

A gép hangja Rejtett felharmonikusok a THD mögött

A nagy hanghűségű berendezések tervezésének legnagyobb kihívása az igazság és a szépség, a bal és jobb agyfélteke, vagy egyszerűbben szólva a zenehallgatás belső élményének és a mérések technikai világának összeegyeztetése. Ha nem tudja összeegyeztetni a kettőt, vagy ragaszkodik ahhoz, hogy csak az egyik létezik, akkor vakon repül. Mivel az elmúlt húsz évben hangszórórendszereket terveztem, az idő nagy részét azzal töltöttem, hogy összefüggéseket kerestem az érzékelési élmény és a mérések között. A sok lehetséges analitikai technika (frekvenciamenet, csoportfutási idő változás, hangszórók közötti fázisszög, poláris válasz a frekvencia függvényében, kumulatív vízesés diagram megjelenítése, IM torzítás a frekvencia függvényében stb.) mellett a nehéz rész annak eldöntése, hogy a mérések közül melyik mérési sorozat a legjelentősebb.

A hangszórótervezői körökben előforduló viták sokféle érvből fakadnak arról, hogy mely mérések a legfontosabbak. Egyetlen hangszóró sem tud "mindent" -a tervezők kénytelenek kiválasztani, hogy mely paraméterek a legfontosabbak, a többit pedig figyelmen kívül hagyják. Ezért hangzanak a különböző árkategóriájú hangszórók annyira különbözőképpen. A tervező különböző tulajdonságokra optimalizálta őket, a marketingkampány pedig a pillanatnyi divatos filozófián alapul. Ma a magas hatásfok, tegnap a minimál keresztváltók, előtte a lineáris fázis, még régebben az alacsony színezés, és egészen a hifi-biznisz őskoráig, a West Coast vs. East Coast Sound. Érted a lényegét!

Az elektronikával minden sokkal egyszerűbbnek tűnik. Nem kell aggódni a poláris válasz miatt, a tranziens válasz kiváló a hangszórókhoz képest, és szinte minden erősítő egyenletesebb frekvencia menetű és szélesebb sávú, mint a legjobb átalakítók - mikrofonok, fejhallgatók vagy hangszórók. Szóval mi miatt kell aggódni? Csak meg kell mérni a torzítást, és kész.

Sajnos ez nem ilyen egyszerű. Az elektronikában a szubjektív korreláció a teljes harmonikus torzítás (THD) és a ténylegesen hallott hangzás között közel nulla. Végül is egy low-fi rack-sztereó vevőnek sokkal alacsonyabb a THD-je, mint a legjobbnak tartott triódás erősítőnek. Ez azt jelenti, hogy "minden erősítő ugyanúgy szól"? Nem, nagy teljesítményű hangszórókkal biztosan nem. Igaz-e ennek a fordítottja - hogy a mérések értelmetlenek? Nem, ez sem igaz. Rengeteg olyan erősítő van, amelynek mérései szörnyűek, és valóban szörnyen is szól.

A hiba nem a hallgató szubjektív érzékelésében van, hanem magában a mérésben. Ebben nincs semmi újdonság. Mérhetsz, amennyit csak akarsz, de egy tömegspektrométer nem fog nagy különbséget találni egy középiskolai menza ebédje és egy négycsillagos étterem legjobb vacsorája között. Az ostoba állítás, hogy a tömegspektrométernek igaza van, és az éttermi vendégek valamiféle "placebohatással" áztatják magukat. Ez az egyszerű tudatlanság példája, amely a tudomány fügefalevéllal próbálja elfedni meztelenségét.

Az éttermi vásárlónak - vagy az elkötelezett hifi rajongónak - mindvégig igaza volt szubjektív észleléseikben. A komoly tervező feladata, hogy kiderítse, mi zajlik a felszín alatt, és ne engedje meg magának a homályos áltudományos handabandát az "eufónikus torzításról" és a "placebo hatásról". Jelenleg csak annyit mondhatunk biztosan, hogy az egyszerű THD értékek nem a megfelelő mérőszámok az elektronikában!

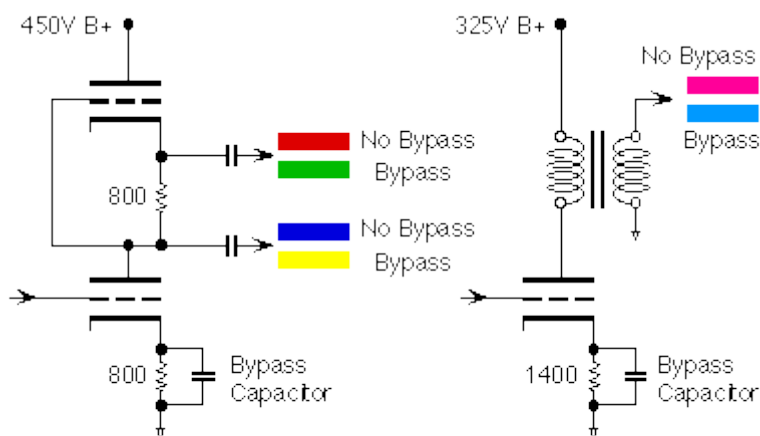
Amikor Matt Kamna (kollégám a Tektronix-nál) felajánlotta, hogy tesztel néhány elektroncsöves meghajtó áramkört a HP 3585A spektrumanalizátorával, megragadtam a lehetőséget. Már régóta kíváncsi voltam arra, hogy kiderítsem, miért hangzanak úgy a különböző áramkörök, ahogyan

hangzanak. Az erősítők áramköri változtatásai úgy hangozhatnak, mint egy hangszóró 1-2 dB-es keresztváltó változtatása, miközbe az áramköri változtatásnak nincs hatása az erősítő mért frekvenciamenetése!

