teljesen eltérően kapcsolóüzemben működnek. Előnyük a kis méret ellenére óriási kimenő teljesítmény és rendkívül kis hőtermelés.

Emiatt az **ilyen készülékek hatásfoka elérheti a 95%-ot is**. Ezt analóg technikával lehetetlen teljesíteni. A hangminőséget illetően megoszlanak a vélemények. Vannak, akik dicsérik, de vannak olyanok is, akik számára túl „mesterséges” ez a hangzásvilág [14]. Ennek ellenére jóval több az előnye ennek megoldásnak, és ezt a népszerűsége is bizonyítja, hiszen egyre több fogy az ilyen készülékekből.

A 7. ábra szemléltet egy D-osztályú házi-mozi erősítőt, valamint egy professzionális végfokot [9] [11]:



7. ábra: Panasonic SA-XR70 és a PKN Controls XE-2500 D-osztályú erősítő

Látható, hogy a hagyományos erősítőkhöz képest sokkal kisebb méretben lehet előállítani a D-osztályú készülékeket, mindamellett a teljesítményük többszöröse is lehet az analóg eszközökének. A mai világban ez nagyon lényeges vásárlási szempont, és emiatt sokan döntenek az ilyen berendezés vásárlása mellett. Az egy másik kérdés, hogy vajon tetszik-e nekünk a készülékek hangja. Meg kell hallgatnunk sok készüléket, és előbb vagy utóbb el fogjuk tudni dönteni, hogy maradunk-e az analóg technikánál, vagy áttérünk a modern digitális típusra. Választási lehetőség bőven van, gyakorlatilag csak a pénztárcánk szab határt az igényeinknek.

Megállapíthatjuk, hogy a hangerősítők legnépszerűbb felhasználási területe a szórakoztatóipar.

Ezen kívül azonban létezik más felhasználás is. Ilyen például a teremakusztikai mérés technika. Itt általában úgynevezett gömbsugárzókat használnak (lásd: következő fejezet), aminek meghajtását szinten erősítő berendezéssel kell biztosítani.

Diplomamunkám célja az volt, hogy egy gömbsugárzóhoz tervezzek és építsek hangfrekvenciás erősítőt, ezért a következő fejezetben röviden bemutatom ezt a hangsugárzó fajtát.

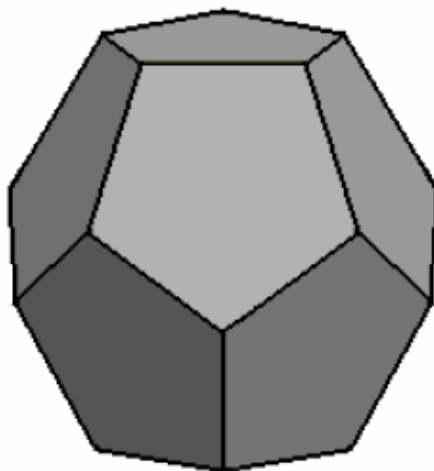
2. 3. A gömbsugárzó

Ezt a fajta hangsugárzót teremakusztikai mérések során használják. Egy terem tervezésénél (pl.: moziban, színházban) sok paramétert figyelembe kell venni ahhoz, hogy a kívánt hangzást elérjük, és a terem hangszigetelését is biztosítsuk.

A mérések során a legfontosabb meghatározandó paraméter az úgynevezett **utóhangidő**. Ez az időtartam, ami alatt az adott, kezdeti hangnyomás szint 60 dB értéket esik. Ez a mennyiség nagy, ha sok a reflexió a teremben (pl.: olyan helyiségekben, ahol sok a sík falfelület), illetve kicsi, ha kevés a reflexió, tehát a keletkező hanghullámok gyorsan elnyelődnek (pl.: olyan termek esetén fordul elő, ahol sok szabálytalan felület van [bútorok, függönyök, stb.]) [16].

Az utóhangidőt a leggyakrabban méréssel szokták meghatározni. Ennek megfelelő elvégzéséhez arra van szükség, hogy a termet az adott hangnyomású hanggal besugározzuk, lehetőleg minden irányban egyenletesen. Ilyen méréseknél van szükség az úgynevezett gömbsugárzóra, amely pontforrásként sugározza be a termet. Elméletileg ennek szabályos gömb alakúnak kellene lennie, és a gömbfelületnek végtelen sok pontszerű hangforrással kellene rendelkeznie. Nyilvánvaló, hogy a gyakorlatban ez nem valósítható meg, csak a mértani formától függően többé-kevésbe megközelíthető.

A Széchenyi Egyetem audio kutató laboratóriuma által használt sugárzó felépítése úgynevezett dodekaéder, amely a 8. ábrán látható [3]:



8. ábra: A dodekaéder

A sugárzó minden egyes oldallapján egy-egy szélessávú hangszóró helyezkedik el. Esetünkben ezek a Monacor cég MSH-115 típusú hangsugárzói, amelyekkel a dobozba szerelés után az elért átviteli sáv szélesség 140 Hz-től 10 kHz-ig terjed.

Látható, hogy a doboz nem hifi célokra készült, de ha belegondolunk, hogy egyféle hangszóróval érték el ezt a frekvenciatartományt, akkor dícséretre méltóak az adatok. Nem is beszélve arról, hogy e frekvenciatartományon belül az átviteli görbe ingadozása ± 1 dB-en belül van.

A felhasznált hangszóró képét a 9. ábra mutatja:



9. ábra: Monacor MSH-115

Összeszerelés után a hangdoboz az alábbi mért paraméterekkel rendelkezik [3]:

- *Belső térfogat : nettó 28 liter*
- *Impedancia : 6,74 Ω*
- *$P_{max} = 41$ Watt villamos teljesítmény*
- *$B = 140$ Hz...10 kHz (-3 dB)*
- *$SPL_{max} = 127$ dB*
- *$S = 98,96$ dB (@1 W, 1 m)*

Látható, hogy némely paraméterében a gömbsugárzó kiemelkedőnek is nevezhető. Ilyen például az érzékenysége (S), amely 98,96 dB hangnyomást jelent 1 W ráadott villamos teljesítmény esetén, a hangsugárzótól 1 m távolságban. Hasonló értékekkel rendelkeznek a professzionális hangosításra tervezett hangdobozok, ami jó minőségű hangsugárzóra utal. Mérési célokra tökéletesen megfelel, és a kivitelezés sem hagy kívánnivalót maga után:



10. ábra: A kész gömbsugárzó

3. A gyakorlati feladat bemutatása

Az előző fejezetben láthattuk a gömbsugárzó felépítését, és műszaki paramétereit. Egy hangdoboz azonban semmit sem ér megfelelő meghajtó erősítő nélkül.

Diplomamunkám célja volt, hogy e sugárzó számára megfelelő hangfrekvenciás erősítőt tervezek és építsek. Követelmény volt, hogy viszonylag nagy kimeneti teljesítménnyel rendelkezzen a konstrukció, azonban a doboz maximális villamos teljesítményét ne haladja meg. Ezen kívül biztosítanom kellett e teljesítménytartományon belül a kiváló és torzításmentes hangzást a teljes átviteli frekvenciatartományban. A sugárzó paramétereit ismerve megterveztem és megépítettem a kapcsolást, melyet a következő fejezetekben részletesen ismertetek.

3. 1. A megépítés munkafázisai

3. 1. 1. A tervezés

Egy hangerősítő áramkör tervezésénél az első és legfontosabb feladat, hogy tisztázzuk, melyek azok a követelmények, amelyeket a tervezett kapcsolásnak teljesítenie kell. A gömbsugárzó műszaki adatait ismerve meghatároztam az erősítő néhány alapvető paraméterét.

Tudjuk, hogy a sugárzó maximális villamos teljesítménye 40 W körül van. Célszerű ezért egy olyan erősítőt tervezni, amely e teljesítménynél többet nem képes leadni csatornánként (csak nagy torzítás árán). Így biztosítható az üzembiztonság, és egy esetleges túlvezérlés esetén sem mennek tönkre a drága hangszórók. Ezen kívül ismert a terhelő impedancia is, amely esetünkben $6,74 \Omega$ (amit a számítások során 6Ω -nak tekintettem). Ezekből egy egyszerű képlettel az alábbiak szerint kiszámítható az erősítő maximális kimeneti effektív feszültsége (szinuszos jelet feltételezve):

$$U_{eff} = \sqrt{P_{max} * R_{terh}} = \sqrt{40W * 6\Omega} \approx 15,5 V$$

Látható, hogy az áramkörnek 15,5 V-os kimeneti feszültséget kell szolgáltatnia, amelynek csúcserőke kb. 22 V. Szinuszos vezérlés esetén maximálisan ekkora jelamplitúdóra kell számítanunk. Ebből következik, hogy az erősítő tápfeszültségének e határérték felett kell lennie, hogy biztosítható legyen a jellevágás nélküli kimeneti amplitúdó. Elméletileg pontosan ekkora tápfeszültség is elég lenne, de ez fizikailag kivitelezhetetlen. Megjegyzendő, hogy ugyan léteznek ún. rail-to-rail áramkörök [2], amelyek a

tápfeszültséghatárokig kivezérelhetők, de hangerősítőknél ez általában nem megvalósítható. A tranzistorok ugyanis teljesen nyitott állapotban sem tökéletes vezetők, azaz a kollektoruk és az emitterük között nem nulla az ellenállás, tehát feszültség esik rajtuk.

Ez az ún. **maradékfeszültség** vagy idegen szóval **szaturációs feszültség**. Nyilvánvalóan a félvezetőgyártók töreksenek arra, hogy ez minél alacsonyabb legyen, de a nullát sajnos nem lehet elérni, bár térvezérlésű tranzisztorokkal nagyon jól meg lehet közelíteni. Mindezek következtében a tápfeszültséget magasabbra kell választani a maximális amplitúdónál, mégpedig legalább annyival, amennyi teljes kivezérlés esetén a kimeneti tranzisztorok szaturációja.

Tápfeszültségként éppen ezért 30 V-ot választottam, ami eleget tesz a kritériumnak. Itt számolni kell azonban azzal a ténnyel, hogy a jel negatív irányban is ekkora amplitúdóval rendelkezik, tehát a tápfeszültségnek kétszer ekkorának kell lennie, ami 60 V lesz. A konkrét kapcsolásban ez a földpontra nézve szimmetrikus elrendezésű, tehát ± 30 V értékű.

Az áramkör tesztelése és beállítása során ezt egy stabil feszültséget előállító **labortápegységgel** biztosítottam, amit a 11. ábra mutat.



11. ábra: Labortápegység ± 30 V-ra

A tápegység előnyös tulajdonsága, hogy beépített áramkorláttal rendelkezik, amely igény szerint állítható egészen 2 A-ig. A bemérés során ez nagyon hasznos, mert így az esetleges zárlat vagy egyéb hiba miatt nem lép fel a tápáram „megszaladása”, és nem fog az áramkör erősítés helyett füstjeleket adni. Nem is beszélve arról, hogy ez költség szempontjából is kedvezőbb.

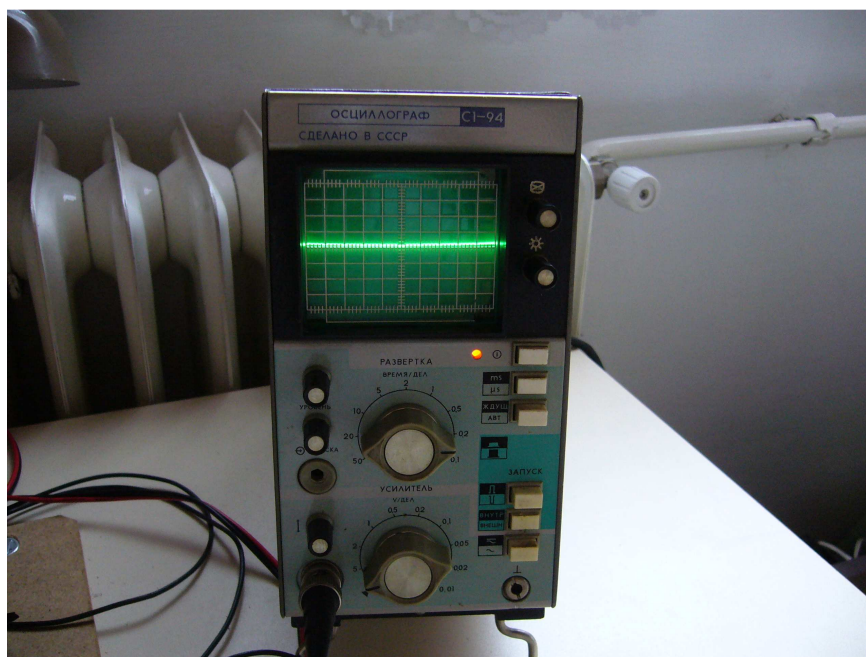
A házi teszteléshez rendelkezésemre állt ezen kívül egy **hangfrekvenciás funkciógenerátor**, ami a 12. ábrán látható.

