

Tranzistorový zvuk a počítačové simulace příčin jeho vzniku

Ing. Bohumil Federmann

Střední škola informatiky, elektrotechniky a řemesel
Rožnov pod Radhoštěm, Školní 1610
756 61 Rožnov pod Radhoštěm
bohumil.federmann@roznovskastredni.cz
federmann@seznam.cz

Abstract:

Účelem příspěvku je poukázat na mnohé, doposud nevyřešené, či často přehlížené problémy v oblasti zpracování zvuku a možnosti jejich řešení za pomoci moderních výpočetních prostředků a počítačové simulace. Příspěvek vychází z vědecké studie vlastností vnímání zvuku, které byly zadokumentovány v souvislosti s vývojem digitálních standardů "super audio compact disk" (SACD) a "digital versatile disk audio" (DVD-audio). Dále je v příspěvku zúročena autorova mnohaletá osobní praxe, popsána Dynamická saturace diferenciálního stupně s odpovědí na příčiny vzniku "Tranzistorového zvuku", které nebyly doposud nikým publikovány.

1. Úvod

Odborníci i veřejnost si často kladou otázku, jak je to s infrazvukem a ultrazvukem. Panuje převážně názor, že obě oblasti nás nemusejí zajímat, neboť slyšíme pouze zvuk, který je v akustickém pásmu. Mnozí se pak podivují, že živý koncert skýtá naprosto jedinečný zážitek, kdežto jeho záznam je poněkud ochuzen.

Celá problematika sahá do samotných počátku přenosu, reprodukce a záznamu zvuku. První přístroje byly postaveny na bázi elektronek, později se přidaly první tranzistory, které vedly k integraci a vznikly první integrované části přístrojů. Dlouhou dobu se jednalo o přístroje analogové, které postupně začaly doplňovat a později vytlačet přístroje digitální. Dnes máme signál i přístroje analogové i digitální.

Na problematiku šířky pásma mají jednoznačný názor převážně výrobci zesilovačů, kteří se omezili na akustické pásmo a vše ostatní popírají, stejně jak "Tranzistorový zvuk", který vzniká převážně v oblasti nad akustickým pásmem. Jakékoliv rozšíření přenášeného pásma by výrobcům zesilovačů nabouralo zažitě zvyklosti a mohlo přivodit mnohé komplikace, proto je často fakta nezajímají. Výrobci elektronkových zesilovačů naopak zastávají názor, že právě ty jejich zesilovače jsou ty lepší, s tvrzením, že měření zkreslení není tím pravým obrazem kvality zesilovačů.

Jinak je tomu u Hi-Fiů, hudebníků a odborníků z oblasti věd lékařských, kteří nejenom slyší a vnímají odlišnosti akustického vjemu při přítomnosti infrazvuku a ultrazvuku, ale jsou schopni jeho vliv změřit a zadokumentovat. Zde byly při vývoji SACD a DVD-audio provedeny rozsáhlé studie pod vedením T. Ooahashiho.

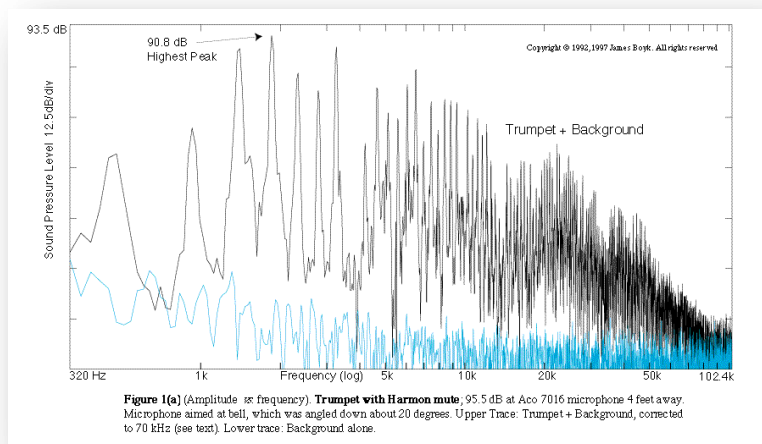
V německém Deutsches Institut für Normung (DIN) v roce 1973 vytvořili celosvětový standard, normu DIN 45500 pro Hi-Fi, která nikterak nepostihovala "Tranzistorový zvuk", nebyly metody, jak jej měřit, byli jen zarytí Hi-Fi, kterým tento zvuk vadil a dodnes vadí. Vznikla řada měřících metod s možností měřit zkreslení, ale žádná metoda nedokázala sjednotit poslechové hodnocení s měřením elektronickými přístroji. Někdy při poslechu nevadí zkreslení jednotky procent a jindy je lidské ucho citlivé k setinám procent. Obecně lze říci, že

