

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky  
a komunikačních technologií

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Brno, 2024

Matěj Hroch



# 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

**PRUŽINOVÝ REVERB**

SPRING REVERB

**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

BACHELOR'S THESIS

**AUTOR PRÁCE**

AUTHOR

**Matěj Hroch**

**VEDOUCÍ PRÁCE**

SUPERVISOR

**doc. Ing. David Kubánek, Ph.D.**

**BRNO 2024**

# Bakalářská práce

bakalářský studijní program **Audio inženýrství**  
specializace Zvuková produkce a nahrávání  
Ústav telekomunikací

**Student:** Matěj Hroch

**ID:** 239009

**Ročník:** 3

**Akademický rok:** 2023/24

**NÁZEV TÉMATU:**

## Pružinový reverb

### POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Prostudujte vlastnosti, parametry a možnosti realizace dozvukových efektů typu reverb. Zaměřte se na pružinový reverb a seznamte se s jeho principem a jednotlivými částmi. Pro vybraný hotový pružinový modul (reverb tank) navrhnete elektronické obvody umožňující jeho buzení a snímání signálů s ohledem na přenosové a impedanční vlastnosti měničů. Dále navrhnete ovládací prvky efektu a doplňte jej o další modifikace v podobě šumové brány a zavedení zpětné vazby. Funkčnost elektronických obvodů prověřte počítačovou simulací. Efekt prakticky realizujte na plošném spoji, umístěte do vhodné krabičky a proveďte měření jeho vlastností.

### DOPORUČENÁ LITERATURA:

[1] RÉVEILLAC, Jean-Michel. Musical Sound Effects: Analog and Digital Sound Processing. 1. London, UK: ISTE, 2018. ISBN 978-1-119-48262-8.

[2] Pružinový hal pro kytarová komba. Praktická elektronika C - Stavebnice a konstrukce, A Radio. Praha: Amaro, 2000, 4(3), 22-23. ISSN 1212-1843.

**Termín zadání:** 5.2.2024

**Termín odevzdání:** 28.5.2024

**Vedoucí práce:** doc. Ing. David Kubánek, Ph.D.

**doc. Ing. Jiří Schimmel, Ph.D.**  
předseda rady studijního programu

### 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**

Práce se zabývá návrhem analogového efektu typu reverb. Konkrétně se jedná o efekt, kde je dozvuk realizován pomocí pružinového modulu. Součástí práce je návrh obvodů pro buzení a snímání signálu a zároveň měření impedančních a přenosových vlastností pružinového modulu. V práci je brán zřetel na kompatibilitnost s běžně používanými audio zařízeními. Návrh je obohacen o šumovou bránu a zpětnou vazbu. Vzhledem k tendenci zachování vzhledu starých audio zařízení je návrh obohacen obvody pro použití analogových VU metrů. Součástí práce je návrh a konstrukce desky plošného spoje a následné měření vlastností efektu. V práci jsou využita již známá zapojení, která jsem zkoumal a vylepšoval.

## **Klíčová slova**

Dozvuk, efekt, pružinový modul, NE5532, šumová brána, VU metr

## **Abstract**

Bachelor thesis deals with design of analog reverb effect. Specifically, it deals with effect, where the reverberation is simulated by spring reverb tank. Thesis contains design of exciting and sensing circuits, also impedance and transmission features measuring. Final device should be compatible with common used audio devices. Reverb design is improved by adding noise gate and feedback. The thesis contains desingn of PCB and whole device construction. Features measuring is also contained. For retro design, VU meters circuits are added. The thesis contains already known circuits, which were tested and improved.

## **Keywords**

Reverberation, effect, spring reverb tank, NE5532, noise gate, VU meter

## **Bibliografická citace**

HROCH, Matěj. *Pružinový reverb*. Brno, 2024. Dostupné také z: <https://www.vut.cz/studenti/zav-prace/detail/159290>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav telekomunikací. Vedoucí práce David Kubánek.

## Prohlášení autora o původnosti díla

**Jméno a příjmení studenta:** Matěj Hroch  
**VUT ID studenta:** 239009  
**Typ práce:** Bakalářská práce  
**Akademický rok:** 2023/24  
**Téma závěrečné práce:** Pružinový reverb

Prohlašuji, že svou závěrečnou práci jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucí/ho závěrečné 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 závěrečné práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této závěrečné práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si 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.

V Brně dne:

-----  
podpis autora

## **Poděkování**

Děkuji vedoucímu bakalářské práce doc. Ing. Davidovi Kubánkovi, Ph. D. za odbornou pomoc, ochotu a cenné rady při zpracování mé bakalářské práce.

V Brně dne:

