



# Teorie zesilovačů HQQF

**Bohumil Federmann**  
[federmann@seznam.cz](mailto:federmann@seznam.cz)  
Hi-Fi svět - ISSN 1803-733X  
napsáno pro AKEL 2015  
Přednáška 3. října 2015 v 11<sup>00</sup>

## 1. Moto

Svět nekončí tím co znám, ale začíná tím co neznám a znát bych mohl.

Bohumil Federmann

## 2. Úvod

Teorie zesilovačů je velmi široká oblast elektroniky a elektrotechniky, zahrnující téměř vše o zesilovačích a nelze ji oddělit od praxe. Jen teorie potvrzená praxí má nějaký význam, pro účely tohoto textu byl rozsah omezen na následující části:

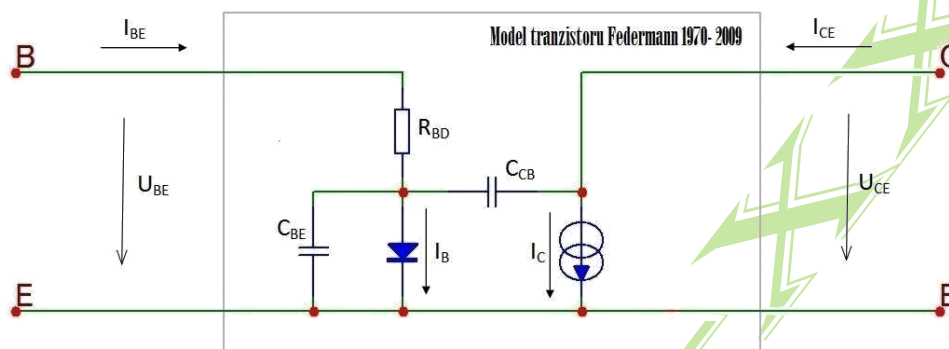
- ✚ Dělení zesilovačů
- ✚ Pracovní oblast zesilovačů
- ✚ Diferenciální dvojice
- ✚ Milníky topologií
- ✚ Zpětné vazby a jejich vliv
- ✚ Dynamická saturace
- ✚ Topologie zkreslení a zvuk
- ✚ Řazení prvků
- ✚ Napájecí zdroje a jejich vliv



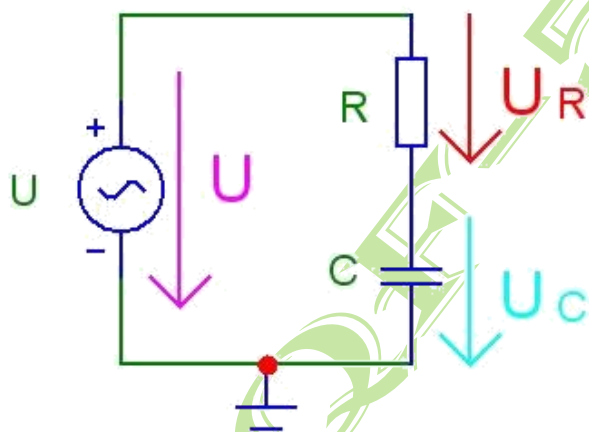
Obrázek 1: Pohled na 10párovou verzi HQQF-55-507

## Začalo to BJT tranzistorem

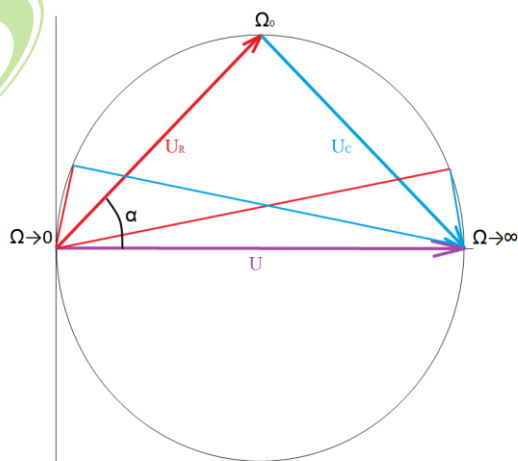
Je několik vesměs vědeckých modelů tranzistorů, avšak žádný není dostatečně výstižný, co se týče jeho výroby a jeho vlastností s výrobou spojených, žádný nepopisuje a nevystihuje jeho s frekvencí měnící se vlastnosti dostatečně přesně či vůbec, proto jsem před mnoha a mnoha lety začal užívat modelu vlastního, který je pro tyto účely mnohem výstižnější.



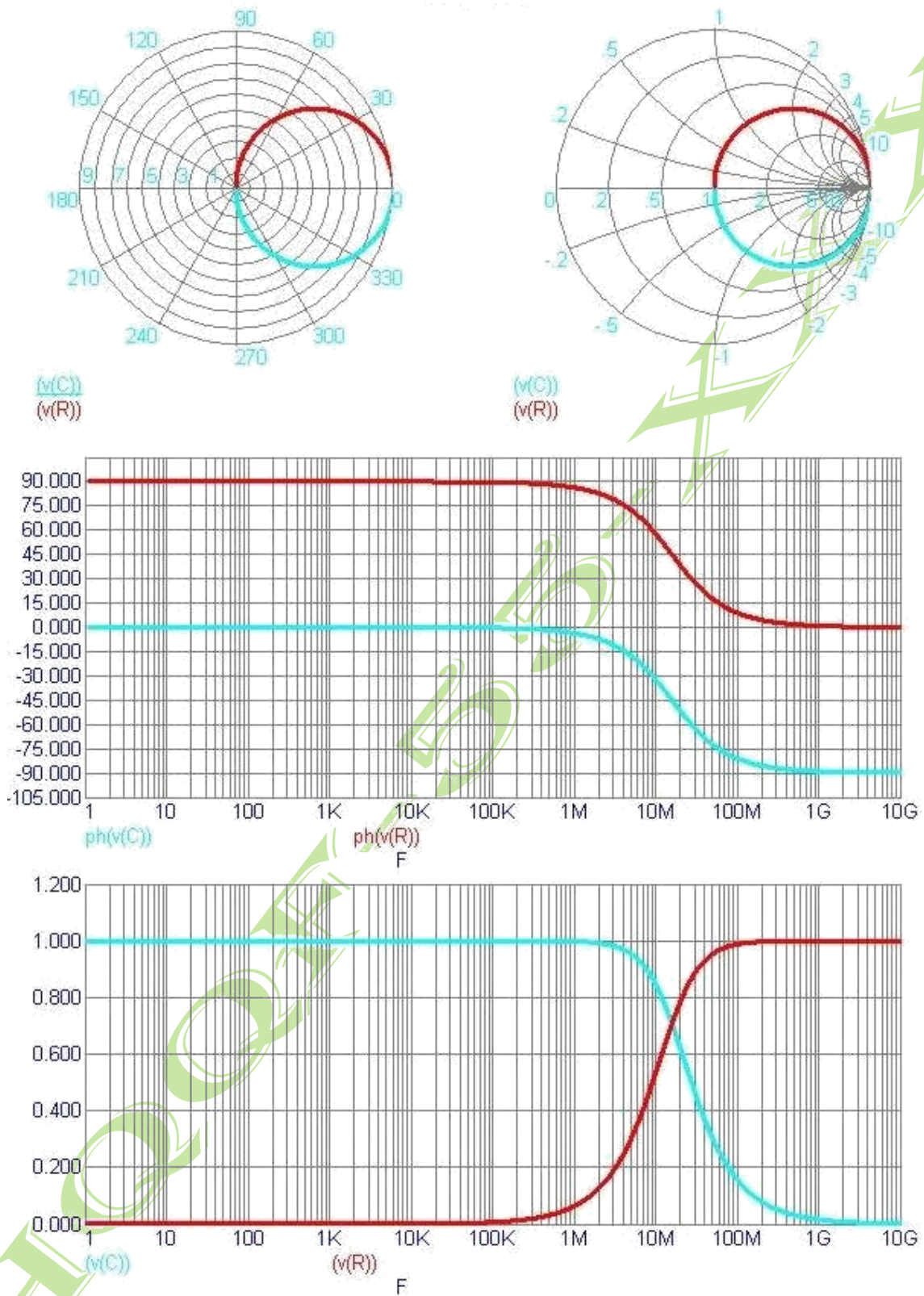
Obrázek 2: Federmannův model tranzistoru BJT



Obrázek 3: Fázové poměry báze BJT tranzistoru



Obrázek 4: Fázové poměry báze BJT tranzistoru



Obrázek 5: Grafy poměrů báze BJT tranzistoru

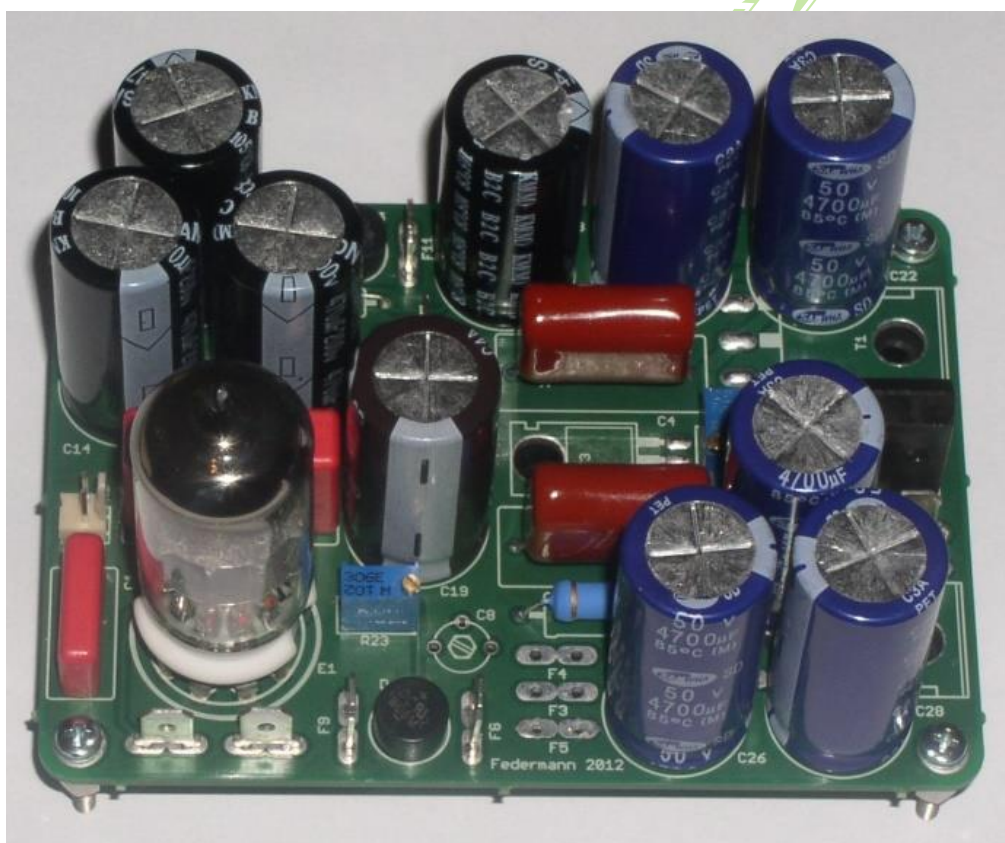


### 3. Dělení zesilovačů

Zesilovače můžeme dělit například dle:

- Aktivních prvků
- Frekvenčního rozsahu
- Pracovního bodu
- Výkonu
- Druhu zpětné vazby
- Zkreslení

Hi-Fi zesilovače patří do skupiny Nf zesilovačů s různými pracovními body, různého výkonu, různých zpětných vazeb a malým zkreslením, lze je realizovat jak s Elektronkami, tak s BJT či TET tranzistory.



