

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Brno, 2017

Vojtěch Panenka



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

KOMPRESORY DYNAMIKY ZVUKOVÝCH SIGNÁLŮ

AUDIO SIGNAL DYNAMIC COMPRESSORS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Vojtěch Panenka

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Jaroslav Koton, Ph.D.

BRNO 2017



Bakalářská práce

bakalářský studijní obor **Audio inženýrství**
Ústav telekomunikací

Student: Vojtěch Panenka

ID: 174370

Ročník: 3

Akademický rok: 2016/17

NÁZEV TÉMATU:

Kompresory dynamiky zvukových signálů

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Prostudujte problematiku kompresorů zvukových signálů a na základě typu kompresoru ukažte místo jeho nasazení při zpracování audio signálů. Uveďte požadavky na ně kladené resp. na jejich dílčí části. Popište možné realizace těchto funkčních bloků a diskutujte jejich výhody a případná omezení těchto řešení. Zvolte některé ze známých řešení kompresoru dynamiky signálu založeného na využití současných polovodičových prvků a to prakticky realizujte. Na funkčním řešení proveďte experimentální měření a ověřte jeho správnou činnost.

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: 1.2.2017

Termín odevzdání: 8.6.2017

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

Konzultant:

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 části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

ABSTRAKT

Bakalářská práce popisuje kompresor dynamiky zvukových signálů, jeho parametry, jednotlivé funkční bloky a jejich praktickou realizaci. Výsledkem je návrh stereo kompresoru včetně jeho konstrukce a experimentálního ověření jeho parametrů.

KLÍČOVÁ SLOVA

kompresor, limiter, dynamika, doba náběhu, doba doběhu, prahová úroveň, komprese, kompresní poměr, VCA, stereo VCA, zesilovač řízený napětím

ABSTRACT

This thesis describes block diagram and specifications of dynamics compressor with an example of realization of each block. As a result of this thesis I've designed, constructed and experimentally measured dynamics compressor based on VCA circuit.

KEYWORDS

compressor, limiter, dynamics, attack time, release time, treshold, compression, compression ratio, VCA, stereo VCA, voltage controlled amplifier

PANENKA, Vojtěch *Kompresory dynamiky zvukových signálů*: bakalářská práce. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav telekomunikací, 2016. 85 s. Vedoucí práce byl doc. Ing. Jaroslav Koton, Ph.D.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci na téma „Kompresory dynamiky zvukových signálů“ jsem vypracoval(a) 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(ka) uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této bakalářské práce jsem neporušil(a) autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl(a) nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a/nebo majetkových a jsem si plně vědom(a) následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského 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.

Brno

.....

podpis autora(-ky)

PODĚKOVÁNÍ

Rád bych poděkoval vedoucímu diplomové práce panu doc. Ing. Jaroslavu Kotonovi, Ph.D. za odborné vedení, konzultace, trpělivost a podnětné návrhy k práci.

Brno

.....

podpis autora(-ky)



Faculty of Electrical Engineering
and Communication
Brno University of Technology
Purkynova 118, CZ-61200 Brno
Czech Republic
<http://www.six.feec.vutbr.cz>

PODĚKOVÁNÍ

Výzkum popsany v této bakalářské práci byl realizován v laboratořích podpořených z projektu SIX; registrační číslo CZ.1.05/2.1.00/03.0072, operační program Výzkum a vývoj pro inovace.

Brno

.....

podpis autora(-ky)



EVROPSKÁ UNIE
EVROPSKÝ FOND PRO REGIONÁLNÍ ROZVOJ
INVESTICE DO VAŠÍ BUDOUCNOSTI



OBSAH

Úvod	12
1 Úvod do tématu	13
1.1 Zpracování zvukového signálu	13
1.2 Dynamické procesory	14
1.2.1 Kompresor	14
1.2.2 Expander	14
1.2.3 Limiter	15
1.2.4 Šumová brána	16
1.2.5 Různé kombinace	16
2 Kompresor v praxi	17
2.1 Použití kompresoru v praxi	17
2.1.1 Technický přístup	17
2.1.2 Kreativní přístup	17
2.1.3 Vyrovnávací komprese	18
3 Parametry kompresoru	20
3.1 Převodní kompresní charakteristika	20
3.1.1 Prahová úroveň	20
3.1.2 Kompresní poměr	20
3.1.3 Koleno	21
3.1.4 Kompenzace úrovně	21
3.2 Časové parametry	21
3.2.1 Doba náběhu a doběhu	21
3.2.2 Režim Auto	21
3.3 Spřažení více kanálů	22
4 Topologie kompresorů	23
4.1 Optokompresor	23
4.2 Variable Mu kompresor	23
4.3 FET kompresor	23
4.4 VCA kompresor	24
5 Konstrukční bloky VCA kompresoru	25
5.1 Základní stavební bloky	25
5.1.1 VCA článek	25
5.1.2 RMS detektor	26

5.1.3	Prahová úroveň	26
5.1.4	Kompresní poměr	27
5.1.5	Kompenzace úrovně	27
5.2	Časové parametry	28
5.3	Propojení dvou kanálů do stera	29
6	Návrh VCA kompresoru	31
6.1	Vstupní a výstupní obvody	31
6.2	VCA článek	32
6.3	RMS detektor	33
6.4	Prahová úroveň	34
6.5	Kompresní poměr	35
6.6	Změna přechodové charakteristiky - kolene	35
6.7	Kompenzace úrovně	36
6.8	Úprava časových parametrů	37
6.9	Bypass	38
6.10	Propojení kanálů do stera	38
7	Konstrukce	40
8	Ověření vlastností kompresoru	41
8.1	Parametry převodní charakteristiky	41
8.1.1	Prahová úroveň	41
8.1.2	Kompresní poměr	45
8.1.3	Koleno	49
8.1.4	Kompenzace úrovně	51
8.2	Časové parametry	55
8.2.1	Doba náběhu	55
8.2.2	Doba doběhu	59
8.2.3	Časové parametry v režimu Auto	63
8.3	Propojení do stera	65
8.4	Přístrojové charakteristiky	67
8.4.1	Frekvenční odezva	67
8.4.2	THD+N	67
8.4.3	Přeslech	68
8.4.4	SNR	68
8.4.5	Fáze vstup-výstup	68
9	Závěr	69

Literatura	70
10 Přílohy	72

SEZNAM OBRÁZKŮ

1.1	Kompresor	14
1.2	Expander	15
1.3	Limitér	15
1.4	Šumová brána	16
1.5	De-esser realizovaný pomocí pásmově laděného kompresoru	16
3.1	Převodní kompresní charakteristika	20
3.2	Časové vlastnosti kompresoru	22
5.1	Blokové schéma VCA kompresoru	25
5.2	VCA článek	25
5.3	RMS detektor	26
5.4	Detektor prahové úrovně	26
5.5	Kompresní poměr	27
5.6	Kompenzace úrovně	27
5.7	Blokové schéma VCA kompresoru s vloženým blokem pro řízení časových parametrů	28
5.8	Režim Auto	29
5.9	Propojení dvou kanálů do stera	29
6.1	Vstupní a výstupní obvody	31
6.2	VCA článek	32
6.3	RMS detektor	33
6.4	Detektor prahové úrovně, přepínač kolene, kompresní poměr	34
6.5	Kompenzace úrovně	36
6.6	Úprava časových parametrů	37
6.7	Bypass	38
6.8	Propojení kanálů do stera	39
7.1	Konstrukce přístroje	40
7.2	Blokové uspořádání desek v přístroji	40
8.1	Prahová úroveň - maximum	42
8.2	Prahová úroveň - střed	43
8.3	Prahová úroveň - minimum	44
8.4	Kompresní poměr - maximum	46
8.5	Kompresní poměr - střed	47
8.6	Kompresní poměr - minimum	48
8.7	Tvrdé koleno	49
8.8	Měkké koleno	50
8.9	Kompenzace úrovně - maximum	52
8.10	Kompenzace úrovně - střed	53

8.11	Kompenzace úrovně - minimum	54
8.12	Doba náběhu - maximum	56
8.13	Doba náběhu - střed	57
8.14	Doba náběhu - minimum	58
8.15	Doba doběhu - maximum	60
8.16	Doba doběhu - střed	61
8.17	Doba doběhu - minimum	62
8.18	Doba náběhu a doběhu	64
8.19	Propojení do sterea - kanál B vs. kanál A	65
8.20	Propojení do sterea - kanál A vs. kanál B	66
8.21	Frekvenční odezva	67
8.22	Fáze vstup-výstup	68
10.1	Kompletní schéma návrhu VCA kompresoru - zdroj napájení	72
10.2	Kompletní schéma návrhu VCA kompresoru - kanál A	73
10.3	Kompletní schéma návrhu VCA kompresoru - kanál B	74
10.4	Kompletní schéma návrhu VCA kompresoru - indikace vybuzení a gain reduction	75
10.5	DPS kanál A top	76
10.6	DPS kanál A bottom	76
10.7	DPS kanál A top - osazovací plán	77
10.8	DPS kanál A bottom - osazovací plán	77
10.9	DPS kanál B top	78
10.10	DPS kanál B bottom	78
10.11	DPS kanál B top - osazovací plán	79
10.12	DPS kanál B bottom - osazovací plán	79
10.13	DPS indikace top	80
10.14	DPS indikace bottom	80
10.15	DPS indikace top - osazovací plán	81
10.16	DPS indikace bottom - osazovací plán	81
10.17	DPS předního panelu	82
10.18	DPS předního panelu - osazovací plán	83
10.19	DPS zdroje top	84
10.20	DPS zdroje bottom	84
10.21	DPS zdroje top - osazovací plán	85
10.22	DPS zdroje bottom - osazovací plán	85

ÚVOD

Tato práce se věnuje popisu kompresoru dynamiky zvukových signálů. Předpokladem pro její pochopení jsou základní znalosti z oblasti elektrotechniky a problematiky analogových obvodů.

Celá práce je rozdělena do několika bloků. První blok je pojatý tak, aby čtenář, který není s tématem zcela seznámen, postupně získal přehled o tom, co je to kompresor, kde a kdy se používá a jak funguje. Tento blok umožní čtenáři následně proniknout do této problematiky hlouběji.

Ve druhém bloku jsou podrobně rozebrány jednotlivé parametry kompresoru, kterými lze kompresor popsat a jejichž nastavením lze kompresor ovládat.

Třetí blok obsahuje popis blokového zapojení VCA kompresoru dynamiky a následný podrobný popis konstrukčního řešení těchto bloků dle mého návrhu.

Poslední blok je věnován experimentálnímu ověření vlastností navrženého a zkonstruovaného kompresoru.

1 ÚVOD DO TÉMATU

1.1 Zpracování zvukového signálu

Ať už jste hudebník, zvukař či běžný posluchač, setkáváte se s komprimovaným zvukem denně a i když o tom možná nevíte, jste na komprimovaný zvuk zvyklí. Kompresory dynamiky se používají při živých koncertech, v nahrávacích i post-produkčních studiích, v rádiu, televizi, vlastně kdekoli, kde se nějakým způsobem zpracovává zvukový signál.

Když zvukový technik zpracovává hudební signál, má možnost ovlivnit čtyři hlavní faktory hudebního materiálu:

- okamžitou hlasitost
- barvu zvuku
- umístění v prostoru
- dynamiku a dynamický rozsah

Okamžitá hlasitost

Hlasitost signálu nastavujeme staticky většinou otočným nebo posuvným potenciometrem - faderem. Nastavením hlasitosti určujeme zesílení nezávisle na parametrech vstupního signálu.

Barva zvuku

Úprava barvy zvuku je nejznámější a nejrozšířenější způsob úpravy hudebního signálu. Barvu zvuku tvoří a určuje spektrální složení daného zvukového signálu a upravuje se pomocí ekvalizéru.

Umístění v prostoru

Výsledný signál je také třeba vhodně umístit do prostoru výsledné nahrávky. Při popisu prostoru mluvíme jednak o stereo (levopravé) rovině a jednak o rovině předozadní. Na umístění v předozadní rovině se podílí mnoho faktorů (dozvuk, frekvenční složení etc.) a pomocí vhodné komprese s ní můžeme také pracovat, např. silně komprimovaný signál subjektivně působí, jako by se zdroj signálu nacházel těsně před námi.

Dynamika

Posledním faktorem, který ovlivňuje naše vnímání zvuku, je dynamika signálu. Většinou o ní běžný posluchač cíleně nepřemýšlí, ale právě dynamické rozdíly pro

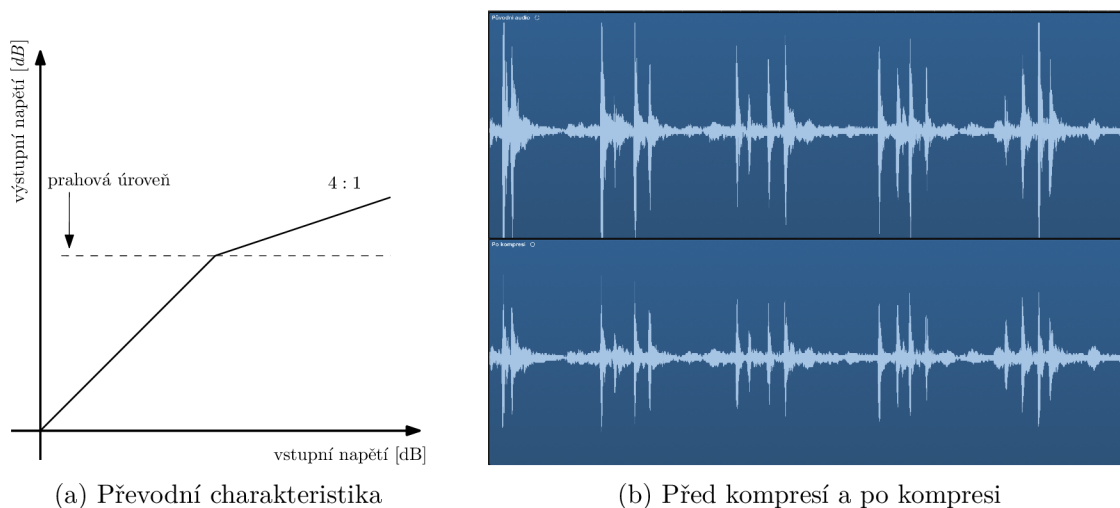
nás dělají hudbu zajímavou. Proto je naprosto nezbytné si ji uvědomovat a naučit se s ní aktivně pracovat.

1.2 Dynamické procesory

S dynamikou signálu pracují dynamické procesory. Rozlišujeme dva základní typy dynamických procesorů, kompresor a expander.

1.2.1 Kompresor

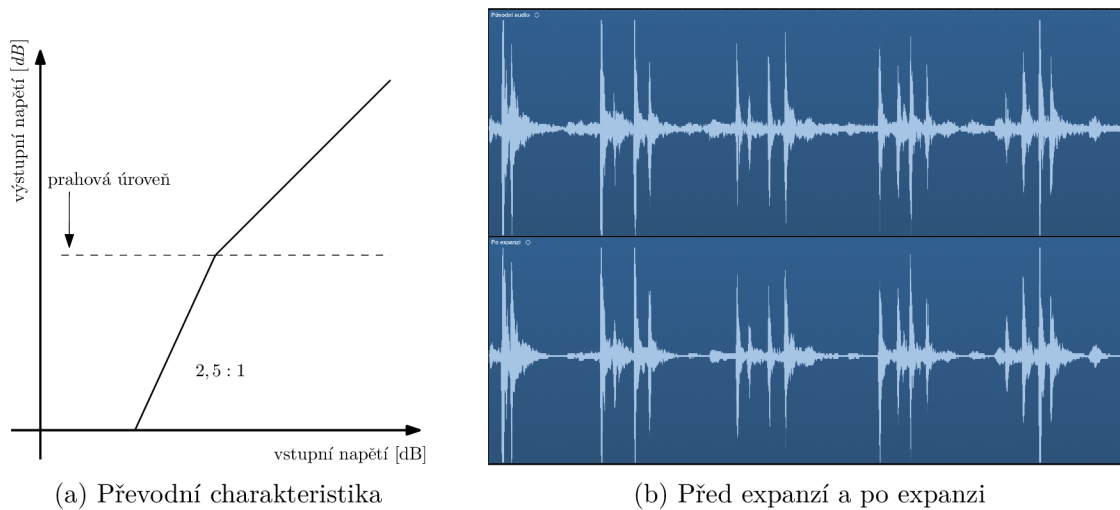
Jednoduše řečeno, kompresor je zařízení, které zeslabuje hlasité signály nad danou prahovou úrovní. Tím snižuje dynamiku zvukového signálu - komprimuje dynamický rozsah. Na obrázku vidíte rozdíl mezi signálem před kompresí a po kompresi.



Obr. 1.1: Kompresor

1.2.2 Expander

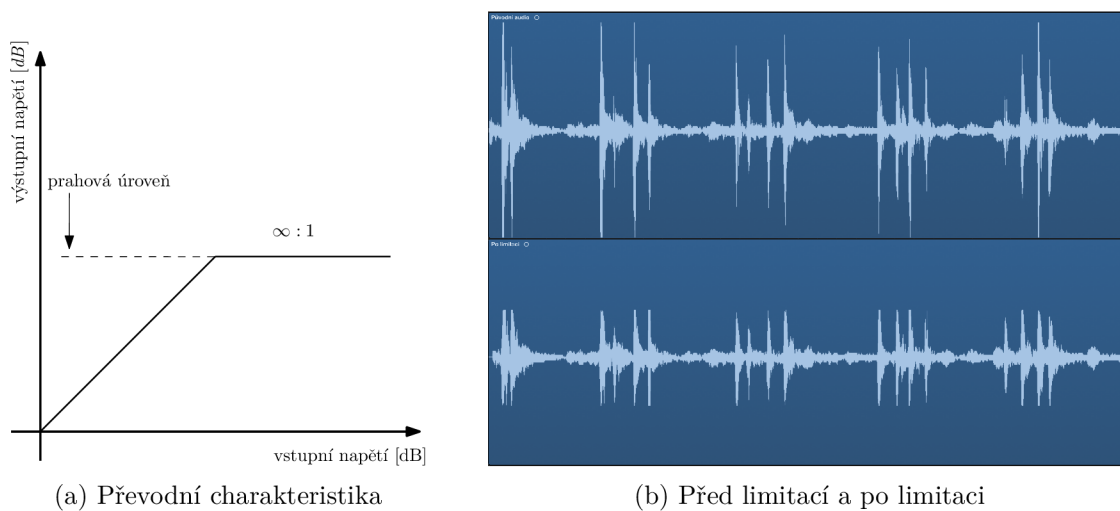
Expander je opakem kompresoru, používá se k navýšení dynamického rozsahu. Je to dynamický procesor, který zeslabuje tiché signály pod danou prahovou úrovní.



Obr. 1.2: Expander

1.2.3 Limiter

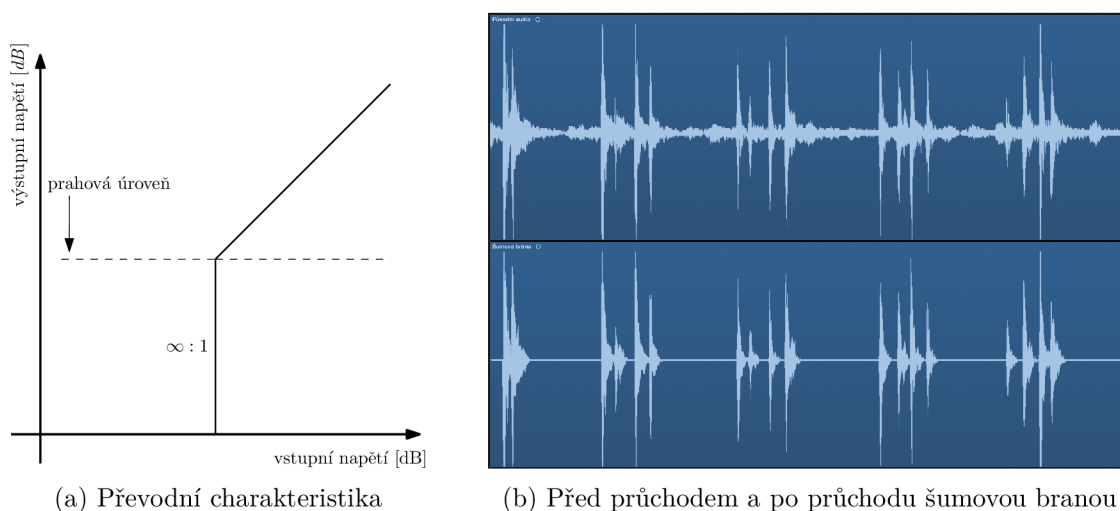
Limiter je extrémním případem kompresoru s vysokým kompresním poměrem, teoreticky až $\infty : 1$. Limiter se často používá v místě, kde je důležité, aby úroveň signálu nepřesáhla danou úroveň, například těsně před A/D převodníkem, jako poslední článek mixu, před vysílačem apod.



Obr. 1.3: Limiter

1.2.4 Šumová brána

Šumová brána je extrémním případem expanderu, její expanzní poměr se označuje jako $\infty : 1$. Šumová brána nepropustí žádný signál pod prahovou úrovní. Používá se k oddělení nežádoucí ručové složky, ať už šumu, přeslechu apod., od hlasitějšího, užitečného signálu. V mnoha případech však použití šumové brány působí nepřirozeně a lépe funguje vhodně nastavený expander. Dalším způsobem, jak zachovat přirozený dojem z hudebního signálu zpracovaného šumovou branou, je omezit její maximální útlum.



Obr. 1.4: Šumová brána

1.2.5 Různé kombinace

Dále lze tyto procesory různě kombinovat buď mezi sebou, nebo i s dalšími zařízeními, a tím vytvořit nové užitečné nástroje. Spojením ekvalizéru a kompresoru lze vytvořit několikapásmový kompresor, který se skládá z několika kompresorů, z nichž každý pracuje v jiném frekvenčním pásmu.

Vícepásmový kompresor se hodí například pro utlumení výrazných sykavek ve zpěvu. Jeho horní pásmo lze nastavit tak, aby ve chvíli, kdy nejsou přítomné výrazné sykavky a další, na horní části spektra výrazné hlásky, kompresor nezabíral a signál procházel netknutý. Pokud se však ve vstupním signálu vyskytne silná sykavka, kompresor pracující na vrchní části spektra se aktivuje a tuto sykavku potlačí v nastaveném poměru. Takovému zařízení se říká de-esser a vyrábí se i jako samostatné zařízení.

Obr. 1.5: De-esser realizovaný pomocí pásmově laděného kompresoru

2 KOMPRESOR V PRAXI

2.1 Použití kompresoru v praxi

Kompresor je velmi mocný nástroj a dá se využít mnoha způsoby, je téměř nemožné je všechny vyjmenovat. Každý zvukový inženýr chápe použití kompresoru trochu jinak a časem si vytvoří vlastní přístup ke způsobu jeho používání. Přesto se pokusím přibližně popsat různá použití kompresoru a podělím se o svůj přístup k práci s kompresory. Jde však čistě o moje názory a subjektivní chápání využití kompresorů, proto je prosím neberte jako pravidlo, ale jako doporučení a příklady.

2.1.1 Technický přístup

Jako první bych rád vyčlenil čistě technické využití kompresoru, například tam, kde by vysoká dynamika nebo úroveň signálu znamenala jeho znehodnocení. Typickým příkladem může být rádiové vysílání, při kterém je pravděpodobné, že se do signálu při přenosu přidá množství šumu. Pokud však využijeme vhodný kompander (komplementární dvojice kompresor + expander, viz. 1.2), můžeme před přenosem snížit dynamický rozsah signálu kompresorem a následně po přenosu opět dynamický rozsah obnovit pomocí expanderu, který zároveň utlumí případný nežádoucí šum.

2.1.2 Kreativní přístup

Kreativní použití jakéhokoli nástroje je vždy subjektivní. Kreativním použitím kompresoru myslím způsob, při kterém je hlavním účelem změna charakteru daného zvukového signálu.

Mikrokomprese

Mikrokompresí nazývám takové použití kompresoru, kdy se zaměřuji na změny dynamiky v krátkém časovém úseku, přibližně v rozsahu jednotek až několika stovek milisekund.

Ideálním příkladem je komprese úderu malého bubínku u bicí soupravy. Úder malého bubínku se skládá ze tří po sobě jdoucích částí, nejprve je to silný tranzient, poté tělo úderu a nakonec doznívající ocas úderu. Pomocí mikrokomprese jsme schopni komprimovat celý úder najednou (rychlý náběh, velmi pomalý doběh, případně lze nastavit i určitou dobu zadržení), utlumit jen tranzient úderu (rychlý náběh i doběh), nechat projít tranzient, ale komprimovat tělo úderu tak, aby kompresor prodloužil jeho znění (pomalejší náběh, středně dlouhý doběh - dle délky těla

úderu) nebo lze docílit tzv. pumpování, kdy kompresor silně utlumí počátek úderu a ten se pak vrací s nastavenou dobou doběhu.

Podobně můžeme použít kompresor například na baskytaru. Pokud hráč hraje hodně dynamicky, může zvuk působit silně perkusivně a nezní tak mohutně, jak bychom od baskytary očekávali. Pokud opět rozeberu jedno drnknutí na strunu, bude se skládat z podobných částí jako úder bubínku. První bude "drnk", silný a tranzientní, a po něm následuje samotný tón. Pomocí rychlého kompresoru je možné tranzienty ztlumit na úroveň samotného tónu a následně celý signál zesílit, tím získáme hutnější zvuk se stejně hlasitým tranzientem jako v původním signálu, ale samotné tělo tónu je hlasitější a zřetelnější.

Makrokomprese

Makrokompresí pak nazývám takové použití kompresoru, kdy se zaměřuji na změny dynamiky v delším časovém úseku, řádově stovky milisekund.

Makrokomprese se pohybuje někde mezi mikrokompresí a vyrovnávací kompresí a lze nad ní přemýšlet jako nad vyrovnáním dynamických rozdílů v rámci slova, fráze apod. Časově jde o podobné změny jako u vyrovnávací komprese, ale odděluji je z toho důvodu, že je třeba nad nimi kreativně uvažovat jinak a jiným způsobem k nim přistupovat.

2.1.3 Vyrovnávací komprese

Poslední typ komprese, který bych rád zmínil, používám pro vyrovnání úrovně nějakého signálu nebo skupiny více signálů po delší časový úsek.

Typickým příkladem může být skupina vokálů. Vyrovnávací kompresi použiji ve chvíli, kdy např. ve sloce zpívá pouze jeden zpěvák, ale v refrénech se přidají další dva vokalisté. Pokud všechny tři mikrofony smíchám do jednoho mixu zcela bez úpravy dynamiky, v refrénech bude vokální mix třikrát hlasitější než ve slokách. Tato skutečnost by nebyla pro posluchače příjemná, proto na vokální mix napojím kompresor a jeho prahovou úroveň (viz. 3 Parametry kompresorů) nastavím těsně nad úroveň signálu ve slokách. Jakmile se přidají další vokály, vstupní úroveň kompresoru stoupne nad prahovou úroveň a kompresor sníží hlasitost celého vokálního mixu dle nastaveného kompresního poměru. V případě vokálů většinou funguje vyšší kompresní poměr okolo 4 : 1 a nastavený postupný přechod - měkké koleno (viz. 3 Parametry kompresorů). U vokálů se nevyplácí nastavovat extrémně rychlý čas náběhu, protože velká část srozumitelnosti lidského hlasu spočívá v tranzientech. Ani příliš dlouhý čas doběhu není vhodný, protože když by po refrénu následovala bezprostředně sloka, kompresoru by chvíli trvalo, než by se vrátil do výchozího stavu,

a začátek zpěvu ve sloce by se postupně zesílil z ticha na původní úroveň, což také není vhodné.

Shrnutí

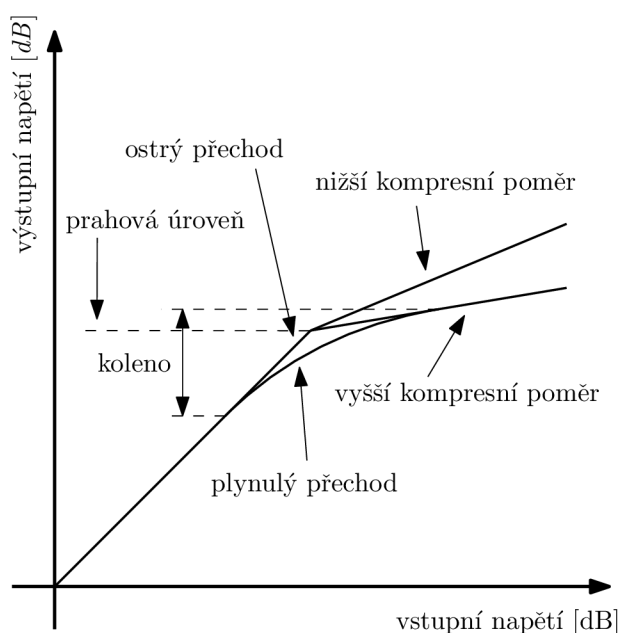
I když jsem zde vyjmenoval různé filozofie použití kompresoru, je třeba mít na paměti, že není možné kompresor použít pouze jedním z těchto způsobů. Pomocí korektního nastavení jsme schopní se jednomu z nich vhodně přiblížit, ale vždy je třeba si uvědomit, že všechny přístupy spolu úzce souvisí. Nejdůležitější je vždy používat kompresor záměrně a vědět, za jakým účelem. Nevhodným použitím kompresoru lze výslednému zvuku velmi uškodit!

3 PARAMETRY KOMPRESORU

Pro pochopení toho, jak kompresor funguje a jak se ovládá, je třeba znát jeho jednotlivé parametry.

3.1 Převodní kompresní charakteristika

Základní parametry každého kompresoru lze vyčíst z jeho převodní charakteristiky. Ta se vynáší do grafu, kdy se do vodorovné roviny vynáší vstupní úroveň a do svislé roviny pak úroveň výstupní.



Obr. 3.1: Převodní kompresní charakteristika

3.1.1 Prahová úroveň

Prahová úroveň je úroveň vstupního signálu, při které nastává zlom v převodní charakteristice kompresoru. V případě ostrého kolene se prahová úroveň nachází přesně v bodu zlomu charakteristiky a v případě plynulého přechodu se prahová úroveň nachází uprostřed oblasti nelineárního přechodu.

3.1.2 Kompresní poměr

Kompresní poměr určuje zesílení (nebo útlum) mezi vstupem a výstupem kompresoru.