-----  
podpis autora

# Obsah

<b>SEZNAM OBRÁZKŮ .....</b>	<b>9</b>
<b>ÚVOD .....</b>	<b>11</b>
<b>1. TEORETICKÝ ÚVOD .....</b>	<b>12</b>
1.1 VÝVOJ DOZVUKOVÝCH EFEKTŮ TYPU REVERB .....	12
1.2 POUŽITÍ DOZVUKOVÝCH EFEKTŮ TYPU REVERB .....	12
1.3 PRUŽINOVÝ REVERB .....	12
<b>2. NÁVRH CELKOVÉ KONCEPCE ZAŘÍZENÍ .....</b>	<b>14</b>
2.1 MĚŘENÍ PRUŽINOVÉHO MODULU .....	14
2.1.1 Měření stejnosměrného odporu cívek .....	14
2.1.2 Měření vstupní a výstupní impedance .....	15
2.1.3 Měření přenosu pružinového modulu .....	16
2.1.4 Měření impulsní odezvy pružinového modulu .....	17
2.1.5 Měření náběhu a doznívání pružinového modulu .....	18
2.2 CELKOVÉ BLOKOVÉ SCHÉMA .....	19
2.3 POTŘEBNÉ OVLÁDACÍ PRVKY .....	20
2.4 ZÁKLADNÍ PRVKY .....	20
2.5 PŘIDANÉ PRVKY .....	21
<b>3. JEDNOTLIVÉ BLOKY ZAŘÍZENÍ .....</b>	<b>22</b>
3.1 VSTUPNÍ OBVODY .....	22
3.2 NÁVRH OBVODŮ KOLEM PRUŽINOVÉHO MODULU .....	23
3.3 NÁVRH ŠUMOVÉ BRÁNY .....	25
3.4 NÁVRH VÝSTUPNÍCH OBVODŮ .....	26
3.5 NÁVRH OBVODŮ PRO VU METRY .....	27
3.6 NÁVRH NAPÁJECÍHO ZDROJE .....	29
3.7 NAPĚŤOVÉ ÚROVNĚ JEDNOTLIVÝCH BLOKŮ .....	29
<b>4. SIMULACE A TESTOVÁNÍ .....</b>	<b>31</b>
4.1 SIMULACE VSTUPNÍCH OBVODŮ .....	31
4.2 SIMULACE PRUŽINOVÉHO MODULU .....	33
4.3 SIMULACE A TESTOVÁNÍ ŠUMOVÉ BRÁNY .....	35
<b>5. NÁVRH DESKY PLOŠNÝCH SPOJŮ .....</b>	<b>37</b>
5.1 NÁVRH HLAVNÍ DESKY .....	37
5.2 NÁVRH DESKY PRO KONEKTORY .....	39
5.3 OSAZOVÁNÍ DESEK .....	41
<b>6. MECHANICKÁ KONSTRUKCE ZAŘÍZENÍ .....</b>	<b>43</b>
6.1 NÁVRH ČELNÍHO PANELU .....	43
6.2 ZADNÍ KONEKTORY .....	43
6.3 KOMPLETACE ZAŘÍZENÍ .....	44
<b>7. MĚŘENÍ A TESTOVÁNÍ HOTOVÉHO ZAŘÍZENÍ .....</b>	<b>46</b>
7.1 NASTAVENÍ VU METRŮ .....	46



7.2	MĚŘENÍ PŘESNOSTI VU METRŮ .....	46
7.3	OVĚŘENÍ FUNKCE VSTUPNÍCH RF FILTRŮ .....	47
7.4	OVĚŘENÍ FUNKCE ODDĚLOVACÍCH KONDENZÁTORŮ .....	48
7.5	MĚŘENÍ PRONIKÁNÍ RUŠENÍ Z NAPÁJECÍHO ZDROJE .....	49
7.6	MĚŘENÍ POMOCÍ AUDIO FX ANALYZER .....	49
<b>8.</b>	<b>ZÁVĚR.....</b>	<b>54</b>
	<b>LITERATURA.....</b>	<b>55</b>
	<b>SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK .....</b>	<b>56</b>
	<b>SEZNAM PŘÍLOH.....</b>	<b>57</b>

# SEZNAM OBRÁZKŮ

1.1	Cívka s jádrem a pružinami.....	13
1.2	Schéma pružinového reverbu [1].....	13
2.1	Pružinový modul.....	14
2.2	Závislost vstupní impedance na kmitočtu.....	15
2.3	Závislost výstupní impedance na frekvenci.....	16
2.4	Měření přenosu pružinového modulu – modul přenosu.....	16
2.5	Měření impulsní odezvy.....	17
2.6	Měření impulsní odezvy – detail na první zákmity.....	18
2.7	Měření doby náběhu pružinového modulu.....	18
2.8	Měření doby doznívání pružinového modulu.....	19
2.9	Celkové blokové schéma zařízení.....	19
3.1	Schéma vstupních obvodů.....	22
3.2	Výchozí schéma šumové brány [6].....	25
3.3	Výsledné schéma šumové brány.....	26
3.4	Schéma výstupních obvodů.....	27
3.5	Schéma VU metru [2].....	27
3.6	Schéma obvodů pro VU metry.....	28
3.7	Schéma napájecího zdroje.....	29
3.8	Graf napěťových úrovní jednotlivých bloků.....	30
4.1	Schéma vstupních obvodů v programu LTSpice.....	31
4.2	Modulová kmitočtová charakteristika RF filtru.....	31
4.3	Simulace funkce oddělení stejnosměrné složky.....	32
4.4	Simulace funkce omezení přepětí.....	32
4.5	Náhradní obvody pro simulaci pružinového modulu.....	33
4.6	Vybíjení kondenzátoru C3 po vypnutí budícího zdroje.....	34
4.7	Výsledný průběh simulace pružinového modulu.....	34
4.8	Schéma šumové brány v programu LTSpice.....	35
4.9	Krokování odporu potenciometru šumové brány.....	36
4.10	Vliv kapacity C3 na časový průběh napětí na hradlech MOSFETů.....	36
5.1	Návrh DPS – hlavní deska.....	37
5.2	Propojení zemí na hlavní desce.....	38
5.3	Hotová hlavní deska – horní a dolní strana.....	39
5.4	Schéma desky pro konektory.....	40
5.5	Návrh DPS – deska pro konektory.....	40
5.6	Hotová deska pro konektory – horní a dolní strana.....	40
5.7	Osazená hlavní deska s měřicími vývody.....	41
5.8	Osazená deska pro konektory s měřicími vývody.....	42
6.1	Návrh čelního panelu v SolidWorks.....	43
6.2	Neosazený zadní panel.....	43
6.3	Osazený zadní panel.....	44
6.4	Vnitřní rozmístění všech součástí.....	45
6.5	Čelní pohled na hotové zařízení.....	45
7.1	Graf porovnání indikované a měřené hodnoty.....	47
7.2	Ověření funkce RF filtrů.....	48
7.3	Ověření funkce oddělovacích kondenzátorů.....	48
7.4	Měření pronikání rušení z napájecího zdroje.....	49