Obrázek 6: Hybridní zesilovač E88CC, IRFP240/IRFP9240, 30W/8 Ω





## 4. Pracovní oblast zesilovačů

Abychom vůbec mohli započít uvažovat o návrhu zesilovače, je třeba si nejdříve definovat požadavky na zesilovač, oblast signálů, ve které se můžeme pohybovat, jen tak si ušetříme spoustu komplikací při návrhu, problematika je popsána například v článku [Jak měřit Hi-Fi zesilovače a jejich pracovní oblast](#). Nebudeme navrhovat zesilovač pro neexistující signály a současně nereflektovat signály ve zvuku běžně přítomny.

### Maximální výkon

Maximální výkon je snad nejznámější veličinou zesilovače, na straně elektrické je limitován napájecím napětím a impedancí reproduktorové soustavy, na straně druhé je dán maximální možnou úrovní signálů v nahrávce se vyskytující, i pro tuto úroveň signálu bychom se neměli dostat do jeho omezení, limitace zesilovače.

### Frekvenční rozsah

Frekvenční rozsah je další důležitou veličinou každého zesilovače, člověk běžně slyší 16Hz (20Hz) až 16kHz (20kHz), s tímto rozsahem si však nevystačíme, člověk vnímá i frekvence nižší – infrazvuk i frekvence vyšší - ultrazvuk, zde se musíme nejdříve podívat blíže na podstatu zvuku.

### Zrychlení hmotného bodu

Zrychlení hmotného bodu jako parametr? Ano  $a = \Delta v / \Delta t$ , i když se to nezdá a nikdo to zatím takto neuvádí, ale všichni s ním vědomě či podvědomě pracují, právě zrychlení je jedním z velmi důležitých elektroakustických parametrů, který má své nezastupitelné místo v signálu akustickém, ale i v signálu elektrickém, kde se dostaneme k potřebné rychlosti přeběhu.

### Energie zvuku

Zvuk je mechanické vlnění vyvoláno energií, nejde o nic jiného než mechanickou energii, která pohybuje hmotným bodem. Vyjdeme-li ze samotné podstaty vzniku jakéhokoliv zvuku, kde na hlasivky, strunu či jakýkoliv jiný hmotný bod působí síla, pak tato síla vyvolá zrychlení tohoto hmotného bodu, které je úměrné síle a nepřímo úměrné hmotnosti hmotného bodu.

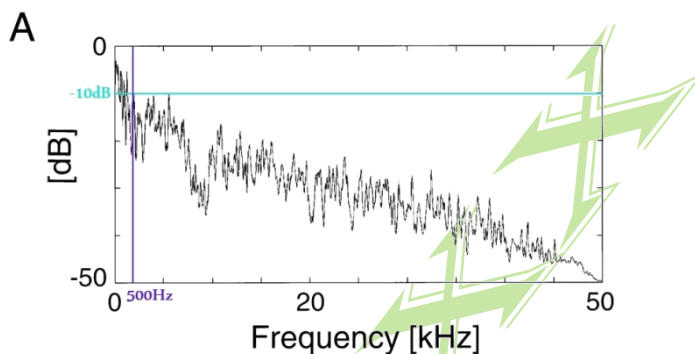
### Amplituda zvukové vlny

Z výše popsaného je patrné, že při konstantní síle působící na hmotný bod, dosáhneme konstantního zrychlení hmotného bodu. Pokud však zvýšíme frekvenci, změním směr působení síly na hmotný bod častěji, bude frekvence kmitání hmotného bodu vyšší, ale současně bude amplituda kmitání hmotného bodu při stejné energii nižší.

### Ultrazvuk

Ultrazvuk je vnímán jako barva tónů v akustickém pásmu sluchovým orgánem, dále je zpracováván mozkiem. Ultrazvuk výrazně stimuluje mozkovou aktivitu, jak jsem popsal například v článku [SACD, blíže vinylu?](#) kde japonský tým T. Ooashiho, složen z deseti japonských univerzit a výzkumných ústavů (Ooashi, 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, následně neurologové publikovali výsledky v Journal of Neurophysiology a na konferenci AES v roce 2000.



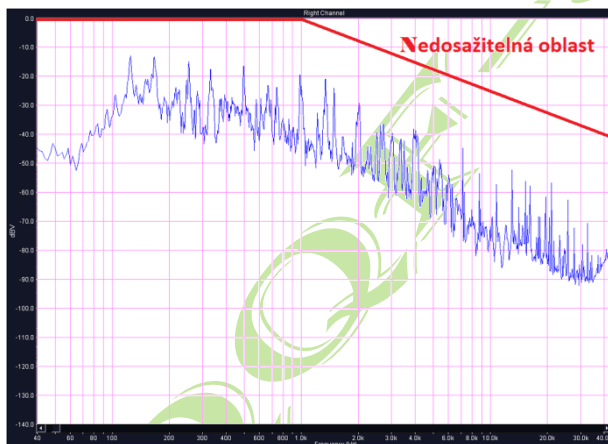
Obrázek 7: Frekvenční závislost úrovně akustického signálu

Tento tým jednoznačně prokázal v akustickém signálu přítomnost signálů vyšších harmonických jdoucích daleko nad 100kHz, ale zároveň prokázal jejich klesající amplitudu, pokles amplitudy se strmostí 20dB/dek začíná někde mezi 500 – 1000Hz. Tento pokles přímo koresponduje s výše popsanou energií hmotného bodu.

### Infrazvuk

Infrazvuk je naopak přijímán endokrinními žlázami, které na jeho popud produkují nadměrné množství různých hormonů. Na hladinu různých hormonů reaguje opět velmi významně svou aktivitou mozek. Případné reakce a dopady rozkmitání tlustého střeva nebudu raději rozebírat.

Takže pro dokonalejší prožitok, pro přiblížení-se koncertnímu sálu, je zapotřebí přítomnosti i frekvenčně nižších signálů.



Obrázek 8: Rozložení signálu v nahrávce

### Rychlost přeběhu

Mnozí se honí za zcela nesmyslnou rychlostí přeběhu, vezmu-li v potaz práce japonského týmu T. Ooahashiho na SACD a vlastní zkušenosti, pak pro výstupní amplitudu 50V a zlomovou frekvenci 1kHz nepřekročí rychlost přeběhu, SR 160mV/μs, při frekvenci 100kHz bude výstupní amplituda pouhých 500mV, pro stejnou výstupní amplitudu 50V a zlomovou frekvenci 10kHz nepřekročí rychlost přeběhu, SR 1,6V/μs, při frekvenci 100kHz bude výstupní amplituda 5V.

### Fáze

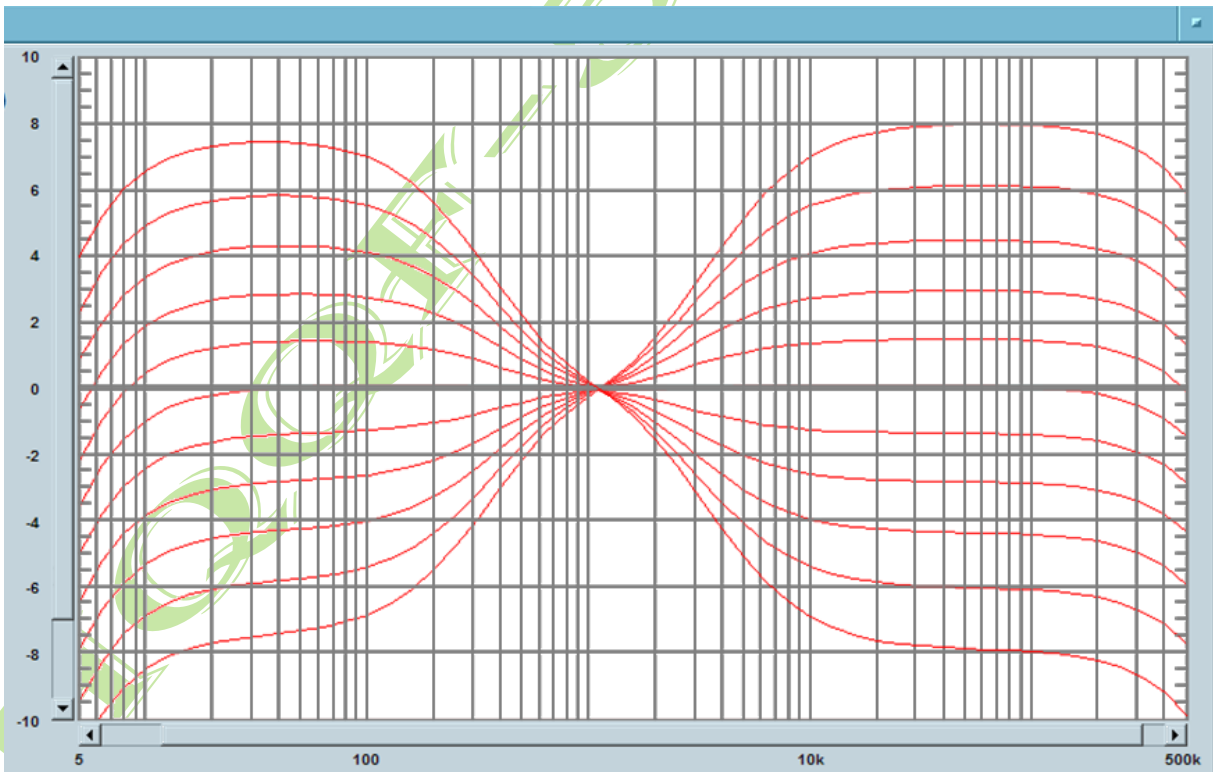
Velmi opomíjenou veličinou je fázová charakteristika zesilovače a to jak na spodním, tak na horním konci přenášeného pásma. Změnou fáze jednotlivých harmonických měníme i charakter a barvu zvuku. Na spodním konci přenášeného pásma je nejvhodnější stejnosměrná vazba, čímž do fáze vůbec



nezasahujeme, na horním konci pásma nenatáčejí fázi o více jak 10° při kmitočtu 100kHz, čehož dosáhneme potřebnou šířkou pásma.



