

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

KATEDRA ELEKTROMECHANIKY A VÝKONOVÉ ELEKTRONIKY

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Výkonový zesilovač pro domácí použití

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE
(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Pavel SMETANA**
Osobní číslo: **E10B0422P**
Studijní program: **B2644 Aplikovaná elektrotechnika**
Studijní obor: **Aplikovaná elektrotechnika**
Název tématu: **Výkonový zesilovač pro domácí použití**
Zadávající katedra: **Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky**

Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :


1. Prostudujte možnosti řešení výkonových zesilovačů.
2. Navrhněte a realizujte výkonový zesilovač vhodný pro domácí použití.

Rozsah grafických prací: **podle doporučení vedoucího**
Rozsah pracovní zprávy: **20 - 30 stran**
Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná/elektronická**
Seznam odborné literatury:

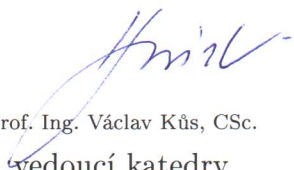
Student si vhodnou literaturu vyhledá v dostupných pramenech podle doporučení vedoucího práce.

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Oldřich Tureček, Ph.D.**
Katedra technologií a měření

Datum zadání bakalářské práce: **15. října 2012**
Termín odevzdání bakalářské práce: **7. června 2013**


Doc. Ing. Jiří Hammerbauer, Ph.D.
děkan




Prof. Ing. Václav Kůs, CSc.
vedoucí katedry

V Plzni dne 15. října 2012

Abstrakt

Práce je zaměřena na možnosti řešení výkonových zesilovačů. Zabývá se rozdělením jednotlivých druhů zesilovačů a jejich parametrů. Součástí práce je návrh a realizace nízkofrekvenčního výkonového zesilovače. Je zde popsán postup stavby zesilovače a jeho oživení. Parametry zesilovače byly ověřeny laboratorním měřením na přístroji *Audio precision 2700*.

Klíčová slova

výkonový zesilovač, Leach, tranzistor, zkreslení, Audio precision 2700

Abstract

This bachelor thesis is focused on the ways of construction of power amplifiers. There are introduced the kinds of the power amplifiers and their parameters in the thesis. The second part of the thesis consists of the design and the realization of the low frequency amplifier. The method of the construction and start-up of the amplifier is also described. The parameters were verified by *Audio precision 2700*.

Key words

power amplifier, Leach, transistor, distortion, Audio precision 2700

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů uvedených v seznamu, který je součástí této bakalářské práce.

Dále prohlašuji, že veškerý software použitý při řešení této bakalářské práce je legální.

.....

podpis

V Plzni dne 3.6.2013

Jméno příjmení

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval Ing. Ladislavu Zuzakovi za cenné odborné rady a výpomoc při realizaci a měření zesilovače.

Obsah

SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK	IX
ÚVOD	1
1 ÚVOD DO TEORIE ŘEŠENÍ ZESILOVAČŮ	2
1.1 LIDSKÝ SLUCH.....	2
1.2 PARAMETRY POPISUJÍCÍ VÝKONOVÝ ZESILOVAČ	2
1.3 OBECNÉ ROZDĚLENÍ ZESILOVAČŮ	3
1.3.1 Integrovaný obvod (IO).....	3
1.3.2 Zapojení z diskretních součástek.....	3
1.3.3 Zapojení s elektronkami.....	3
1.4 PRACOVNÍ TŘÍDY ZESILOVAČŮ	4
1.4.1 Zesilovač třídy A	4
1.4.2 Zesilovač třídy B	4
1.4.3 Zesilovač třídy AB.....	5
1.4.4 Ostatní třídy	5
1.5 ZKRESLENÍ ZESILOVAČE - VZNIK	6
1.5.1 Přejížděcí zkreslení	6
1.5.2 Zkreslení při přebuzení zesilovače	6
1.6 DRUHY ZKRESLENÍ ZESILOVAČE.....	6
1.6.1 Celkové harmonické zkreslení (THD+N).....	6
1.6.2 Zkreslení TIM (Transient Intermodulation Distortion).....	7
1.6.3 Intermodulační zkreslení.....	7
1.7 VÝSTUPNÍ VÝKON ZESILOVAČE	7
1.8 VELIKOST IMPEDANCE, PRO KTERÉ JE ZESILOVAČ URČEN.....	8
1.9 NAPÁJECÍ ZDROJ ZESILOVAČE	8
2 VÝBĚR VHODNÉHO ŘEŠENÍ VÝKONOVÉHO ZESILOVAČE PRO DOMÁCÍ POUŽITÍ	10
2.1 POPIS ZAPOJENÍ	10
2.1.1 Vstupní diferenciální část.....	10
2.1.2 Druhý stupeň.....	11
2.1.3 Regulace klidového proudu.....	11
2.1.4 Nadproudová ochrana	11
2.1.5 Koncový stupeň	11
2.1.6 Zpětná vazba	12
2.1.7 Stejnoseměrné servo	12
2.2 STAVBA ZESILOVAČE	13
2.2.1 Deska plošného spoje zesilovače	13
2.2.2 Napájecí zdroj.....	13
2.2.3 Pomalý náběh zdroje (softstart).....	14
2.3 POPIS VÝROBY DPS PRO ZDROJ METODOU NAŽEHLOVÁNÍ TONERU.....	15
3 POSTUP OŽIVENÍ	17
3.1 MĚŘENÍ ZESILOVAČE.....	18
4 STAVBA PŘÍSTROJOVÉ SKŘÍNĚ.....	19
4.1 VÝPOČET CHLADIČE	20
5 ZÁVĚR:	23
SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ	24
PŘÍLOHY:	I-X

Seznam symbolů a zkratek

f.....	Frekvence
dB.....	Decibel
DC.....	Označení stejnosměrného proudu
DPS.....	Deska plošného spoje
Hz.....	Jednotka frekvence
IO.....	Integrovaný obvod
OZ.....	Operační zesilovač
IO.....	Integrovaný obvod
W.....	watt – jednotka výkonu
Ω	Ohm – jednotka elektrického odporu
V.....	Volt – jednotka elektrického napětí

Úvod

Výkonový nízkofrekvenční zesilovač pracuje v rozmezí člověkem slyšitelného pásma. Zesiluje nízkou úroveň vstupního signálu ze zdroje na dostatečnou úroveň tak, aby bylo možné vybudit reproduktory. Membrána reproduktoru pak přeměňuje zesílený elektrický signál na akustický tlak, který člověk vnímá jako zvuk.

Cílem této práce je prostudovat různé možnosti řešení zesilovačů, vybrat vhodné schéma a postavit a oživit nízkofrekvenční výkonový zesilovač pro domácí použití. Od zesilovače očekávám výstupní výkon 100-200 W při co nejnižším zkreslení. Následně jsou jeho parametry ověřeny laboratorním měřením.

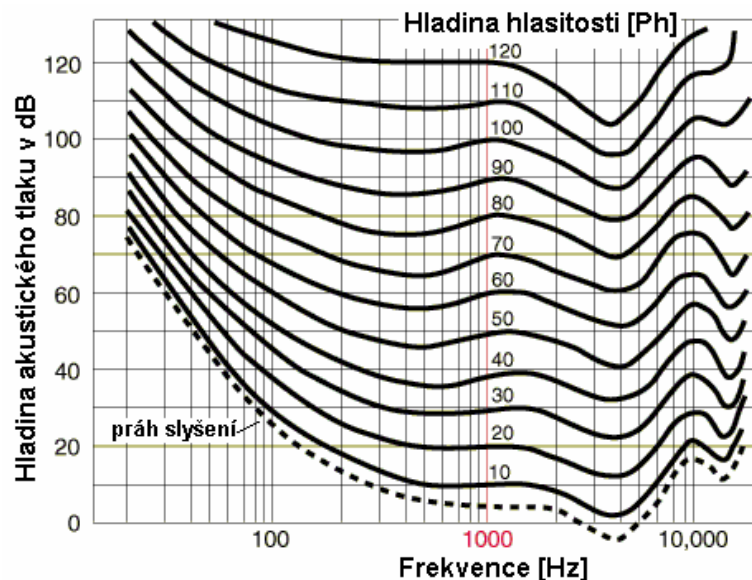
Byla vybrána modifikace známého symetrického zapojení zesilovače Leach. Autorem původního zapojení je profesor W. Marshall Leach, který toto zapojení publikoval v roce 1976.

1 Úvod do teorie řešení zesilovačů

1.1 Lidský sluch

Nízkofrekvenční zesilovač musí pracovat v člověkem slyšitelném pásmu, které je v rozmezí od 20 Hz do 20 kHz. Frekvence vyšší než 20 kHz jsou pro člověka neslyšitelné a běžné reproduktory nedokáží tento zvuk zahrát. Pro nižší kmitočty musí mít membrána reproduktoru velkou plochu, aby vytvořila dostatečný akustický tlak.

Lidský sluch nevnímá všechny frekvence se stejnou intenzitou. Intenzita vnímaného zvuku se mění v závislosti na akustickém tlaku a frekvenci. Křivky popisující závislost mezi frekvencí a akustickým tlakem se nazývají izofony. Tato závislost je znázorněna na obrázku č. 1.



Obr. 1 - křivky stejné hlasitosti (izofony) [1]

1.2 Parametry popisující výkonový zesilovač

Výkonový zesilovač si lze představit jako dvojbran, kde jsou důležitými parametry zisk, šířka zesilovaného pásma a zkreslení. Také by měl mít vysokou účinnost, potlačovat brum způsobený sítí a mít nízký šum, který způsobují rezistory a aktivní prvky. Výkonový zesilovač by měl být také schopen odevzdávat velké výkony do zátěže.

1.3 Obecné rozdělení zesilovačů

Zesilovače lze rozdělit podle použitých součástek při stavbě na tři hlavní druhy – integrovaný obvod, zapojení z diskretních součástek a zapojení z elektronek. Speciálním případem je hybridní zapojení, které je vytvořené z jejich kombinace.

1.3.1 Integrovaný obvod (IO)

Integrovaný obvod má kromě nízké ceny ještě mnoho dalších výhod. Jedna z nich je, že zesilovač je poměrně jednoduchý na zapojení a je spolehlivý. Většinou stačí přidat jen několik součástek a zesilovač je plně funkční. Další výhodou je vysoká hustota součástek v jednom pouzdře, tudíž je výsledný zesilovač menší a krátké spoje uvnitř pouzdra omezují parazitní vlastnosti propojovacích vodičů. Oteplení součástek je rovnoměrné kvůli jejich mechanické provázanosti. Pouzdro často obsahuje ochranné obvody proti přetížení a přehřátí. Běžné zapojení IO dosahují výstupního výkonu do 50 W.

1.3.2 Zapojení z diskretních součástek

Zapojení z diskretních součástek nabízí možnost dosáhnout vysokých výstupních výkonů. Vysoké výstupní výkony jsou dosaženy paralelním řazením koncových tranzistorů. Nevýhodou je rozsáhlost zapojení a horší tepelná provázanost součástek. Také se mohou více projevit parazitní vlivy součástek.

1.3.3 Zapojení s elektronikami

Elektronky, často nazývané „lampy“, se dnes používají v zapojení nízkofrekvenčních zesilovačů jen výjimečně. Elektronkové zesilovače nejsou dnes již běžně používány, ale přesto se s nimi stále můžeme setkat v některých zařízeních. Mezi hlavní výhody patří jejich nízký vnitřní odpor a frekvenční stabilita. U elektronkových zesilovačů také nenajdeme šum polovodičového přechodu. Jejich další vlastnost je krátkodobá přetížitelnost. Nevýhodou je velký odběr elektrické energie a nízká životnost. Další nevýhodou je nutnost použití kvalitních výstupních transformátorů, které dále prodražují výslednou cenu zesilovače. Také cena elektronek je v dnešní době vyšší při porovnání s cenou tranzistorů.

