

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Brno, 2016

Ondřej Valach



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV TELEKOMUNIKACÍ

DEPARTMENT OF TELECOMMUNICATIONS

NÁVRH ELEKTRONKOVÉHO KOMPRESORU PRO ZPRACOVÁNÍ ZVUKOVÝCH SIGNÁLŮ

DESIGN OF VACUUM TUBE COMPRESSOR FOR AUDIO SIGNAL PROCESSING

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Ondřej Valach

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Jaroslav Koton, Ph.D.

BRNO 2016



Bakalářská práce

bakalářský studijní obor **Audio inženýrství**
Ústav telekomunikací

Student: Ondřej Valach

ID: 147363

Ročník: 3

Akademický rok: 2015/16

NÁZEV TÉMATU:

Návrh elektronkového kompresoru pro zpracování zvukových signálů

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Prostudujte problematiku kompresorů zvukových signálů a ukažte místo jejich nasazení. Popište možné realizace těchto funkčních bloků a diskutujte jejich výhody a případná omezení. Na základě místa jejich nasazení popište požadavky na ně kladené resp. na jejich dílčí části. Zvolte některé ze známých řešení kompresoru využívající jako aktivní prvky elektronky a popište jeho jednotlivé části s ohledem na teoretické závěry. Kompresor dynamiky prakticky zrealizujte a proveďte ověření jeho charakteristických parametrů.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

[1] PŘIBILOVÁ, A.: Zvuková technika, STU, 2012, ISBN: 978-8022737104.

[2] URBAN, O.: Instrumentář elektroakustického zvuku, Akademie múzických umění, 2008, ISBN: 978-8073311155

Termín zadání: 1.2.2016

Termín odevzdání: 1.6.2016

Vedoucí práce: doc. Ing. Jaroslav Koton, Ph.D.

Konzultant bakalářské práce:

doc. Ing. Jiří Mišurec, CSc., předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení částí druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

ABSTRAKT

Seminární práce se zabývá problematikou kompresoru LA2A i kompresorů obecně. Rozebírá pojmy spojené s dynamikou signálu. V první části je text soustředěn na teoretický úvod, kde jsou probrány pojmy spojené s dynamikou signálů. Je zde vysvětlen princip komprese a parametry které jsou spjaty s tímto procesem. Druhá část textu se věnuje čistě stavbě kompresoru, který vychází ze známého typu LA2A. Popisuje jeho jednotlivé části a jejich vzájemnou souvislost. Na závěr textu je předložena představa o doplnění dvou funkcí nad rámec originálního LA2A.

KLÍČOVÁ SLOVA

Kompresor, transformátor, optoprvek, redukce gainu, frekvenční odezva.

ABSTRACT

The seminar work deals with the problem of compressors and compressor LA2A in general. It discusses terms associated with the dynamics of the signal. The first part of the text is centred on the theoretical introduction, which discusses the concepts associated with the dynamic of signals. There is explained the principle of compression and parameters that are associated with this process. The second part is devoted purely to construction of the compressor, which is based on a well-known type LA2A. It describes its individual parts and their interrelation. At the end of the text it is proposed the idea of adding two features beyond the original LA2.

KEYWORDS

compressor, transformer, photocell, gain reduction, frequency response

VALACH, O. *Návrh elektronového kompresoru pro zpracování zvukových signálů*.
Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních
technologií, Ústav telekomunikací, 2016. 56 s. Bakalářská práce. Vedoucí práce: doc.
Ing. JAROSLAV KOTON, Ph.D.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci na téma Návrh elektronového kompresoru pro zpracování zvukových signálů jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této bakalářské práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a/nebo majetkových a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon), ve znění pozdějších předpisů, včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

V Brně dne

.....

(podpis autora)

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji vedoucímu bakalářské práce doc. Ing. JAROSLAVU KOTONOVÍ, Ph.D. za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé bakalářské práce.

V Brně dne

.....

(podpis autora)

Výzkum popsany v této bakalářské práci byl realizovaný v laboratořích podpořených projektem Centrum senzorických, informačních a komunikačních systémů (SIX); registrační číslo CZ.1.05/2.1.00/03.0072, operačního programu Výzkum a vývoj pro inovace.

Brno

.....

Podpis autora(-ky)

OBSAH

Seznam obrázků	iii
Seznam tabulek	v
Úvod	1
1 Dynamika	2
1.1 Rozdělení na dva typy dynamiky.....	2
1.2 Dynamika v příkladech.....	2
1.3 Dynamická obálka (ADSR).....	3
1.3.1 Transient.....	4
2 Dynamické procesory	5
2.1 Základní princip dynamických procesorů.....	5
2.1.1 Sledovač obálky.....	5
2.2 Parametry popisující funkci dynamických procesorů:.....	6
2.2.1 Zkreslení.....	8
2.2.2 Clipping.....	10
2.3 Grafické znázornění omezení dynamiky.....	11
2.4 Základní rozdělení dynamických procesorů.....	12
2.4.1 Kompresor.....	12
2.4.2 Limiter.....	13
2.4.3 Upward kompresor.....	13
2.4.4 Expander.....	13
2.4.5 Gate.....	14
2.4.6 Ducker.....	14
2.4.7 Deesser.....	14
2.4.8 Vícepásmový kompresor.....	15
2.5 Rozdělení kompresorů podle topologie zapojení.....	15
2.5.1 Vari-mu.....	15
2.5.2 FET.....	16
2.5.3 Opto.....	16
2.5.4 VCA.....	17

2.5.5	Digital	17
2.6	Pojmy spojené s problematikou kompresorů.....	18
2.6.1	Pumpování a dýchání.....	18
2.6.2	Paralelní komprese.....	18
2.6.3	Hřebenový filtr.....	18
3	kompresor LA2A	19
3.1	Obecný popis kompresoru LA2A	19
3.2	Technická specifikace kompresoru LA2A	19
3.3	Ovládání kompresoru LA2A	20
3.4	Rozdělení do funkčních bloků	21
3.4.1	Vstupní transformátor	21
3.4.2	Optický útlumový článek.....	22
3.4.3	Výstupní transformátor	24
3.4.4	Side-chain zesilovač	25
3.4.5	Koncový zesilovač.....	26
3.4.6	VU Měřicí obvod	27
4	Praktická konstrukce	28
4.1	Deska předního panelu.....	28
4.2	Vnitřní uspořádání kompresoru	28
5	Naměřené výsledky	30
5.1	Převodní charakteristika v režimu (comp/limit)	30
5.1.1	Výpočet kompresního poměru	32
5.2	Kmitočtová charakteristika	32
5.3	Fázová charakteristika	33
5.4	Skupinové zpoždění.....	34
5.5	Harmonické zkreslení	35
	Závěr	37
	Literatura	39
	Seznam symbolů, veličin a zkratk	40
A	Schéma kompresoru LA2A	41
B	Seznam použitých součástek	42

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1.1: Dynamický průběh v čase, neboli ADSR obálka (převzato z [3]).	3
Obr. 1.2 Dynamický průběh v čase, tři hudebních nástrojů (převzato z [2]).	4
Obr. 2.1 Blokové schéma dynamického procesoru (převzato z [10]).	5
Obr. 2.2 Schéma sledovače obálky (převzato z [10]).	6
Obr. 2.3 Vliv sledovače na obálku zvukové vlny (převzato z [2]).	6
Obr. 2.4: Průběh popisující soft/hard knee přechod (převzato z [2]).	8
Obr. 2.5 Jednoduchý soft clipper z diod (převzato z [3]).	11
Obr. 2.6 Průběh hard dclippingu (vlevo) a soft clippingu (v pravo) (převzato z [3]).	11
Obr. 2.7: Převodní charakteristika při nastavených parametrech: treshold -40dB a ratio 2:1 (převzato z [2]).	12
Obr. 2.8: Přenosové charakteristiky jednotlivých dynamických procesorů (převzato z [2]).	13
Obr. 2.9: Přenosové charakteristiky kompresoru ve funkci ducker a gate (převzato z [2]).	14
Obr. 2.10 Kompresor fairchild 670 (převzato z [3]).	16
Obr. 2.11 Kompresor Universal audio 1176 (převzato z [3]).	16
Obr. 2.12 Kompresor Teletronix LA2A (převzato z [3]).	17
Obr. 2.13 Kompresor dbx 160(převzato z [3]).	17
Obr. 3.1: převodní charakteristika pro režim zesilovač a kompresor.	20
Obr. 3.2: Blokové schéma kompresoru LA2A.	21
Obr. 3.3: Frekvenční odezva vstupního transformátoru A10 firmy UTC (převzato[5]).	22
Obr. 3.4: Schéma optického útlumového článku (převzato z [6]).	22
Obr. 3.5: Znázornění tvaru křivky náběhu a poklesu pro kompresor LA2A (převzato z [1]).	23
Obr. 3.6: Frekvenční odezva výstupního transformátoru A24 firmy UTC (převzato z [1]).	24
Obr. 3.7: Schéma side-chain zesilovače (převzato z [6]).	25
Obr. 3.8 Schéma kmitočtového filtru řídicího obvodu.	26

Obr. 3.9: Schéma koncového zesilovače (převzato z [6]).....	27
Obr. 3.10: Schéma VU měřícího obvodu	27
Obr. 4.1 Pohled na přední panel kompresoru LA2A.....	28
Obr. 4.2 pohled do vnitřního zapojení kompresoru LA2A.	29
Obr. 5.1 Převodní charakteristika v režimu komprese	31
Obr. 5.2 Převodní charakteristika v režimu limitace.....	31
Obr. 5.3 Výpočet kompresního poměru s převodní charakteristiky.....	32
Obr. 5.4 Kmitočtová charakteristika kompresoru LA2A a polovodičového kompresoru	33
Obr. 5.5 fázová charakteristika kompresoru LA2A a polovodičového kompresoru.....	34
Obr. 5.6 Charakteristika skupinového zpoždění kompresoru LA2A a polovodičového kompresoru	35
Obr. 5.7 Zkreslení THD+N kompresoru LA2A a polovodičového kompresoru	36

SEZNAM TABULEK

Tab. 1.1: příklad dynamických rozsahů různých systémů (převzato z [2]).	2
---	---

ÚVOD

Téma práce se týká stavby a popsání funkce kompresoru. Jedná se o zařízení využívané pro zpracování audio signálu. Jeho funkcí je omezení nebo naopak zvýšení dynamiky signálu. Celý projekt by se dal rozdělit na dvě stěžejní části. První se zabývá problematikou kompresorů, druhá je zaměřena na funkci a stavbu konkrétního kompresoru. Jedná se o kompresor pracujícím na bázi proslulého typu LA2A. Tento kompresor se řadí do kategorie "vintage" kompresorů zejména kvůli tomu, že využívá jako aktivní prvky elektronky a zároveň pracuje na bázi "opto" kompresorů. Jejich využití v hudebním průmyslu je stále velmi široké.

První část vysvětluje předpoklady nutné k pochopení následné funkce kompresoru. Velká část materiálu je věnována dynamice, která je klíčová k pochopení celé funkce dynamických procesorů. Kapitola postupně konkretizuje pojmy, popisuje rozdělení kompresorů podle cílu využití a zavádí pojmy spíše z praxe, které jsou i hůře fyzikálně vysvětlitelné. Je třeba zmínit, že v oboru audioinženýrství je spousta pojmů, kterými lze popsat zvuk, ale fyzikálně se vysvětlit nedají. Tyto pojmy budou v práci občas použity.

Druhá část se věnuje samotnému kompresoru LA2A. Pomocí blokového schématu jsou popsány jednotlivé části přístroje. Dále chování kompresoru v různých situacích a při různém nastavení ovládacích prvků. Velký důraz je kladen na vysvětlení nároků, které jsou kladeny na vstupní a výstupní transformátory.

1 DYNAMIKA

Dynamika, nebo-li dynamický rozsah, je pojem úzce spjatý s problematikou kompresorů. Je definována jako rozdíl mezi nejnižším a nejsilnějším signálem v dB, který je systém schopný přenést nebo vyzářit. Ať už se jedná o jakýkoli prvek audio řetězce, analogový nebo digitální (CD přehrávač, rádio, reproduktor), všechny mají určitý dynamický rozsah. Ten se vyjadřuje v různých variacích jednotky decibel (dB). Pro další popis bude využita jednotka dBSPL, kde spojení SPL (sound pressure level) zdůrazňuje, že se jedná o hladinu akustického tlaku vztaženou k hodnotě $2 \cdot 10^{-5}$ Pa. Tab. 1. uvádí několik příkladů dynamických rozsahů různých systémů.

Tab. 1.1: příklad dynamických rozsahů různých systémů (převzato z [2]).

system	Dynamický rozsah (dB)
Softwarový mixážní pult (25 bits)	150
nejlepší A/D převodníky	122
Lidský sluch	120
Aktivní monitory Dynaudio Air 25	113
Kondenzátorový mikrofon Neumann U87	110
CD, nebo 16 bit audio soubor	96
Magnetofonová páska	75
FM rádio	65
Vinyl	60

1.1 Rozdělení na dva typy dynamiky

Mikrodynamika - je popsána jako změna úrovně signálu jedné jednotlivé noty (úderu) - může být popsána parametry attack, release. Například uveďme úder bubnu, kdy po nějakou dobu ton nabíhá (narůstá na intenzitě) a následně utichá, to vše spadá do mikrodynamiky

Makrodynamika - je změna úrovně signálu v rozsahu delším než jeden úder (nota), většinou tedy rozsah hlasitosti celé nahrávky.

1.2 Dynamika v příkladech

První příklad je převzat z [2]. Bude vztažen k orchestrálnímu koncertu, kde nejtíší zahraný zvuk bude mít 10dBSPL a nehlasiťší 100dBSPL. Jejich rozdíl udává celkový dynamický rozsah, který by tedy byl 90dBSPL. Z toho vyplývá, že pokud je potřeba zaznamenat koncert v celém dynamickém spektru, mikrofon Neumann U87 by měl s jistou rezervou správně zaznamenat nejsilněší i nejslabší zvuk. Pokud bude následně

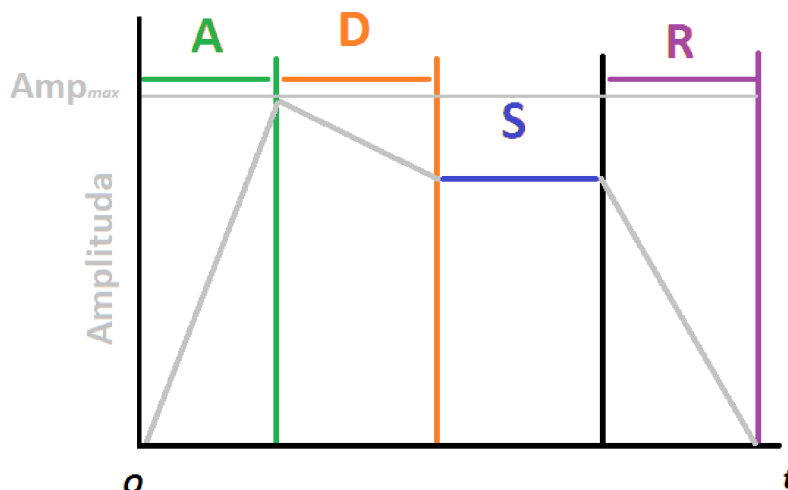
koncert uložen na CD, kde je 16 bitová datová hloubka a jeho dynamický rozsah je 96dB, poté jej přehrajeme na kvalitních monitorech s dynamickým rozsahem větším než 90dB, dostane se nám poslechu v plném dynamickém rozsahu. Je důležité, aby ani jeden prvek z celého řetězce (od nahrávání až po poslech) neměl tento rozsah menší než samotný nahrávaný zvuk. Pokud by měl být tento koncert zaznamenán na vinyl, který má dynamický rozsah pouze 60dB, nabízí se možnost použití kompresoru, který nám zjednodušeně srovná rozdíly mezi hlasitými a tichými místy, a umožní nám tak vtěsnání 90dB dynamiky do rozsahu pouze 60db bez jinak nutného ořezání části dynamického pásma.