Ami ezt érdekessé tette, az az, hogy a HP 3585A kivételes, 100 dB-es dinamikatarományt mutat a képernyőn, és 40 MHz-ig mér. (Éppen megfelelő a zajos DAC-ok és CD-lejátszók tisztítására.) A dinamikataromány további kiterjesztéséhez Matt egy Tektronix AA501A torzításelemző "distorsion-out" portját használta a HP 3585A bemenetének meghajtására. Az AA501A segítségével az alapharmonikust kiszűrtük, mielőtt az elérte volna a HP-t, amivel további 20 dB-t nyertünk, így a teljes mérési tartomány 0 dB-től -118 dB-ig terjedt.

Az elemzés egyszerűsítése érdekében 1 kHz-es szinuszhullámot választottunk, és a meghajtószintet úgy állítottuk be, hogy állandó 50 V effektív kimeneti szintet állítsunk elő. Ha a tesztfrekvencia ennél magasabb lenne, a felső harmonikusok az áramkörök véges sáv szélessége miatt egy kicsit jobbnak tűnhetnének, mint amilyenek valójában. Azt is akartam, hogy a fontos 2., 3., 4. és 5. felharmonikusok az 1 és 5 kHz közötti tartományba essenek, ahol a fül a legérzékenyebb a torzításra.

Az 50V effektív kimeneti szint megválasztása önkényes volt, de jó kompromisszumot jelent a 300B, a 2A3 és az EL34/KT88 meghajtási követelményei mellett. Az 50V effektív kimeneti szint mellett a műszer zajszintje 118 dB az alapjelhez képest, ami 0,0002%-os torzítás mérését teszi lehetővé.



6SN7 Test Circuits

Mind a hét tesztkörhöz ugyanazt a NOS 6SN7 kettős triódát használtuk. (A 7. áramkör, amely nem látható, egy hagyományos, kétfokozatú RC-kapcsolt kaszkód volt.) Az először 1940-ben tervezett 6SN7 még mindig az egyik leglineárisabb meghajtócső, a torzítás jellemzően többszörösen alacsonyabb, mint a 12AU7-é és a 6DJ8-é. A 6SN7-nél sokkal alacsonyabb torzítás eléréséhez olyan régiségeket kell választani, mint a 76, vagy 56 trióda és egy igazi oldtimer, a közvetlenül fűtött 26-os. A torzítási tesztekert meghagyom a "Vacuum Tube Valley" magazinnak!

(Megjegyzés: Tisztában vagyok vele, hogy nem mindenkinek van olyan egzotikus mérőeszköze, mint egy Tek SG505, Tek AA501A és egy HP 3585A. Mindezek a mérések megismételhetők egy olyan egyszerű tesztberendezéssel, mint egy jó teszt CD (Repeat-re állítva) és egy PC-alapú FFT analízátor. A széles tartományú torzítási mérésekhez hasznos lenne egy passzív LC notch-szűrőt építeni, amely eltávolítja az 1 kHz-es alapharmonikust a vizsgált áramkör kimenetéről. Az AA501A csak ennyit csinált, kiszűrte az 1 kHz-es alap jelet, és javította a HP 3585A analízátor képernyőn megjelenő felbontását).

6SN7 Harmonics	2nd	4th	6th	8th	10th	THD	Yp	Rk	mA
SRPP Cathode	-38	-91	-98	-103	-118	0.88	450	800	8
SRPP Ca & By	-34	-96	-92	-102	-120	1.6	450	800	8
SRPP Plate	-38	-80	-96	-103	-120	0.97	450	800	8
SRPP Plate & By	-34	-84	-90	-100	-120	1.88	450	800	8
Xfmr Coupled	-45	-84	-112	-112	-120	0.41	325	1400	7
Xfmr & Bypass	-40	-88	-110	-115	-120	0.76	325	1400	7
6SN7 Cascade	-45	-84	-91	-86	-90	1.23			

6SN7 Harmonics	3rd	5th	7th	9th	11th	THD	Yp	Rk	mA
SRPP Cathode	-58	-99	-108	-120	-118	0.88	450	800	8
SRPP Ca & By	-56	-95	-115	-120	-120	1.6	450	800	8
SRPP Plate	-56	-112	-108	-120	-120	0.97	450	800	8
SRPP Plate & By	-53	-100	-110	-120	-120	1.88	450	800	8
Xfmr Coupled	-60	-76	-92	-109	-120	0.41	325	1400	7
Xfmr & Bypass	-63	-80	-104	-110	-120	0.76	325	1400	7
6SN7 Cascade	-52	-83	-82	-96	-97	1.23			

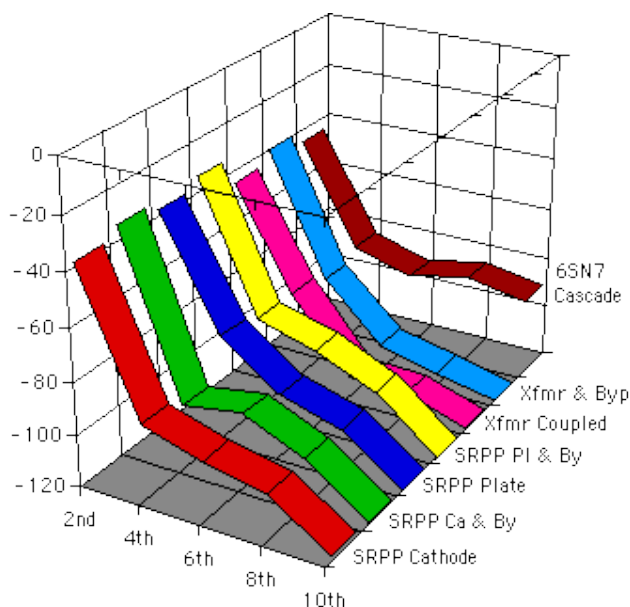
Amint a tesztberendezést beállítottuk és működésbe hoztuk, vélhetően sok finom részlet láthattunk, de mint mindig, a spektrumanalizátor kijelzőjét nehéz volt értelmezni, a 3., 4., 5. stb. harmonikus szintek mindenhol fel-le ugráltak. Nem volt nyilvánvaló, hogy az áramkörök bármelyike hogyan hoz létre egy adott harmonikus "alírást". Egy darabig gondolkodtam a problémán, és rájöttem, hogy az összes páros felharmonikust aszimmetrikus torzítási mechanizmusok, az összes páratlan felharmonikust pedig szimmetrikus torzítási mechanizmusok hozzák létre. Mattnek és nekem csak annyit kellett tennünk, hogy minden egyes felharmonikust dB szintjét leírtunk, szétválasztottuk a páros és páratlan felharmonikusokat, és ábrázoltuk őket. Ahelyett, hogy kézzel végeztem volna el az ábrázolást, a Excel-t használtam az adatok megjelenítéséhez.