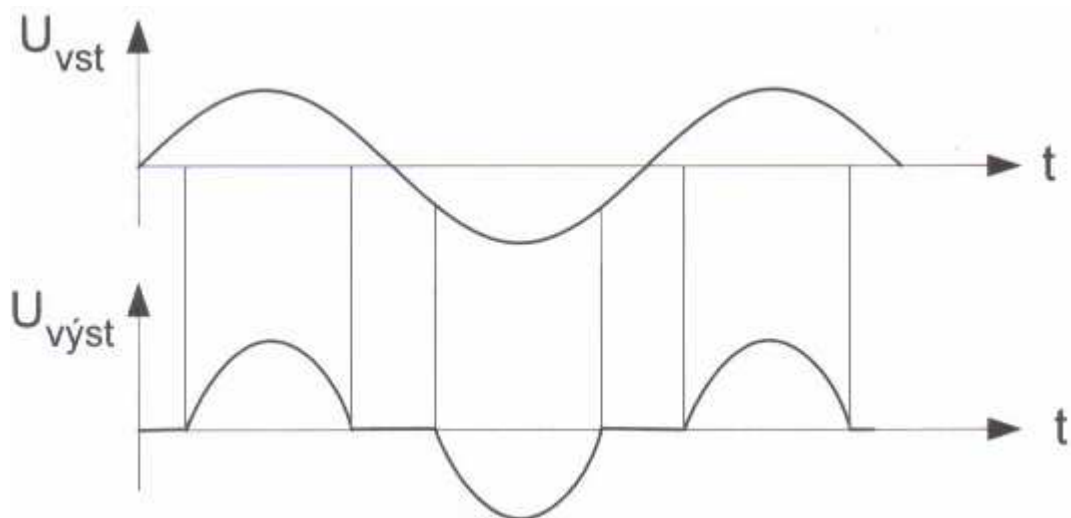
1.4 Pracovní třídy zesilovačů

1.4.1 Zesilovač třídy A

Tento typ zesilovače zesiluje celou periodu vstupního signálu. Jeho hlavní výhodou je minimální zkreslení. Mezi nevýhody patří malá teoretická účinnost maximálně 25 % způsobená velkým klidovým proudem. Tento typ zapojení je vhodný pro předzesilovače.

1.4.2 Zesilovač třídy B

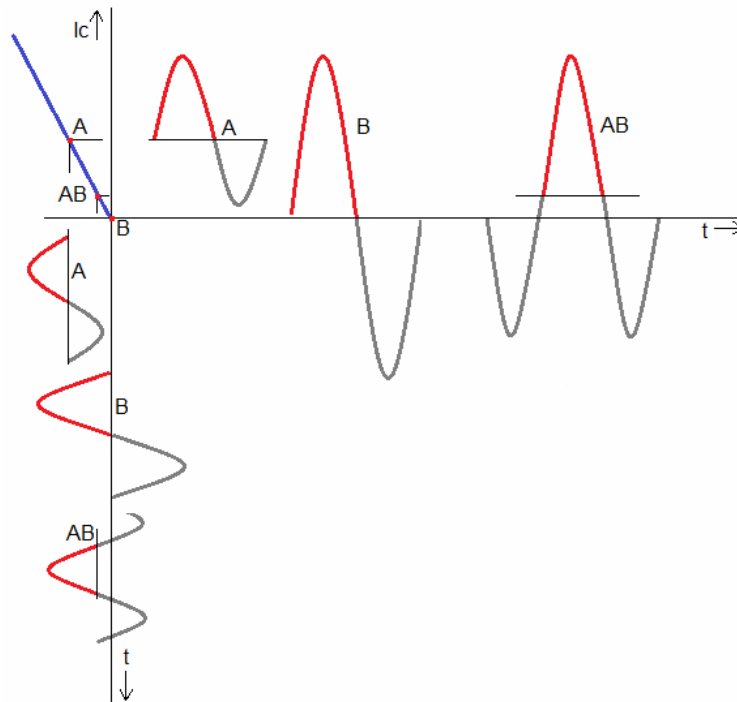
Toto zapojení zesiluje pouze jednu polaritu signálu. Proto je potřeba pro zesílení celé periody použít komplementární dvojici tranzistorů. Tranzistory pracují bez předpětí (v zániku kolektorového proudu). To způsobuje přechodové zkreslení (viz obr. 2). Výhodou tohoto zapojení je poměrně vysoká teoretická účinnost až 78,5 %.



Obr. 2 - přechodové zkreslení [2]

1.4.3 Zesilovač třídy AB

Tato třída využívá výhod obou typů zapojení A i B. Aby se minimalizovalo přechodové zkreslení, musí tranzistory protékat malý klidový proud – báze a emitor musí pracovat s předpětím. Tento druh zesilovače má nižší účinnost než zesilovač třídy B, teoreticky až 70 %. Znázornění pracovních bodů jednotlivých tříd zesilovačů lze vidět na obrázku č. 3.



Obr. 3 - grafické znázornění pracovního bodu tříd A,B,AB

1.4.4 Ostatní třídy

Třída C má záporné předpětí na bázi, a tak zesiluje pouze malou část periody. Výhodou je vysoká teoretická účinnost. V nízkofrekvenční oblasti se nepoužívá. Využití má převážně ve vysokofrekvenční technice.

Třída D je označována jako Digitální. Pro zpracování signálu se používá pulsně šířková modulace. Využitím spínaného režimu tranzistorů je teoretická účinnost až 80 %.

Zesilovač **třídy G a H** jsou kombinací předešlých tříd, kde je regulována velikost napájecího napětí.

1.5 Zkreslení zesilovače - vznik

Za zkreslení se u zesilovače považuje změna tvaru výstupního signálu oproti vstupnímu. Některé druhy zkreslení nemusí mít na kvalitu zvuku zásadní vliv.

1.5.1 Přejímové zkreslení

Toto zkreslení lze pozorovat u zesilovače třídy B, kde neprotéká klidový proud. Přejímová báze-emitor se otevírá až při určité hodnotě napětí. To má za následek změnu tvaru signálu při průchodu nulou. Přejímové zkreslení se objevuje i u třídy AB, kde je částečně sníženo nastavením nízkého klidového proudu.

1.5.2 Zkreslení při přebuzení zesilovače

Při určité úrovni vstupního signálu je zesilovač omezen maximálním napětím zdroje. Další zvyšování úrovně vstupní signálu deformuje výstupní signál. Tento jev se nazývá limitace zesilovače.

1.6 Druhy zkreslení zesilovače

Zkreslení zesilovače lze popsat několika způsoby. Rozlišujeme celkové harmonické zkreslení, zkreslení TIM a intermodulační zkreslení.

1.6.1 Celkové harmonické zkreslení (THD+N)

Harmonické zkreslení je dáno poměrem velikosti energií vyšších harmonických frekvencí oproti základní frekvenci. Udává se v procentech a pro čistý harmonický signál je $THD+N = 0\%$. Pro měření tohoto zkreslení je nutné mít co nejkvalitnější zdroj sinusového signálu. Celkové harmonické zkreslení lze vyjádřit pomocí následujícího vzorce:

$$THD + N = \frac{\sum \text{výkon vyšších harmonických}}{\text{výkon základní harmonické}} = \frac{P_2 + P_3 + P_4 + \dots + P_n}{P_1} \cdot 100 [\%]$$

Vzorec 1 – výpočet THD+N

1.6.2 Zkreslení TIM (*Transient Intermodulation Distortion*)

Příčinou zkreslení TIM je celková zpětná vazba, která snižuje zesílení, rozšiřuje přenášené pásmo a zaručuje stabilitu. Projevuje se nedostatečnou rychlostí přeběhu, kdy zesilovač nestíhá sledovat vstupní signál. Zkreslení je patrné při vysoké úrovni obdélníkového signálu a vysoké frekvenci. Obdélníkový signál mění strmost náběžné hrany oproti vstupnímu signálu.

1.6.3 Intermodulační zkreslení

Intermodulační zkreslení se projevuje při přivedení dvou sinusových signálů o různé frekvenci na vstup zesilovače. Na výstupu zesilovače se objeví jak vstupní signály, tak i jejich kombinace.

1.7 Výstupní výkon zesilovače

Výstupní výkon zesilovač se udává ve Wattech a je měřen do určité míry zkreslení. Velikost míry zkreslení není závazná, ale může být stanovena například normou ČSN EN 60268-3. Výstupní výkon se označuje třemi způsoby:

PMPO (*Peak Music Power Output*)

PMPO označuje krátkodobý (špičkový) výkon zesilovače. Jeho hodnota je vyšší než u RMS. Energii pro tak vysoký výkon dodávají kondenzátory ve zdroji. U této hodnoty není přesně stanoveno, do jaké zátěže a jak dlouho špička trvá.

RMS (*Root Mean Square*)

RMS udává efektivní hodnotu střídavého napětí (proudu). Tato hodnota střídavého proudu vytvoří na zátěži stejné tepelné účinky, jako by vytvořil stejnosměrný proud.

Sinusový výkon

Sinusový výkon zesilovače je měřen při buzení harmonickým signálem (často měřeno pro 1 kHz) při maximálním vybuzení zesilovače, dokud nedochází k limitaci. Uvádí se do jaké zátěže byl výkon měřen.

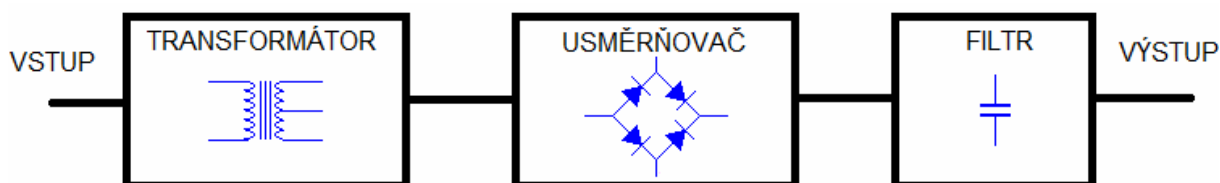
1.8 Velikost impedance, pro které je zesilovač určen

Zesilovače mají uvedenou hodnotu jmenovité impedance, do které jsou schopny pracovat. Tuto impedanci je vhodné dodržovat. Při připojení nižší než jmenovité impedance mohou zareagovat ochrany proti přetížení, a nebo může dojít i ke zničení zesilovače.

Reproduktory se vyrábí ve jmenovitých impedancích (2 Ω , 4 Ω , 6 Ω , 8 Ω ...). Nižší hodnoty impedancí se používají například v autorádiích, kde jsme omezeni nízkou hodnotou palubního napětí 12 V. Vyšší hodnoty impedancí reproduktorů se používají pro snížení ztrát na přívodních vodičích.

1.9 Napájecí zdroj zesilovače

Zdroj zajišťuje napájení zesilovače. Vhodné vlastnosti pro napájení má nestabilizovaný lineární zdroj. Blokové schéma nestabilizovaného lineárního zdroje znázorňuje obr. č. 4.



Obr. 4 - blokové schéma zdroje

Důležité parametry zdroje jsou napětí a proud. Výstupní napětí za usměrňovačem musí být co nejméně zvlněné, proto se zdroj doplňuje o filtrační kondenzátory, které zvlnění potlačují. Ty se volí v jednotkách až desítkách mF podle velikosti výstupního výkonu. Zdroj se dále doplňuje o keramické kondenzátory o kapacitě několik stovek nF, aby odstranily vysokofrekvenční rušení. Je vhodné použít transformátor v toroidním provedení, který vykazuje oproti klasickým transformátorům vyšší účinnost a nižší rušení.