Existují dva způsoby zápisu kompresního poměru, první je technicky korektnější, udává totiž poměr jako $\frac{\Delta V_{OUT}}{\Delta V_{IN}}$, tedy výstup ku vstupu. Pokud je poměr nastaven na polovinu, zapíše se jako kompresní poměr 0,5. Druhý způsob zápisu je v praxi používanější a právě toto značení je používáno na komerčně vyráběných přístrojích. Poměr je udáván jako $\frac{\Delta V_{IN}}{\Delta V_{OUT}}$, tedy vstup ku výstupu. Pokud je poměr nastaven na polovinu, zapíše se jako 2 : 1. Maximální kompresní poměr se označuje jako $\infty : 1$, minimální jako 1 : 1.

V této práci používám druhý způsob značení z důvodu větší rozšířenosti.

3.1.3 Koleno

Charakter přechodu přes prahovou úroveň se označuje jako koleno. V některých aplikacích je vhodné použití ostrého přechodu, v jiných je vhodnější použít přechod plynulejší, kterého lze docílit například zařazením nelineárního prvku do obvodu. Většina kompresorů má možnost přepnout mezi ostrým a plynulým přechodem, ale u některých typů je tato charakteristika pevně dána nelinearitou použitého prvku (optočlánek, dioda, elektronka, ...).

3.1.4 Kompenzace úrovně

Kompresor už z principu své funkce snižuje výstupní úroveň, proto je k dispozici parametr zesílení (gain), kterým lze tuto skutečnost kompenzovat.

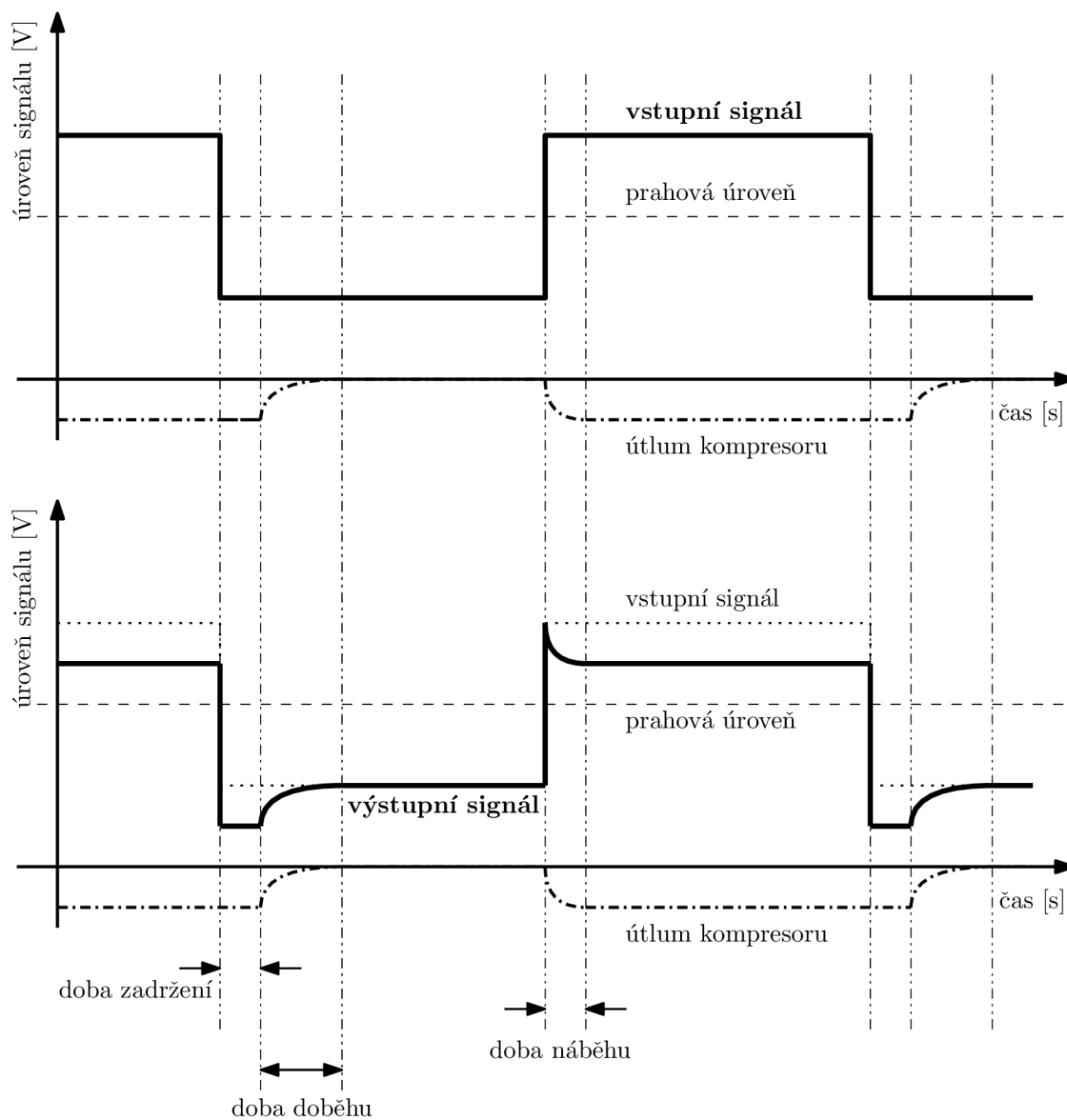
3.2 Časové parametry

3.2.1 Doba náběhu a doběhu

Doba náběhu určuje, za jakou dobu po překročení prahové úrovně dosáhne kompresor požadovaného útlumu. Doba doběhu pak určuje, za jakou dobu po snížení signálu pod prahovou úroveň se kompresor vrátí do své výchozí polohy. V souvislosti s nimi občas mluvíme ještě o době zadržení (hold), která určuje, po jakém čase se začne kompresor vracet do svého výchozího stavu.

3.2.2 Režim Auto

Někteří výrobci přidávají do svých kompresorů tzv. režim Auto - automatické nastavení časových konstant. Cílem je, aby kompresor na pomalu se měnící signály reagoval pomalu a na rychle se měnící signály reagoval rychle. V praxi jde často pouze o přemostění obvodů, které umožňují dodatečně nastavit reakční časy kompresoru.



Obr. 3.2: Časové vlastnosti kompresoru

3.3 Spřažení více kanálů

Pro některé aplikace je výhodné spřáhnout ovládání více kanálů a v některých případech i propojit detektory jednotlivých kanálů, aby reagovaly společně. Jakým způsobem lze realizovat propojení stereo kompresoru popisují v sekci 5.3.

4 TOPOLOGIE KOMPRESORŮ

Kompresory se vyrábějí v mnoha podobách, modelech a typech. Existují čtyři základní topologie, kterých se výrobci drží.

4.1 Optokompresor

Jeho jádrem je optočlánek. Využívá světlocitlivých vlastností fotorezistoru. Ten reaguje na zdroj světla pomaleji, na světlo vyzářené po delší časový úsek. Vlastnosti kompresoru pak určuje nelineární charakteristika fotorezistoru. Optokompresory se v praxi používají jako vyrovnávací kompresory díky své unikátní převodní charakteristice a pomalé a plynulé reakci.

Typickými zástupci jsou LA-2A, LA-3A, TubeTech CL1B

4.2 Variable Mu kompresor

I když jde asi o nejstarší topologii kompresoru, Variable Mu kompresory se používají ve většině špičkových nahrávacích studií. Obsahují speciální elektroniku, jejíž zesílení lze v užitečném rozsahu regulovat pomocí změny předpětí na mřížce. Konstrukce Variable Mu kompresoru je velmi náročná, proto v praxi používaných modelů není mnoho. Protože je jejich konstrukce velice nákladná, mnoho firem se zaměřuje na tvorbu softwarových simulací funkčních, legendárních modelů, místo vývoje nových kusů.

Typickými zástupci jsou Fairchild 670, Altec 436C a Manley Variable Mu.

4.3 FET kompresor

S nástupem polovodičových prvků začali výrobci nahrazovat ve svých obvodech nákladné a nespolehlivé elektronky FET tranzistory. Tím vznikl nový unikátní typ kompresoru, který reaguje rychleji, přesněji a agresivněji než Variable Mu kompresory, a navíc je cenově dostupnější a spolehlivější. Od začátku však byly stavěné tak, aby napodobily specifické zabarvení elektronkových modelů, proto se i FET kompresory vyznačují specifickým zabarvením signálu.

Nejnámějším zástupcem FET kompresoru je bezpochyby hojně používaný 1176.

4.4 VCA kompresor

Poslední, nejmodernější topologií je konstrukce, jejímž jádrem je VCA článek. VCA kompresory jsou rychlé, přesné, jednoduše nastavitelné, levné a nezabírají moc místa. Představují dnes nejrozšířenější a nejuniverzálnější řešení.

Drtivá většina dnes používaných kompresorů jsou VCA kompresory, snad s výjimkou specifických použití v nahrávacích studiích pro zabarvení signálu.

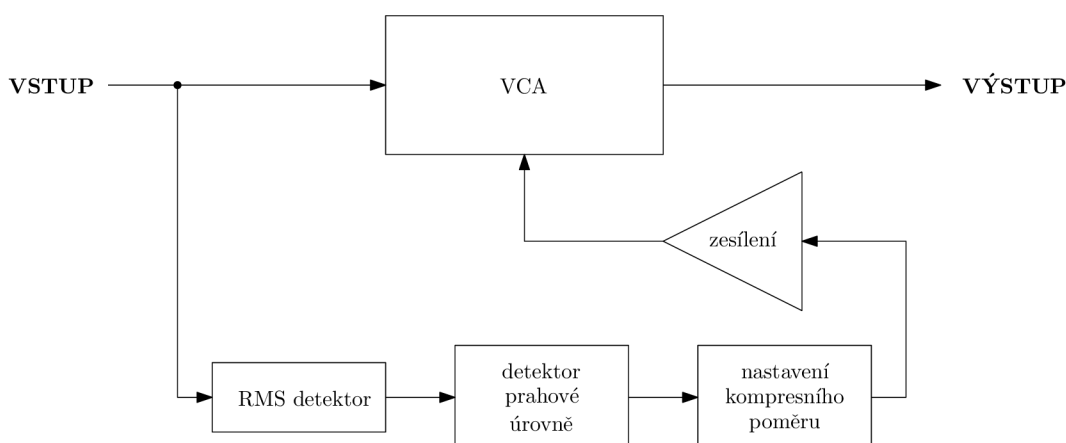
Pro můj návrh jsem si vybral VCA kompresor právě z důvodu univerzálnosti, jednoduchosti a cenové dostupnosti.

5 KONSTRUKČNÍ BLOKY VCA KOMPRESORU

V následující části práce již předpokládám, že je čtenář seznámen s pojmem kompresor dynamiky zvukových signálů a že získal základní povědomí o tom, jak zařízení funguje, jak se ovládá a k čemu slouží.

5.1 Základní stavební bloky

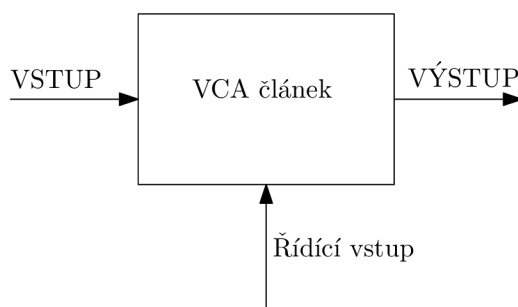
Pro začátek si zjednodušíme zapojení kompresoru tak, jak vidíte na obrázku:



Obr. 5.1: Blokové schéma VCA kompresoru

Dva hlavní stavební bloky tohoto zapojení jsou VCA článek, který se nachází v přímé signálové cestě, a RMS detektor, který se nachází v řídicí větvi VCA článku. Za RMS detektor jsou pak vřazeny další obvody, které umožňují nastavit prahovou úroveň, kompresní poměr a zesílení kompresoru.

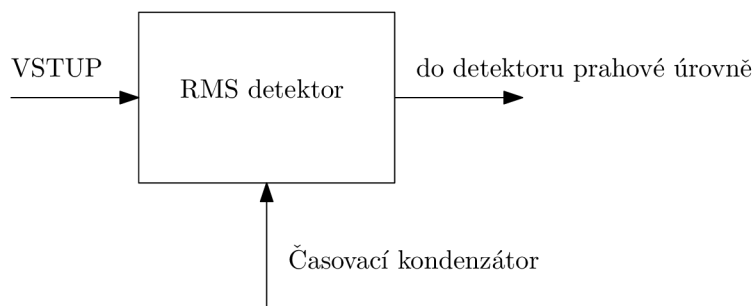
5.1.1 VCA článek



Obr. 5.2: VCA článek

Výhodou VCA kompresoru je, že přímá signálová cesta prochází pouze VCA článkem a vstupními a výstupními obvody. VCA článek je napětím řízený zesilovač, jenž se chová jako logaritmický převodník - na lineární změnu napětí na řídicím vstupu reaguje logaritmickou změnou zesílení, změna napětí o $-6,5$ mV na řídicím vstupu vyústí v zesílení $+1$ dB.

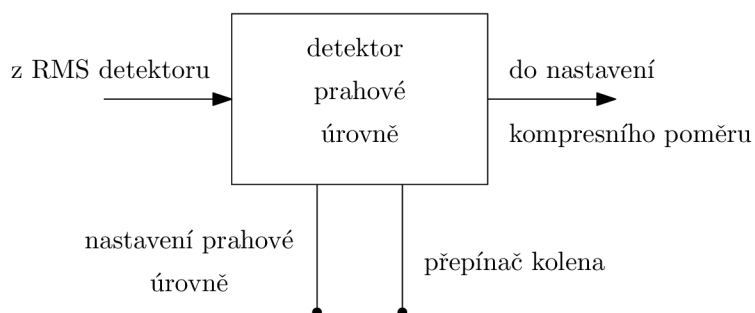
5.1.2 RMS detektor



Obr. 5.3: RMS detektor

Vstupní signál je mimo VCA článku přiveden i na vstup RMS detektoru. RMS detektor čte napětí na vstupu a v závislosti na něm tvoří napětí na výstupu o určité hladině. Tato závislost je opět logaritmická. RMS detektor pro nárůst nebo pokles hladiny vstupního signálu o 1 dB zvýší nebo sníží své výstupní napětí o 6,5 mVDC, tedy přesně opačně než VCA článek. Kdybychom připojili výstup RMS detektoru přímo na řídicí vstup VCA článku, vznikl by tvrdý limiter.

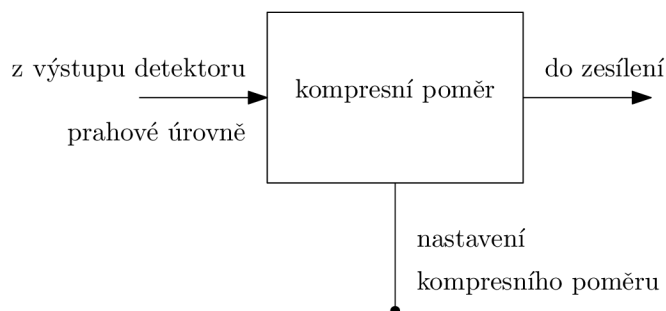
5.1.3 Prahová úroveň



Obr. 5.4: Detektor prahové úrovně

Na výstup RMS detektoru je připojen detektor prahové úrovně. Pomocí potenciometru lze posunout prahovou úroveň o ± 20 dB. Pomocí přepínače pak lze měnit koleno kompresoru z tvrdého na měkké.

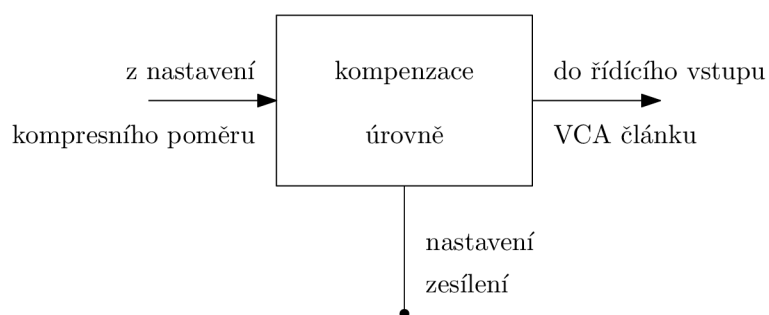
5.1.4 Kompresní poměr



Obr. 5.5: Kompresní poměr

Dalším krokem je nastavení kompresního poměru. V podstatě jde o možnost snížení napětí z detektoru prahové úrovně na jeho poměrnou část, rozsah kompresního poměru by se měl pohybovat od 1 : 1 do ∞ : 1.

5.1.5 Kompenzace úrovně

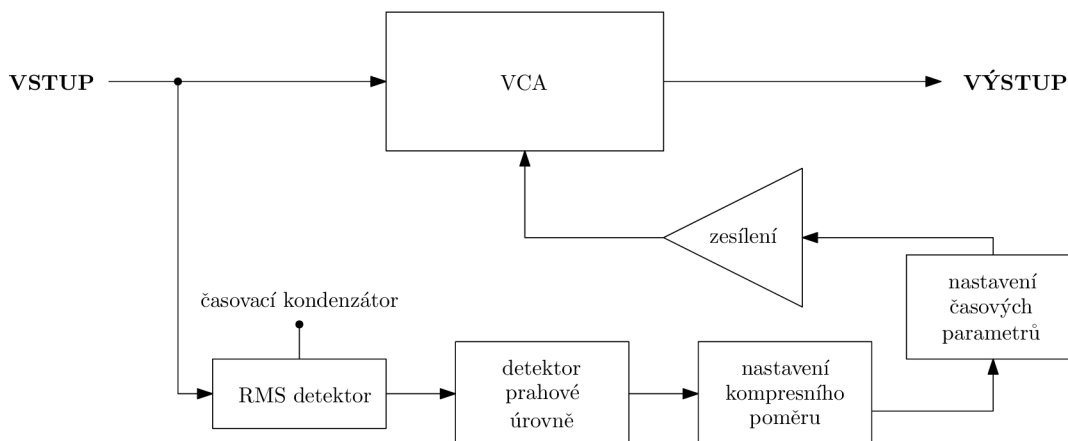


Obr. 5.6: Kompenzace úrovně

Posledním článkem před řídicím vstupem VCA článku je blok kompenzace úrovně, kde lze pomocí potenciometru vykompenzovat ztrátu úrovně způsobenou kompresí.

5.2 Časové parametry

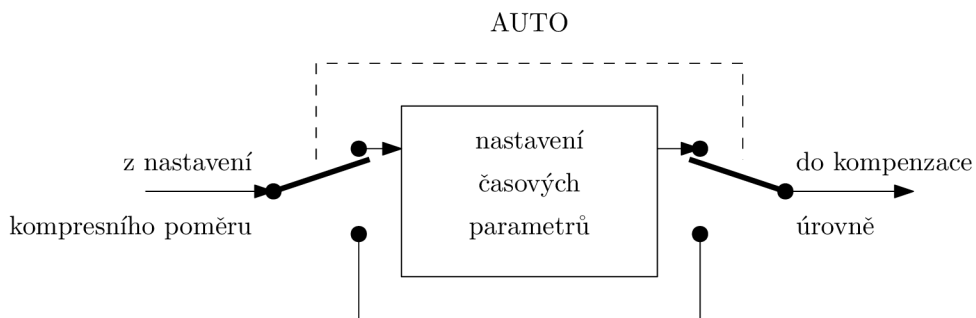
Základní časové vlastnosti kompresoru se odvíjí od časových vlastností RMS detektoru, které jsou dány jeho časovou konstantou. Tu určuje časovací kondenzátor. Pokud je jím klasický kondenzátor, lze časovou konstantu jednoznačně určit. Pokud však na místo jednoduchého kondenzátoru vložíme obvod, který se chová jako dynamický kondenzátor, viz 6.3, budou se časové parametry kompresoru měnit právě dle tohoto obvodu.



Obr. 5.7: Blokové schéma VCA kompresoru s vloženým blokem pro řízení časových parametrů

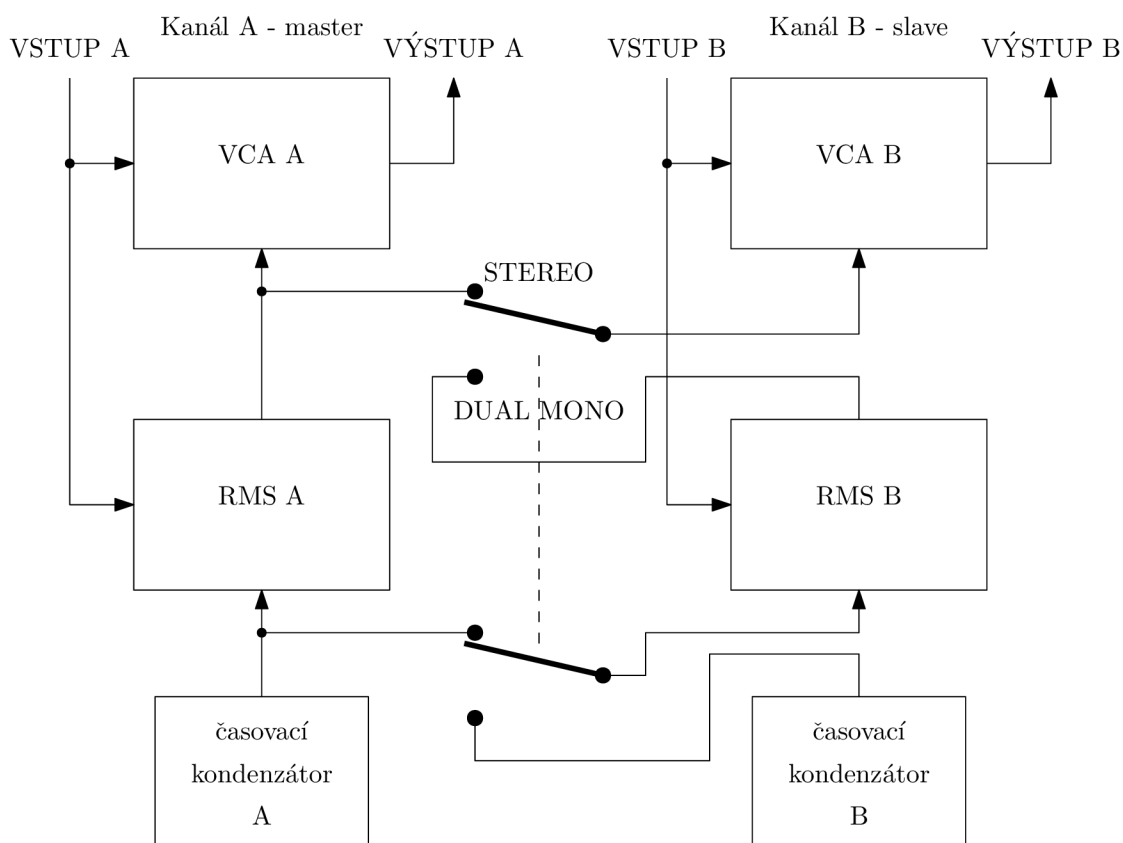
Pokud chceme, jsme schopni vložením dalšího bloku do řídicí větve VCA článku výrazně ovlivnit čas náběhu a doběhu kompresoru. Pomocí dvou potenciometrů pak lze přímo nastavit dobu náběhu - attack a doběhu - release.

Někteří výrobci přidávají do svých kompresorů tzv. režim Auto - automatické nastavení časových konstant. Cílem je, aby kompresor na pomalu se měnící signály reagoval pomalu a na rychle se měnící signály reagoval rychle. V praxi, pokud je v obvodu přítomen dynamický kondenzátor, jde však často pouze o přemostění obvodů, které umožňují dodatečně regulovat reakční časy kompresoru.



Obr. 5.8: Režim Auto

5.3 Propojení dvou kanálů do sterea



Obr. 5.9: Propojení dvou kanálů do sterea

Dva i více kanálů lze mezi sebou vzájemně propojit tak, aby fungovaly společně. Z blokového schématu je zřetelný způsob propojení dvou kanálů do sterea. V pozici přepínače DUAL MONO funguje každý kanál zcela autonomně, ale v pozici

STEREO se z nich stane stereo kompresor. Řídící větev kanálu A řídí i kanál B, důležité je však propojit i časovací kondenzátory obou RMS detektorů, protože jen tak je zaručené, že stereo kompresor bude reagovat stejnou vahou na podněty v obou kanálech.

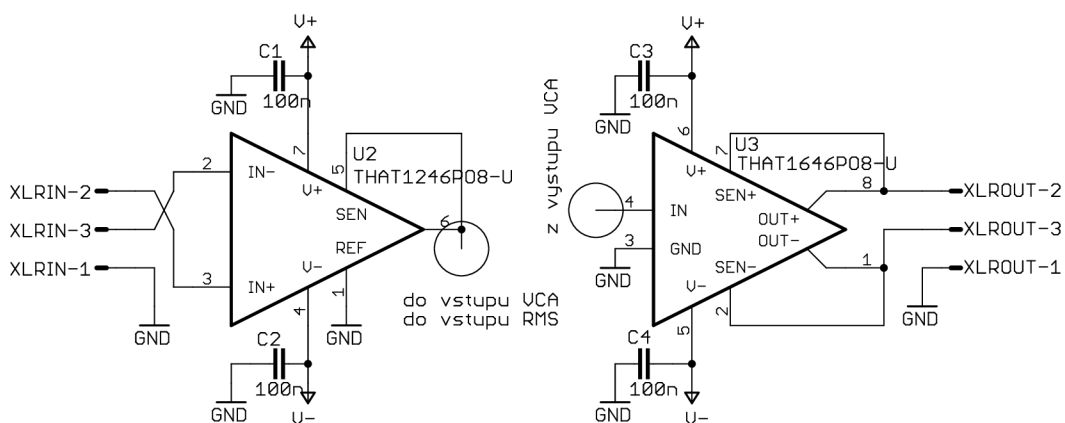
6 NÁVRH VCA KOMPRESORU

Kompletní schéma mého návrhu VCA kompresoru je dostupné v příloze: 10, pojdme je postupně projít v blocích, které jsem nastínil dříve.

Zapojení vychází z návrhu dle výrobce, společnosti THAT¹. Tento návrh využívá THAT 4301 Analog Engine®, skládající se z VCA článku, RMS detektoru a několika operačních zesilovačů v jednom čipu. VCA článek i RMS detektor jsou už z výroby kalibrovány tak, aby byly jejich převodní konstanty vzájemně komplementární.

6.1 Vstupní a výstupní obvody

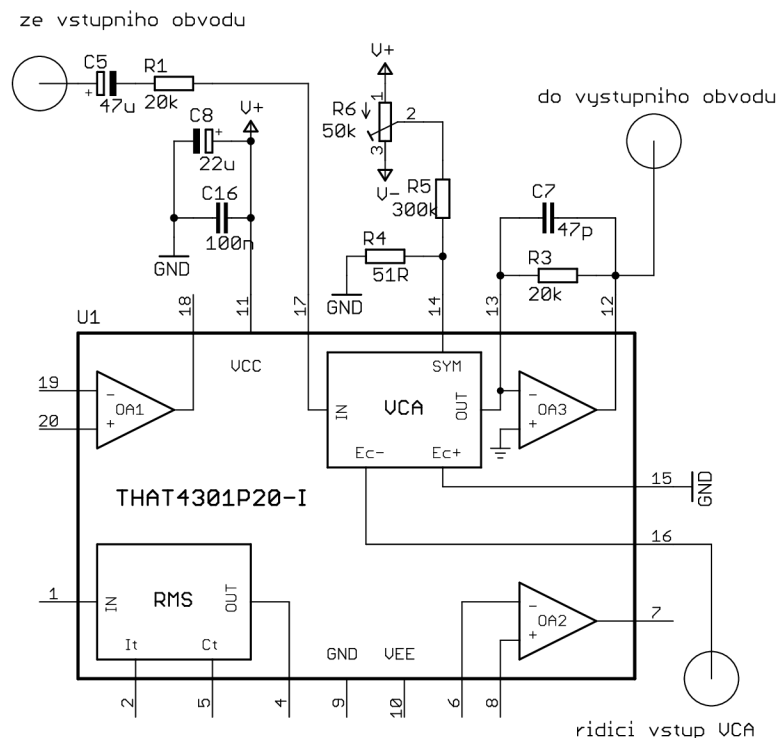
Z požadavků na výsledný produkt vyplynulo, že je třeba, aby vstupy i výstupy byly provedeny symetricky, proto jsem na vstup zařadil obvod THAT 1246, který funguje jako symetrický přijímač, a na výstup obvod THAT 1646, který funguje jako symetrický vysílač. Zapojení těchto obvodů je převzaté z dokumentace obvodů, doplněné o lokální blokovací kondenzátory.



Obr. 6.1: Vstupní a výstupní obvody

¹A Fully Adjustable Compressor/Limiter, THAT Corporation Design Note 115

6.2 VCA článek



Obr. 6.2: VCA článek

Přímý audio signál prochází mimo vstupních a výstupních obvodů pouze VCA článkem a operačním zesilovačem OA₃. Tato signálové cesta je velmi krátká a vhodným umístěním do blízkosti vstupních a výstupních konektorů lze zamezit zbytečnému vystavení signálové cesty rušivým vlivům.

Audio signál je na vstup VCA článku přiveden přes kondenzátor C₅ a rezistor R₁, jehož velikost přímo určuje proud, který poteče do vstupu VCA. Ten se chová jako virtuální zem. Optimální velikost R₁ je dle THAT² 20 kΩ pro vstupní napětí do 10 V_{MAX}(+20 dBV). C₅ společně s R₁ tvoří horní propust a její mezní frekvenci lze spočítat dle vzorce $f_c = \frac{1}{2\pi R_5 C_4}$. V našem případě vychází přibližně na 0,17 Hz.

Velikost výstupního proudu VCA článku je určena napětím na řídicím vstupu VCA článku. Operační zesilovač OA₃ je zapojen jako převodník I/U a pokud je splněna podmínka, že R₃ = R₁ a na řídicí vstup VCA článku je přivedeno napětí 0 V (\Rightarrow 0 dB zesílení na VCA), výstupní napětí celého kompresoru se rovná napětí vstupnímu ($V_{IN} = V_{OUT}$).