Obrázek 9: Předzesilovač HQQF s precizním nastavením zisku a charakteristik

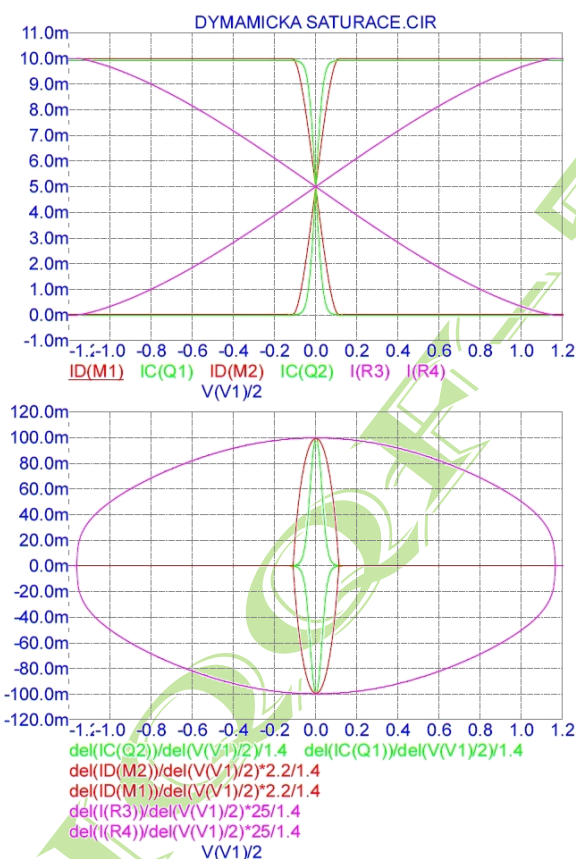


Obrázek 10: Naměřené charakteristiky předzesilovače

## 5. Diferenciální dvojice

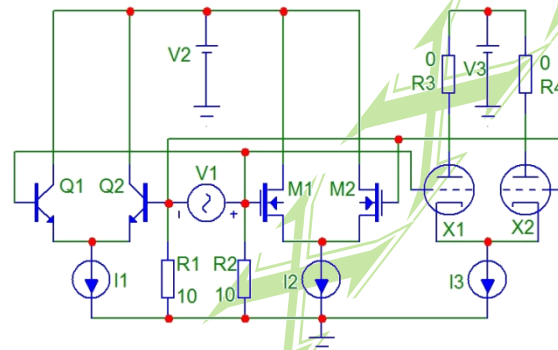
Většina zesilovačů je zapojena jako zpětnovazební, na jejichž vstupu je diferenciální dvojice, která má vlastnosti odvozené od použitých prvků a pracovních bodů. Porovnáním diferenciálních dvojic s BJT a FET tranzistory společně s diferenciální dvojicí elektronkovou, dospějeme k vlastnostem jednotlivých vstupních obvodů, můžeme porovnat závislost zesílení na vstupním diferenciálním napětí  $U_{dif}$ .

Na grafech je patrné, jak se ta či ona diferenciální dvojice staví k  $U_{dif}$ . V horní části je vynesena závislost kolektorového či katodového proudu na  $U_{dif}$ , ve spodní části grafu je vynesena derivace kolektorového či katodového proudu na  $U_{dif}$ , tato mnohem názorněji zobrazí dění ve vstupní diferenciální dvojici.



Obrázek 12: Charakteristiky diferenciálních dvojic.

téměř nekonečný vstupní odpor elektronek na straně jedné a na straně druhé prostorový náboj báze BJT tranzistoru, který musí vždy dotéct přes přechod BE, je rozdíl mezi BJT tranzistory a Elektronkami nebetýčný.



Dynamická saturace, Federmann 1968-2015

Obrázek 11: Srovnávací zapojení diferenciálních dvojic.

### BJT diferenciální dvojice

BJT diferenciální dvojice s proudem řízenými tranzistory je na tom nejhůře, napětí  $U_{dif}$  7,5mV již zapříčiní pokles proudu kolektoru, tedy i zesílení o 5%.

### FET diferenciální dvojice

FET diferenciální dvojice s polem řízenými tranzistory je na tom poněkud lépe, teprve  $U_{dif}$  25mV zapříčiní pokles zesílení o stejných 5%.

### Elektronkové diferenciální dvojice

Elektronková diferenciální dvojice je na tom nejlépe, teprve  $U_{dif}$  300mV zapříčiní pokles zesílení o stejných 5%.

### Srovnání BJT vs. FET vs. Elektronky

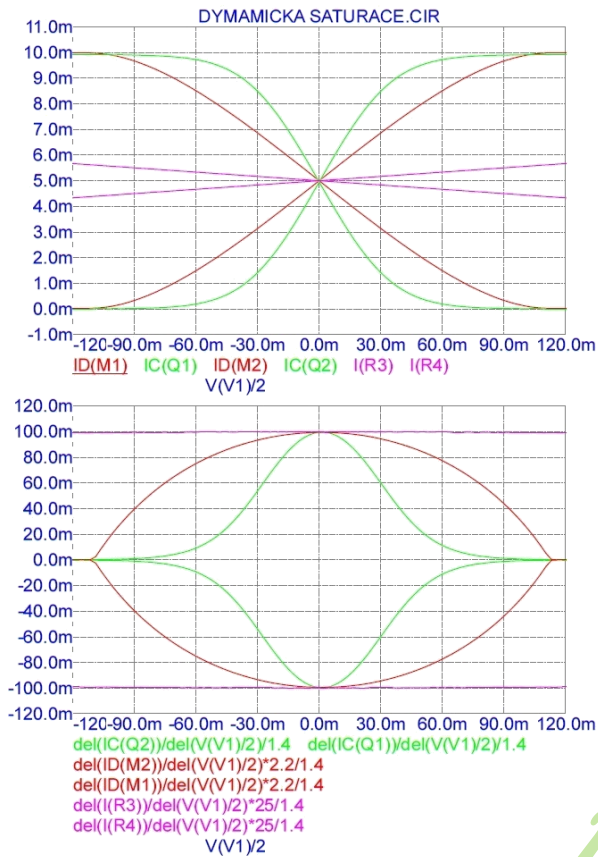
Srovnání BJT vs. FET vs. Elektronky vychází z uvedeného měření či simulací, dalo by se napsat BJT : FET : Elektronkám 40 : 12 : 1, elektronková diferenciální dvojice je na tom 40 x

lépe jak dvojice s BJT tranzistory, když k tomu

připočteme velmi malou vstupní kapacitu a

průběhový náboj báze BJT tranzistoru, který musí vždy dotéct přes přechod BE, je rozdíl mezi BJT tranzistory a Elektronkami nebetýčný.





Obrázek 13: Detail charakteristik diferenciálních dvojic.

FET – plem řízené tranzistory jsou někde mezi Elektronkami a BJT tranzistory, dá se za jejich pomoci značně přiblížit vlastnostem diferenciálního stupně s elektronkami.

## 6. Milníky topologií

Jak bylo oněkdý napsáno na Hi-Fi světě v článku „Hi-Fi zesilovače a milníky jejich topologií“ lze za významné milníky topologií zesilovačů považovat Blackovu celkovou ZV z roku 1928, Cordellovu snahu kolem roku 1980 o kompenzaci ZV, ale také Federmannovy práce posouvající charakteristiku průběhu zesílení zesilovače s otevřenou smyčkou, zcela opačným směrem jak to činil Robert R. Cordell a popis Dynamické saturace.

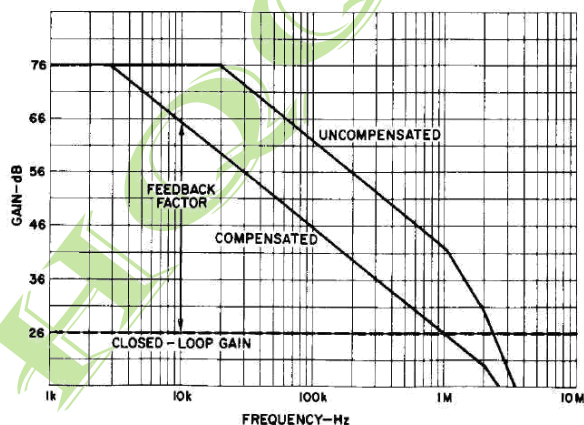
### Harold Stephen Black

Jeden z velkých milníků v topologiích zesilovačů přinesl [Harold Stephen Black](#), když patentoval [Celkovou zpětnou vazbu, která není mnohými dodnes pochopena](#).