Pro porovnání, dynamický rozsah lidského ucha (rozdíl mezi nejhlasitějším a nejtichším vnímatelným zvukem) je uprostřed slyšitelného frekvenčního pásma asi 120 dB. Na okrajích pásma je mnohem menší.

1.3 Dynamická obálka (ADSR)

V branži zabývající se zvukem je třeba často popsat časový dynamický průběh signálu ve velmi malém časovém úseku, tedy spadající do mikrodynamiky. K tomu slouží dynamická obálka, neboli ADSR (obr.1.1). Vypovídá o tom, jak narůstá a klesá hlasitost signálu v čase, a dělí se do čtyř fází:

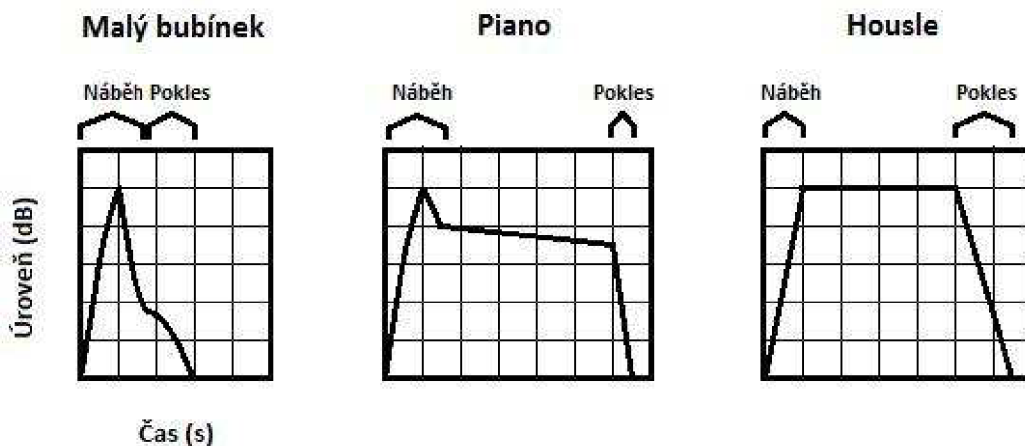
1. Attack (Náběh)
2. Decay (Pokles) - mírný
3. Sustain (Průběh) – relativně vyrovnaný
4. Release (Doznívání / Pokles)



Obr. 1.1: Dynamický průběh v čase, neboli ADSR obálka (převzato z [3]).

1.3.1 Transient

Z hlediska časové obálky signálu je důležitý pojem "Transient". Ten představuje krátký časový úsek na samém začátku zvuku, který má velkou amplitudu. Jde o brzké kmity, které jsou pro uchování věrného zvuku některých nástrojů klíčové. Transientní kmity mohou obsahovat vyšší míru neperiodického obsahu. Na následujícím obrázku (Obr.1.2) vidíme dynamickou obálkou tří různých hudebních nástrojů. Kromě houslí mají všechny nástroje dobře viditelný transient, který má vždy největší amplitudu ve fázi náběhu, který byl popsán v kapitole 1.3. Podle toho, jak je transient výrazný, se zvuky dělí na transientní a netransientní. Do transientních signálů spadá většina perkusivních zvuků. Jeden z nejvýraznějších transientní zvuků je produkovan malým bubínkem z bicí soupravy, jehož dynamický průběh je znázorněn na obrázku (Obr.1.2). Obecně transientní signály mají výrazný, rychlý náběh a jsou krátké. Netransientní zvuky mají pomalý náběh a trvají déle. Mezi typický příklad patří housle nebo zvuk elektrické kytary, u něhož platí, že čím více je zkreslený, tím méně obsahuje transientů.



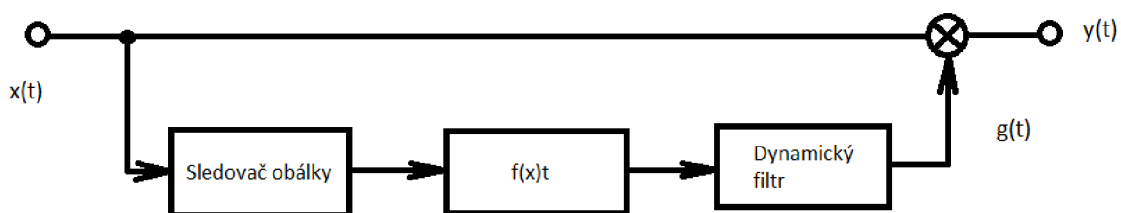
Obr. 1.2 Dynamický průběh v čase, tří hudebních nástrojů (převzato z [2]).

2 DYNAMICKÉ PROCESORY

Dynamický procesor neboli kompresor je zařízení, které umožňuje měnit dynamický rozsah zvukové stopy. Umí tvarovat dynamickou obálku zvuku, čímž může způsobovat i určité zabarvení zvuku. Jeho funkce je založena na systému, kdy člen sledující obálku signálu, který chceme komprimovat, řídí zesílení napěťového zesilovače.

2.1 Základní princip dynamických procesorů

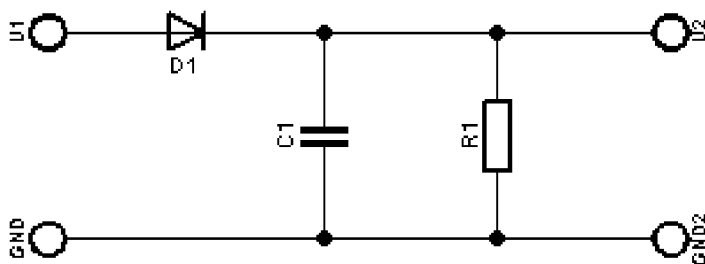
Základní dynamická úprava signálu se skládá ze tří na sebe navazujících procesů, jak je možné vidět na Obr. 2.1. Prvním procesem je detekce průběhu obálky signálu pomocí sledovače obálky (enveloppe follower) více v části 2.1.1. Ten ze signálu pomocí algoritmu odvozuje zesilovací činitel pro napěťově řízený zesilovač. Na sledovač obálky navazuje blok funkce převodní charakteristiky $f(x)t$, na něhož je napojen dynamický filtr, kterým je možné regulovat časové konstanty náběhu (attack) a doběhu (release) pro řídicí větev. Obecně platí, že se dynamický procesor skládá z přímé signálové cesty a z řídicí (side chain) větve. Z té se odvozuje zesilovací činitel napěťového zesilovače zapojeného v přímé signálové cestě, který řídí samotnou kompresi signálu. Side chain signál nemusí být brán pouze z přímé signálové cesty, ale může být brán i z externího zdroje. To znamená, že můžeme komprimovat jeden signál na základě energie signálu druhého. V přímé větvi je možné zařadit zpožďovací linku, která způsobí zpoždění signálu přímé větve o reakční dobu řídicí větve. Jedná se o dynamické procesory s nulovou reakční dobou, tzv. look-ahead limitery.



Obr. 2.1 Blokové schéma dynamického procesoru (převzato z [10]).

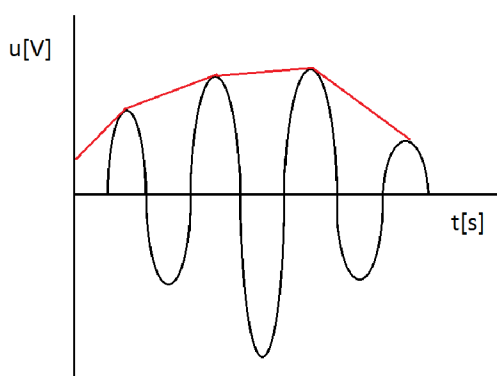
2.1.1 Sledovač obálky

Sledovač obálky využívá odhadu efektivní, nebo špičkové hodnoty signálu, jež určuje, zda bude kompresor v režimu RMS/peak. Podrobněji popsáno v kapitole 2.2. Jedná se o dvoucestný usměrňovač s integračním článkem a se dvěma, nebo jednou časovou konstantou. Obdobný princip je využíván u měřiče úrovně. Celé zařízení funguje jako extrémní dolní propust. Principiální schéma sledovače obálky je na následujícím obrázku (Obr. 2.2.).



Obr. 2.2 Schéma sledovače obálky (převzato z [10]).

Obrázek 2.3. znázorňuje vliv sledovače obálky na vstupní signál. Výsledný tvar signálu po průchodu sledovačem obálky je znázorněn červenou barvou.



Obr. 2.3 Vliv sledovače na obálku zvukové vlny (převzato z [2]).

2.2 Parametry popisující funkci dynamických procesorů:

Pro jednodušší popis parametrů je kapitola vztahena na kompresor (viz 2.4.1.), obecně však platí pro všechny dynamické procesory.

Threshold (práh komprese) je úroveň, kterou musí průchozí signál překročit, aby zařízení začalo pracovat. Čím níže je práh nastaven, tím menší úroveň signálu přivedená na vstup procesoru stačí k tomu, aby docházelo k dynamické úpravě. Jestliže se práh komprese nastaví příliš nízko, je zde nebezpečí zesílení i těch nejnižších zvuků v signálu, tedy i nežádoucího šumu.

Ratio (kompresní poměr) určuje, v jakém poměru bude průchozí signál omezen, jestliže překročí práh komprese.

Attack (čas náběhu) je zpoždění počítané od doby dosažení kompresního prahu, po kterou zařízení nezasahuje do dynamiky signálu. Běžné zpoždění dynamických procesorů se pohybuje v řádu milisekund. Jestliže je čas náběhu krátký, pak kompresor reaguje rychle a stlačuje dynamiku signálu hned ve fázi náběhu signálu, dojde tedy k výraznému omezení již prvotních silných kmitů – transientů viz. kapitola 1.3.3. Naopak při dlouhém náběhu projdou prvotní kmity zcela bez omezení dynamiky a stlačuje se spíše až tělo signálu, nikoli dynamický náraz-špička.

Release (čas doběhu) je pravým opakem náběhu. Určuje, jak dlouho bude dynamickému procesoru trvat, než se signál vrátí zpět pod práh komprese a přestane omezovat dynamiku signálu. Jestliže nastavíme čas doběhu příliš krátký, může docházet k nežádoucímu efektu nazývanému pumpování, popsaného dále v kapitole 2.6.1. Pokud je čas doběhu naopak příliš dlouhý, může dané stlačení přetrvat až do dalšího dynamického nárazu, což může být v některých případech žádoucí, ale ve většině nikoliv. Časy release, a menší mírou i attack, se většinou nastavují podle tempa skladby, respektive dle předpokládané hustoty kompresních okamžiků.

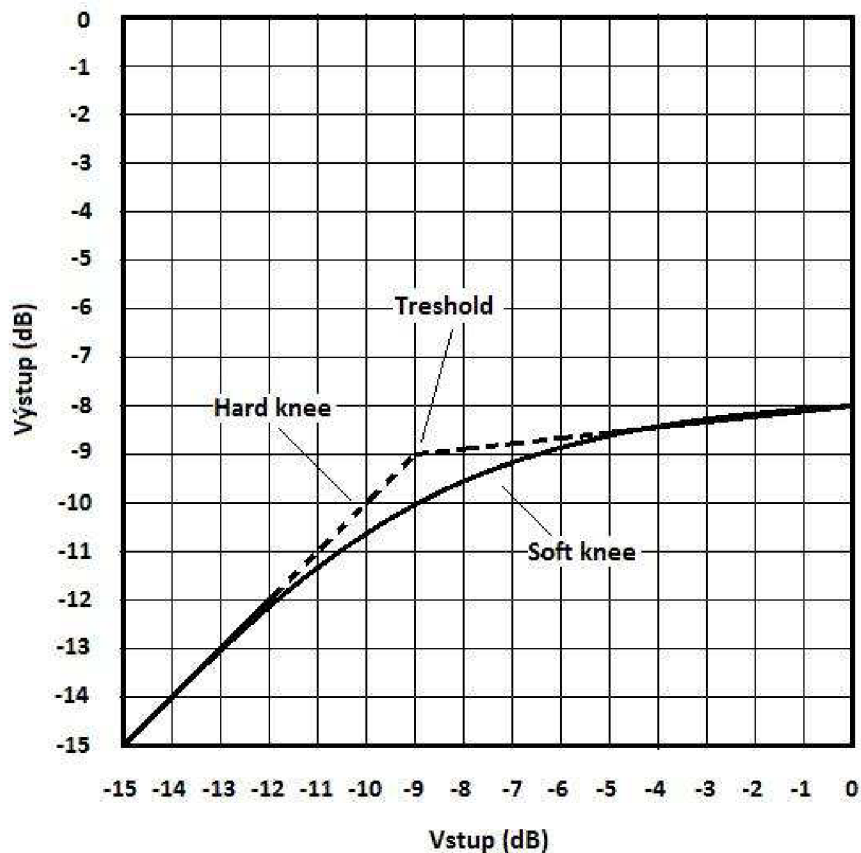
Hold (čas držení) určuje dobu, po kterou dynamický procesor setrvá ve fázi komprimace, přestože signál už nebude určitou dobu dosahovat kompresního prahu. Po odeznění fáze držení následuje doběh.

MakeUp Gain (kompenzace hlasitosti) je hodnota, o kterou bude již zkomprimovaný signál zesílen, aby se "hlasitostně" vykompenzovalo omezení dynamiky. Některé dynamické procesory nabízejí možnost automatického dorovnávání makeup gainu. Pro objektivní porovnání výsledku je tato funkce velmi doporučena.

Side Chain (řídící obvod) je součástí každého kompresoru. Slouží k odměřování úrovně komprimovaného signálu. Právě tento obvod má podstatný vliv na to, že každý model zní trochu jinak, protože při reakci na úroveň vstupního signálu se nemusí vycházet ze stejných zásad. Ve většině případu je pojem side chain spojen s možností zapojit do řídicí větve vstup ne z řídicí větve daného kompresoru, ale z externího zdroje signálu. To umožňuje řízení míry komprese daného signálu jakýmkoli jiným signálem.

redukce signálu (gain reduction) - udává velikost signálu, o kterou byl původní signál změněn díky kompresi, měří se v decibelech. Zobrazení redukce gainu je realizováno většinou pomocí analogového VU metru nebo pomocí VU metru s integrovaným obvodem ovládajícím pás světelných diod.

knee (koleno) - parametr, který určuje tvar přechodové křivky v místě zlomu z jednotkového parametru ratio do námi nastaveného, jiného než 1:1. Podle tvaru zlomu se rozlišuje hard a soft knee. Hard knee odpovídá ostřejšímu přechodu do fáze komprese, než soft knee. U kompresoru, kde očekáváme nějaký vintage charakter zvuku, je přechod spíše pozvolný (soft knee) a většinou se nedá regulovat. Je dán fyzikálními vlastnostmi použitých prvků. Oba typy přechodů jsou graficky znázorněny na následujícím obrázku (Obr. 2.4.).



Obr. 2.4: Průběh popisující soft/hard knee přechod (převzato z [2]).

Režim Peak/RMS - podle typu zpracovaného signálu lze uvažovat nad použitím dynamického procesoru v režimu Peak, nebo RMS. U dynamických procesorů jsou oba tyto režimy vyhodnocovány v části sledovače obálky viz. kapitola 2.1.1. Režim peak je určen zejména pro transientní signály, které jsou krátké a mají výrazný transient, viz kapitola 1.3.1.

Peak režim může být využit i pro netr transientní zvuky, zejména s kreativním záměrem. Reakční časy v tom režimu jsou tak rychlé, že ve výsledku fungují jako zkreslení. Znamená to, že dynamický procesor je schopen reagovat na každou jednu periodu signálu. Zejména zřetelný je tento jev pro nižší tóny se základní harmonickou ležící v pásmu od 20Hz do 300Hz a nejlépe je zřetelný na nepříliš zkresleném netr transientním signálu.