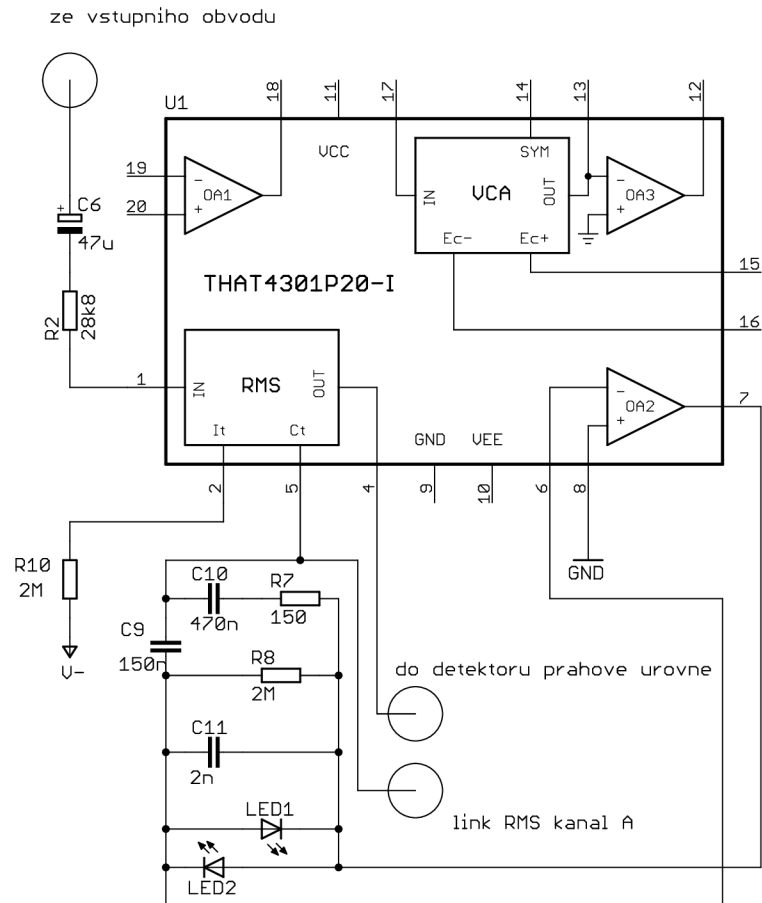
Závislost zesílení VCA článku na napětí na řídicím vstupu je nepřímá a logaritmická, nárůst napětí na řídicím vstupu o 6,5 mV způsobí pokles zesílení VCA o

²THAT Corporation Design Note 00A, strana 1

1 dB a analogicky pokles napětí na řídicím vstupu o 6,5 mV způsobí nárůst zesílení VCA o 1 dB.

Pomocí trimru R_6 lze vyrovnat napěťovou nesymetrii vnitřního usměrňovače, a tím minimalizovat zkreslení VCA článku.

6.3 RMS detektor



Obr. 6.3: RMS detektor

Vstupní signál je zároveň přiveden skrz C_6 a R_2 na vstup RMS detektoru, který se také chová jako virtuální zem. RMS detektor je nastaven tak, že pro -10 dBu na vstupu vytvoří na svém výstupu napětí 0 VDC a pro nárůst nebo pokles hladiny vstupního signálu o 1 dB zvýší nebo sníží své výstupní napětí o 6,5 mVDC.

Časové vlastnosti kompresoru jsou vždy odvozené od časové konstanty RMS detektoru. Ta je určena kapacitou připojenou na pin C_t , řekněme jí C_T , a proudem nastaveným na pinu I_t , nazvěme jej I_T . Pin I_t se chová jako virtuální zem, proto

pokud vřadíme mezi tento pin a -15 V rezistor R_{10} o velikosti $2\text{ M}\Omega$, lze spočítat $I_T = \frac{U_{R10}}{R_{10}} = 7,5\mu\text{A}$.

Na pin Ct je připojen obvod proměnlivého kapacitoru. Pokud zjednodušíme jeho chování na dva různé stavy, můžeme říct, že pro rychle se měnící tranzientní vstupní signál se otevřou LED diody a C_9 s C_{10} se chovají jako paralelně zapojené. Pokud ovšem na vstup přivedeme pomalu se měnící signál, C_{10} je navíc násoben záporným zesílením zpětnovazební smyčky³:

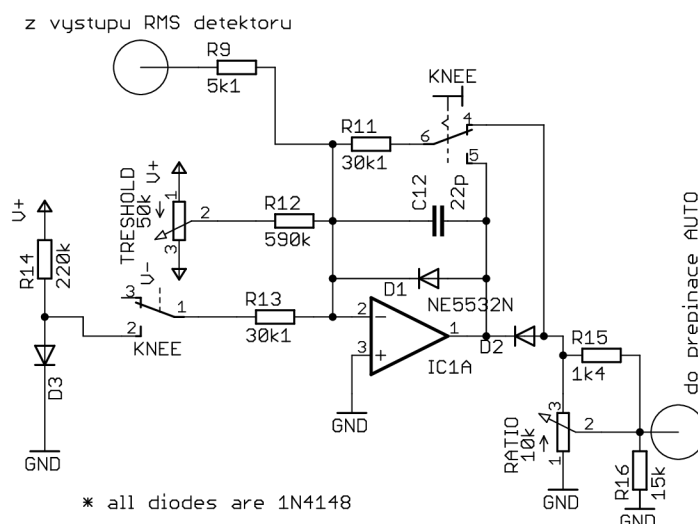
$$\text{Pomalou se měnící signály: } C_T = C_9 + C_{10} \cdot \left(1 + \frac{C_9}{C_{11}}\right)$$

$$\text{Rychle se měnící signály: } C_T = C_9 + C_{10}$$

Proud I_T se zrcadlí na interní programovatelný proudový zdroj na pinu Ct se zesílením 1,1 a pro časovou konstantu obvodu platí vztah⁴:

$$\tau = 0,026C_T/I_T$$

6.4 Prahová úroveň



Obr. 6.4: Detektor prahové úrovně, přepínač kolene, kompresní poměr

Na výstup RMS detektoru je připojen operační OZ IC1A zapojený jako invertující jednocestný operační usměrňovač. Pokud nebereme v potaz vliv R_{12} a potenciometru TRESHOLD, přivedeme-li na vstup IC1A napětí (nazvěme ho V_{RMS}) menší než 0 V , na výstupu IC1A bude kladné napětí, které neprojde skrz diodu D_2 . Napětí za D_2 (nazvěme ho V_{TH}) se proto rovná nule, pokud je napětí V_{RMS} menší než 0 V . Pokud je ale V_{RMS} kladné, D_2 se otevře a V_{TH} bude rovno $-V_{RMS}$.

³THAT Corporation Design Note 114, strana 1

⁴THAT 4301 Analog Engine® datasheet, RMS-Level Detector, strana 9

V_{RMS}	V_{TH}
$< 0 \text{ V}$	0 V
$\geq 0 \text{ V}$	$-V_{\text{RMS}}$

Přechod mezi těmito dvěma stavy bude ostrý, protože operační usměrňovač linearizuje exponenciální VA charakteristiku diody D_2 .

Nyní se dostáváme zpět k R_{12} a potenciometru TRESHOLD. Pokud by tento prvek nebyl přítomen, prahová úroveň je pevně daná nastavením RMS detektoru, v našem případě -10 dBu na vstupu RMS detektoru.

Potenciometrem TRESHOLD se dá posunout prahová úroveň kompresoru, poskytuje totiž další zdroj napětí na vstup operačního usměrňovače. Napětí nastavené potenciometrem a napětí V_{RMS} se na operačním zesilovači sečtou a dohromady určí V_{TH} . Na jezdcí tohoto potenciometru lze nastavit napětí $\pm 15 \text{ V}$, rezistor R_{12} však tento rozsah snižuje. Na vstupu operačního zesilovače je tedy možné měnit napětí o cca $\pm 2,56 \text{ V}$, což vyústí v nastavitelný rozsah prahové úrovně -40 dBu do 10 dBu .

6.5 Kompresní poměr

Dalším krokem je nastavení kompresního poměru. V podstatě jde jen o snížení V_{TH} na jeho poměrnou část. V obvodu je tento krok řešen napěťovým děličem v podobě potenciometru RATIO. Je-li tento potenciometr nastaven na maximální kompresní poměr a potenciometr GAIN je nastaven na 0 dB , lze říci, že pokud úroveň napětí na vstupu kompresoru vzroste o 1 dB , V_{RMS} vzroste o $6,5 \text{ mV}$, V_{TH} klesne o $6,5 \text{ mV}$ a napětí na řídicím vstupu VCA (nazvěme ho V_G) vzroste o $6,5 \text{ mV}$. Na řídicí vstup VCA je tedy přiveden signál o $6,5 \text{ mV}$ vyšší, což vyústí v zesílení -1 dB . Při maximální kompresi - limitaci se tedy výstupní signál utlumí přesně o tolik, o kolik se vstupní signál zesílil. Tomuto stavu odpovídá kompresní poměr $\infty : 1$.

V případě, že nastavíme potenciometr RATIO přesně do středu tak, že $V_G = -0,5 V_{\text{TH}}$, zeslabí se výstup VCA článku jen o $0,5 \text{ dB}$, to by odpovídalo kompresnímu poměru $2 : 1$. Pro použití kompresoru v praxi je však výhodnější rezistorem R_{15} upravit průběh dráhy potenciometru RATIO tak, aby se v polovině rozsahu nacházela hodnota $4 : 1$.

6.6 Změna přechodové charakteristiky - kolene

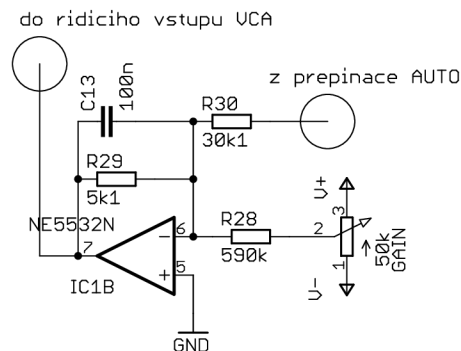
Jedna z nejčastějších variací kompresoru je možnost přepnutí mezi ostrým a plynulým přechodem přes prahovou úroveň. V předchozím zapojení jsme pro detekci

prahové úrovně využívali jednocestný operační usměrňovač, který linearizuje exponenciální VA charakteristiku usměrňovací diody. Pokud tento operační usměrňovač nahradíme jednoduchou diodou, projeví se její nelineární VA charakteristika na průběhu přechodu přes prahovou úroveň.

Efektivní rezistivita diody D_2 se mění podle napětí na výstupu IC1A. Rozsah napětí, pro které má D_2 vhodnou rezistivitu, se pohybuje cca od 300 mV do 600 mV⁵, rozpětí 300 mV by ovšem znamenalo rozsah vstupního napětí $V_{IN} \approx 46\text{dB}$, což je příliš vysoká hodnota. Proto je diodě D_2 předřazen operační zesilovač OA_1 , který zvýší napětí na vstupu D_2 , a tím posune pracovní bod, čímž docílí ostřejšího přechodu přes prahovou úroveň. Zesílení na IC1A je kompenzováno zeslabením na IC1B, aby platilo, že $V_G \approx V_{RMS}$ při kompresním poměru $\infty : 1$ (pro signály vysoko nad prahovou úrovní $\rightarrow D_2$ je plně otevřená).

R_{14} , R_{13} a D_3 zajišťují teplotní kompenzaci diody D_2 . Napětí na D_2 ujíždí vlivem teplotního rozdílu přibližně o $2 \text{ mV}/^\circ\text{C}$ ⁶, napětí na D_3 se bude měnit se stejnou strmostí. Pokud jsou D_2 i D_3 identické a umístěné ve své těsné blízkosti, budou obě přibližně stejně teplotně závislé.

6.7 Kompenzace úrovně



Obr. 6.5: Kompenzace úrovně

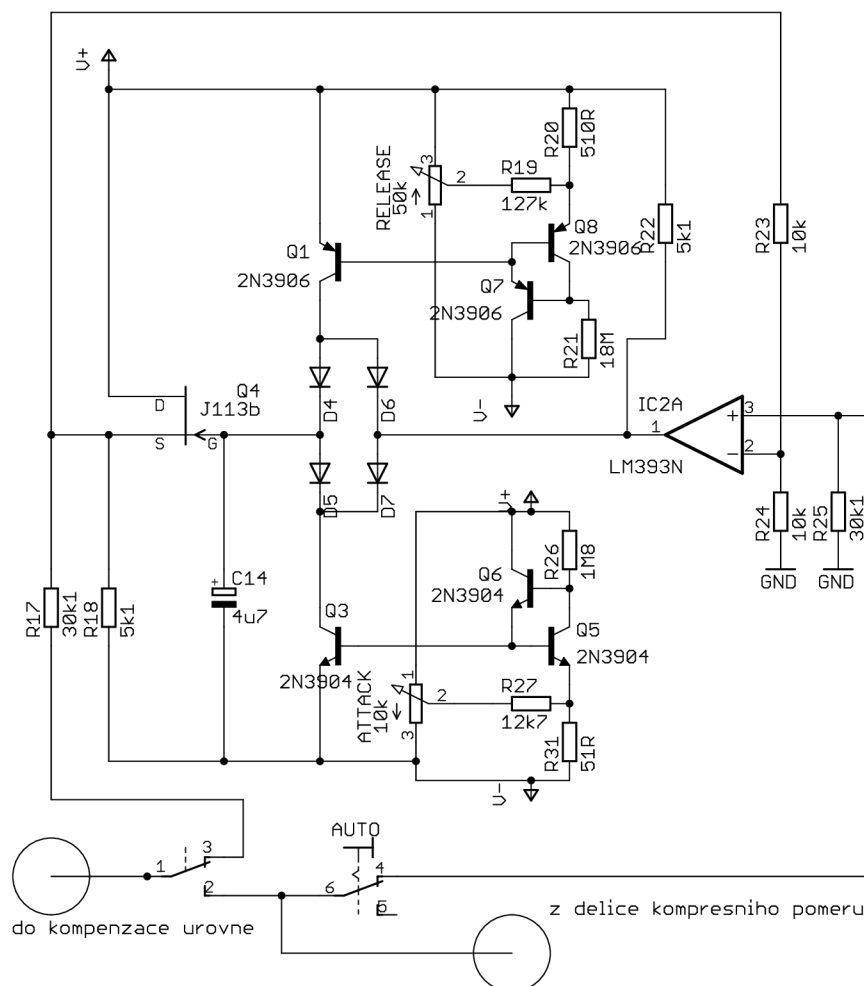
Potenciometrem GAIN lze nastavit dodatečné zesílení signálu. Společně s R_{28} funguje obdobně jako už dříve popsany potenciometr TRESHOLD při nastavování prahové úrovně. Dohromady fungují jako další zdroj napětí na vstupu invertujícího sčítacího operačního zesilovače IC1B, kde se sečtou se signálem z děliče kompresního poměru RATIO. Výsledkem je pak V_G přímo na řídicím vstupu VCA článku. Rozsah

⁵THAT Corporation Design Note 00A, strana 5

⁶THAT Corporation Design Note 00A, strana 6

napětí nastavitelný pomocí tohoto potenciometru je ± 20 dB při napájecím napětí ± 15 V.

6.8 Úprava časových parametrů



Obr. 6.6: Úprava časových parametrů

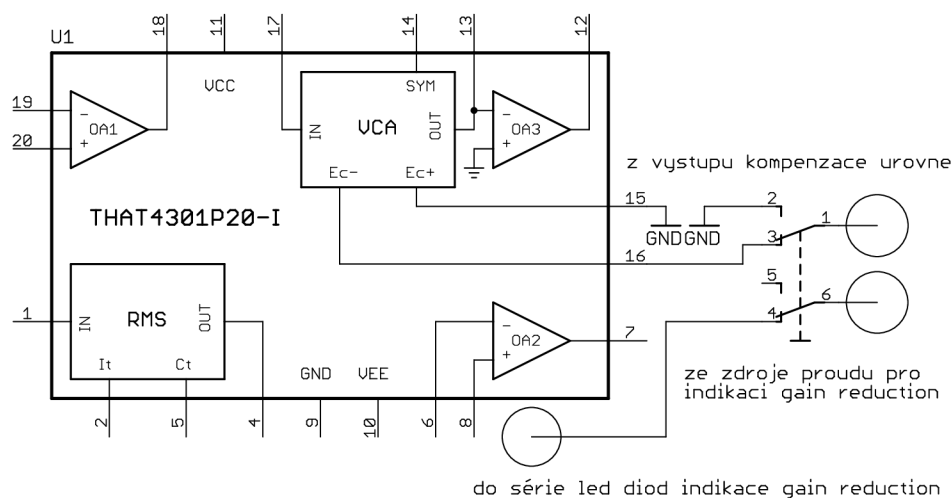
Jádrem tohoto zapojení je kondenzátor C_{14} , který je nabíjen a vybíjen pomocí dvou nastavitelných proudových zrcadel. Dále se zde nachází tranzistor FET Q_4 , který odvádí napětí z kondenzátoru C_{14} , a zpětnovazební smyčka, která zlepšuje vlastnosti a přesnost obvodu pro DC napětí.

Proudové zrcadlo složené z NPN tranzistorů Q_5 a Q_3 slouží k nastavení doby náběhu kompresoru tak, že omezuje proud, který vybíjí kondenzátor C_{14} . Tranzistor Q_6 řídí velikost proudu přivedeného na báze Q_5 a Q_3 . Pomocí lineárního potenciometru ATTACK se pak provádí samotné nastavení vybíjecího proudu a zapojení R_{26} ,

R_{31} , R_{27} , Q_5 , Q_3 a Q_6 je navrženo tak, že nastavení doby náběhu má logaritmický průběh⁷.

Druhé proudové zrcadlo pro nastavení nabíjení kondenzátoru C_{14} slouží k nastavení doby doběhu kompresoru a je komplementárním obrazem proudového zrcadla pro nastavení doby náběhu popsáno v předchozím odstavci.

6.9 Bypass



Obr. 6.7: Bypass

Každý kanál je možné přemostit pomocí přepínače BYPASS, který na řídicí vstup VCA kompresoru zapojí místo řídicího napětí zem. Důsledkem je, že VCA článek má zesílení 1.

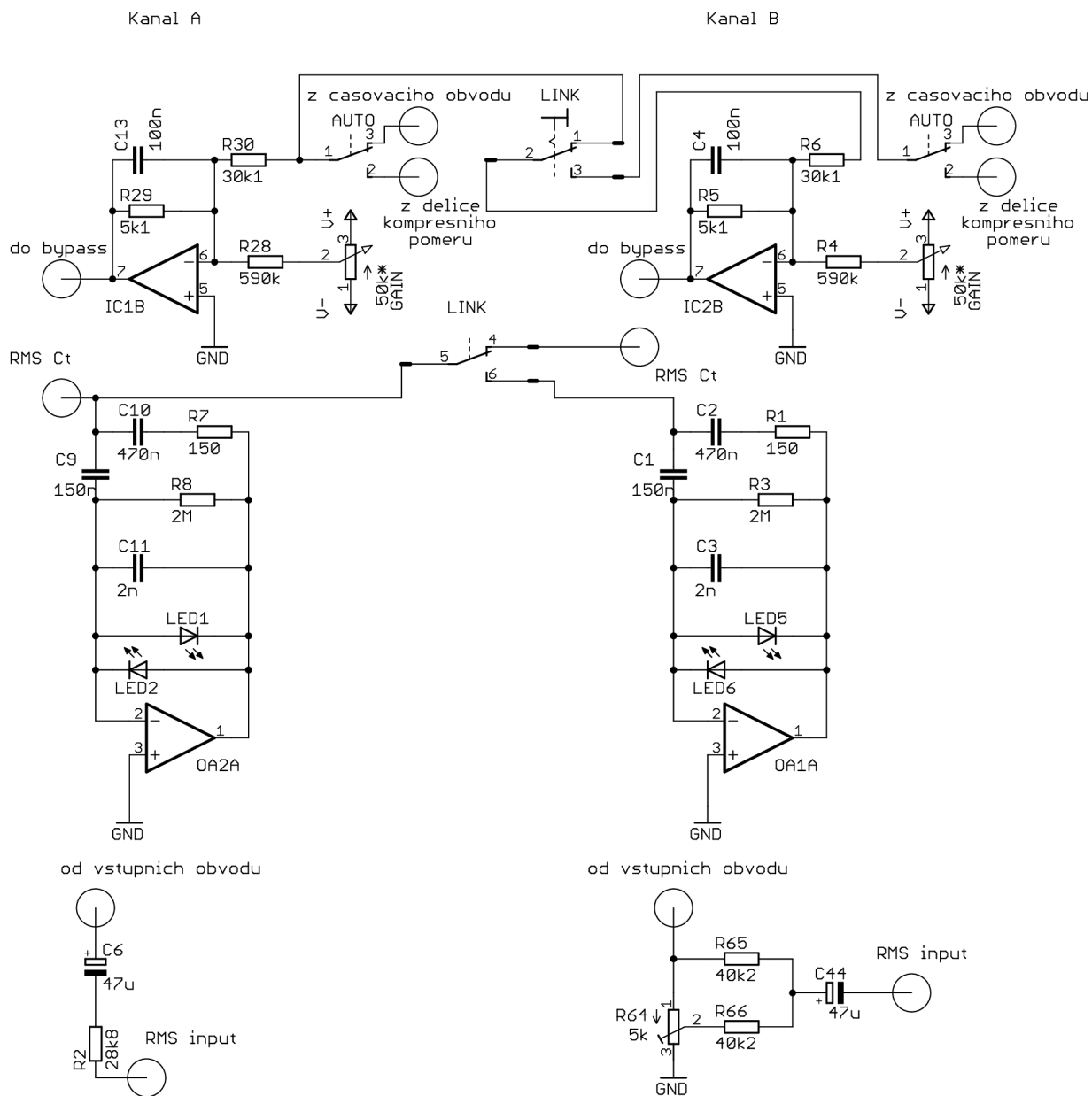
6.10 Propojení kanálů do sterea

První kanál je určený jako řídicí a při přepínači v poloze STEREO se ovládá celý stereo kompresor pomocí ovládacích prvků levého kanálu. Z praktických důvodů je řídicí větev společná pouze po kompenzaci úrovně. Kompenzace je již oddělená a pro každý z kanálů je třeba ji nastavit odděleně.

Zároveň se v poloze STEREO připojí časovací kondenzátor levého kanálu i na RMS detektor kanálu pravého. Tím lze dosáhnout toho, že řídicí kanál reaguje na změny obou kanálů najednou.

⁷THAT Corporation Design Note 115, strana 2

Vzhledem k tomu, že jsou ve stereo konfiguraci použity dva oddělené RMS detektory, je pravděpodobné, že se jejich interně nastavená prahová hodnota, kdy mají na výstupu 0 V, může nepatrně lišit. Proto je v pravém kanálu RMS detektoru předřazen dělič složený z R_{64} , R_{65} a R_{66} , který umožní tento rozdíl kompenzovat.



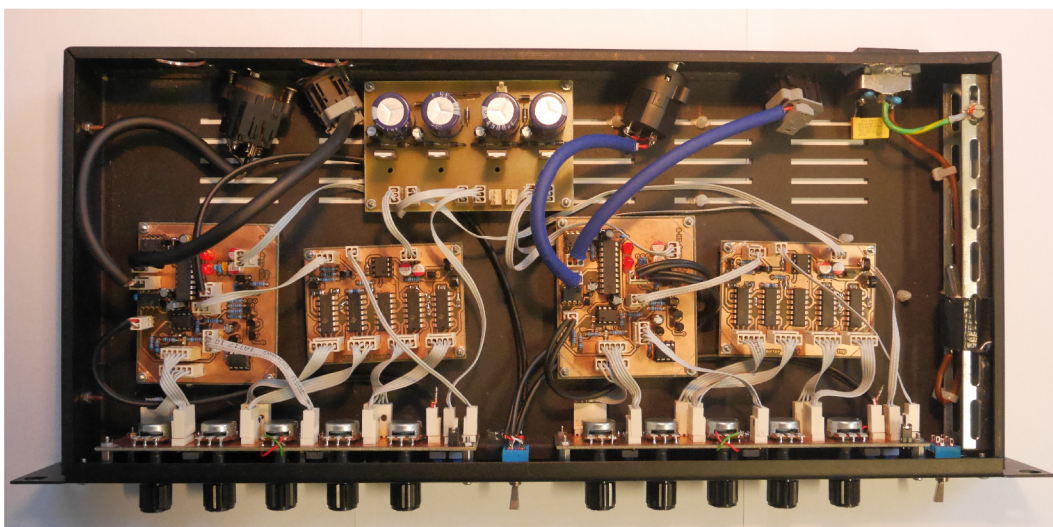
Obr. 6.8: Propojení kanálů do sterea

7 KONSTRUKCE

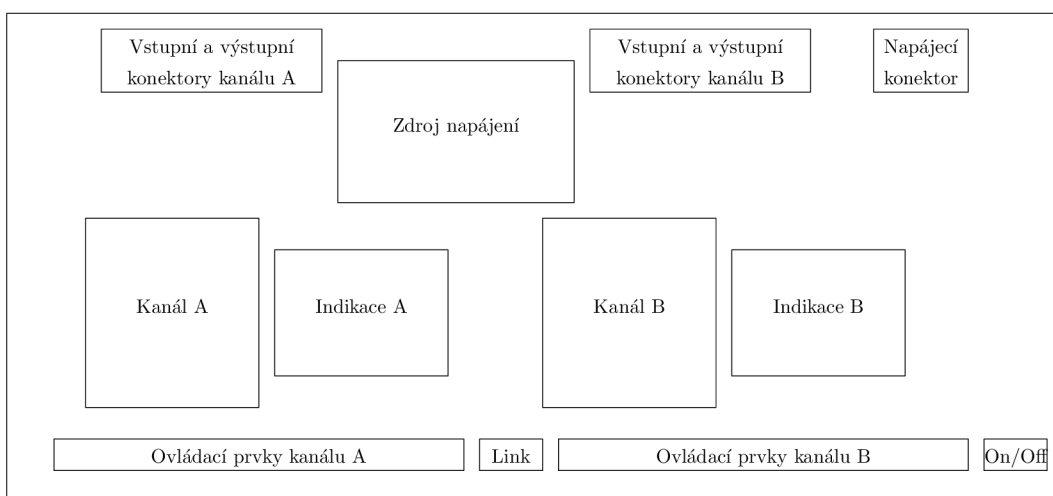
Dvoukanálový kompresor byl konstruován do 19" rackové skříňe o výšce 1 U. Dokumentace desek plošných spojů je součástí této práce v sekci příloh 10.

Konstrukce se skládá z těchto desek:

- vstupní a výstupní XLR konektory, napájecí konektor
- deska kanálu A, deska kanálu B
- desky indikací
- desky ovládacích prvků na předním panelu
- přepínač On/Off a Link



Obr. 7.1: Konstrukce přístroje



Obr. 7.2: Blokové uspořádání desek v přístroji

8 OVĚŘENÍ VLASTNOSTÍ KOMPRESORU

V následující části práce jsou uvedeny výsledky experimentálního měření výsledného kompresoru. U nastavitelných parametrů jsou měřeny vždy tři polohy - maximální, minimální a v polovině dráhy.

8.1 Parametry převodní charakteristiky

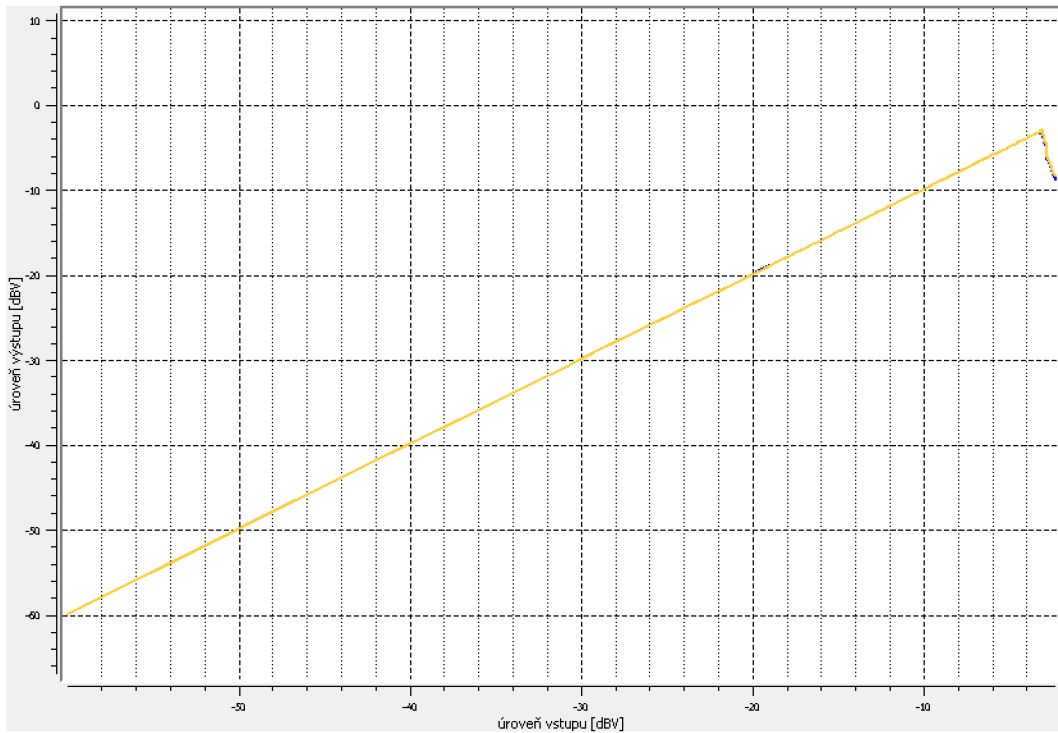
Charakteristiky prahové úrovně, kompresního poměru i kolene jsou odečteny z efektivní hodnoty napětového přenosu vstup-výstup. Charakteristika kompenzace zesílení je odečtena z hodnoty zesílení napětového přenosu vstup-výstup. Měření probíhalo na frekvenci 1000 Hz, hodnotách vstupního napětí od 0,001 do 0,775 V s krokem 0,01 V.