ucho bývá citlivější na zkreslení vzniklé v polovodičových zesilovačích se silnou zápornou zpětnou vazbou.

Abych objasnil samotné příčiny vzniku zkreslení, zabývám se v příspěvku chováním diferenciálního stupně v zesilovači se silnou zápornou zpětnou vazbou, jehož vlastnosti lze názorně simulovat pomocí moderních simulačních programů. Pochopení samotné podstaty vzniku nežádoucího zkreslení může pomoci lépe posoudit vlastností zesilovače stejně jako vhodně řešit jeho topologii.

Hudební profesor James Boyk

Hudební profesor James Boyk se dlouhodobě zabýval vyššími harmonickými. Přes omezení na 102,4kHz,



Obrázek 2 Naměřené frekvenční spektrum u trumpetů při základním tónu 465,4Hz

Akustický signál a jeho záznam

Analogový záznam

Analogový signál se v počátcích nikterak výrazně při záznamu neupravoval. Na vinylové desky se zaznamenávalo kolik dovolil záznamový materiál a záznamové zařízení. Pro magnetický záznam byl rozhodujícím faktorem vysokofrekvenční předmagnetizační kmitočet, v

Instruments With Harmonics				
Fig.	Instrument	SPL (dB)	Harmonics Visible To What Freq.?	Percentage of Power Above 20 kHz
1.	Trumpet (Harmon mute)	96.	>50 kHz	0.5
2.	Trumpet (Harmon mute)	76.	>80 "	2.
3.	Trumpet (straight mute)	83.	>85 "	0.7
4.	French horn (bell up)	113.	>90 "	0.03
5.	French horn (mute)	99.	>65 "	0.05
6.	French horn	105.	>55 "	0.1
7.	Violin (double-stop)	87.	>50 "	0.04
8.	Violin (<i>sul ponticello</i>)	77.	>35 "	0.02
9.	Oboe	84.	>40 "	0.01

Instruments Without Harmonics				
Fig.	Instrument	SPL (dB)	10 dB Above Bkgnd. to What Freq.?	Percentage of Power Above 20 kHz
10.	Speech Sibilant	72.	>40 kHz	1.7
11.	Claves	104.	>102 "	3.8
12.	Rimshot	73.	>90 "	6.
13.	Crash Cymbal	108.	>102 "	40.
14.	Triangle	96.	>90 "	1.
15.	Keys jangling	71.	>60 "	68.
16.	Piano	111.	>70 "	0.02

Obr. 1 Naměřené hodnoty frekvenčního rozsahu některých hudebních nástrojů

kteří bylo zapříčiněno rozsahem použitých přístrojů, jeho měření dokladují, že v každé skupině hudebních nástrojů je alespoň jeden, který svým frekvenčním rozsahem přesahuje hranici 102,4kHz.

U některých nástrojů je výkon nad akustickým pásmem až neskutečný. Největší podíl měly činely se svými 40% či Key jangling (cinkání klíči) se svými 68%.

obou případech se zaznamenávaly kmitočty daleko nad 20kHz. Některé prameny uvádí, že záznam mohl sahát daleko přes 100kHz.