Az adatok értelmezése

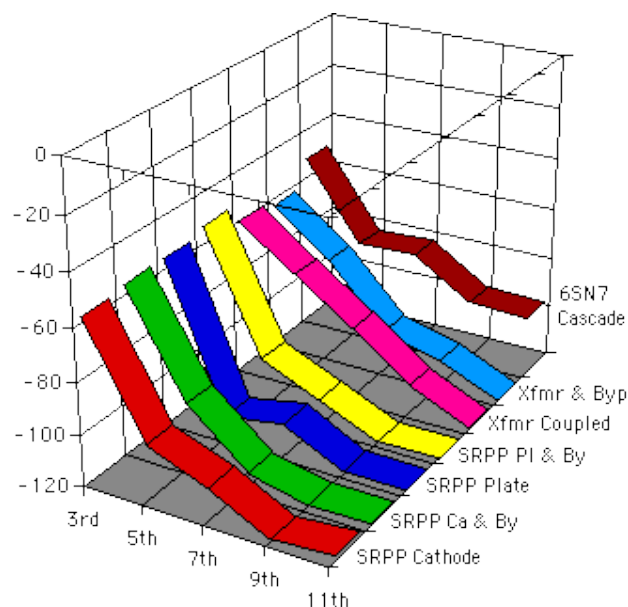
Egy kis Excel-diagramkészítés után nyilvánvalóvá váltak a rejtett minták. Mivel a páros és páratlan értékek különböző sebességgel csökkennek, ha a nyers spektrumanalizátor kijelzőjét nézzük, csak egy szaggatott fűrészfogas mintázatot látunk. Ezen a fűrészfog-mintázaton belül pár torzítási görbét láthatunk, egyet a páros felharmonikusokhoz, egyet pedig a páratlan felharmonikusokhoz. Ez a két görbecsoport nagyon eltérő hatással van az IM oldalsávokra.

A páros (aszimmetrikus) harmonikusok távoli oldalsávokat, míg a páratlan (szimmetrikus) harmonikusok közeli oldalsávokat hoznak létre. Gondoljon a CCIF 14 + 15 kHz-es teszthangjának spektrumára, és a kép egy kicsit világosabbá válik. A hullámforma egy kicsit úgy néz ki, mint egy AM jel, 1 kHz-es "vivővel". Ha ennek a hullámformának csak a csúcsát vágjuk le (aszimmetrikus, egyenletes harmonikus torzítás), akkor 1 és 29 kHz-en összeg- és különbségi jeleket kapunk. Ha a hullámforma tetejét és alját levágva (szimmetrikus, páratlan harmonikus torzítás), akkor 13 és 16 kHz-en összeg- és különbségi jeleket kapunk.

Az adatokat és a grafikonokat vizsgálva ltható, hogy a nyers THD-t szinte teljes egészében a 2. harmonikus okozza. A hagyományos THD "specifikációra" való támaszkodás veszélye az, hogy figyelmen kívül hagyja a magasabb harmonikusok komplex viselkedését és lecsengési mintázatát. A felső felharmonikusok egészen eltérő viselkedését elrejtik a hasonlóan tűnő THD-mérőszámok.



6SN7 Even Harmonics



6SN7 Odd Harmonics

Egyes 6SN7 áramkörök a harmonikusok kioltásának jeleit mutatják bizonyos felharmonikusoknál, másoknál nem, míg más áramköröknél a felharmonikusok sima, "tankönyvi" lecsengése figyelhető meg. A harmonikus kioltás egy olyan áramkörben, amely majdnem, de nem egészen push-pull (SeRies Push Pull), szintfüggő lehet, a nullpontok attól függően mozognak, hogy a triódák két görbéje hol metszi egymást. Más szóval, ne számítson arra, hogy a kioltási hatások kiszámíthatóak lesznek, ha csak nem fordít nagy gondot a dinamikus egyensúly fenntartására a jelszintek széles tartományában.

Talán ez az oka a különböző áramkörök szubjektív hangszínének, amely nem jelenik meg semmilyen frekvenciamenet mérésben. Amit a hallgató esetleg hall, az az áramkör zaj- és torzítási padlójának spektrális különbsége ami szubjektíven frekvenciamenet problémának hangzik, de nem az. A spektrális egyensúly szubjektív érzékelésének valószínűleg több köze lehet a zaj spektumának megváltozásához és az alsó/felső harmonikusok mintázatához, mint a tényleges frekvenciamenet eltérésekhez. A legtöbbször hallottunk már sötét hangzású tranzisztoros erősítőket vagy tompa hangzású "vintage" erősítőket amelyek frekvencia menete a mérések szerint egyenes, de a hangzásuk biztosan nem az!

Egy olyan apró változás, mint egy katód átblokkoló kondenzátor leltávolítása, megváltoztatja a felső-harmonikus spektrumot. Bár ez triviális változtatásnak tűnhet, jelentősen megváltoztatja a trióda működési jellemzőit. Ha egy triódát fix előfeszítéssel vagy katód átblokkoló kondenzátorral használunk, a cső kézikönyvében lévő μ , dinamikus lemezenállás (R_p) és a transzkonduktivitás (g_m) adatai megbízható útmutatót jelentenek a tervezéshez. Ha a katód kondenzátort elhagyjuk, az R_p és a g_m is megváltozik méghozzá jelentős mértékben.