8.1.1 Prahová úroveň

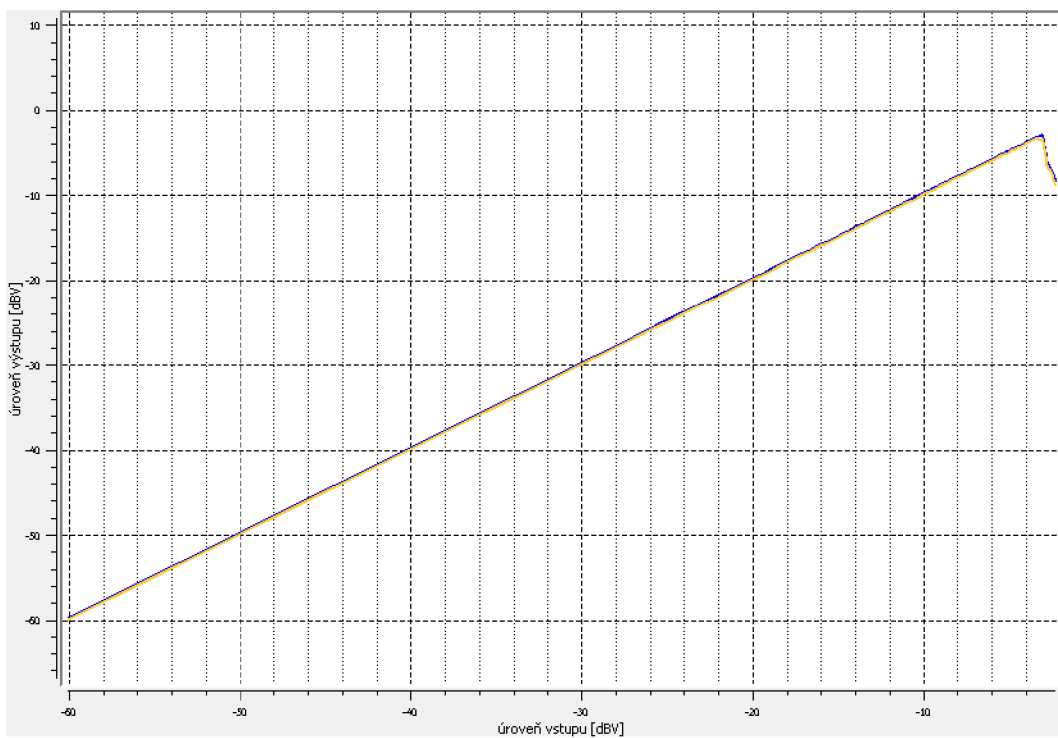
kanál	minimum	střed	maximum
A	-36,7 dBV	-15,06 dBV	-3,4 dBV
B	-35,68 dBV	-16,03 dBV	-3,43 dBV

Tab. 8.1: Prahová úroveň

Kvůli omezení měřicího přístroje jsem nemohl změřit maximální hodnotu parametru TRESHOLD (přebuzení výstupu), první naměřitelná maximální hodnota je cca v 65 % dráhy potenciometru. Teoretická maximální hodnota by měla být okolo +10 dB.