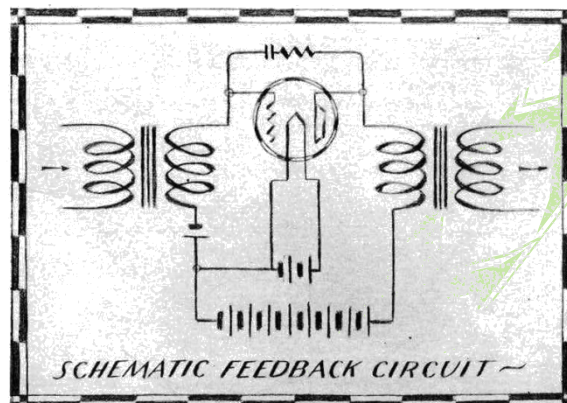
Harold Stephen Black podal svůj vynález na Americký Patentový úřad již 8. srpna 1928. Myšlenka však byla natolik novátorská a v rozporu s tehdejšími zvyklostmi a uznávanými standardy, že "Mistři" úředníci nebyli vůbec schopni pochopit samotnou podstatu a proto patent z počátku striktně odmítali.

Teprve po pěti letech se H.S. Blackovi podařilo, že byl 22. dubna 1932 patent US Patentovým úřadem přijat, zveřejněn byl o dalších pět let později 21. prosince 1937 pod číslem 2 102 671. Od zrodu myšlenky k jejímu patentování, tak uplynulo neuvěřitelných 9 let!

Fig. 2—Compensated and uncompensated power amplifier open-loop gain vs. frequency.



Obrazek 15: Cordellova korekce frekvenční charakteristiky



### Feedback Amplifiers

By H. S. BLACK  
Toll Systems Development

TELEPHONE history is full of dreams come true. Few rosier dreams could be dreamed than that of an amplifier whose overall performance is perfectly constant, and in whose output distortion constitutes only one one-hundred millionth of the total energy, although the component parts may be far from linear in their response and their gain may vary over a considerable range. But the dreamer who awakes in amazement to find that such an amplifier can be built has additional surprises in store for him. These benefits can be obtained by simply throwing away some gain, and by utilizing "feedback action".

A feedback amplifier is one in which a portion of the output is fed back to the input. The notion of doing this with various types of electrical apparatus has long been familiar; and it has been appreciated that by applying the principle to an amplifier the gain of the device might be increased or decreased, according to the amount and phase of the impulse fed back. It has commonly been supposed, however, that for stable operation there must be a net loss around the closed loop formed by the amplifier and feedback circuits. Furthermore, it has been supposed that in the case where the gain was reduced there was ordinarily no advantage to be had which would justify the loss in amplification; and that, in the case where the gain was appreciably increased, dan-

[ 290 ]

Obrazek 14: Část Blackova patentu celkové zpětné vazby

### Robert R. Cordell

Další z velkých milníků v topologiích zesilovačů přinesl [Robert R. Cordell](#), často vystupující pod jménem Bob Cordell. Zde si musíme uvědomit, že jeho práce vznikaly kolem roku 1980, kde nebyly běžně k dispozici simulační programy, součástková základna byla poplatná tehdejší době. Robert R. Cordell se ve svých pracích věnovaných TIM [část I](#), [část II](#) zaměřil na stabilitu zesilovačů a hledání podstaty zkreslení. Aby byl zesilovač vůbec použitelný, byla jeho stabilita brána jako prvotní. Z doložených průběhů a textů TIM [část I](#) je velmi dobře patrné, že se konstruktéři na přelomu 80. a 90. let

vyhýbali více zlomům na charakteristice tím, že zaváděli lokální ZV, které průběh zesílení linearizovaly za cenu snížení zesílení. V téže době sílí rovněž snahy o zvyšování rychlosti přeběhu, vývoj se tak trochu motá v bludném kruhu, neboť lokální ZV šířku pásma snižují a tím omezují i rychlost přeběhu. V konečném výsledku se konstruktéři blíží k řešení, kdy zesilovače jsou dostatečně rychlé, ale pracují na horním konci přenášeného pásma téměř bez rezervy zisku, čímž celková ZV pozbývá na významu.

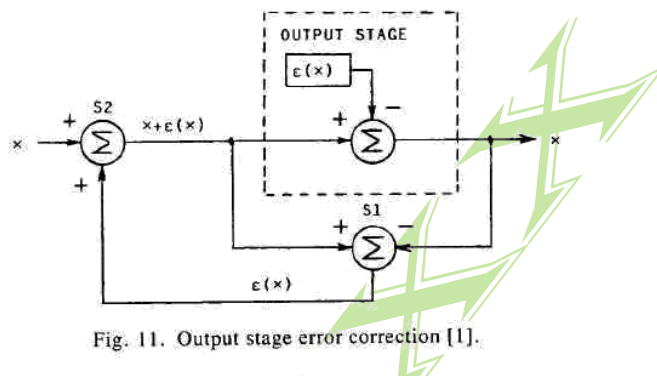


Fig. 11. Output stage error correction [1].

**Obrázek 16: Cordellova chybová korekce - blokově**

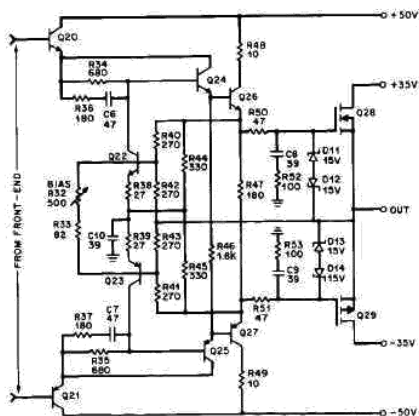


Fig. 12. MOSFET power amplifier output stage. Q<sub>22</sub> and Q<sub>23</sub> provide error-correction signals.

J. Audio Eng. Soc., Vol. 32, No. 1/2, 1984 January/February

**Obrázek 17: Cordellova chybová korekce -schéma**

### Chybová korekce

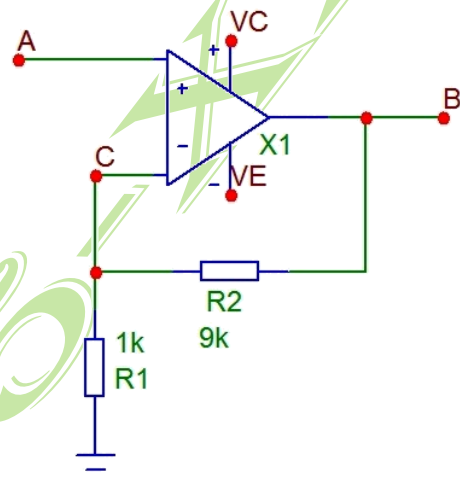
Počátkem roku 1984 přichází Robert R. Cordell s řešením, popsaném v textu [A MOSFET Power Amplifier with Error Correction\\*](#), kde jde o chybovou korekci. Tato chybová korekce nemá za úkol nic jiného, než zpět navrátit význam celkové ZV. Účelem je nejenom vrátit rozdílové - chybové napětí z výstupu zesilovače zpět na vstup, ale navíc jej ještě zesílit aby byl vliv větší. Jinými slovy co lokální ZV v celkovém zesílení zabily, je třeba se pokusit obnovit.

## 7. Zpětné vazby a jejich vliv

Zpětné vazby jsou nedílnou součástí každého zapojení, můžeme je najít v každém prvku, například Millerova kapacita, můžeme je vytvořit na lokální úrovni, například emitorový odpor a můžeme je vytvořit na celkové úrovni jako celková zpětná vazba.

### ZV tvořená strukturou aktivního prvku

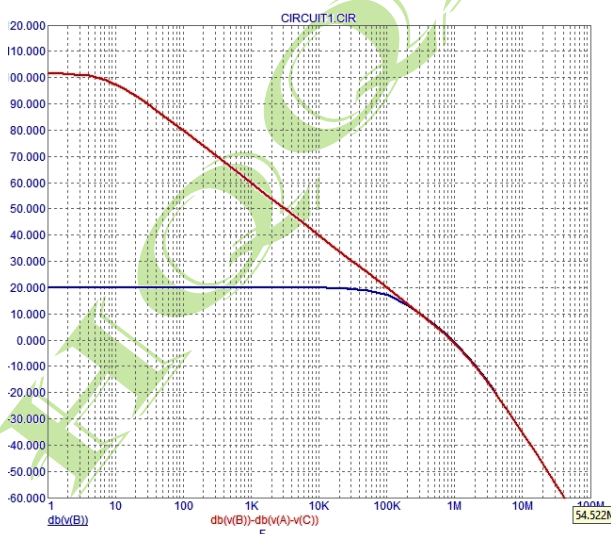
Každý aktivní prvek je tvořen mimo jiné i nežádoucími parazitními kapacitami a odpory, které mohou tvořit lokální zpětnou vazbu, většinou zápornou, která se podílí na vlastnostech toho či onoho prvku, pak můžeme změřit zesílení na nízkých kmitočtech, pokles zesílení o -3dB u tranzistorů znám jako  $f_{\beta}$ , a další. Většinou nejsme schopni tyto vlastnosti ovlivnit, můžeme jejich vliv částečně eliminovat pracovním bodem, abychom nenabíjeli kapacity na zbytečně velké náboje, použijeme menší rozkmit napětí, abychom nabíjeli rychleji, použijeme větší proudy, proto je často je lepší proudové než napěťové buzení. Pokud chceme dosáhnout lepších vlastností, musíme většinou použít jiné prvky, vlastnostmi aktivních prvků jsou limitovány i meze té či oné konstrukce.



Obrázek 18: Příklad zapojení zpětné vazby

### ZV tvořená na lokální úrovni

Pasívními prvky můžeme vytvořit ZV na lokální úrovni, nejčastěji jde o emitorový či anodový odpor, kterým snižujeme zesílení a rozšiřujeme šířku pásma. Někteří konstruktéři s oblibou používají kapacitu mezi kolektor a bází, čímž se sníží zesílení, ale toto snížení je frekvenčně závislé, výrazně se sníží šířka pásma.



Obrázek 19: Charakteristika s a bez zpětné vazby

### ZV tvořená na celkové úrovni

Pasívními prvky můžeme vytvořit ZV na celkové úrovni, stejně jak ji popsal ve svém patentu v roce 1928 Harold Stephen Black.

Celková ZV může být jak kladná tak záporná, záporná vždy snižuje zesílení a zkreslení zesilovače, upravuje šířku pásma.