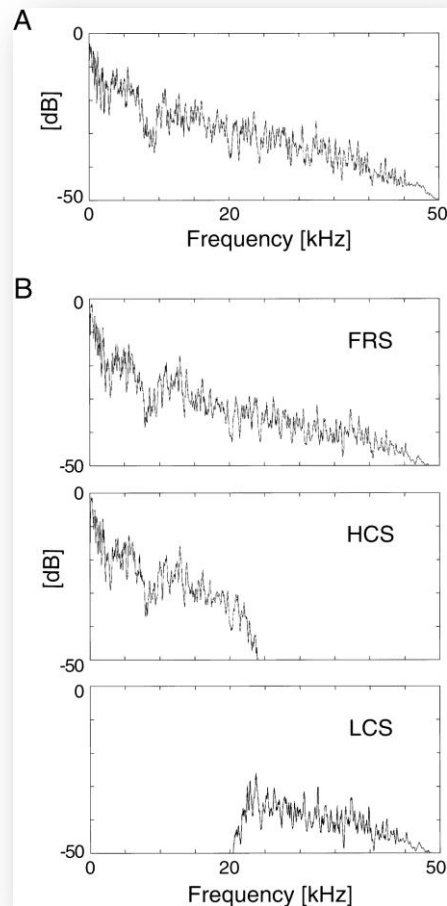
Digitální záznam

Digitální záznam byl prováděn nejčastěji 44kHz a 16bit převodníkem. 16bit záznam umožnil zaznamenat větší dynamiku signálu řádově 90dB oproti cca 60dB, jak tomu bylo u analogových záznamů, ale frekvenční rozsah byl striktně omezen do cca 20kHz!

Omezením frekvenčního pásma na 20kHz byla dočasně vyřešena problematika zpracování signálu nad 20kHz.

T. Ooahashiho, vývoj SACD a DVD-audio

Japonský tým T. Ooahashiho, složen z deseti japonských univerzit a výzkumných ústavů (Oohashi, Tsutomu, Emi Nishina, Manabu Honda, Yoshiharu Yonekura, Yoshitaka Fuwamoto, Norie Kawai, Tadao Maekawa, Satoshi Nakamura, Hidenao Fukuyama a Hiroshi Shibasaki), pracoval na vývoji nových digitálních standardů "super audio compact disk" (SACD) a "digital versatile disk audio (DVD-audio), přičemž zkoumal vliv vyšších harmonických na lidské smysly,

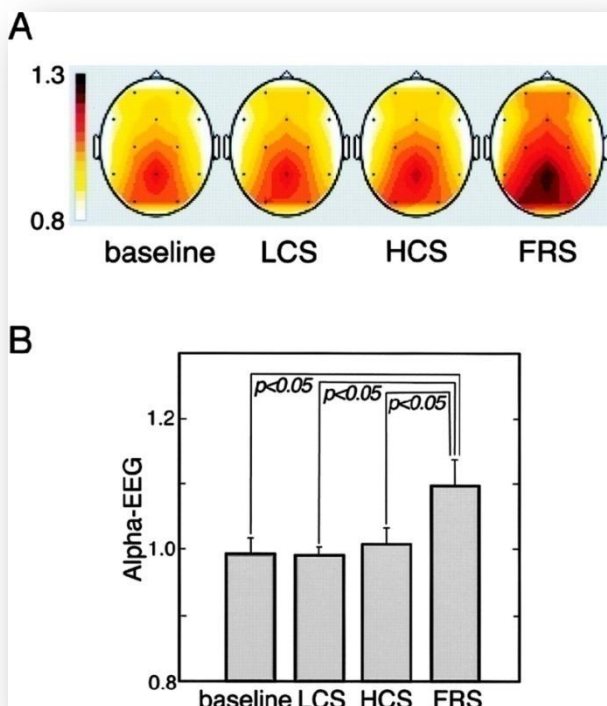


Obr. 3 Rozdělení frekvenčního pásma

následně neurologové publikovali výsledky v Journal of Neurophysiology a na konferenci AES v roce 2000.

Zpráva říká, že hudební signál (FRS), kterým byla hudba z ostrova Bali, neboť právě ta má značný podíl vyšších harmonických, byl rozdělen na dvě pásma, do 20kHz (LFC) a nad 20kHz (HFC). Nikdo z posluchačů nebyl schopen samostatně rozpoznat signály nad 20kHz.

Byla zkoumána mozková aktivita na takto rozdělený signál. Výsledek jednoznačně prokázal, že pokud působí na lidské smysly samostatně pásmo nad 20kHz, mozek jej nechává bez povšimnutí, pokud působí samostatně pásmo do 20kHz EEG, vykazuje jisté elektrické aktivity, které se velmi



Obr. 4 EEG, měření mozkové aktivity na jednotlivá pásma

výrazně zvýší při působení obou frekvenčních pásem.