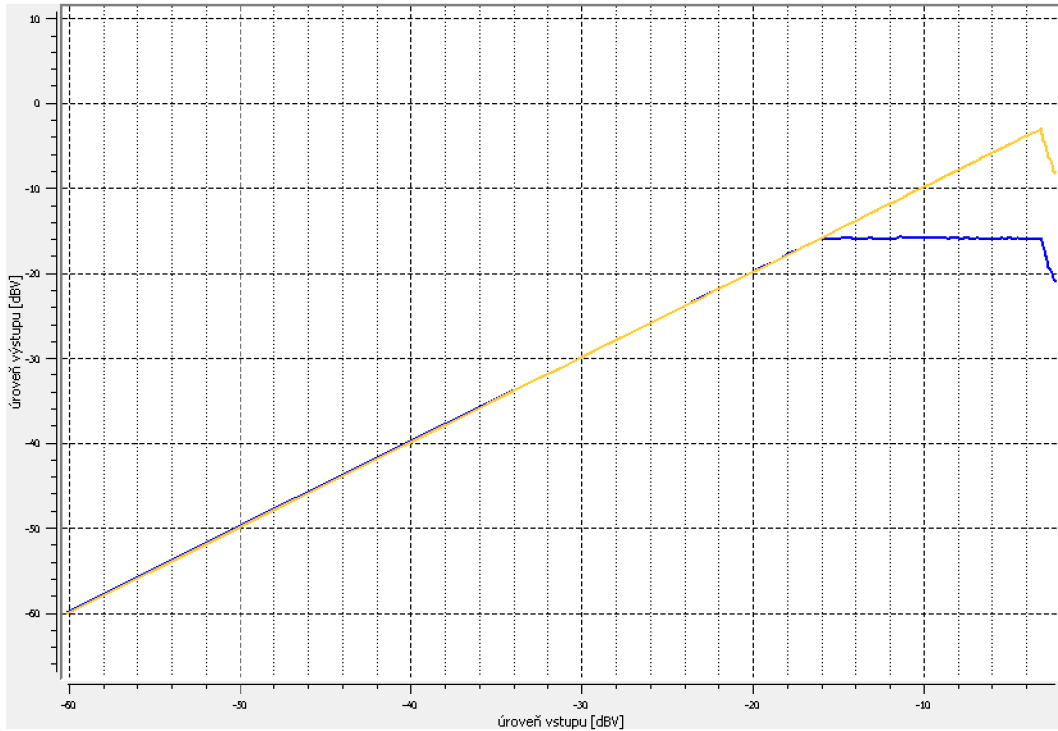


(a) Kanál A

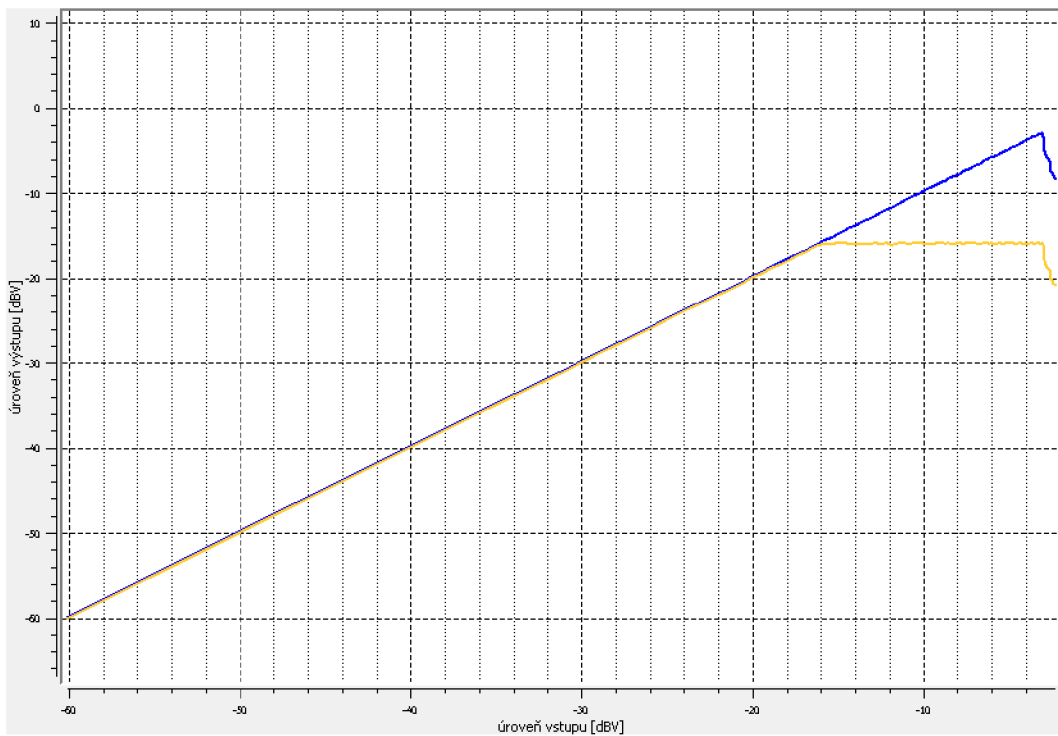


(b) Kanál B

Obr. 8.1: Prahová úroveň - maximum

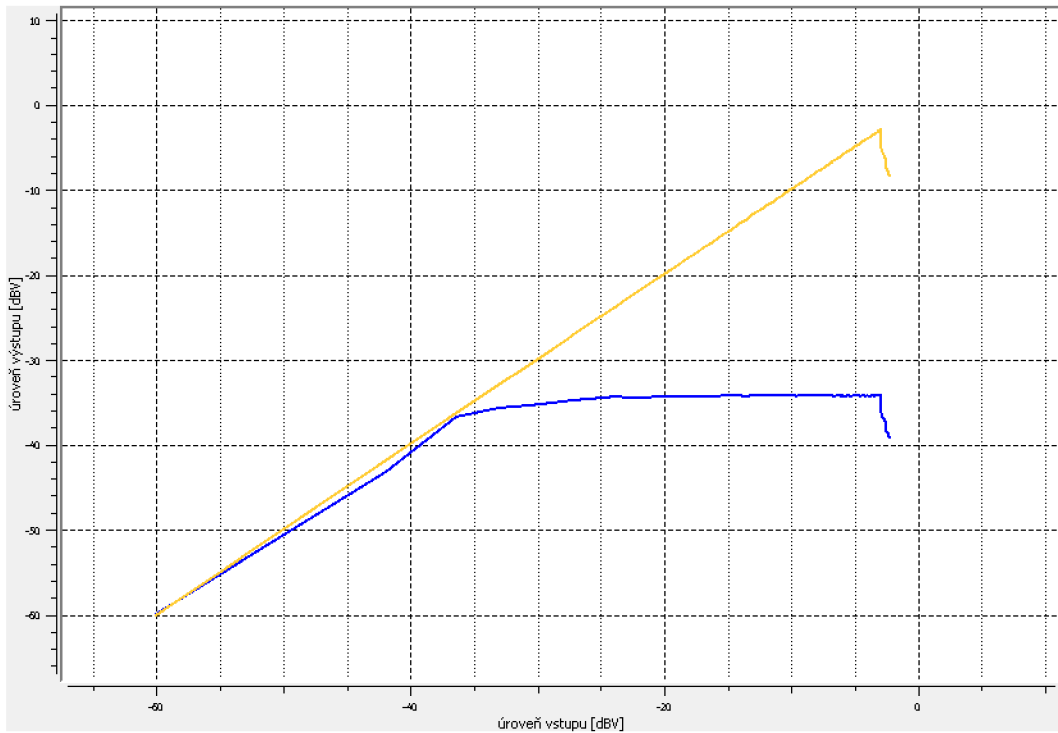


(a) Kanál A

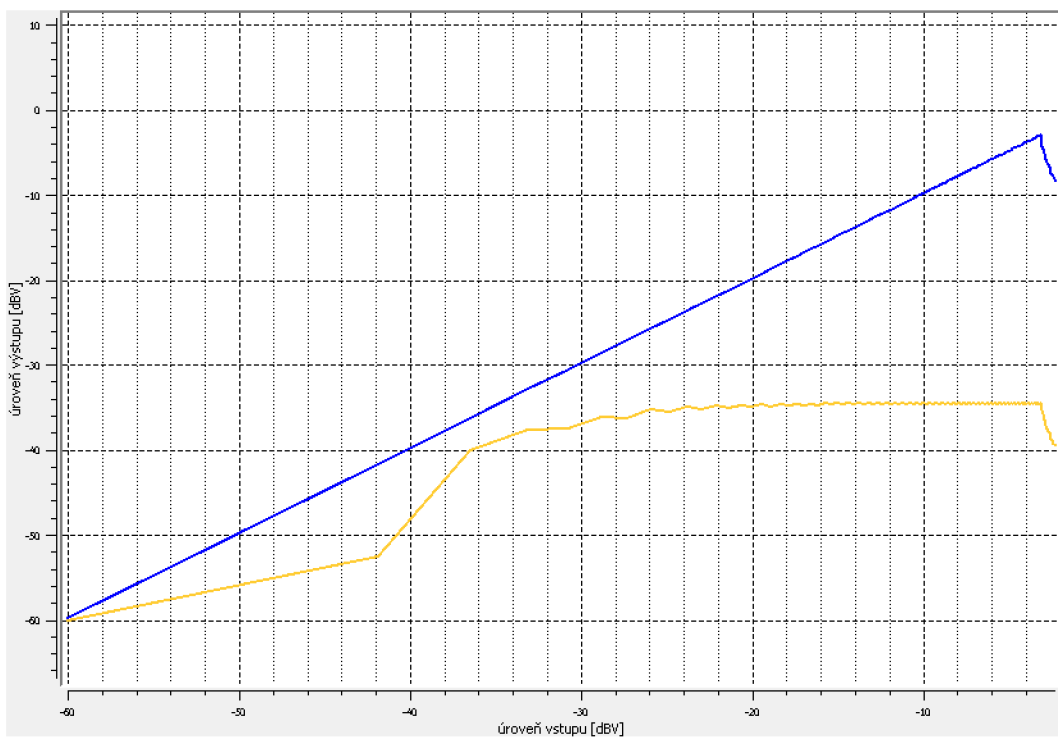


(b) Kanál B

Obr. 8.2: Prahová úroveň - střed



(a) Kanál A



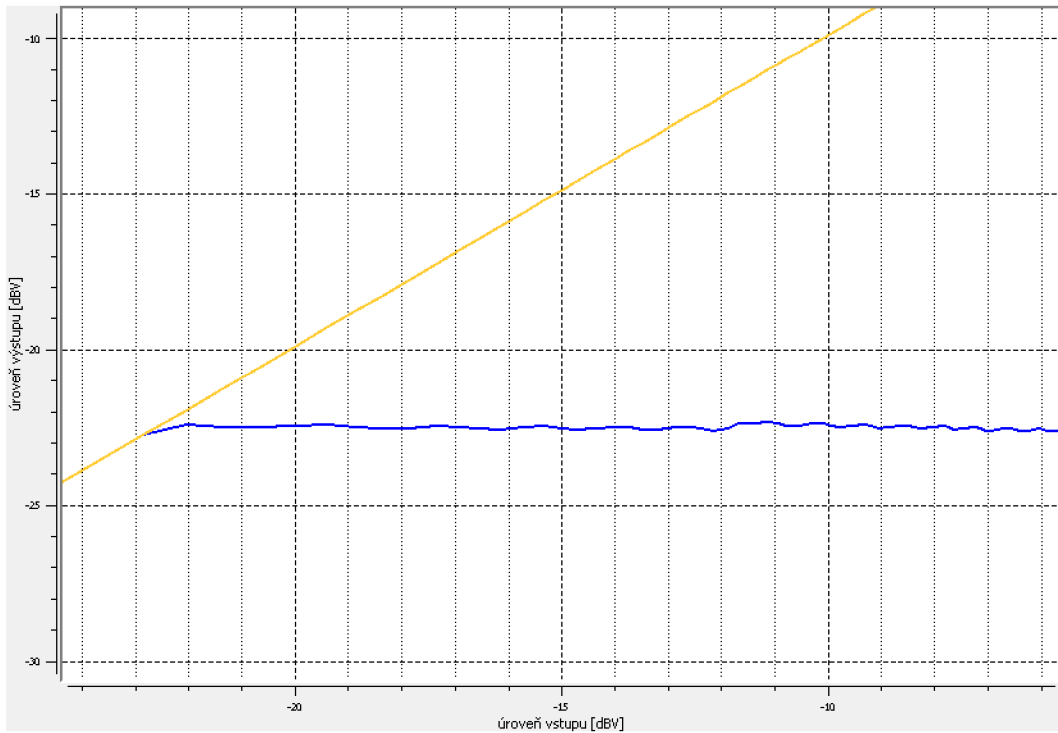
(b) Kanál B

Obr. 8.3: Prahová úroveň - minimum

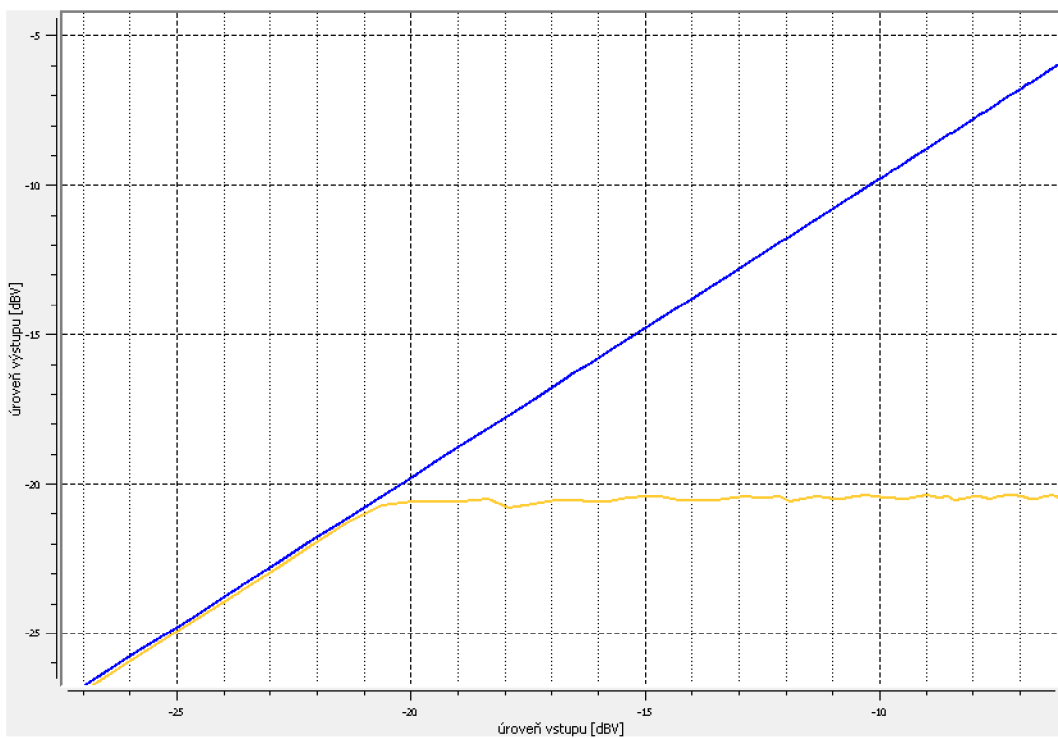
8.1.2 Kompresní poměr

kanál	minimum	střed	maximum
A	1 : 1	3,33 : 1	∞ : 1
B	1 : 1	3,37 : 1	∞ : 1

Tab. 8.2: Kompresní poměr

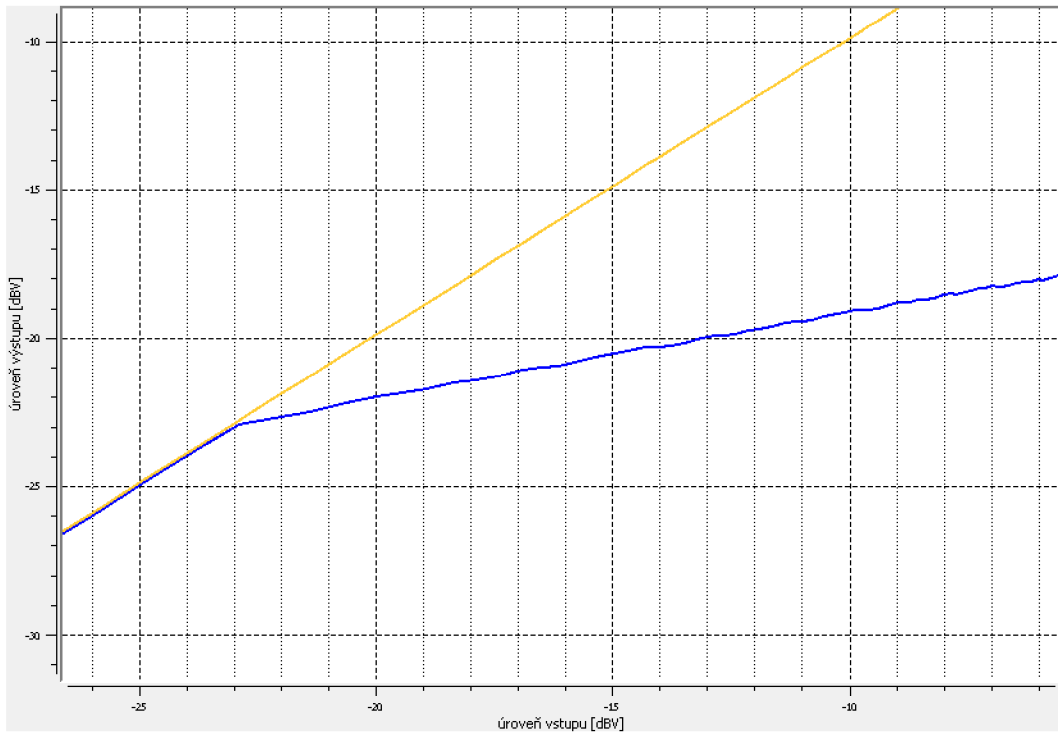


(a) Kanál A

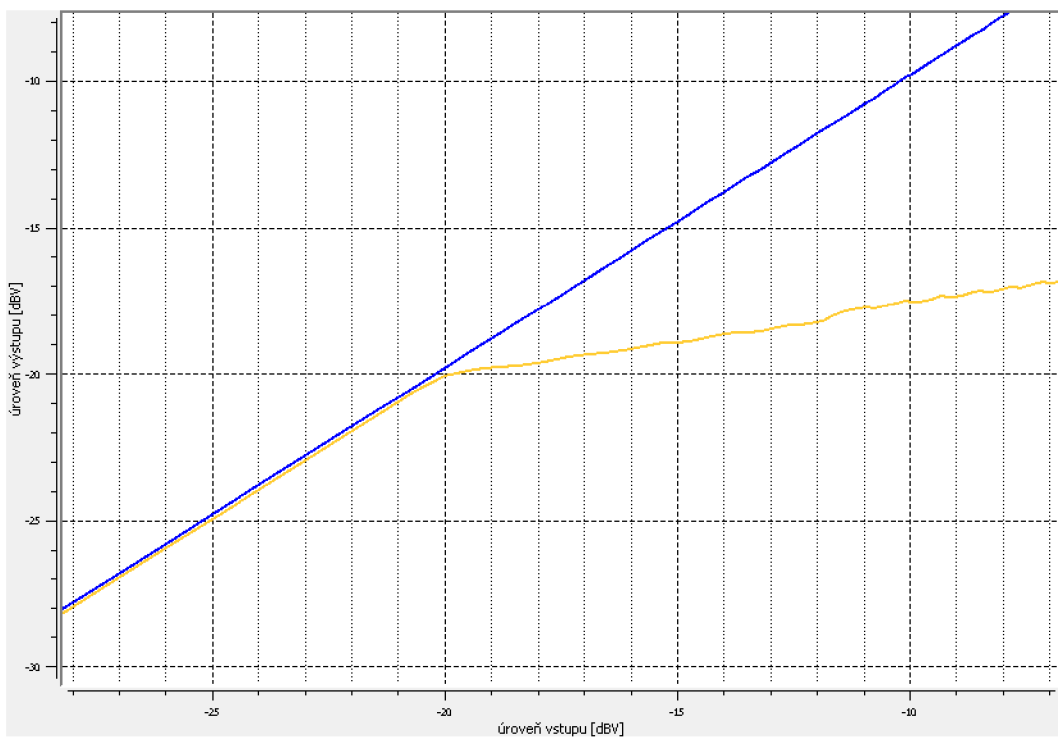


(b) Kanál B

Obr. 8.4: Kompresní poměr - maximum

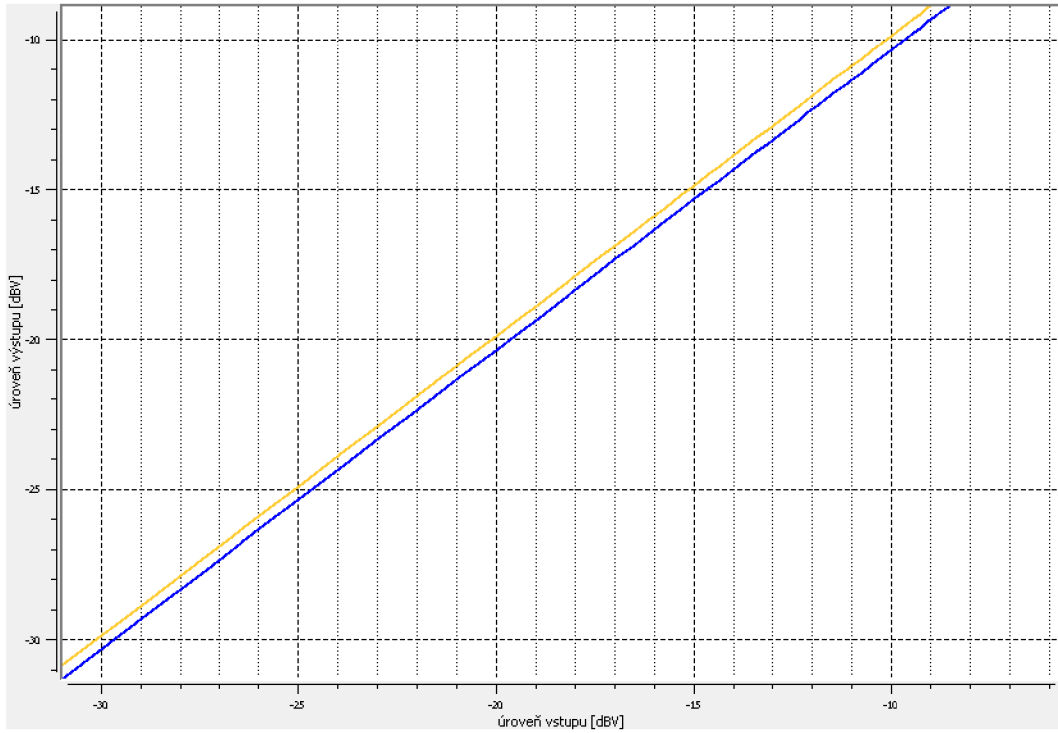


(a) Kanál A

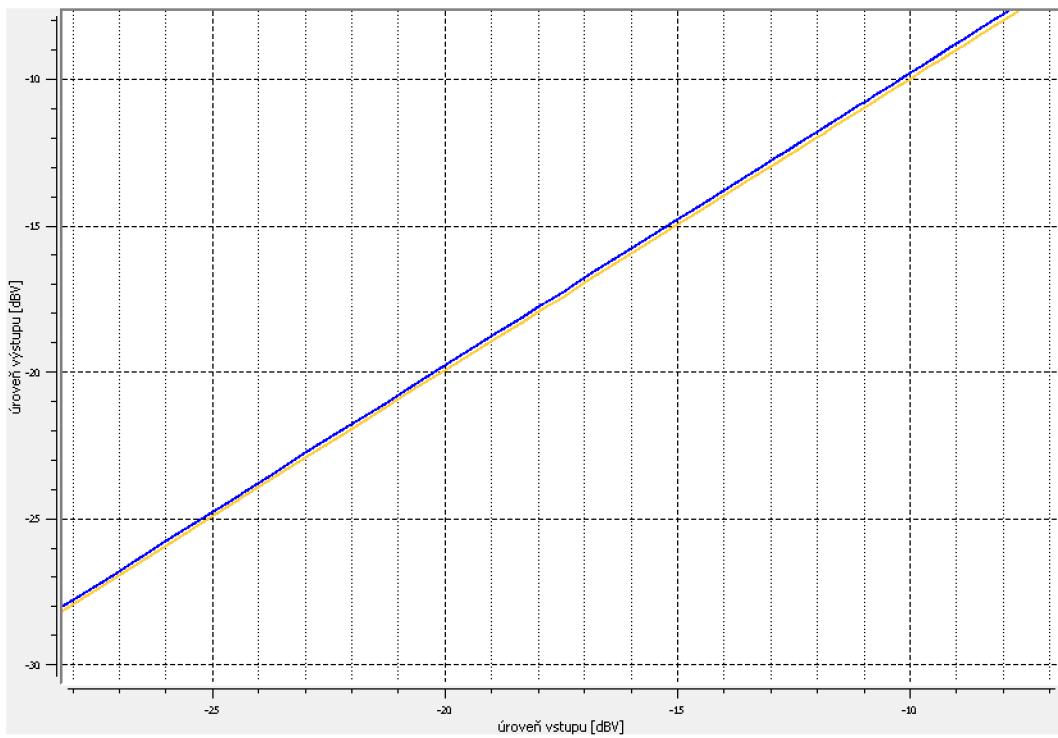


(b) Kanál B

Obr. 8.5: Kompresní poměr - střed



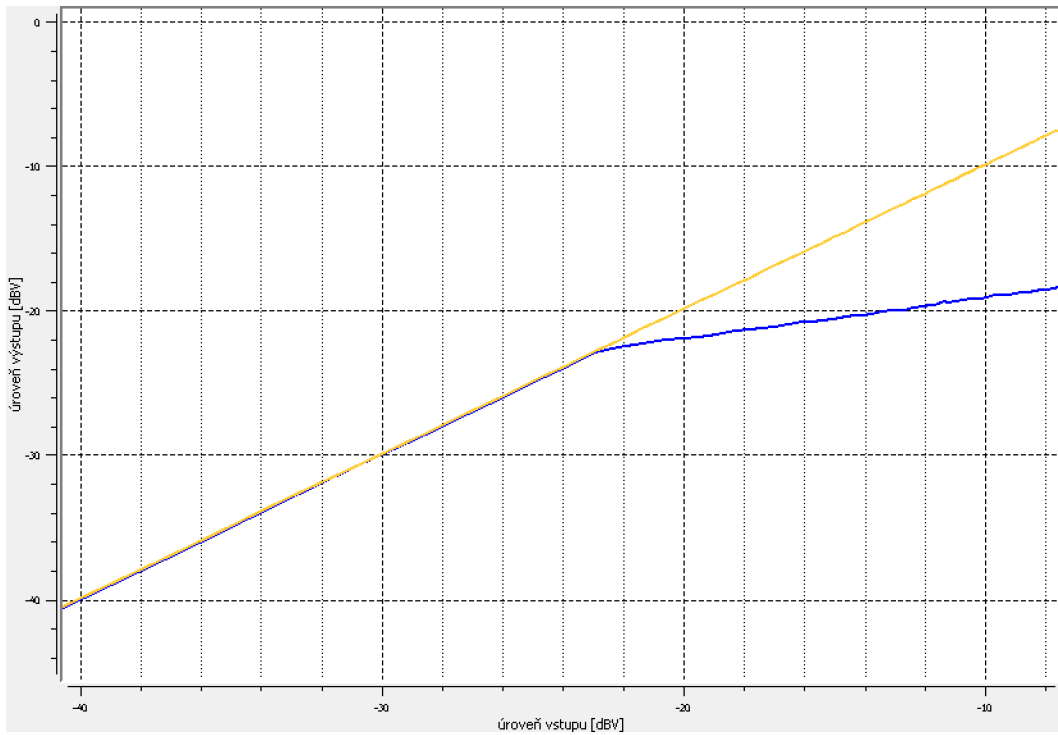
(a) Kanál A



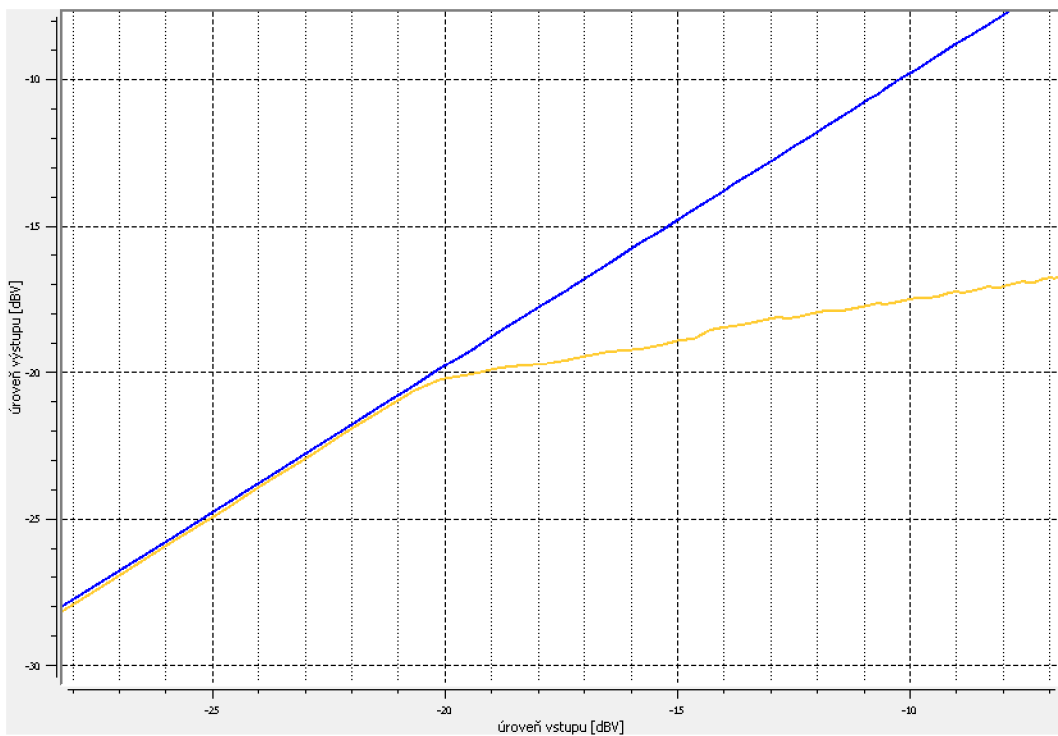
(b) Kanál B

Obr. 8.6: Kompresní poměr - minimum

8.1.3 Kleno

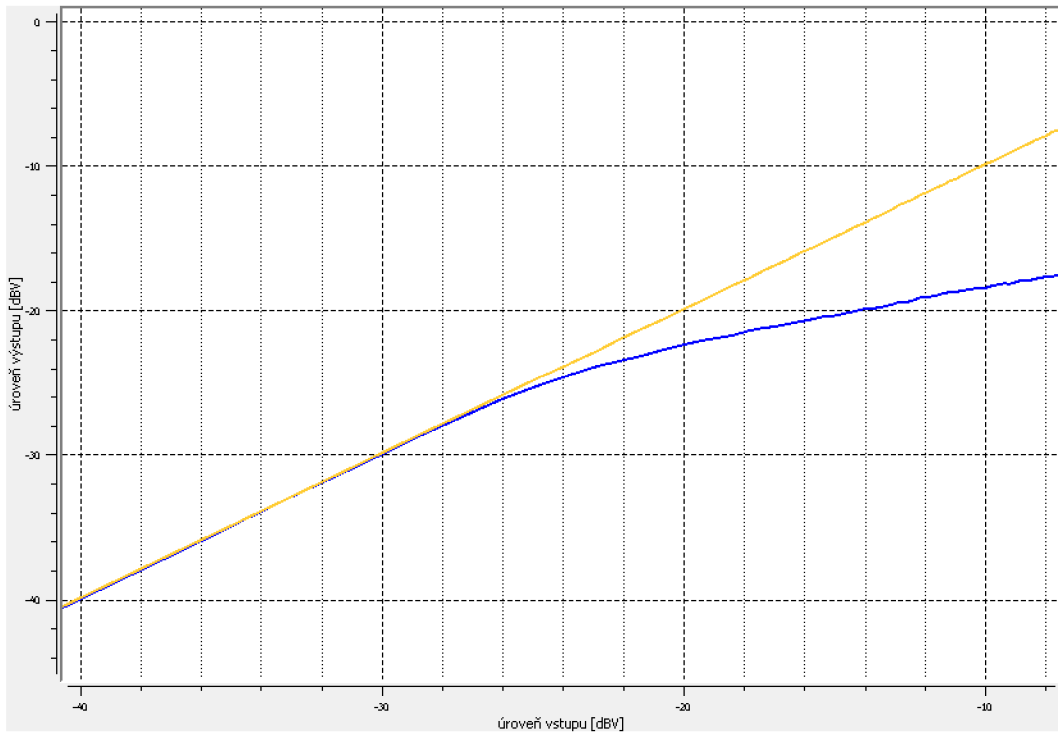


(a) Kanál A

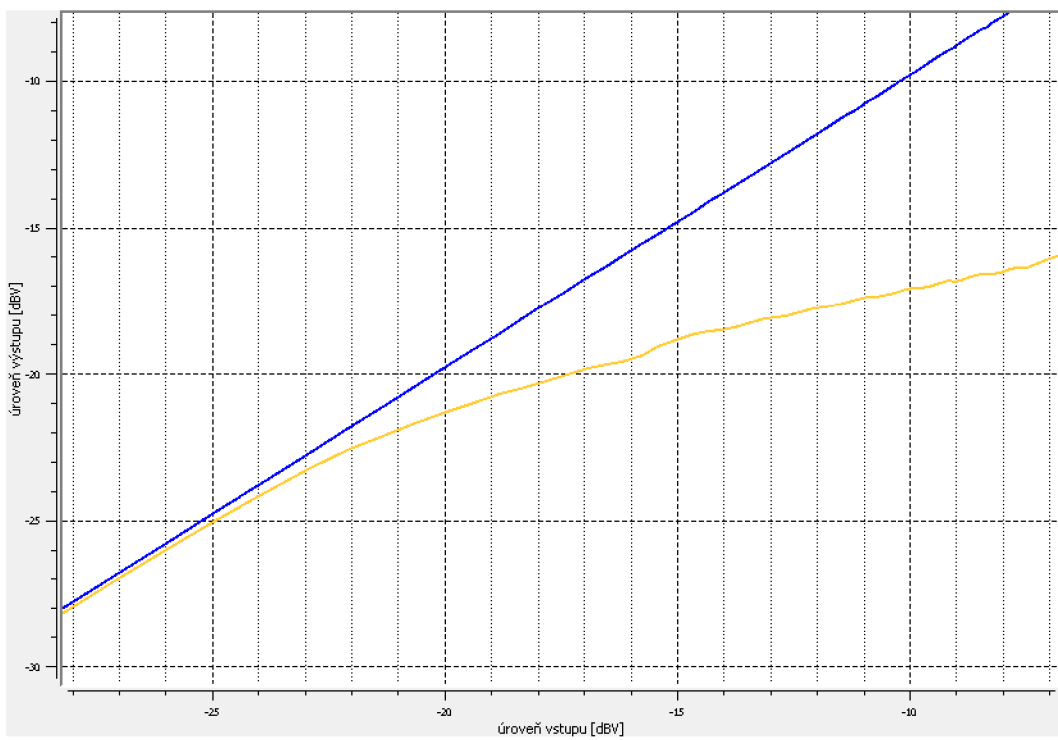


(b) Kanál B

Obr. 8.7: Tvrdé kleno



(a) Kanál A



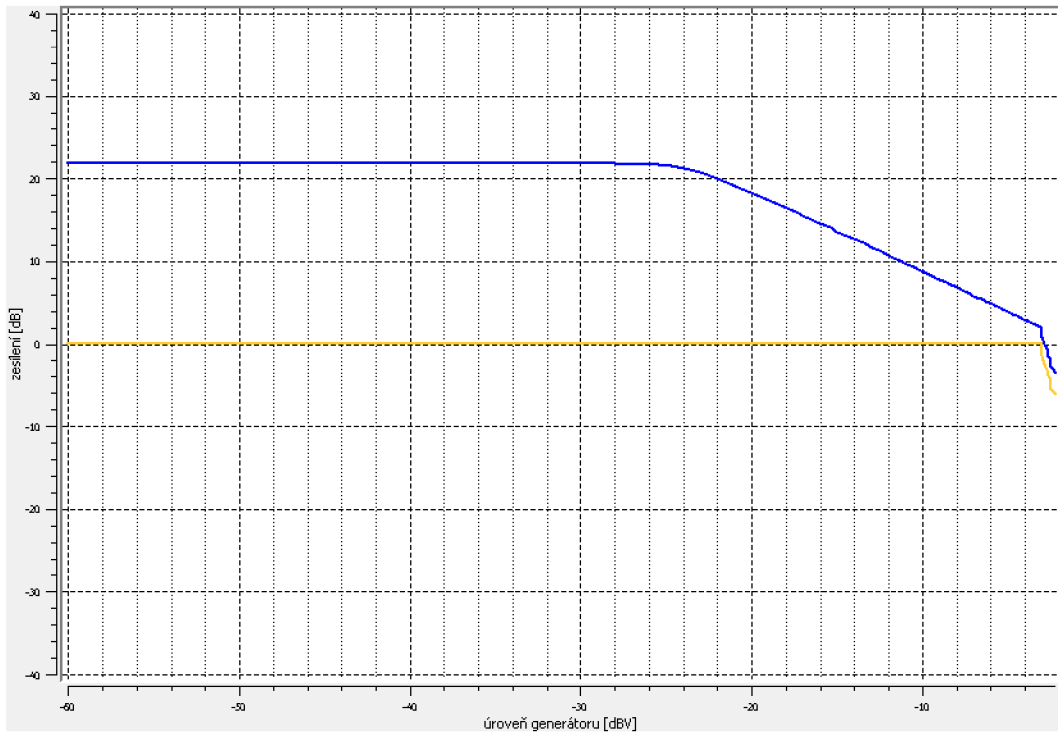
(b) Kanál B

Obr. 8.8: Měkké koleno

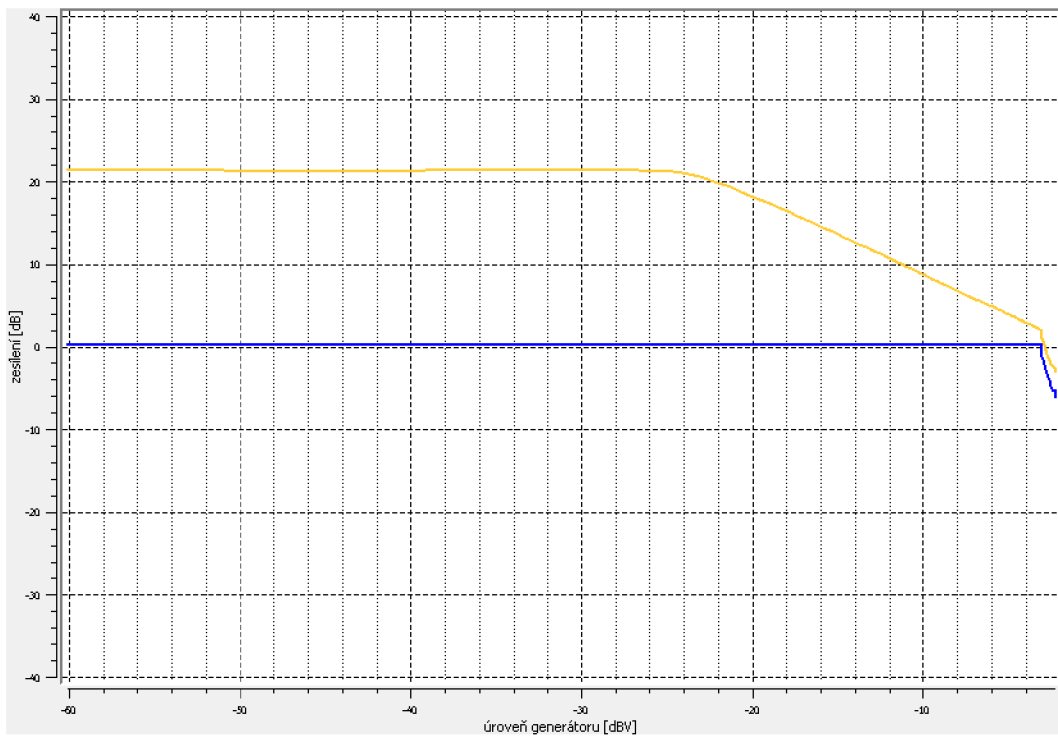
8.1.4 Kompenzace úrovně

kanál	minimum	střed	maximum
A	-20,86 dB	0 dB	21,87 dB
B	-21,43 dB	0 dB	21,43 dB

Tab. 8.3: Kompenzace úrovně

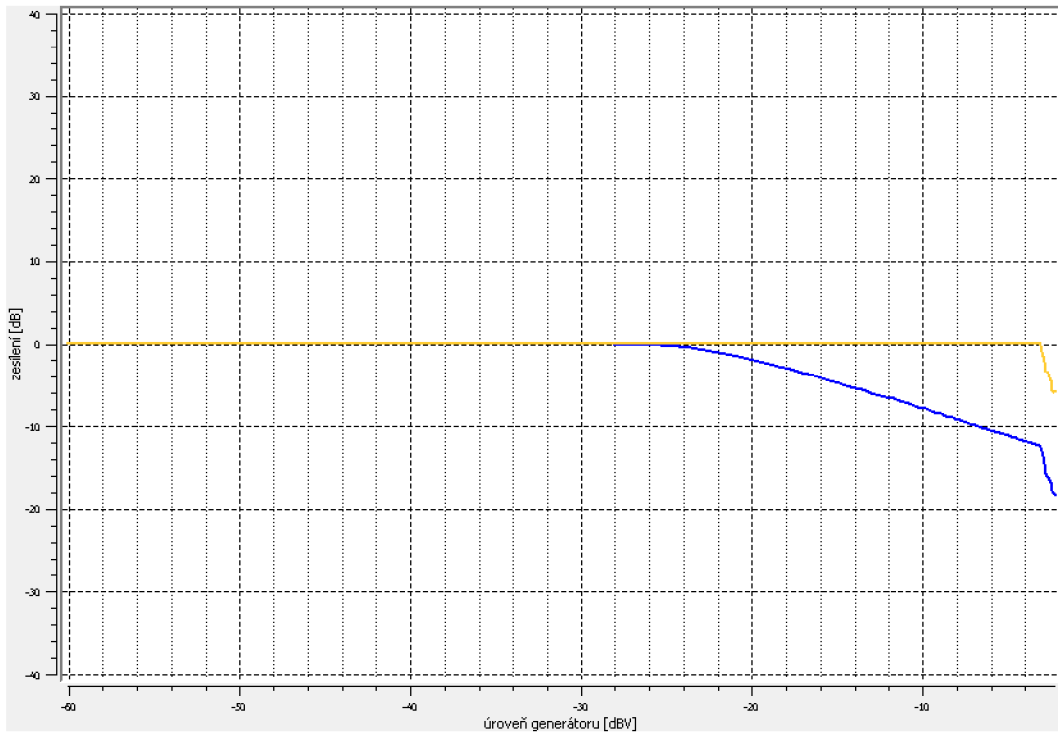


(a) Kanál A

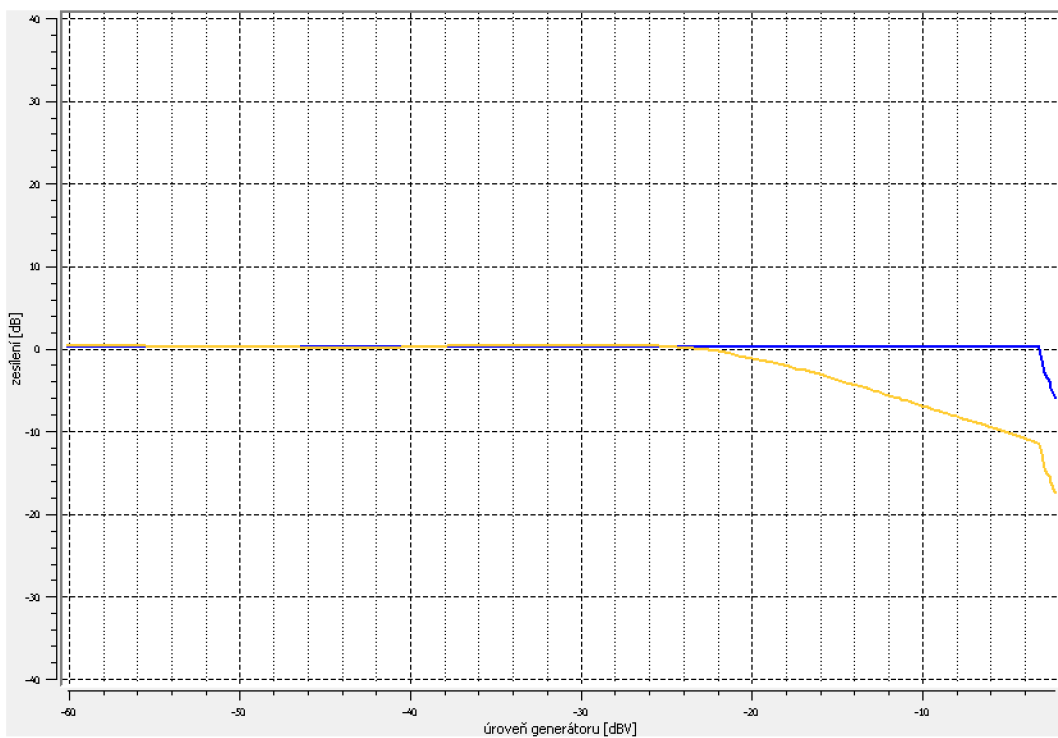


(b) Kanál B

Obr. 8.9: Kompenzace úrovně - maximum

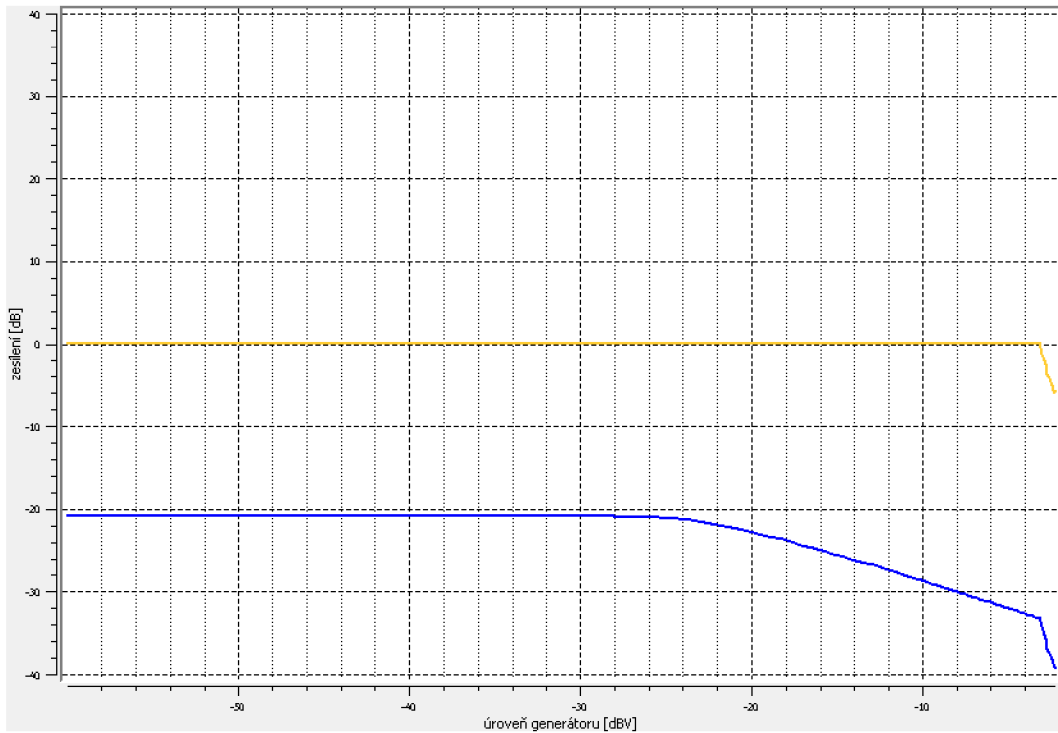


(a) Kanál A

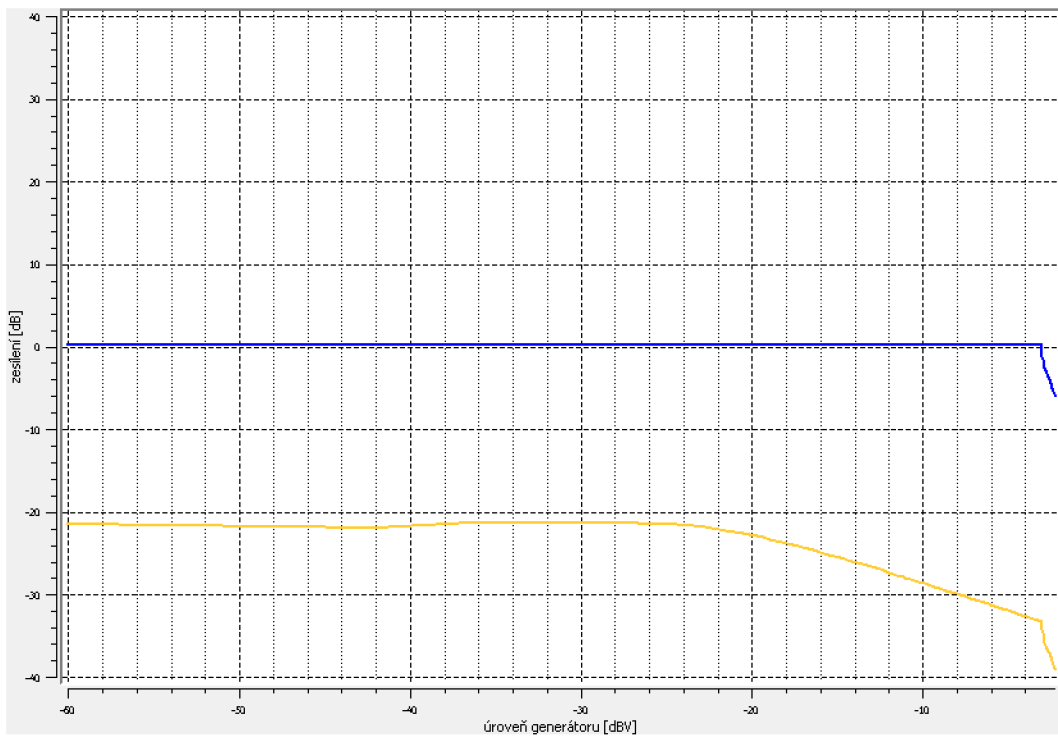


(b) Kanál B

Obr. 8.10: Kompenzace úrovně - střed



(a) Kanál A



(b) Kanál B

Obr. 8.11: Kompenzace úrovně - minimum

8.2 Časové parametry

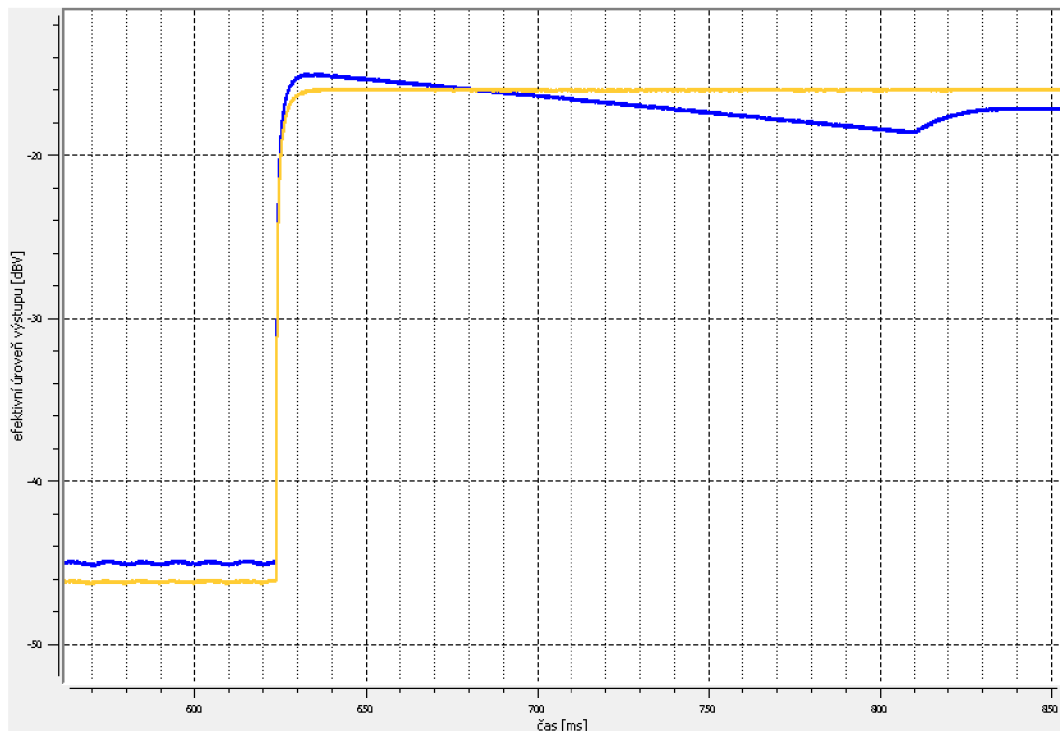
Doba náběhu je odečtena z obálky výstupního napětí při vstupním signálu o frekvenci 10000 Hz a měnící se úrovně s periodou 500 ms. Nižší úroveň signálu je -40 dBV, vyšší pak -10 dBV.

Doba doběhu je odečtena z obálky výstupního napětí při vstupním signálu o frekvenci 10000 Hz a měnící se úrovně s periodou 2000 ms. Nižší úroveň signálu je -40 dBV, vyšší pak -5 dBV.

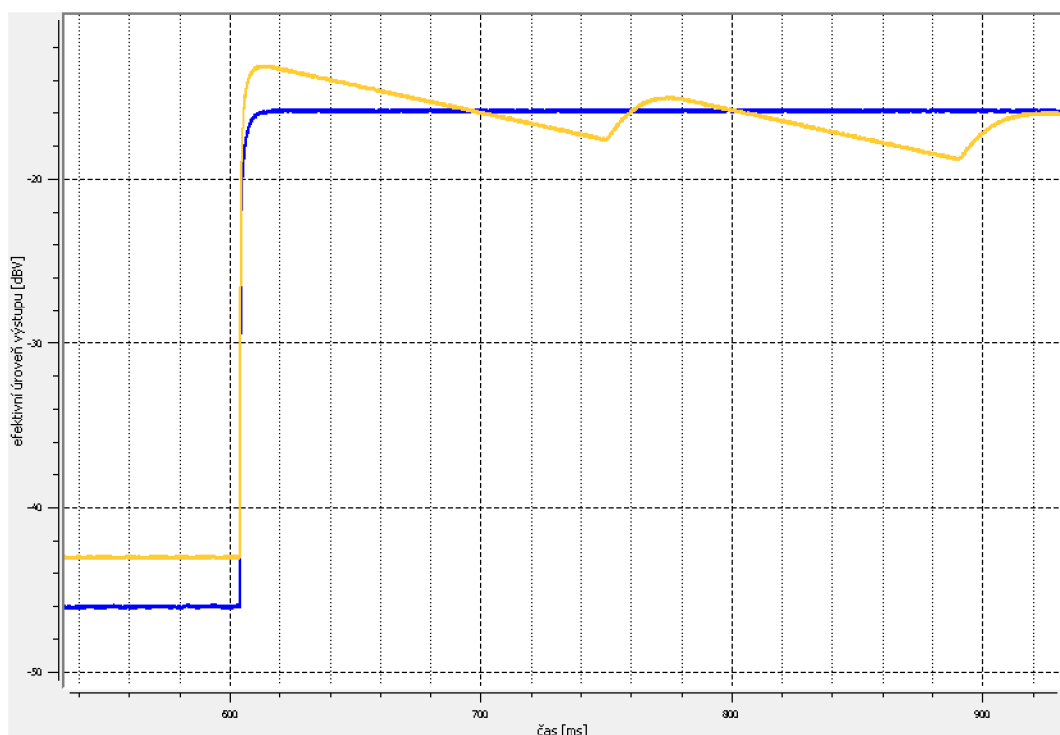
8.2.1 Doba náběhu

kanál	minimum	střed	maximum
A	30,96 ms	48,496 ms	183,516 ms
B	30,86 ms	44,096 ms	123,516 ms