2.2.1 Zkreslení

Jedním ze základních parametrů elektroakustických zařízení je zkreslení. Nastává v jakékoli části elektroakustického řetězce, ať už se jedná o reproduktory, zesilovač efekty, mikrofon nebo propojovací vodiče. Vyjadřuje, jak hodně se změní výstupní signál od vstupního nežádoucím efektem. Obecně je tato vlastnost považována za nežádoucí, ale ve zvláštních případech je toto prospěšné, jak bude popsáno v kapitole

nelineárního zkreslení. Pro dnešní elektroakustické přístroje je standardní maximální velikost zkreslení ± 1 dB v celém slyšitelném pásmu.

Slyšitelnost zkreslení - Při zkreslení vznikají na výstupu v signálu rušivé složky, které na vstupu nebyly. Lidské ucho omezuje v rozpoznávání těchto složek jev zvaný maskování. Maskování se nejvíce projevuje pro blízké kmitočty, ale určitou mírou se uplatňuje i pro zvuky frekvenčně vzdálené. Při malých hlasitostech, kdy ještě nedochází ke zkreslení vlastního ucha, je například třetí harmonická tónu se základní frekvencí několik stovek Hz maskována, pokud je její úroveň nižší než 50 dB. Z toho lze odvodit, že lidský sluch nevnímá harmonické zkreslení u nižších hlasitostí, je-li nižší, než desetina procenta. Podle audiometrického měření bylo změřeno, že lidské ucho pozná harmonické zkreslení až 0,3%, pokud má možnost bezprostředního porovnání s nezkrasleným signálem. Pro rušivé neharmonické signály je lidské ucho ještě citlivější. Stačí pouze desetina procenta k jejich zaznamenání, a to i v případě, že jsou srovnatelné s hladinou šumu. Tyto vlastnosti platí pro lidský sluch do hlasitosti asi 70 dB, výše už začíná zkreslovat samotné ucho v nezanedbatelné míře. Je to způsobeno obranným mechanismem ucha brnícím poškozením přílišnou hlasitostí tzv. středoušním reflexem. Zkreslení signálu je tedy do určité míry maskováno zkreslením vlastního ucha, a není tedy možné ho dobře rozeznat. Z toho lze odvodit, že pokud zkreslení nemá být slyšet, je třeba, aby bylo typu měkkého omezení tzv. soft clipping viz. kapitola 2.2.2.

Základní typy zkreslení

Lineární zkreslení - dá se vyjádřit amplitudovou nebo frekvenční charakteristikou příslušného systému v celém akustickém frekvenčním spektru. Amplitudové zkreslení popisuje vzestup nebo pokles úrovně signálu na vstupu a jeho nelineární dopad na úroveň signálu na výstupu. Příklad řízeného amplitudového zkreslení může být omezování nebo expanze dynamiky. Při jakémkoli zdvihu nebo poklesu v průběhu celého spektra dochází ke kmitočtovému zkreslení.

Útlumové zkreslení - vzniká na každém vedení a je způsobeno jeho neschopností přenášet všechny frekvence stejně. Projevuje se s rostoucí vzdáleností, a to tak, že se vzdáleností ubývá více energie na vysokých kmitočtech, než na nízkých. Je to zkreslení, kterému se nedá předejít, ale určitým způsobem se dá vykompenzovat jeho vliv. K tomuto účelu se používají korektory útlumového zkreslení, které fungují jako zesilovače, které zesilují více vyšší kmitočty, než nižší. Pomocí této metody může být na konci vedení docíleno správného poměru mezi vysokými a nízkými kmitočty, stejně tak, jak tomu bylo na vstupu vedení.

Fázové zkreslení - Je způsobené různou rychlostí šíření střídavého signálu v závislosti na jeho frekvenci. Nižší kmitočty se šíří vedením rychleji než vysoké, proto na konci vedení vzniká zkreslení zpožděním, neboli fázové zkreslení. Potlačit tento nežádoucí jev je možné pomocí fázových korektorů. Velmi nepříznivě se toto zkreslení projevuje při přenosu rozhlasového a televizního signálu nebo také při přenosu dat.

Nelineární zkreslení - neboli THD, tvarové, harmonické. Je způsobené nelinearitou součástek (elektronek, transformátorů apod.) Nelineární se nazývá z důvodu, že závislost velikosti výstupního signálu na vstupním nelze vyjádřit lineární rovnicí. Jeho vlivem dochází k zesílení vyšších harmonických složek. Velikost celkového harmonického zkreslení (THD) je poměr efektivní hodnoty součtu všech harmonických k základní a je popsáno vztahem

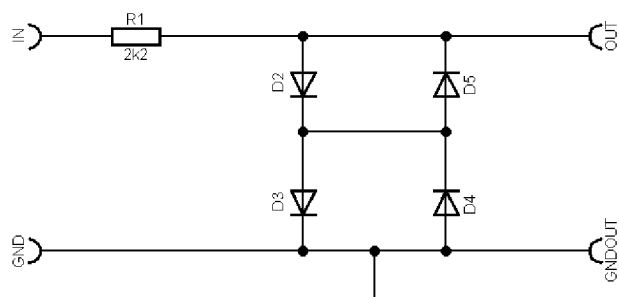
$$THD = \frac{\sqrt{V_2^2 + V_3^2 + V_4^2 + \dots + V_n^2}}{V_s} \times 100[\%], \quad (1)$$

kde V_s (V_{rms}) je základní harmonická a V_n (V_{rms}) je n-tá harmonická- Výsledek je uváděn v procentech.

Význam pro určení velikosti THD má v praxi pouze prvních 5 nebo 6 harmonických složek, zbytek už nemá prakticky vliv. Sudé harmonické složky nepůsobí tak rušivě jako liché. Nejnepříjemnější zkreslení vzniká vlivem 3. harmonické, což odpovídá přechodovému zkreslení, které se projevuje už při malých hlasitostech, takže není ani maskováno užitečným signálem. I když je vznik zkreslení obecně nežádoucí, právě často v elektronkových zařízeních, kde se pohybuje okolo 5%, je to sporné. V případě LA2A je zkreslení naprosto stěžejní pojem. Je třeba brát v úvahu, že stejnou měrou jako na úpravu dynamiky je LA2A použito na "zabarvení" signálu. Obecně barvu zvuku je možné velmi dobře ovlivnit nelineárním zkreslením, protože přidáním vyšších harmonických se stává signál plnějším a má schopnost se více prosadit mezi ostatními zvuky. Zde je zkreslení dosaženo nejen elektronkami, jak tomu obecně bývá, ale i vstupním a výstupním transformátorem, který je z tohoto důvodu lehce poddimenzován a má právě na tomto největší podíl. Pro poslech velmi příjemný "teplý" zvuk je způsoben zesílením hlavně sudých harmonických složek, která zvuk zakulacují. [9]

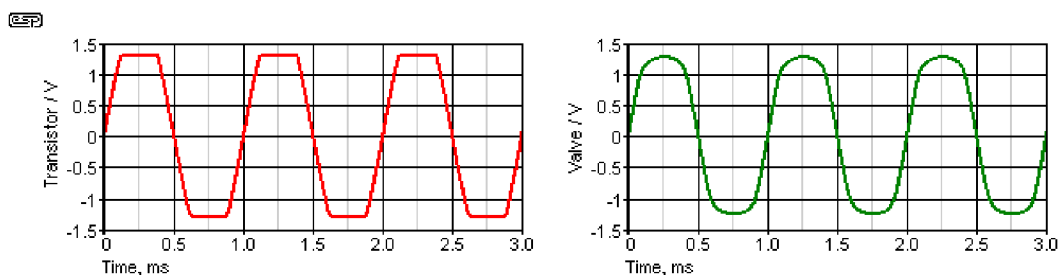
2.2.2 Clipping

Jev, který se v audiotechnice projevuje jako zkreslení signálu ve chvíli, kdy dosáhne maxima daného systému. V analogové doméně je clipping signálu méně znatelný než v digitální sféře, kde je pro ucho velmi nepříjemný, protože digitální clipping produkuje vysokou míru neharmonického zkreslení skrz aliasing. Ten nastává, pokud je vzorkovací frekvence menší než dvakrát nejvyšší frekvence vzorkovaného signálu. Clipping může být měkký (soft clipping) nebo tvrdý (hard clipping). Příklad nejjednoduššího soft clipping obvodu je na obrázku 2.5.



Obr. 2.5 Jednoduchý soft clipper z diod (převzato z [3]).

Obvod je složen z diod, které díky své charakteristice vytvářejí měkký průběh clippingu. Pokud dojde ke zkreslení signálu procházejícím tranzistorem vlivem přebuzení jeho maximálních parametrů, výsledkem bude červená křivka v levé části obrázku 2.6. V pravé části je zelenou křivkou zobrazeno zkreslení elektronikami. Rozdíl mezi oběma druhy clippingu je znatelný ve tvaru v okolí špičky, kdy u elektroniky je zaoblena pozvolna (soft clipping) a u tranzistoru je uříznuta natvrdo (hard clipping). Oba systémy na základě zkreslení zesilují vyšší harmonické složky, ale obecně zkreslení způsobené elektronikami je pro lidský sluch příjemnější z důvodu přítomnosti poměrově více sudých harmonických složek než u tranzistorů a polovodičů obecně.

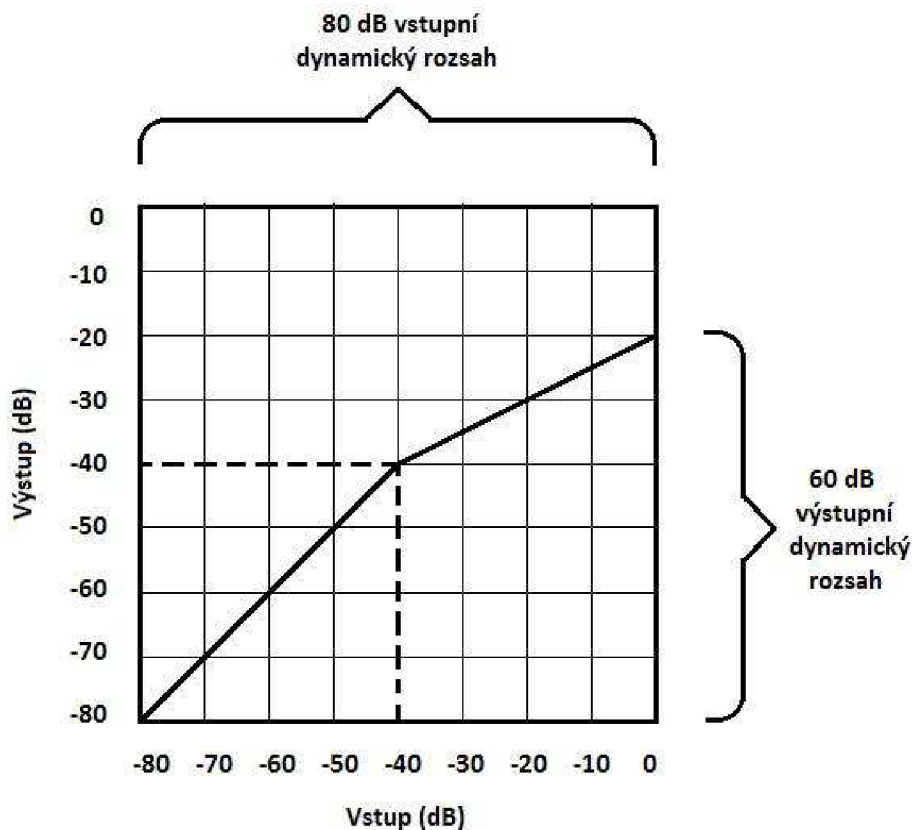


Obr. 2.6 Průběh hard clippingu (vlevo) a soft clippingu (v pravo) (převzato z [3]).

2.3 Grafické znázornění omezení dynamiky

Přenosovou funkci dynamického procesoru popisuje přenosová charakteristika, do které jsou zahrnuty tyto parametry: treshold, ratio, vstupní dynamický rozsah (input dynamic range) a výstupní dynamický rozsah (output dynamic range). V tomto konkrétním příkladě je na obrázku 2.6. uvedena převodní charakteristika kompresoru viz kapitola 2.4.1. Tato charakteristika pracuje s nastavením parametrů treshold na -40

dB a ratio na 2:1. To znamená, že signál, který před vstupem měl dynamický rozsah 80dB, bude po průchodu dynamickým procesorem mít rozsah pouze 60dB.



Obr. 2.7: Převodní charakteristika při nastavených parametrech: treshold -40dB a ratio 2:1 (převzato z [2]).

2.4 Základní rozdělení dynamických procesorů

Dynamické procesory dělíme podle jejich výsledného vlivu na signál. Všechny tyto funkce vycházejí z funkce kompresoru, nebo jsou to doslova kompresory v určitém nastavení. Například kompresor v nastavení s minimálním attackem a prakticky nekonečným kompresním poměrem je limiter, proto jsou jednotlivé procesory často vysvětleny jako kompresor v určitém nastavení.

2.4.1 Kompresor

Snižuje dynamický rozsah signálu. Jedná se o zařízení, které pracuje v celém spektru, nemá v řídicí větvi zařazen žádný frekvenční filtr. Snižuje dynamický rozsah

signálu o hodnotu kompresního poměru, pokud signál překročí kompresní práh. Pod touto hranicí je signál dynamicky neupraven. Převodní charakteristika kompresoru je vidět na Obr. 2.8. Kompresory se dělí zejména podle zapojení řídicí větve, jednotlivé topologie jsou popsány v kapitole 2.5.

2.4.2 Limiter

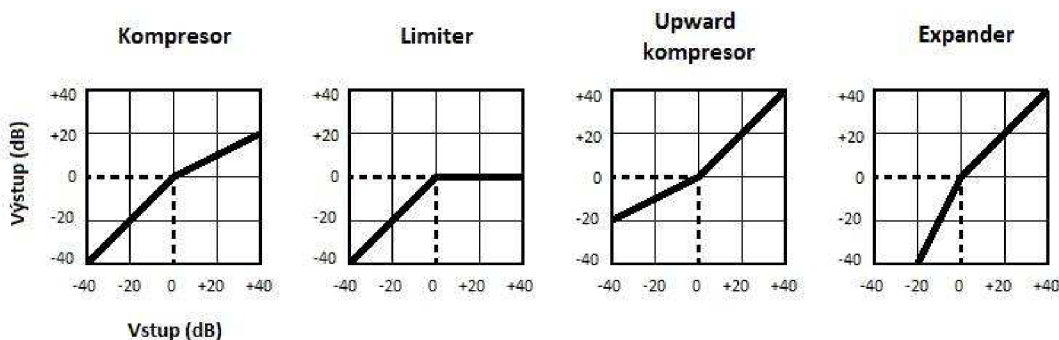
Je kompresor nastavený tak, že signál, který přesáhne kompresní práh, bude zeslaben právě na hodnotu tohoto prahu, jak jde vidět na převodní charakteristice (obr. 2.8.). Je to dáno nekonečným kompresním poměrem, kterého by měl limiter dosahovat. Používá odhadu špičkové hodnoty a jeho reakční časy jsou hodně rychlé. Je důležité, aby rychlost náběhu byla dostatečná pro zaznamenání celého transient. To je však v analogové verzi poměrně náročný úkol. Pro tento účel se používají digitální systémy, buď ve formě hardwaru, nebo softwarových pluginů. Jedná se o dynamické procesory s nulovou reakční dobou popsané více v kapitole 2.1.

2.4.3 Upward kompresor

Speciální druh kompresoru, který signál od začátku stlačí podle parametru ratio, a poté se podle nastavených parametrů attack a release vrací do původního stavu s určitou rychlostí. Původnímu stavu odpovídá ratio 1:1, toho dosáhne signál vždy po uplynutí fáze attack. Jeho převodní charakteristika je vidět na obrázku 2.8.

2.4.4 Expander

Funguje na opačném principu než klasický kompresor. Pod určitým prahem se zvuky zeslabují rychleji, než by se zeslabovaly přirozeně. V případě extrémního nastavení poměru ztišení dochází k úplnému ztišení signálu – v tomto případě se již nejedná o Expander, ale o Noise Gate – šumová brána. Jeho převodní charakteristika je vidět na obrázku 2.8.



