

## Nemlineáris torzítások audio eszközökben

*Dr. Bakó Tamás Béla  
Evosoft Hungary Kft.  
Tamas.Bako@evosoft.com*

### Bevezetés

A hangtechnikában sokféle eszközt használnak a hang felvételére, rögzítésére és lejátszására. Minden eszköz a hang rögzítése illetve továbbítása során kisebb-nagyobb mértékben módosítja a bemenetére került hangjel formáját. Ezen módosítások egy része szándékos (ilyen eszköz például a hangszínszabályzó vagy a limiter), azonban gyakran csupán az eszköz tökéletlensége okozza az eltérést és ez nem szándékolt torzítást okoz a lejátszott hangban. Tudósok és mérnökök serege hatalmas erőfeszítéseket tett arra, hogy a különféle berendezések torzításait minél kisebbre csökkentse. Azonban elindult egy olyan hangtechnikai irányzat is, ahol nem, hogy nem cél a torzítás csökkentése, hanem éppen ellenkezőleg: a régi típusú, tökéletlen hangeszközök torzításait szeretnék minél jobban szimulálni. Miért? Ugyanis ezeknek a régi eszközöknek a hangja bár torz volt, de a torz hang mégsem feltétlenül volt kellemetlen, ugyanis egyes torzítás fajták képesek lehetnek az átvinni kívánt hangnak kellemes hangszínt adni, a bántóan éles hangokat tompítani vagy a nehezen átvihető mély hangokat finoman kiemelni.

A következőkben néhány ismertebb hangátviteli eszköz torzítása lesz bemutatva, illetve arról lesz szó, hogy mitől lehetnek kellemesek ezek a torzítások.

### Elektroncsöves erősítők

Az elektroncsöves készülékek a XX. század elején jelentek meg, majd az 1970-es években kiszorították őket a jóval kevesebbet fogyasztó, kisebb méretű és mechanikailag kevésbé kényes, valamint kisebb torzítású tranzistoros készülékek. Azonban kb. a 90-es évektől ismét reneszánszukat élik a csöves berendezések, annak ellenére, hogy a torzításuk a mérési szabványok szerint nagyobb.

Az erősítők torzításának kérdésével az 1920-as években elkezdtek foglalkozni, és már ekkoriban kidolgozták azokat a torzítás mérési szabványokat, amiket a mai napig használunk [1]. Ezek közül a legfontosabb a harmonikus torzítás mérés. A harmonikus torzítást úgy tudjuk megmérni, ha egy adott frekvenciájú szinuszjelet kapcsolunk a mérendő készülékre majd a kimenő jelben meghatározzuk az adott frekvenciájú szinuszjel és a torzítás miatt megjelenő szinusz felharmonikusok teljesítményének az arányát.

A harmonikus torzítás arány egy elektroncsöves erősítőnél kb. 1-2%, egy tranzistoros erősítőnél kb. 0.05%, azaz akár 40-szer kisebb. Azonban szubjektív meghallgatásos tesztek azt bizonyítják, hogy az elektroncsöves erősítők hangját a nagyobb torzítás ellenére is általában mégis kellemesebbnek ítélik meg az emberek, mint a tranzistoros készülékekét. Ennek négy fő oka van: az eltérő nemlineáris karakterisztika a normális jeltartományban, az eltérő határoló karakterisztika a túlzottan nagy amplitúdójú jeleken, a negatív visszacsatolás hiánya az elektroncsöves készülékeknél, valamint az, hogy az ember hallása különböző súllyal veszi figyelembe az eltérő karakterisztikákból eredő eltérő torzításokat.

### *Karakterisztika a normális jeltartományban*

Az elektroncsövek karakterisztikáját a Child-Langmuir törvény határozza meg, ami leírja a kapcsolatot a cső kimenő árama és a rács feszültsége között [2]:

$$I_A = K(U_R + D \cdot U_A)^{3/2},$$

ahol  $I_A$  a cső kimenő anódárama,  $K$  a cső geometriájára jellemző állandó,  $U_R$  a bemenő rácfeszültség,  $U_A$  az anódfeszültség és  $D$  a cső erősítésének a reciproka (áthatás).