7.5	Kmitočtová odezva nefektovaného signálu .....	50
7.6	Kmitočtová odezva efektového signálu.....	50
7.7	Kmitočtová odezva efektovaného signálu se zavedením zpětné vazby .....	51
7.8	Impulsní odezva pro efektovaný signál – 1000 ms .....	51
7.9	Impulsní odezva pro efektovaný signál se zpětnou vazbou – 1000 ms .....	52
7.10	Impulsní odezva pro efektovaný signál – 5000 ms .....	52
7.11	Impulsní odezva pro efektovaný signál se zpětnou vazbou – 5000 ms .....	53

# ÚVOD

Trendem dnešní doby je nahrazování analogových audio zařízení počítačovými simulacemi. Ovšem určitá zařízení stále nachází uplatnění pro své specifické vlastnosti. Často se jedná v podstatě o nedokonalosti (nelinearita, zkreslení), které jsou ale na poslech při správném použití příjemné. Hlavní výhoda počítačových simulací tkví v jednoduchosti použití a také v dostupnosti. Toho využívají zejména začínající muzikanti a producenti, kteří si nemohou dovolit nákladná a na provoz náročná analogová zařízení.

Trend digitální hudby je ovšem čím dál častěji vyvracen lidmi, kteří se vracejí zpět k analogovým zařízením. Můžeme pozorovat rozmach vinylových desek a gramofonů.

V komerčních studiích jsou rackové skříně s analogovými audio zařízeními standardem. Klient má díky tomu mnohem širší řadu možností. U některých producentů či interpretů je vybavení stěžejním hlediskem pro výběr nahrávacího studia.

Cílem práce je vytvořit samostatný analogový efekt typu reverb, který využívá pružinový modul a je možné jej použít s běžně používanými audio zařízeními.

# 1. TEORETICKÝ ÚVOD

V následující kapitole jsou představeny základní typy dozvukových efektů typu reverb, jejich realizace, využití těchto efektů a detailnější popis pružinového reverbu. Informace pro kapitolu byly čerpány z knihy [1], kde lze dohledat podrobnější informace o vývoji dozvukových efektů.

## 1.1 Vývoj dozvukových efektů typu reverb

V moderní hudební produkci zastávají dozvukové efekty nezbytnou součást zejména při nahrávání po stopách, kdy je dozvuk přidán v postprodukci.

Původně se k přidání dozvuku do nahrávky využívaly místnosti s různou dobou dozvuku a rozličnými odrazivostmi stěn. Do této místnosti byl umístěn reproduktor a jeden či více mikrofonů. Tímto stylem přidávání dozvuku je vyhlášené studio Abbey Road.

Snaha šetřit náklady a prostory vedla k použití mechanických prvků pro simulaci dozvuku. Těmito prvky jsou pružiny nebo plechové pláty (odtud název používaný dodnes – „plate reverb“). V obou případech je nutné měnit elektrickou energii na mechanickou a naopak. Pružinový reverb má pouze jeden rozměr (délka pružin). Výhoda plechového plátu spočívá v možnosti umístění budičů a snímačů v různých místech plechového plátu a využívat tak jeho rezonančních módů.

S rozvojem počítačů došlo k značnému nárůstu možností realizace dozvukových efektů. Běžnou praxí je simulování dozvuku prostoru podle jeho známé impulsní odezvy pomocí konvoluce – konvoluční reverb.

## 1.2 Použití dozvukových efektů typu reverb

V dnešní době je velmi časté nahrávání playbackem, každý nástroj je tedy nahráván zvlášť. Jelikož je těžké předpokládat potřebnou dobu dozvuku, jsou jednotlivé stopy nahrávány s minimálním přirozeným dozvukem. Za tímto účelem bývají v komerčních studiích izolační kabiny, které jsou zevnitř obloženy akustickými absorbéry.