A "közös bölcsesség" szerint, ha szándékosan elhagyja a katódköri kondenzátort, az helyi negatív visszacsatolást okoz ami linearizálja az áramkört. Ez igaz, de csak egy része a történetnek. Az is történik, hogy miközben a μ változatlan marad, a dinamikus lemezenállás jelentősen megnő, és a transzkonduktivitás jelentősen csökken. Például egy 6SN7 esetében, amelynek katóddenállása 800 ohm, az R_p 7700 ohmról 23 700 ohmra emelkedik, ami több mint háromszoros növekedést

jelent! A transzkonduktivitás is a korábbi érték egyharmadára csökken. Gyakorlatilag a cső teljesítménye nagymértékben leromlik - pontosan ugyanaz a hatás, mint a nagymértékű emissziócsökkenés.

Az RC-csatolású fokozatoknál súlyos következményei vannak annak, ha nem blokkoljuk át a katódelőállást. Az alacsony torzítás elérése érdekében a triódák szeretik, ha a terhelő impedancia legalább három-négyszer nagyobb, mint a cső dinamikus lemezellenállása. Mivel a cső terhelését RC-csatolással a következő fokozat rácsellenállásával párhuzamosan kapcsolódva a fix anód ellenállás állítja be, a terhelő ellenállás növelésére kevés lehetőség van, kivéve a B+ növelését, ami az erősítőben máshol okoz problémákat.

Ha az átblokkoló kondenzátort eltávolítjuk, a korábban kielégítő R_p / anód terhelés arány sokkal kedvezőtlenebbé válik, mivel a tényleges R_p most háromszorosára nőtt. Igaz, van helyi visszacsatolás, amely segít ennek leküzdésében. De maga a cső most egy olyan terhelést lát, amely sokkal alacsonyabbnak látszik, mint korábban, a munkaegyenes meredekebb lesz, ami a kimenő jel csúcsait a nagyon nemlineáris, alacsony áramerősségű tartományba viszi.

Ennek következményei vannak a keletkező torzítási spektrumra. A cső most már eredendően magasabb torzítással rendelkezik (kivéve, ha transzformátorral vagy mu-followerrel van terhelve), amit részben elfed a helyi visszacsatolás. Ez alacsonyabb 2. felharmonikusokat eredményez, de a felső felharmonikusok az anód által látott kedvezőtlenebb terhelés miatt rosszabbak lehetnek.

Az itt bemutatott adatokban a hatás nem nyilvánvaló, de aztán megint csak Matt és én kerültük az RC-csatolást, kivéve a hagyományos 2 fokozatú kaszkódáramkört, amely valóban magasabb felső harmonikus tartalommal rendelkezik. Bár nem mértük, de ha a hagyományos áramkörnek nem áthidalt katódjai lennének, talán még rosszabb lenne a helyzet. A hagyományos anód ellenállásokat kiváltó áramkörök kifejezetten jól működhetnek.

A harmonikusok egyenletes lecsengése különösen a transzformátorral csatolt áramkörben figyelemre méltó. A transzformátoros csatolás természetességével és "közvetlenségével" kapcsolatos izgalom oka a spektrális adatokat tekintve nyilvánvaló. Ez a felharmonikusok legjobb eloszlása, amit valaha láttam, szinte pontosan úgy néz ki, mint egy RCA "tankönyvi" spektrális eloszlása. A torzítás általános nagysága is lenyűgözően alacsony. Próbáljon meg olyan tranzisztoros áramkört találni, amely 50V effektív értéket tud szolgáltatni 1%-nál kisebb torzítással, visszacsatolás nélkül!

A különböző harmonikus spektrumok hangja

Mint fentebb említettük, a páratlan és páros felharmonikusok aszimmetrikus torzításként és szimmetrikus torzításként értelmezhetőek, ezért az IM torzításvizsgálatoknál megfigyelhető nagyon eltérő hatások. Ahogy D.E.L. Shorter a BBC-től az Electrical Engineering 1950. áprilisi számában rámutatott, a valódi zenét nagyon sok, egymáshoz közeli elhelyezkedő hang alkotja. Egy kórus vagy egy hegedű a legsűrűbb spektrummal rendelkezik. Shorter kimutatta, hogy mindössze három, egymástól közel eső hang esetén az IM összeg és különbségi oldalsávok száma meghaladja a sokkal egyszerűbb harmonikus sorozatokét. A hangok számának növekedésével az IM-oldalsávok száma sokkal gyorsabban nő, mint az egyszerű harmonikusoké. A határeset 3 azonos nagyságú hang; 2 hang esetén az IM körülbelül megegyezik a harmonikus torzítással, 4 hang esetén az IM jóval nagyobb, mint a harmonikus torzítás. Az olvasó fantáziájára bízom, hogy kitalálja, hány egyidejű hang van jelen a valós zenében - háromnál jóval több!

Az IM vs. THD hatása további következményekkel jár az általunk hallgatott zene típusára nézve. A jazz és a népzene ritkásabb spektrummal rendelkezik, így a THD nagyobb szerepet játszik a

szubjektív színezésben. Ezzel szemben az a cappella énekesek, a nagy kórusok és a hegedűk nagyon sűrű spektrummal rendelkeznek, sok, egymástól közel eső hanggal, amelyek fázisa állandóan változik. Az ilyen típusú zenét még kis mennyiségű IM is erősen rontja, de nem olyan érzékeny a viszonylag kis mennyiségű, alacsony rendű harmonikus torzításra. Innen erednek a végtelen audiofil viták, amelyek valójában azon alapulnak, hogy a hallgató milyen típusú zenét preferál.