Psychologická měření zcela jednoznačně prokázala, že zvuk obsahující obě pásma vyvolává u posluchačů příjemnější pocity než stejný zvuk bez horního pásma.

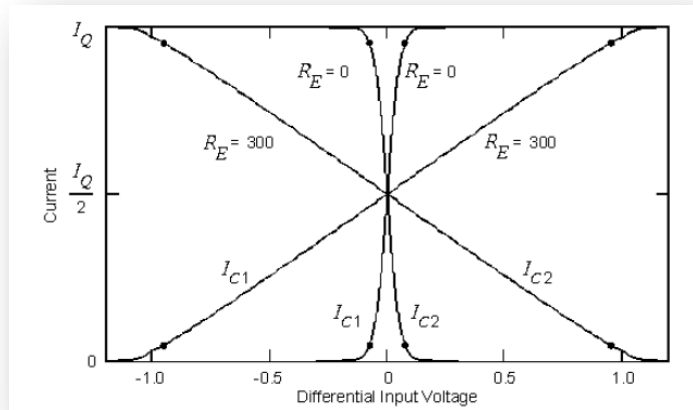
Vlastnosti SACD a DVD-audio

Výzkum provedený Japonským týmem T. Ooahashiho vedl k novému standardu SACD a DVD-audio, jejichž frekvenční rozsah sahá do 100kHz. Převod je prováděn 24bit převodníkem. Dynamický rozsah se tak zvýšil na cca 140dB. Frekvenční rozsah však vrátil část problémů se zpracováním signálu nad 20kHz a audio zesilovače by měly běžně, bez znatelného zkreslení přenést pásmo sahající nad 100kHz.

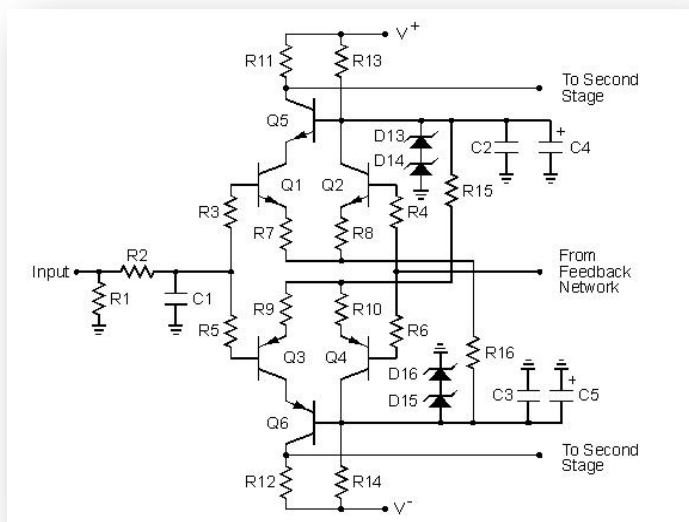
Walter Jung: OP Amp Audio

Již Walter Jung a mnozí další se zabývali řešením problematiky zesilovačů se silnou zpětnou vazbou. Jejich pozornost byla soustředěna na vstupní diferenciální zesilovač a na jeho dynamickou saturaci.

Odvodili velikost vstupního diferenciálního napětí, kdy dochází k dynamické saturaci vstupní diferenciální dvojice tranzistorů.



Obr. 5 Hodnoty vstupního diferenciálního napětí, při proudu 1mA $U_{dif}=57mV$ stanoveno jako limitace



Obr. 6 Topologie W. Marshalla Leacha s emitorovými degeneračními odpory

Topologie W. Marshalla Leacha

W. Marshall Leach se věnoval zesilovačům s nízkým zkreslením TIM (transient intermodulation distortion). K dosažení šířky pásma alespoň 400kHz používal tranzistory s $F_T=8,5MHz$, vstupním R-C filtrem upravoval rychlost přeběhu na cca 60V/s a celková šířka pásma byla větší jak 220kHz.