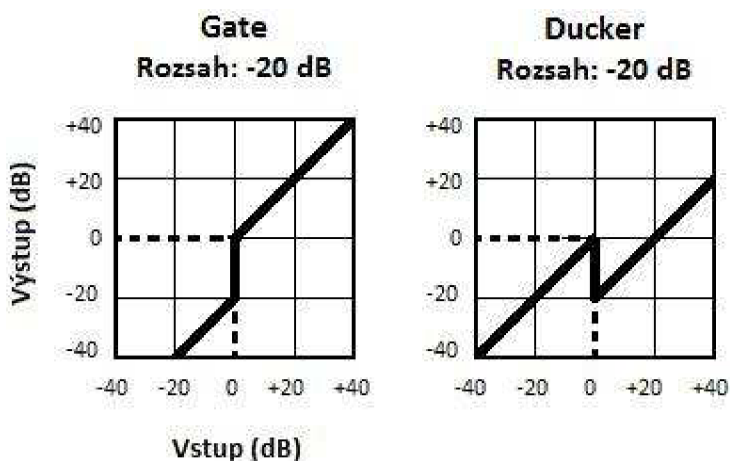
Obr. 2.8: Přenosové charakteristiky jednotlivých dynamických procesorů (převzato z [2]).

2.4.5 Gate

Potlačí všechny signály pod hranici treshold a používá odhadu efektivní hodnoty. Příklad přechodové charakteristiky pro gate je zobrazen na obrázku 2.9. Nejčastěji bývá použit na zvuky bicí soupravy, kde je třeba oddělit požadovaný signál od přeslechů z jiných nástrojů. Je třeba, aby mikrofony byly nastavené tak, že snímají co nejvíce, jen daný nástroj, jehož podíl v celkovém zvuku musí být silně dominantní, jinak ani gate nebude fungovat správně. Další možností je použít gate na zkrácení zvuku. Stačí pouze nastavit práh na hodnotu odpovídající signálu ještě ve fázi doběhu a zvuk bude zkrácen. Zkrácení zvuku může mít pozitivní vliv na prosazení nástroje v nahrávce. Nejčastěji se toto používá u velkého bubnu na utlumení dozívání nízkých frekvencí. Pokud se frekvence k potlačení nachází jen v úzkém pásmu, je možné použít frekvenčně závislý gate. Funguje tak, že v řídicí větvi zařízení je zapojen filtr typu pásmová propust, kterým je možné plynule pohybovat v rámci celého spektra.

2.4.6 Ducker

Zeslabuje všechny signály nad hranicí treshold o pevně danou hodnotu. Jeho převodní charakteristik je zobrazena na obrázku 2.9. Do řídicí větve signál přichází vždy z externího vstupu (side chain). Používá se nejčastěji pro funkci talk over, kdy je třeba ztlumit hrající hudbu v případě mluvení do mikrofonu. Charakteristika duckeru je zobrazena na obrázku 2.9.



Obr. 2.9: Přenosové charakteristiky kompresoru ve funkci ducker a gate (převzato z [2]).

2.4.7 Deesser

Má ve svém řídicím obvodu zapojen filtr, který má velký zdvih na frekvenci 4-10 kHz, což je oblast, kde se v lidské řeči vyskytují sykavky. Mužské i ženské sykavky

mohou být položeny ve frekvenčním pásmu různě. Použijeme-li takto zapojený kompresor, bude komprimovat pouze v případě, že se objeví určité množství energie v tomto pásmu, ale komprimovat bude právě pouze toto pásmo. Dalo by se tedy říci, že jde o princip vícepásmového kompresoru viz následující kapitola. Algoritmus deeseru má ale více variant, někdy je ve funkci tzv. frekvenčně řízeného gate. Při nastavení prahu citlivosti pro de-esser je zapotřebí postupovat velmi opatrně, jinak dochází k nadměrnému potlačení sykavek s efektem, který vypadá, jako by si zpěvák šlapal na jazyk. [3].

2.4.8 Vícepásmový kompresor

Požadavky na dostatečnou hlasitost audiosignálu jsou kladeny už od dob AM vysílání a stejně je tomu i dnes zejména proto, že čím více energie je ve zvukové nahrávce, tím na větší výkon je možné vybudit vysílač, a následkem toho je jeho větší dosah. Zde se do hry dostává vícepásmový kompresor. Za jeho pomocí je možné dosáhnout nejvyšší možné hlasitosti bez vedlejších slyšitelných postranních efektů, a to až o 6dB oproti klasickým kompresorům. V případě použití klasických kompresorů (širokopásmová komprese) na smíchanou nahrávku není možné docílit takové hlasitosti, protože do procesu vstupují nepředvídatelné vlastnosti audiosignálu, který bude spektrálně vždy trochu jinak rozložený, a to znemožňuje ideální použití klasického kompresoru. Navíc mají tendenci stopu poznamenat modulačním zkreslením. To znamená, že nahrávka nepřírozně dýchá nebo pumpuje (viz kapitola 2.5.1), na základě neadekvátně použité komprese. Vícepásmové kompresory fungují tak, že za vstupem se signál rozdělí na několik samostatných frekvenčních pásem pomocí pásmových filtrů (nebo-li crossoverů, používaných též v reproduktorových výhybkách), které separují zvuk do jednotlivých pásem, která jsou nezávisle na sobě komprimována. Po tomto procesu jsou před výstupem jednotlivé signály zase smíchány. Takto dochází k omezení dynamiky pouze v pásmech, kde byl překročen práh (threshold). K oddělení jednotlivých frekvenčních pásem slouží výhybky, které na základě fyzikálních zákonů nemohou být úplně strmé, a proto dochází na předělech pásem k lehkému překrytí jednotlivých pásem. Vícepásmové kompresory se používají zejména při masteringu a při vysílání ke zpracování komplexního signálu.[9]

2.5 Rozdělení kompresorů podle topologie zapojení

2.5.1 Vari-mu

Jde o nejstarší typ kompresoru, jehož aktivními prvky jsou elektronky. Tyto kompresory většinou neměly ani ovládání kompresního poměru (ratio). Snížení zisku stoupalo se zvyšující se úrovní vstupního signálu, což mělo za následek i soft knee přechod. Zní přirozně, velmi jemně, teple a dodává zvuku velmi muzikální barvu. Výborný kompresor pro stmelení více zvuků. Používá se na bicí podskupiny, akustické nástroje i hlas. Jeho attack i release je o něco rychlejší než u Opto varianty popsané dále. Často se používá spíše k zabarvení zvuku než ke kompresi. Nejznámější představitel tohoto typu kompresoru je Fairchild 670, který je vidět na obrázku 2.10. [3].



Obr. 2.10 Kompresor fairchild 670 (převzato z [3]).

2.5.2 FET

(Field Effect Transistor) – Využívá tranzistory FET, jež byly funkčně schopny nahradit původní elektronky. Tyto kompresory mohou být díky tranzistorům FET hodně rychlé, co se týče náběhu i poklesu, a extrémně čisté zvukově. Při vyšší míře omezení dynamiky produkuje žádoucí, muzikální zkreslení a zároveň zní velmi plně/tlustě a oble/kulatě. Velmi dobrá volba pro dynamickou úpravu hlasu, basových nástrojů, syntetických nástrojů, ambientních mikrofonů a podskupin. Nejlepším příkladem FET kompresoru je Universal Audio 1176 (obr. 2.11.). [3].



Obr. 2.11 Kompresor Universal audio 1176 (převzato z [3]).

2.5.3 Opto

Jádrem kompresoru je optoprvek, kterým řídíme napětí na řídicí mřížce vstupní

elektronky. Optoprvek se skládá z žárovky nebo led diody, která osvětluje fotorezistor. Využívá se zde nelinearity součástek dané konstrukcí samotných součástek - není zde možnost žádné regulace. Celkově jsou tyto opto - kompresory nejpomalejší z celé skupiny. Zní velmi přirozeně a jemně. Používají se spíše pro jemnou kompresi a vyrovnání dynamiky, tzv. "levelling". Nejčastěji používané jsou na úpravu hlasu nebo akustických nástrojů. Hlavní představitelem opto kompresorů je LA2A (obr. 2.12.) [3].



Obr. 2.12 Kompresor Teletronix LA2A (převzato z [3]).

2.5.4 VCA

Ze všech jeho analogových ekvivalentů, solid-state voltage-controlled amplifiers (VCAs), umožňuje nejpreciznější a nejlépe kontrolovatelnou hodnotu zisku. Jsou určeny pro nejnáročnější operace. Jejich hlavní výhodou je, že stejnou signálovou cestu sleduje několik různých detektorů, které rozhodují o další úpravě signálu. Je použitelný pro extrémní případy, ale i pro opravdu jemnou kompresi. Nejvíce je vyhledávaný pro dynamickou úpravu bicích nástrojů. Příkladem VCA Kompresoru je Empirical Labs Distressor nebo DBX 160 (obr. 2.13.). [3]



Obr. 2.13 Kompresor dbx 160(převzato z [3]).

2.5.5 Digital

Využívají matematické operace, takže jsou absolutně přesné. Můžeme na nich nastavit prakticky nulový attack nebo release.

2.6 Pojmy spojené s problematikou kompresorů

2.6.1 Pumpování a dýchání

Existují dva speciální jevy, které mohou při kompresi nastat. Jsou známy spíše z praxe a nejsou dobře fyzikálně prokazatelné ani popsatelné. Jedná se o jevy pumpování a dýchání.

Pumpování se dá popsat jako rychlá a většinou nechtěná redukce signálu, která vzniká při opravdu silné kompresi anebo limitaci při vysokých hlasitostech. Vysvětlení může být uvedeno na příkladu, kdy v reakci na nízké frekvence obsažené v každém úderu velkého bubnu bude celá nahrávka měnit hlasitost. Zabránit se tomu dá zavedením filtru typu horní propust do řídicího obvodu kompresoru.

Druhý pojem dýchání se projevuje pomalejším poklesem a nárůstem signálů s nižší intenzitou, které jsou následovány šumem. Tento efekt dodává hudbě pocit z určité prostorovosti. [2]

2.6.2 Paralelní komprese

. Jedná se o speciální druh komprese využívaný pro dosažení plnějšiho zvuku. Kompresor je zařazen paralelně k neupravenému signálu a na výstupu jsou signály smíchány. K tomuto účelu jsou většinou využívány rychlé kompresory, které jsou nastaveny na minimální attack a release. Je důležité, aby kompresor nezpůsoboval fázové zpoždění mezi vstupem a výstupem, jinak při smíchání čistého a zkomprimovaného signálu dojde k hřebenovému filtru, který je popsán dále.

2.6.3 Hřebenový filtr

Je jevem, který nastává při vzájemné interferenci stejných nebo značně podobných signálů, kdy fáze mezi nimi je nějakým způsobem posunuta. Výsledkem je lidskému uchu nepříjemný zvuk působící tupě, který je chudý na vyšší harmonické složky. Průběh hřebenového filtru obsahuje úzké zářezy pravidelně se opakující v průběhu celého spektra, kde se zvyšující frekvenci mírně klesá jejich záporné zesílení. [9]

3 KOMPRESOR LA2A

3.1 Obecný popis kompresoru LA2A

Celá následující kapitola se soustředí již pouze na problematiku konkrétního kompresoru LA2A

Kompresor byl sestaven v roce 1960, z čehož vyplývá i použité zapojení a v něm použité součásti. Zapojení kompresoru je vidět na schématu v příloze A. Je poměrně jednoduché, jde o jakousi nosnou kostru zapojení těchto kompresorů vůbec. Jeho základ stojí na pečlivě zvolených součástech s precizními parametry, jinak nemůže být docíleno požadovaných vlastností. Popis jednotlivých součástí a jejich parametrů je popsán v kapitole 3.4.

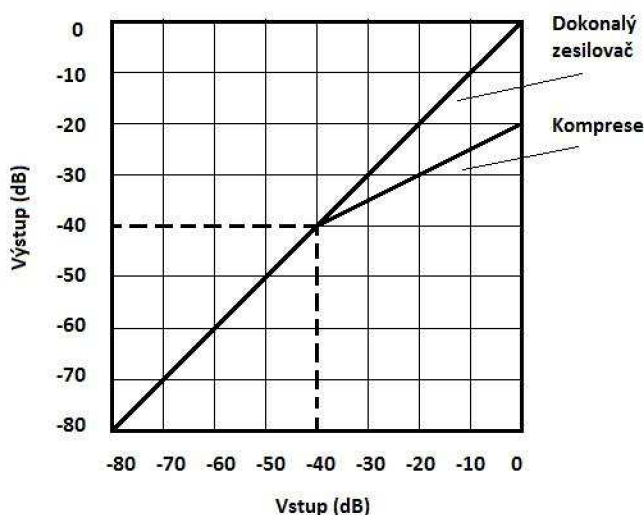
Základní princip kompresoru LA2A je odvozen ze zvolené topologie, což je v tomto případě OPTO viz kapitola 2.5.3. Využívá optoprvek k regulaci zesílení koncového zesilovače. Optoprvek bude dále podrobněji popsán v kapitole 3.4.2.

3.2 Technická specifikace kompresoru LA2A

- redukce gainu: až 40 dB
- zkreslení: méně než 0.35 THD pro ± 10 dB, a v průměru méně než 0.75 THD
- vstupní úroveň: 16 dB, maximální
- odezva: ± 0.1 dB, od 30 cyklů do 15 kilocyklů
- šum: 75 dB pod +10 dBm výstupní úrovně
- zesílení: 40 ± 1 dB
- výstupní úroveň: +10dBm nominální, +16dBm špička
- vstupní úroveň: +16 dBm maximum
- Kompresní poměr přibližně 4:1
- attack: velmi rychlý
- Release: přibližně 0.06 sekundy pro 50% release, 0.5 to 5s pro kompletní release, ten závisí na množství předcházející komprese
- vstupní Impedance: 600 Ω
- output Impedance: 600 Ω
- velikost panelu: 19" x 5 1/4 "
- hlavní ovládací prvku panelu: Gain (výstupní úroveň), Peak Reduction a volba měřícího rozsahu
- měřené veličiny: Redukce gainu (dB), vstupní a výstupní úroveň (dB)
- použité elektronky: (2) 12AX7A, (1) 12BH7A, (1) 6AQ5

3.3 Ovládání kompresoru LA2A

Ovládání celého zařízení je možné pouze pomocí dvou prvků, a to je úroveň vstupního signálu (dále označovaný jako potenciometr "gain" nebo "input gain") a úroveň výstupního signálu (dále označovaný potenciometr "peak reduction" nebo "output gain"). Oba tyto prvky jsou realizovány pomocí otočných potenciometrů. Pouhým poměrem mezi nastavením prvků gain a peak reduction se dá zařízení rozdělit do dvou funkčních režimů: kompresor a prostý zesilovač, jak zobrazuje následující graf (obr 3.1).