Ennek jellegzetessége, hogy a hangfrekvenciás tartományon belül különféle alakú jeleket képes előállítani (ilyenek például: szinusz, négyszög, háromszög). Erősítő áramkörök dinamikus vizsgálatánál ez elengedhetetlen.

A generátor semmit sem ér azonban, ha nincs valamilyen műszerünk, amivel az áramkör kimeneti jelét indikálni tudjuk, tehát szükség volt egy oszcilloszkópra is (13. ábra). Az oszcilloszkóp 10 MHz felső határfrekvenciájú, orosz gyártmányú, tehát hangfrekvenciás mérésekhez tökéletesen megfelel.



12. ábra: Funkciógenerátor (EMG gyártmány)



13. ábra: 10 MHz-es egysugaras, egysatornás oszcilloszkóp

E kis kitérő után térjünk vissza a kapcsolás megtervezéséhez.

A tápfeszültség- és teljesítményadatok ismeretében ki kellett választanom a megfelelő **félvezetőket**. A választásnál nagyon fontos, hogy nem szabad az alkatrészeket a határadataik közelében üzemeltetni, mert egyrészt ott már nem biztos, hogy a specifikációban megadott jellemzőkkel bírnak, másrészt az élettartamuk is jelentősen csökkeni fog. Biztonsági okokból fontosnak tartok bizonyos mértékű túlméretezést, ezért ezt szem előtt tartva lapoztam fel az alkatrész-katalógusokat.

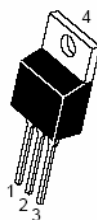
Az erősítőhöz az alábbi eszközöket választottam ki.

Végtranzisztorok:

Véleményem szerint ezek az eszközök képezik a legfontosabb részét az hangerősítőnek, ugyanis ezek vannak közvetlen kapcsolatban a hangsugárzókkal. Ezért a kitűnő minőségű félvezetők kiválasztása alapfeltétel a jó hangzás biztosításához. Hosszas utánajárás és keresgélés után rátaláltam egy számomra legmegfelelőbb típusra, amely az **MJE 15032** típusú eszköz (ld.: 14. ábra). Ezeket a félvezetőket több gyártó is gyártja, de állítólag a legjobb paraméterekkel a Motorola gyártmányok rendelkeznek. Sajnos ilyeneket nem sikerült beszerezni, helyette a hasonló tulajdonságú Onsemi gyártmányokhoz jutottam hozzá.

Legfontosabb adatai [7]:

- maximális kollektor-emitter feszültség: 250 VDC
- maximális kollektoráram: 8 A (folyamatos), 16 A (csúcs)
- maximális teljesítmény-disszipáció (25 °C-os tokhőm. esetén): 50 W
- maximális teljesítmény-disszipáció (25 °C-os környezeti hőm. esetén): 2 W
- áramerősítési tényező ($I_C = 1 \text{ A}$, $V_{CE} = 5 \text{ V}$): min. 50
- tranzit frekvencia (f_T) = 30 MHz
- tokozás: TO-220
- lábkiosztás: 1-bázis; 2-kollektor; 3-emitter



14. ábra: MJE 15032

Az adatok alapján elmondható, hogy ez az eszköz megfelelő hűtéssel ellátva jól működhet a kapcsolásban végtranzisztorként. Az internetes hifi fórumokon nagyon dicsérték a hangminőséget illetően [14]. Többek között emiatt választottam ezt az eszközt a teljesítmény felerősítésére.

Meghajtó tranzisztorok:

Az elméleti részben látható volt, hogy a bipoláris tranzisztor áramvezérelt eszköz, tehát a vezérléséhez a megelőző fokozatnak biztosítania kell a megfelelő meghajtóáramot. Ez kisjelű fokozatokban nem okoz gondot, mert ott a vezérlőáram is kis értékű (kb. néhány 100 μA). Így a következő tranzisztor nem fogja jelentős mértékben leterhelni az előtte lévő fokozatot. A végfokozatokban azonban ez nem teljesül, mert a kis értékű áramerősítési tényező miatt a kívánt nagy kollektoráram előállításához viszonylag nagy bázisáram szükséges. Ez az áram 10-100 mA nagyságrendű is lehet. Mindezekből következik, hogy a teljesítmény eszközöket közvetlenül nem kapcsolhatjuk a feszültségerősítő fokozat kimenetére, mert azok jelentős terhelést okoznának. A korlátozott kimenő áram miatt a torzítás is rendkívüli módon megnőne, valamint a kivezérelhetőség drasztikusan lecsökkenne [5]. E probléma megoldására használják az ún. meghajtó tranzisztorokat. Ezeknél követelmény, hogy a végtranzisztorokhoz képest nagyobb áramerősítési tényezővel rendelkezzenek, és néhány W teljesítményt képesek legyenek disszipálni. Ebből következik, hogy kisjelű eszközök erre a célra nem felelnek meg.

A gyakorlatban közepes teljesítményű félvezetőket szoktak e célra felhasználni. Ezért a tervezett erősítőben **BD 139** (npn), illetve **BD 140**-es (pnp) típusokat használtam (ld.: 15. ábra).

A két eszköz adataikat tekintve teljesen megegyezik, csak a polaritásuk különböző, azaz ezek a tranzisztorok egymás kiegészítő tranzisztorai (komplementer tranzisztorpárok).

Legfontosabb adataik [7]:

- maximális kollektor-emitter feszültség: 80 VDC
- maximális kollektoráram: 1,5 A (folyamatos), 3 A (csúcs)
- maximális teljesítmény-disszipáció(25°C-os tokhőm. esetén): 12,5 W
- maximális teljesítmény-disszipáció(25°C-os környezeti hőm. esetén): 1,25 W
- áramerősítési tényező ($I_C = 5 \text{ mA}$, $V_{CE} = 2 \text{ V}$): 25-250
- tranzit frekvencia (f_T) = 100MHz
- tokozás: TO-18
- lábkiosztás balról jobbra: 1-emitter; 2-kollektor; 3-bázis



15. ábra: BD 139/140

Ezt a tranzisztort nagyon könnyű beszerezni, és az ára is kedvező. A katalógusadatai alapján pedig elmondható, hogy célszerű meghajtó tranzisztorként alkalmazni.

Kisjelű tranzisztorok:

A kapcsolatban alkalmazott többi eszköz kivétel nélkül un. kisjelű tranzisztor. Közös jellemzőjük, hogy csak kis teljesítmény leadására képesek, amiből következik, hogy csak az elő-, illetve feszültségerősítő fokozatokban alkalmazzák őket. Itt a legfontosabb követelmény, hogy minél nagyobb áramerősítési tényezővel rendelkezzenek azért, hogy az egyes fokozatokon belül a lehető legnagyobb erősítést érjük el.

A gyakorlatban számos ilyen eszköz áll rendelkezésre, amit az adott feladatnak megfelelően könnyű kiválasztani a katalógusadatok alapján. Az általam tervezett erősítőben **BC 546B** (nnp) illetve **BC 556B** (pnp) típusokat használtam a bemeneti fokozatban (ld.: 16. ábra). Ezek kisjelű hangfrekvenciás tranzisztorok és egymás komplementerei.

Legfontosabb katalógusadataik [7]:

- maximális kollektor-emitter feszültség: 65 VDC
- maximális kollektoráram: 100 mA (folyamatos), 200 mA (csúcs)
- maximális teljesítmény-disszipáció(25°C-os körny.-i hőm. esetén): 500 mW
- áramerősítési tényező ($I_C = 2 \text{ mA}$, $V_{CE} = 5 \text{ V}$): 200-450
- tranzit frekvencia (f_T) = 100 MHz
- tokozás: TO-92
- lábkiosztás: 1-kollektor; 2-bázis; 3-emitter



16. ábra: BC 546B/556B

A kapcsolatban használt egyéb kisjelű félvezetők:

A fent említett tranzisztorokon kívül van még néhány eszköz, amit felhasználtam a tervezés során. A legfontosabb ezek közül a feszültségerősítő fokozatban alkalmazott **kisjelű MOS-FET** tranzisztor. Ez az alkatrész sok szempontból kitűnő tulajdonságokkal rendelkezik. A legfontosabb, hogy a vezérléséhez nem kell áram, azaz az előző fokozatot nem terheli le (ld.: a konkrét kapcsolat elemzése). Ezen kívül magas a felső határfrekvenciája, így jellemző a gyors működés (nagyon jó tranziens átvitel). Az eszköz típusa: **VN2010L** (ld.: 17. ábra).

Legfontosabb katalógusadatai [7]:

- maximális drain-source feszültség: 200 VDC
- maximális draináram: 200 mA (folyamatos), 800 mA (csúcs)
- maximális teljesítmény-disszipáció (25°C-os körny.-i hőm. esetén): 800 mW
- minimális drain-source ellenállás ($r_{DS(on)}$; $V_{GS}=4,5$ V; $I_D=0,05$ A): 6-10 Ω
- bemeneti kapacitás ($V_{DS}=25$ V; $V_{GS}=0$ V): 35-60 pF
- kimeneti kapacitás ($V_{DS}=25$ V; $V_{GS}=0$ V): 9-30 pF
- tokozás: TO-92
- lábkiosztás: 1-source; 2-gate; 3-drain



17. ábra: VN 2010L

A fentiekén kívül még két **félvezetőeszközt** említenék meg, melyeket a kapcsolásban konstans áramú áramforrásként, illetve aktív terhelésként használtam fel (ld.: 18. és 19. ábrák):

- n-csatornás J-FET: **BF 245A**
- pnp bipoláris tranzisztor: **BC 303**

A **BF 245A** típusú J-FET fontosabb katalógusadatai [7]:

- maximális drain-source feszültség: 30 VDC
- maximális draináram: 25 mA (folyamatos)
- maximális teljesítmény-disszipáció (25°C-os körny.-i hőm. esetén): 300 mW
- csatornaáram $V_{GS}=0$ V esetén (I_{DSS}): 2-6,5 mA
- bemeneti kapacitás ($V_{DS}=20$ V; $V_{GS}=-1$ V): 4 pF
- kimeneti kapacitás ($V_{DS}=20$ V; $V_{GS}=-1$ V): 1,6 pF
- tokozás: TO-92
- lábkiosztás: 1-gate; 2-source; 3-drain



18. ábra: BF 245A

A **BC 303** típusú pnp bipoláris tranzisztor fontosabb katalógusadatai [7]:

maximális kollektor-emitter feszültség: -60 VDC

- maximális kollektoráram: -1 A
- maximális teljesítmény-disszipáció(25°C-os körny.-i hőm. esetén): 850 mW
- áramerősítési tényező ($I_C = -150$ mA, $V_{CE} = -10$ V): 40-240
- tranzit frekvencia (f_T) = 100 MHz
- tokozás: TO-39
- láb kiosztás balról jobbra: kollektor; bázis; emitter



19. ábra: BC 303

A fenti eszközök adataiból látszik, hogy szinte valamennyit a hangfrekvenciás tartomány erősítésére fejlesztették ki őket. Kivétel ezek közül a **VN2010L** típusú MOS-FET, amely bár kapcsolási feladatokra készült, mégis felhasználható audio célokra is a hangminőség romlása nélkül. Sőt azt tapasztaltam, hogy az alkatrész használata javított az áramkör hangján.