Celková ZV vždy přivádí výstupní signál na vstup zesilovače, kde dochází k porovnání dvou časově posunutých signálů, podle linearit vstupního obvodu může docházet ke vzájemné modulaci



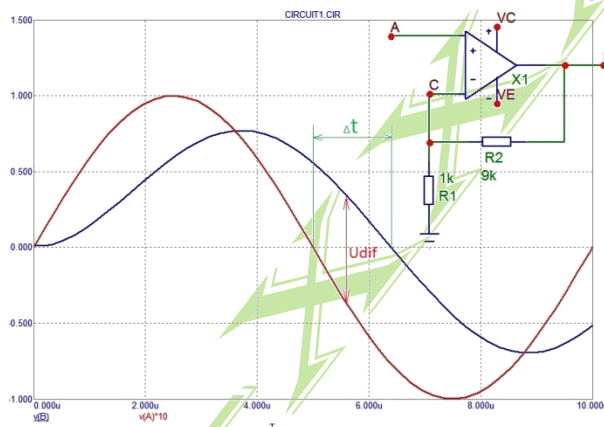
signálů, obzvláště pokud se vstupní diferenciální dvojice nachází v nelineární oblasti, může docházet ke vzájemné modulaci vstupních signálů, ale i zpětnovazebních, pokud se ke zpětnovazebním přidá les harmonických vytvořený zkreslením zesilovače, pak se nám les harmonických násobí.



## 8. Dynamická saturace

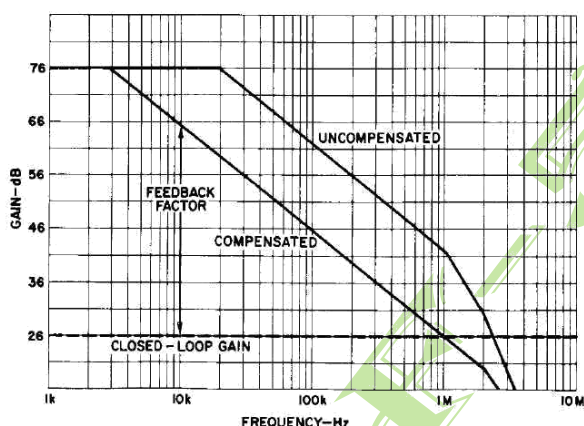
Dynamická saturace je stav zesilovače, jeho vstupní diferenciální dvojice, popsany B. Federmannem, která vzniká tím, že se vstupní diferenciální dvojice dostane do nelineární oblasti, za což můžeme považovat i pokles zesílení o 5 či 10%. Jak je uvedeno v části věnované samotné diferenciální dvojici, je pokles zesílení o 5% u BJT tranzistorů u 7,5mV, u FET tranzistorů u 25mV a elektronek u 300mV, přiměřeně to platí pro jiné zapojení, jiné prvky a jiné pracovní body.

Pokud ve zpětné vazbě nepoužijeme frekvenčně závislé prvky, můžeme pomocí zesílení v otevřené smyčce přímo vypočíst  $U_{dif}$ , ale také zpoždění zesilovače a naopak. Pokud frekvenčně závislé prvky použijeme, pak musíme toto při výpočtu zohlednit.



Obrázek 20: Závislost  $U_{dif}$  a zpoždění

Fig. 2—Compensated and uncompensated power amplifier open-loop gain vs. frequency.



Obrázek 21: Zesílení otevřené smyčky Topologie Cordell

### Federmannovo řešení

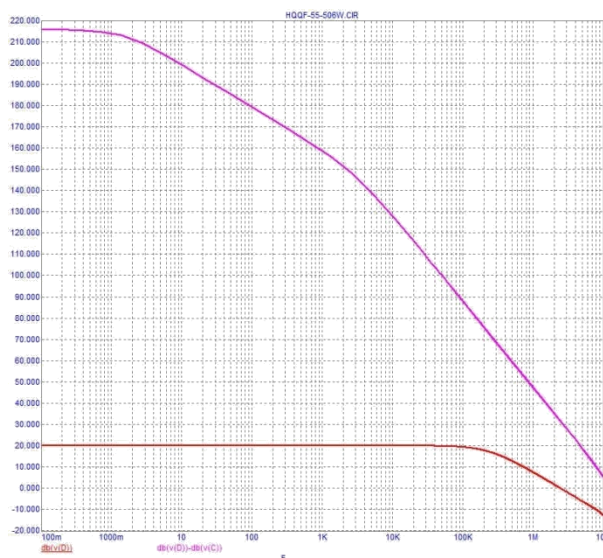
Obdobné Federmannovo zapojení zesilovače HQQF disponuje na stejné frekvenci zesílením 90dB, pro stejnou 50V amplitudu výstupního napětí je  $U_{dif}$  pouhých 1,58mV.

### Dynamická saturace v praxi

Zde je vidět Dynamická saturace v praxi, Cordellovo řešení výrazně zvyšuje  $U_{dif}$ , aby následně zaváděl chybovou korekci, která se snaží o nápravu dopadu lokálních ZV, naopak Federmannovo řešení výrazně

### Cordellovo řešení

Pro vznik Dynamické saturace je nutné si uvědomit velikost zesílení daného zapojení na dané frekvenci. Na Cordellovu grafu je nastaveno zesílení při 100kHz na 26dB s rezervou zisku +35dB, zesílení celkem 61dB, stlačené lokálními vazbami na pouhých 46dB, pro výstupní napětí s amplitudou 50V je nutné  $U_{dif}$  50mV po Cordellově korekci strašných 251mV, při přípustné hranici kolem 7,5mV.

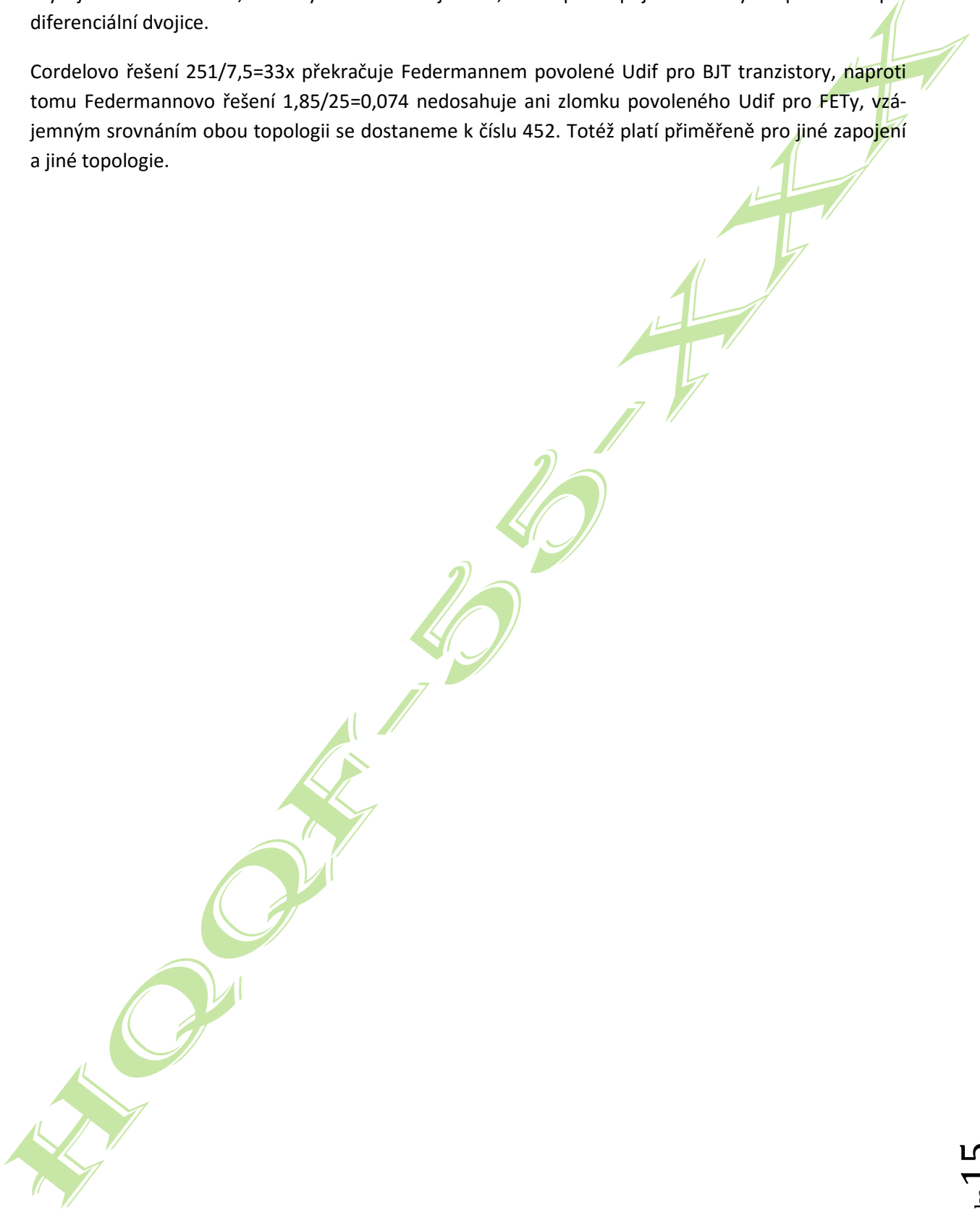


Obrázek 22: zesílení otevřené smyčky Topologie Federmann



zvyšuje celkové zesílení, čímž významně snižuje Udif, navíc pro zapojení s J-FETy na pozici vstupní diferenciální dvojice.

Cordelovo řešení  $251/7,5=33x$  překračuje Federmannem povolené Udif pro BJT tranzistory, naproti tomu Federmannovo řešení  $1,85/25=0,074$  nedosahuje ani zlomku povoleného Udif pro FETy, vzájemným srovnáním obou topologií se dostaneme k číslu 452. Totéž platí přiměřeně pro jiné zapojení a jiné topologie.





## 9. Topologie zkreslení a zvuk

Je mnoho topologií s různými dopady do zkreslení a do zvuku, mnohé lze zjednodušit a nalézt cestu k lepším výsledkům ještě před samotným návrhem zapojení.

### Zesilovače s celkovou ZV

Vycházejí ze stavu, že zesilovače s celkovou ZV jsou zatíženy vlastním zkreslením, zkreslením opakujícím se uzavřením celkové ZV, zkreslením vzniklým v důsledku Dynamické saturace a škálou harmonických vzniklých na nelinearitě vstupní diferenciální dvojice, jeví se nejlepším řešením, zesilovač s nekonečným zesílením, v praxi zesilovač s co největším zesílením, utaženým silnou celkovou ZV, jak je popsáno v tomto dokumentu a jak je realizováno u Topologie HQQF-55-507.