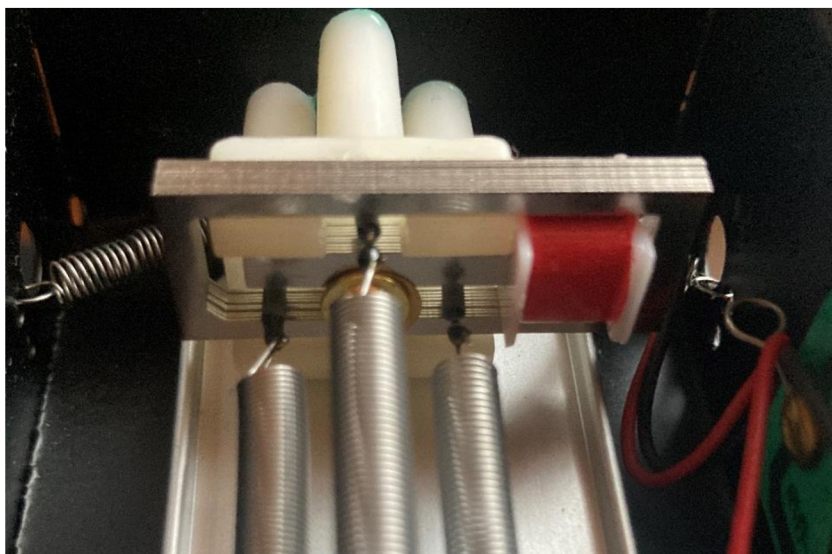
Dozvuk je přidán do nahrávky pomocí externího efektu. Zásadní výhoda tkví v možnosti následné úpravy tohoto dozvuku (úroveň, dynamické efekty, kmitočtové filtry). Popřípadě lze použít více různých typů reverbu.

## 1.3 Pružinový reverb

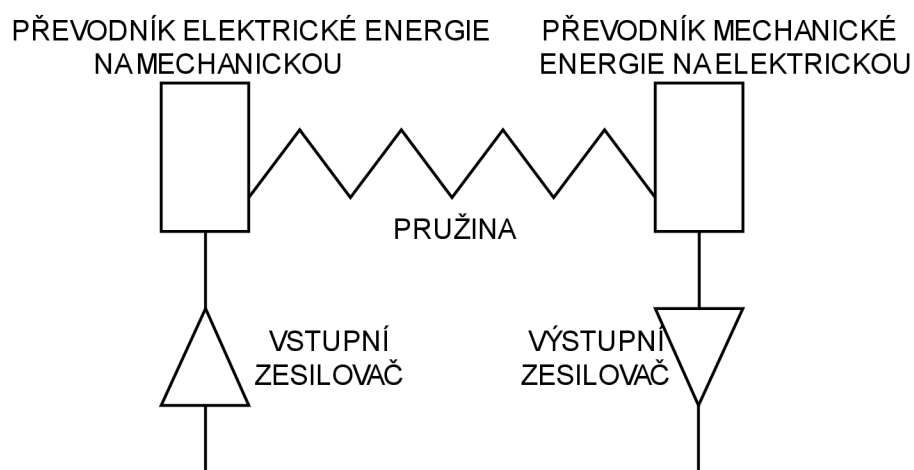
Pružinový reverb sice nepřináší věrnou simulaci prostoru, je ovšem používán dodnes pro své specifické vlastnosti.

V běžném pružinovém reverbu můžeme najít 3 a více pružin různých typů. Pružiny se liší například tloušťkou drátu nebo počtem závitů. Rozdílné vlastnosti pružin vedou

k obohacení výsledného zvuku. Převod elektrické energie na mechanickou (a naopak) zajišťují cívky s jádry. Tato jádra jsou složena z plechů podobně jako transformátory s plechy tvaru „E“ a „I“. Konce pružin, které procházejí jádry cívek, jsou opatřeny malými permanentními magnety, jak je patrné z obrázku 1.1. Díky proměnnému proudu procházejícím budicí cívkou vzniká kolem jádra proměnné magnetické pole, které rozechvívá pružiny. Snímací cívka funguje recipročně, kdy proměnný proud se v cívce indukuje díky proměnnému magnetickému poli způsobenému pohybujícími se magnety na koncích pružin. Shrnující blokové schéma modulu je na obr. 1.2.



Obrázek 1.1 Cívka s jádrem a pružinami



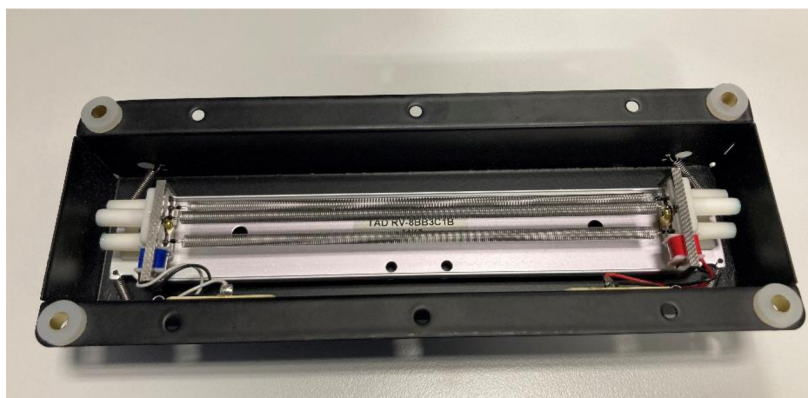
Obrázek 1.2 Schéma pružinového reverbu [1]

## 2. NÁVRH CELKOVÉ KONCEPCE ZAŘÍZENÍ

V kapitole je popsán návrh efektu jako celku. Při návrhu byl brán zřetel na určité zaběhlé standardy v audiotechnice.

Výsledným zařízením by měl být efekt, který lze namontovat do devatenáctipalcové rackové skříně. Vstup a výstup efektu by měl být možný pomocí konektoru TRS jack nebo XLR (symetrický vstup a výstup) nebo pomocí konektoru TS jack (nesymetrický vstup a výstup). Toto zařízení by obsahovalo vlastní napájecí zdroj. Při návrhu je důležité brát zřetel na vhodný výběr ovládacích prvků a také i na celkový vzhled.