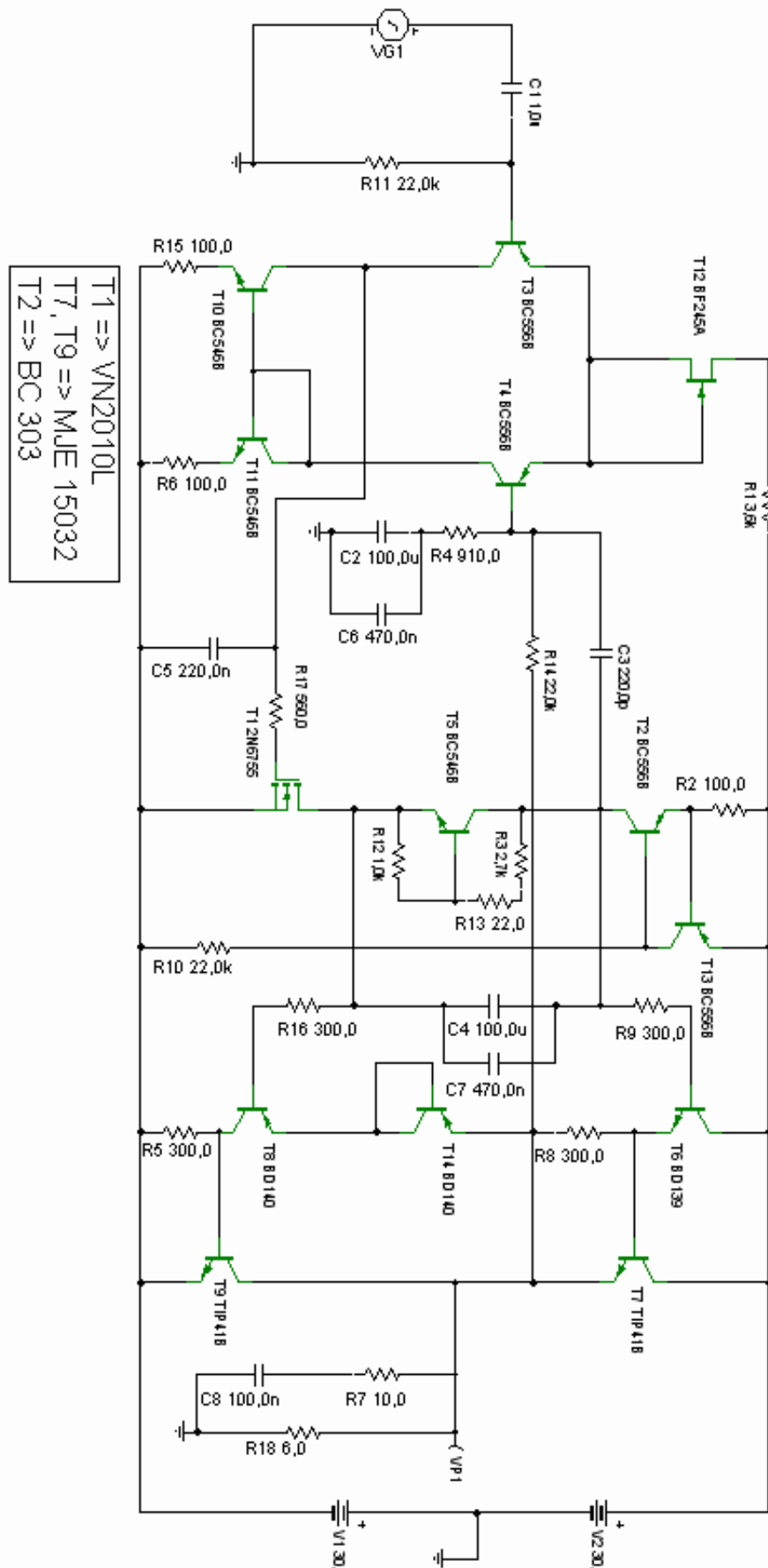
A konkrét kapcsolás elemzése

A fejezet következő részében térjünk rá a konkrét kapcsolás elemzésére és működési leírására. A jel útját végigkövetve bemutatom az egyes alkatrészek szerepét, valamint a jelre gyakorolt hatását az esetleges hibalehetőségek, illetve hiányosságok figyelembevételével. Ezen kívül kiemelem a hangzás szempontjából legfontosabb részegységeket.

A teljes kapcsolási rajz a 20. ábrán látható.

Az ábra első ránézésre bonyolultnak tűnhet, de a jel útját figyelmesen végigkövetve kiderül, hogy a felépítés viszonylag egyszerű.

A VG1 jelű generátor vonalszintű jelét a T3-as tranzisztor fogadja a bázisán a C1-es kondenzátoron keresztül. A bázispontra kapcsolódik még az R11-es 22 kOhm-os ellenállás, amely az erősítő bemeneti ellenállását reprezentálja (jó közelítéssel).



20. ábra: Az erősítő egy csatornájának kapcsolási rajza

A C1 és R11 által megvalósított felüláteresztő szűrő fogja nagyrészt meghatározni a teljes erősítőlánc alsó határfrekvenciáját. Ez a frekvencia az alábbi képlet segítségével számolható ki:

$$f_a = 1 / (2\pi \cdot R_{be} \cdot C_{be})$$

A rajzon látható adatokat behelyettesítve ez kb. 7,2 Hz-re adódik, amely bőven alatta van a 20 Hz-es legkisebb hallható frekvenciának, tehát ebből a szempontból rendben van az áramkör.

A bemenő jelet a T3 és T4 tranzisztorokból álló un. differenciálerősítő áramkör fogadja (angolul: long-tailed pair). Ez rendkívül elterjedt megoldás a modern hangtechnikai áramkörök bemeneti fokozatai között, mert megfelelő beállítás mellett nagyon lineáris működésű. Segítségével a teljes erősítő áramkör kimeneti pontja közel 0 V-ra fog beállni automatikusan (szimmetrikus tápfeszültséget használva). A fokozat munkaponti áramát (tehát azt az áramot, amely vezérlés nélkül folyik a félvezetőkön) a T12-es J-FET állítja be. Ez egy un. konstans áramú áramgenerátor, mert a gate és source kivezetése össze van kötve. Így a FET adatlapján található I_{DSS} áram fog folyni az eszközön. Esetünkben ez kb. 4 mA. Az R1-es ellenállás azt a célt szolgálja, hogy a FET drain feszültségét kb. 15 V-ra állítsa be. Az eszköz karakterisztikájából látható, hogy ilyen előfeszítés mellett rendkívül stabil ez az áram, ami az alkatrészen folyik. Ez azt jelenti, hogy az átfolyó áram nagymértékben független a drain-source feszültségtől (bizonyos határokon belül). Ez azért előnyös, mert így a bemeneti fokozat bizonyos mértékben érzéketlen lesz a tápfeszültség ingadozásaira. Például túlvezérlés esetén néhány V-os ingadozás a tápfeszültségben gyakorlatilag semmilyen hatással nem lesz a bemeneti fokozat munkapontjára, így az ebből eredő torzítás elkerülhető.

A FET árama a T3 és T4 közös emitterpontján kettéoszlik, és a differenciálerősítő két tranzisztorra 2-2 mA-es árammal fog működni. A T10, T11 képezik a differenciálerősítő munkaellenállását, amely jelen esetben un. áramtükrös aktív terhelés.

E kapcsolási megoldás előnye, hogy a tranzisztorok aktív terhelésként rendkívül nagy dinamikus ellenállást képviselnek, azaz váltóáramú jelekre nézve nagy munkaellenállás jelenik meg terhelésként. Ennek hatására növekszik a fokozaterősítés. Másik nagy előny, hogy a negatív tápágból érkező esetleges brummot vagy zajt e két eszköz jelentősen elnyomja. Ez igaz a T12-es FET-re is, csak ott a pozitív ágból jövő zavarokat szűri az eszköz. Mindezek miatt a kapcsolat bemeneti fokozata kis zajjal és viszonylag nagy fokozaterősítéssel fog rendelkezni. Az R15, R6 ellenállások biztosítják a differenciálerősítő két ágának minél nagyobb szimmetriáját. Ugyanis két diszkrét kivitelű tranzisztor sohasem lehet teljesen azonos, és ezért óhatatlanul fellép bizonyos asszimmetria a fokozaton belül. Ezt lehetőleg el kell kerülni, mert csak úgy biztosítható az alacsony torzítású működés.

Mivel T10 és T11 együtt áramtüköröt alkotnak, ezért a rajtuk átfolyó váltakozó áramnak azonosnak kell lennie. Tegyük fel, hogy T3 a vezérlés hatására nyit, azaz árama növekszik. Ez az áram csak úgy tud megnőni, ha T4 árama csökken (a teljes fokozat áram konstans 4 mA), azonban ez a csökkenés a T10, T11 által megvalósított áramtükör miatt megjelenik a T3-as tranzisztor áramában is. Mindezekből elmondható, hogy a differenciál erősítő kimeneti pontján (T3 kollektorán) kétszeres áramváltozás fog megjelenni, tehát a fokozaterősítés tovább növekszik ennek hatására. Ezt ún. **fázisösszegzésnek** nevezzük [2].

A fentiekből látszik, hogy a T10 és T11 tranzisztoroknak rendkívül nagy szerepük van a fokozaterősítés és a kis zaj biztosításában. Ezeket az alkatrészeket lehetne ellenállással is helyettesíteni, de azzal nagyon leromlana a fokozat teljesítőképessége, így véleményem szerint e két eszköz semmiképpen sem hagyható el.

A szimmetrikus működés biztosításához elengedhetetlen a differenciálerősítő tranzisztorainak összeválogatása, azok a lehető legjobban hasonlítsanak egymásra [6]. E szempontot figyelembe vettem az építés során. Bár megjegyzem, hogy műszerezettség hiányában csak az áramerősítési tényező alapján tudtam válogatni az eszközöket.

A T4 tranzisztor valósítja meg a teljes erősítőláncre kiterjedő negatív visszacsatolást.

A differenciálerősítő kimeneti pontja a T3 és T10 közös kollektorpontja. Látható, hogy erre a pontra közvetlenül kapcsolódik a T1-es főerősítő, vagy más néven feszültségerősítő tranzisztor. Ez az eszköz egy n-csatornás, növekményes MOS-FET, melynek típusa VN2010L. Legnagyobb előnye, hogy vezérléséhez csak feszültség szükséges, azaz a gate kivezetésén áram nem folyik. Ez azt eredményezi, hogy nem terheli le az előtte lévő differenciálerősítő fokozatot, így az ebből eredő erősítés-csökkenés elkerülhető.

Jogosan vetődik fel a kérdés, hogy valóban lehet-e a bemeneti fokozat és a főerősítő között DC-csatolást használni. Ugyanis ennek hatására a T10 kollektora csak néhány V értékkel lesz magasabb potenciálon, mint a negatív tápfeszültség. Ez a kivezérelhetőség szempontjából előnytelen, azonban mégis használható a megoldás. A főerősítő nagy fokozaterősítése miatt a T1 vezérléséhez elegendő néhányszor 10, esetleg 100 mV nagyságrendű vezérlőjel ahhoz, hogy elérjük a kívánt feszültségerősítést (esetünkben ez kb. 26 dB).

Mindezek hatására a T10 kollektorán lévő hangfrekvenciás jel amplitúdója a fent említett értékeket veszi fel, tehát nem keletkezik torzítás a jellevágás miatt ebben a fokozatban.

Ezen kívül előnyként említeném meg, hogy ilyen kis amplitúdójú vezérlés miatt (nagy fokozaterősítés) a főerősítő fokozat linearitása is nagymértékben javul, mert az eszköz (T1) bemeneti karakterisztikájának csak egy nagyon kis

szakaszát használjuk ki a vezérlés szempontjából. Így bőven a lineáris tartományon belül marad a munkapont.

A MOS-FET-ek jellemző tulajdonsága, hogy a kitűnő nagyfrekvenciás viselkedés miatt könnyen oszcillációba kezdhetnek ezeken a frekvenciákon.

Ez ezért alakulhat ki, mert a szórt kapacitások és induktivitások rezgőköröket hozhatnak létre, melyek rezonanciafrekvenciája ebbe a magasabb frekvenciatartományba esik, és beindul az oszcilláció. Ezt mindenképp meg kell akadályozni a hangfrekvenciás áramkörökben. Ennek egy egyszerű gyakorlati módja, hogy valamilyen módon korlátozzuk a FET átvitelét, azaz egy alacsonyabb felső határfrekvenciát állítunk be [5].

A gyakorlatban ez úgy valósítható meg, hogy az eszközre egy adott frekvenciánál magasabb frekvenciájú komponensek jutását megakadályozzuk, azaz beiktatunk a bemeneti körébe egy aluláteresztő szűrőt. A kapcsolási rajzon ezt az R17 560 Ohm ellenállás, valamint vele sorban a FET bemeneti kapacitása hozza létre. Az R17 ellenállás az ún. felakadásgátló ellenállás, amely FET-et alkalmazó hangerősítőkben nélkülözhetetlen. A tervezésnél fontos szempont, hogy ez az alkatrész a lehető legközelebb helyezkedjen el a FET gate kivezetéséhez. Különösen igaz ez a teljesítmény MOS-FET-eket használó végfokozatokra.

A főerősítő bemeneti körében található még egy alkatrész, ez pedig a C5-ös kondenzátor. Ez az alkatrész és a C3-as kondenzátor állítják be a teljes erősítőrendszer nagyfrekvenciás stabilitását, azaz az átvitelt úgy módosítják, hogy egy domináns nagyfrekvenciás töréspontja legyen az áramkörnek, és -20 dB/dekád meredekséggel metssze a 0 dB-s tengelyt a függvény. Ilyen feltételek mellett az áramkör stabil marad még reaktív terhelésekre nézve is.