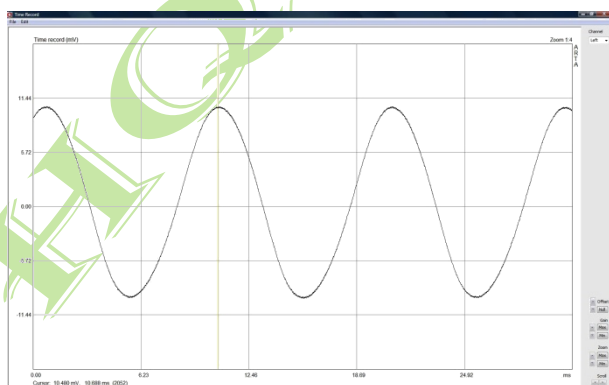
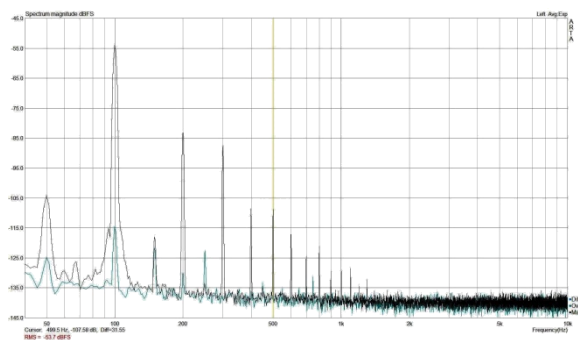
### Zesilovače bez celkové ZV

Kromě toho je ještě druhé řešení, topologie zesilovače bez celkové ZV, tedy zesilovače postaveného jen na lokálních ZV, kde nedochází k zavedení výstupního signálu na vstup, zesilovač je tak ušetřen vzniku pralesu harmonických, zde je vhodné vytvořit zapojení, které má rovněž pro každý stupeň maximální zisk, který je následně lokální ZV upraven na potřebnou malou definovanou hodnotu, toto řešení využívá elektronkový předzesilovač Topologie HQQF-55-512 a na něj navázaný HEXFETový výkonový stupeň Topologie HQQF-55-514, odvozené do značné míry od Topologie HQQF-55-507, jde o konkrétní řešení o kterém se ve světě běžně jako o dokonalém Hi-Fi zesilovači bez celkové ZV mluví, ale v praxi se ke své škodě běžně nevyrábí.

## FFT, převodní charakteristika dokonalý zvuk

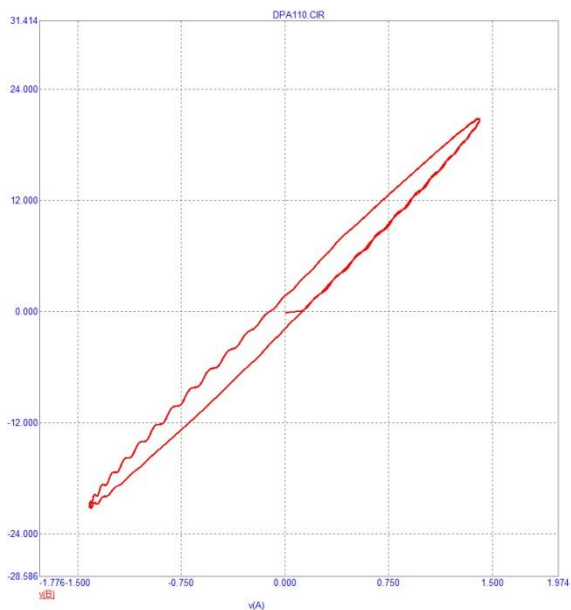
### FFT - Fast Fourier transform

FFT čili Fast Fourier transform, česky Rychlá Fourierova transformace je silný nástroj pro hodnocení obsahu harmonických v měřeném signálu, o čemž je jeho síla větší o to se stává jeho výsledek často zavádějící. Menším krokem dosáhneme úměrně menšího šumového dna, čímž se stávají různá měření neporovnatelná, hlavní nevýhodou FFT je fakt, že jde o rychlou transformaci, nikoliv o transformaci úplnou, rychlá zjistí rychle rozložení jed-



notlivých harmonických, ale nic nenapoví o jejich fázi, čímž nejsme vůbec schopni usoudit na tvar měřeného signálu, nevíme, zda se v daný okamžik harmonická k základnímu signálu přičítá či odčítá, zda je ve fázi či v proti fázi, či jinak natočena, je nám sebrána možnost odhalení zdroje té či oné anomálie, jediné co nám pak zůstává je pomyslný výsledek dobrý - špatný.





### Převodní charakteristika

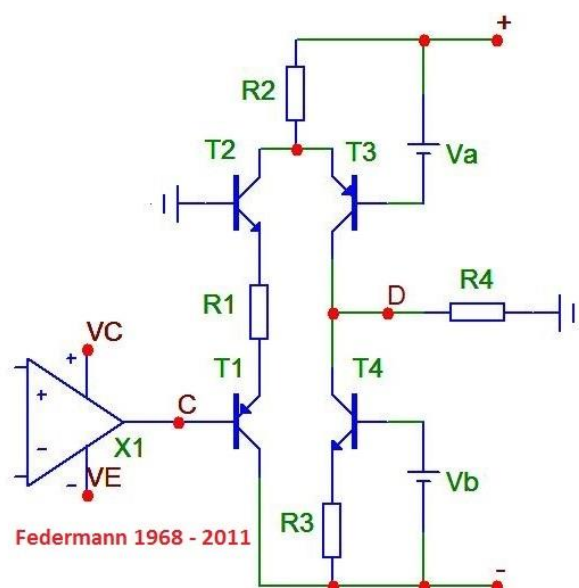
Snad nejstarším a stále opomíjeným měřením je měření převodní charakteristiky, které nám často napoví mnohem více jak FFT, posuzování převodní charakteristiky však vyžaduje jistou dávku zkušeností a znalostí obvoduřiny, znalým se pak odmění komplexním pohledem na chování zesilovače v závislosti na frekvenci i amplitudě, pomůže odhalit nevhodně nastavený bod, nevhodně zvolený prvek, ale i náchylnost na kmitání a mnohé další.

Na obrázku je patrný pokles zesílení, ale také jistá možná nestabilita s náchylností na kmitání, zřejmě při zavírání tranzistoru v kladné větvi, které neskončilo při otevření tranzistoru ve větvi záporné, atd..

### Dokonalý zvuk

Všechno je děláno pro dokonalý zvuk, ale nikdo doposud nestanovil definici dokonalého zvuku, co to vlastně je dokonalý zvuk, ten který je nejlíbivější, nebo ten který je nejvěrnější, líbivý nemusí být vždy věrný a věrný nemusí být vždy líbivý.

## 10. Řazení prvků



Federmann 1968 - 2011

Obrázek 23: Kaskoda napěťového zesilovače

### Napěťový zesilovač

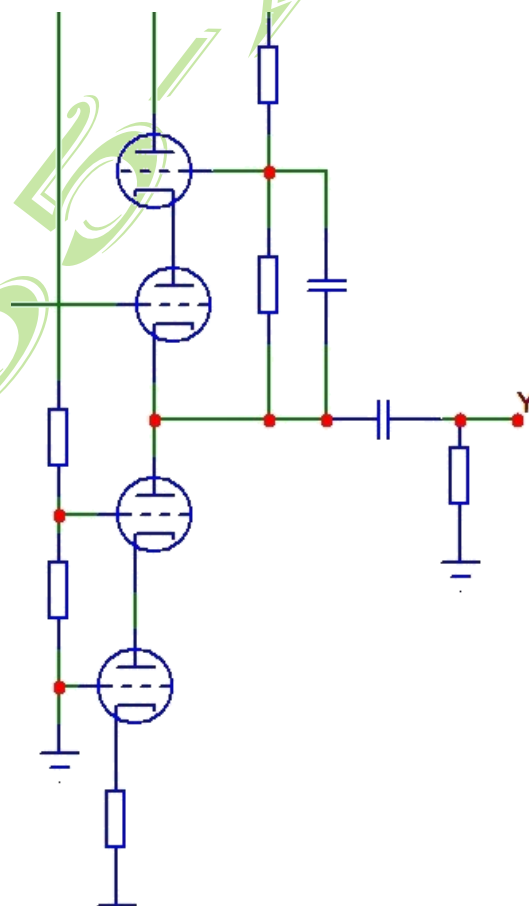
Kaskoda tvořena čtyřmi tranzistory pracujícími v čisté třídě A, možnost napájení i několik set voltů umožňuje široké využití v rozkmitových stupních, sloužících zároveň jako budiče koncových tranzistorů s šířkou pásma mnoha desítek MHz.

### Katodový sledovač

Kaskoda pro příznivce elektronek, tvořená čtyřmi elektronkami, kaskoda má obrovskou linearitu a malý výstupní odpor, obdobně jak kaskoda tranzistorová je ideálním budičem koncových tranzistorů či elektronek.

### Kaskody Federmann

Prvky můžeme řadit různými způsoby, jak za sebou, tak vedle sebe, méně zvyklé jsou kaskody, kaskody které se chovají jako jeden stupeň, ve kterém lze realizovat značný zisk a dosáhnout značné linearity, vhodnou topologií lze zajistit maximální stabilitu pracovního bodu rozhodujících prvků, čímž se výrazně eliminuje nelinearita, typickými kaskádami Topologie Federmann jsou následující dvě kaskody.