A tranzisztorok karakterisztikáját pedig a következő képlettel lehet közelíteni:

$$I_C \approx I_0 \cdot \exp\left(\frac{I_B}{I_T}\right),$$

ahol  $I_C$  a kollektoráram,  $I_B$  a bázisáram (a tranzisztor az áramerősítéssel jellemezhető jobban),  $I_0$  és  $I_T$  pedig tranzisztorfüggő paraméterek.

Ha a két karakterisztikát Taylor-sorba fejtjük, akkor azt láthatjuk, hogy az elektroncsőnél a torzítás jóformán csak második és harmadik harmonikust hoz létre, a magasabb harmonikusok elhanyagolhatóak, azonban a tranzisztornál a magasabb harmonikusok amplitúdója is viszonylag nagy.

A magasabb harmonikusok két okból is zavaróak az ember számára: egyrészt az emberi hallás számára a magasabb harmonikusok önmagukban sokkal zavaróbban hatnak mint a 2. vagy 3. harmonikusok, másrészt a magasabb harmonikusokat előállító karakterisztika nagymértékű intermodulációs torzítást is okoz, ami különösen zavaró a hallás számára.

Az intermodulációs torzítás érték arra ad viszonyszámot, ha kettő vagy több különböző frekvenciájú szinuszjel van a bemeneten, akkor a kimeneten mekkora lesz az összeg és különbségi frekvenciájú szinuszos komponensek aránya az eredeti bemenő jelek teljesítményéhez képest. Ezek az összeg és különbségi frekvenciájú jelek nincsenek az eredeti jelek frekvenciájával semmilyen arányban, azaz azokhoz képest disszonánsak, illetve zajszerűek. Így ez a fajta torzítás disszonáns háttérhangokat, illetve a hangerőtől függő értékű háttérzajt okoz, ami kellemetlen hangzás, illetve elfedi az eredeti hang halk részleteit (innen erednek azok a kifejezések, hogy a csöves erősítőknél (ahol ez a torzítás típus jóval kisebb) a hang "tisztább", "több részletet tartalmaz", "árnyaltabb"[3].

A második és harmadik harmonikus jelenléte viszont – különösen a mély hangok esetén – kifejezetten kellemes hatást kelt. Az emberi hallás rendelkezik egy olyan tulajdonsággal, ha egy hangnak csak az első két vagy három felharmonikusát továbbítjuk, akkor a fül ezek alapján képes visszaállítani és meghallani az eredeti alaphangot is, illetve ha az eredeti harmonikus jóval gyengébben van jelen, akkor sokkal erősebbnek halljuk azt (ráadásul egy kellemesebb, "világosabb" hangszínnel). Ezt a jelenséget használják ki egyes hangszerknél is, (pl. a tuba), illetve az ún. pszichoakusztikus basszus elvet felhasználó kisméretű, de meglepően erős mély hangokat produkáló házimozsi rendszerekben [4].

### *Negatív visszacsatolás*

A tranzisztoros készülékek stabil működését és alacsony torzítását negatív visszacsatolás alkalmazásával lehet elérni, aminek a lényege, hogy a torz kimenő jel egy részét invertálva

visszavezetik a bemenetre, amitől a harmonikus torzítás jelentős mértékben lecsökken [5]. Azonban, bár az össztorzítás lecsökken, a maradék torzításban a magas fokszámú harmonikusok aránya megnő. Ez amiatt történik, hogy a torz jelet a negatív visszacsatolás miatt újra átengedve az erősítő rendszeren, a torzítás tovább torzul. Így a második harmonikus visszavezetve negyedik harmonikust termel, a harmadik harmonikus hatodikot, amelyek egy része megint vissza lesz csatolva, s így tovább. Emiatt, bár az össztorzítás eredőben jóval kisebb lesz, azt viszont főként magas fokszámú harmonikusok fogják alkotni, emiatt az intermodulációs torzítás magas marad [1].

### *Határoló karakterisztika*

Visszacsatolás mentes esetben az elektroncsövek és a tranzisztorok határoló karakterisztikája hasonló egymáshoz, azonban a negatív visszacsatolás miatt a megépített tranzisztoros erősítők karakterisztikája jóval nagyobb kivezérlési szakaszon marad közel lineáris és a kivezérlési határ közelében hirtelen törnek le, amitől megint főleg magas fokszámú harmonikusok keletkeznek. A negatív visszacsatolást nem tartalmazó csöves kapcsolások fokozatosan mennek át a közel lineáris szakaszból határolásba, így itt elsősorban alacsony fokszámú harmonikusok keletkeznek [3]. A lágy karakterisztika sokkal alkalmasabb nagy amplitúdójú impulzusszerű zajok (sercegések, kattogások) "mellékhatások nélküli" csillapítására, tehát a bántóan zavaró hangok elnyomására.