Térjünk rá a főerősítő kimeneti körére. Látható, hogy a kimenő jelet a T1 drain kivezetéséről vesszük le, a bemenete pedig a gate, tehát a kapcsolás földelt source-ú beállításban működik. A FET a T2, T13, R2, R10 alkatrészekből álló aktív terhelésre dolgozik. E kapcsolat előnye, hogy a T2 tranzisztoron átfolyó áram (ami egyben a főerősítő munkaponti árama is) gyakorlatilag csak az R2 értékétől, valamint a T13 bázis-emitter nyitófeszültségétől függ. Ebből adódóan T2 helyére szinte bármilyen megfelelő határértékekkel rendelkező pnp tranzisztor beépíthető.

Az R2 ellenálláson átfolyó áramot az alábbiak szerint lehet meghatározni:

$$I_{R2} = U_{BE(T13)} / R_2$$

A konkrét áramkörben ez kb. 6 mA ($U_{BE(T13)} = 0,6$ V). Ez az áram nagyon stabil, és a tápfeszültségtől gyakorlatilag független. A torzításmentes működés biztosításához elengedhetetlen, hogy ez az áram rendkívül stabil maradjon a kivezérlési tartományban.

A fenti előnyökön kívül itt is jelentkezik az aktív terhelés azon jó tulajdonsága, hogy növeli a fokozaterősítést, és a tápfeszültség felől érkező zajokat, zavarokat szűri a nagy dinamikus impedanciája miatt.

A 20. ábrán látható, hogy a főerősítő kollektorkörében beépítésre került még egy hálózat, mégpedig a T5, R3, R13, R12 alkatrészekből álló komplexum. Ez a hálózat hozza létre a végtranzisztorok számára az AB-osztályú működéshez szükséges előfeszültséget. Ez a feszültség nagyon stabil, melyet az ellenállások értékének megfelelő megválasztásával állíthatunk be az alábbi módon:

- ha növelni szeretnénk az előfeszültséget, akkor vagy az R3, R13 ellenállások értékét növeljük, vagy az R1 értékét csökkentjük
- ha csökkenteni szeretnénk az előfeszültséget, akkor vagy az R3, R13 ellenállások értékét csökkentjük, vagy az R1 értékét növeljük

A legtöbb kapcsolásban általában R3 vagy R13 helyére egy trimmer-potenciométert szoktak beépíteni, mellyel egyszerűen beállítható a megfelelő előfeszítés, és ezzel a végfokozat munkaponti árama (más néven alapárama). Ennek ellenére a kapcsolásban fix értékű ellenállásokat használtam, mert a potenciométerben az évek múlásával érintkezési hiba léphet fel, tehát bizonytalanná válhat a kontaktus, amely magával vonhatja a végfokozat munkapontjának elállítódását. Ez nem engedhető meg.

Fix értékű ellenállásokkal egy kicsit körülményesebb a beállítás, sőt a különböző végtranzisztorok miatt a sztereó erősítő két végfokozatában esetleg eltérő ellenállásokat kell használni az azonos munkapont beállításához. Ha azonban sikerül megtalálnunk a megfelelő értékű alkatrészeket, akkor az idő múlásával kevésbé változik a végfokozat alapárama. Véleményem szerint ez mindenképpen előny a munkapont stabilitását illetően.

Tovább követve a jel útját elérkezünk a kapcsolat utolsó és egyben legfontosabb harmadához, amely nem más, mint a végfokozat. Ezt a T6, T7, T8, T9, T14 tranzisztorok alkotják.

Szakdolgozatom elméleti részében már írtam arról, hogy a bipoláris tranzisztor áramvezérelt eszköz, tehát a vezérlése teljesítményt igényel, melyet az előző fokozat hoz létre. Ez a teljesítmény annál nagyobb, minél nagyobb a meghajtott tranzisztor kimeneti teljesítménye (illetve kollektorárama).

Itt említenék meg egy fontos paramétert, amelyet figyelembe kell venni a végfokozat tervezésekor. Ez a paraméter az áramerősítési tényező (β), amely megadja, hogy adott kollektoráram létrehozásához mekkora bázisáramra van szüksége a tranzisztornak.

Képlettel kifejezve:

$$\beta = I_C / I_B$$

ahol: I_C a kollektoráram
 I_B a bázisáram

Kisjelű fokozatokban nem okoz gondot a véges meghajtóáram, mert ott a felhasznált tranzisztorok áramerősítési tényezője nagy, akár több 100-szoros is lehet. A végfokozati eszközöknél azonban a meghajtást külön ún. meghajtó tranzisztorokkal kell biztosítani a megfelelő kivezérelhetőség és alacsony torzítás elérése érdekében.

A kapcsolásban ezt a T6, T8, T14 tranzisztorok által létrehozott meghajtó fokozat biztosítja. A T6 és T8 bázisára kapcsolódik egy-egy 300 Ohm felakadás gátló ellenállás, amelyek feladata hasonló, mint az R17-nek, azaz behatárolják a nagyfrekvenciás átvitelt, és így megszüntetik az esetleges gerjedést. A meghajtó tranzisztorok bázisait C4 köti össze váltakozó áramú szempontból, így minkét eszköz megkapja a hangfrekvenciás jelet. Szükség volt egy hidegítő kondenzátor beépítésére, ugyanis C4 viszonylag nagy veszteséggel és induktivitással rendelkezik, mivel az egy nagykapacitású elektrolitkondenzátor. A C7 jelű hidegítő kondenzátor csökkenti a fent említett veszteséget, illetve a káros induktivitást magasabb frekvenciákon.

Látható, hogy a T14 diódaaként bekötött tranzisztor nem vesz részt a jel erősítésében, azonban beépítése növeli a végfokozat szimmetriáját, tehát nem hagyható el.

Mielőtt rátérnék a végfokozat működésére, röviden tekintsük át a hangfrekvenciás végfokozatok fajtáit és az egyes beállítási osztályokat.

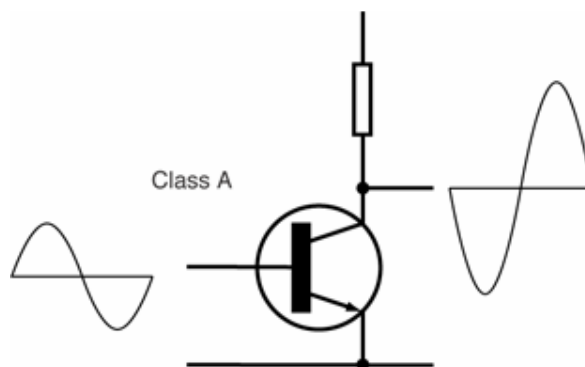
Beállítási osztályok

Az előzőekben már többször említettem, hogy nagyon fontos a végfokozat megfelelő munkaponti áramának beállítása, ugyanis ez fogja meghatározni, hogy a kapcsolás milyen beállítási osztályban üzemel.

Az analóg erősítéstechnikában négy legelterjedtebb beállítási osztály van, amelyek az A, AB, B, illetve C. Ezek közül az első kettőt használják hangerősítőkben, mert a B és C osztályú beállítás nem tesz lehetővé lineáris átvitelt. A C osztályt rádiófrekvenciás kapcsolásokban alkalmazzák.

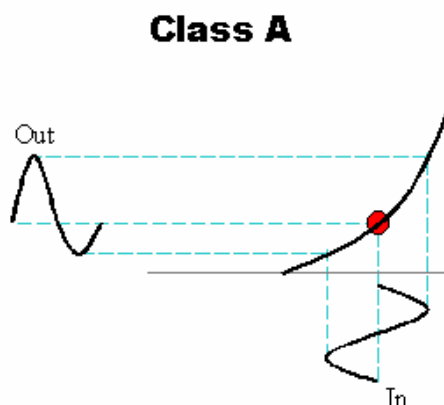
A osztályú beállítás

Ennek a beállításnak a lényege, hogy a kimeneti eszköz munkapontját úgy választjuk meg, hogy a jel mindkét félperiódusát erősítse. Ez látható a 20. ábrán. Így a végfokozat megvalósítható akár egyetlen tranzisztorral is (együtemű erősítőfokozat) [5].



20. ábra: A-osztályú együtemű erősítőfokozat [13]

A 21. ábrán láthatjuk az A osztályú beállítás munkapontját a bemeneti karakterisztikán, valamint a jelalakokat [12].



21. ábra: A-osztályú erősítőfokozat munkapontja

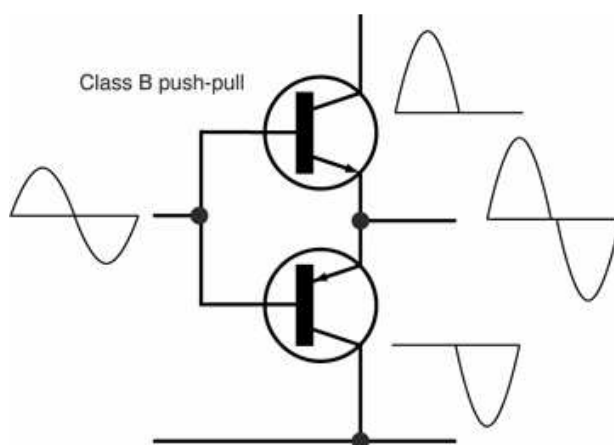
Az ábrán az is jól látható, hogy az eszköz a teljes jelet erősíti, azaz folyamatosan nyitva van. A kimeneti fokozat így nagyon egyszerű lesz, és az áramkör nagyon jó linearitással rendelkezik.

Nagy hátrány azonban, hogy hangszóró meghajtása esetén ezt a munkapontot csak úgy lehet biztosítani a végfokozatban, hogy a kimeneti eszközt rendkívül magas munkaponti árammal működtetjük. Akár több amper is lehet ennek értéke a kimenő teljesítménytől függően. Ez hűtési és elhelyezési problémákat vet fel. Hátrány még, hogy az A osztályú erősítők kimenő teljesítménye erősen korlátozott a munkapont beállításából adódóan, általában a 20 W értéket nem haladja meg. A hatásfok maximum 50 %.

Mindezek ellenére nagy linearitása miatt nagyon népszerű ez a megoldás az audiofil készülékek között.

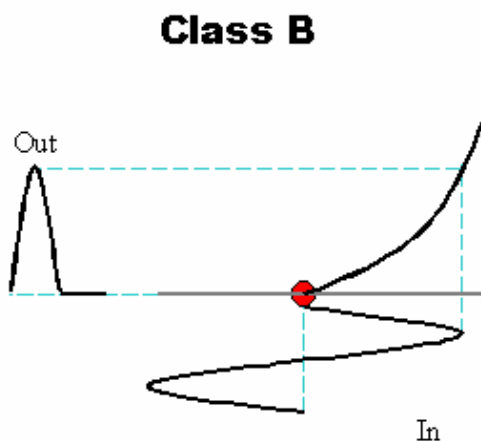
B osztályú beállítás

Ennél a megoldásnál a végtranzisztorok munkapontját úgy állítjuk be, hogy az egyik félvezetőelem csak a jel egyik félperiódusát erősítse. Ebből adódik, hogy a B osztályú végfokozathoz két kimeneti tranzisztorra van szükség. Mivel e két eszköz ellenkező polaritású vezérlést kap, ezt a végfokozatot ellenütemű (un. „push-pull”) fokozatnak nevezzük. Ilyen elrendezését látható a 22. ábra mutatja be [12].



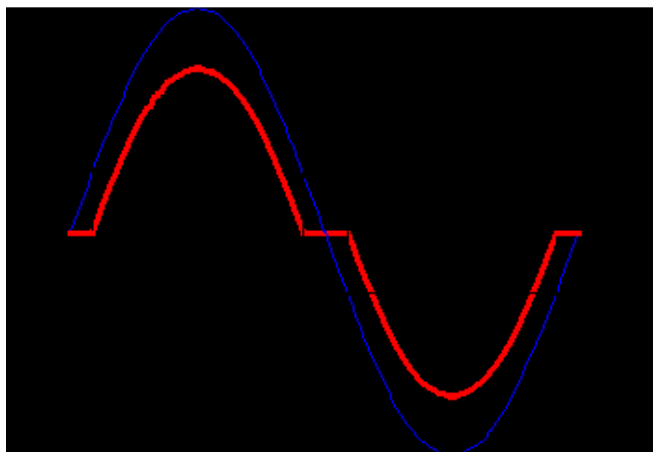
22. ábra: B-osztályú ellenütemű erősítőfokozat

A végfokozat munkapontjának elhelyezkedése a 23. ábrán látható.