Tab. 8.4: Doba náběhu

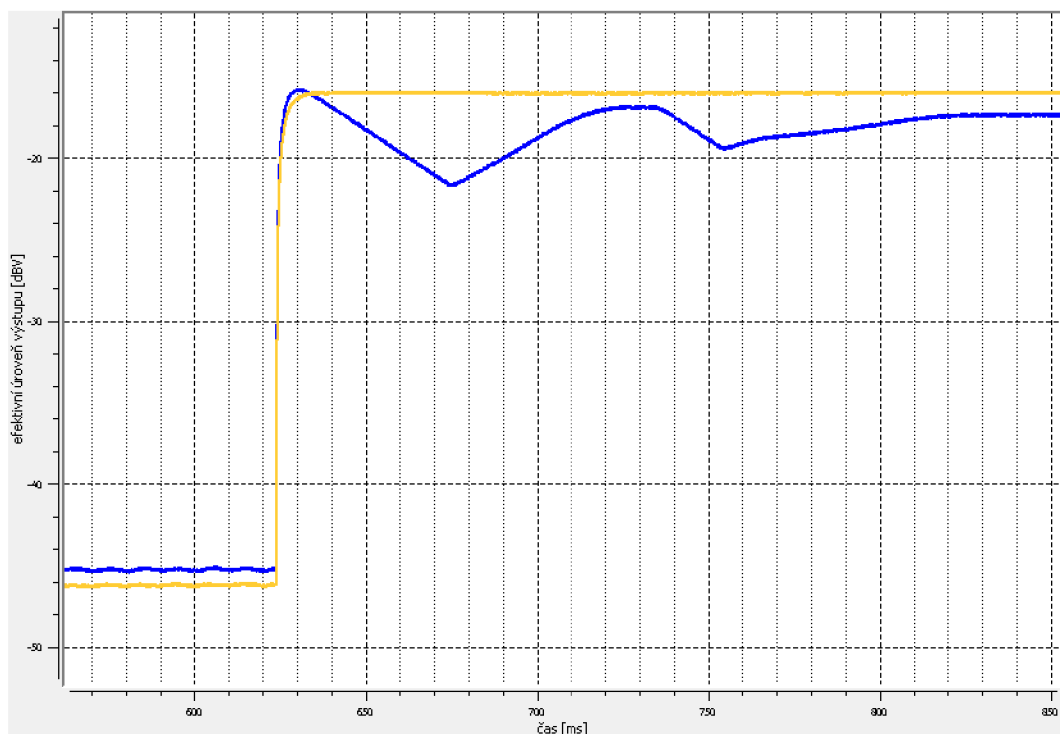


(a) Kanál A

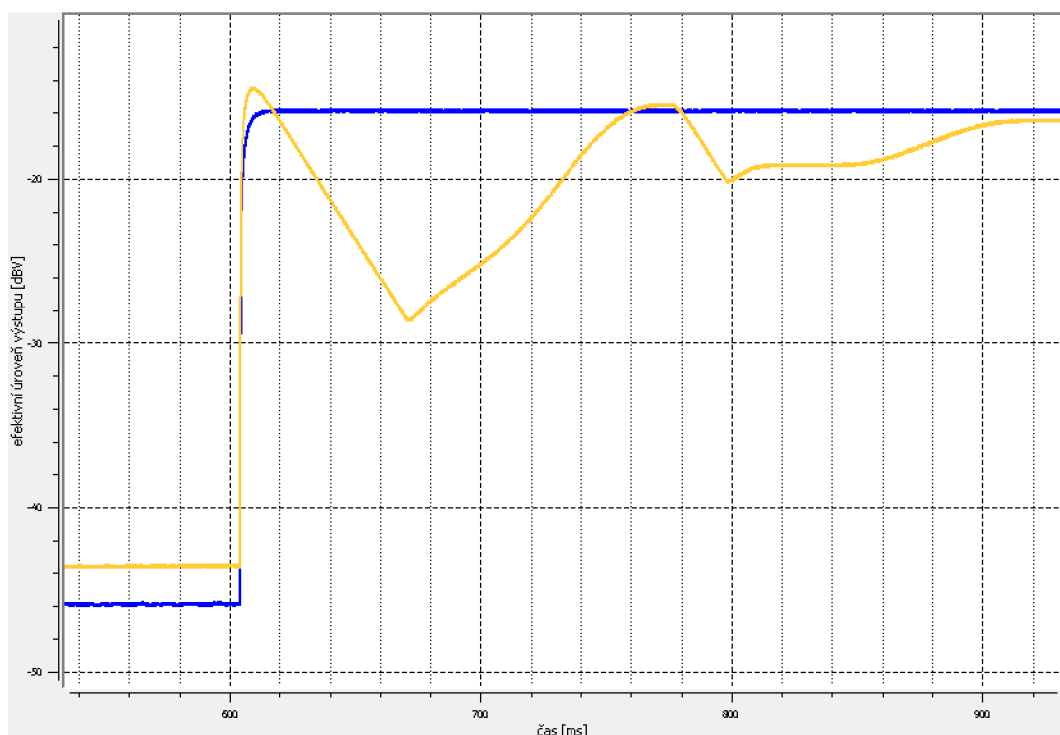


(b) Kanál B

Obr. 8.12: Doba náběhu - maximum

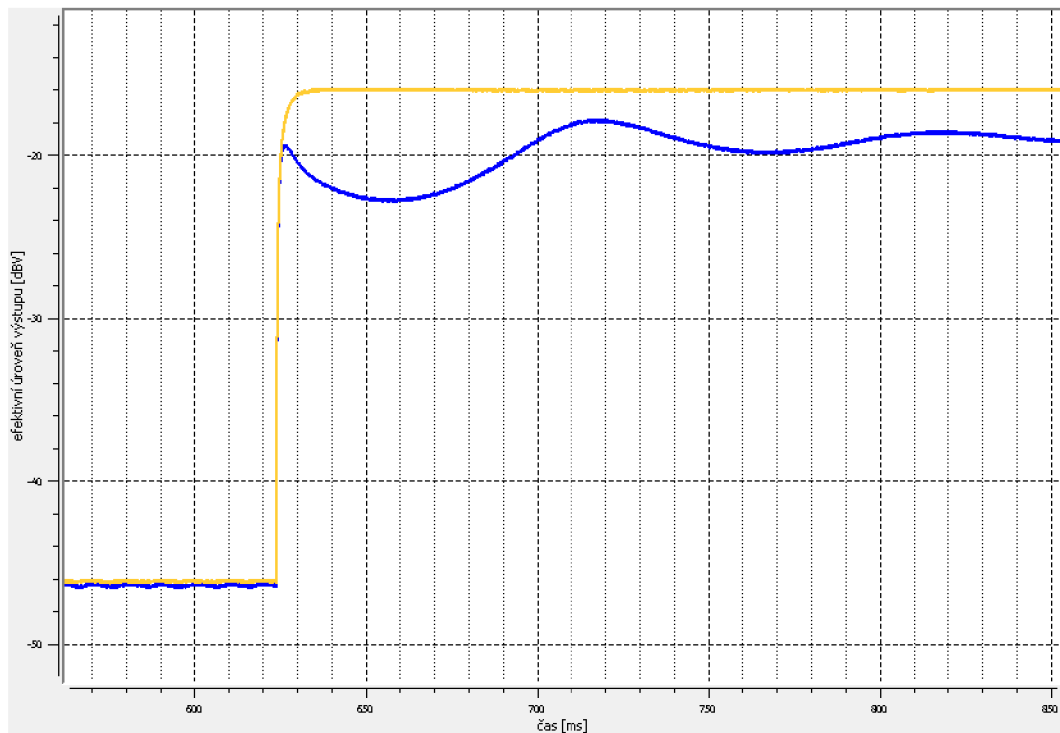


(a) Kanál A

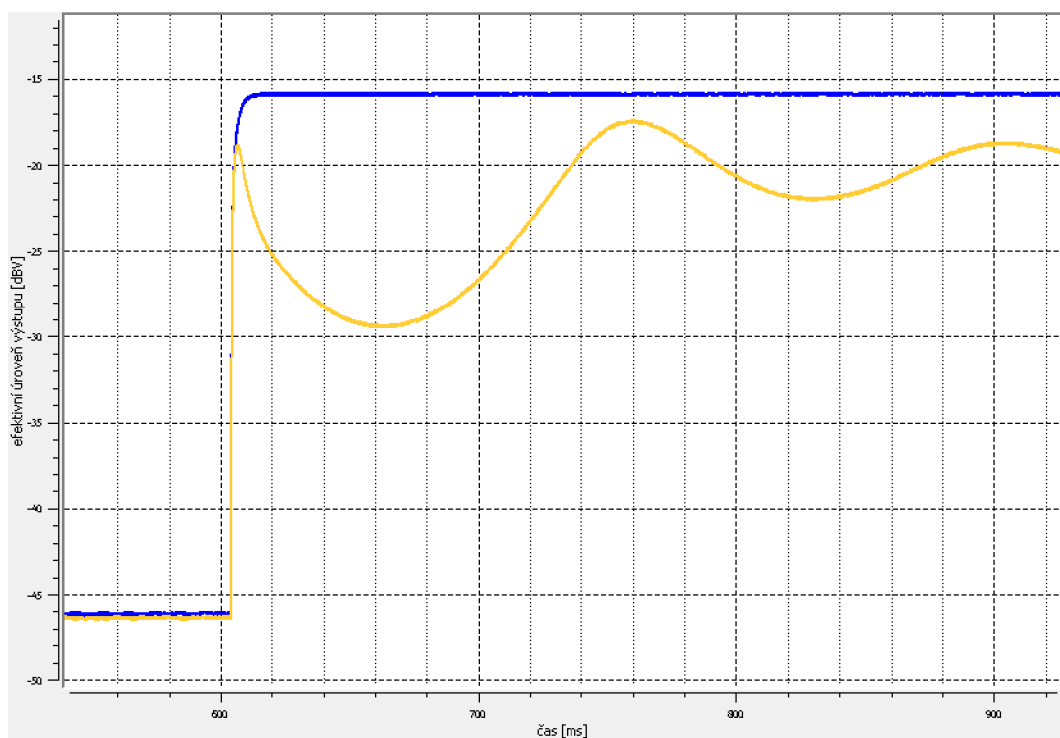


(b) Kanál B

Obr. 8.13: Doba náběhu - střed



(a) Kanál A



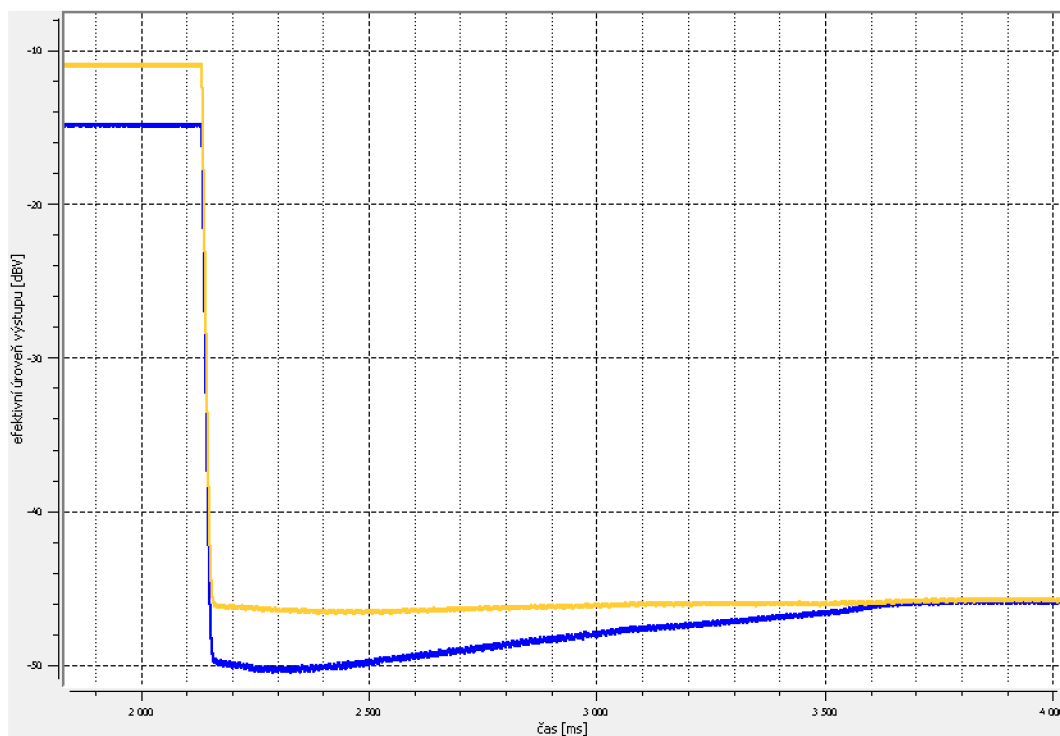
(b) Kanál B

Obr. 8.14: Doba náběhu - minimum

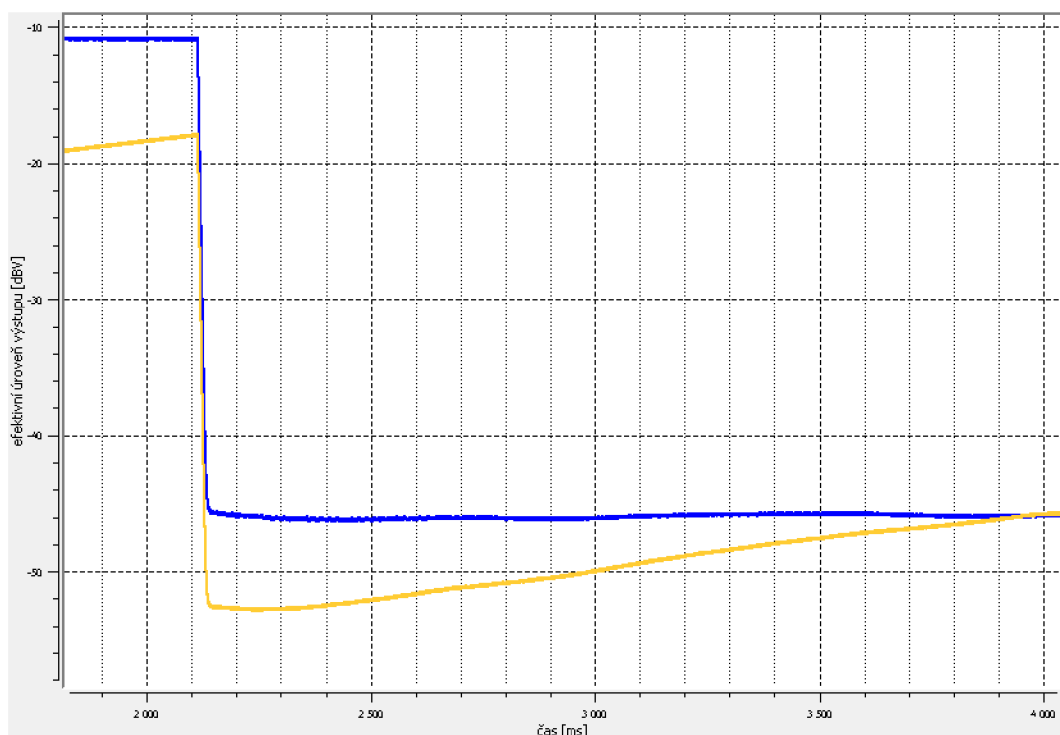
8.2.2 Doba doběhu

kanál	minimum	střed	maximum
A	50,91 ms	197,27 ms	1533,85 ms
B	45,24 ms	216,61 ms	1839,27 ms

Tab. 8.5: Doba doběhu

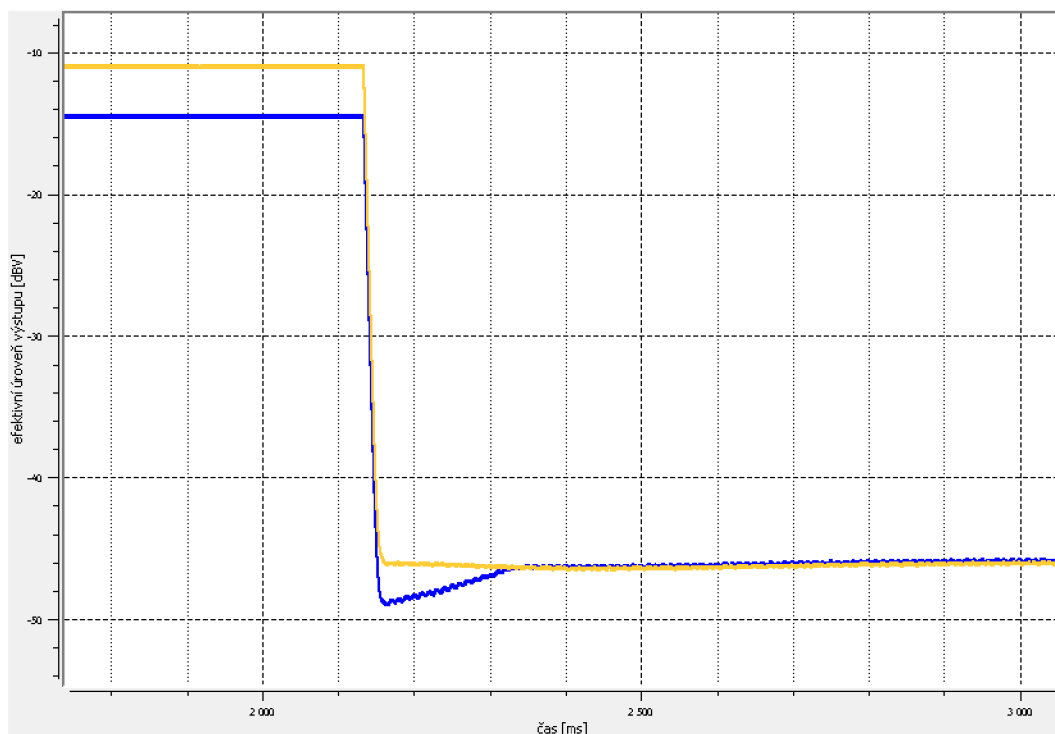


(a) Kanál A

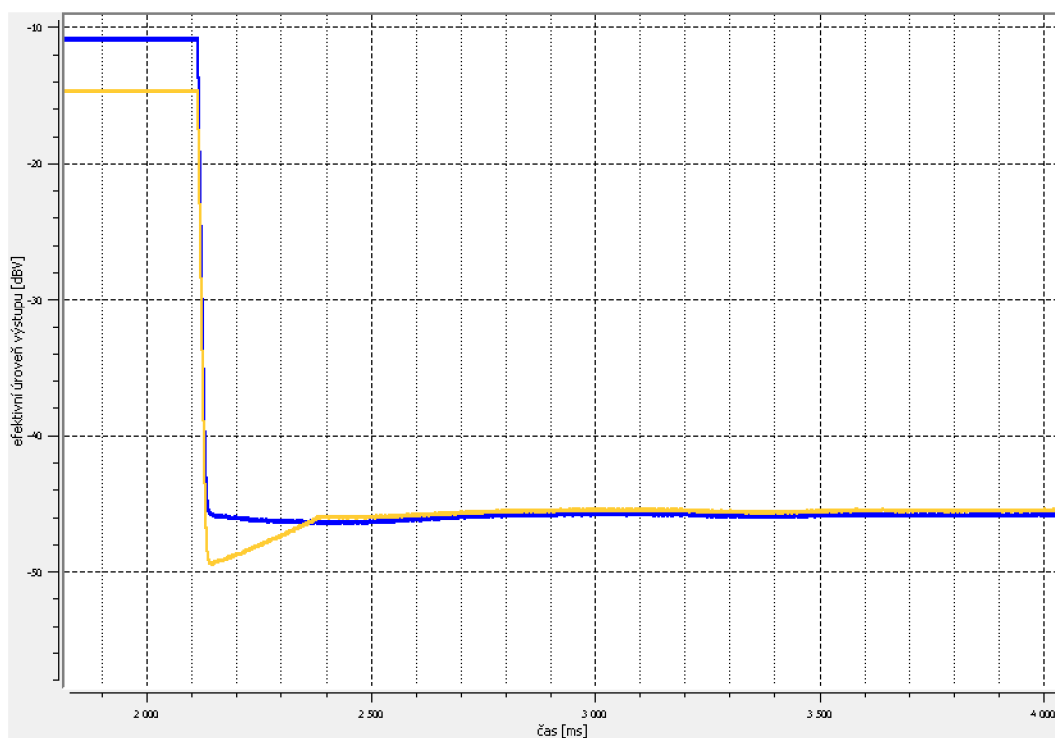


(b) Kanál B

Obr. 8.15: Doba doběhu - maximum

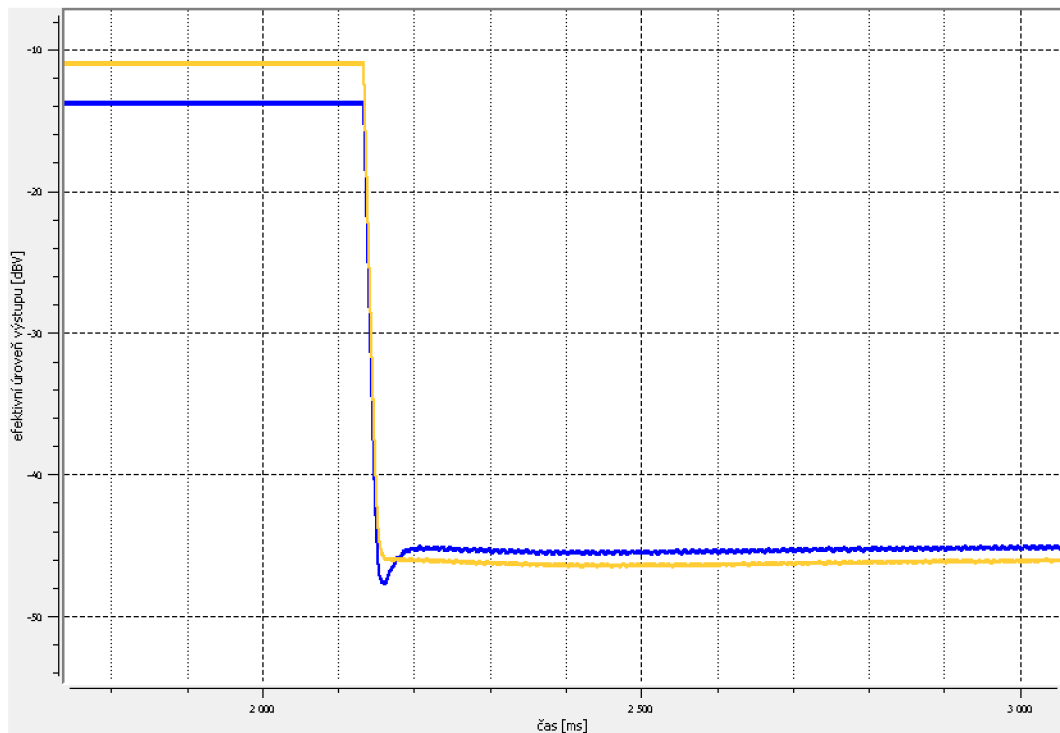


(a) Kanál A

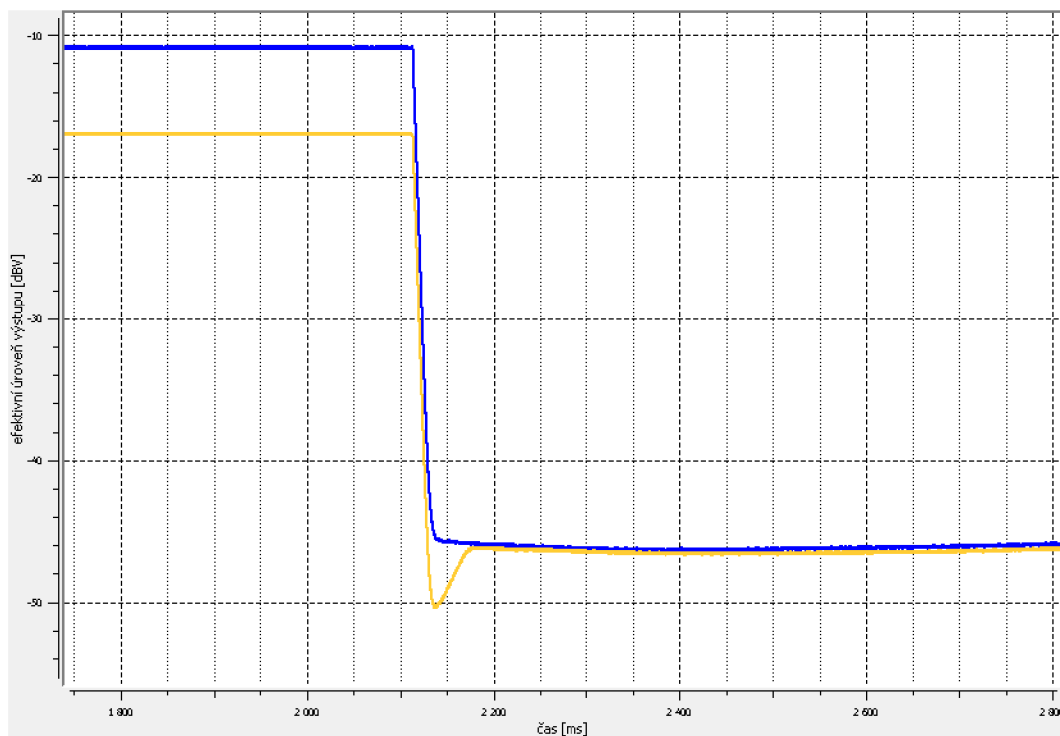


(b) Kanál B

Obr. 8.16: Doba doběhu - střed



(a) Kanál A



(b) Kanál B

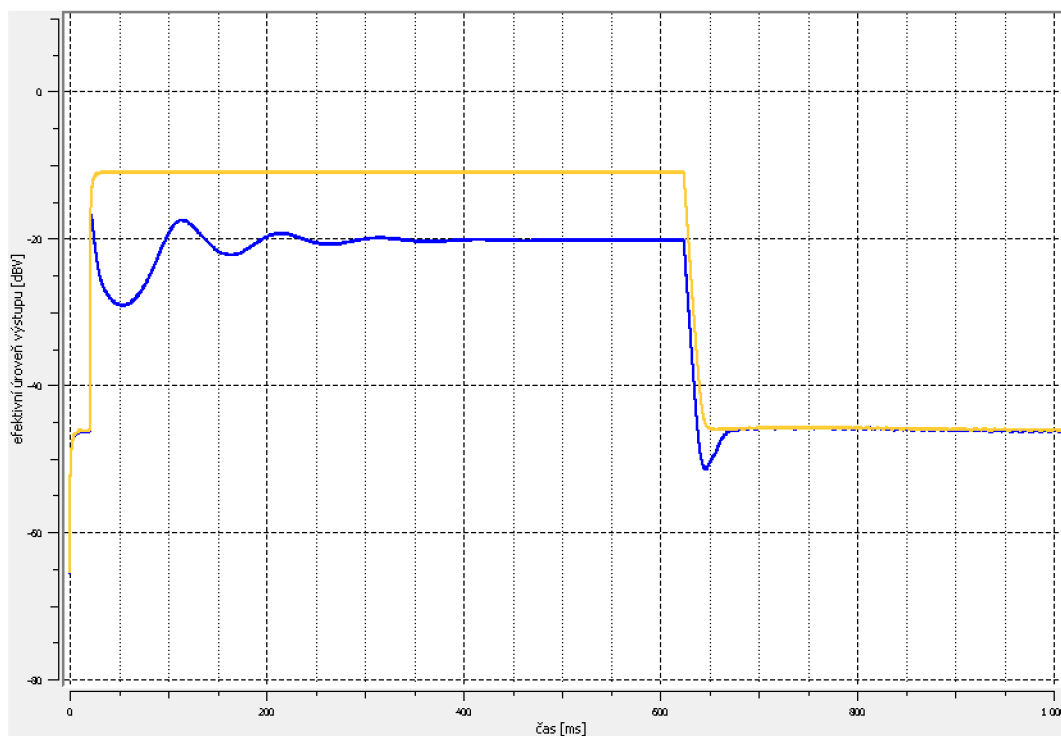
Obr. 8.17: Doba doběhu - minimum

8.2.3 Časové parametry v režimu Auto

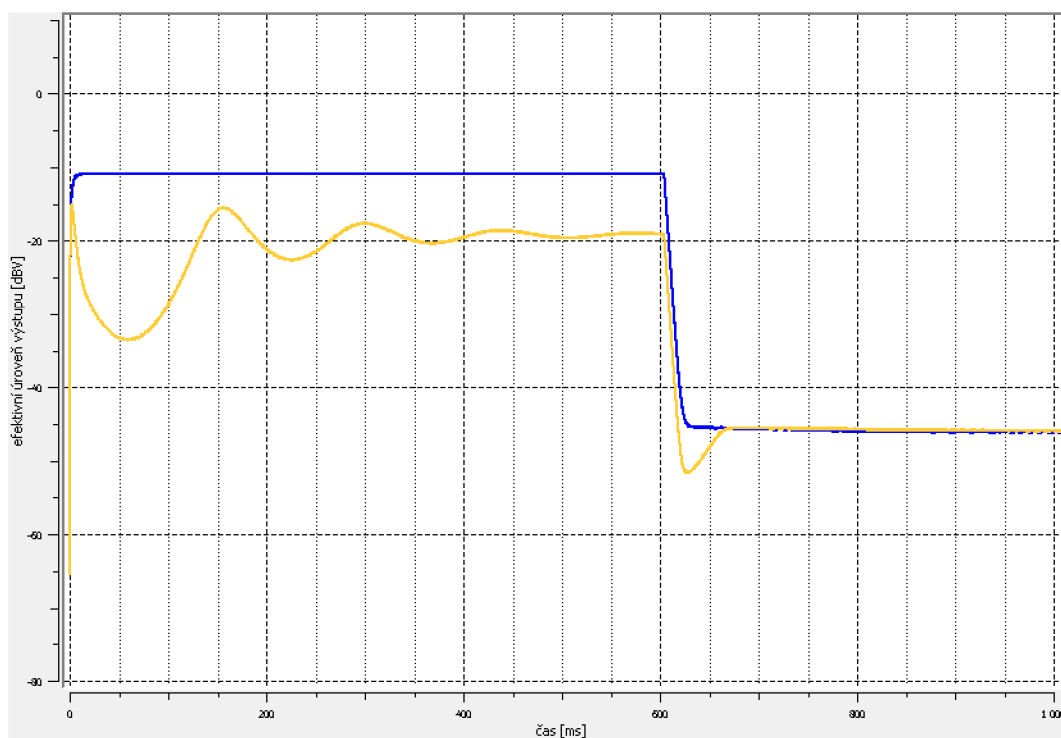
Doba náběhu a doběhu v režimu Auto je odečtena z obálky výstupního napětí při vstupním signálu o frekvenci 10000 Hz a měnící se úrovně s periodou 500 ms. Nižší úroveň signálu je -40 dBV, vyšší pak -10 dBV.