Velikost výkonu napájecího transformátoru se volí minimálně stejně velká, jako je výstupní výkon zesilovače, ale je vhodné ponechat dostatečnou výkonovou rezervu. Orientační hodnoty transformátorů a kondenzátorů jsou uvedeny v následující tabulce:

výkon zesilovače	výkon transformátoru	napětí hlav. sekund. vinutí	filtrační kondenzátory
1 x 100 W	150 W	2 x 35 V	C1 = C2 = 5000 μ F/50 V
2 x 100 W	250 W	2 x 35 V	C1 = C2 = 10000 μ F/50 V
1 x 200 W	250 W	2 x 40 V	C1 = C2 = 10000 μ F/63 V
2 x 200 W	400 W	2 x 40 V	C1 = C2 = 20000 μ F/63 V
1 x 300 W	300 W	2 x 50 V	C1 = C2 = 15000 μ F/70 V
2 x 300 W	500 W	2 x 50 V	C1 = C2 = 33000 μ F/70 V

Tab. 1 – orientační hodnoty transformátoru a kondenzátorů pro dimenzování zdroje [3]

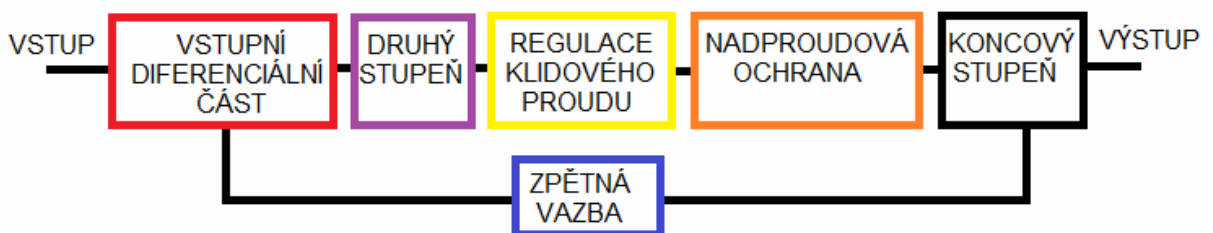
2 Výběr vhodného řešení výkonového zesilovače pro domácí použití

Pro domácí poslech požadujeme:

- Dvoukanálový zesilovač provozovaný ve stereo režimu
- Očekávaný výstupní výkon zesilovače 100-200 W při použití do zátěže o velikosti 4Ω
- Frekvenční rozsah 20 Hz až 20 kHz
- Zapojení v symetrickém provedení

Byl vybrán symetrický výkonový zesilovač postavený z diskretních součástek. Inspirací je známé zapojení Leach. Jedna z mnoha jeho modifikací se objevila v Amatérském radiu [4].

2.1 Popis zapojení



Obr. 5 – blokové schéma výkonového zesilovače

2.1.1 Vstupní diferenciální část

Zesilovač je řešen jako symetrické zapojení. Vstupní signál je přiveden na vstupní RC člen, který odstraňuje vysoké frekvence. Dále signál pokračuje na diferenciální vstup tvořený tranzistory T2, T3 a T5, T6. Vstupní signál je přímo přiveden na báze tranzistorů T2 a T3, zpětnovazební signál je přiveden na báze T5 a T6. Rozdílový signál, který vznikne odečtem vstupního a zpětnovazebního signálu je reprezentován jako kolektorový proud přes tranzistory T2 a T3 a je použit pro řízení dalšího stupně.

Rozdílový signál prochází také přes tranzistory T1 a T4. Ty jsou připojeny na referenční napětí dané Zenerovými diodami D5 a D6 na 39 V. Nastavují tak klidový proud v diferenciálním zesilovači.

2.1.2 Druhý stupeň

Druhý stupeň zesilovače je tvořen tranzistory T7, T10 a T8, T9. Tranzistory T7 a T10 se v běžném provozu neprojeví, slouží pouze jako ochrana. Tranzistory T8 a T9 slouží jako zesilovač signálu z diferenciálního stupně. Tranzistory T11 a T12 slouží jako regulace výstupu druhého stupně.

2.1.3 Regulace klidového proudu

Tranzistor T13 slouží jako stejnosměrný regulátor napětí. Velikost stejnosměrného napětí je regulována trimrem P1. Ten ovlivňuje velikost klidového proudu přes koncový stupeň. Tranzistor T13 je umístěn na chladiči společně s koncovými tranzistory. Teplotní spojení přes chladič slouží jako zpětná vazba, která zaručí pokles napětí na tranzistoru při ohřátí.

Některá zapojení využívají diod místo přímého umístění tranzistoru na chladiči. Diody jsou tepelně svázané s chladičem a slouží jako regulace při ohřátí. Nejlepší volbou je použití koncových tranzistorů, které obsahují snímací diodu přímo v pouzdře, tzv. ThermalTrak. Takto je zaručena nejlepší teplotní provázanost. Nevýhodou je úzký výběr a nedostupnost tranzistorů v tomto provedení.

2.1.4 Nadproudová ochrana

Zesilovač je doplněn o nadproudovou ochranu tvořenou tranzistory T14 a T15. Ty snímají velikost napětí na emitorových odporech. Nadproudová ochrana se nastavuje trimry P2 a P3.

2.1.5 Koncový stupeň

Výstup z druhého stupně pokračuje do koncového, který má nízkou výstupní impedanci a dokáže odevzdat velké výkony do zátěže.

Výstupní (koncové) tranzistory T18 až T21 jsou buzeny tranzistory T11, T12 a T16, T17. Celkově se jedná o třístupňové darlingtonovo zapojení. Tím je dáno velké proudové zesílení, které je potřeba pro vybuzení reproduktoru. Budič pracuje ve třídě A, aby snížil přechodové zkreslení. T18 a T20 zesilují kladnou polaritu signálu, T19 a T21 zesilují zápornou polaritu signálu.

Emitorové rezistory R47 až R51 vyrovnávají výrobní odchylky koncových tranzistorů a zajišťují tak rovnoměrné rozložení proudů přes koncové tranzistory.

Z koncových tranzistorů jde signál přes R53 paralelně s cívkou L1 na výstupní svorky. Výstup je uzemněn přes sériovou kombinaci rezistoru R54 a kondenzátoru C26, která se nazývá Boucherotův člen, a je spojena se zemí. Tato část potlačuje možný vznik zákmitů způsobených parazitní kapacitou reproduktorů a reproduktorových kabelů.

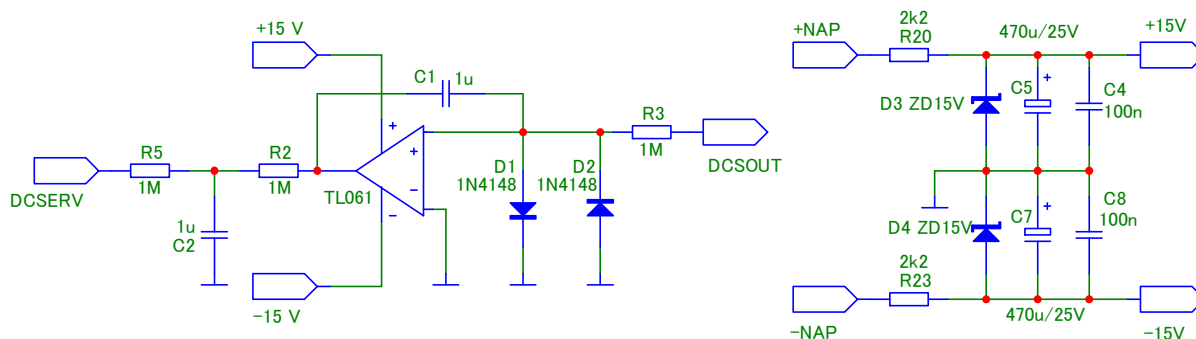
2.1.6 Zpětná vazba

Zpětná vazba je zde rozdělena do dvou větví. První část je vedena přímo z budičů T11, T12 přes rezistor R27 a kondenzátor C15. Dále je uzemněna přes antisériové spojení kondenzátorů C28 o hodnotě 220 μF a k nim paralelní kondenzátor C27. Druhá část je vedena přímo z koncových tranzistorů přes rezistory R24 a R21 a je uzemněna kondenzátorem C11.

2.1.7 Stejnosměrné servo

Původní zapojení bylo doplněno o stejnosměrné servo realizované operačním zesilovačem TL061. Stejnosměrné servo snímá velikost stejnosměrné složky na výstupu zesilovače a přivádí opačné napětí na vstup diferenciálního stupně. Tím snižuje velikost stejnosměrné složky na výstupu. Napájení pro stejnosměrné servo bylo odvozeno přes rezistory a Zenerovy diody od napájení zesilovače.

Protože se po oživení ukázalo, že DC servo není pro zapojení zásadním přínosem, rozhodl jsem ho vynechat z důvodu příliš velkého vstupního napěťového offsetu OZ TL061. Katalog výrobce OZ Thomson Microelectronics TL061 [5] udává vstupní napěťový offset $V_{io}=3\text{ mV}$. Vhodným výběrem například OZ OP07 od firmy Texas Instruments by se funkce DC serva mohla zlepšit. Pro OZ OP07 je v datovém listu uvedena hodnota $V_{io}=60\text{ }\mu\text{V}$ [6]



Obr. 6 – schéma DC serva a jeho zdroje

2.2 Stavba zesilovače

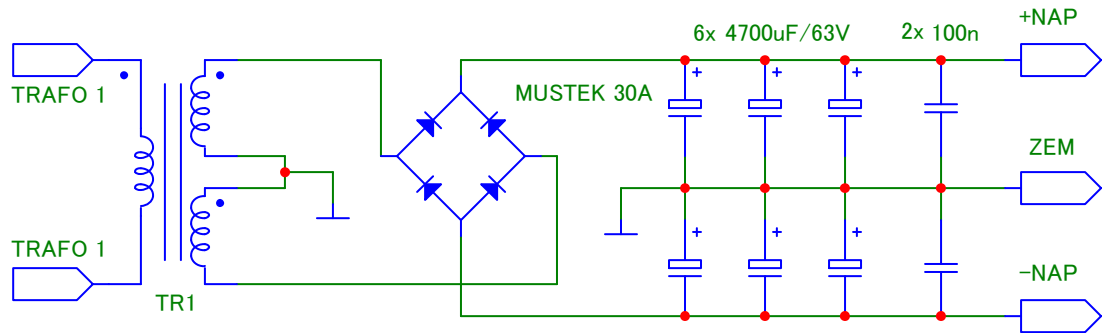
2.2.1 Deska plošného spoje zesilovače

Základem při stavbě zesilovače je deska plošného spoje (DPS). Byla použita dvoustranná deska o rozměrech 160 x 80 mm. Při kusové výrobě DPS neobsahuje prokovené otvory a tak je potřeba pájet součástky z obou stran.

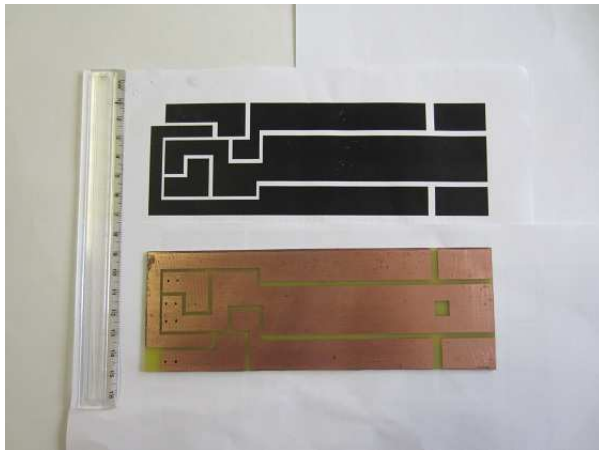
Pro osazování byly použity běžně dostupné součástky. Rezistory jsou metalizované. Elektrolytické hliníkové kondenzátory jsou tepelně odolné na 105 °C. Trimry 2 k Ω jsou víceotáčkové (25 otáček), aby bylo možné jemně nastavit klidový proud koncovými tranzistory. Emitorové rezistory jsou řešeny pomocí metaloxidových rezistorů na 2 W. Zde by bylo vhodné použít rezistory drátové o jmenovité výkonové ztrátě 5 W. Diferenciální stupeň je řešen tranzistory v pouzdře TO92. Druhý stupeň a tranzistor pro regulaci klidového proudu je v pouzdře TO-220. Pouzdro je celoplastové a tak odpadá problém s izolačními podložkami. Nevýhodou je snížený odvod tepla. Kvůli mechanickému provedení zesilovače byly zvoleny bipolární koncové tranzistory Toshiba 2SC5200 a 2SA1943 v pouzdře TO264. Pod tyto tranzistory jsem použil silikonovou izolační podložku. Všechny tranzistory umístěné na chladiči jsou pro lepší odvod tepla namazány tepelně vodivou pastou. Zenerovy diody tvořící referenční napětí 39 V jsou přeměřené a byly vybrány z více kusů. Pojistky jsou použity rychlé o velikosti vypínacího proudu 5 A a jsou uloženy v pojistkovém pouzdře.