Obr. 3.1: převodní charakteristika pro režim zesilovač a kompresor

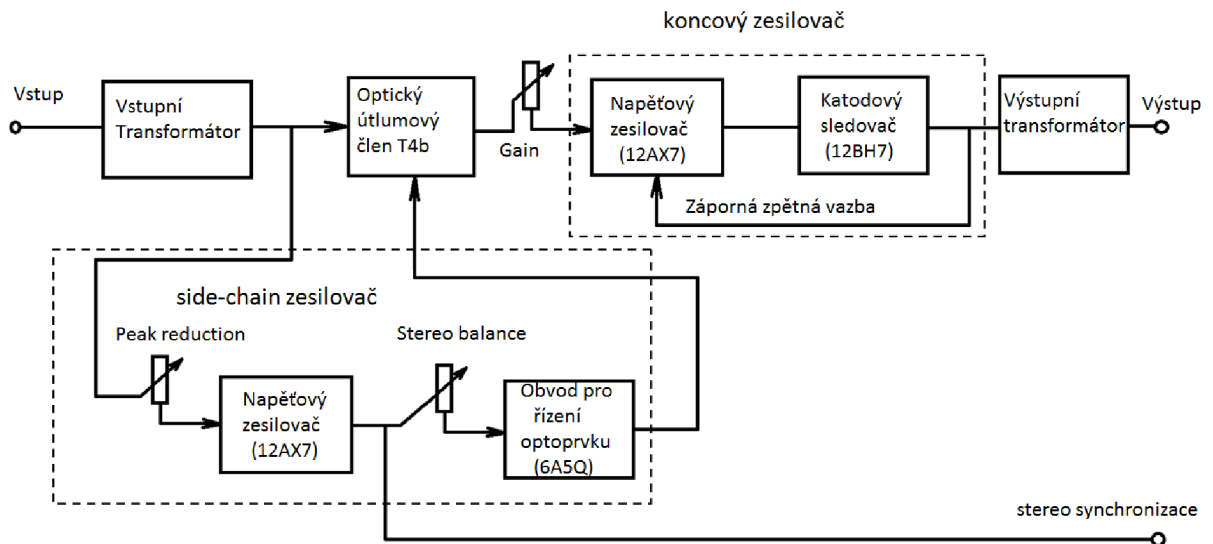
Přepínáním dvoupolohového přepínače kompresor/limiter se nastavuje kompresní poměr. V poloze kompresor je kompresní poměr dán poměrem gain a peak reduction a v poloze limiter je kompresní poměr blížíící se nekonečnu. Úprava zisku zesilovače je zobrazována pomocí VU metru, viz (VU měřící obvod), zobrazující redukci vstupního signálu v decibelech (dB). Je zde možnost volby rozsahu měřené veličiny mezi +4dB nebo +10dB, vyšší hodnota je pro měření signálu, kde probíhá větší redukce.

3.4 Rozdělení do funkčních bloků

Celý kompresor můžeme rozdělit do několika funkčních bloků, které znázorňuje obrázek 3.2.

Blokové schéma neuvádí napájecí obvod a měřicí obvod s VU metrem z důvodu, že se nejedná o obvody aktivně se zapojující do procesu tvarování zvuku.

Přes vstupní transformátor přichází vstupní signál do obvodu optického útlumového článku a zároveň do side-chain zesilovače, který se skládá z napěťového zesilovače a obvodu řídicího úroveň signálu pro optoprvek. Přivedený signál jde přes potenciometr peak reduction do napěťového zesilovače s lampou 12AX7A. Takto upravený signál prochází přes potenciometr stereo balance, který rozděluje míru stereo synchronizace v případě, že je použit vícekanálový zvuk, který je podrobně popsán v kapitole 3.4.4. Signál budí obvod s lampou 6AQ5 a tento řídí napětí pro optický útlumový článek. Výstup z článku je regulován potenciometrem gain, přes který se budí koncový zesilovač a nakonec výstupní transformátor.

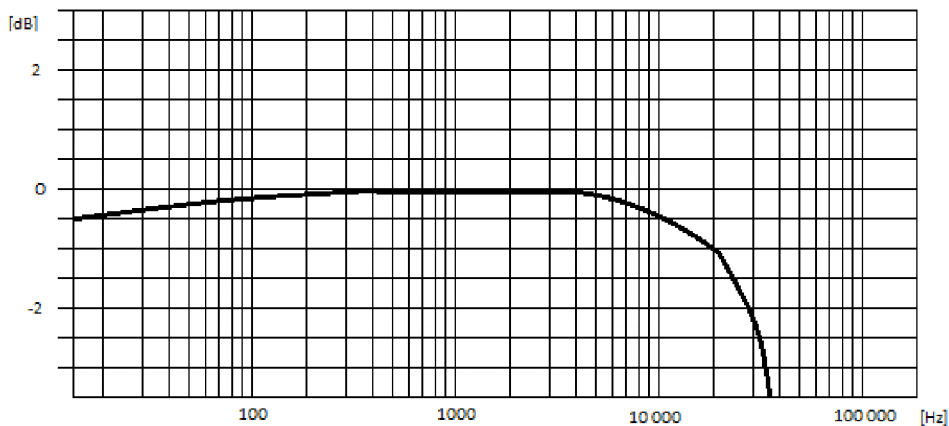


Obr. 3.2: Blokové schéma kompresoru LA2A.

3.4.1 Vstupní transformátor

Společně s výstupním transformátorem tvoří nejpodstatnější část celého systému. Neplní až tak funkci tvorby charakteru nebo tvarování zvuku jako optočlen, ale jeho základní úkol je co nejmenší ovlivnění upravovaného signálu. Funkcí obou transformátorů je impedanční přizpůsobení mezi kompresorem a systémem připojeným na jeho vstup. Největší důraz je kladen na vyrovnanou frekvenční odezvu v celém slyšitelném spektru 20Hz-20kHz. Frekvenční odezva popisuje výkonovou ztrátu na každé jednotlivé frekvenci. Protože žádná reálná součástka nemá tuto odezvu vyrovnanou v celém spektru, je potřeba vybírat typy, které splňují tuto podmínku co nejpřesněji. Jako takový se nejlépe jeví transformátor s označením A10 firmy UTC. Tento konkrétní typ spadá do kategorie menších transformátorů s frekvenční odezvou \pm

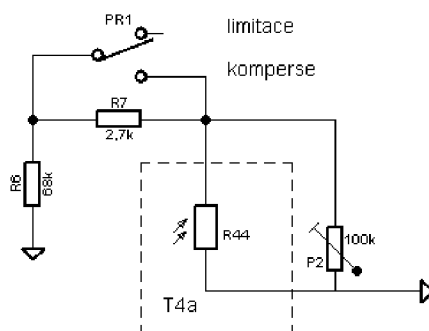
2dB ve spektru 20Hz-20kHz. Přenos na nižších kmitočtech je o něco vyšší než na vysokých, jak je zobrazeno v grafu (obr 3.3). Přenos od pásma 20kHz exponenciálně klesá. Impedance, které je možné připojit na vstup transformátoru, jsou 250 Ω a 500 Ω , celkem se jedná o 5 svorek, oba vstupy jsou symetrické a mají společnou zem. Výstupní impedanci transformátoru výrobce udává 50k Ω . [5]



Obr. 3.3: Frekvenční odezva vstupního transformátoru A10 firmy UTC (převzato[5]).

3.4.2 Optický útlumový článek

Jádro celého projektu, optoprvek, který už byl částečně popsán v části 2.5.3., je hlavní funkční součástka bloku optického útlumového článku. Je to součást, která utváří unikátní charakter výsledného zvuku. Doba náběhu i poklesu kompresoru je kompletně dána tímto optoprvkem. Schéma optického útlumového článku je na obrázku 3.4.



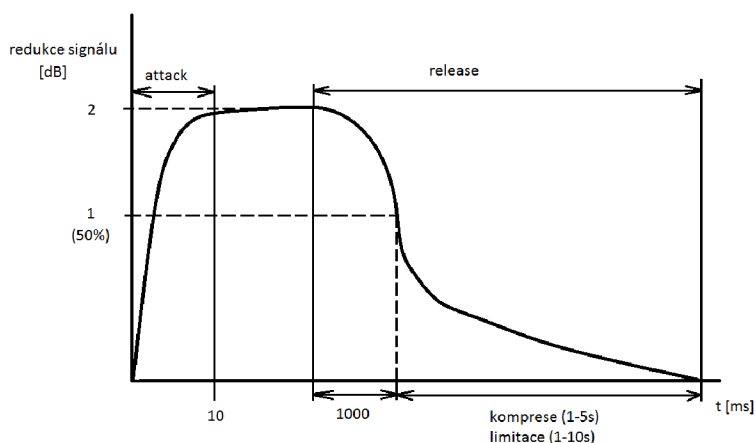
Obr. 3.4: Schéma optického útlumového článku (převzato z [6]).

Optoprvek je tvořen elektroluminiscenční panelem s dvěma fotorezistory. Jeden z nich zajišťuje samotnou redukci signálu a druhý je použit pouze pro měření velikosti této redukce, a je propojen s VU měřícím obvodem popsáným v kapitole 3.4.6. Z tohoto

důvodu musí mít oba fotorezistory stejné parametry.

Elektroluminiscenční panel a fotorezistory jsou namířeny funkční části naproti sobě a vše je uzavřeno v kovovém neprůsvitném pouzdře. Celý panel se skládá z několika od sebe elektricky izolovaných vrstev. Jako izolant je použita skleněná destička, na jejíž jedné straně je elektricky vodivá vrstva a na druhé straně je vrstva fosforu. Obě vrstvy jsou vzájemně elektricky odděleny, ale pokud na vodivé vrstvě bude přivedeno napětí, ovlivní to určitým způsobem fosforovou vrstvu, která v závislosti na velikosti tohoto napětí bude svítit. Čím vyšší bude toto napětí, tím více bude vrstva svítit. Chování optického modulu je také závislé na frekvenci přivedeného signálu. Fotorezistor reaguje na vzrůstající intenzitu světelné energie poklesem odporu, což se projeví nižším napětím na výstupu optoprvcu. Pokud by se odpor fotorezistoru z důvodu natolik silného jasu blížil nule, dojde prakticky k uzemnění upravovaného signálu a výstupní napětí klesne na nulu. V reálu se toto stát nemůže z fyzikálních a konstrukčních vlastností součástí. Obecně lze říci, že elektroluminiscenční panel, i po vypnutí, delší dobu produkuje světelnou energii, než fotorezistoru klesne odpor. Je to z důvodu fyzikální podstaty rekombinace elektronů, která nemůže ustát ihned. [1]

Obě součásti mají určitou dobu náběhu a je to dáno jejich samotnou konstrukcí, tudíž tento parametr ani nemůže být měněn. Doba poklesu z komprimované úrovně v dB do původní hodnoty vychází pro prvních 50% cca 60ms. Pro přechod ze zbytkových 50% zpět do nezpracované úrovně je třeba asi 1s až 5s. Z toho lze přibližně stanovit tvar křivky poklesu, který je zobrazen na grafu obr. 3.5. Jde spíše o orientační charakteristiku. Hodnoty jsou zaokrouhleny a zobecněny, ale důležitý charakter průběhu signálu. Znázorňuje prvotní rychlý pokles a postupně zmírňující se klesání. Od fotorezistoru je pro tento konkrétní typ operace požadována co nejkratší doba náběhu. Tyto součástky mají schopnost jakési paměti, to znamená, že pokud docházelo k redukcí signálu v posledních 20 nebo 30 sekundách, bude release odporu rychlejší. Průměrná naměřená doba náběhu do hodnoty 50% z celkové redukce zisku je 10ms, ale to pouze v případě, pokud docházelo ke kompresi během posledních 30s. V případě, že v průběhu více než 30s ke kompresi nedošlo, čas náběhu se pohybuje v mezích 50ms až 100ms.



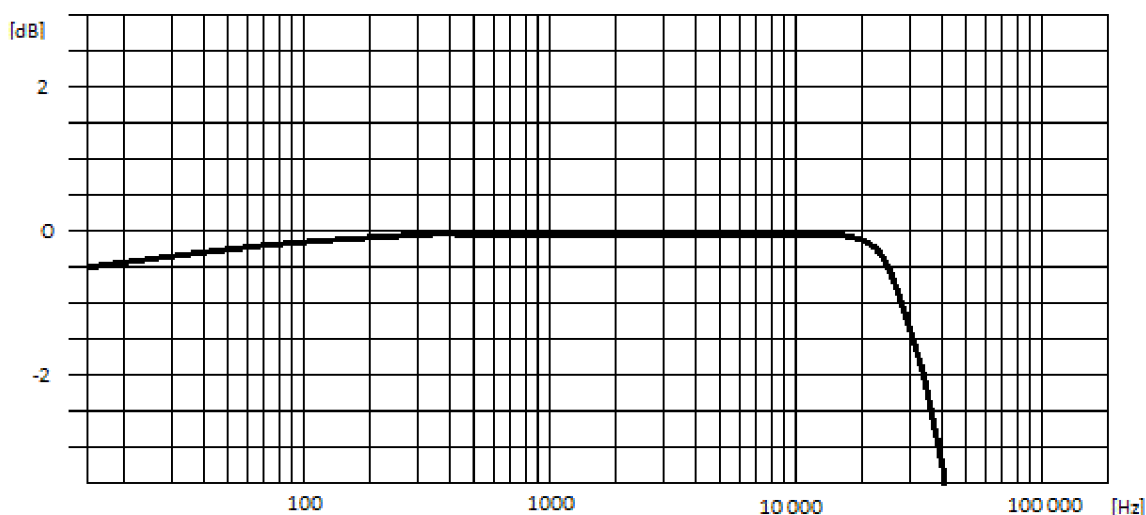
Obr. 3.5: Znázornění tvaru křivky náběhu a poklesu pro kompresor LA2A (převzato z [1]).

Konkrétnější příklad v rámci limitace signálu: pokud limitace potlačí signál o 6dB, bude celkový čas doběhu 2s. Zatímco při extrémnější limitaci (20dB nebo 30 dB) bude čas doběhu 5 - 10s. Společné mají však to, že během první sekundy dojde k návratu úrovně signálu na 50 % od nekomprimované hodnoty.

Existuje několik druhů těchto optoprvků. Pro účely LA2A byl zvolen prvek T4Bx firmy IGS, který se vyznačuje v porovnání s ostatními T4B prvky jiných firem, největší úrovní komprese a rychlejším náběhem i poklesem.

3.4.3 Výstupní transformátor

Jeho funkcí je impedanční přizpůsobení navazujících systémů. Je nutné, aby transformátor měl pokud možno co nejvyrovnanější frekvenční odezvu v celém pásmu stejně jako vstupní transformátor. Oba transformátory by měly mít ideálně stejnou frekvenční odezvu, jinak postrádá smysl použití jednoho transformátoru s vyrovnanější charakteristikou, pokud druhý transformátor dané pásmo ořeže. Jako nejideálnější výstupní transformátor se jeví transformátor A24, který má frekvenční odezvu ± 2 dB v pásmu od 20Hz do 40kHz, jak zobrazuje obr.3.6. [5] Použitelný přenos ± 2 dB má v o něco širším pásmu než vstupní transformátor, ale podstatný je jeho charakter ve slyšitelném pásmu, kde je přibližně stejný. Kvůli získání unikátního a příjemně zabarveného zvuku je použitý transformátor lehce poddimenzovaný, čímž způsobuje zkreslení signálu a přidává vyšší harmonické složky výslednému zvuku. Ten má díky tomu mnohem barevnější charakter a je příjemnější na poslech. Výstup transformátoru je symetrický o impedanci 600 Ω .



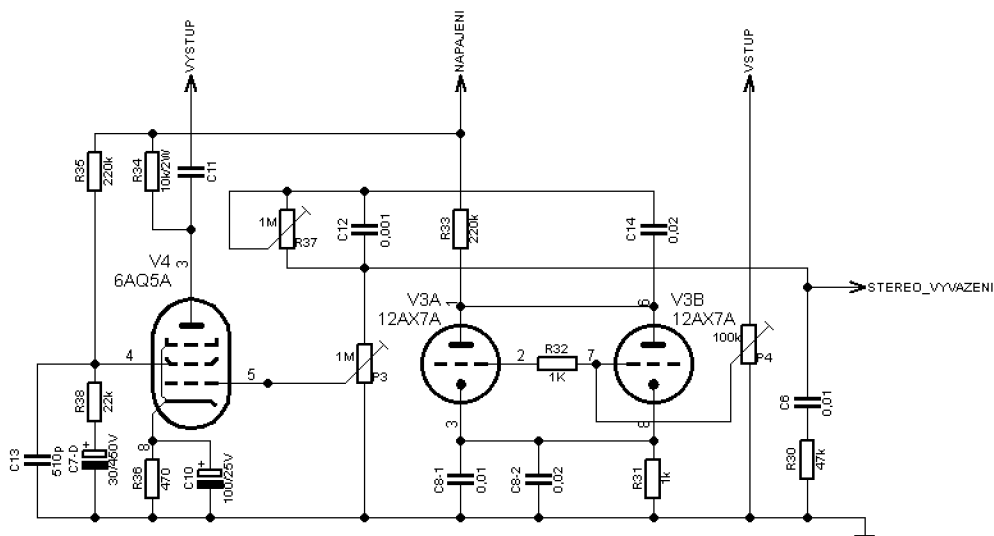
Obr. 3.6: Frekvenční odezva výstupního transformátoru A24 firmy UTC (převzato z [1]).