(A zenészek a látszólagos lehetetlenség ellenére is képesek és képesek néhány másodpercig fenntartani a hangok azonos fázist. Ezt a saját bőrömön tapasztaltam meg az Audionics Shadow Vector quad dekóderrel végzett munkám során. Bizonyos lemezekon a dinamikus mátrix áramkörök időnként megőrültek. Kiderült, hogy ez a zenészek játékának rövid idejű fázis zárásai periódusai voltak. Az SQ-kódolt Loggins & Messina "Full Sail" albumon volt egy olyan szám, ahol a hegedű a bal hátsó részen, a szájharmonika pedig a jobb hátsó részen volt. Sztereóban és fejhallgatóban is remekül szólt, de a quad dekódolással a logikai detektor körbe-körbe kavarta a hangot a szobában, ahogy a zenészek tartották, illetve elvesztették a fázis zárt állapotot. Igazán furcsa hatás, és valószínűsíthetően nem a producer szándéka szerint).

Tehát attól függően, hogy milyen típusú zenét hallgatsz, a spektrális eloszlás és a torzítás osztálya (szimmetrikus vs. aszimmetrikus) befolyásolja a szubjektív hangszínt. Ez sokkal összetettebb, mint a népszerű sajtóban újranyomtatott leegyszerűsítő "a 2. harmonikus mindig jobb" duma.

A spektrális eloszlás preferálása nagy szerepet játszik egy egyébként egyenes frekvenciamenetű erősítő "hangszínében". A "spektrális hangszínről" való kifinomultabb gondolkodás megmutatja, hogy mennyire letértünk a helyes útról a digitális korban.

A visszacsatolás hatása a harmonikus szerkezetre

Az 1947-es Williamson-erősítő volt az a konstrukció, amely a leginkább népszerűsítette a "visszacsatolás minden bajra gyógyír" filozófiát. Érdekes, hogy az 1948 és 1956 közötti időszakban szinte az összes kereskedelmi forgalomban kapható hifi erősítő Williamson topológia volt (kisebb kivételtől eltekintve a Quad II, a McIntosh és az EV Circlotron). Ebben a meghatározó időszakban a "nagyobb teljesítmény, alacsonyabb THD" mantra lett az iparág hajtóereje. 1960-ra az ultra széles sáv szélesség, a nagy visszacsatolás és az AB osztályú EL34 és 6550 UL áramkörök uralták az iparágat.

Tizenkét év alatt a nagy torzítású eszközökkel szembeni hagyományos hangmérnöki előítélet elhalványult, és megnyílt az út a nagy teljesítményű pentódák és az AB osztályú működés előtt. Minden egyes "javulást" az eszköz torzításának növekedése jellemezte, amit aztán egyre több és több visszacsatolással "korrigáltak". A még nagyobb visszacsatolási aránnyal rendelkező tranzistoros áramkörök jelentették a következő kézenfekvő lépést, elvégre nagyobb a teljesítményük, alacsonyabb THD-jük, nagyobb sáv szélességük volt, és ami a legfontosabb, olcsóbb volt az előállításuk.

Norman Crowhurst írt egy lenyűgöző elemzést a felharmonikusok sorrendjét megsokszorozó visszacsatolásról, amelyet az "Glass Audio" 7-6. kötetének 20-30. oldalán újra leközölt. Egy csővel kezd, amely csak a 2. felharmonikusokat generál, hozzáad egy-egy újabb csövet (ami a 2., 3. és 4. harmonikusokat eredményezi), majd az egészet push-pullá teszi (ami a 3., 5., 7. és 9. harmonikusokat eredményezi), és végül, de nem utolsósorban, visszacsatolást ad az áramkörhöz, ami a harmonikusok sorozatát hozza létre a 81. harmonikusig. Mindez a komplexitás az "ideális" csövektől, amelyek csak a 2. harmonikust hoznak létre!

A valódi eszközöknél még több felharmonikus van. Az IM szempontjából a tényleges erősítőknél összetett és dinamikus zajszintjük van, köszönhetően a több száz összeg és különbségi frekvencia IM hatásnak. És akkor még nem is számoltuk a reaktív terhelések hatását, ami frekvenciafüggőséget ad a harmonikus struktúrához! (Reaktív terhelések esetén további felharmonikusok jelennek meg a teljesítménycsövek által látott elliptikus munkaegyenes miatt. Az elliptikus munkaegyenes a nagyon nemlineáris kisáramú tartományokig sülyedhet, ami a magasabb rendű felharmonikusok pillanatnyi növekedését eredményezi. Ez a spektrális "érdesedés" leginkább erős mélyfrekvenciás programanyag és nehezen hajtható tölcsér, vagy bass reflex mélyszugárzók esetén hallható).

Ahogy Crowhurst megjegyezte, a visszacsatolás többnyire csökkenti a 2. és 3. felharmonikusokat, a felsőbbeket pedig többé-kevésbé békén hagyja, vagy néha még növeli azok mértékét. A visszacsatolás becsapja az egyszerű THD-mérőt, de a spektrumanalizátor átlát a szitán. Kár, hogy a nyers teljesítmény és a szinte használhatatlan THD-mérések több mint 50 éven keresztül a mindenképp és mindenképp a végcélja lett. Ha több mérnöknek és kritikusnak lett volna hozzáférése a spektrumanalizátorokhoz, a nyers THD-mérések félrevezető jellegét korábban felfedezték volna, és az erősítők tervezése talán más irányt vett volna.

Ha az eszközszintű linearitás és a magas rendű felharmonikusok hiánya a cél, akkor a közvetlenül fűtött triódák használata az egyetlen járható út. A triódának kötött pentódák és sugártetódák torzításának körülbelül 1/3-a a torzítása. A spektrális eloszlás is jobb. Ebben az összefüggésben a Sakuma erősítőknél a 300B közvetlen fűtésű meghajtó csöveikkel kezd értelmet nyerni - egy 300B-vel, amely 65V effektív feszültséggel hajtegy nagyimpedanciás transzformátor terhelést, a meghajtónak nagyon alacsony lesz a torzítása, talán 0,1% a push-pull meghajtók esetében.