### **Transzformátor**

Az elektroncsöves készülékekben szereplő kimenő transzformátor, ami a végerősítő csövek kimenetét illeszti a hangszóróhoz, szintén kulcsfontosságú szerepet játszik a kellemes hangszín előállításában [3]

Légmagos transzformátorok esetén a nemlineáris torzítás gyakorlatilag elhanyagolható, azonban a hangtechnikában vasmagos transzformátorokat alkalmaznak, ahol a mágneses fluxust továbbító vasmag erőteljes nemlineáris hiszterézisgörbével rendelkezik. Az okozott torzítás nagymértékben függ a megépített kapcsolat típusától. Régi csöves erősítőknél a végcső A osztályú üzemmódban működött és a kimenő transzformátor közvetlenül az anódra volt kapcsolva, így a transzformátor magja az anódáram miatt folyamatosan elő volt mágnesezve. Ekkor a transzformátor a vasmag mágnesezési karakterisztikájának egy lágyan változó szakaszán dolgozik és így csak főleg alacsony fokszámú harmonikusokat állít elő. További érdekesség, hogy nagyobb frekvenciákon a transzformátor induktív jellege miatt kisebb áramok folynak, így a torzítás is alacsonyabb, azonban mélyebb hangok esetén az induktív áram nő és a torzítás növekszik. Mély hangok esetén – ahogy azt már korábban említettük – a torzítás kifejezetten kellemes, mély hang kiemelő hatású.

Fontos azonban azt is megemlíteni, hogy a transzformátor "kellemes" torzítása csak A osztályú erősítők esetén igaz [6]. A később megjelent ellenütemű áramköri kapcsolások esetén a tekercseken átfolyó áramok mágneses tere kioltja egymást és ekkor a mágnesezési karakterisztika "durvább" szakaszára esik a vasmag munkapontja, amitől a torzítás (elsősorban a magasabb fokszámú harmonikusok mennyisége) megnő.

## Mágneses hangrögzítés

A mágneses hangrögzítésnél hasonló effektusok lépnek fel mint a transzformátornál: a hanganyagot mágneses hordozóra rögzítik, ami erősen nemlineáris tulajdonságú és hasonló görbével rendelkezik mint a transzformátor vasmagja, azaz a 0 mágnesezés környékén a legerősebb a torzítás. A hordozó nemlinearitása akkora, hogy előmágnesezés nélkül a torzítás elfogadhatatlanul magas lenne, ezért a magnetofonoknál nagyfrekvenciás váltakozó áramú előmágnesezést használnak. Az előmágnesező áram amplitúdója kb. tízszer nagyobb mint maga a jel, így a jel munkapontja kellően távol kerül a 0 közeli nagy torzítású szakasztól és megintcsak alacsony fokszámú harmonikusok keletkeznek [7].

Szintén érdekesség, hogy amíg az elektroncsöveknél és a transzformátor torzításnál elsősorban a második harmonikus dominál, addig a magnetofonoknál gyakorlatilag nincs második harmonikus, hanem jóformán csak harmadik harmonikus szerepel. Ennek oka a váltakozóáramú előmágnesezés, ami miatt a jelen keletkező torzítás teljesen szimmetrikus; szimmetrikus jelek Taylor sorfejtése pedig csak páratlan fokszámú komponenseket tartalmaz.

Ugyancsak fontos megemlíteni a magnetofon hangnál fellépő zajmodulációt is [8]. A magnetofonszalag nem egyenletes szemcsézettsége és a magnetofon futómű egyenetlen mozgása együtt egy alacsony frekvenciájú zajt produkál, ami nem hozzáadódik a felvételhez, hanem modulálja azt, ami a hangokat kicsit ingadozóvá és a nagyobb hangerejű hangokat sziszegővé teszi, ami leginkább a fűvós hangszerek illetve az orgona hangjára hasonlító effektus.