3.4.4 Side-chain zesilovač

Skládá se z napěťového zesilovače (12AX7) a obvodu pro řízení optoprkvu (6A5Q) a obsahuje i funkci stereo vyvážení. Blok side-chain zesilovače je zobrazen na schématu, viz obr. 3.7. Požadavkem side-chain zesilovače je ovládat chování optického útlumového článku. Vstupní signál je přiváděn na potenciometr P4 "peak reduction", který mění velikost signálu na vstupu side-chain zesilovače, a tím i nastavuje parametr treshold a následně i velikost samotné redukce signálu. Lampa 12AX7, která je zde použita jako napěťový zesilovač, pouze zvyšuje úroveň signálu. Zároveň je tato lampa použita v obvodu preemfáze, který je vysvětlen v další části.

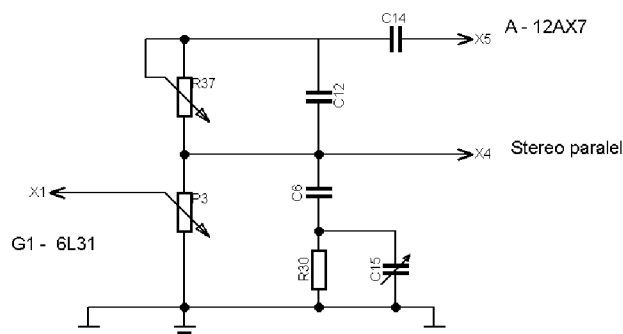
Preemfáze - Trimr R37 nastavuje hodnotu posílanou do optického útlumového článku. Obvod preemfáze neleží v signálové cestě, ale pouze ovlivňuje jeho frekvenční odezvu skrz útlumový článek. Trimr R37 tvoří spolu s kondenzátorem C12 RC člen, který při nižší hodnotě R37 zkratuje kondenzátor C12 a propouští nižší frekvence. V opačném případě vyšší. Toto nastavení rozhoduje o tom, podle jakých frekvencí bude kompresor komprimovat. Nastavením trimru R37 na malou hodnotu bude komprese probíhat v celém pásmu v závislosti na celém spektru vstupního signálu. Nastavením trimru R37 na vysokou hodnotu bude komprese probíhat v závislosti na vyšším frekvenčním pásmu začínajícím přibližně nad 1kHz, ale komprimovat se bude opět celé pásmo. Podrobněji je popsán filtr pro frekvenční úpravu řídicího signálu v kapitole „Kmitočtový filtr řídicího obvodu“. [6]

Stereo vyvážení - Kompresor od základu je určen pro zpracování monofonního signálu. Pokud je třeba komprimovat stereofonní signál je možnost využít výstupu stereo synchronizace a připojit ho ke druhému kompresoru stejného typu. Pro tyto aplikace je využíván pouze jeden optický útlumový článek který určuje míru redukce signálu pro oba kompresory. Pokud bychom nepoužili synchronizaci, každý kompresor bude komprimovat zvlášť svůj kanál. V případě, že stereofonní signál bude rozložen v panoramě střídavě, vznikne efekt, který je většinou nežádoucí. Mezi jednotlivými kanály dojde ke kompresi v různých časech a výsledný signál bude velmi nekonzistentní.



Obr. 3.7: Schéma side-chain zesilovače (převzato z [6]).

Kmitočtový filtr řídicího obvodu - bude ovlivňovat kmitočtovou charakteristiku signálu pro koncovou lampu 6AQ5A, je zobrazen na následujícím obrázku (obr. 3.8.).



Obr. 3.8 Schéma kmitočtového filtru řídicího obvodu

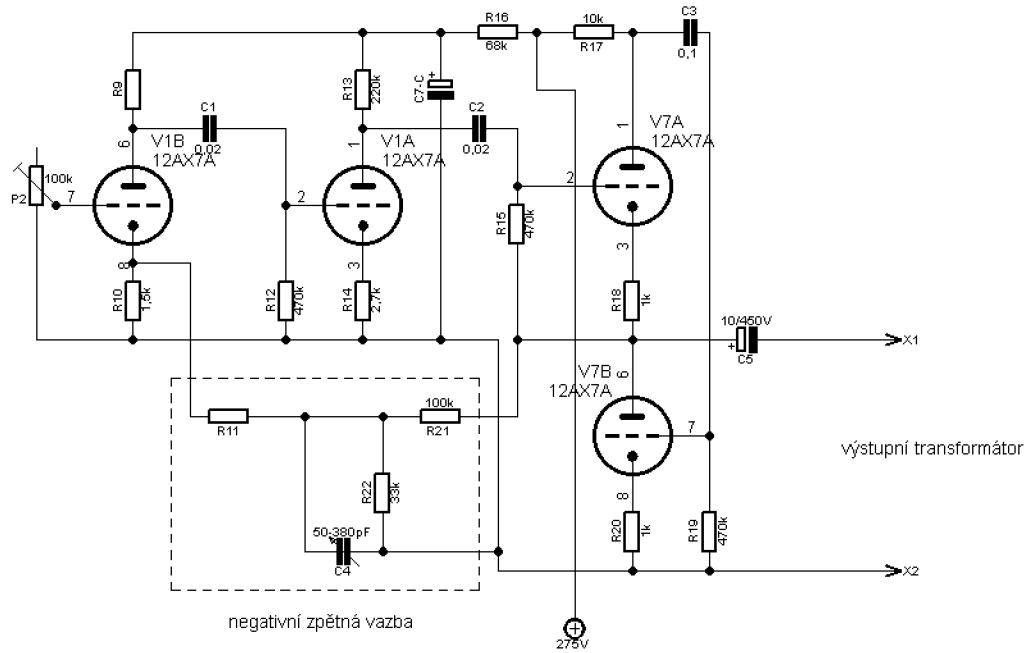
Právě tímto filtrem upravený signál bude řídit míru celkové komprese. Jsou zde tři nastavovací prvky které mohou signál ovlivnit. Potenciometr P3 nastavuje poměr použitého signálu pro řídicí signál mezi vstupním signálem daného kompresoru anebo externím signálem (side chain), viz kapitola 2.2. Nejčastěji je toto použito pro synchronizaci dvou stejných kompresoru při stereo aplikaci.

Potenciometr R37 může ovlivnit signál v nižších frekvencích, při jeho nejvyšší hodnotě odporu způsobuje pásmovou zádrž (Bell) se středem na 200Hz a úrovní signálu -18dB. Při opačném nastavení potenciometru na nejnižší hodnotu odporu (hodnota odporu paralelně ke kondenzátoru) se neprojeví.

Kondenzátor C15 ovlivňuje výšky a projevuje se jako filtr typu Shlef, kde v závislosti na jeho hodnotě 50 až 380pF je možnost změnit parametr gain v rozmezí cca 2,2dB. Tyto výsledky byly dosaženy pomocí simulace daného obvodu v programu microcap.

3.4.5 Koncový zesilovač

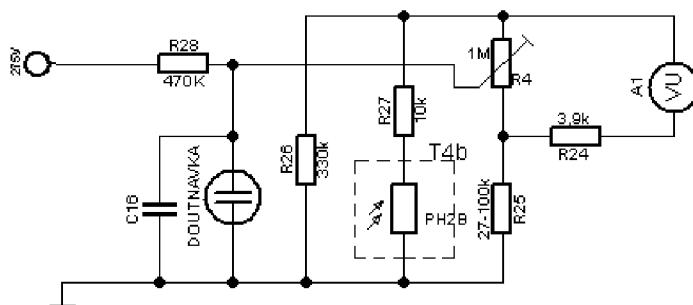
Je tvořen lampou 12AX7, která funguje jako zesilovač napětí, a je následován lampou 12BH7A, která funguje jako katodový sledovač. Schéma koncového zesilovače je na obrázku 3.9. Funguje v zapojení typu kaskoda. Z výstupu elektronky 12BH7A je vedena záporná zpětná vazba zpět do zesilovače napětí (12AX7). V rámci zpětné vazby je zapojen proměnný kondenzátor C4, kterým je možné nastavit frekvenční kompenzaci, může fungovat jako dolní propust. Výstup koncového stupně je zapojen do výstupního transformátoru.



Obr. 3.9: Schéma koncového zesilovače (převzato z [6]).

3.4.6 VU Měřící obvod

Zobrazuje jednu ze tří měřených veličin, které mohou být zvoleny třípolohovým přepínačem SW2. První měřená veličina je výstupní výkon +4dB, další je navýšení rozsahu na +10dB a poslední možnost je měření redukce signálu v decibelech. Vše je zobrazeno na indikátoru úrovně vybuzení. Z hlediska funkce je podstatná hlavně část měření redukce signálu. Pouze ta je zobrazena na následujícím schématu (obr.3.10). Vzhledem k celkovému schématu je zde uvažováno přepnutí trojpolohového přepínače do druhé polohy (redukce signálu).



Obr. 3.10: Schéma VU měřícího obvodu .

4 PRAKTICKÁ KONSTRUKCE

Konstrukce kompresoru je řešena formou kovového šasi, na kterém je uchycena většina součástí. Při konstrukci nebyly použity plošné spoje, ale pájecí lišty s drátovými propojkami. Důvod tohoto řešení je co největší minimalizace vzniku elektrických vazeb v zapojení a hlavně léty prověřenou techniku, která se v tomto konkrétním zapojení osvědčila. Celé šasi je vsazeno do kovové krabice o rackové velikosti 3U.

4.1 Deska předního panelu

Na desce předního panelu je uchycena většina ovládacích prvků. Na obrázku 4.1. je vidět uspořádání jednotlivých prvků. Jsou zde tři přepínače. První je pro zapnutí přístroje, druhý pro přepínání mezi režimem komprese a limitace, třetí, otočný je určen pro volbu měřeného rozsahu. Dva hlavní potenciometry jsou určeny pro ovládní funkce Gain a peak reduction. Trimr ve spodní části panelu (P4) je určen pro kalibraci nulové hodnoty VU metru. Uprostřed panelu se nachází VU metr, jedná se spíše o orientační prostředek k měření úrovně signálu.



Obr. 4.1 Pohled na přední panel kompresoru LA2A.

4.2 Vnitřní uspořádání kompresoru

Orientační vzhled vnitřní části zapojení je možné vidět na obrázku 4.2. Větší součásti jsou přichyceny k šasi z vrchní strany. Elektronky jsou vsunuty do keramických patič, optočlen má konektor shodný s oktalovou elektronkou (např. :EL34), proto byla

použita bakelitová patice pro oktalové elektronky. Keramické patice pro elektronky byly zvoleny, z důvodu vystavení intenzivnímu teplu, u optočlenu zahřátí nehrozí, proto byla použita bakelitová verze. Všechny tři transformátory byly přichyceny k šasi z vrchní strany. Pro možnost nastavení parametrů stereo synchronizace a frekvenčního filtru byly na vrchní stranu šasi vyvedeny potenciometry P3 a R37.

Z důvodu eliminování brumů a jiných nežádoucích efektů byly oba přívody žhavení k jednotlivým elektronkám zapleteny do sebe a jeden konec byl uzemněn. Toto uzemnění bylo vedeno co nejkratší cestou na nejbližší zemnicí bod. Toto je možné řešit zapojením výkonového drátového potenciometru, je třeba jeho krajní kontakty zapojit mezi žhavicí kontakty a jeho běžec uzemnit. Zde z hlediska brumu efekt byl nerozeznatelný od přímého spojení jednoho kontaktu na zem a použití potenciometru, proto byla zvolena jednodušší varianta zapojení na zem.

Signálové cesty byly vždy vedeny co nejkratší cestou, zejména tam, kde signál má ještě nízkou úroveň, a je mnohem náchylnější chytat rušení. Byl použit co nejmenší počet zemnicích bodů, zase kvůli zamezení vzniku nežádoucích jevů.



Obr. 4.2 pohled do vnitřního zapojení kompresoru LA2A.

5 NAMĚŘENÉ VÝSLEDKY

Na kompresoru LA2A byly naměřeny charakteristiky popisující jeho základní vlastnosti. Pro měření byl použit analyzátor Audio Precision APx525. Všechny charakteristiky byly naměřeny v režimu, kdy signál posílaný do kompresoru přesáhl práh (threshold), a docházelo jeho kompresi. Nebyl použit žádný z nastavovacích prvků pro ovlivnění frekvenční charakteristiky v řídicím obvodu. Potenciometr R37 byl nastaven tak, aby se neprojevovala pásmová zádrž na 200Hz. Kapacitní trimr C15 byl nastaven tak, aby neovlivňoval pásmo výšek. Kromě jedné převodní charakteristiky v režimu limitace, byly všechna měření provedena v režimu komprese. Pro měření, kdy frekvence generovaného signálu byla konstantní, byl použit sinusový průběh o frekvenci 1kHz a úrovni 4dBu (cca 1,25Vrms). Součástí řešení je porovnání vlastností kompresoru v polovodičové verzi, s názvem kompresor dynamiky zvukových signálů, který sestrojil p. Vítězslav Král [11]. Naměřeny byly tyto charakteristiky:

Převodní charakteristika

Kmitočtová charakteristika

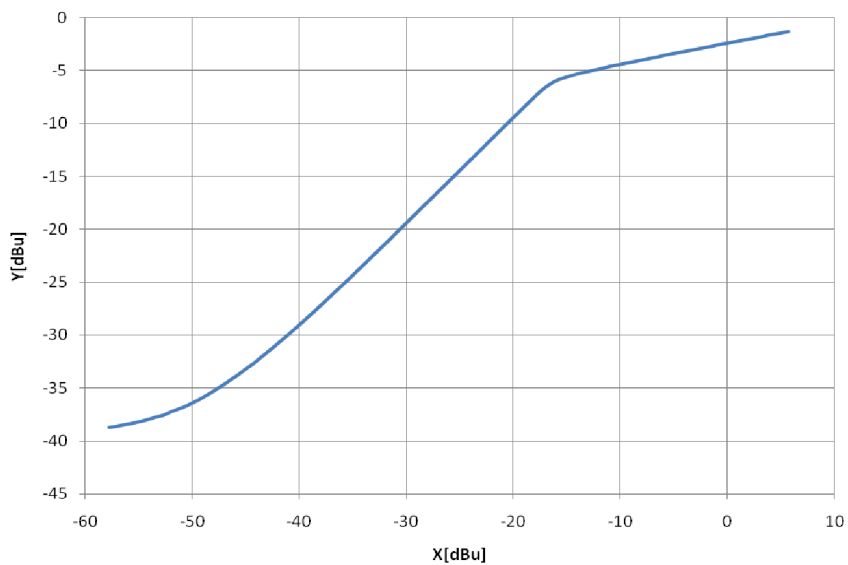
Fázová charakteristika

Skupinové zpoždění

Harmonické zkreslení

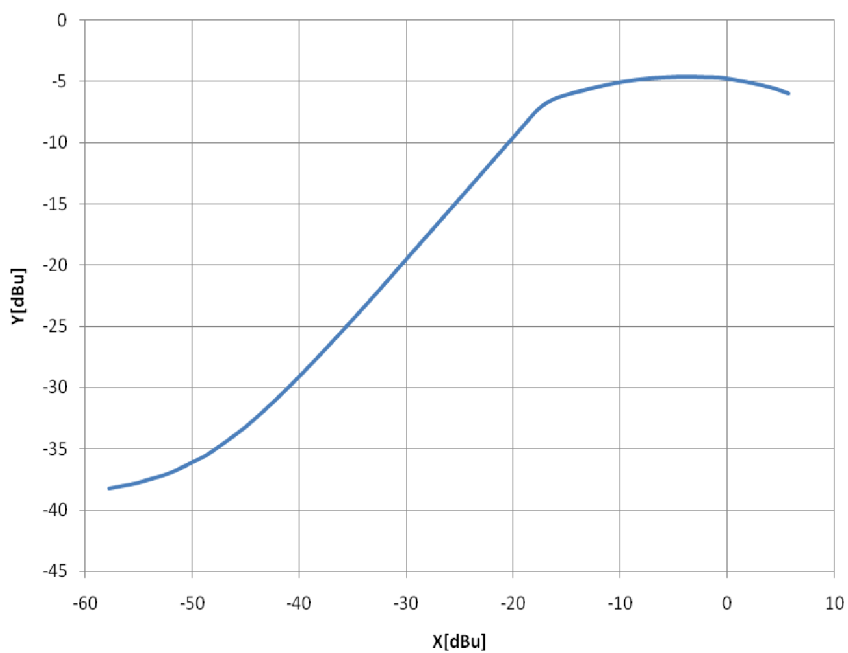
5.1 Převodní charakteristika v režimu (comp/limit)