### 2.1 Měření pružinového modulu



Obrázek 2.1 Pružinový modul

Zakoupený pružinový modul (na obr. 2.1) nese označení 8BB3C1B. K tomuto modulu nebyl dodán katalogový list a na internetu jsou pod tímto označením uvedeny různé parametry. Zásadní parametry, které je zapotřebí o modulu zjistit jsou:

- Vstupní impedance
- Stejnoseměrný odpor vstupní cívky
- Výstupní impedance
- Stejnoseměrný odpor výstupní cívky
- Přenos

Jelikož se na vstupu i výstupu pružinového modulu nachází cívky, lze počítat s čistě induktivní zátěží.

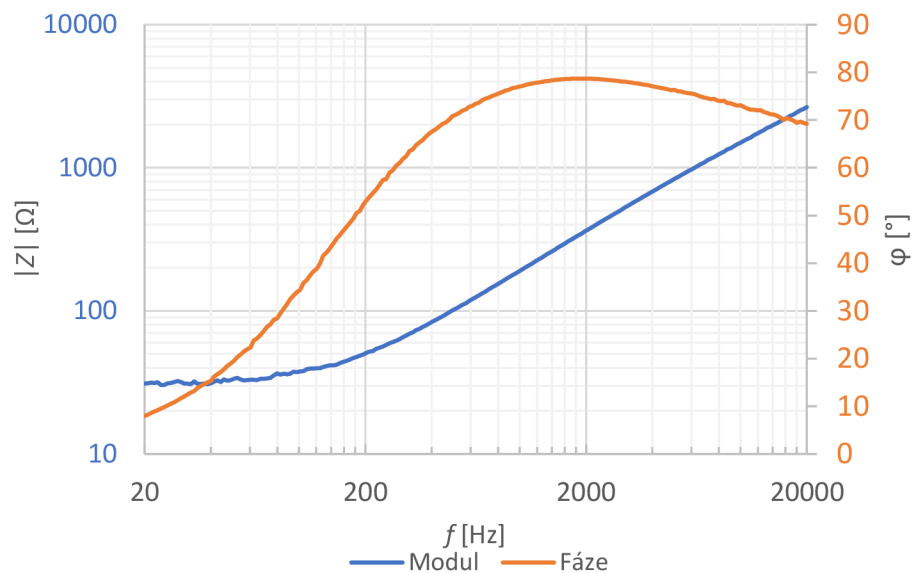
#### 2.1.1 Měření stejnosměrného odporu cívek

Stejnoseměrný odpor vstupní a výstupní cívky byl změřen multimetrem Agilent 34401A. Zjištěný stejnosměrný odpor vstupní cívky je  $29 \Omega$  a odpor výstupní cívky  $236 \Omega$ .

### 2.1.2 Měření vstupní a výstupní impedance

Toto měření bylo realizováno pomocí přístroje Bode 100. Před měřením došlo ke kalibraci přístroje s otevřeným obvodem a obvodem na krátko.

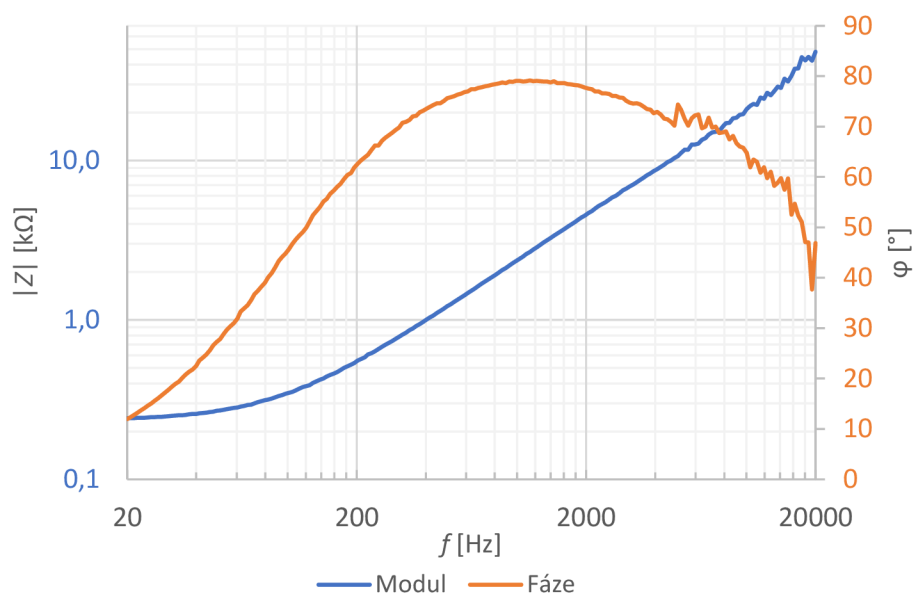
Vstupní impedance představuje důležitou informaci společně se stejnosměrným odporem vstupní cívky, neboť touto impedancí bude zatížen zesilovač budící pružinový modul. Z výsledného grafu na obrázku 2.2 lze vyčíst, že na nízkých kmitočtech je impedance v podstatě rovna stejnosměrnému odporu. Impedance roste s kmitočtem už od 100 Hz, znatelnější nárůst je ovšem až za hranicí 1 kHz. Průměrný operační zesilovač lze zatížit minimální impedancí přibližně 500  $\Omega$ . Tuto impedanci má cívka až při kmitočtu 3 kHz, proto bude výhodné zvolit pro buzení cívky spíše koncový zesilovač.