## Optikai hangrögzítés

Optikai hangfelvétel esetén a hangrezgéseknek megfelelően vezérelt villamos áramot egy fényvezérlő készülék segítségével fényrezgésekké alakítjuk át, és az ily módon vezérelt fényt egy vékony csíkban exponáljuk a filmszalagra. A rögzítésnek két fő típusa van. Az egyik az intenzitásos rögzítés, ahol a fényváltozás a szalagon arányos feketedést hoz létre. A másik módszernél magát a rezgést fényképezzük le és a hangsávban a teljesen fekete és teljesen fehér területek aránya hordozza a hanginformációt (transzverzális rögzítés) [9]. A rögzítési tökéletlenségek miatt mind a két módszernél fellépnek torzítások.

Intenzitásos rögzítésnél a fő problémát az okozza, hogy az expozíció és a film feketedése között erősen nemlineáris kapcsolat van. Régi filmeknél pedig a fényváltozásokat előállító ún. Kerr-cellák is további torzításokat okoztak. Ez a fajta torzítás nem igazán volt kellemesnek nevezhető: a filmeknek egyébként is nagy volt az alapzaja és a mellette megjelenő, gyakran 10%-ot is elérő torzítás kifejezetten fárasztó hatású volt.

Transzverzális rögzítésnél is fellépnek torzítások, ami abból adódik, hogy a hanginformációt hordozó fehér és fekete területek nem képesek ugrásszerűen átmenni egymásba, és a kettő közötti átmeneti tartomány a film előhívása során torzulhat: erős előhívás esetén az átmeneti tartomány átmegy feketébe, nem elégséges előhívás esetén pedig világos marad. Ennek hatására a rögzített jel, például egy szinuszjel, formája megváltozik: a szinusz felső részei csúcsosabbakká válnak, az alsóbbak pedig laposabbá, vagy fordítva. A rögzített hang ettől furcsán torz lesz: a mély hangok felerősödnek, harsogóakká válnak, a magasak pedig csillapodnak. Ez az ún. Donner-torzítás [10].

## Vezetékek

Egy nagyon vitatott téma a vezetékek által okozott hangtorzulás. A vezetékek által állítólag okozott torzítás nem túl erős és csak a drágább berendezések mellett válik hallhatóvá, ekkor viszont zavaró tud lenni. Néhányan előírják hogy a kábelek ára a teljes hi-fi berendezés kb. 10%-át kell kitegye, hogy a kábelek ne okozzanak problémát. Léteznek olyan különleges és állítólag nagyon kis torzítású oxigénmentes rézből vagy ezüstből készült audio kábelek, amelyek métere háromszázezer Forintba kerül. Mások szerint viszont az egész csak kitaláció és semmilyen különbség nem mérhető a különböző vezetékek között. Az audio fórumokon olvasható nagy viták ellenére sehol nem találtam olyan objektív cikket vagy leírást, ami meggyőzően igazat tudna adni az egyik vagy a másik fél részére. Oxigénmentes rézkábeleket ugyan használnak máshol, ipari környezetben is, azonban más célból: az ilyen anyagból készült generátor vezetékek hosszabb élettartamúak [11].

Amennyiben ez a torzítás típus tényleg létezik, akkor egy lehetséges magyarázat a vezetékek által okozott hangtorzulásra a réz vezetékek felületén, illetve a vezeték anyagát alkotó réz kristályszemcsék határain kialakuló réz-oxidok által okozott egyenirányító hatás. Mind a réz(I)-oxid, mind pedig a réz(II)-oxid ugyanis p típusú félvezető tulajdonsággal rendelkezik. Régebben például nagyáramú egyenirányítókat is készítettek réz-oxidból [12]. A varisztorok (feszültség hatására nemlineárisan viselkedő ellenállások) hasonló szerkezeti felépítéssel rendelkeznek: a szemcsés anyagszerkezetben az érintkező felületeken kialakuló diódák együttesen azt okozzák, hogy kis feszültségek (kis áramok) esetén az ellenállás érték nagy, majd egy bizonyos feszültség (áram) felett az ellenállás rohamosan csökkenni kezd. A vezetékek csatlakozó felületein, illetve a szemcse határokon létrejövő egyenetlen oxid szerkezet nagyon hasonlíthat a varisztorok szerkezetére, tehát lehetséges, hogy a hagyományos réz vezeték ellenállása a rajta átfolyó áram függvényében változhat. Ez a hatás nem túl nagy, azonban nagyobb átfolyó áramok esetén (például a hangszóró kábeleknél) a kis belső ellenállású hangszórók mellett a kismértékű ellenállás változás is okozhat észlelhető mértékű torzítást.