Převodní charakteristika popisuje vztah mezi velikostí signálu vstupujícího do kompresoru a signálu na jeho výstupu. Měření je prováděno pomocí postupného zvyšování napětí na vstupu kompresoru. Počáteční efektivní hodnota napětí je 1mV a koncová je 1,5V. Pro testování byl zvolen sinusový signál o frekvenci 1kHz. Výsledky v efektivní hodnotě napětí byly do grafu převedeny na hladinu napětí v jednotce dBu, pro lepší zvukovou představivost. Graf (obr. 5.1.) odpovídá kompresoru v režimu komprese. Z grafu lze vyčíst že, pokud kompresor nedosáhne prahu (threshold), chová se jako lineární zesilovač. Po dosažení prahu je dobře viditelné koleno (knee), které je spíše pozvolné (soft). Kompresní poměr (ratio) je vypočítán v následující kapitole



Obr. 5.1 Převodní charakteristika v režimu komprese

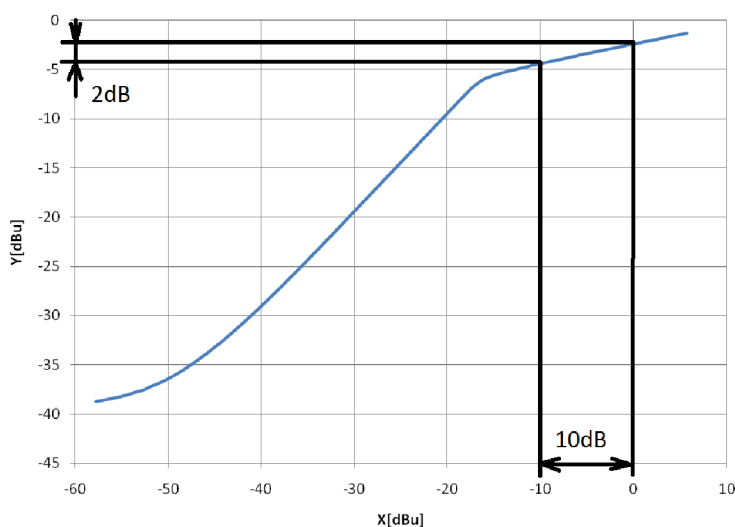
Křivka limitace (Obr.5.2.) zobrazuje ostřejší koleno (hard knee) a kompresní poměr je o větší než u režimu komprese, což odpovídá předpokladu a shoduje se s orgiginální verzí LA2A.



Obr. 5.2 Převodní charakteristika v režimu limitace

5.1.1 Výpočet kompresního poměru

Jelikož u LA2A není kompresní poměr regulovatelný, jeho hodnota vyplývá z použitých součástek, je třeba ho změřit. Pro tento účel nejlépe vyhovuje převodní charakteristika při fázi komprese (Obr.5.3.). Pevodní charakteristika limitace pro tento účel není vhodná, protože v její určité části došlo při měření k možné odchylce. Kompresní poměr je dán poměrem mezi velikostí vstupního signálu a výstupního signálu. Pokud nedosáhne signál prahu, kompresní poměr je 1:1 vždy, proto je důležité odečítat kompresní poměr v oblasti až po jeho dosažení. Zde byl zvolen úsek v rozpětí -10dBu do 0dBu velikosti vstupního signál, jemuž na výstupu odpovídala změna velikosti o 2dBu. Tyto dvě čísla jsou vyjádřené poměrem 10:2. Z toho vyplývá, že výsledný kompresní poměr je 5:1, což odpovídá předpokladu. Pro velikosti signálu platí, že pokud signál na vstupu vzroste o 5dB, na výstupu se zvýší pouze o 1dB.

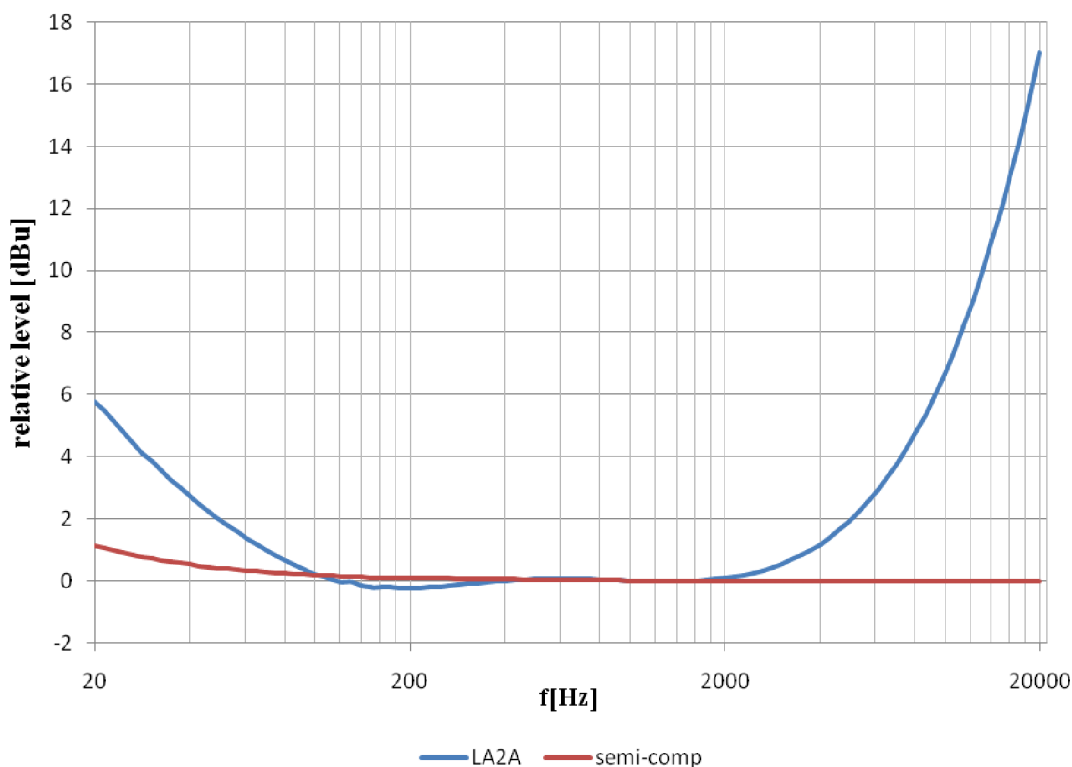


Obr. 5.3 Výpočet kompresního poměru s převodní charakteristiky

5.2 Kmitočtová charakteristika

Kmitočtová charakteristika udává schopnost systému přenášet frekvence ve zvoleném spektru. Je z ní možné vyčíst o kolik dB se změní signál na jednotlivých frekvencích. U zařízení zabývajících se zpracováním zvuku je většinou požadována vyrovnaná frekvenční charakteristika, kromě výjimečných případů. V případě LA2A je určitým způsobem požadována i změna barvy výsledného zvuku, což je následek i určitého zásahu do frekvenčního spektra. Měření bylo provedeno postupným zvyšováním frekvence od 20Hz do 20kHz, při stejné hladině sinusového signálu. Jako referenční hodnota signálu byla použita frekvence 1kHz, kde signál je o velikosti 0dBu. Výsledná křivka je zobrazena na obrázku 5.4. Z křivky lze vyčíst velmi extrémní nárůst v oblasti nízkých kmitočtů okolo 60Hz. Na vysokých kmitočtech je nárůst ještě extrémnější, začíná přibližně na 2kHz. Tento výsledek je způsoben negativní zpětnou vazbou, která má možnost poměrně radikálně ovlivnit průběh frekvenční charakteristiky. Druhý podstatný prvek měnící kmitočtovou charakteristiku může být vstupní a výstupní transformátor, nicméně z jejich kmitočtové charakteristiky udávané výrobcem, kdy má na nízkých i na vysokých kmitočtech být naopak pokles, je jejich vliv na tento výsledek

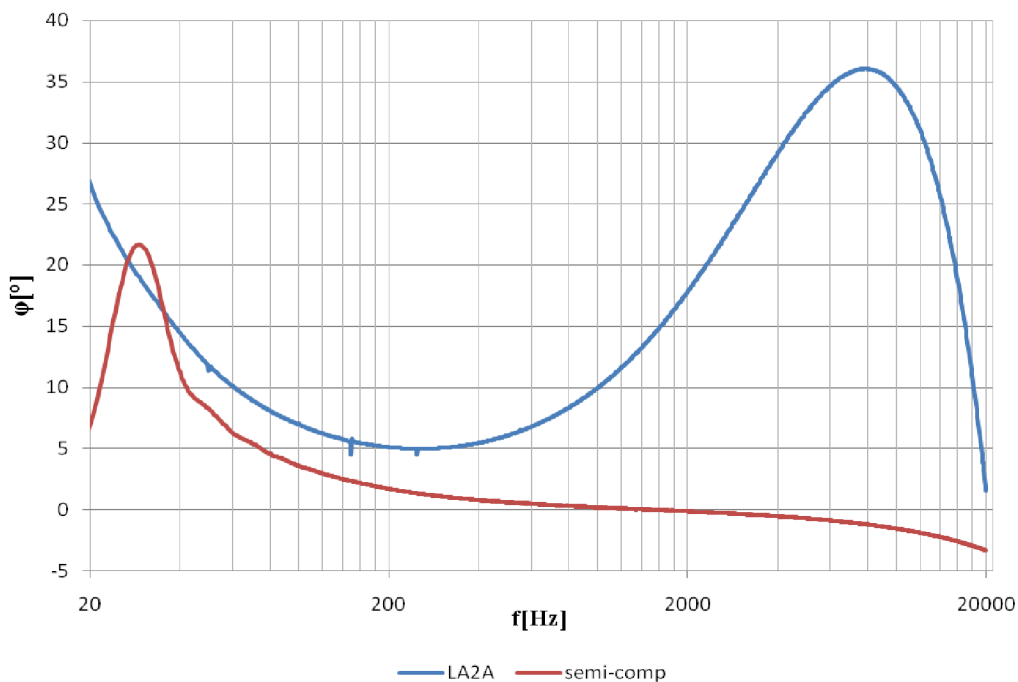
nepravděpodobný. Křivka polovodičového kompresoru má poměrně vyrovnaný průběh v průběhu celého spektra, což je od tohoto typu kompresoru požadováno. Jemný zdvih je až kolem hodnoty 20-40Hz, což je pro zvuk frekvenční oblast prakticky nevyužívaná. S jistotou lze říci, že kmitočtová charakteristika polovodičového kompresoru je pro zpracování zvukových signálů v pořádku, pro LA2A je výsledná křivka v souladu s předpokladem popsaným v kapitole 3.2.



Obr. 5.4 Kmitočtová charakteristika kompresoru LA2A a polovodičového kompresoru

5.3 Fázová charakteristika

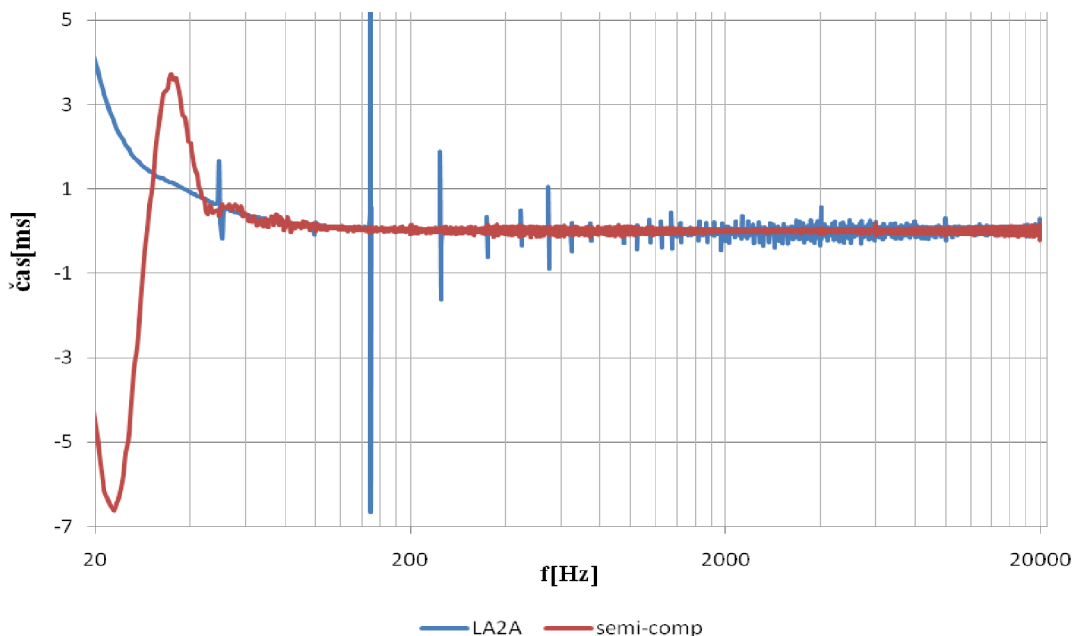
Fázová charakteristika popisuje o kolik stupňů je fáze pozměněna mezi vstupním a výstupním signálem v rámci celého spektra. Od kompresoru se obecně požaduje co nejmenší fázový posun na jakékoli frekvenci. Měření proběhlo postupným přeladováním celého spektra (20Hz - 20kHz) při úrovni vstupního signálu +4dBu. Na obrázku 5.5. je vidět fázová charakteristika obou kompresorů, LA2A se projevuje velkým fázovým posuvem na frekvenci 5kHz a poté v pásmu 20Hz až 60Hz. Posuv mohl být způsobený reakční dobou některých prvků a vstupními/výstupními transformátory. Výsledek odpovídá technickým parametrům udávaným výrobcem LA2A. Polovodičový kompresor má minimální fázový posun v celém pásmu, kromě přibližně 25Hz což je pro zvuk nepodstatné.



Obr. 5.5 fázová charakteristika kompresoru LA2A a polovodičového kompresoru

5.4 Skupinové zpoždění

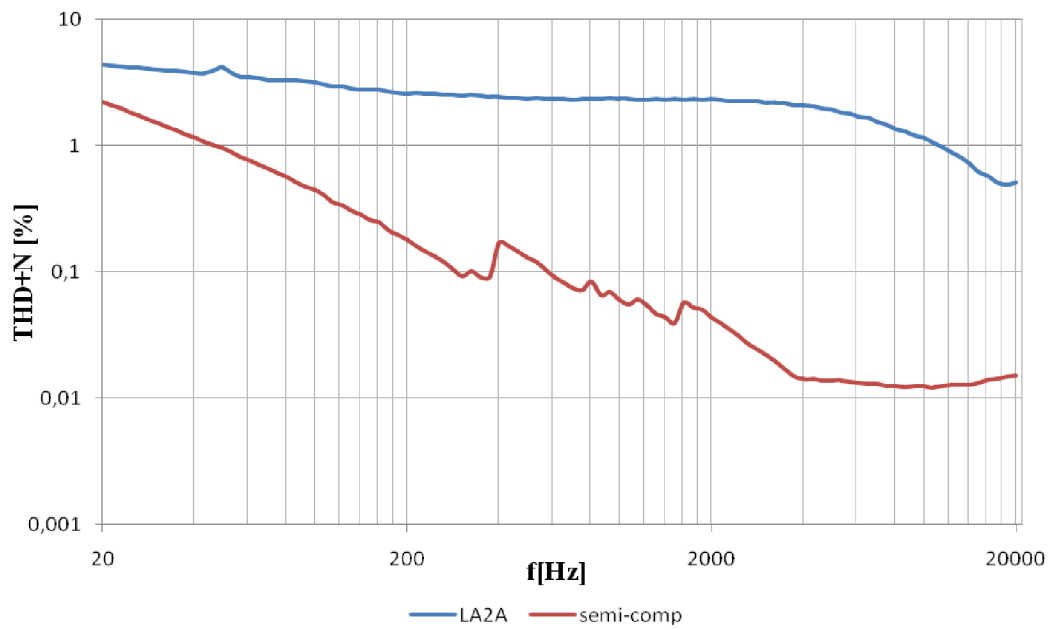
Skupinové zpoždění udává reálné časové zpoždění na jednotlivých frekvencích při průchodu zařízením. Je to další vyjádření fázových vlastností signálu, ale měřeno je v sekundách. Měření proběhlo postupným přeladováním celého spektra (20Hz - 20kHz) při úrovni vstupního signálu +4dBu. Výsledná křivka je vidět na obrázku 5.6., pro LA2A je v celém spektru poměrně vyrovnaná až na úzké výkyvy a v oblasti nízkých kmitočtů okolo 50Hz, zpoždění začíná narůstat. Naměřená charakteristika je v souladu s předpokladem pro LA2A. Polovodičový kompresor se v této charakteristice chová velmi podobně jako LA2A.