23. ábra: B-osztályú ellenütemű erősítőfokozat munkapontja

Sajnos ilyen beállítás mellett a kimeneti tranzisztorok jelentős torzítást okoznak, mert a vezérléskor a nemlineáris tartományon is áthalad a munkapont. Ennek oka, hogy a két tranzisztor közül mindig csak az egyik van nyitva, és amíg az le nem zár, a másik nem tud nyitni. Ebből adódóan a munkapont mindenképpen áthalad egy nemlineáris szakaszon, ami létrehozza az un. keresztvezési torzítást („Crossover Distortion”). Ezt szemlélteti a 24. ábra.

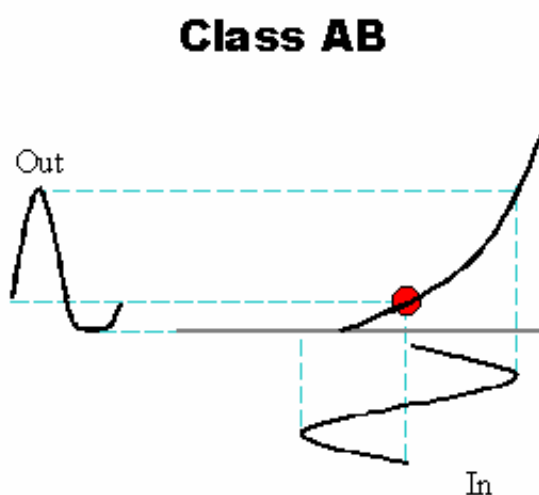


24. ábra: Keresztezési torzítás

Látható, hogy ez a végfokozati megoldás nem alkalmazható hangerősítőkben, mert ott követelmény a nagyfokú linearitás, és alacsony torzítás. Van azonban egy nagy előnye a B osztályú beállításnak, ez pedig a rendkívül jó hatásfok. Ez a gyakorlatban maximum 78 %.

AB osztályú beállítás

A fenti probléma megoldására született egy köztes beállítási osztály, amit AB osztálynak nevezünk. Ez felépítésre a B osztályhoz hasonló, azonban a végtranzisztorok közül egyik sincs teljesen lezárva vezérlés nélkül. Ez azt jelenti, hogy folyik rajtuk egy viszonylag kis értékű munkaponti áram, vagy más néven alapáram. A munkapont elhelyezkedése 25. ábrán látható [12].



25. ábra: AB osztályú munkapont elhelyezkedése

Ez a megoldás a leggyakrabban használt végfokozati elrendezés a hangerősítők között. Előnye a jó hatásfok, ami kb. 60 %. Ezen kívül további előnyös tulajdonsága, hogy a munkaponti áram megfelelő megválasztásával elérhető, a keresztezési torzítás a hallhatósági szint alatt tartása. A szükséges áramérték függ a végtranzisztorok típusától, hasonlóságától, illetve az alkalmazott hangsugárzó impedanciájától is. Általában elmondható, hogy 100 mA körüli alapáram esetén már biztosan nem keletkezik hallható keresztezési torzítás.

A végfokozat működése

A fentiek alapján elmondható, hogy a felépített erősítőben kvázikomplementer, ellenütemű, AB osztályú végfokozat található, melynek alapárama 100 és 150 mA között van (R3, R12, R13 ellenállások értékétől függően). A kvázikomplementer itt azt jelenti, hogy nem teljesen szimmetrikus a fokozat pozitív és negatív fele a kimeneti pontra nézve, tehát nem egymás kiegészítői (komplementerei). Ez látszólag bonyolultabb megoldás, mint ha valódi komplementer lenne, de van néhány előnye ennek az alkalmazásnak.

Az egyik ilyen jó tulajdonság, hogy a végtranzisztorok azonos típusúak, azaz esetünkben mindegyik npn eszköz. Ez jelentősen megkönnyíti a az építés során a félvezetők párba válogatását. Fontos azonban megjegyezni, hogy ez esetben a meghajtótranzisztorok (T6, T8, T14) párba válogatása is szükséges az alacsony torzítás biztosításához. T14 diódaaként bekötött tranzisztor a meghajtó fokozat szimmetriáját növeli. Elvileg ide megfelelő lenne egy dióda is, de fontos, hogy az eszköz nyitófeszültsége egyezzen meg a T8-as tranzisztor bázis-emitter nyitófeszültségével [6]. Ezt véleményem szerint úgy lehet a legegyszerűbben biztosítani, hogy egy ugyanolyan típusú tranzisztor bázis-emitter átmenetét használjuk fel diódaaként.

A fokozat működése rendkívül egyszerű: a jel pozitív félperiódusa nyitja a T6-os tranzisztort. Ennek emitterén a közös kollektoros beállítás miatt ugyanez a vezérlőjel jelenik meg, amely így vezérli a T7-es végtranzisztort. Ennek hatására áram indul meg a pozitív tápfeszültségű pont felől a terhelésen (R18) keresztül a föld felé. Így megjelenik a pozitív félperiódus R18-on. A negatív félperiódus a T8-as pnp tranzisztort fogja kinyitni, amely közös emitteres beállításban dolgozik, azaz megfordítja a jel fázisát. Így ennek kollektorán a vezérlőjellel pontosan ellenkező fázisú jel adódik. Ennek hatására T9 kinyit, és így a föld felől a terhelésen keresztül áram fog megindulni a negatív tápfeszültségű pont felé, azaz R18-on megjelent a jel negatív félperiódusa is.

A kimeneten található egy soros RC-kör. Ez az ún. Zobel-hálózat. Feladata, hogy reaktív hangszóróterhelés esetén növelje az erősítő stabilitását magasabb frekvenciákon azáltal, hogy részben kompenzálja a terhelés reaktív komponenseit.

A gyakorlati megvalósításnál fontos, hogy a végtranzisztorokat megfelelő hűtőbordára szereljük fel, mert a jó hűtést mindenképpen biztosítani kell. Ezen kívül a T5-ös munkapontbeállító tranzisztort is fel kell erősíteni a közös hűtőbordára, mert így biztosítható a végfokozat hőmegfutás nélküli működése. Ha ugyanis ha a T7, T9 tranzisztorok felmelegszenek a használat során, jobban kinyitnak, és megnő az áramuk. Ezt az áramot pedig a T5 tranzisztor kollektor-emitter feszültsége állítja be. Ha ez az eszköz is a végtranzisztorokkal együtt melegszik, akkor jobban ki fog nyitni. Rajta kontans áram folyik, ezért a kollektor-emitter feszültsége lecsökken, ami a végtranzisztorok áramának növekedése ellen hat. Ezt termikus visszacsatolásnak nevezzük, amelyet bipoláris eszközöket alkalmazó hangerősítőkben mindenképpen célszerű használni.

Az előzőekből látszik, hogy a kapcsolás felépítése egyszerű és logikus, működése könnyen követhető és áttekinthető. Segítségével véleményem szerint egy kellemes hangú, jó paraméterekkel rendelkező készülék építhető.

Szakdolgozatom következő részében a megépítés egyes fázisait mutatom be röviden, képekkel illusztrálva.

3. 1. 2. Próbaverzió megépítése és beállítása

Az áramkör megépítését a próbaverzió létrehozásával kezdtem. Ez abból állt, hogy az elő- és feszültségerősítő fokozatot egy próbapanelra építettem meg. A panel olyan kivitelű volt, hogy az egyes alkatrészeket nem kellett beforrasztani, csak a megfelelő helyre bedugni. Nagy előnye a megoldásnak, hogy egyszerű az összeépítés, és alkatrészcsere esetén nincs szükség forrasztópákára.

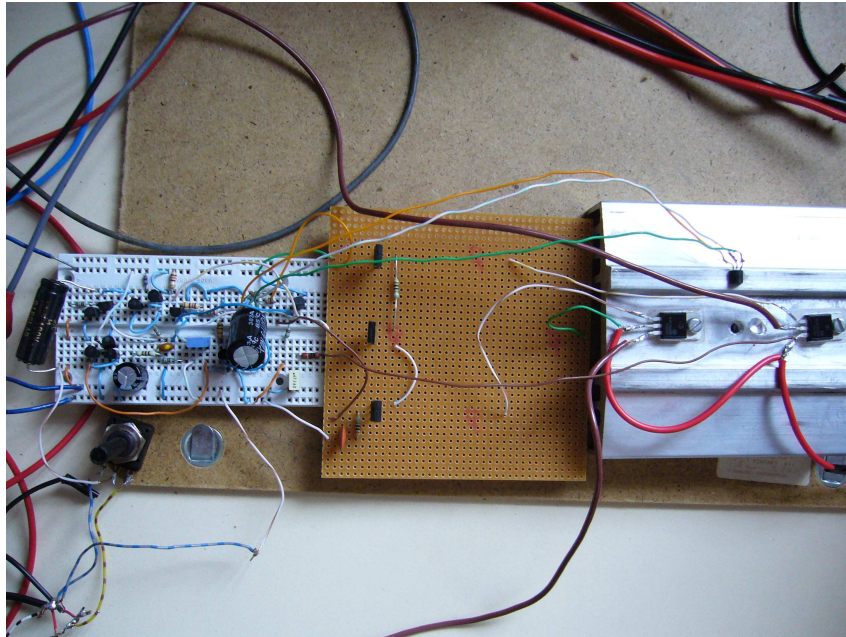
A meghajtó fokozatot külön helyeztem egy forrasztható próbapanelra, valamint a végfokozati tranzisztorok egy ideiglenes hűtőbordán kaptak helyet.

Az összeállítás nagy hátránya, hogy azon a próbapanelon, ahol nem használunk forrasztást az alkatrészek rögzítéséhez, nagyon könnyen érintkezési hiba léphet fel. Ezen kívül számolnunk kell a hosszú vezetékezés miatt fellépő nagyobb zavarérzékenységgel is.

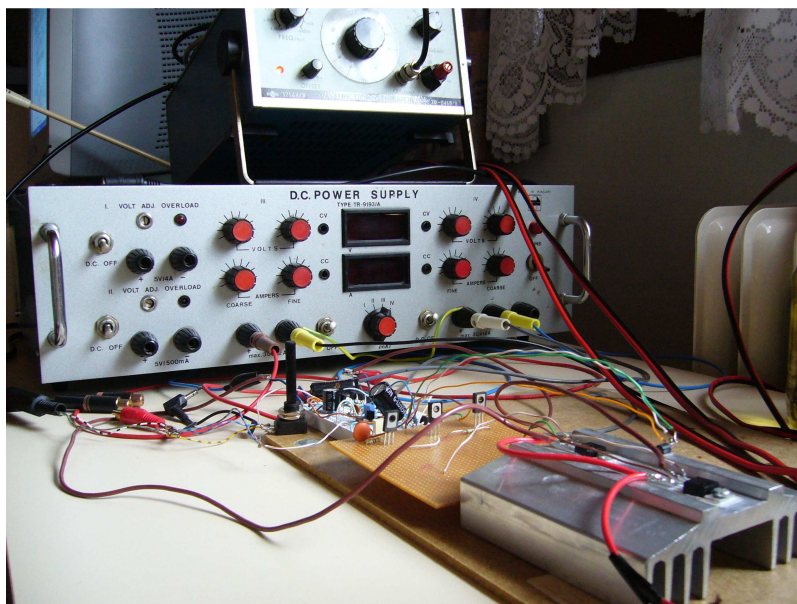
Mindezekből látható, hogy e megoldás csak tesztelésre használható, a végleges áramkört kizárólag nyomtatott áramkör formájában kell megépíteni. Saját tapasztalom szerint a hangminőséget is befolyásolja a szerelés minősége. Erre részletesebben kitérek A nyomtatott áramkör megtervezése című fejezetben.

Az összeépített próbaverzió látható a 26. és 27. ábrákon. A 26. ábrán balról jobbra haladva láthatók az erősítő fő egységei:

- az elő- és feszültségerősítő fokozatok a fehér színű próbapanelon
- a meghajtó fokozat a forrasztható panelon
- a végfokozati elemek és a szabályozótranzisztor a hűtőbordán



26. ábra: A próbaverzió felülnézeben



26. ábra: A próbaverzió a tápegységgel és a hanggenerátorral

A képeken jól látszik, hogy a részegységek összekötéséhez jó hosszú vezetékekre volt szükség. Ez mindenképpen hátrányos a hangminőséget illetően, de tesztelésnek ebben a fázisában a lényeg, hogy az áramkört hiba nélkül éleszteni lehessen, illetve az esetleges hibák könnyen felderíthetők legyenek. Az alkatrész cseréje is egyszerűbben megoldható.