A meghajtócső néha kikerülhet a képből, ami a torzítást illeti, de ez sokkal ritkább, mint gondolnánk. Nagyon kevés erősítőnek van olyan meghajtó része, amelynek torzítása 1/3-a a kimeneti fokozatnak, és 5 dB vagy annál nagyobb a túlvezérlési tartaléka. Ez igaz a triódás, pentódás vagy tranzisztoros erősítőkre is! Sokkal jellemzőbb a kimeneti fokozathoz képest fele vagy több torzítás, és 1-2 dB túlvezérlési tartalék. Ennek eredményeképpen a 2A3 és a 300B erősítők mind másképp szólnak, a meghajtó áramkör linearitásától és áramellátásától függően.

Eszköz, topológia és harmonikus spektrumok

A fentiek mindegyike vonatkozik a triódákra, a hagyományos RC-csatolt, transzformátoros, induktivitással terhelt, SRPP és aktív terhelésű áramkörökre, például a mu-követőkre. Nem vonatkozik viszont a kaszkódba kapcsolt triódákra, pentódákra, bipoláris tranzisztorokra vagy MOSFET-ekre. Az eszközök e második csoportja nem rendelkezik a triódák egyszerű négyzetes átviteli karakterisztikájával, ehelyett sokkal összetettebb exponenciális görbével rendelkeznek, és ez a magasabb rendű harmonikusok sokkal nagyobb arányát jelenti.

Amikor összehasonlítja az eszközök specifikációit, nézze meg alaposan a 2. és a 3. harmonikus torzítás arányát egy alapvető SE áramkör esetében. Az alacsony torzítású triódák (6J5, 6C5, 6SN7, 6CG7, az új JJ ECC99 és a közvetlenül fűtött típusok) sokkal alacsonyabb 3. felharmonikusokkal rendelkeznek. A második csoportba tartozó eszközök esetében a 3. felharmonikus megegyezik a 2. felharmonikussal vagy nagyobb annál. A közepes és nagy torzítású triódák (12AU7, 6DJ8) a két csoport közé esnek. (A 6DJ8 ezért ismert a "nagy felbontású" tranzisztoros hangzásról - a torzítási spektrumaik nem sokban különböznek)!

Néha az emberek kicsit összezavarodnak az SRPP, a mu-followerek, a kaszkódok és a pentódák különbségein és hasonlóságain. A fontos különbségtétel az, hogy mi hajtja a felső cső rácsát, amely ugyanúgy viselkedik, mint az árnyékoló rács a pentódában. Hangfrekvenciákon, ha a felső rács követi az alsó eszköz rácsán lévő feszültség-ingadozást, az összetett eszköz úgy viselkedik, mint egy

trióda. Ha a felső rács váltakozó áramúlag a földön van, akkor a kompozit eszköz pentódaaként (vagy sugár tetródaaként) viselkedik. Ha a felső (vagy árnyékoló) rács a feszültségingadozás kis töredékére van csatlakoztatva, akkor ezt ultra lineáris működésnek nevezzük, a torzítási karakterisztika a trióda és a pentóda működés között valahol félúton van.

A triódaműködést alacsony anódenállás (R_p), alacsony vagy közepes erősítés (μ), közepes vagy magas Miller-kapacitás és alacsony torzítás jellemzi, a magasabb rendű felharmonikusok gyors lecsengésével. A triódák és más eszközök összehasonlítása azt mutatja, hogy a valaha gyártott erősítő eszközök közül ezek rendelkeznek a legalacsonyabb torzítással.

A pentóda (vagy kaszkód) működését nagyon magas anódenállás, közepes vagy nagyon magas erősítés (a terhelés impedanciájától függően), nagyon alacsony Miller-kapacitás és közepes vagy magas torzítás jellemzi a magasabb rendű felharmonikusok magas arányával. Ebből látható, hogy a pentódák (vagy kaszkódok) a legalkalmasabbak nagyon alacsony szintű erősítésre és RF frekvenciákra, ahol a torzítás kevésbé fontos, mint a zaj és a nagyfrekvenciás erősítés.

Az A osztályú tranzistoros erősítők megjelenésével, majd az elektroncsövek újjáéledésével a nyolcvanas évek végén (köszönjük Glass Audio) az eszköz linearitását ismét kezdik fontosnak tartani, különösen a közvetlenül fűtött triódás erősítők újjáéledésével. Az úgynevezett "nagy torzítású" SE direkt fűtött triódás erősítőket követő felháborodásában észrevétlen maradt, hogy a kimeneti cső torzítása valójában harmada az őt követő mint a következő legjobb eszközöké, a triódának kapcsolt pentódaé. (Nem így gondolja? Olvassa el a "Vacuum Tube Valley" magazint, amely éppen ezt az eredményt mutatja 300B-k, 6L6-ok, EL34-ek és 6550-ek esetében).

A tápegységeknél nincs túl sok választási lehetőség. Ahhoz, hogy a hangszóróba áramot juttasson, transzformátort kell használnia, ami csak annyit csinál, hogy a feszültséget az erősítőhöz igazítja. Bármilyen kísérlet a teljesítménycső anódja által látott terhelő impedancia növelésére elkerülhetetlenül csökkenti a teljesítményt, ezért a legtöbb triódás erősítő tervezője a teljesítménycső R_p -jének 3 és 6-szorosa közötti primer impedanciát választ. Ez észszerű kompromisszum a teljesítmény, az alacsony torzítás és a hangszóró számára megfelelő csillapítási tényező tekintetében. (A hangszóró által érzékelt csillapítási tényező közel áll az R_p és a primer impedancia arányához).

A meghajtó áramkörök esetében lehetőség van aktív terhelésre (μ -follower), transzformátoros csatolásra (ami nagyon nagy impedanciát biztosít a hangfrekvenciás tartományban), vagy közvetlen csatolásra a teljesítménycső rácsára (feltéve, hogy az előfeszítés-stabilitási problémák kezelhetők). A triódák és a pentóda/kaszkód/tranzisztor áramkörök nagyon különbözően reagálnak a megnövekedett terhelő impedanciákra.