2.2.2 Napájecí zdroj

Zdroj energie pro zesilovač je řešen pro každý kanál odděleně. Jedná se o symetrické provedení ± 52 V. Pro tento zdroj byl zvolen toroidní transformátor 2x36 V 300 W. Usměrňovač je můstkový se jmenovitým proudem 30A. Každý kanál obsahuje celkem 6 filtračních kondenzátorů, každý o kapacitě 4,7 mF. Celková kapacita je cca 15 mF pro každou polaritu. Paralelním spojením více kondenzátorů o nižší kapacitě se také sníží vnitřní odpor zdroje. Propojení zdroje a zesilovače je realizováno pomocí vodičů s konektory Fast-on 4,8 mm.



Obr. 7 – schéma napájecího zdroje



Obr. 8 – DPS zdroje po vyleptání a omytí



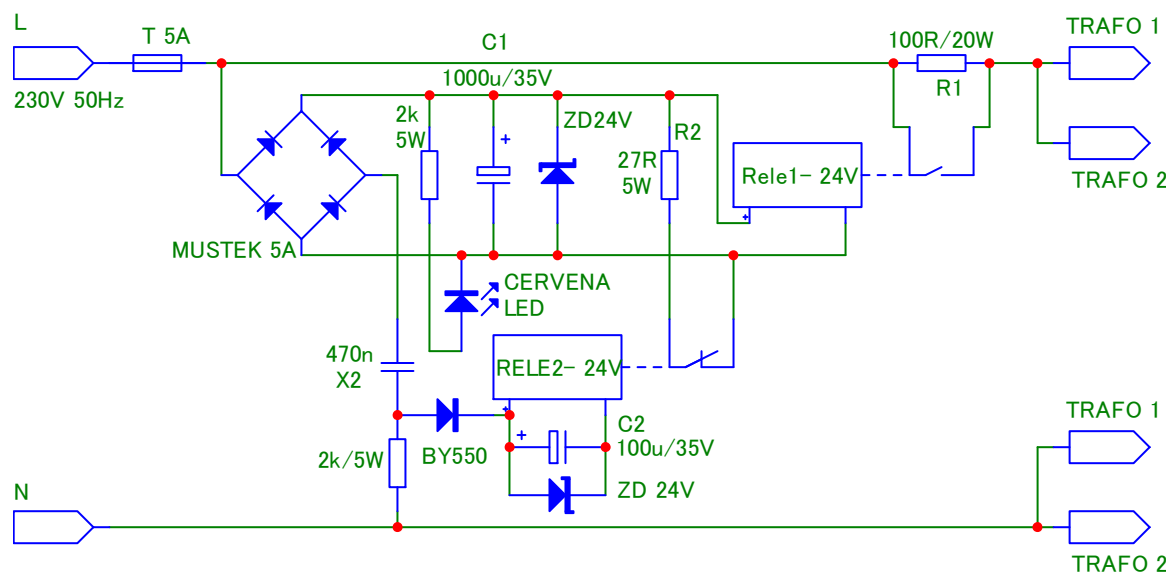
Obr. 9 – DPS zdroje po osazení

2.2.3 Pomalý náběh zdroje (softstart)

Tento pomocný obvod má za úkol snížit proudový ráz do sítě při zapnutí a snižuje namáhání filtračních kapacit způsobených vysokým nabíjecím proudem. Při zapnutí zdroje dochází k nabíjení velkých kapacit, a to v kombinaci s magnetizačním proudem transformátoru způsobuje proudovou špičku, která může vybavovat jisticí prvek instalace.



Obr. 10 – foto softstartu



Obr. 11 – schéma softstartu

Popis funkce

Rezistor R1 o hodnotě $100\ \Omega$ a maximální jmenovité výkonové ztrátě $20\ \text{W}$ je po zapnutí síťového spínače v sérii s primárními vinutími transformátorů. Po časové prodlevě 1-2 sekundy, která je dána dobou nabíjení kondenzátoru C1 o hodnotě $1000\ \mu\text{F}/35\ \text{V}$ sepne relé 1, které přemostí rezistor.

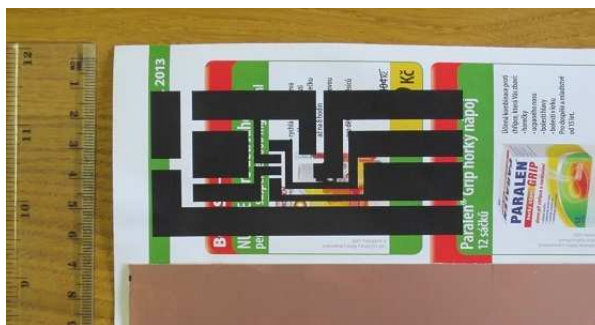
Aby došlo k včasnému odpadnutí relé po vypnutí zařízení, je paralelně k cínce spínacího relé 1 rozpínací relé 2, které po odpojení napájení vybijí zbytkový náboj z kondenzátoru C1 přes rezistor $27\ \Omega/5\ \text{W}$. Relé jsou použita na napětí $24\ \text{V}$, Zenerovy diody chrání proti přepětí a odvádí napěťové špičky způsobené spínáním cívek relé.

Softstart také obsahuje indikační červenou LED diodu. Deska plošného spoje pro zdroj a softstart je vyrobena metodou nažehlování toneru z laserové tiskárny.

2.3 Popis výroby DPS pro zdroj metodou nažehlování toneru

Jednoduché obvody obsahující několik součástek je nákladné vyrábět například fotocestou. Spoje kreslené v ruce nemají stejnou tloušťku čar a na větších plochách jsou vidět tahy fixem.

Aby bylo dosaženo lepšího výsledku, byl použit jako rezist při leptání toner z laserové tiskárny.



Obr. 12 - vytisknutý toner na lesklém papíře

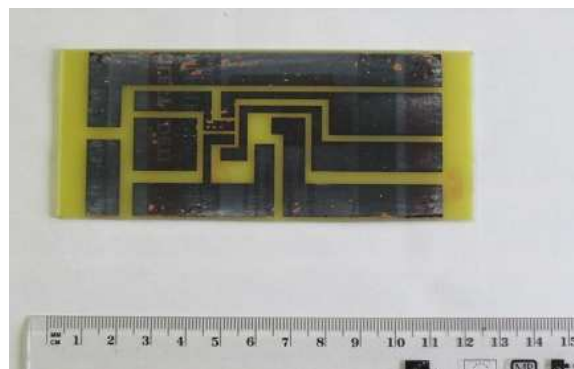
Metoda spočívá v tom, že se na lepící papír, reklamní leták nebo speciální fólii vytiskne laserovou tiskárnou motiv cest a přiloží se na desku ze strany mědi. Žehličkou se nažehlí. Důležité je, že se motiv nemusí zrcadlově převracet. Doba žehlení se pohybuje okolo 5 minut. Po vychladnutí desky se papír nechá odmočit ve vlažné vodě.

Použití barevných papírů se ukázalo jako neefektivní, protože toner nedržel na desce. Záleží na druhu toneru a typu barevných nažehlovacích papírů. Lepší výsledek byl dosažen tiskem motivu na lesklý papír reklamního letáku. Po nažehlení a odmočení toner zůstal na desce. Odstraňování papíru z desky vyžaduje jistou trpělivost a opatrnost, aby nedošlo k poškození motivu. Menší chyby se snadno doopraví lihovým fixem.

Následovalo vyleptání v roztoku chloridu železitého a odstranění toneru. Toner nelze odstranit lihem jako lihový fix, ředidlo nesmývalo dokonale. Jako účinný se osvědčil toluen.



Obr. 13 - odstraněný papír po nažehlení



Obr. 14 – vyleptaná deska plošného spoje

3 Postup oživení

Po osazení součástkami a upevnění na chladič byl zesilovač pro první připojení ke zdroji osazen pojistkami o nižší hodnotě vypínacího proudu. Mezi zdroj a zesilovač byly do obou větví vřazeny rezistory o velikosti $50\ \Omega$, které ochrání součástky především tranzistory v případě chyby v zapojení. Paralelně k rezistoru byl zapojen voltmetr, který měřil úbytek napětí. Podle velikosti napětí, respektive velikosti proudu, který přes rezistor prochází, bylo možné rozpoznat problém v zapojení.

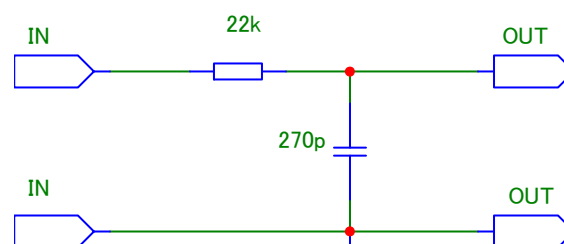
Zesilovač nefungoval na první zapojení. Při provozu na prázdko bylo stejnosměrné napětí v jednotkách milivolt. Po připojení zátěže se objevila na výstupu stejnosměrná složka $4\ \text{V}$. Po odpojení stejnosměrného serva byla stejnosměrná složka na výstupu bez zátěže v hodnotě $200\text{--}300\ \text{mV}$. To je pro toto zapojení příliš vysoká hodnota.

Další chyby ve schématu byly objeveny v diferenciálním stupni, kde jsou k Zenerovým diodám D5, D6 paralelně umístěny kondenzátory C9, C13. Schéma uvádělo pro jednu větev kondenzátor C9 $100\ \mu\text{F}/50\ \text{V}$ a v druhé větvi byl použit kondenzátor C13 $10\ \mu\text{F}/50\ \text{V}$. Ochrana Dioda D12 byla orientována opačně. Ani po odstranění těchto chyb nefungoval zesilovač správně.

Při porovnání s originálním zapojením bylo zjištěno, že chybí část zpětné vazby. Rezistor R22 byl přímo uzemněn. Připojil jsem do série s rezistorem kondenzátor C27 $100\ \text{nF}$. To sice snížilo výstupní napětí bez DC serva na hodnotu $5\text{--}20\ \text{mV}$, ale snížilo to také zesílení v oblasti nízkých frekvencí a způsobilo fázový posun a deformaci výstupního signálu.

Po doplnění zpětné vazby připojením antisériové kombinace kondenzátorů C28, C29 o kapacitě $220\ \mu\text{F}$ podle originálního zapojení se zesílení v celém frekvenčním pásmu ustálilo. Tvar a fáze výstupního signálu byly také v pořádku.

Horní hranice frekvenčního pásma byla výrazně nad potřebnou úrovní (nad $100\ \text{kHz}$). Z důvodu možného vzniku nestability jsem na vstupní konektor zesilovače umístil pasivní filtr typu dolní propust tvořený kombinací rezistoru a kondenzátoru.



Obr. 15 – schéma zapojeného filtru na vstupním konektoru

$$f_0 = \frac{1}{2\pi RC} = \frac{1}{2\pi \cdot 22 \cdot 10^3 \cdot 270 \cdot 10^{-12}} = 26,8 \text{ kHz}$$

Vzorec 2

Po měření (viz grafy) se ukázalo zvolení keramického kondenzátoru a jeho nízké hodnoty 270 pF jako nevhodné. Kvůli až 20% toleranci se horní hranice frekvenčního pásma přesunula na 21 kHz. Po odstranění kondenzátoru a zanechání 22 kΩ rezistoru v sérii se horní hranice frekvenčního pásma posunula na 33 kHz.