A megépítés után következett a legfontosabb lépés, ez pedig az előző bekezdésben említett élesztés. E műveletnél rendkívül elővigyázatosnak kell lenni, különös tekintettel a végfokozatra. Ugyanis ez a fokozat üzemel nagy teljesítménnyel, és zárlat vagy nagyfrekvenciás gerjedés esetén rendkívül nagy áram folyhat a végtranzisztorokon. Ez védelem hiányában akár a tápegység leégéséhez is vezethet, nem beszélve arról, hogy a drága végtranzisztorok is tönkremehetnek a másodperc töredéke alatt. Mindenképpen célszerű valamilyen módon a felvett áramot korlátozni addig, amíg az erősítő stabilan nem működik egyenáramú szempontból.

Mindezek figyelembevételével választottam feszültségforrásként egy rövidzárvédelemmel ellátott labortápegységet.

Az élesztést az alábbiak szerint végeztem:

1. A tápegységen beállítottam az áramkorlátot kb. 50 mA-re. Azért választottam ilyen alacsony értéket, mert így a kisjelű tranzisztorok sem mennek tönkre egy esetleges túláram miatt, függetlenül attól, hogy milyen okból keletkezik ez az áram. Fontos megjegyezni, hogy a végfokozatot ez esetben B osztályba kell beállítani, mert így nem folyik áram a végtranzisztorokon (ld.: B osztályú beállítás). Ezt úgy érhetjük el, hogy a T5 jelű szabályozótranzisztor kollektorát és emitterét egy vezetékekkel rövidre zárjuk. Ez esetben a teljes erősítőrendszer maximális áramfelvétele nem haladhatja meg a 20 mA-t helyes működés esetén.
2. Bekapcsolás után ellenőriztem a kimeneten (VP1 jelű ponton) a DC szintet a földhöz képest. A bemenetet rövidre zártam. Megfelelő működés és összeválogatott félvezetők esetén az itt mért érték nem lehet nagyobb 10 mV-nál. Ezen kívül ellenőriztem az R15 illetve R6 jelű ellenállásokon eső feszültség értékét. Ez 180-200 mV-ra adódott, tehát közel 2 mA folyik a bemeneti differenciálerősítő 1-1 ágában. Végül, de nem utolsósorban rámértem az R2 jelű ellenállásra, ahol 640 mV-ot jelzett a műszer. Ebből következik, hogy a főerősítő kollektorárama 6,4 mA, tehát ez is rendben volt.
3. Miután B osztályban mindent rendben találtam, eltávolítottam a T5 tranzisztorról a rövidzárat. A tápegységen az áramkorlátot feljebb állítottam kb. 300 mA-re. Bekapcsolás után a kijelzőről leolvasható volt a végfokozat alapárama. Ez 100 mA környékére állt be, tehát az elvárásaimnak megfelelően elindult a végfokozat AB osztályú beállításban is. A kimeneten a DC szint nem változott jelentős mértékben.

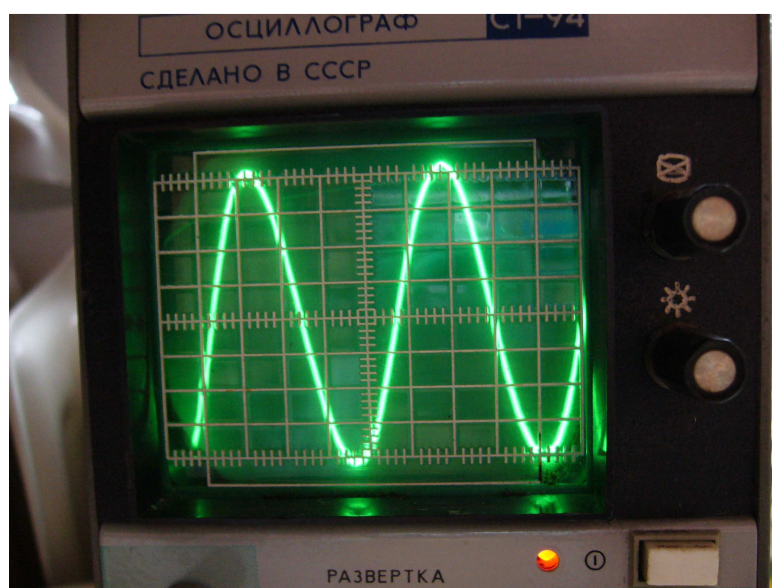
Ezekből megállapítottam, hogy az egyenáramú munkapont rendben van. Következhetett a dinamikus vizsgálat. E mérésnél a bemenetre hanggenerátort a kimenetre egy ellenállásokból létrehozott műterhelést kötöttem, amelyet olajhűtéssel láttam el. Ez látható a 27. ábrán.



27. ábra: 6 Ohm-os műterhelés olajhűtéssel

A műterhelést egyenáramú leválasztás nélkül, közvetlenül kapcsoltam a kimenetre, ugyanis az ott lévő 10 mV körüli DC szint ezt minden további nélkül lehetővé teszi. Ez nagyon jó hatással van az alsó határfrekvencia alakulására, valamint kihagyható az áramkörből a leválasztó nagykapacitású elektrolitkondenzátor.

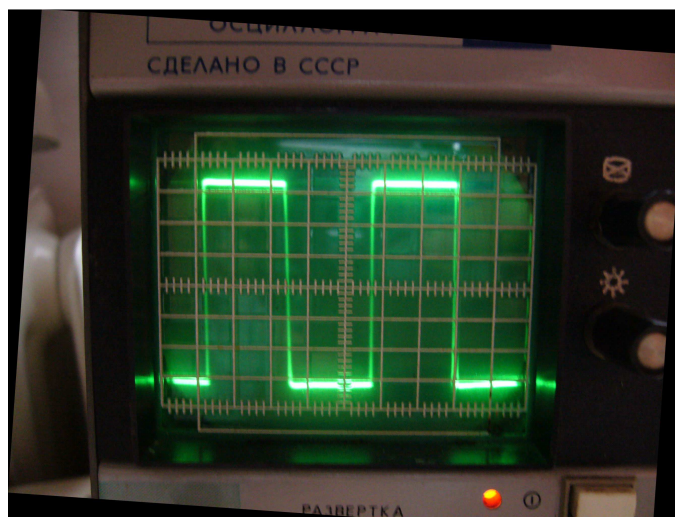
A 28. ábra mutatja a maximális szinuszos kimeneti feszültséget az idő függvényében.



28. ábra: maximális kimenőjel 1 kHz-es szinuszos vezérlés esetén

Az oszcilloszkóp függőleges tengelyének beállítása 5 V/osztás. Így a mért jel amplitúdója kb. 21 V, és megfigyelhető, hogy torzítás még nem látható sem a pozitív, sem a negatív félperiódusban. Ezen kívül helyes az AB osztályú munkapont is, mert keresztezési torzítás sem lépett fel a nullátmenetek környékén.

Az erősítő bemenetét ugyanekkora amplitúdójú és frekvenciájú négyszögjellel meghajtva az alábbi ábrát kaptam (29. ábra):



29. ábra: maximális kimenőjel 1 kHz-es négyszögjeles vezérlés esetén

Jól látható, hogy gyakorlatilag torzítás nélkül átviszi a négyszögjelet is az áramkör. Nem látszik sem túllövés, sem tetőesés, sem pedig berezgés a kimenőjelben. Ebből következik, hogy nincs semmiféle nagyfrekvenciás átviteli probléma, illetve a meredek fel- illetve lefutás miatt az erősítő kellő gyorsasággal is rendelkezik. Ez nagyon fontos a megfelelő dinamika biztosítása érdekében. A jel amplitúdója kisebb, mint szinuszos vezérlésnél, ami abból adódik, hogy a tápegység áramkorlátozó áramköre behatárolta a kivehető teljesítményt. Ugyanis négyszögjeles meghajtás esetén ugyanakkora amplitúdó eléréséhez nagyobb áramnak kell folyni a végtranzistorokon. Ennek oka a jel felharmonikus-tartalmában keresendő.

Mindezek után lemértem az erősítő alsó-, illetve felső határfrekvenciáját, tehát azokat a frekvenciaértékeket, amelyeknél a kimenő jel amplitúdója 3 dB-lel kisebb a sávközépen mért értéknél.

Ezek az alábbi értékek lettek:

- alsó határfrekvencia: kb. 10 Hz
- felső határfrekvencia: kb. 40 kHz

A mérési eredményekből látható, hogy az áramkör nagyon jó tulajdonságokkal rendelkezik, és ez a hangminőségben is tükröződött.

3. 1. 3. A nyomtatott áramkör megtervezése

Az előző fejezetben kiderült, hogy az áramkör jó paraméterekkel rendelkezik. Ahhoz, hogy e tulajdonságokat megőrizzük, szükség van egy megfelelően tervezett és kivitelezett nyomtatott áramkörösre. Tapasztalatom szerint egy rossz panel sokat ronthat a hangminőségen.

A tervezésnél a számos fontos szempontot figyelembe kell venni. Ezek közül talán az egyik legfontosabb, hogy a panelon a vezetópályákat mindig a rajtuk folyó áramnak megfelelően méretezzük. Ez azt jelenti, hogy ahol nagy áramok folynak a működés közben, ott a lehető legvastagabb vezetővel dolgozzunk. Ilyen például a végfokozat. A kisáramú helyeken (pl.: jelutak) megfelelő a vékony rézfólia alkalmazása, mert így kevesebb zajt, zavart szed fel a környezetéből [6].

A jelutak kialakításánál ezen kívül el kell kerülni azt, hogy a vezetópálya olyan szomszédos vezetőfólia mellett fusson, amiben nagy áram folyik. Ugyanis ez zavarforrás lehet. Ez legtöbbször olyan kapcsolásoknál fordul elő, ahol a földvezetékben is folyik áram vezérlőjel hiányában. Az ilyen áramkörök aszimmetrikus táplálásúak. Diplomamunkám témájául választott erősítőben ezzel szemben a földpontra nézve szimmetrikus tápfeszültséget alkalmazok. E megoldás nagy előnye, hogy a földvezetékben egyenáramú komponens gyakorlatilag nem jelenik meg, tehát kisebb lesz az ebből eredő zavar is.

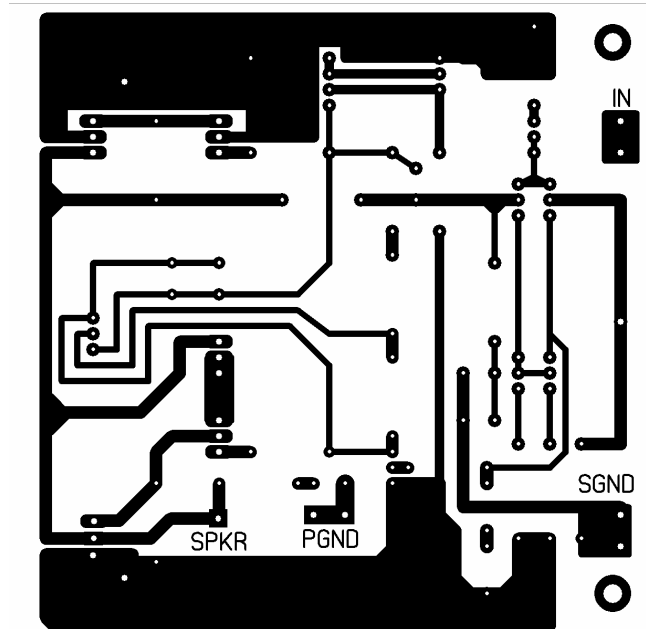
Másik fontos tervezési alapelv, hogy az alkatrészek elhelyezése megfelelően „szellős” legyen, valamint az egyes eszközöket a lehető legrövidebb kivezetéssel kell beforrasztani. Nem jó, ha a panel túlzsúfolt, mert így az egyes alkatrészek kölcsönhatásba kerülhetnek egymással, és ebből adódóan nem várt hiba léphet fel a működésben. Ilyen lehet például, ha az induktivitások káros csatolásba kerülnek, vagy a környezeti hőmérsékletnél melegebb alkatrészek más eszközöket is fűtenek, ami a munkapont eltolódásával járhat.

A tervezésnél törekedni kell arra, hogy lehetőleg átkötést ne használjunk a panelon, mert az ugyancsak zavarforrás lehet (különösen, ha hosszú vezetékkel kivitelezük az átkötést) [6]. Vannak azonban olyan esetek, amikor ez elkerülhetetlen, ekkor a lehető legrövidebb vezetékkel kell megoldani az adott pontok összekötését.