A triódák esetében az erősítés mérsékelt növekedése, a torzítás nagymértékű csökkenése és a felső harmonikus torzítás még nagyobb mértékű csökkenésének lehetősége áll fenn. Valójában, ha a terhelő impedancia a meghajtócső R_p -jének 10-szerese vagy annál nagyobb impedancia, a trióda rávehető, hogy közel ideális triódaaként viselkedjen. (A gyakorlatban a μ -follower torzítása kölcsönhatásba léphet a meghajtócső torzításával, ami összetettebb átviteli görbét eredményez.)

A pentódák, kaszkódok és tranzistoros meghajtók esetében a terhelő impedancia növelése nagyon nagy erősítést, a torzítás lehetséges növekedését és a felső-harmonikus tartalom növekedését eredményezheti. Ez egy teljesen más kép, mint a triódáknál. Ha az erősítő rendelkezik visszacsatolással, a megnövelt erősítés felhasználható a visszacsatolási tényező növelésére. A visszacsatolás növelése nagymértékben csökkenti az alsó felharmonikusokat (2. és 3.), de amint azt korábban a Crowhurst-cikkben említettük, semmit sem tesz a nagyobb rendszámú felharmonikusok

csökkentése érdekében. A megnövelt visszacsatolás élesebb klippeléshez is vezet, ami csökkenti a dinamikataromány szubjektív érzékelését.

Tehát ha összehasonlítana 2 transzformátorral kapcsolt, alacsony MU-triódát egyetlen pentódával vagy egy aktív terhelésű tranzistorral, akkor az össz erősítés és a nyers THD hasonló lehet, de a felső felharmonikusok aránya szinte biztosan sokkal nagyobb lesz a nagy erősítésű, magas visszacsatolású áramkörrel. A régi Brook-reklámoknak igazuk van: az alacsony mu-triódák használata mindenütt a legjobb megoldás, még akkor is, ha a feladat elvégzéséhez néhány eszközzel többre van szükség.

Tápegységek és zajspektrumok

A puffer kondenzátoros és pi-szűrős tápegységek által keltett elektromágneses interferencia (EMI) zaj felelős a tonális színeződések jelentős részéért, valamint az alacsony szintű fátyolosodásért.

A közvetlenül az egyenirányítóhoz csatlakoztatott első tápegység kondenzátora nagyon gyorsan feltöltődik - a kapacitásokat egy rövid, de nagyon erős áramcsúcs "tölti fel". (A pi-szűrős tápegységek áramcsúcsának részletesebb tárgyalását lásd az RCA Radiotron Designers Handbook, Fourth Edition 30. fejezetében, a 30.1. ábrán).

Ami a legtöbb olvasó számára észrevétlen marad, hogy ennek a rövid áramcsúcsnak az impulzusszélességét viszont az erősítő pillanatnyi áramfelvétele modulálja. Ha az áramigény nagy, akkor a túske szélesebb, ha pedig alacsony az áramfelvétel, akkor a túske keskenyebb. A frekvenciatartományból nézve a szélesebb túske erősebb alacsony frekvenciájú komponensekkel rendelkezik, a keskenyebb túske pedig több magas frekvenciájú komponenssel ... bár mindkét túske legalább 100 kHz-ig vagy még tovább terjedő fésűs spektrumú, az első tápellátó kondenzátor maradék induktivitásától függően. A teljesítménytranszformátor szekunder/egyenirányító/szűrők zajspektrumát a teljes erősítő áramfelvétele modulálja.

Ha a puffer kondenzátor & pi-szűrős tápellátást Tesla-tekercsként (induktivitás, kommutátor, kondenzátor) képzeljük át, a kép tisztább lesz. Ennek a miniatűr RF-adónak az EMI-spektruma az áramfelvétel inverzével impulzusszélesség-modulált.

Ez nem is olyan rossz az igazi, állandó A osztályú áramköröknél, mivel az áramigény elméletileg állandó. A gyakoribb AB osztályú áramköröknél azonban katasztrófa. Az AB osztályú áramigény nagymértékben ingadozik, különösen a tranzistoros erősítők esetében, amelyek jellemzően néhány wattot fogyasztó üresjáratban működnek. Ez azt jelenti, hogy a tápegység zajspektruma (amely az RFI-frekvenciákra is kiterjed) a zenével együtt folyamatosan változik.

Ez lehet a lengőfojtós tápegységek egyetlen legnagyobb előnye. Az egyenirányítón átmenő áramimpulzus sokkal szélesebb, és nem befolyásolja jelentősen az áramigény. Úgy néz ki, hogy azok a népek, akik leragadta a fűtés és a félvezetős erősítők puffer kondenzátoros tápellátásánál (a legrosszabb fajta), talán bölcsen tennék, ha az egyenirányító hidat kis értékű ellenállásokkal lassítanák, ahelyett, hogy a csillapítást az első szűrő kondenzátor kiszámíthatatlan ESR-értékére bíznák. Valószínűleg ez az oka annak, hogy egy átblokkoló fólia kondenzátor hozzáadásával az ilyen típusú tápegységek hangja rosszabb lesz. Az átblokkoló fólia kondenzátor csökkenti az effektív ESR-t, az áramimpulzus felgyorsul és az EMI-kibocsátás megnő.

Ez a miniatűr Tesla-tekercs nagyon érzékeny lesz a fizikai elrendezésre, a teljesítménytranszformátorban lévő kóbor C-ekre és R-ekre, valamint az első kondenzátorban lévő kóbor L-ekre és R-ekre. Az egyenirányító ferritgyöngyökkel való lassítása szintén nem lehetséges, mivel az áramimpulzus nagyon gyors, nagyon nagy, és könnyen telítheti a ferritet. A kis

ellenállásértékek induktivitással történő átblokkolása, egy-egy a híd mindkét lábán, a legjobb módja annak, hogy mérsékeljük az RF-kibocsátást a forrásnál. Nem sok esély van arra, hogy valami olyan inert dolog telítődjön, mint egy huzalellenállás és az átblokkoló induktivitás egy légmagos, ott sincs telítődés.