Obrázek 2.2 Závislost vstupní impedance na kmitočtu

Měření výstupní impedance probíhalo obdobně, zjištěné hodnoty impedance byly vyšší a jsou patrné z grafu na obrázku 2.3. Výstupní impedance nepředstavuje pro návrh tolik zásadní informaci, neboť za výstupní cívku pružinového modulu lze zařadit napěťový sledovač s OZ, který má velmi vysokou vstupní impedanci.

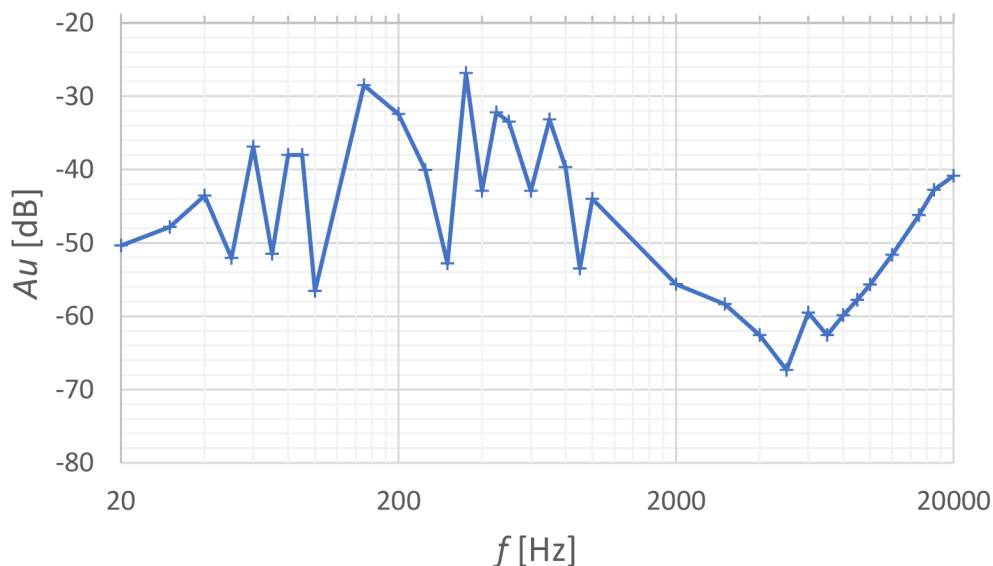




Obrázek 2.3 Závislost výstupní impedance na frekvenci

### 2.1.3 Měření přenosu pružinového modulu

Měření pružinového modulu probíhalo pomocí generátoru a osciloskopu. Na nepájivém poli byl sestaven obvod emitorového sledovače pro impedanční přizpůsobení. Přeladování frekvence probíhalo na generátoru ručně a hodnoty napětí byly odečítány na osciloskopu. Výsledky byly vyneseny do grafu na obr. 2.4.

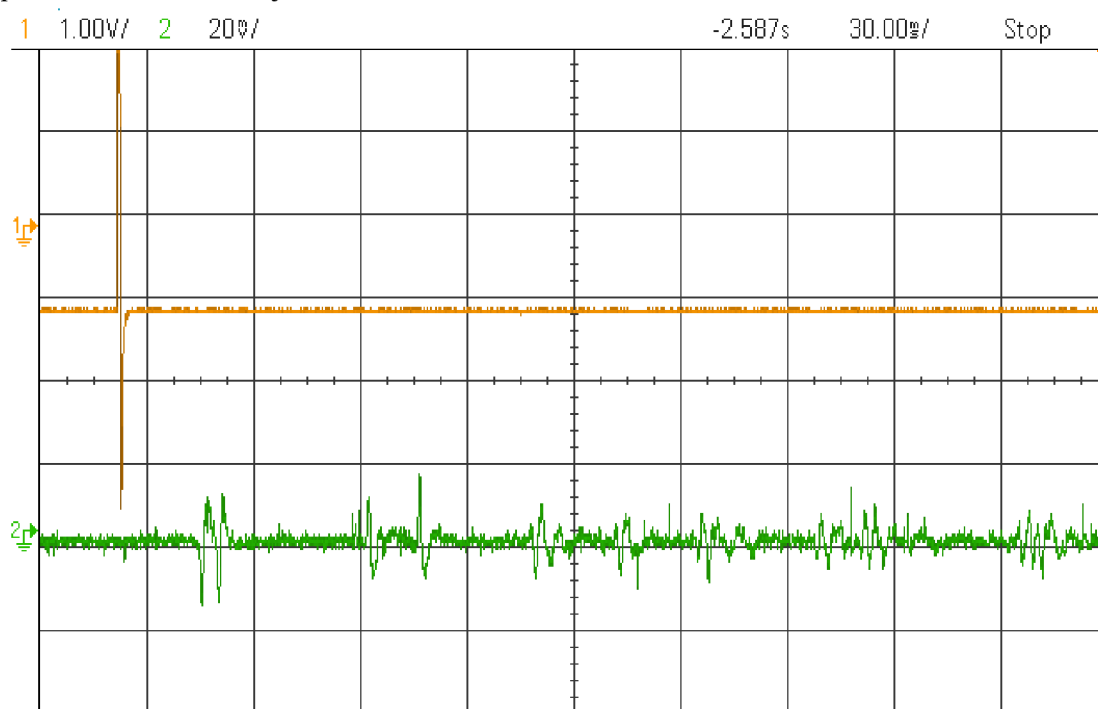


Obrázek 2.4 Měření přenosu pružinového modulu – modul přenosu

Z grafu lze pozorovat, že modul přenosu je značně proměnlivý. Díky mechanickým vlastnostem pružin dochází na určitých kmitočtech k rezonancím, což se projevuje zvýšením modulu přenosu.