Podle teoretických předpokladů je horní hranice přenášeného pásma, kde je pokles o 3 dB, dostatečně vysoko. Změna zesílení v pásmu 20 Hz až 20 kHz by měla být co nejnižší, optimálně do $\pm 0,5$ dB [9]. Pro kvalitnější vstupní filtr by bylo vhodné použít místo keramického kondenzátoru svitkový kondenzátor o vyšší kapacitě.

3.1 Měření zesilovače

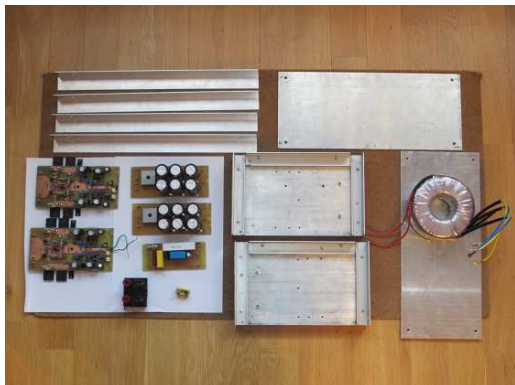
Parametry zesilovače byly ověřeny laboratorním měřením na audioanalyzátoru *Audio precision 2700*. Audioanalyzátor [10] dosahuje nízké hodnoty zkreslení THD+N až 0,00025 %. Rychlost měření závisí na velikosti použitého kroku a nastavení přesnosti. Signálový sinusový generátor s rozsahem 10 Hz až 204 kHz dosahuje přesnosti frekvence v rychlém režimu $\pm 0,5$ % a v přesném režimu $\pm 0,03$ %. Výstupem měření jsou grafy, které lze exportovat jako obrázek nebo tabulkové hodnoty.

Na zesilovači byla změřena amplitudová frekvenční charakteristika pro různé úrovně vstupního napětí, závislost zkreslení THD+N na frekvenci a závislost zkreslení THD+N na napětí. Poslední měření obsahovalo závislost zkreslení THD+N na frekvenci i napětí, které popisuje v jednom grafu celkové chování zesilovače.

Zesilovač má zisk 29,5 dB. Maximální úroveň vstupního napětí je 1,4 V. Při dalším zvyšování úrovně vstupního napětí dochází k přebuzení zesilovače a navyšování hodnoty zkreslení THD+N. Nejnižší hodnota THD+N = 0,0267 % byla naměřena při jmenovitém výkonu.

4 Stavba přístrojové skříně

Součástí práce je stavba skříně, ve které bude zesilovač umístěn.



Obr. 16 – rozložená skříň a jednotlivé části

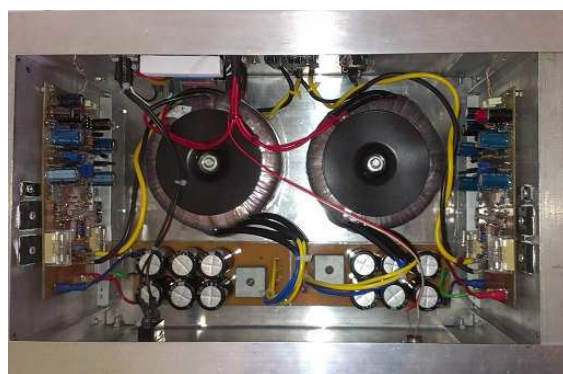


Obr. 17 – sestavená skříň bez komponent

Pro dobré parametry jako jsou dostatečná pevnost, nízká hmotnost, dobrý odvod tepla a dobrá obrobiteľnosť byla zvolena skříň vyrobená z hliníku. Deska zesilovače i s tranzistorem je umístěna přímo na chladiči, který tvoří boční stěny. Přední i zadní panel je vyroben z hliníkového plechu o tloušťce 2 mm. Spojení jednotlivých částí je realizováno pomocí hliníkových „L“ profilů a šroubů M3. Přední panel, přišroubovaný 5 mm šrouby s imbusovou hlavou, obsahuje síťový páčkový vypínač a červenou indikační LED diodu. Zadní panel obsahuje napájecí EURO konektor, vstupní XLR konektory a výstupní reproduktorové konektory. Na distančních sloupcích je přišroubovaný softstart. Dno zesilovače je také z hliníkového plechu. Ke dnu jsou připevněny toroidní transformátory a pomocí distančních sloupek jsou připevněna DPS zdrojů. Aby se zamezilo poškození povrchu, na kterém bude zesilovač umístěn, je vybaven čtyřmi přístrojovými podstavci. Pro zamezení kontaktu s živými částmi slouží horní kryt, který je vyroben z černého plechu.



Obr. 18 – sestavený zesilovač



Obr. 19 – foto pohledu do skříně

4.1 Výpočet chladiče

Odvod tepla z tranzistoru, respektive z jeho čipu na chladič, není ideální. Ve skutečnosti stojí v cestě několik tepelných odporů. Celkový tepelný odpor je pak dán vztahem:

$$R_{\vartheta_{ge}} = R_{\vartheta_G} + R_{\vartheta_U} + R_{\vartheta_K}$$

Vzorec 3 [2]

R_{ϑ_G} – vnitřní tepelný odpor tranzistoru (přechod čip-pouzdro). T_j označuje maximální teplotu čipu. Hodnota je získaná z katalogového listu [7], T_a je provozní teplota, pro kterou navrhujeme chladič. P = maximální výkonová ztráta pouzdra.

$$R_{\vartheta_G} = \frac{T_j - T_a}{P} = \frac{150 - 60}{150} = 0,6 \text{ K/W}$$

Vzorec 4

R_{ϑ_U} – přechod tepla mezi pouzdrem tranzistoru a chladičem (zde se uplatní odpor izolační podložky, neideální rovnost povrchu, požitá teplovodivá pasta). Z dokumentace silikonové podložky [8] vyplývá tepelný odpor 0,3 K/W, účinky teplovodivé pasty a nerovnosti chladičů lze zanedbat.

R_{ϑ_K} – tepelný odpor chladiče. Tato hodnota bývá udávaná výrobcem chladiče. U mnou použitého chladiče není známa. Lze použít hodnotu z podobného chladiče nebo ji vyčíst z tabulek. V tomto případě byla využita metoda pro výpočet plechového chladiče. Celý objem chladiče včetně žeber byl přepočítán na velikost obyčejného plechu. Zde se dopouštím nepřesnosti, ale výpočet bude pro nejnepříznivější variantu, plocha žeber chladiče výrazně zlepšuje odvod tepla.

$$R_{\vartheta_K} = \frac{3,3 \cdot C^{0,25}}{\sqrt{\lambda} \cdot d} + \frac{650 \cdot C}{S} = \frac{3,3 \cdot 1}{\sqrt{2,1} \cdot 6} + \frac{650 \cdot 1}{387,5} = 2 \text{ K/W}$$

Vzorec 5 [2]

C = korekční faktor;

λ = teplotní vodivost materiálu;

d = síla materiálu;

S = plocha chladiče v cm.

Tyto hodnoty získáme z tabulek 2 a 3.

poloha	povrch plechu	
	nečerněný	černěný
kolmá montáž	0,85	0,43
vodorovná montáž	1	0,5

Tab. 2 - Hodnoty korekčního faktoru C [2]

materiál	λ [W/K·cm]
hliník	2,1
měď	3,8
mosaz	1,1

Tab. 3 - Hodnoty tepelné vodivosti λ [2]

Dále je potřeba spočítat výkon, který je přeměněn v zesilovači na teplo. U zesilovače třídy AB lze použít vzorec 6, kde P_0 = jmenovitý sinusový výkon.

$$P_{\vartheta AB \max} = \frac{P_0}{3} = \frac{200}{3} = 66,67 \text{ W}$$

Vzorec 6 [2]

Rozdělením celkové výkonové ztráty mezi 4 tranzistory vychází výkonová ztráta pro jeden tranzistor:

$$P_{\vartheta AB \ 1Tran} = \frac{P_{\vartheta AB \max}}{4} = \frac{200}{4} = 16,67 \text{ W}$$

Vzorec 7

Celkový tepelný odpor $R_{\vartheta ge}$ pro jeden tranzistor se spočítá podle vzorce 8. T_i označuje maximální teplota tranzistoru získaná z katalogového listu [7], T_u = provozní teplota.

$$R_{\vartheta ge} = \frac{T_i - T_u}{P_{\vartheta AB \ 1Tran}} = \frac{150 - 60}{16,67} = 5,4 \text{ [K/W]}$$

Vzorec 8 [2]

Vyjádřením a dosazením do vzorce 3 byla získána potřebná hodnota tepelného odporu chladiče pro jeden tranzistor.

$$R_{\vartheta ge} = R_{\vartheta G} + R_{\vartheta U} + R_{\vartheta K} \rightarrow R_{\vartheta K \ 1Tran} = R_{\vartheta ge} - R_{\vartheta G} - R_{\vartheta U} = 5,4 - 0,6 - 0,3 = 4,5 \text{ K/W}$$

Vzorec 9

Při zanedbání tepelného příspěvku budících tranzistorů byla vydělena hodnota celkového tepelného odporu počtem koncových tranzistorů, mezi které je rozdělena výkonová ztráta. V našem případě mezi čtyři koncové tranzistory.

$$R_{\vartheta K} = \frac{R_{\vartheta ge}}{4} = \frac{4,5}{4} = 1,125 \text{ K/W}$$

Vzorec 10

Ze vzorce 10 lze vidět, že pro jmenovitý výkon zesilovače 200 W by byl potřeba chladič o tepelném odporu 1,125 K/W. Z výpočtu použitého chladiče vyšla hodnota tepelného odporu 2 K/W. Z nepřímé úměrnosti lze vypočítat maximální jmenovitý výkon P_{0max} , který lze uchladiť.

$$\begin{array}{l} 200 \text{ W} \dots\dots\dots 1,125 \text{ K/W} \\ P_{0max} \dots\dots\dots 2 \text{ K/W} \end{array} \quad P_{0max} = \frac{1,125}{2} \cdot 200 \text{ W} = 112,5 \text{ W}$$

Vzorec 11

5 Závěr:

Při stavbě zesilovače jsem narazil na problémy, které byly způsobeny chybami ve schématu a způsobovaly tak jeho špatnou funkci. Po odstranění těchto závad a oživení následovalo měření zesilovače na přístroji *Audio precision 2700*. Maximální výkon byl naměřen 112 W do 8 Ω . Teoretický výkon by byl přibližně 200 W při použití do zátěže 4 Ω .

Z výpočtu lze vidět, že chladiče jsou poddimenzovány. Podle výpočtu chladiče uchladí jmenovitý výkon do hodnoty nejnižší impedance 8 Ω . Chladič byl počítán pro variantu bez žeber a tak jeho skutečná schopnost odvádět teplo je větší a pro domácí použití jsou tyto chladiče dostatečné. Při používání zesilovače do zátěže 4 Ω by bylo vhodné pasivní chladiče doplnit o ventilátor.

Zesilovač obsahuje obvod pro pomalý náběh zdroje na plný výkon. Tím je zajištěna stabilita při zapnutí. Dále by bylo vhodné doplnit zesilovač o zapojení ochrany reproduktorů. Ochrany by zamezily zničení reproduktorů při výskytu závady zesilovače nebo jiné neprovozní situace.

Zesilovač splnil moje očekávání, jeho parametry mnohonásobně převyšují moje potřeby. V celém řetězci určitě nebude nejslabším článkem. Hmotnost zesilovače je 11 kg a celkové náklady na stavbu činily 3600 Kč.