A teljesítménytranszformátor, az egyenirányító híd és az első kondenzátor közötti távolság határozza meg a zajforrás-antenna hurokterületét, és az áramimpulzus csúcserőssége határozza meg, hogy ez az antenna mekkora (valószínűsíthető) teljesítményt bocsát ki. Egy olyan egyszerű dolog, mint a tápvezetékek összesodrasa a hozzá tartozó földvisszavezetéssel, 20 dB-lel csökkentheti az antenna emisszióját. A zajcsökkentéshez a zajforrásnál (bármely gyorsan kapcsoló aláramkörnél) történő zajcsökkentés, valamint az RF-stílusú árnyékolási technikák kombinációjára van szükség.

A mainstream AES-iskola mérnökei sok éven át nevéssé tették az "audiofil" tápkábeleket, de a félvezetős egyenirányítós tápegységek EMI-kibocsátása nem vicc. Szópon nehéz azonosítani (a nyomvonal csak egy kicsit vastagabbnak tűnik), de egy széles sávú spektrumanalizátor egyértelműen megjeleníti a kapcsolóeszközök által létrehozott fésűs spektrumot. A csilli-villi tápkábelek talán azzal teszik a legnagyobb jót, hogy részben árnyékolják a zajos tápegységeket más félvezetős berendezésektől és CD-lejátszóktól.

Persze ez felveti a kérdést: miért tűrjük egyáltalán a zajos tápegységeket? A széles sávú zaj minden irányba sugárzik: az áramköri lapokba, a földelésbe, az alváz belsejébe és a tápkábelből kifelé. Ha bármilyen részben szűrt digitális maradék lebeg (és ez még a legdrágább DAC-ok és CD-lejátszók esetében is elkerülhetetlen), a tápegység zaja keresztmodulálódik a digitális maradékkal, amint az első nemlineáris áramköri elemmel találkozik. Mennyire lineáris a legtöbb op-erősítő 1 MHz-en? Nem nagyon. Ez a videóerősítő területe, nem az audio.

Minden alkalommal, amikor transzformátort, félvezetős dióda hidat és bemeneti kondenzátort lát, akkor zajproblémája van. Igen, a HEXFRED-ek, a Schottky-diódák és a snubber áramkörök segítenek. De a rendkívül gyors töltőáram-impulzus problémája továbbra is fennáll, és az AB osztályú működés tovább rontja a helyzetet. (Ha azt hiszi, hogy az előerősítők mentesek, gondolja át újra. Nagyon kevés opamp A osztályú. A legtöbb AB osztályú, és sok közülük kvázi-komplementer AB osztályú is). Az induktivitások, árnyékolt felépítés és RF zajcsökkentési technikák alkalmazása az audioberendezésekben már évtizedek óta esedékes. Az egyetlen ok, amiért ez ilyen sokáig tartott, az az, hogy kevés hangmérnök (még kevésbé digitális mérnök) ismeri az RF technológiát, beleértve a széles sávú spektrumanalizátorok rutinszerű használatát az áramkörök "szaglászására" a zavaró emissziók szempontjából.

Záró gondolatok

Az erősítőkről szóló rövid értekezés célja, hogy rámutasson arra, hogy a hagyományos mérések hogyan vezetnek az erősítők tervezésénél bölcs döntésekhez. Az alacsonyabb rendű felharmonikusok a magasabb rendszámú felharmonikusokhoz képest szinte hallhatatlanok, mégis szinte minden THD-mérést meghatároznak! A mérőműszer a tervezőt, az értékelőt, a kereskedőt és a fogyasztót is elkormányozza a jó hangzástól.

Ez a klasszikus mese a részeg emberről, aki az utcai lámpa alatt keresi a kocsikulcsát, pedig gyanítja, hogy teljesen máshol vesztette el. "Itt jobb a fény!" - mondják a mainstream mérnökök, a kereskedők és a magazinok kritikusai - de a jó hangzás kulcsa biztosan nem ott van, ahol az audioipar keresi.

Ha így lenne, akkor miért szólnak a 40 évvel ezelőtt készült sztereó LP-k, amelyeket 65 éves, közvetlen fűtésű triódákkal erősítettek, sokkal jobban, mint a mai digitális hangzás, amelyet 0,001%

THD-vel játszanak le a 0,001%-os THD-vel rendelkező, tömegfi-rack sztereókon keresztül? A különbségek a mass-fi és a valódi high fidelity között olyan egyértelműek egy (nyitott gondolkodású) hallgató számára, mint a nap.

Abban a furcsa helyzetben vagyunk, hogy ahogy a hangszórók egyre jobbak lesznek, a vákuumcsöves áramkörök valódi érdemei egyre nyilvánvalóbbá válnak. Végül is, még J. Gordon Holt is "A" osztályú minősítést adott a Crown DC-300 tranzisztoros erősítőjének 1971-ben. Akkoriban a szerényebb árú Dyna Stereo 70 alacsonyabb minősítést kapott - mégis, modern hangszórókkal a DC-300 hallgathatatlan, a Dyna pedig egyre jobban szól. A hatvanas évek elejének belépő szintű EL84-es erősítői (Scott 299, Eico és Dyna SCA-35) a mai hatékonyabb és sokkal átláthatóbb hangszórókkal figyelemre méltóan természetesen és valóságosan szólnak.

Nincs okunk azt hinni, hogy a hangszórók nem fognak tovább javulni, hiszen az anyagtudományban mindenféle új innováció van a láthatáron, és a számítógépes modellezési technikákban is évről évre jelentős előrelépések történnek. Szintetikus gyémántkúpok, valaki?

Itt az ideje, hogy egyszer és mindenkorra leromboljuk az "eufonikus torzítás" mítoszát, és felfedezzük az erősítő torzításának valódi és finom forrásait, amelyeket az emberek valóban hallanak. Amint megtaláljuk azokat a méréseket, amelyek valóban segítenek, nem pedig hátráltatnak, könnyebb lesz olyan elektronikát építeni, amely barátságos a hallgató számára. Remélem, ez a cikk elgondolkodtatja az embereket, és ami a legfontosabb, saját maguknak hallgatják meg!