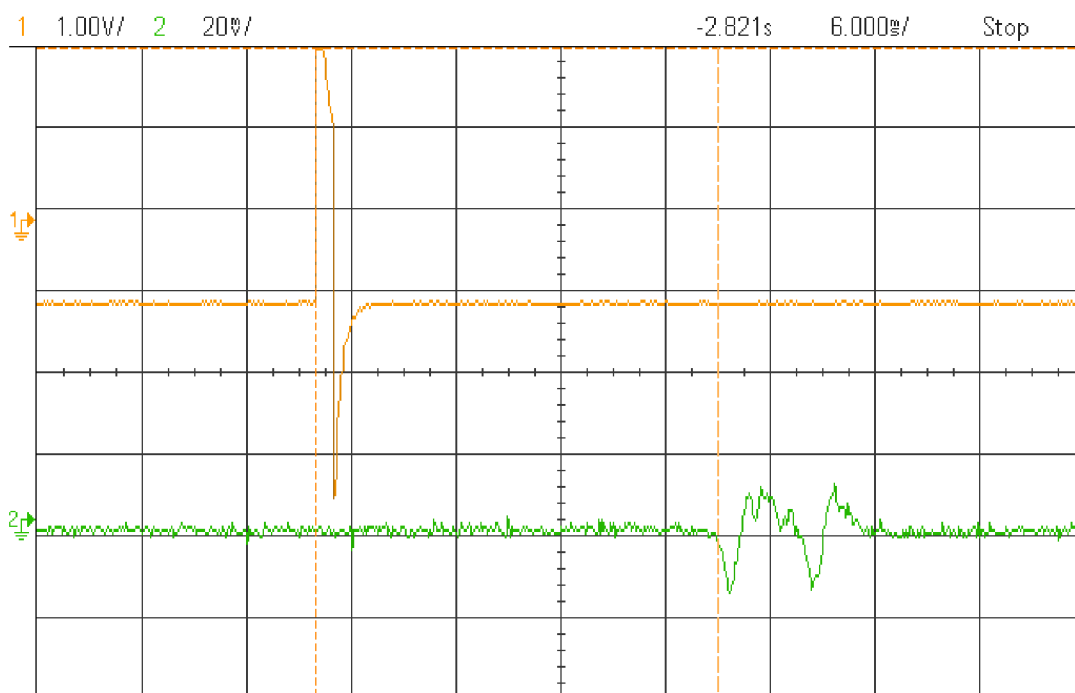
#### 2.1.4 Měření impulsní odezvy pružinového modulu

Pro měření impulsní odezvy byl využit generátor a osciloskop, kdy na generátoru byl nastaven impuls o amplitudě 2 V a délce 1,5 ms. Na vstupu pružinového modulu byl opět připojen emitorový sledovač pro impedanční přizpůsobení. Výsledný průběh na výstupu pružinového modulu je znázorněn zeleně na obr. 2.5.



Obrázek 2.5 Měření impulsní odezvy

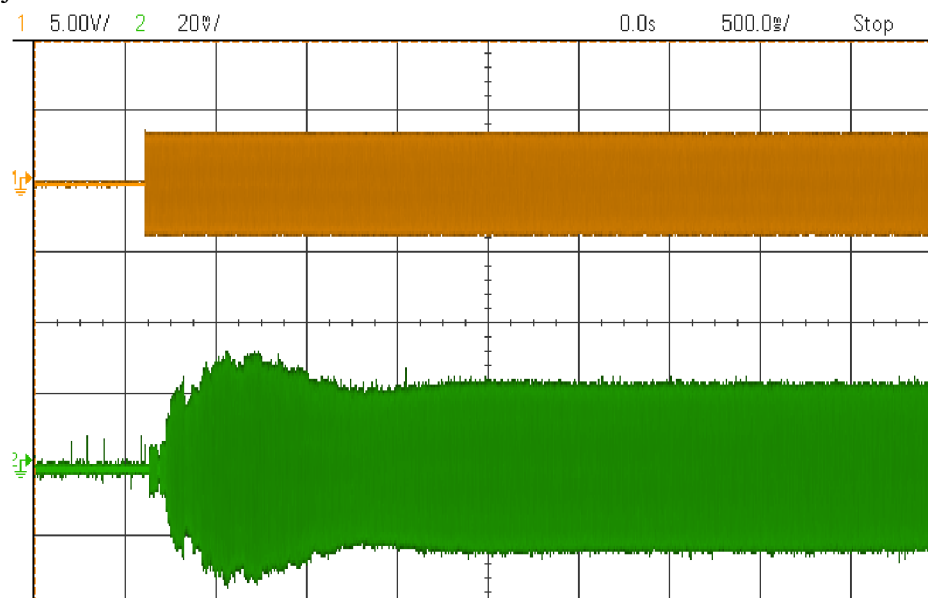
Na výstupním průběhu jsou patrné první dva zákmity, které jsou detailněji znázorněny na obr. 2.6. První z nich nastane po 23 ms po vstupním impulsu, druhý po 28 ms. Další znatelné zákmity jsou patrné 70 a 85 ms po vstupním impulsu. Hodnoty napětí těchto impulsů jsou velmi nízké (přibližně 20 mV<sub>pp</sub>).