kanál	náběh	doběh
A	31,7 ms	27,68 ms
B	38,03 ms	38,05 ms

Tab. 8.6: Doba náběhu a doběhu v režimu Auto



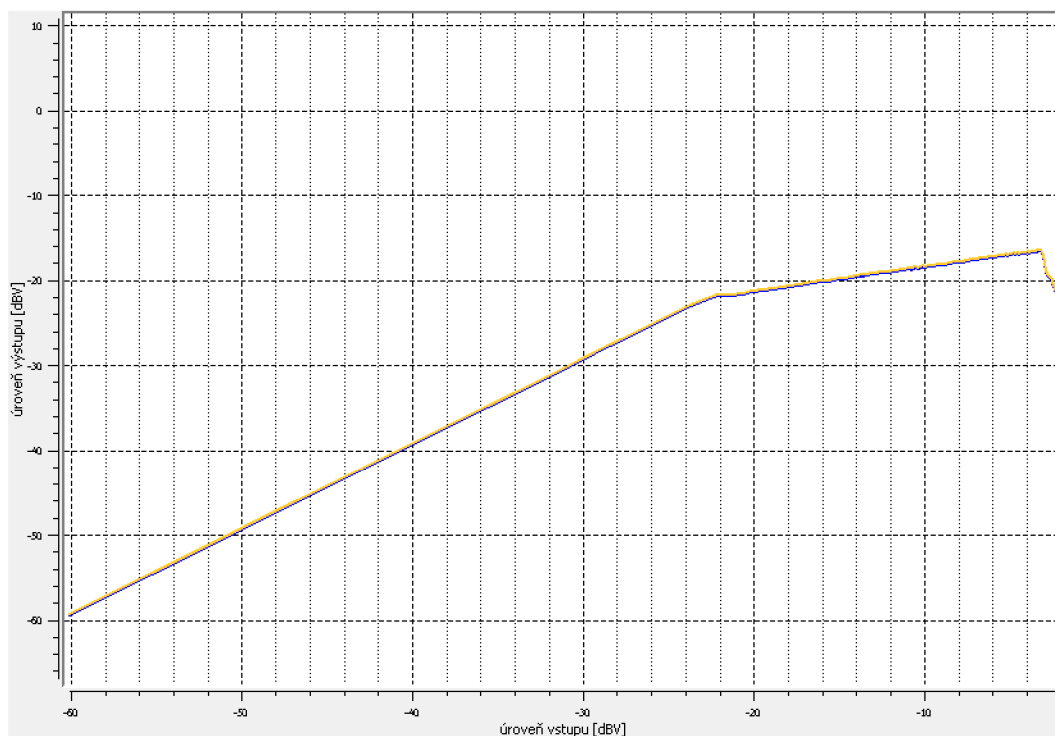
(a) Kanál A



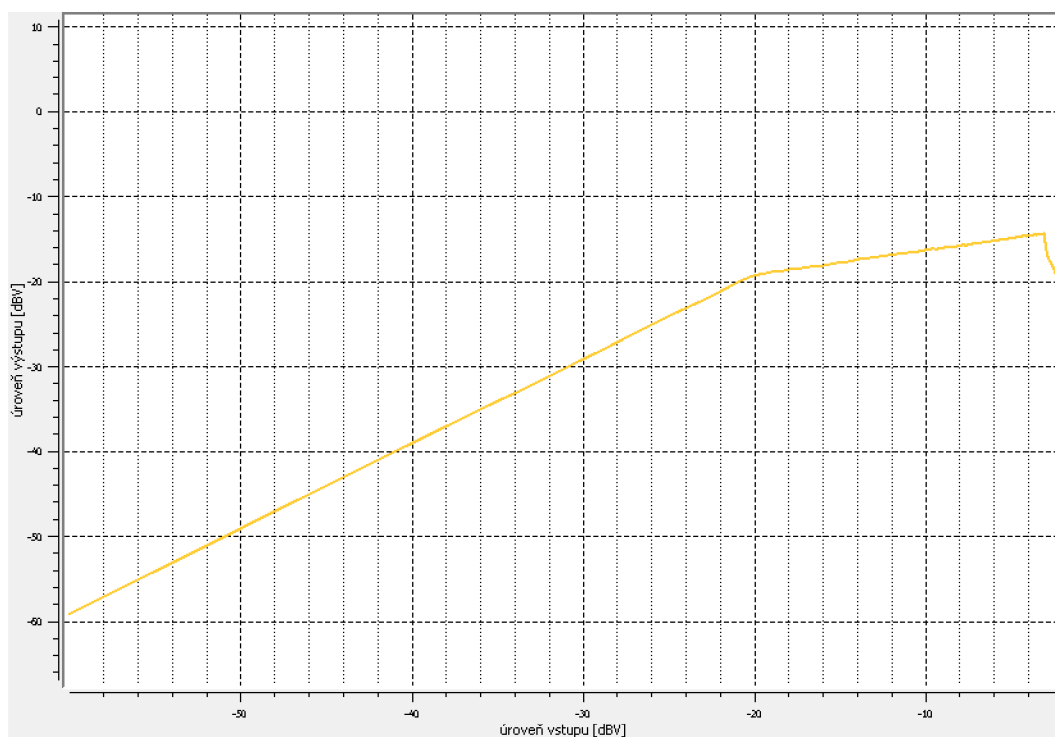
(b) Kanál B

Obr. 8.18: Doba náběhu a doběhu

8.3 Propojení do stera

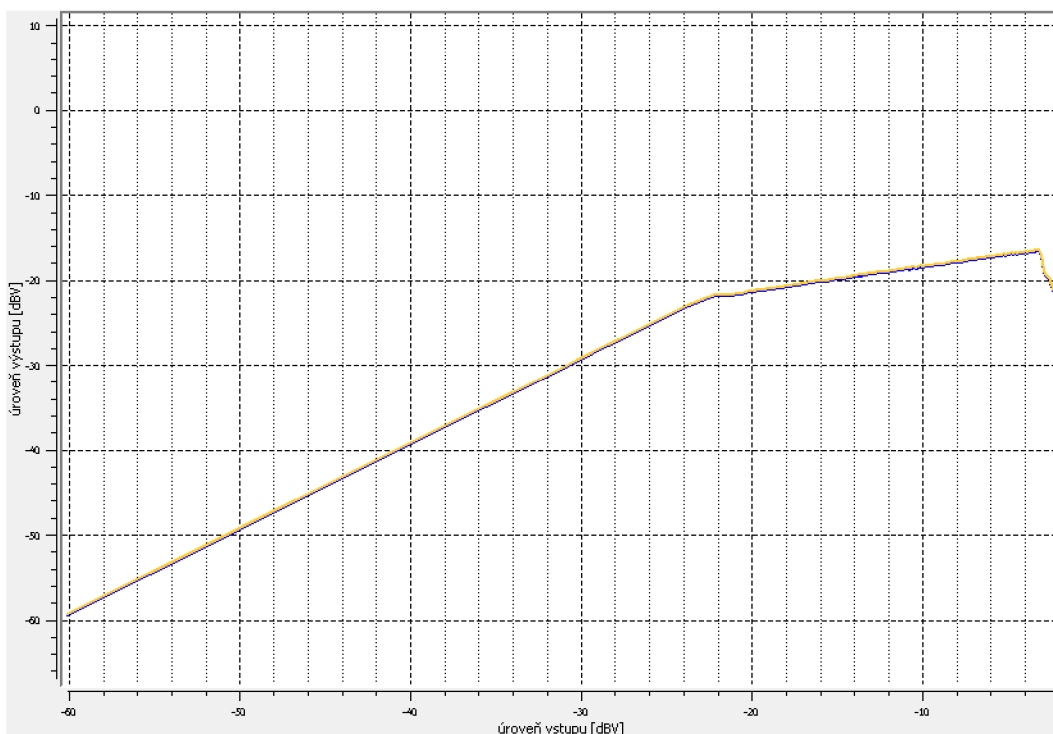


(a) Zdroj připojen na oba kanály

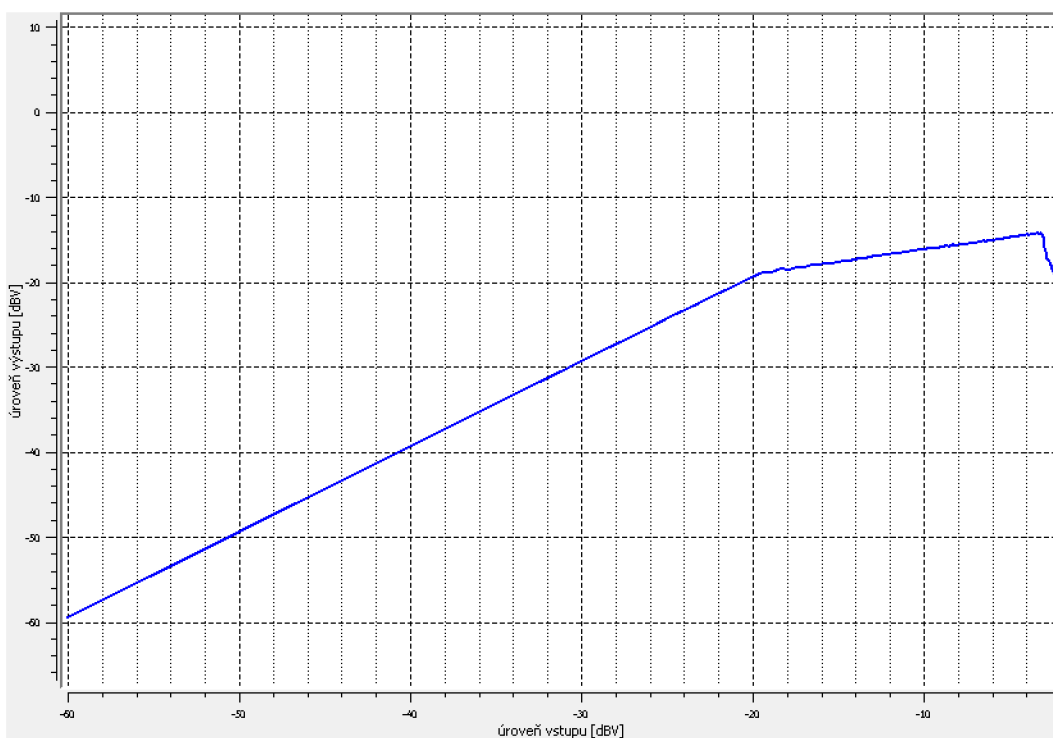


(b) Zdroj připojen jen na kanál B

Obr. 8.19: Propojení do stera - kanál B vs. kanál A



(a) Zdroj připojen na oba kanály



(b) Zdroj připojen jen na kanál B

Obr. 8.20: Propojení do sterea - kanál A vs. kanál B

Charakteristiky jsou odečteny z efektivní hodnoty napětového přenosu vstup-výstup. Měření probíhalo na frekvenci 1000 Hz, hodnotách vstupního napětí od

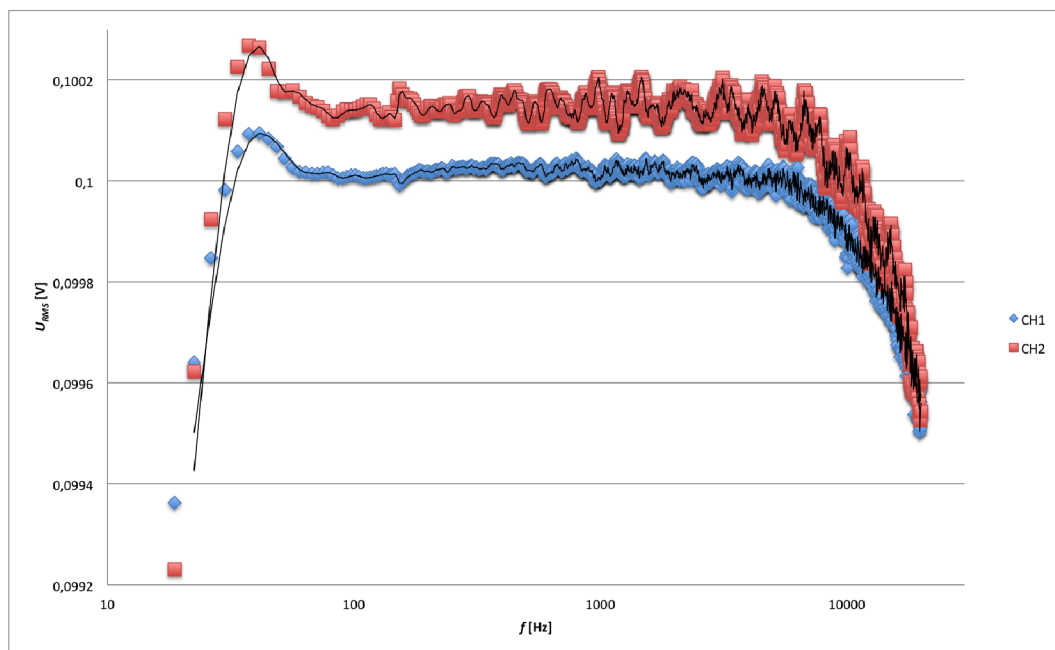
0,001 do 0,775 V s krokem 0,01 V.

Při měření první charakteristiky byl zdroj připojen na oba kanály, při měření druhé jen na kanál B (žlutý), případně A (modrý).

Z naměřeného průběhu je zřetelné, že prahová úroveň je závislá na zdroji obou kanálů - pokud odpojím jeden kanál od zdroje, prahová úroveň o něco stoupne, protože má nižší úroveň na vstupu. Kdyby tato závislost neplatila, byl by podřízený kanál zcela závislý na vstupním signálu řídicího kanálu, což není ve stereo konfiguraci vhodné. Správně má kompresor reagovat na podněty v obou kanálech společně, což mé měření potvrzuje.

8.4 Přístrojové charakteristiky

8.4.1 Frekvenční odezva



Obr. 8.21: Frekvenční odezva

Odchylka na rozsahu 20 Hz – 20 kHz kanálu A je $\pm 0,0275$ dB.

Odchylka na rozsahu 20 Hz – 20 kHz kanálu B je $\pm 0,0391$ dB.

8.4.2 THD+N

THD+N kanálu A je 0,0059 %.

THD+N kanálu B je 0,0063 %.

8.4.3 Přeslech

Přeslech kanálu A do kanálu B je $-93,61$ dB.

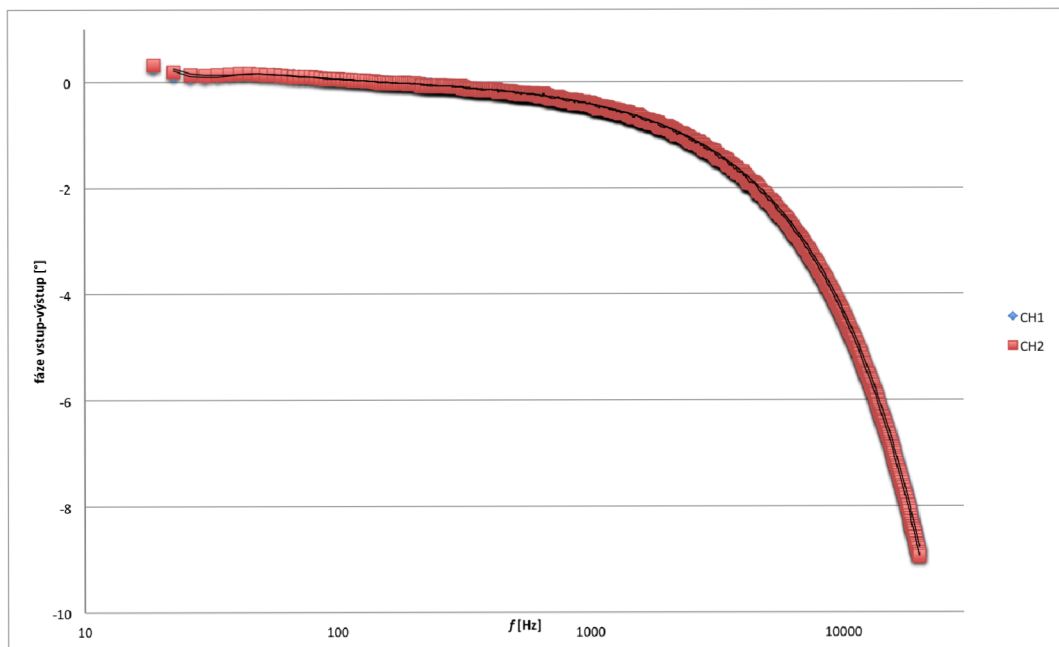
Přeslech kanálu B do kanálu A je $-86,37$ dB.

8.4.4 SNR

Odstup signálu od šumu při vstupním napětí 100 mV kanálu A je $71,31$ dB.

Odstup signálu od šumu při vstupním napětí 100 mV kanálu B je $69,53$ dB.

8.4.5 Fáze vstup-výstup



Obr. 8.22: Fáze vstup-výstup

9 ZÁVĚR

Výsledkem mé bakalářské práce je kompletní návrh dvoukanálového kompresoru s širokou škálou nastavení parametrů včetně možnosti spojit oba kanály do stereo konfigurace.

Experimentálním měřením jsem potvrdil většinu předpokládaných vlastností, proto považuji můj návrh za funkční. Kdyby se měl tento prototyp přesunout do výroby, bylo by určitě finančně výhodnější umístit jej na jednu desku plošných spojů místo několika malých. Pro stavbu prototypu však bylo výhodnější pracovat s jednotlivými bloky odděleně, dá se s nimi lépe pracovat. Také by při komerční výrobě bylo vhodné spárovat obvod VCA článku a RMS detektoru tak, aby oba kanály měly co nejbližší vlastnosti, případně umístit citlivé součástky obou kanálů blízko k sobě.

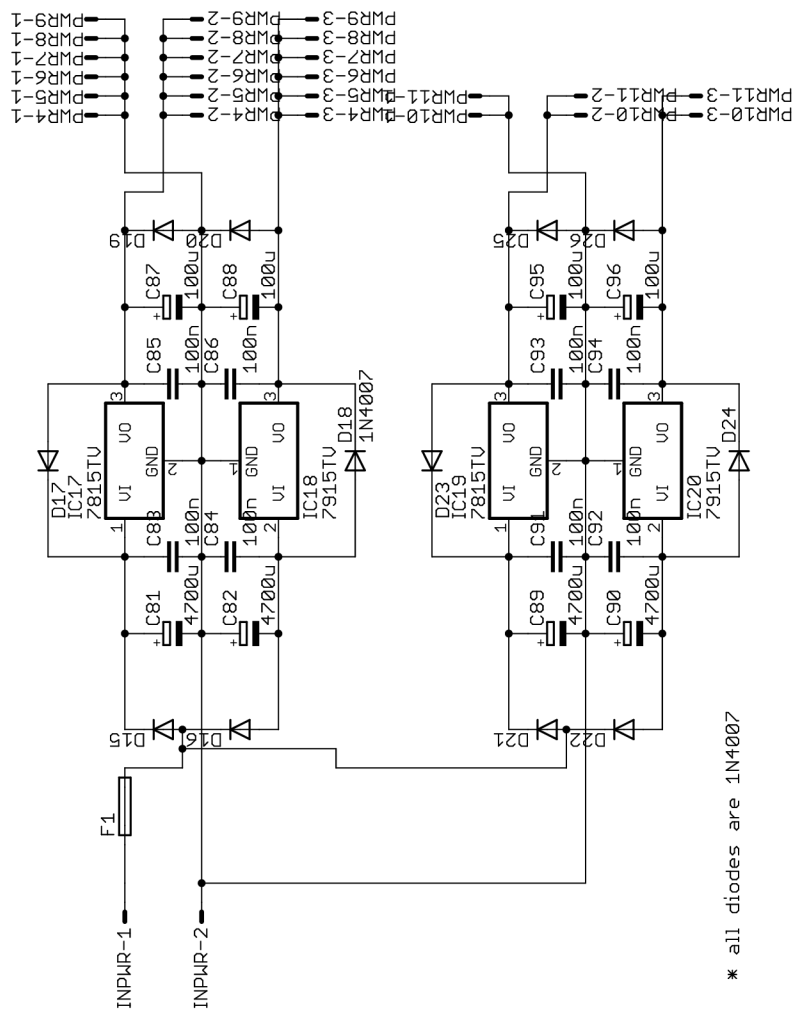
Věřím, že čtenář, který neznal problematiku kompresorů, získal díky této práci potřebné znalosti k orientaci v této oblasti. Tyto znalosti mohou být užitečné jak člověku, který uvažuje o vlastním návrhu a konstrukci podobného přístroje, tak i člověku, který chce lépe pochopit funkci kompresoru proto, aby se jej naučil lépe využívat v praxi.

LITERATURA

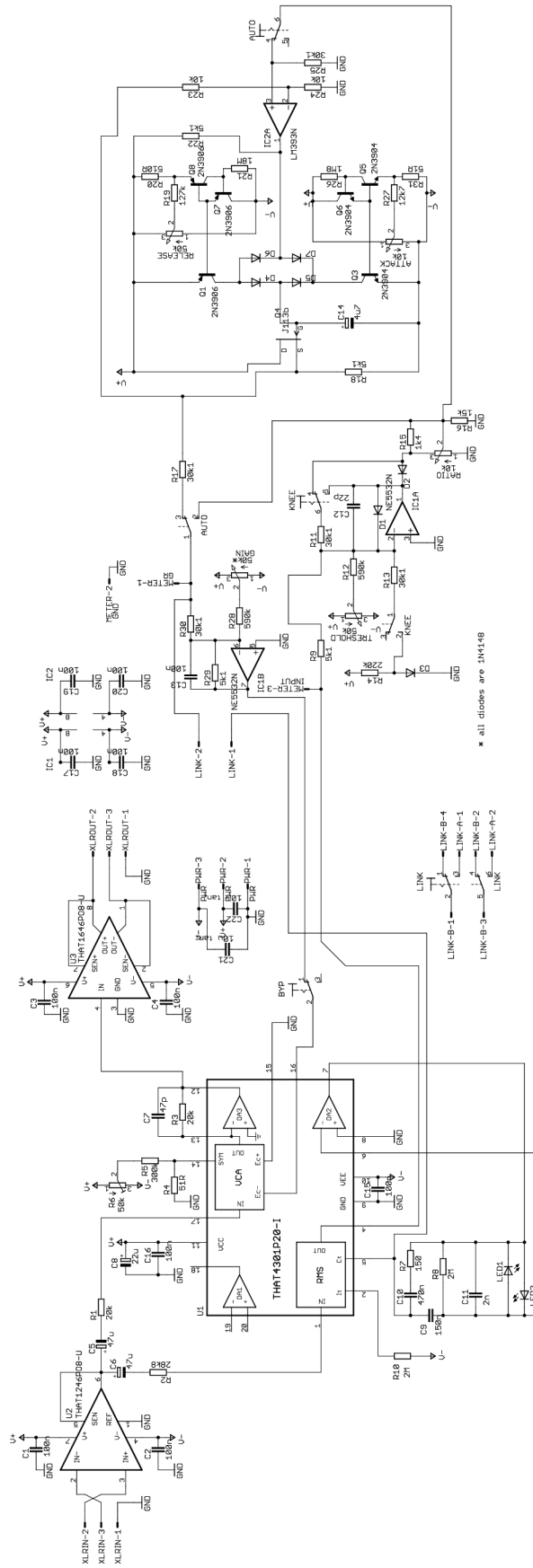
- [1] THAT Corporation. *Design Note 00A - Basic Compressor/Limiter Design* [online]. 2009, [cit. 7.6.2017]. Dostupné z URL: <<http://www.thatcorp.com/datashts/dn00A.pdf>>.
- [2] THAT Corporation. *Design Note 01A - The Mathematics of Log-Based Dynamic Processors* [online]. 2009, [cit. 7.6.2017]. Dostupné z URL: <<http://www.thatcorp.com/datashts/dn01A.pdf>>.
- [3] THAT Corporation. *Design Note 115 - A Fully Adjustable Compressor* [online]. 2009, [cit. 7.6.2017]. Dostupné z URL: <<http://www.thatcorp.com/datashts/dn115.pdf>>.
- [4] THAT Corporation. *Design Note 114 - Adaptive attack and release rates using THAT Corporation RMS detectors (the non-linear capacitor circuit* [online]. 2009, [cit. 7.6.2017]. Dostupné z URL: <<http://www.thatcorp.com/datashts/dn114.pdf>>.
- [5] THAT Corporation. *Design Note 112 - LED Bar-Graph Compression Indicator* [online]. 2009, [cit. 7.6.2017]. Dostupné z URL: <<http://www.thatcorp.com/datashts/dn112.pdf>>.
- [6] THAT Corporation. *Design Note 113 - THAT4301 Gain Reduction Indicator* [online]. 2009, [cit. 7.6.2017]. Dostupné z URL: <<http://www.thatcorp.com/datashts/dn113.pdf>>.
- [7] THAT Corporation. *Design Note 116 - Techniques for Stereo Volume Control* [online]. 2010, [cit. 7.6.2017]. Dostupné z URL: <<http://www.thatcorp.com/datashts/dn116.pdf>>.
- [8] THAT Corporation. *1240 series Datasheet* [online]. 2015, [cit. 7.6.2017]. Dostupné z URL: <http://www.thatcorp.com/datashts/THAT_1240-Series_Datasheet.pdf>.
- [9] THAT Corporation. *1606/1646 Datasheet* [online]. 2015, [cit. 7.6.2017]. Dostupné z URL: <http://www.thatcorp.com/datashts/THAT_1606-1646_Datasheet.pdf>.
- [10] THAT Corporation. *4301 Datasheet* [online]. 2016, [cit. 7.6.2017]. Dostupné z URL: <http://www.thatcorp.com/datashts/THAT_4301_Datasheet.pdf>.

- [11] SCHIMMEL, Jiří. *Studiová a hudební elektronika*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav telekomunikací, 2015, [cit. 7.6.2017]. ISBN 978-80-214-4452-2

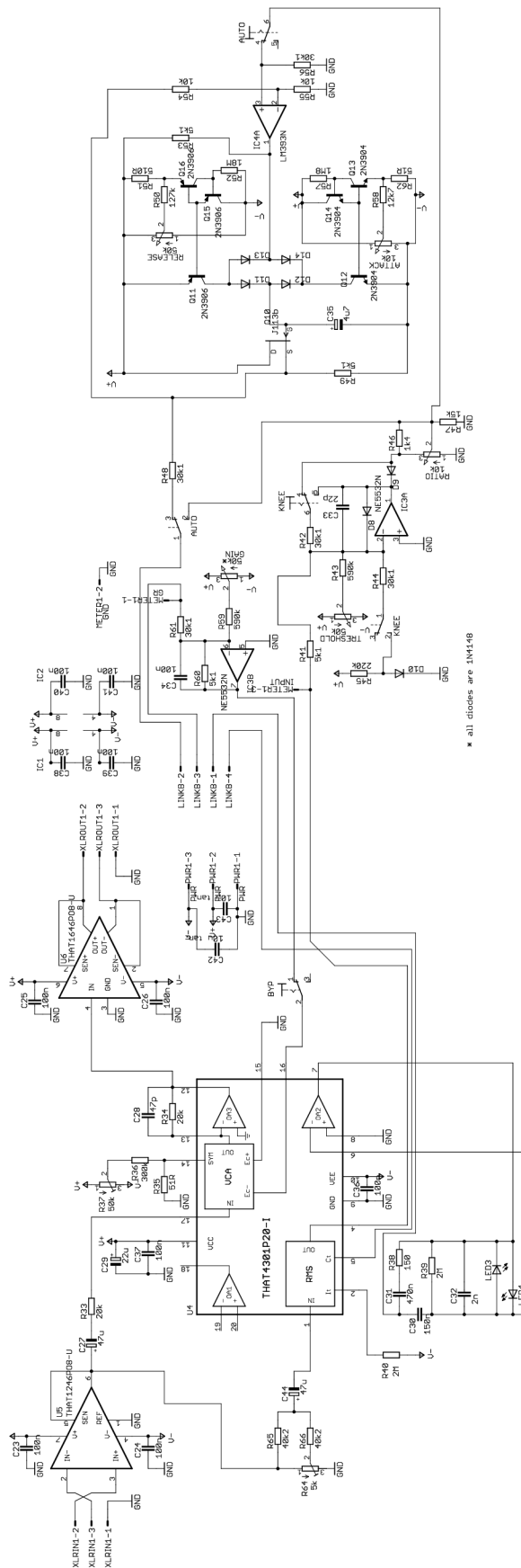
10 PŘÍLOHY



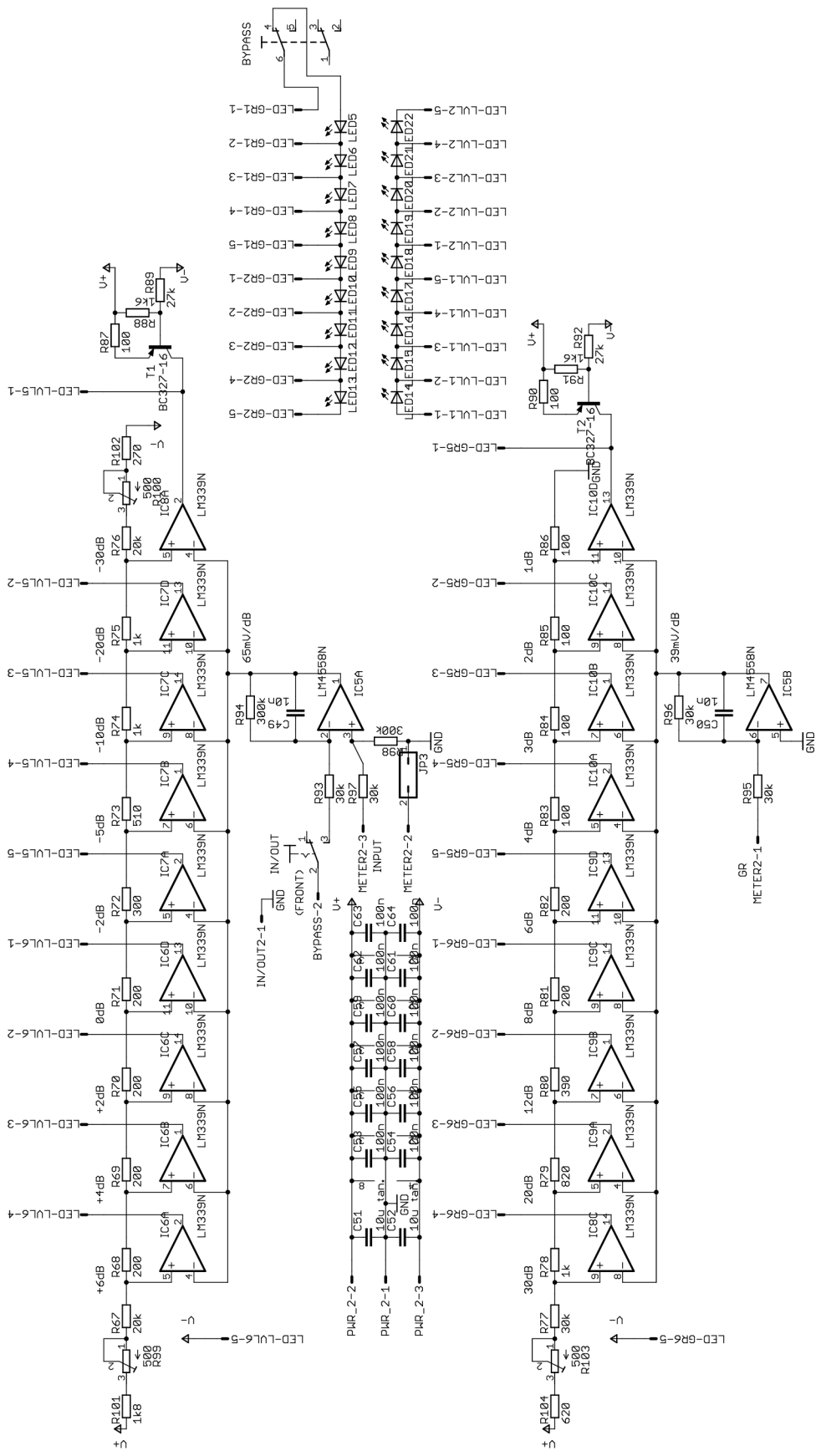
Obr. 10.1: Kompletní schéma návrhu VCA kompresoru - zdroj napájení