W. Marshall Leach však nikdy nikomu nedoporučoval, aby měřil zesilovač při frekvencích nad 20kHz při plném výkonu.

Koncové tranzistory jsou tepelně velmi namáhané a mohlo by dojít k jejich zničení

Vymezení rozsahu simulací

Pro účely příspěvku jsem simulaci omezil na pásmo od řádu jednotek Hz až do řádů stovek kHz. Nezabýval jsem se jednotlivými druhy zkreslení jako jsou TIM (transient intermodulation distortion), SID (slew induced distortion) ani DIM (dynamic intermodulation distortion), stejně tak limitací, přechodovým zkreslením a pro koncové tranzistory nebezpečnými příčnými proudy.

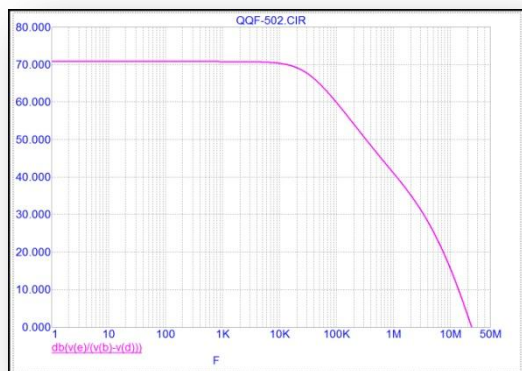
Omezil jsem se pouze na zkoumání poměru vstupního diferenciálního zesilovače, které dostatečně popíše následující simulace:

1. - frekvenční závislosti zesílení A_u dané topologie.
2. - závislost kolektorových proudů na U_{dif} .
3. - závislost proudového zesílení na U_{dif} .
4. - linearita v závislosti na velikosti U_{dif} .

Frekvenční závislosti zesílení A_u

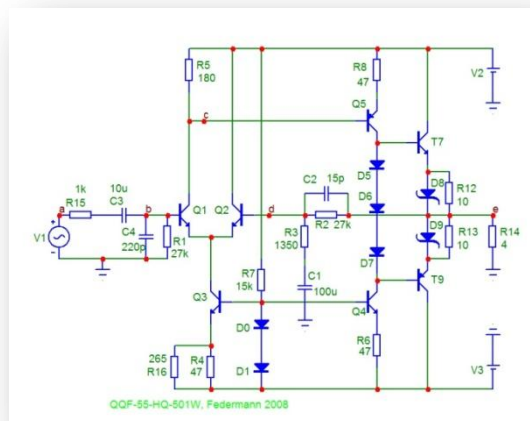
Různé topologie tranzistorových zesilovačů včetně integrovaných mají různé charakteristiky závislosti A_u na frekvenci, pro všechny však nad jistou mez platí pokles zesílení s rostoucí frekvencí.

Budeme vycházet z maximálního výstupního napětí, například $U_{ef}=20V$, pak $U_s=28V$, dle obr. 8 při zesílení cca 70dB na 1kHz. Tomuto odpovídá $U_{dif}=10mV$. Při frekvenci 200kHz však zesílení pokleslo na 54dB a pro dosažení stejného výstupního napětí $U_s=28V$ je již zapotřebí $U_{dif}=56mV$. Samozřejmě pro odlišné zapojení platí odlišné hodnoty.

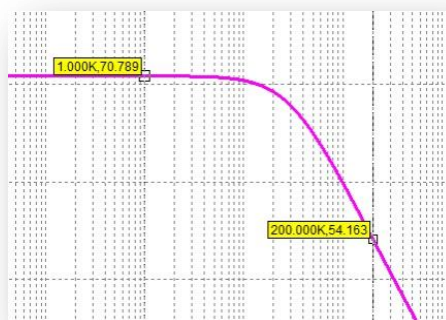


Obr. 9 Závislost zesílení A_u na frekvenci

11, kde je znázorněna závislost kolektorových proudů na U_{dif} a jejich první derivace, jež vyjadřují závislost proudového zesílení na U_{dif} .



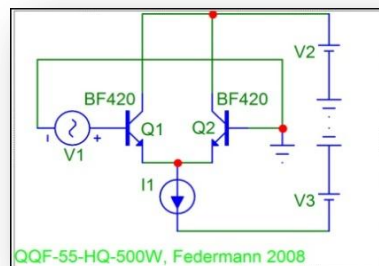
Obr. 7 Příklad zapojení zesilovače



Obr. 8 Detail poklesu zesílení

Závislost kolektorových proudů na U_{dif}

Chování vstupního diferenciálního zesilovače znázorněného na obr. 10 popisuje dostatečně obr.