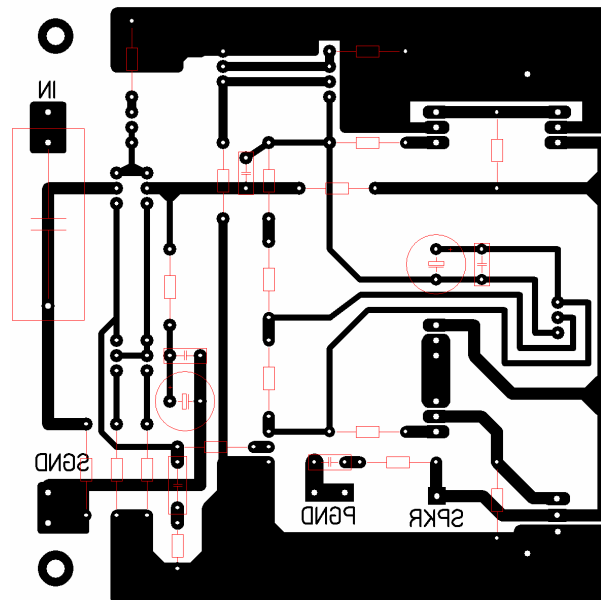
Tranzisztoros erősítők esetén a negatív visszacsatolást rövid vezetékkel kell kivitelezni. Csak így valósul meg az, hogy a kimeneti jel és a visszacsatolt jel a legkisebb mértékben különbözzön. A visszacsatolás (és így a hibajavítás) megfelelő működésének biztosításához ez elengedhetetlen feltétel [6].

A fenti elvek figyelembe vételével terveztem meg az erősítő nyomtatott áramköri rajzát. A tervezéshez a Sprint Layout 4.0 nevű programot használtam, amely egy egyszerűen használható szoftver, és kisebb áramkörök könnyen tervezhetők vele.

A végleges nyák-terv és a beültetési rajz a 30. és 31. ábrákon látható.



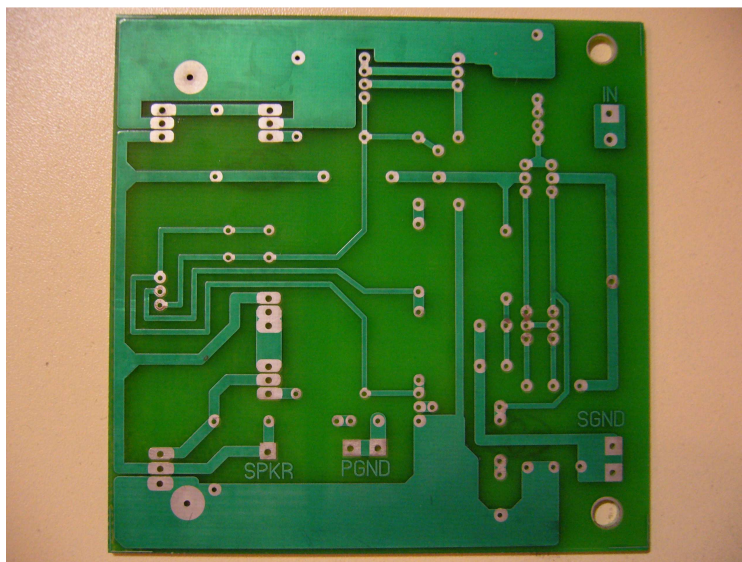
30. ábra: Az erősítő nyomtatott áramköri rajza (fóliaoldal)



31. ábra: Az erősítő beültetési rajza

A erősítőpanelokat egy nyomtatott áramkör gyártására specializálódott céggel készítettem el. A cég nagyon precíz munkát végzett, mert több példányban is elkészült a panel, és hibákat (alámaródás, szakadt rézfólia, stb.) nem fedeztem fel az áramköri rajzolatban. A kész panelok méretre vágva, kifúrva, illetve forrasztásgátló lakkal kezelve érkeztek meg.

A kész panel látható a 32. ábrán.



32. ábra: Az elkészült nyomtatott áramkör

3. 1. 4. A végleges erősítőmodulok megépítése és bedobozolása

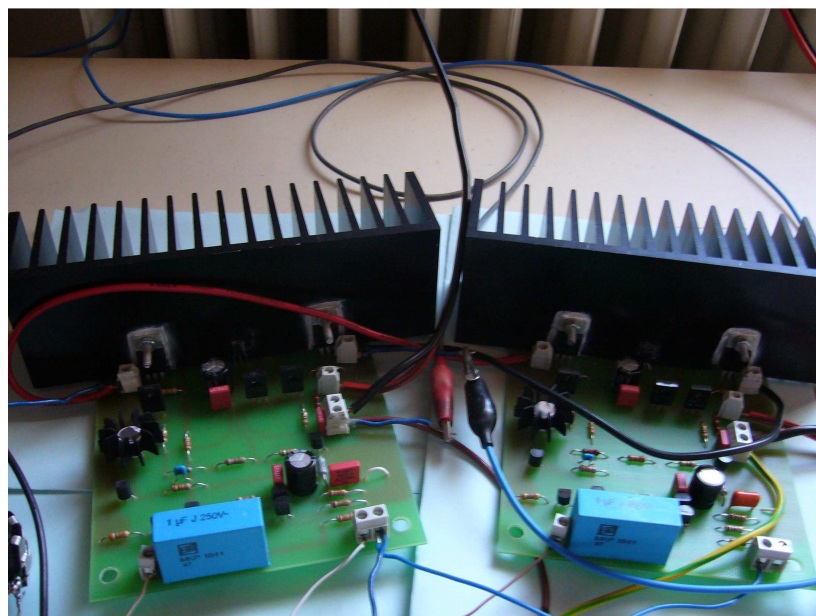
Miután az erősítő paneljai a rendelkezésemre álltak, elkezdtem az alkatrészek beszerzését, majd ezután a modulok készre szerelését.

Az egyes alkatrészeket az alábbi cégektől szereztem be:

- S.I.K.E.R. Bt. (Győr)
- Somogyi Elektronik Kft. (Győr)
- Impulzus Kft. (Győr)
- Lomex Kft. (Budapest)
- DSP System Kft. (Budapest)
- Elektrokontha Kft. (Budapest)
- Robtron Elektronik Trade Kft.

Az alkatrészek beszerzése után következhetett az erősítő jobb és bal csatornájának megépítése és élesztése. Ez utóbbi ugyanúgy történt, mint ahogy azt a 3.1.2.-es fejezetben leírtam, tehát még mindig labortápegységről üzemeltettem a panelokat.

Az elkészült áramkörök láthatók a 33. ábrán.



33. ábra: Az erősítő jobb és bal csatornája tesztelés közben

Az ábrán jól láthatók a nagyméretű hűtőbordák, amelyekre a végtranzisztorokat csavarral rögzítettem. A félvezetők alá csillámlemezt helyeztem. Így az eszközöket elektromos szempontból elszigeteltem a hűtőbordától, és egymástól is. Ugyanis a TO-220 tokozású tranzisztorok kollektora a hűtőszáslóval elektromos kapcsolatban van, tehát mindenképpen szükséges a szigetelés. Sajnos azonban ez a megoldás rontja a hőátadó képességet. Ennek kiküszöbölésére hővezető pasztát alkalmaztam a tranzisztor és a csillámlemez, valamint a csillámlemez és a hűtőborda között. Ez nagymértékben javítja a hővezetést.

A hűtőborda fekete színű, eloxált típusú, melynek hőellenállása $1,5\text{ }^{\circ}\text{K/W}$. Tapasztalatom szerint a fekete szín a hőelvezetés szempontjából jobb hatásfokot eredményez, mint a fémszín. Emiatt döntöttem ilyen hűtő használata mellett.

A modulokat hosszú ideig teszteltem ebben az összeállításban, és megbízhatóan működtek. Nem következett be sem hőmegfutás illetve a melegedés hatására munkaponteltolódás, sem nagyfrekvenciás gerjedés, még különböző típusú hangsugárzók használata esetén sem.

A szerelés következő fázisa a megfelelő tápegység összeállítása volt. Egyszerű megoldást választottam, ami az alábbi részegységekből állt:

- Toroid hálózati transzformátor 250 VA-s terhelhetőséggel, 2x22 V szekunder feszültséggel, valamint tekercsenként egy-egy 3,15 A-es olvadó biztosítóval.
- Szekunder tekercsenként 1-1 Graetz-híd, melyek közös pontja lett a földpont. Ehhez a ponthoz képest rendelkezésünkre állt a +30 V és a – 30 V tápfeszültség az egyenirányítás után.
- Brummszűrés 2 db 18000 μ F értékű elektrolit kondenzátorral. Az egyik a pozitív tápágat, a másik a negatív tápágat szűri.
- A fenti kondenzátorokkal párhuzamosan bekötöttem egy-egy 220 nF-os nagyfrekvenciás hidegítő kondenzátort. Ezek az alkatrészek csökkentik a tápegység belső ellenállását is azáltal, hogy az elektrolit kondenzátorok veszteségi ellenállását csökkentik.

Miután a tápegység is elkészült, valamint a modulok ennek segítségével is tökéletesen működtek, hátra volt még az erősítő dobozba építése.

Véleményem szerint e művelet az egyik legnehezebb feladat. Sokszor nehéz kialakítani megfelelő esztétika mellett a jó használhatóságot. Nem könnyű biztosítani a zajmentes működést, mert a dobozban az áramkörök viszonylag közel helyezkednek el egymáshoz, és a transzformátor is zavart kelthet a szórt mágneses tere miatt.

A vezetékezésnél itt is alapszabály, hogy ahol nagy áram folyik, ott mindenképpen a lehető legvastagabb vezetékkel dolgozzunk. Különösen igaz ez a földvezetékezésre, amely az egyik legkényesebb pont. A legjobb módszer, ha a földhálózatot csillagpontos kialakításúra tervezzük. Ez azt jelenti, hogy kijelölünk egy pontot, amely lehet például a Graetz-hidak közös pontja, vagy a szűrőkondenzátorok közös pontja. Ezek után minden földvezetéknek erre a pontra kell csatlakozniuk [6] [14].

Ilyen elrendezés esetén elkerülhető az ún. földhurok jelensége. Ez akkor alakul ki, amikor a helytelen vezetékezés miatt bizonyos helyeken hurkok alakulnak ki a földhálózatban, és ezekben a hurkokban áram kezd folyni. Ezek az örvényáramok rendkívül zavaró brummként jelentkeznek az erősítő kimenetén és ezáltal a hangsugárzón is. A legjobb védekezés ez ellen a fent említett csillagpontos földhálózat.

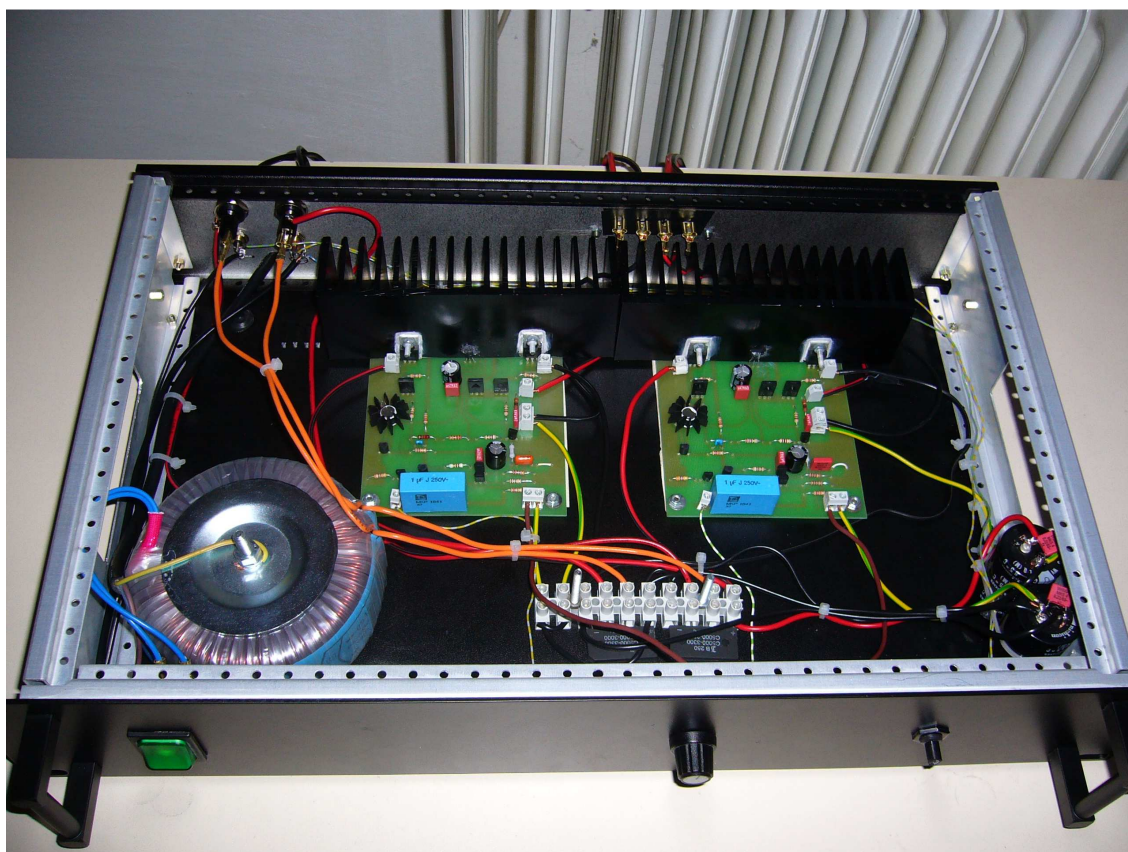
Másik fontos szempont, hogy a hálózati védőföldet nem célszerű rákötni az erősítő fémházára. Ez ugyanis ismét földhurokot okozhat, ha a csatlakoztatott lejátszóberendezés is el van látva védőföldeléssel. Ilyenkor a 230 V-os hálózat védőföldelésén keresztül alakul ki a hurok, amely 50 Hz-es bűgásként jelentkezik a kimenőjelben. Ez használhatatlanná teszi az erősítőt.