Obrázek 24: Kaskoda katodového sledovače

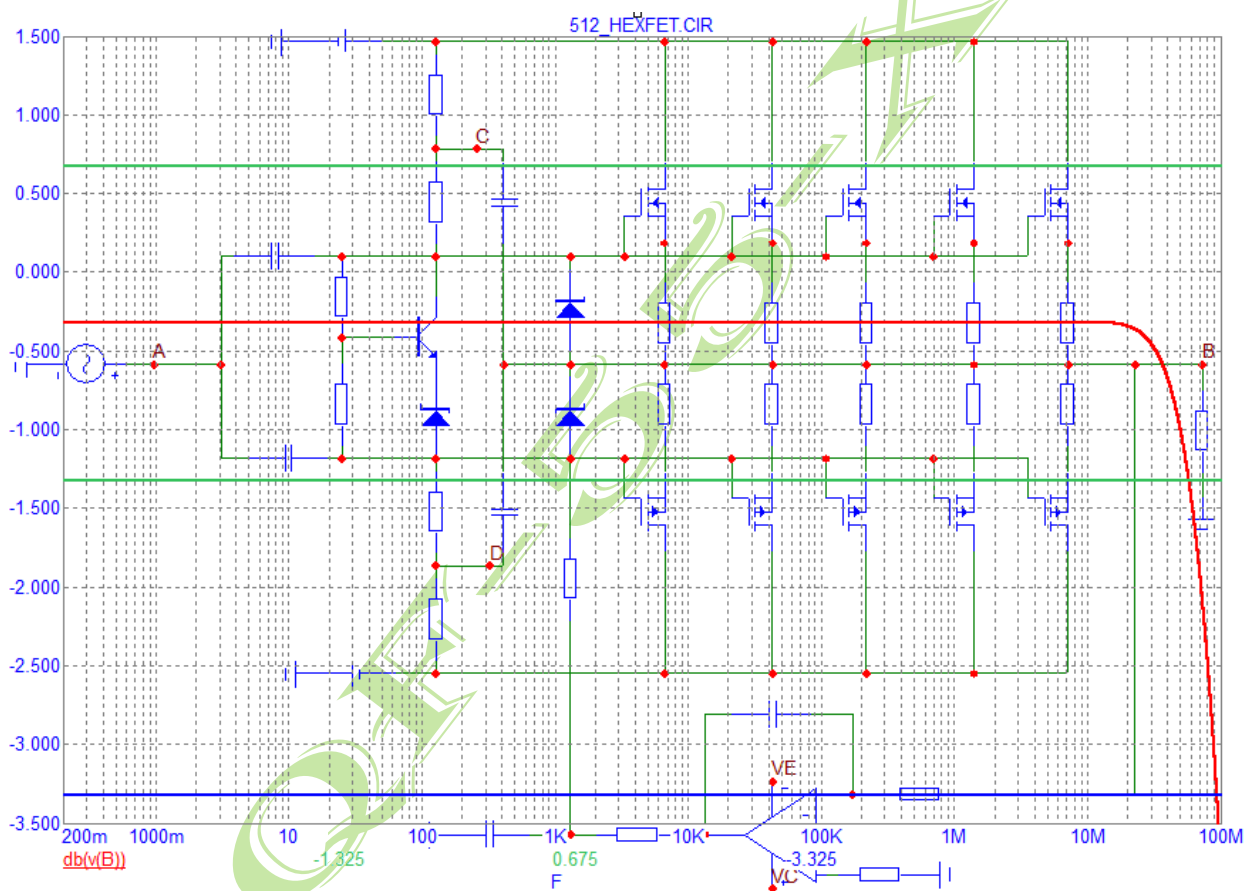


## Paralelní řazení

Často používané je paralelní řazení tranzistorů, ale i při tomto řazení můžeme dosáhnout jiných než běžných vlastností, obzvláště když obvodovou topologii doplníme patřičně důmyslnou topologií prostorovou, v praxi to znamená, že stabilita je mimo jiné závislá na značné minimalizaci vzdáleností a prostoru, která je řešitelná pouze na úrovni SMD prvků.

### Paralelní spojování HEXFETů

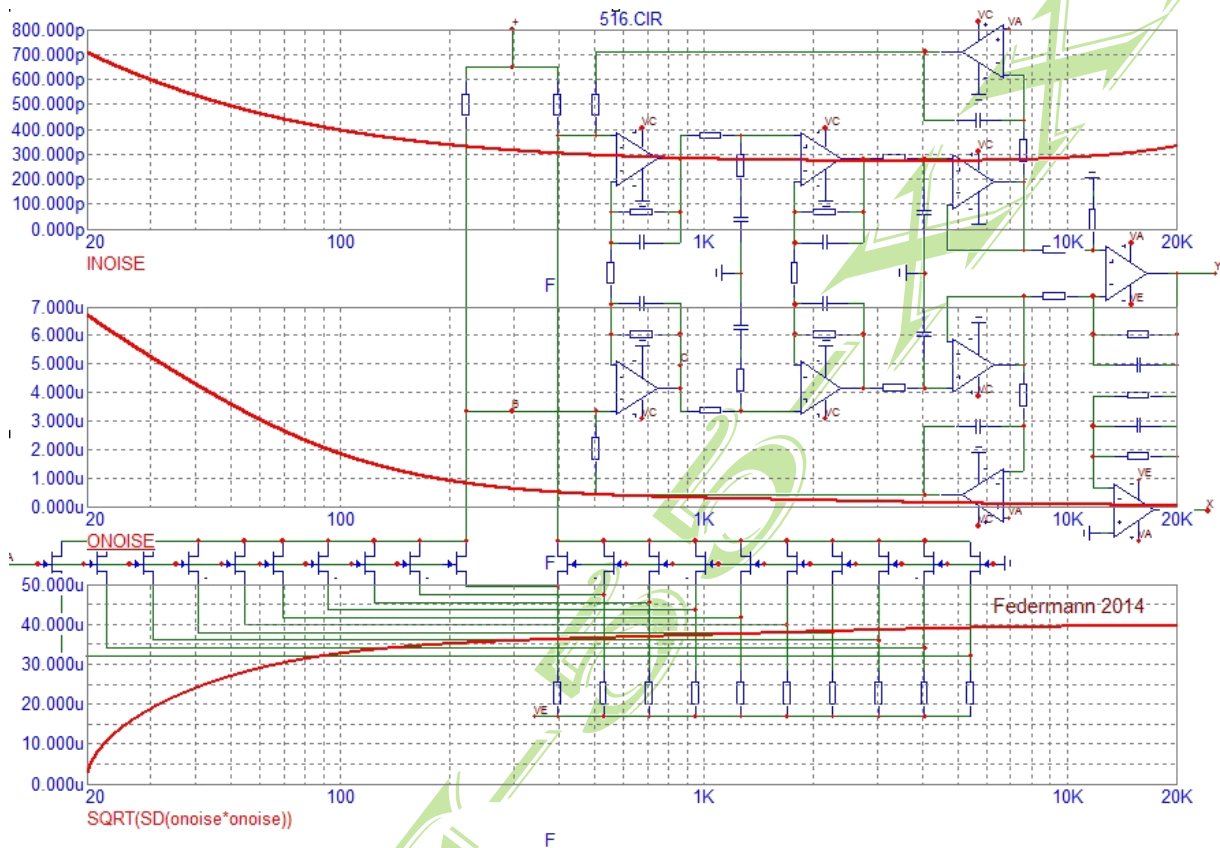
Malá ukázka řazení HEXFETů u 5párové verze zesilovačů HQQF Topologie Federmann řady 514, zesilovačů bez celkové zpětné vazby s šířkou pásma 58MHz pro pokles -1dB a pro pokles -3dB neuvěřitelných 98MHz.



Obrázek 25: Výkonové spojování HEXFETů u HQQF-55-514

### Paralelní spojování J-FETů

Typickým paralelním řazením tranzistorů v Topologii Federmann je spojování 10 párů J-FETů za účelem dosažení menšího šumu, tímto spojováním bylo dosaženo přepočteného vstupního šumového napětí  $0,28\text{nV}/\sqrt{\text{Hz}}$  při 1KHz, je zde i ukázka stejnosměrného řazení OZ v dlouhé řetězce s pasívními RIAA filtry.



Obrázek 26: Šumové spojování J-FETů u HQQF-55-516

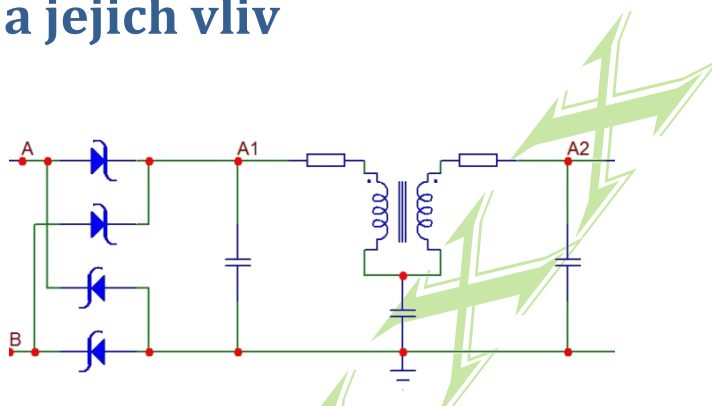
HQQF-55-516

## 11. Napájecí zdroje a jejich vliv

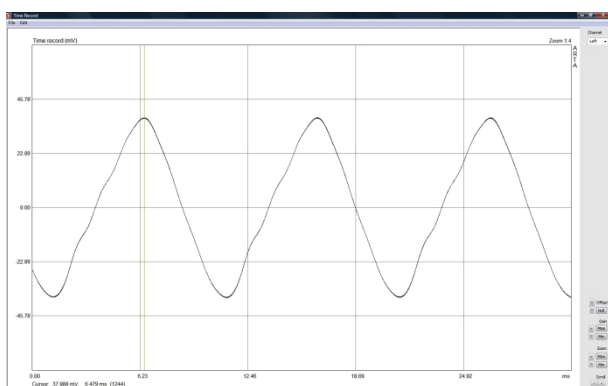
### Pokles zisku = pokles odolnosti

Řada zesilovačů 506 ukázala, že Topologie Federmann dosáhla pouhými dvěma stupni pokošení hranice zesílení otevřené smyčky 200dB a další zvyšování zesílení již není účelné.