Obr. 10 Zapojení

Závislost proudového zesílení vstupních tranzistorů na U_{dif}

Na obr. 11 stejně jak na obr. 5 je patrná závislost kolektorových proudů na U_{dif} .

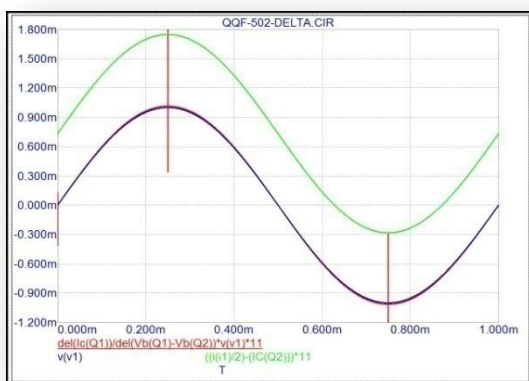
Walter Jung a W. Marshall Leach považovali za saturaci vstupních tranzistorů, jimiž teče proud 1mA, napětí $U_{dif} = 57\text{mV}$.

Na grafech je patrné, že s rostoucím proudem se hranice pro saturaci zvyšuje. První derivace prozrazuje závislost proudového zesílení i jeho pokles v závislosti na velikosti U_{dif} .

Dynamická saturace

Vycházíme z akustického signálu, jehož amplituda i frekvence jsou trvale proměnné, obě hodnoty mohou nezávisle na sobě dosahovat maxima.

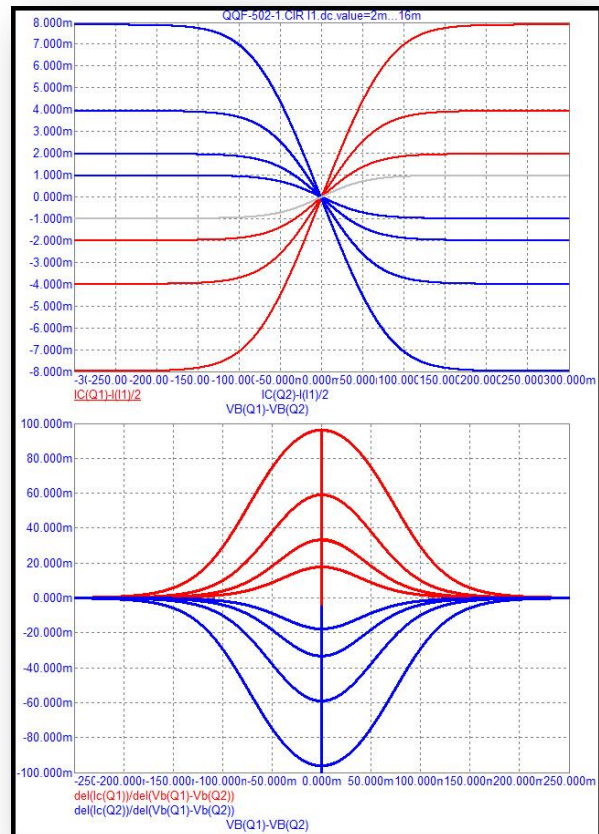
V případě nejvyšších frekvencí s velkou amplitudou nastane stav, že zesilovač má při dané frekvenci bez zpětné vazby malé zesílení a pro dosažení požadovaného napětí na výstupu potřebuje velké U_{dif} . V našem případě vyšlo při frekvenci 200kHz a výstupním napětí $U_s = 28\text{V}$ $U_{dif} = 56\text{mV}$.



Obr. 12 Závislost výstupního proudu na $U_{dif} = 1\text{mV}$

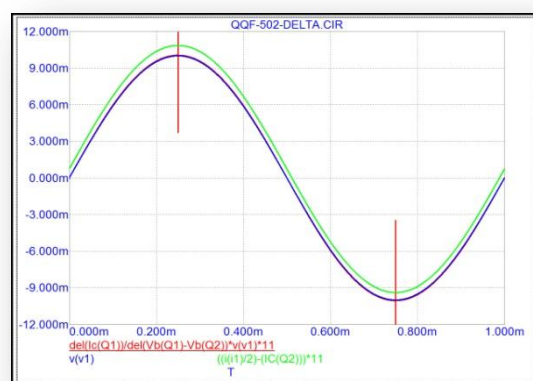
Saturaci můžeme nazvat "Dynamickou saturací", neboť trvá pouze po čas rychlé napěťové změny akustického signálu, která obsahuje vysoké harmonické.