Seznam literatury a informačních zdrojů

- [1] Akustika, vznik a šíření zvuku, frekvenční analýza a syntéza, sluchový vjem zvukového signálu. [online]. [cit. 2013-05-31].
Dostupné z: http://homen.vsb.cz/~ber30/texty/varhany/anatomie/pistaly_akustika.htm
- [2] KOTISA, Zdeněk. *NF zesilovače*. 1. vyd. Praha: BEN - technická literatura, 2003, 95 s. ISBN 80-730-0065-2.
- [3] VORÁČEK, Vojtěch. *NF zesilovače*. 1. vyd. Praha: BEN - technická literatura, 2006, 103 s. ISBN 80-730-0211-6.
- [4] *Amatérské radio: časopis pro elektroniky a amatéry*. Praha: AMARO spol. s. r. o. ISSN 0322-9572.
- [5] Datový list obvodu TL061 [cit. 30. května 2013]. Dostupné na:
www.datasheetcatalog.org/datasheet/SGSThompsonMicroelectronics/mXvwry.pdf
- [6] Datový list obvodu OP07C [cit. 30. května 2013]. Dostupné na:
<http://www.ti.com/lit/ds/symlink/.pdf>
- [7] Datový listy tranzistorů Toshiba 2SC5200 a 2SA1943 [cit. 30. května 2013].
Dostupné na: http://www.toshiba.com/taec/components2/Datasheet_Sync/66/7890.pdf
- [8] Datový listy izolační podložky [cit. 30. května 2013]. Dostupné na:
<http://www.gme.cz/dokumentace/621/621-036/dsh.621-036.2.pdf>
- [9] SELF, Douglas. *Audio power amplifier design handbook*. 5th ed. Oxford: Focal Press/Elsevier, 2009. ISBN 978-024-0521-626.
- [10] 2700 Series Instrument Specifications [cit. 30. května 2013]. Dostupné na:
<http://www.ap.com/download/file/183>

Přílohy:

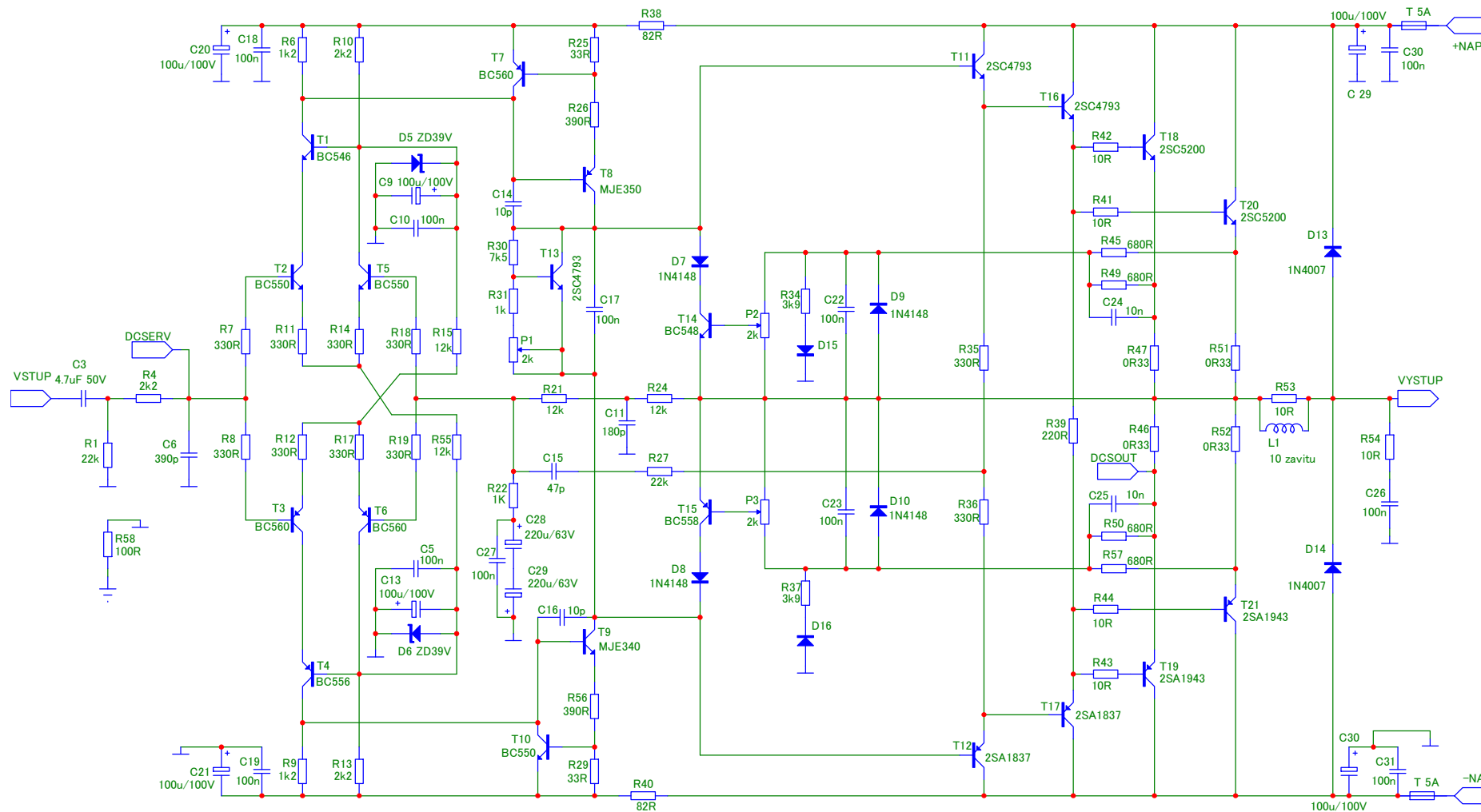


Schéma 1 – zapojení nízkofrekvenčního výkonového zesilovače

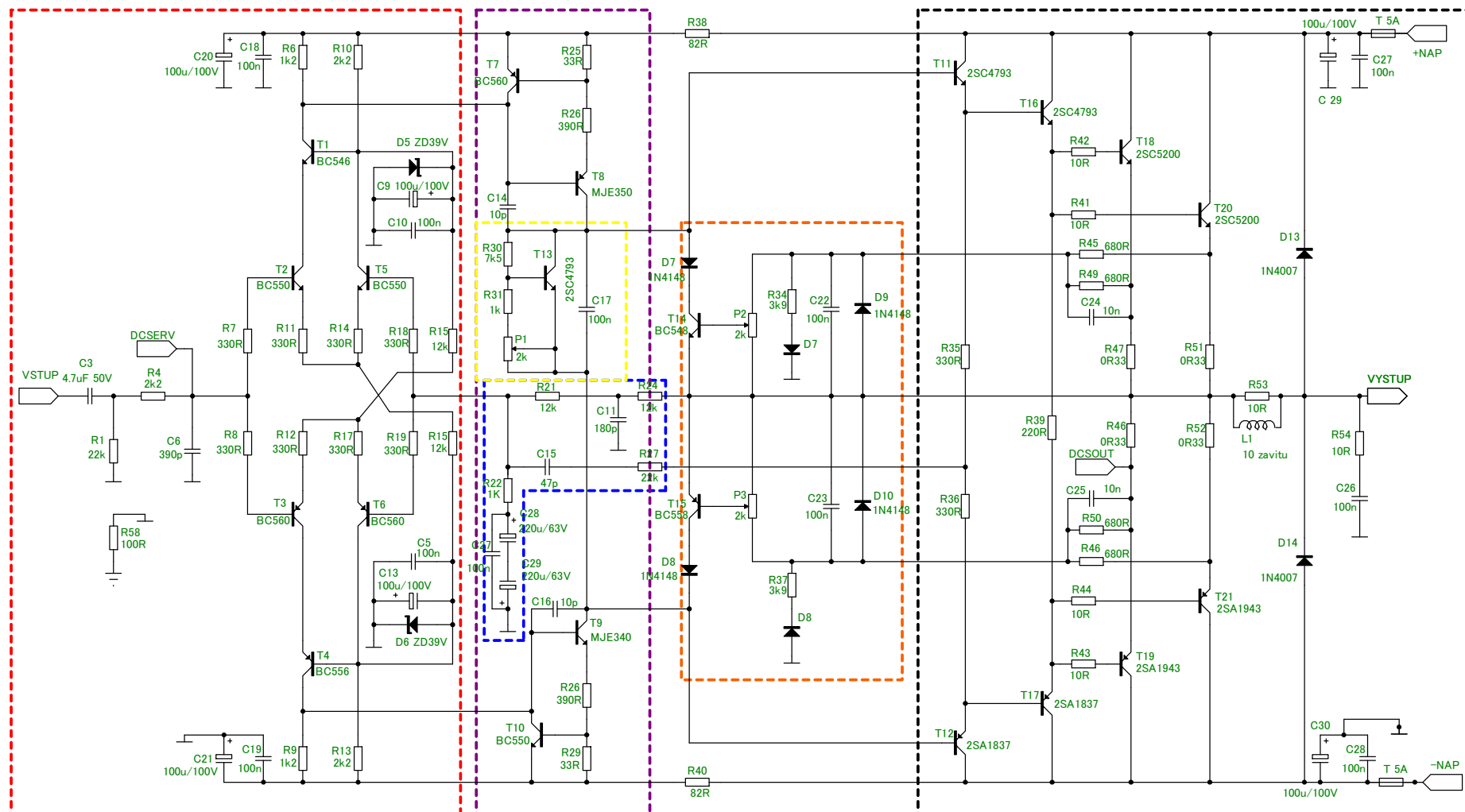
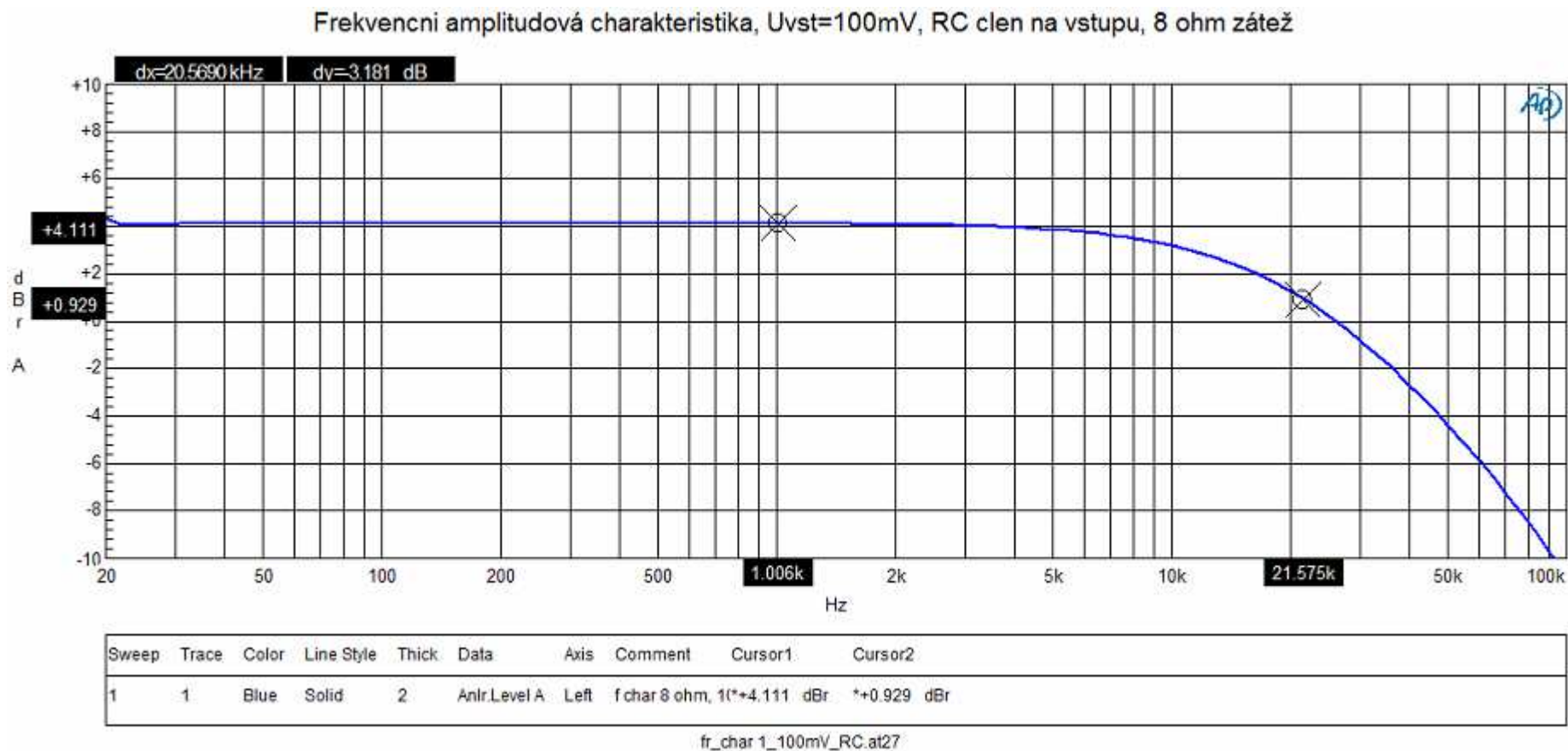
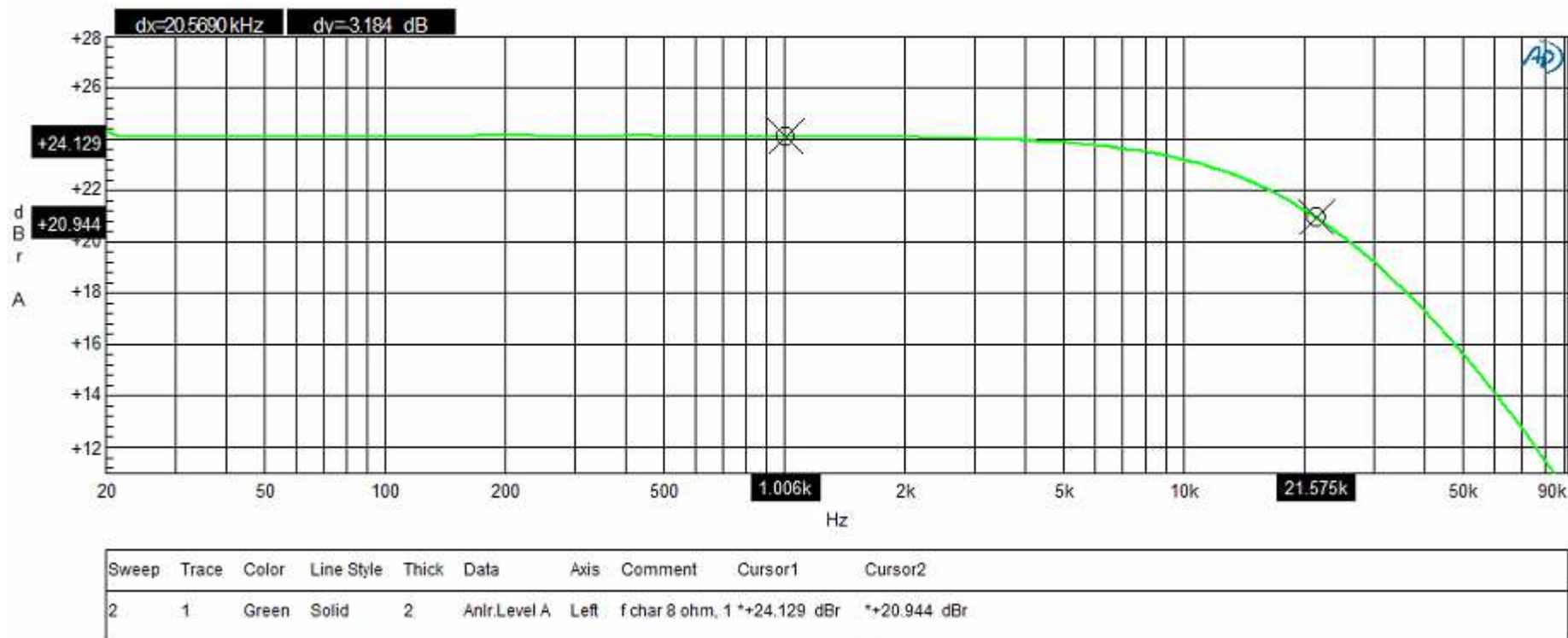