Obr. 5.6 Charakteristika skupinového zpoždění kompresoru LA2A a polovodičového kompresoru

5.5 Harmonické zkreslení

Harmonické zkreslení udává, jak bude harmonický signál ovlivněn po průchodu zařízením, zejména z hlediska harmonických složek, které se při harmonickém zkreslení zesilují., více v kapitole 2.2.1. Na obr je zobrazena charakteristika odpovídající zkreslení THD+N, což je míra harmonického zkreslení včetně hladiny šumu vlastního zařízení. Výsledný průběh je vidět na obrázku 5.7. Pro LA2A zkreslení s klesající frekvencí mírně stoupá a jeho maximum je cca 7%, což je poměrně hodně. Širokopásmové zkreslení THD+N bylo naměřeno 1,79%. Polovodičový kompresor vykazuje mnohem nižší hodnoty zkreslení v celém spektru a je to od něj i očekáváno. U LA2A je zkreslení způsobeno vstupním a výstupním transformátorem a menší mírou také elektronkami. Je třeba zvážit, pro jaký účel bude kompresor používán, protože na některé aplikace bude požadované zkreslení příliš velké, ale v případě že použitím sledujeme nejen komprimaci, ale i dodání barvy, může toto zkreslení prospět. Obecně se od zařízení tohoto typu očekává poměrně velké zkreslení, proto se dá říci, že v tomto ohledu je podmínka splněna.



Obr. 5.7 Zkreslení THD+N kompresoru LA2A a polovodičového kompresoru

ZÁVĚR

Cílem této práce je sestavení kompresoru fungujícího na bázi proslulého elektronkového kompresoru LA2A. Důraz je kladen zejména na zachování charakteru zpracování zvuku jako u originálu. Tento aspekt může být do největší míry ovlivněn vstupním a výstupním transformátorem a použitým optoprvkem.

V první části byly popsány základy fyzikálních vlastností zvuku, souvisejících s dynamikou. Byly uvedeny příklady různých zdrojů zvuku ve vztahu k dynamickému rozsahu. Popsány fáze vzniku a zániku zvukové vlny. Velká část kapitoly je věnována popisu prvotního náběhu - transientu. Je vysvětlena jeho důležitost ve spojitosti s dynamickou úpravou a jeho schopnost ovlivnit charakter zvuku.

Druhá kapitola se věnuje popisu dynamických procesorů. Vysvětluje princip na jednoduchém blokovém schématu, jehož části jsou následně rozebrány podrobně. Následuje popis parametrů, které se uplatňují při dynamické úpravě signálu. Je zde vysvětlen způsob grafického znázornění kompresního poměru pomocí převodní charakteristiky. Velká část textu je věnována zkreslení, jeho pozitivnímu či negativnímu vlivu na signál a s tím souvisejícímu clippingem. V další podkapitole jsou dynamické procesory rozděleny podle topologie zapojení a popsány vlastnosti jednotlivých typů. Je zde také popsána důležitost pochopení účelnosti kompresoru pro danou situaci. Poslední podkapitola se věnuje vysvětlení speciálních pojmů souvisejících s kompresí signálů.

Třetí kapitola se věnuje samotnému kompresoru LA2A. Jako první jsou uvedeny jeho technické předpoklady včetně elektrického schématu. Přístroj byl rozdělen na funkční bloky, které byly následně popsány podrobně. Jsou zde uvedeny předpokládané charakteristiky některých součástí. Pro filtr v řídicí větvi je zde popsán výsledek simulace v programu microcap. Je kladen důraz na pochopení stěžejních součástí kompresoru, zejména na vstupní a výstupní transformátory a jejich význam z hlediska zkreslení. Dále je podrobně rozebrán optočlen samotný i funkční blok, do kterého spadá.

Čtvrtá část se věnuje praktické realizaci kompresoru. Jsou zde popsány konstrukční vlastnosti přístroje, uchycení součástí a jejich rozmístění. Zbytek popisuje zásady vedení signálových cest, kvůli zamezení průniku nežádoucích složek do užitečného signálu.

Ve páté kapitole jsou rozebrány výsledky měření. Úkolem bylo porovnat zkonstruovaný kompresor s parametry originálního kusu LA2A a polovodičovým kompresorem. Jako první byla naměřena převodní charakteristika, ze které byl vypočítán přibližný kompresní poměr, ten vyšel 5:1, což je v souladu s technickými parametry výrobce. V režimu limitace byl kompresní poměr mnohonásobně vyšší, což odpovídá obecným teoretickým předpokladům. Jako další byla naměřena kmitočtová charakteristika, která byla do značné míry ovlivněna zápornou zpětnou vazbou, a vyšší mírou úrovně šumu. Fázové charakteristika a skupinové zpoždění vyšlo v rámci použitelných hodnot pro LA2A. Úroveň širokopásmového zkreslení THD+N vyšla 1,79 %, což je asi o 1 dB více, než je uvedeno v technických parametrech originálního výrobku. Z naměřených výsledků je zřejmé, realizovaný kompresor ve větší míře splňuje teoretické předpoklady. Z hlediska porovnání polovodičového kompresoru a

LA2A, je v charakteristikách značný rozdíl. Z důvodu použití modernějších technologií je polovodičový kompresor vlastnostmi preciznější, ale z pohledu posluchače může LA2A při správné aplikaci lepší, zvukově příjemnější volbou.

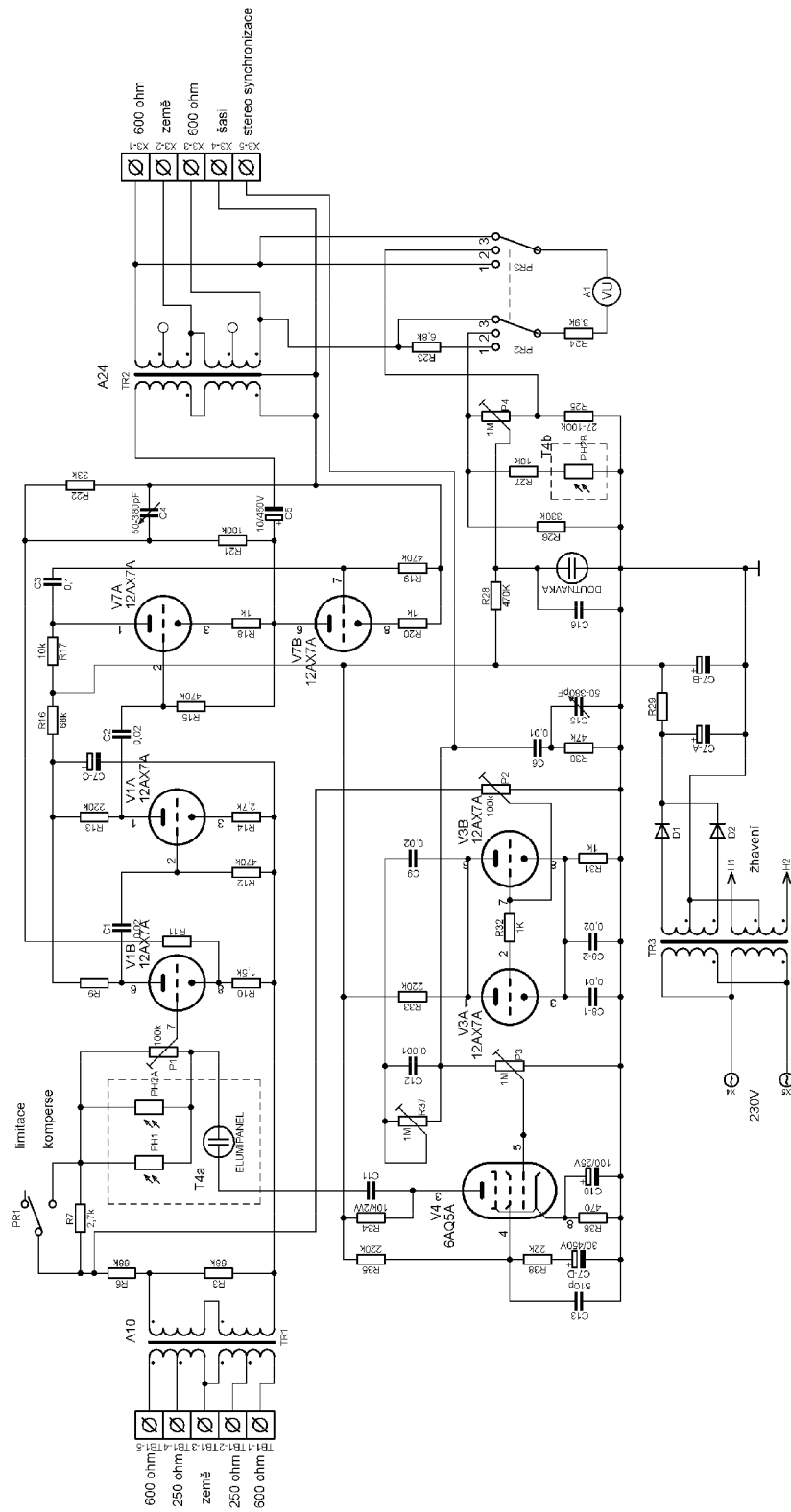
LITERATURA

- [1] IGS AUDIO. *IGS Audio* [online]. 2013 [cit. 2015-12-15]. Dostupné z: <http://www.igsaudio.com/t4bx>
- [2] IZHAKI, Roey. *Mixing audio: concepts, practices and tools*. 1st ed. Amsterdam: Focal Press, 2008, xvii, 566 s. ISBN 978-0-240-52068-1.
- [3] MUSIL, Jarek. KREŠENDO. *Zvuková technika & zvukový design*. Brno, 2007.
- [4] RecProAudio. *DIY Universal Audio (Teletronix) La2a Compressor* [online]. 2004 [cit. 2015-12-15]. Dostupné z: http://www.recproaudio.com/diy_pro_audio/teletronix_la2a.htm
- [5] UNITED TRANSFORMER CORPORATION. *Filter catalog* [online]. 1962 [cit. 2015-12-15]. Dostupné z: http://www.gearslut.com/index.php?main_page=product_info&products_id=187
- [6] UNIVERSAL AUDIO INC. *Universal Audio* [online]. 2013 [cit. 2015-12-15]. Dostupné z: <http://www.ualudio.com/blog/la-2a-analog-obsession/>
- [7] UREI INCORPORATED. *Model LA2A - leveling amplifier* [online]. U.S.A., 1979 [cit. 2015-12-15].
- [8] WAVES AUDIO LTD. *Waves* [online]. 2010 [cit. 2015-12-15]. Dostupné z: <http://www.waves.com/plugins/cla-2a-compressor-limiter>
- [9] VLACHÝ, Václav. *Praxe zvukové techniky*. 3. aktualizované a doplněné vydání. Praha: Muzikus, 2008. ISBN 978-80-86253-46-5.
- [10] SCHIMMEL, Jiří. *Studiová a hudební elektronika*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav telekomunikací, 2012.
- [11] KRÁL, Vítězslav. *KOMPRESORY DYNAMIKY ZVUKOVÝCH SIGNÁLŮ* [online]. Brno, 2016 [cit. 2016-05-30]. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav telekomunikací. Vedoucí práce Doc. Ing. Jaroslav Koton.

SEZNAM SYMBOLŮ, VELIČIN A ZKRATEK

<i>TR</i>	Transformátor
<i>THD</i>	Total harmonic distortion, úroveň harmonického zkreslení
<i>THD+N</i>	Total harmonic distortion, úroveň harmonického zkreslení včetně šumu
<i>VU</i>	Volume unit - úroveň vybuzení (dB)
<i>Peak</i>	signálová špička
<i>RMS</i>	Root-mean square - efektivní hodnota signálu

A SCHÉMA KOMPRESORU LA2A



B SEZNAM POUŽITÝCH SOUČÁSTEK

onačení	hodnota	provedení	poznámka
Rezistory			
R5	68k	uhlíkový	
R6	68k	uhlíkový	
R7	1k	uhlíkový	
R8	2M2	uhlíkový	
R9	220k	uhlíkový	
R10	1k5	uhlíkový	
R11	68k	uhlíkový	
R12	470k	uhlíkový	
R13	220k	uhlíkový	
R14	2k7	uhlíkový	
R15	470k	uhlíkový	
R16	68k	uhlíkový	
R17	10k	uhlíkový	
R18	1k	uhlíkový	
R19	470k	uhlíkový	
R20	1k	uhlíkový	
R21	100k	uhlíkový	
R22	33k	uhlíkový	
R23	6k8	uhlíkový	
R24	3k9	uhlíkový	
R25	27k	uhlíkový	
R26	330k	uhlíkový	
R27	10k	uhlíkový	
R28	470k	uhlíkový	
R29	4k7	uhlíkový	výkonový 2W
R30	47k	uhlíkový	
R31	1k	uhlíkový	
R32	1k	uhlíkový	
R33	220k	uhlíkový	
R34	10k	uhlíkový	výkonový 2W
R35	220k	uhlíkový	
R36	470R	uhlíkový	
R38	22k	uhlíkový	
Potenciometry			
P1	100k	drátový	
P2	100k	drátový	
P3	1M	drátový	
P4	1M	uhlíkový	
R37	1M	drátový	trimr
kondenzátory			
C1	0,02u	svítkový	630V
C2	0,1u	svítkový	630V
C3	0,1u	svítkový	630V
C4	50-380pf	slídový	kapacitní trimr
C5	10u	svítkový	450V
C6	0,01u	svítkový	630V
C7A	47u	elektrolytický	450V
C7B	47u	elektrolytický	450V

C7C	47u	elektrolytický	450V
C7D	47u	elektrolytický	450V
C8-1	0,01u	svítkový	630V
C8-2	0,02u	svítkový	630V
C9	0,02u	svítkový	630V
C10	100u	elektrolytický	25V
C11	0,01u	svítkový	630V
C12	0,001u	svítkový	630V
C13	510pf	keramický	100V
C15	50-380pf	keramický	kapacitní trimr
C16	470pf	keramický	100V
Přepínače			
PR1		páčkový spínač	2 polohový
PR2/3		otočný přepínač	3 polohový
Diody			
D1	1N4007-B	univerzální rychlá dioda	DO-41 1A 1000V
D2	1N4007-B	univerzální rychlá dioda	DO-41 1A 1000V
Transformátory			
TR1	A10 - UTC	vstupní	
TR2	A24 - UTC	výstupní	
TR3		napájecí	275V-40mA,6,3V-2A
Elektronky + optovrky			
V1	12AX7A(ECC83)	Tesla	dvojitá trioda
V2	12BH7A	Sovtek	dvojitá trioda
V3	12AX7A(ECC83)	Tesla	dvojitá trioda
V4	6AQ5A(6L31)	Tesla	kocová pentoda
T4a/b	IGS T4b		optočlen