V praxi jsou většinou vyšší harmonické s menší amplitudou, kterou můžeme při výpočtu a simulaci přiměřeně zohlednit.



Obr. 11 Závislost proudového zesílení na U_{dif}

Jak vyplývá z následujících grafů, můžeme v tomto případě již mluvit o zkreslení, způsobeném saturací obou vstupních tranzistorů.



Obr. 13 Závislost výstupního proudu na $U_{dif} = 10\text{mV}$

Stanovení počátku dynamické saturace

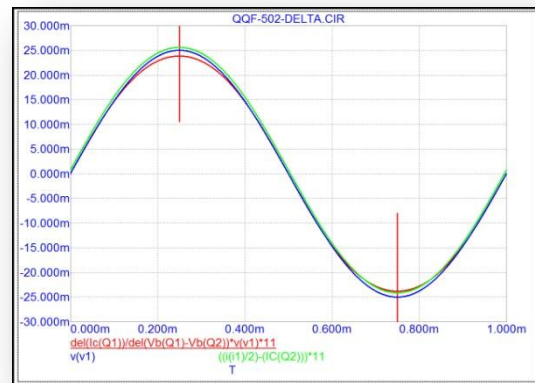
Jak je patrné z obr. 12 a 13, do $U_{dif}=10mV$ nedochází k viditelné změně tvaru signálu. Na obr. 14 můžeme vidět $U_{dif}=25mV$ a již počátek dynamické saturace. Pro náš případ je zesílení při 100kHz rovno cca 60dB a tomu odpovídá $U_{dif}=28mV$.

Se zvyšováním U_{dif} nad hodnotu 20mV až 30mV při proudu obou tranzistorů po cca 7,5mA již dochází ke změně tvaru výstupního signálu. Při použití menších kolektorových proudů se tato hranice úměrně sníží a naopak.

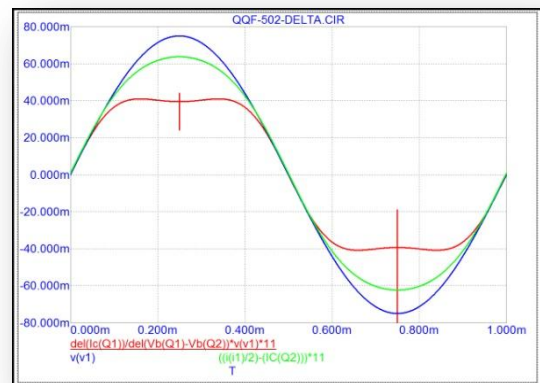
Pro názornost a lepší vyjádření poměrů na vstupní diferenciální dvojici tranzistorů jsem v grafech použil:

- Modře - vstupní napětí: Hodnota= U_{dif}
- Zeleně - vyjádření kolektorového proudu tranzistoru: Hodnota= I_1-I_{C2} , hodnota je dále upravena vynásobením *11 tak, aby byla vyjádřitelná ve společném grafu. Je zatížena chybou I_B , která je největší v obr. 12. Na obr. 13 je ještě patrná, ale pro demonstrativní účely poměrů diferenciálního stupně nehraje roli.

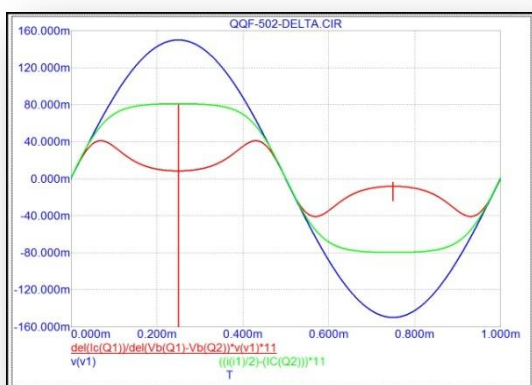
- Červeně - zvýraznění tvarového zkreslení, které vzniká při dynamické saturaci. Obdobně, jako se ve statistice počítá kvadratická či střední kvadratická odchylka, jsem použil pro účely přesnějšího stanovení počátku a průběhu Dynamické saturace výraz: Hodnota= $\frac{\Delta I_c}{\Delta U_{dif}} * I_c$, hodnota je rovněž upravena tak, aby byla vyjádřitelná ve společném grafu, vynásobením *11.