Schéma 2 – zapojení nízkofrekvenčního výkonového zesilovače s vyznačením jednotlivých bloků



Graf 1 - Frekvenční amplitudová charakteristika $U_{vst}=100\text{ mV}$, RC člen na vstupu, $8\ \Omega$ zátěž

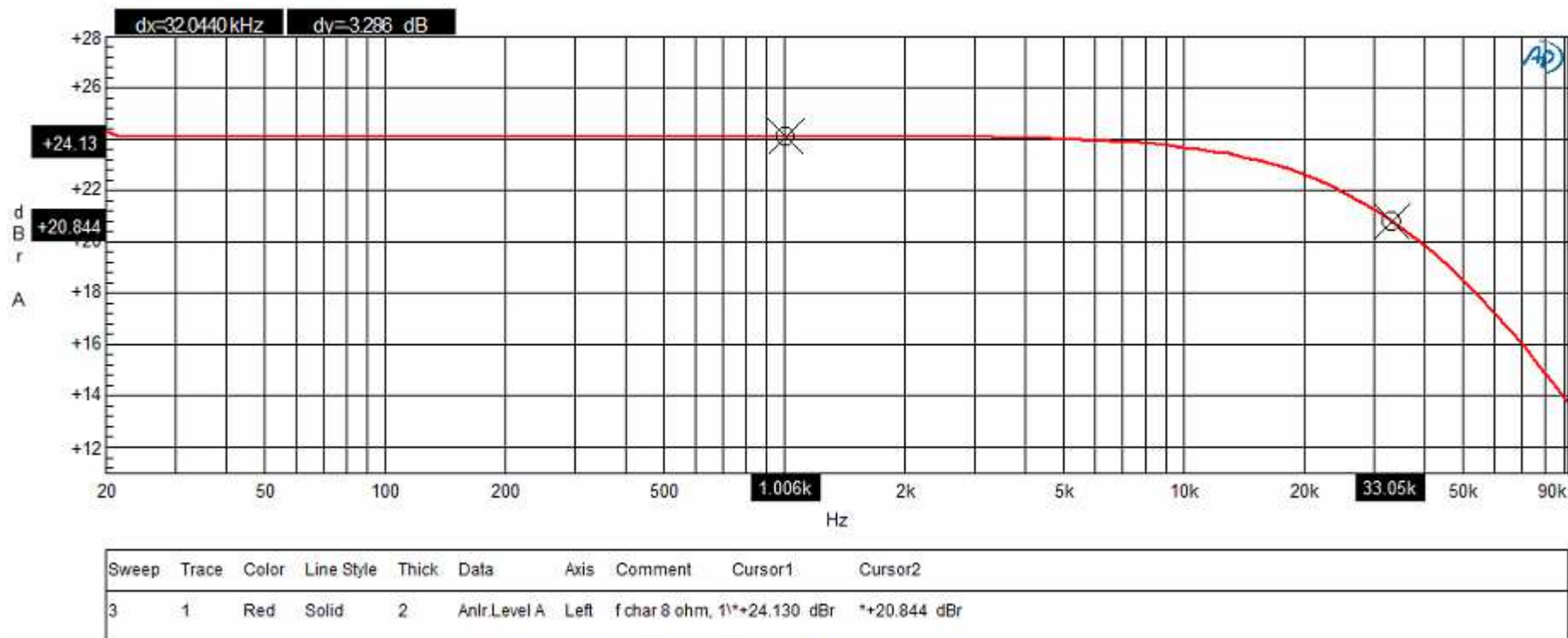
Frekvencní amplitudová charakteristika $U_{vst}=1V$, RC člen na vstupu, 8 ohm zátěž



fr_char_1V_RC.at27

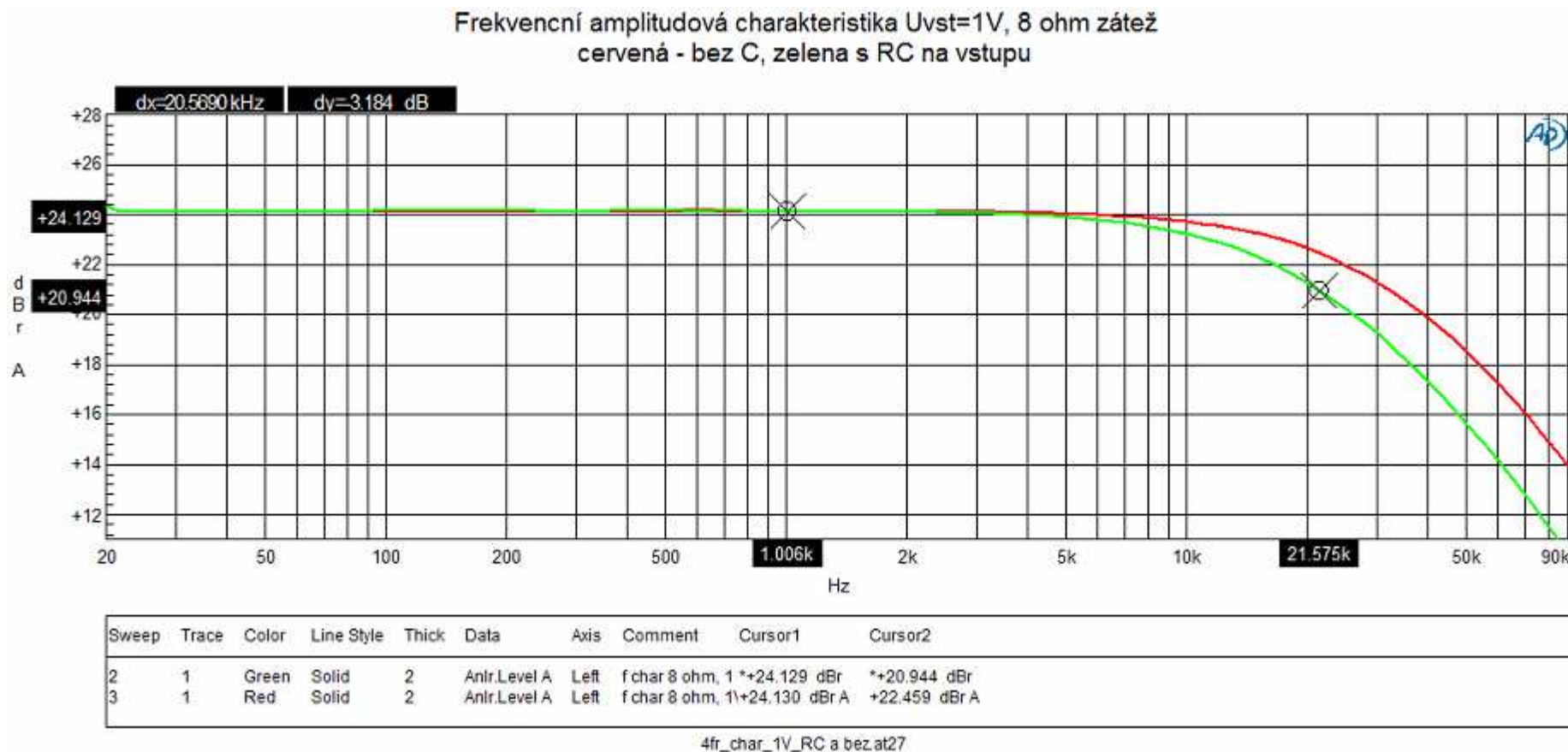
Graf 2 - Frekvencní amplitudová charakteristika $U_{vst} = 1 V$, RC člen na vstupu, 8Ω zátěž

Frekvencní amplitudová charakteristika $U_{vst}=1V$, bez C na vstupu, 8 ohm zátěž