Természetesen a torzítás létezésének bebizonyosodása esetén sem kell azonnal elrohanni a kábelboltba és megvenni a legdrágább kábeleket, ugyanis az okok megismerése után egyszerű és olcsó ellenlépéseket lehet tenni a torzítás csökkentésére: például aranyozott csatlakozóvégek a felületi oxidáció hatásának elkerülésére, illetve vastagabb anyagú kábelek használata, ami hatására az ellenállás és így az ellenállás változás is csökkenni fog.

## Összefoglalás

Az előzőekben különböző hangtechnikai eszközök nemlineáris torzításait tekintettük át. Ezek egy része kellemes hatású (ilyen az elektroncsöves készülékek, a magnetofon, az előmágnesezett transzformátor torzítása), máskor viszont zavaró (tranzistoros készülékek, optikai hangfelvételek, vezetékek torzítása). A különbség a nemlineáris karakterisztikákban rejlik. Ugyanis az emberi hallás számára kellemesek az alacsony fokszámú harmonikusokat tartalmazó torzítások (különösen, ha csak mély hangoknál jelentkeznek). Egyes zajhatások is kellemesek lehetnek, ha azok fűvós hangszerekre emlékeztetnek. A magas fokszámú harmonikusok és az általuk okozott erősebb intermodulációs torzítás viszont kifejezetten kellemetlen.

A torzítások vizsgálatánál még van néhány nem lezárt kérdés. Ilyen például a vezetékek torzítása. Egy másik téma a Donner-torzítás szimulálása. Elektroncső és magnetofon szimulátorok már

kereskedelmi forgalomban kaphatóak, azonban még Donner-torzítás szimulátort sehol nem láttam publikálva. Ez szintén egy érdekes téma lehetne, ráadásul az első lépés a régi filmek Donner-torzításának digitális jelfeldolgozó eszközökkel történő csillapítására.

### Irodalomjegyzék

- [1] Daniel H. Cheever, "A new methodology for audio frequency power amplifier testing based on psychoacoustic data that better correlates with sound quality", University of New Hampshire, 2001, ch 1, pp. 2-34.
- [2] Barta István, "Rádiókészülékek és erősítők", Egyetemi tankönyv, Tankönyvkiadó Budapest, 1956, ch. 8, pp. 362-375.
- [3] Eric Barbour, "The Cool Sound of Tubes", IEEE Spectrum, 2005 October.
- [4] Daniel Ben-Tzur and Martin Colloms, "The Effect of MaxxBass Psychoacoustic Bass Enhancement on Loudspeaker Design", Presented at the 106th Convention of the Audio Engineering Society, Munich, Germany, May 8-11 1999, preprint 4892.
- [5] H. Black, "Inventing the negative feedback amplifier", IEEE Spectrum, 1977, pp. 55-60.
- [6] M. van der Veen and P. Touzelet, "New Vacuum Tube and Output Transformer Models Applied to the Quad II Valve Amplifier," Presented at the 114<sup>th</sup> Convention of the Audio Engineering Society, Amsterdam, Netherlands, March 22-25 2003, preprint 5748.
- [7] Fritz Winckel, "Technik der Magnetspeicher", Berlin, Springer, 1960. pp. 40-101.
- [8] Fritz Winckel, "Technik der Magnetspeicher", Berlin, Springer, 1960, p 372.
- [9] Lohr Ferenc, "A filmszalag útja", Magyar Filmintézet és Filmarchívum, 1941, ch 18. p 138
- [10] J. Webers, Handbuch der Film- und Videotechnik. München: Franzis, 1993, ch. 6.3, pp. 145-146
- [11] S. Sengupta, H. Soda, A McLean and J. W. Rutter, "A comparative study of the microstructures observed in statically cast and continuously cast Bi-In-Sn ternary eutectic alloy", Metallurgical and Materials Transactions, Vol. 31 A, January 2000. pp 239-242.
- [12] U.S. Patent 1,640,335 , (URL: <http://www.jmargolin.com/history/1640335.pdf>).