Zesilovače HQQF stejně jak všechny ostatní mají s rostoucí frekvencí pokles zesílení, s poklesem zesílení roste zkreslení a náchyl-



Obrázek 28: Síťový filtr Federmann

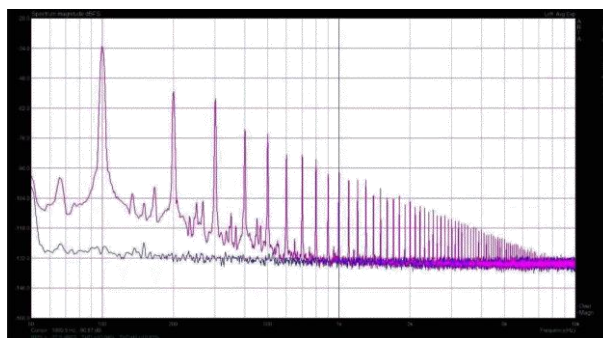


Obrázek 27: Měřený průběh napětí na filtračních kapacitách

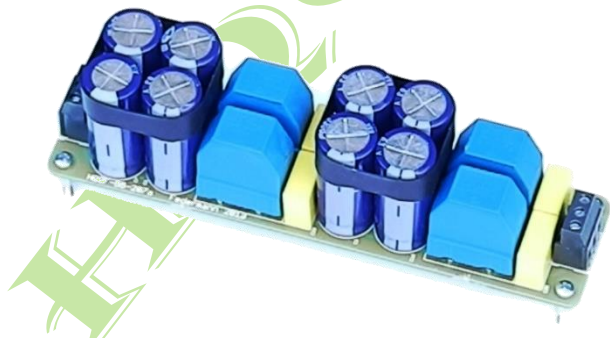
nost k Dynamické saturaci, jak je popsáno v předchozím textu, ale rovněž všechny zesilovače s poklesem rezervy zisku ztrácí úměrně schopnost se vypořádat i s rušením přicházejícím z napájení či odjinud. Vznikla tak snaha posunout vývoj zesilovačů dále, ale ne zdokonalováním jejich topologie, ale vytvořením topologie zdrojů, které by v konečném důsledku zlepšily vlastnosti zesilovačů, či by jejich vynikající vlastnosti méně degradovaly.

### Větší filtrační kapacity = širší spektrum rušení

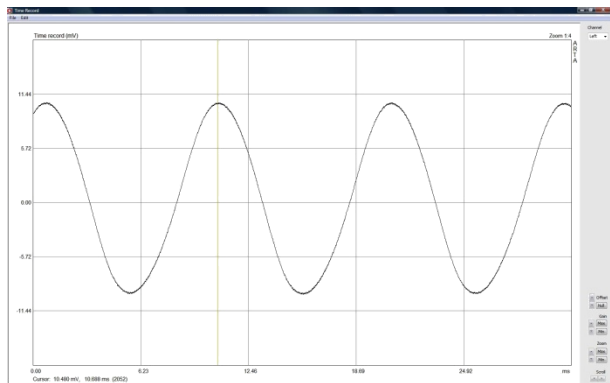
Snaha konstruktérů o tvorbu lepších zdrojů je vede k užívání rychlých diod a větších filtračních kapacit, v konečném důsledku se zmenší zvlnění, ale současně zkrátí nabíjení filtračních kapacit většími proudy a takto vytvořené rušivé harmonické sahají frekvenčně mnohem výše, zesilovač si však s vyššími harmonickými neumí poradit.



Obrázek 30: Spektrum harmonických před filtrem



Obrázek 29: Filtr napájení HQQF-55-207



Obrázek 31: Průběh napětí za filtrem

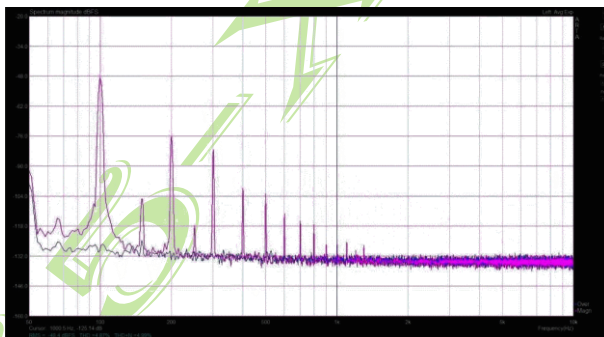
sinusový, použitím dvou stupňů se potlačení jenom zlepší a zvuk zesilovače se patřičně odvděčí.

Síťový filtr Federmann samozřejmě potlačí nejenom rušení vytvořené při usměrnění napětí ve zdroji zesilovače, ale taktéž dokonale potlačí rušení přicházející ze sítě, čímž dokonale při přidání filtru ss složky nahradí a předčí všechny síťové pračky

## Zbytečnost síťových praček

Žádné, ani ty nejdražší a nedůmyslnější síťové pračky nejsou schopny odstranit síťové rušení, které vzniká až v samotném zesilovači v jeho napájecím zdroji.

Právě proto jsem vyvinul velmi jednoduché, přitom originální řešení, spočívající v malé toroidní tlumivce podepřené kondenzátorem, pro nízké kmitočty se tváří téměř neviditelně, ale pro kmitočty vyšší je téměř nepropustná, tím změnil téměř trojúhelníkový průběh na průběh menší a



Obrázek 32: Spektrum harmonických za filtrem



Obrázek 33: Malé ohlédnutí za uplynulým ročníkem AKELu praxe vznikaly dostatečně dlouhou řadu let.

## Poděkování

Úplně závěrem můj velký dík a poklona organizátoru AKELu, panu Bohumilu Sýkorovi i jeho manželce, za čas a vynaloženou práci s organizací.

## 12. Závěr

Jde jen o nepatrný průřez odlišností mého pohledu od pohledů léta zažitých, od nich odvozených návrhů - topologii zesilovačů.

Pro hlubší se věnování té či oné problematice zde není téměř žádný prostor, snad v konkrétních dotazech na mou osobu. Každá část by se dala rozebírat desítky či stovky hodin, neboť pohled a



## 13. Obsah

1. Moto .....	1
2. Úvod .....	1
Začalo to BJT tranzistorem .....	2
3. Dělení zesilovačů .....	4
4. Pracovní oblast zesilovačů .....	5
Maximální výkon .....	5
Frekvenční rozsah .....	5
Zrychlení hmotného bodu .....	5
Energie zvuku .....	5
Amplituda zvukové vlny .....	5
Ultrazvuk .....	5
Infrazvuk .....	6
Rychlost přeběhu .....	6
Fáze .....	6
5. Diferenciální dvojice .....	8
BJT diferenciální dvojice .....	8
FET diferenciální dvojice .....	8
Elektronkové diferenciální dvojice .....	8
Srovnání BJT vs. FET vs. Elektronky .....	8
6. Milníky topologii .....	10
Harold Stephen Black .....	10
Robert R. Cordell .....	10
Chybová korekce .....	11
7. Zpětné vazby a jejich vliv .....	12
ZV tvořená strukturou aktivního prvku .....	12
ZV tvořená na lokální úrovni .....	12
ZV tvořená na celkové úrovni .....	12
8. Dynamická saturace .....	14
Cordellovo řešení .....	14
Federmannovo řešení .....	14
Dynamická saturace v praxi .....	14
9. Topologie zkreslení a zvuk .....	16
Zesilovače s celkovou ZV .....	16
Zesilovače bez celkové ZV .....	16
FFT, převodní charakteristika dokonalý zvuk .....	16
FFT - Fast Fourier transform .....	16
Převodní charakteristika .....	17
Dokonalý zvuk .....	17
10. Řazení prvků .....	18
Kaskody Federmann .....	18
Napěťový zesilovač .....	18
Katodový sledovač .....	18



Paralelní řazení.....	19
Paralelní spojování HEXFETů .....	19
Paralelní spojování J-FETů .....	20
11. Napájecí zdroje a jejich vliv .....	21
Pokles zisku = pokles odolnosti .....	21
Větší filtrační kapacity = širší spektrum rušení.....	21
Zbytečnost síťových praček .....	22
12. Závěr .....	22
Poděkování.....	22
13. Obsah.....	23
14. Seznam obrázků .....	25

HIQOOF-1515





## 14. Seznam obrázků

Obrázek 1: Pohled na 10párovou verzi HQQF-55-507 .....	1
Obrázek 2: Federmannův model tranzistoru BJT .....	2
Obrázek 3: Fázové poměry báze BJT tranzistoru.....	2
Obrázek 4: Fázové poměry báze BJT tranzistoru.....	2
Obrázek 5: Grafy poměrů báze BJT tranzistoru.....	3
Obrázek 6: Hybridní zesilovač E88CC, IRFP240/IRFP9240, 30W/8 Ω .....	4
Obrázek 7: Frekvenční závislost úrovně akustického signálu.....	6
Obrázek 8: Rozložení signálu v nahrávce .....	6
Obrázek 9: Předzesilovač HQQF s precizním nastavením zisku a charakteristik.....	7
Obrázek 10: Naměřené charakteristiky předzesilovače .....	7
Obrázek 11: Srovnávací zapojení diferenciálních dvojicí. ....	8
Obrázek 12: Charakteristiky diferenciálních dvojicí. ....	8
Obrázek 13: Detail charakteristik diferenciálních dvojicí. ....	9
Obrázek 14: Část Blackova patentu celkové zpětné vazby .....	10
Obrázek 15: Cordellova korekce frekvenční charakteristiky .....	10
Obrázek 16: Cordellova chybová korekce - blokově .....	11
Obrázek 17: Cordellova chybová korekce -schéma.....	11
Obrázek 18: Příklad zapojení zpětné vazby.....	12
Obrázek 19: Charakteristika s a bez zpětné vazby .....	12
Obrázek 20" Závislost Udif a zpoždění .....	14
Obrázek 21: Zesílení otevřené smyčky Topologie Cordell.....	14
Obrázek 22: zesílení otevřené smyčky Topologie Federmann .....	14
Obrázek 23: Kaskoda napěťového zesilovače .....	18
Obrázek 24: Kaskoda katodového sledovače.....	18
Obrázek 25: Výkonové spojování HEXFETů u HQQF-55-514.....	19
Obrázek 26: Šumové spojování J-FETů u HQQF-55-516.....	20
Obrázek 27: Měřený průběh napětí na filtračních kapacitách.....	21
Obrázek 28: Síťový filtr Federmann.....	21
Obrázek 29: Filtr napájení HQQF-55-207 .....	21
Obrázek 30: Spektrum harmonických před filtrem.....	21
Obrázek 31: Průběh napětí za filtrem .....	22
Obrázek 32: Spektrum harmonických za filtrem .....	22
Obrázek 33: Malé ohlédnutí za uplynulým ročníkem AKELu .....	22