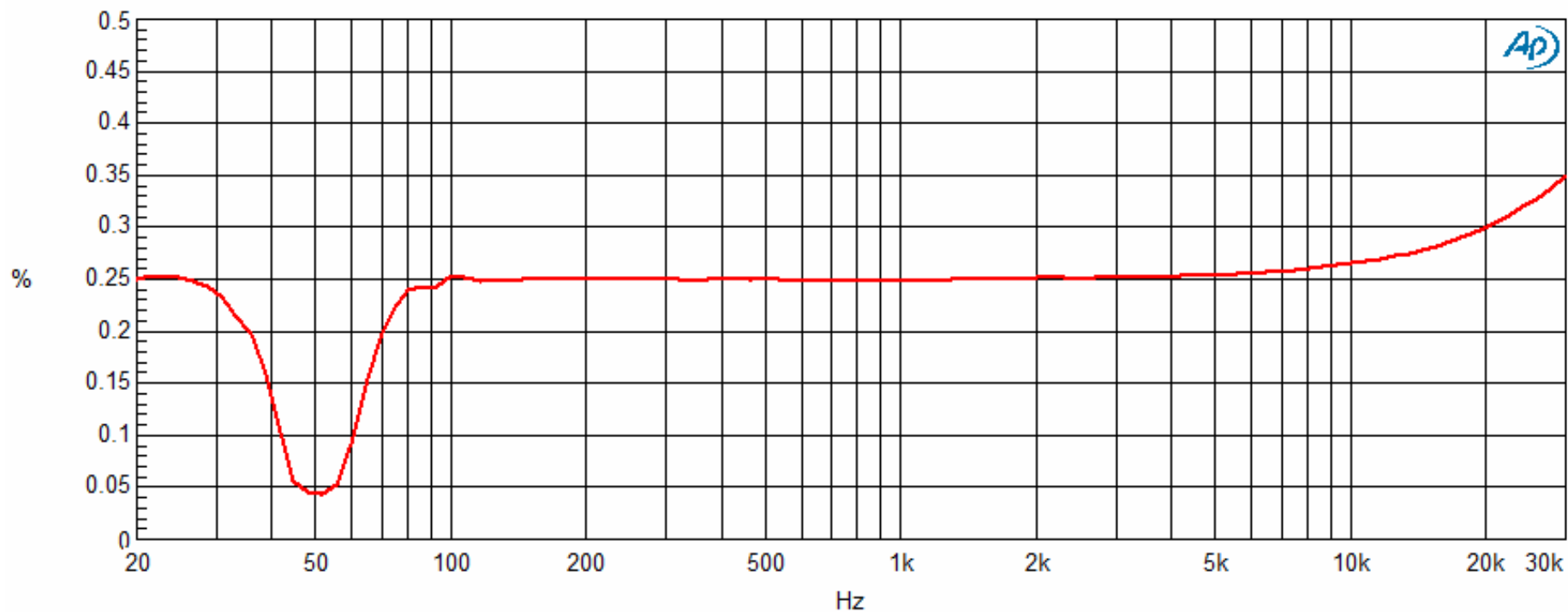
3fr_char_1V_bezRC.at27

Graf 3 - Frekvencní amplitudová charakteristika $U_{vst} = 1 V$, bez RC členu na vstupu (pouze 22 kΩ v sérii), 8 Ω zátěž



Graf 4 - Frekvencní amplitudová charakteristika $U_{vst} = 1 V$, s a bez RC členu na vstupu, 8 Ω zátěž

Závislost zkreslení na frekvenci klidový proud 60 mA

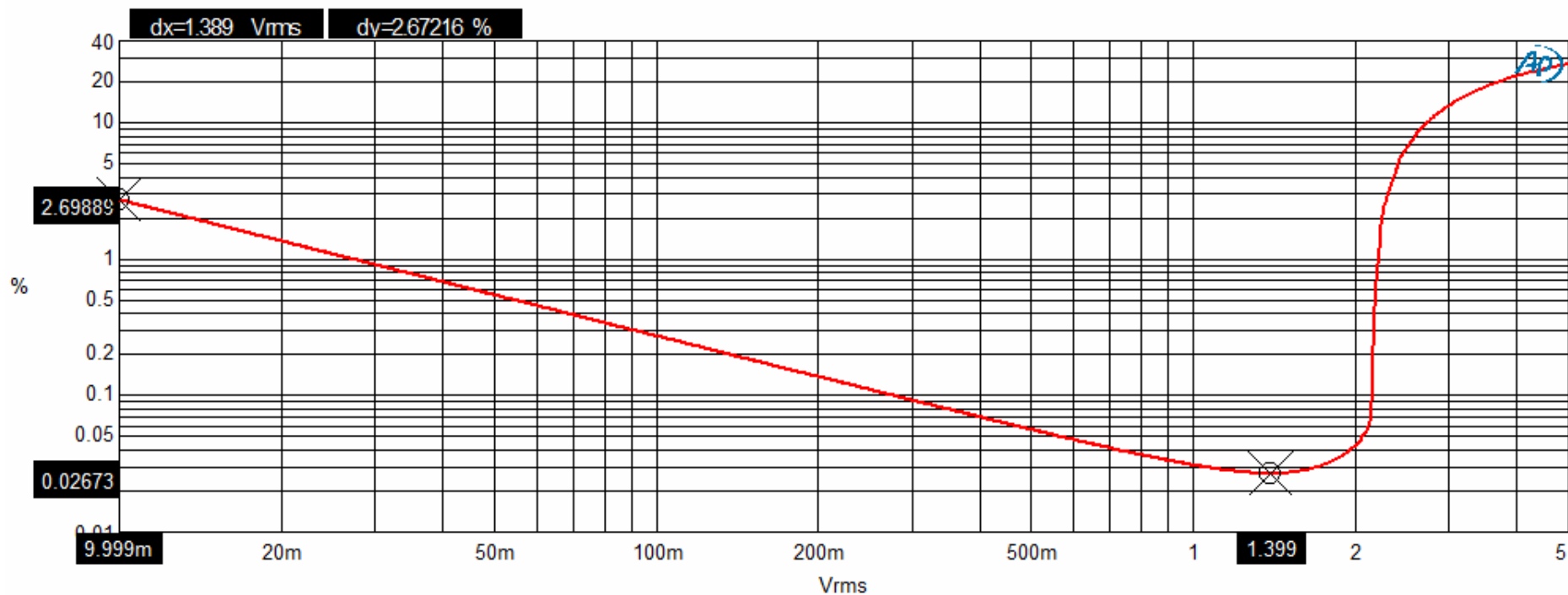


Sweep	Trace	Color	Line Style	Thick	Data	Axis	Comment
4	1	Red	Solid	2	Anlr.THd+N Ratio	Left	Klidak 60mA

THD+N.at27

Graf 5 - Závislost THD+N zkreslení na frekvenci

Závislost zkreslení na vstupním napětí

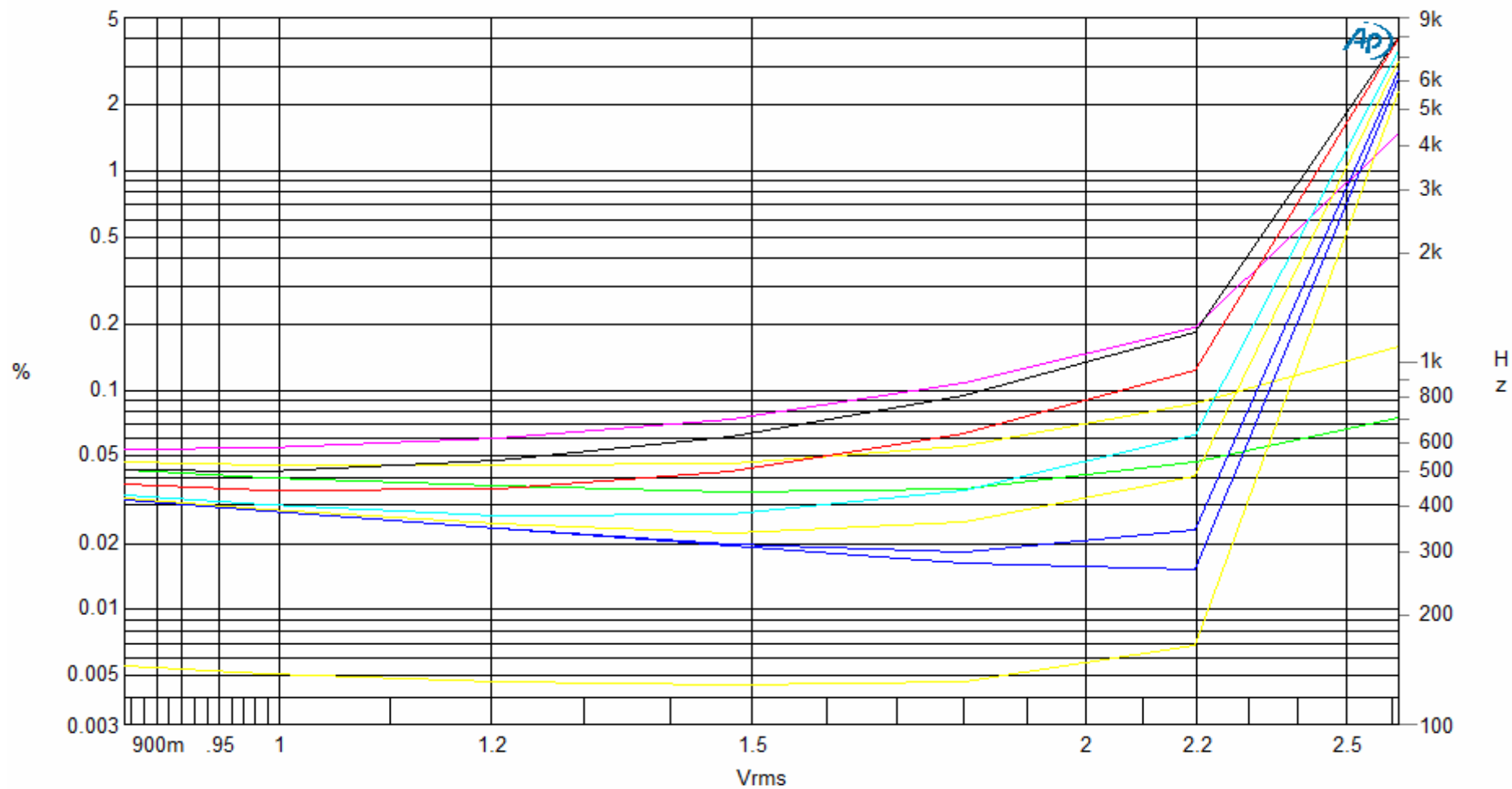


Sweep	Trace	Color	Line Style	Thick	Data	Axis	Comment	Cursor1	Cursor2
6	1	Red	Solid	2	Anlr.THd+N Ratio	Left	1Khz 4 ohm 10 *2.69889 %	*0.02673 %	

THD+N_level.at27

Graf 6 - Závislost zkreslení na vstupním napětí

Závislost zkreslení na napětí a frekvenci



Graf 6 - Závislost THD zkreslení na napětí a frekvenci

Sweep	Trace	Color	Line Style	Thick	Data	Axis	Comment	Source 2
2	2	Green	Solid	1	Anlr.THd+N Ratio	Left		: 23.5000 kHz=Gen.Freq
3	2	Yellow	Solid	1	Anlr.THd+N Ratio	Left		: 18.4250 kHz=Gen.Freq
5	2	Magenta	Solid	1	Anlr.THd+N Ratio	Left		: 11.3150 kHz=Gen.Freq
8	2	Green	Solid	1	Anlr.THd+N Ratio	Left		: 5.44500 kHz=Gen.Freq
10	2	Red	Solid	1	Anlr.THd+N Ratio	Left		: 3.34500 kHz=Gen.Freq
13	2	Cyan	Solid	1	Anlr.THd+N Ratio	Left		: 1.60950 kHz=Gen.Freq
15	2	Yellow	Solid	1	Anlr.THd+N Ratio	Left		: .988500 kHz=Gen.Freq
18	2	Blue	Solid	1	Anlr.THd+N Ratio	Left		: 475.750 Hz=Gen.Freq
24	2	Blue	Solid	1	Anlr.THd+N Ratio	Left		: 110.175 Hz=Gen.Freq
27	2	Yellow	Solid	1	Anlr.THd+N Ratio	Left		: 53.0250 Hz=Gen.Freq

Legenda ke grafu 6