Fontos megemlíteni, hogy védőföldelés hiányában az erősítő hálózati transzformátorát kettős szigeteléssel kell ellátni azért, hogy a hálózati feszültség egy esetleges zárlat esetén se kerüljön ki a fémháza.

Az erősítőben ezt egy gumilappal oldottam meg, ami a transzformátor és a ház között helyezkedik el. Ezen kívül a transzformátor kívülről műanyag szigeteléssel van ellátva. Így biztosított az érintésvédelem.

A fenti elveket követve építettem szabványos méretű rackdobozba az erősítőt. A hátulján kialakítottam a szabványos csatlakozási pontokat, az előlapon pedig a kezelőszerveket. A hangerőszabályzást két db monó kivitelű forgópotenciométerrel oldottam meg. A hálózati kapcsoló kétáramkörű, kétállású, billenő kivitelű. A bekapcsolt állapotot zöld fény jelzi.

Az erősítő belső felépítése a 34. ábrán látható.



34. ábra: Az erősítő belső felépítése

A baloldalon jól látható a nagyméretű toroid transzformátor, mellette a két egyenirányító híd sorkapocsba csavarozva. A jobb szélén kaptak helyet a puffer kondenzátorok. Az erősítő modulok elhelyezésénél törekedtem a megfelelő szellőzés biztosítására, így a hűtőbordák közvetlenül a szellőzőnyílások alatt helyezkednek el.

Az alábbi ábrákon a készre szerelt készülék látható (35, 36. és 37. ábra).



35. ábra: Az erősítő felülnézetből



36. ábra: Az erősítő előlnézetből



36. ábra: Az erősítő hátulnézetből

3. 2. Az elkészült erősítő műszaki adatai

A megépített készülék műszaki adatait a Széchenyi István Egyetem Elektronikus Áramkörök Laboratóriumában mértem le. A méréshez funkciógenerátort, oszcilloszkópot, valamint digitális multimétert használtam. Az oszcilloszkóp rendelkezett Fourier-analízis funkcióval is (FFT), így a kimeneti jel spektrumából a torzítás is mérhető volt.

A legfontosabb műszaki adatokat az alábbi táblázat tartalmazza (37. ábra).

Végfokozat típusa	Kvázikomplementer, ellenütemű, AB osztályú végerősítő fokozat
Maximális kimeneti teljesítmény csatornánként ($k=1\%$; $f=1\text{ kHz}$; $R_t=6\text{ Ohm}$)	44 W
Teljes harmonikus torzítás ($f=1\text{ kHz}$; $P_{ki}=30\text{ W}$) ($f=1\text{ kHz}$; $P_{ki}=20\text{ W}$) ($f=1\text{ kHz}$; $P_{ki}=10\text{ W}$) ($f=1\text{ kHz}$; $P_{ki}=5\text{ W}$) ($f=1\text{ kHz}$; $P_{ki}=1\text{ W}$)	0,3% 0,25% 0,2% <0,1% nem mérhető
Átviteli sáv szélesség (-3 dB)	10 Hz – 35 kHz
Fázistolás ($f=20\text{ Hz}$) ($f=20\text{ kHz}$)	+20° -30°
Kimeneti DC szint	maximum $\pm 10\text{ mV}$
Terhelő impedancia	6 Ohm
Bemeneti feszültség / csatlakozók	0 dBu (775 mV) / 2 db RCA
Hangerőszabályzó potenciométerek	2 db 100 kOhm-os, mono, lineáris pot.
Tápfeszültség	~ 230V / 50 Hz
Védelem	2 db 3,15 A/T biztosítókkal a hálózati transzformátor szekunder tekercsei után
Érintésvédelem	Kettős szigeteléssel
Tömeg	Kb. 5 kg

37. ábra: Az erősítő műszaki adatai

3. 2. Az erősítő szubjektív összehasonlítása egy gyári készülékkel

Miután elvégeztem a fizikai paraméterek meghatározását, végeztem egy szubjektív összehasonlító tesztet. Véleményem szerint az ilyen összehasonlítás az egyik legfontosabb „mérés” hangerősítők esetén, hiszen a műszaki adatokból szinte sosem derül ki, hogy az adott készülék milyen hangzáskarakterisztikával rendelkezik.

A tesztben egy gyári, ötcsatornás, házi-mozi rádióerősítőt és az általam készített erősítőt hasonlítottam össze. Elsődlegesen a két készülék hangminőségét vizsgáltam, a tényleges fizikai paramétereket kevésbé vettem figyelembe. A gyári eszköz egy Technics SA-DX950 típusú távol-keleti készülék volt. A műszaki adataira részletesen nem térek ki, csak annyit említek meg, hogy MOS-FET-es végfokozatot tartalmaz, és az adatlap alapján kitűnő fizikai paraméterekkel rendelkezik még 100 W kimeneti teljesítmény mellett is.

Az összehasonlító tesztet normál hangerő mellett végeztem, tehát a kimeneti teljesítmény egyik készülék esetén sem haladta meg az 1-2 W-ot. Több zenei stílussal is meghallgattam az eszközöket, és egy-egy meghallgatás több órát is igénybe vett.

A teszt befejezése után az alábbi eredményekre jutottam.

A szubjektív vélemény:

Örömmel vettem tudomásul, hogy a két készülék hangminősége között jelentős különbség nincsen. A hangzásvilágról általánosságban elmondható, hogy a saját készülékem keményebb és talán egy kicsivel ércesebb hanggal rendelkezik. Ezzel szemben a Technics lágyabb, visszafogottabb stílust képvisel. Véleményem szerint e különbség oka a MOS-FET-es végfokozatban keresendő, amiből adódóan a két készülék kimeneti jele eltérő felharmonikus-tartalommal rendelkezik.

Valamivel nagyobb különbséget csak a készülékek mélytartományában fedeztem fel. Itt ugyanis az általam épített erősítő érzésem szerint nagyobb dinamikával rendelkezik, és a karakterisztikája olyan, mintha alacsonyabb frekvenciákat is képes lenne leadni. Teszi ezt annak ellenére, hogy a Technics erősítő alsó határfrekvencia 10 Hz az adatlap szerint. E különbség oka valószínűleg az, hogy a saját készülékemet a kimeneti teljesítményhez képest túlméretezett tápegységgel építettem. Ez nagymértékben hozzájárulhat a mélyfrekvenciás tartomány dinamikájának javulásához.

A teszt összefoglalásaként elmondható, hogy mindkét készülék nagyon kellemes, torzításmentes hangot képes előállítani az adott teljesítménytartományban. Felhasználásukat tekintve a saját erősítőm hangzásvilága talán jobban illik a pörgősebb tánczenékhez, míg a Technics inkább a lágy dallamok (pl.: komolyzene) visszaadásában jobb.

4. Összefoglalás

Szakedolgozatom témája volt egy hangfrekvenciás erősítő építése azzal a kitétellel, hogy alkalmas legyen a Széchenyi István Egyetem Audio- és Videotechnikai Laboratóriumában lévő gömbsugárzó hangszóró meghajtására.

Az erősítőt a célnak megfelelően megterveztem és megépítettem, figyelembe véve a műszaki követelmények mellett korunk esztétikai elvárásait is.

A dolgozatot úgy építettem fel, hogy tartalmazza az erősítéstechnika elméleti alapjait, mely nélkülözhetetlen a gyakorlati munka megvalósításához.

Az elméleti részben ismertettem a hangfrekvenciás erősítők felépítését, működését, valamint a tervezéshez szükséges alapvető félvezető technikai ismereteket, az egyes alkatrésztípusokat, illetve az erősítők minősítésénél használt paramétereket.

A gyakorlati részben bemutattam az építés munkafázisait.

Elsőként a tervezést és a részletes áramköri leírást ismertettem. Ebben a lépésben egy próbaverzión számos kísérletet hajtottam végre a hangminőség javítása érdekében. Alaposan teszteltem ezt az összeállítást, míg végül eljutottam a végleges áramköri kialakításhoz.

Ezek után megterveztem az erősítő nyomtatott áramkörét, amit egy erre specializálódott céggel gyártattam le. Az elkészült panelok segítségével összeállítottam a végleges erősítőmodulokat, melyeket ismét hosszú idejű tesztnek vettem alá. Miután bebizonyosodott, hogy megbízhatóan működnek, szabványos rackdobozba építettem be a modulokat a megfelelő tápegységgel együtt. A dobozon kialakítottam a kezelőszerveket és csatlakozókat, melyeket feliratokkal láttam el.

A készüléken hangfrekvenciás méréseket végeztem, mely alapján elmondható, hogy az eszköz a feladatban kiírt követelményeknek megfelel, sőt némely paraméterben túlteljesíti az elvárásokat. E paramétereket a szakedolgozatban táblázat formájában adtam meg.

Végül elvégeztem a számomra legizgalmasabb „mérést”, amely a hangminőség szubjektív értékelése volt. Ehhez összehasonlításuképpen rendelkezésemre állt egy gyári készülék. A tesztből kiderült, hogy a két konstrukció között nincs számottevő hangzásbeli különbség, csak néhány apró részletben térnek el egymástól (pl.: mélytartomány dinamikája). Ezt azonban csak hosszas (heteken keresztül tartó) meghallgatás után jelenthettem ki egyértelműen, hozzáteve, hogy ez erősen szubjektív értékelés.

Dolgozatomban képekkel illusztráltam a kész erősítőt, az építés egyes fázisait, illetve a méréshez használt műszereket.

Összefoglalásképpen elmondhatom, hogy az erősítő megépítése technikai szempontból nagy kihívás és élmény volt számomra, mely számos tanulsággal szolgált. Emellett remélhető, hogy hangtechnikai céloknak is hosszú távon eleget tesz a Széchenyi István Egyetem Audio- és Videotechnikai Laboratóriuma számára.

Ezúton szeretném megköszönni konzulensemnek, Dr. Wersényi Györgynek a segítségét és támogatását szakdolgozatom megvalósításához.

5. Irodalomjegyzék

- [1]: Dr. Wersényi György – Híradástechnikai alkatrészek jegyzet 2003
- [2]: Dr. Borbély Gábor – Elektronikai áramkörök I-II.
(SZIF-Universitas 1998)
- [3]: Varga Gábor – Gömsugárzó-hangszóró tervezése és építése
- [4]: Klaus Beuth & Olaf Beuth – Az elektronika alapjai II.
(Műszaki Könyvkiadó, 1994)
- [5]: John Linsley Hood – Csöves és tranzistoros hangerősítők
(Tibiscus Bt, 1997)
- [6]: Ágoston Lajos – Audiofil erősítők építése (Ágoston Lajos, 2003)
- [7]: www.alldatasheet.com
- [8]: www.pioneer.de
- [9]: www.panasonic.hu
- [10]: www.alesis.com
- [11]: www.zaj.hu
- [12]: <http://www.duncanamps.com/technical/ampclasses.html>
- [13]: http://en.wikipedia.org/wiki/Class_A_amplifier
- [14]: <http://audiodiy.atw.hu>
- [15]: www.crown.com
- [16]: Dr. Wersényi György – Műszaki akusztika jegyzet 2004