Obr. 14 Závislost výstupního proudu na $U_{dif}=25mV$



Obr. 15 Závislost výstupního proudu na $U_{dif}=75mV$



Obr. 16 Závislost výstupního proudu na $U_{dif}=150mV$

Nárůst zkreslení a počtu lichých harmonických

Zvyšováním U_{dif} nad hranici cca 40mV, velmi rychle dochází ke ztrátě zesílení, u $U_{dif}=75mV$ již můžeme pozorovat rychlý nárůst třetí harmonické, čímž získáváme jasnou odpověď na hodnocení tranzistorových zesilovačů hudebníky, že kvinta - třetí harmonická - je u těchto zesilovačů dominantní!

Závěr

Závěrem bych provedl stručné shrnutí.

- ✚ Bez simulačních programů se dnes v elektrotechnice neobejdeme, napomáhají nám nejenom simulovat chování elektrických obvodů, ale i lépe porozumět jejich funkci. Je vhodné pracovat s programy, které jsou "SPICEcompatible", aby byly výsledky vzájemně srovnatelné.
- ✚ Věda a lidské poznání jde dnes za pomoci výpočetní techniky mílovými kroky kupředu, stále však zůstává a vždy bude zůstávat řada zdánlivě jednoduchých nevyřešených problémů.
- ✚ Jeden z nevyřešených či nezodpovězených problémů byl i "Tranzistorový zvuk". Sice jsem se omezil pouze na chování diferenciálního stupně, který nejčastěji stojí na vstupu ať již klasického zesilovače, či operačního zesilovače. Právě diferenciální stupeň je pro chování zesilovače se silnou zpětnou vazbou ten rozhodující.
- ✚ Účelem příspěvku nebylo dát definitivní odpověď na danou problematiku, ale ukázat jednu z možných cest, jak zkoumat dané děje, jak se co nejvíce přiblížit dané problematice, porozumět více konkrétnímu zapojení a následně zúročit takto získané poznatky při své další práci.
- ✚ Tímto příspěvkem jsem odpověděl rovněž sám sobě po velmi dlouhé době na otázku chování tranzistorových zesilovačů, na vznik zkreslení, které není jednoduše měřitelné. Tento druh zkreslení se dá považovat za neperiodický a náhodný, na takové rušení je lidský sluch mnohem citlivější, než na zkreslení, které má trvalý a periodický charakter.

Literatura

- [1] James Boyk: There's Life Above 20 Kilohertz! A Survey of Musical Instrument Spectra to 102.4 KHz <http://www.cco.caltech.edu/~boyk/spectra/spectra.htm>
- [2] The Journal of Neurophysiology Vol. 83 No. 6 June 2000, pp. 3548-3558 <http://jn.physiology.org/cgi/content/full/83/6/3548>
- [3] Inaudible High-Frequency Sounds Affect Brain Activity: Hypersonic Effect <http://www.arraytherapeutic.com/library/articles/JN83-6-3548.pdf>
- [4] Walter Jung: OP Amp Audio, Realizing High Performance: Bandwidth Limitations http://waltjung.org/PDFs/WTnT_Op_Amp_Audio_3.pdf
- [5] W. Marshall Leach: The Cascode Diff-Amp Input Stage <http://users.ece.gatech.edu/~mleach/lowtim/instage.html>
- [6] CVIČENÍ V MICRO-CAPU http://www.roznovskastredni.cz/biolek/dwnl/Pracovni_sesit_MC9demo.pdf
- [7] Micro-Cap <http://www.spectrum-soft.com/demo.shtm>
- [8] Bohumil Federmann: Hi-Fi svět - ISSN 1803-733X <http://www.federmann.cz>