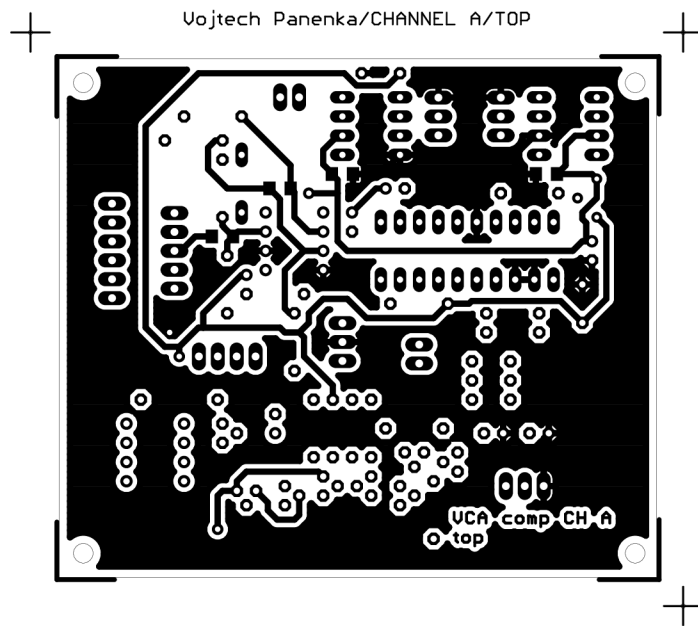
Obr. 10.2: Kompletní schéma návrhu VCA kompresoru - kanál A



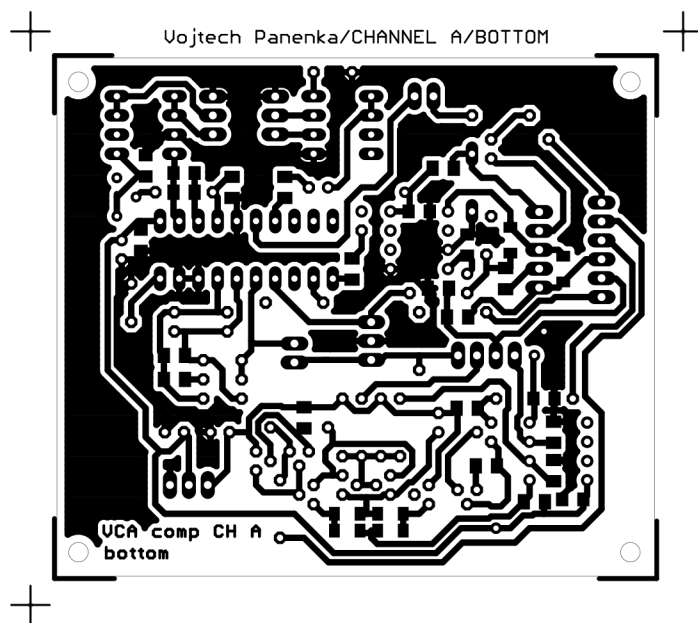
Obr. 10.3: Kompletní schéma návrhu VCA kompresoru - kanál B



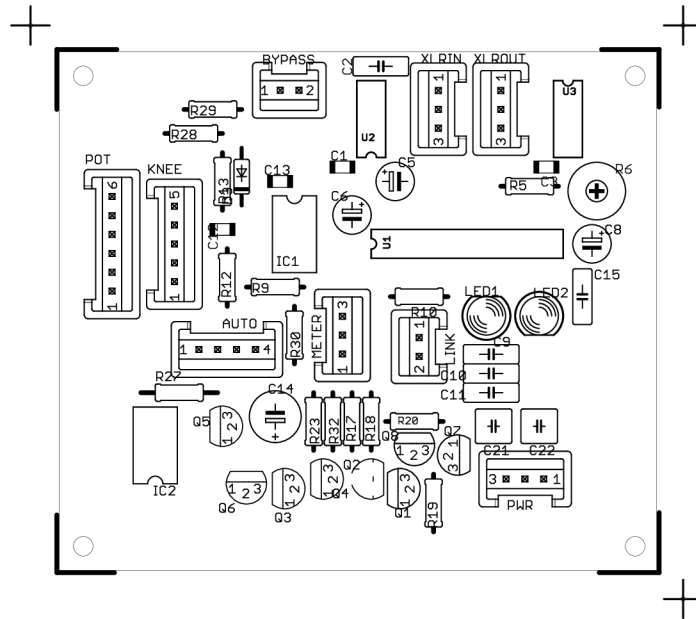
Obr. 10.4: Kompletní schéma návrhu VCA kompresoru - indikace vybudnění a gain reduction



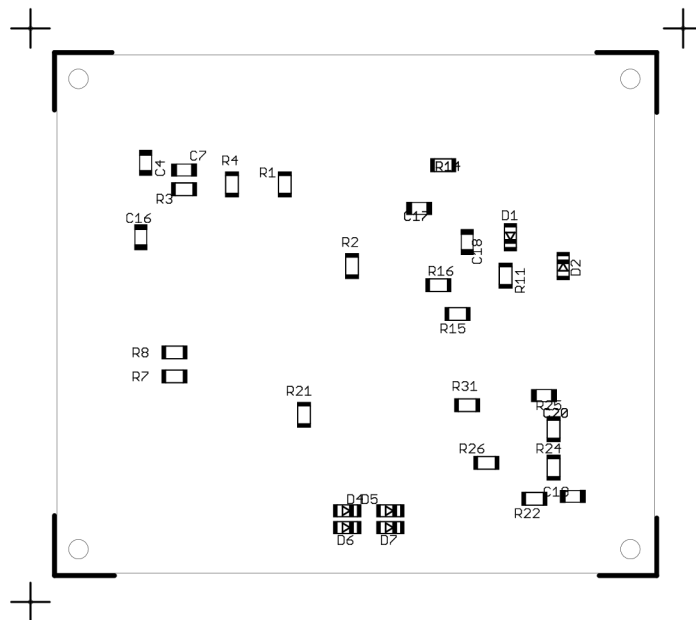
Obr. 10.5: DPS kanál A top



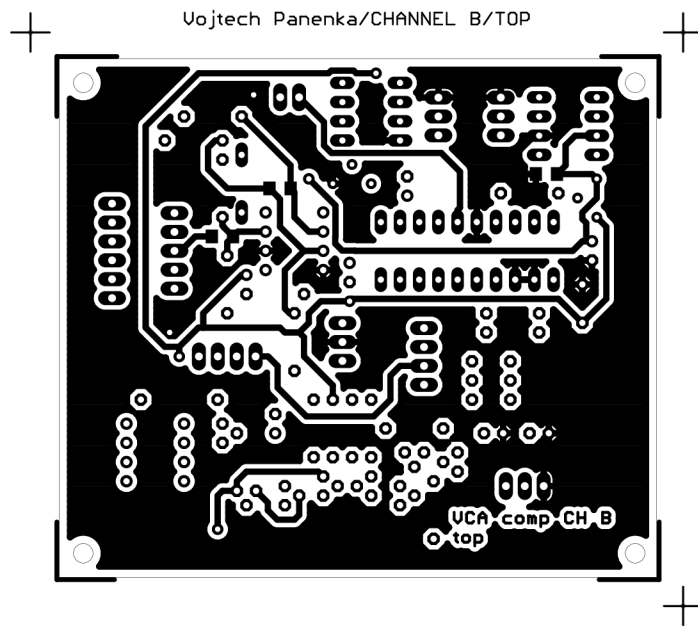
Obr. 10.6: DPS kanál A bottom



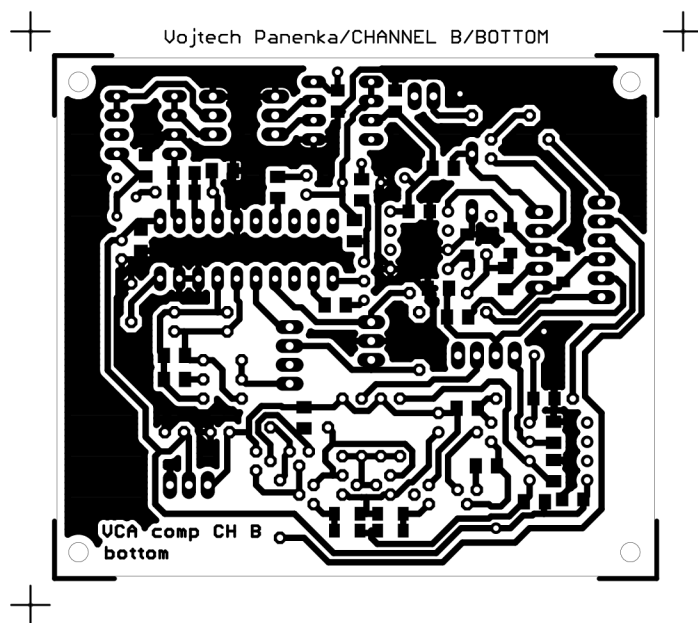
Obr. 10.7: DPS kanál A top - osazovací plán



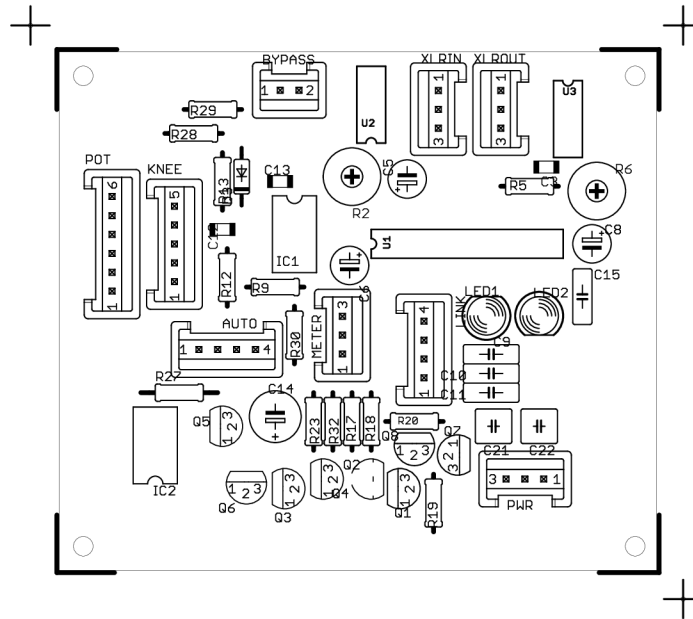
Obr. 10.8: DPS kanál A bottom - osazovací plán



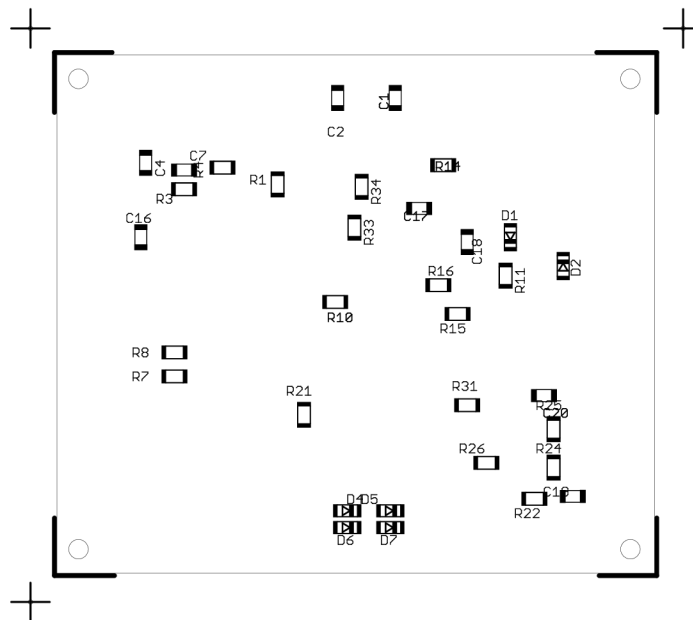
Obr. 10.9: DPS kanál B top



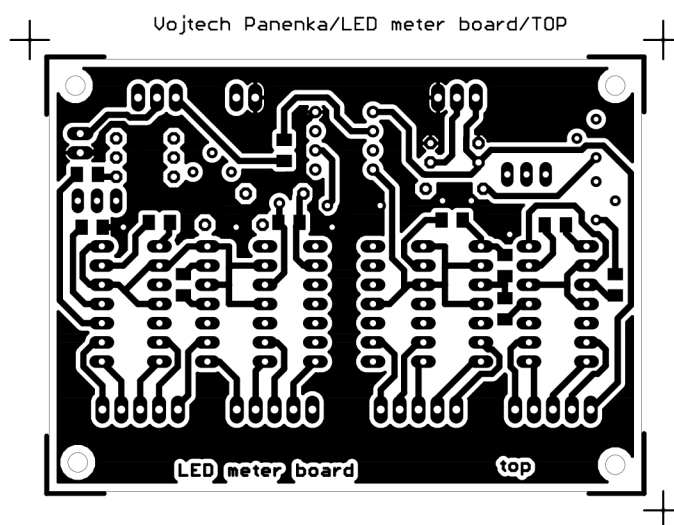
Obr. 10.10: DPS kanál B bottom



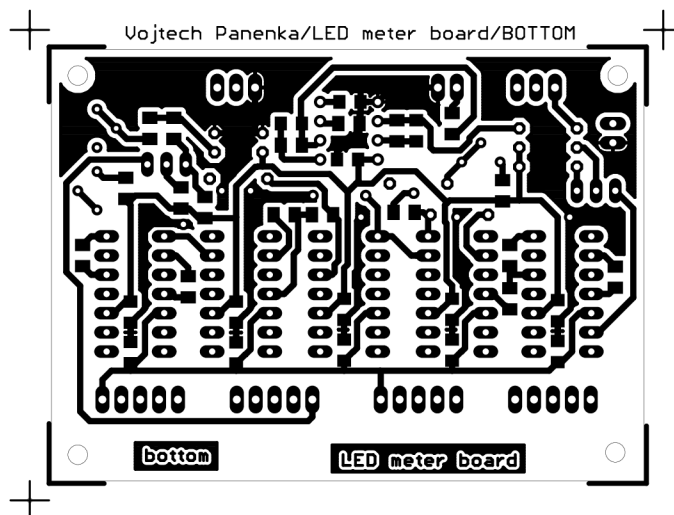
Obr. 10.11: DPS kanál B top - osazovací plán



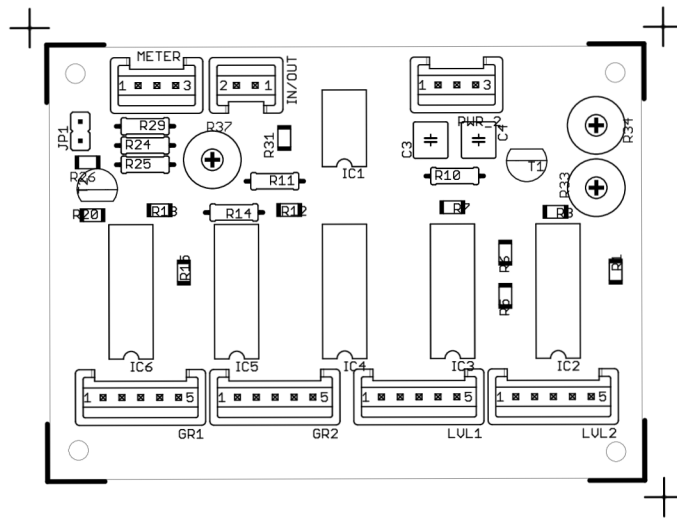
Obr. 10.12: DPS kanál B bottom - osazovací plán



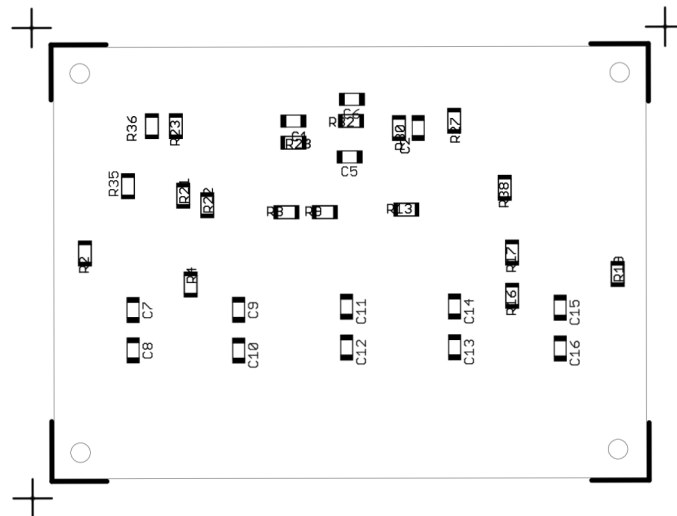
Obr. 10.13: DPS indikace top



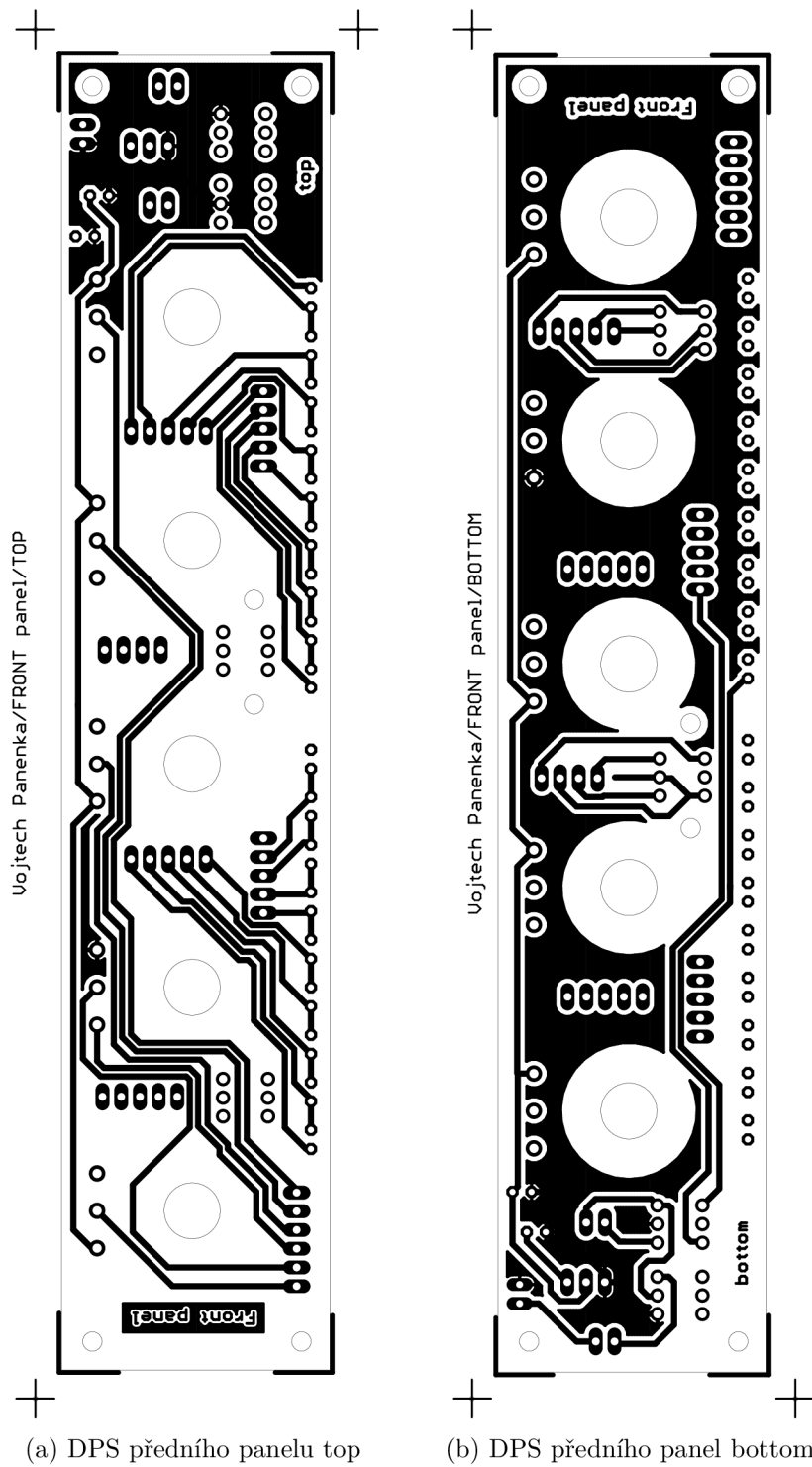
Obr. 10.14: DPS indikace bottom



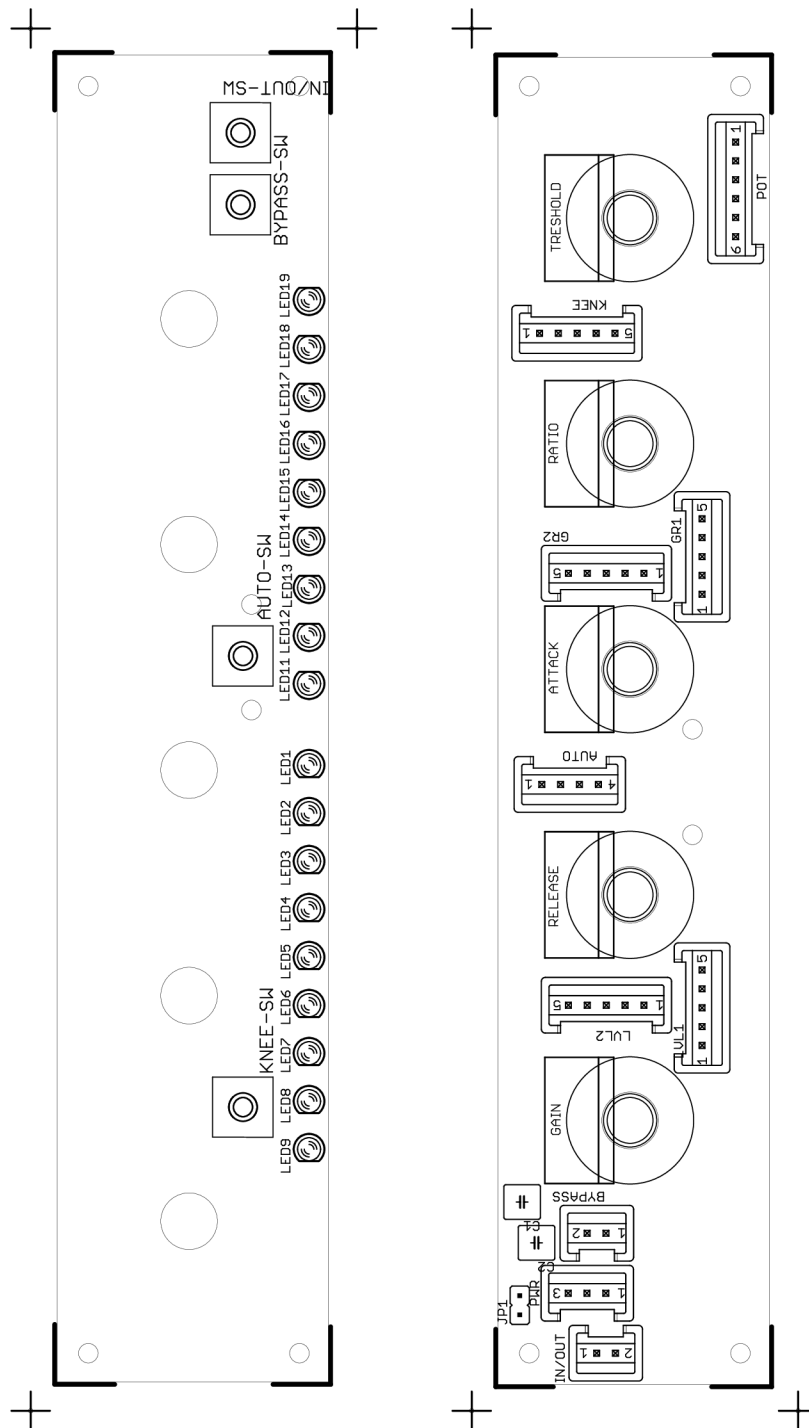
Obr. 10.15: DPS indikace top - osazovací plán



Obr. 10.16: DPS indikace bottom - osazovací plán



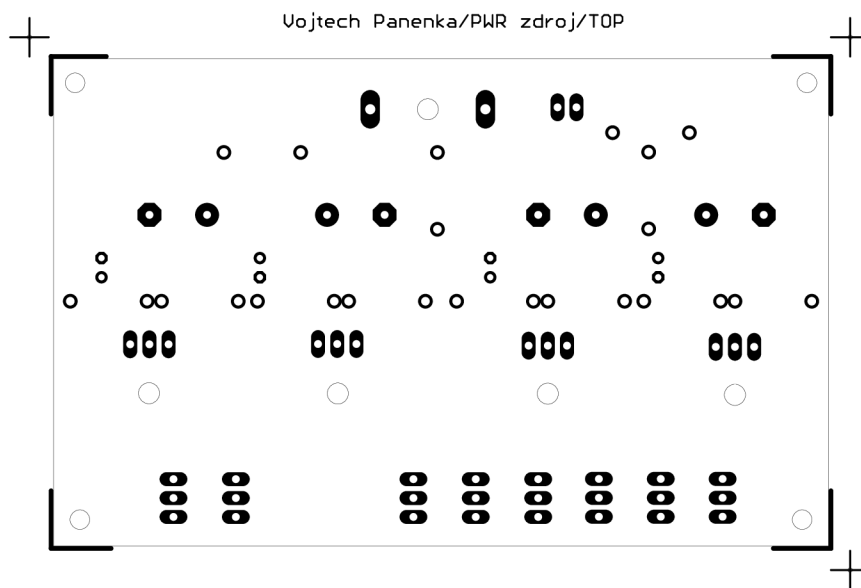
Obr. 10.17: DPS předního panelu



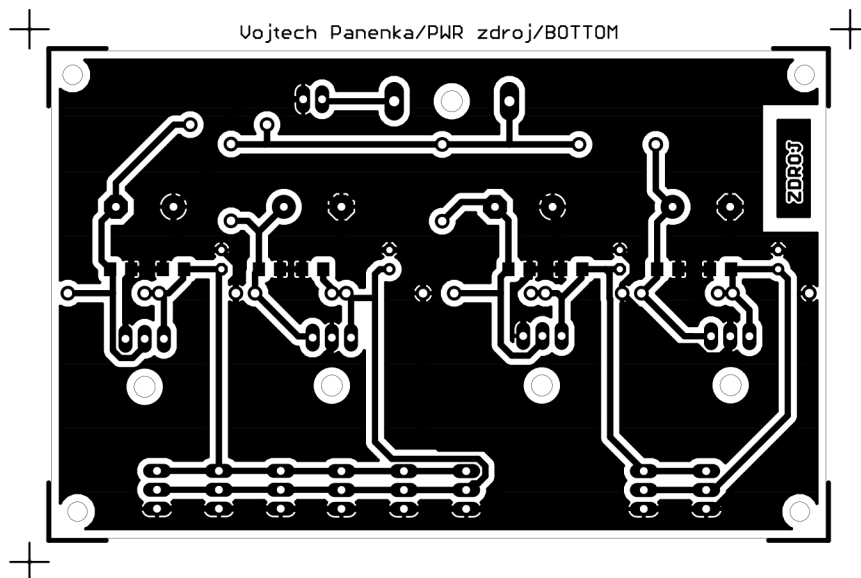
(a) DPS předního panel top - osazovací plán

(b) DPS předního panel bottom - osazovací plán

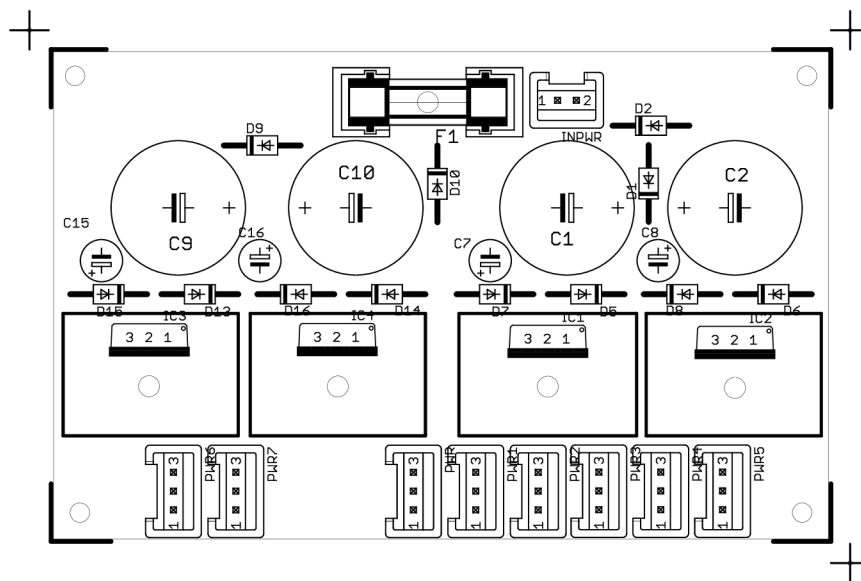
Obr. 10.18: DPS předního panelu - osazovací plán



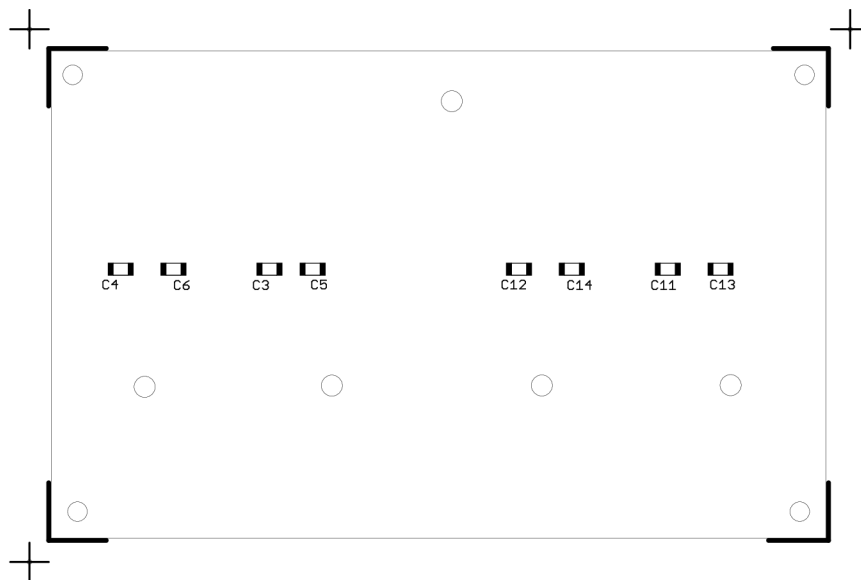
Obr. 10.19: DPS zdroje top



Obr. 10.20: DPS zdroje bottom



Obr. 10.21: DPS zdroje top - osazovací plán



Obr. 10.22: DPS zdroje bottom - osazovací plán