Obrázek 2.6 Měření impulsní odezvy – detail na první zákmity

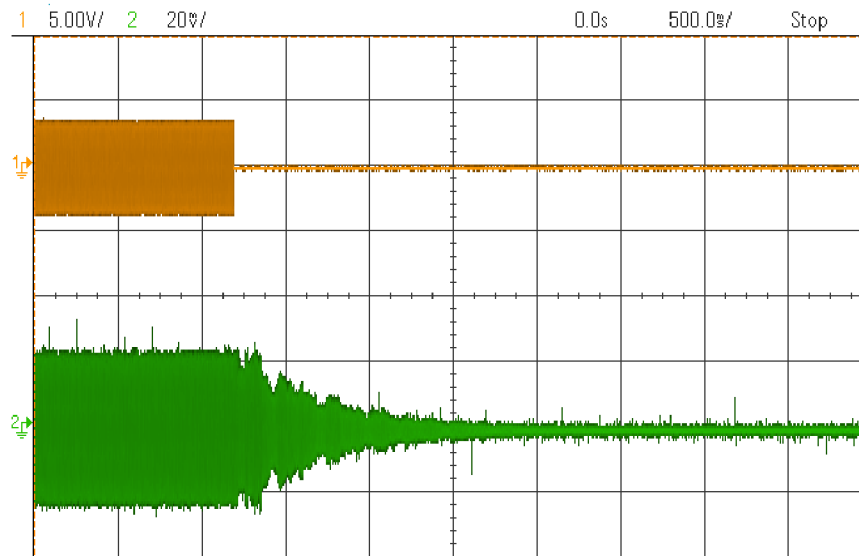
### 2.1.5 Měření náběhu a doznívání pružinového modulu

Po změření impulsní odezvy byl na generátoru nastaven harmonický signál o amplitudě 6 V<sub>pp</sub> a kmitočtu 1 kHz. Na výstupu pružinového modulu bylo možné pozorovat výraznější nárůst napětí přibližně až po 100 ms po zapnutí buzení. Průběh na výstupu modulu je znázorněn zeleně na obr. 2.7.



Obrázek 2.7 Měření doby náběhu pružinového modulu

Po vypnutí budícího zdroje dojde k povlnnému doznívání napětí na výstupu pružinového modulu. Tento děj trvá přibližně 2 sekundy a je znázorněn zeleným průběhem na obr. 2.8.



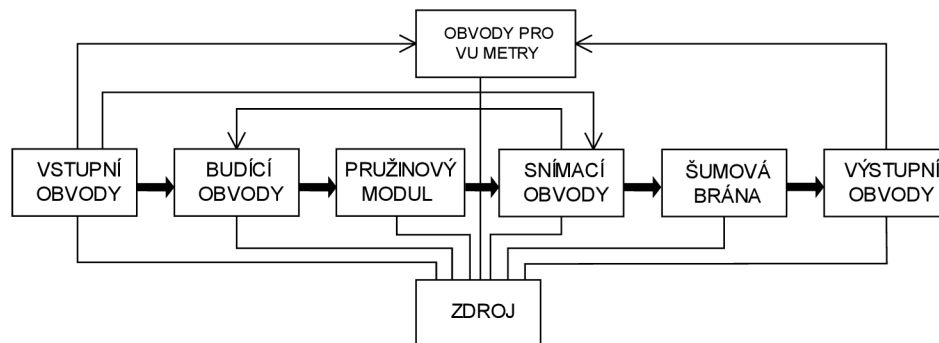
Obrázek 2.8 Měření doby doznívání pružinového modulu

## 2.2 Celkové blokové schéma

Pro pružinový modul je zapotřebí navrhnout budící a snímací obvody. Aby bylo možné do zařízení přivádět symetrický i nesymetrický signál, je nutné vhodně navrhnout vstupní obvody. Ostatní obvody budou pracovat se signálem nesymetrickým. Aby byl výstup zařízení symetrický i nesymetrický, je zapotřebí navrhnout vhodné výstupní obvody.

Přidanou hodnotou zařízení je zabudování šumové brány, jejíž obvod je nutné navrhnout. Šumová brána je zařazena za snímací obvody pružinového modulu. Další obohacení představují VU metry, pro které je zapotřebí navrhnout potřebné obvody. Poslední obohacení spočívá v zavedení zpětné vazby.

Pro napájení všech obvodů se ve schématu vyskytuje zdroj.



Obrázek 2.9 Celkové blokové schéma zařízení

## 2.3 Potřebné ovládací prvky

V praxi se můžeme setkat s různými provedeními dozvukových efektů typu reverb. Mezi základní ovládací prvky patří:

- Vstupní a výstupní úroveň
- Predelay
- Poměr dry/wet
- Čas dozvuku

U některých efektů lze ovládat i obálku ADSR, přidávat filtry, dynamické efekty apod., popřípadě lze vybrat impulsní odezvu.

U pružinového reverbu jsou možnosti ovládnání omezeny konstrukcí pružinového modulu a celkovou koncepcí efektu. Délka pružin je stále stejná a nemají žádné přidané mechanické tlumení, díky čemuž nelze ovládat dobu dozvuku. Také nepřipadá v úvahu ovládnání obálky ADSR.

Pro ovládnání navrhovaného zařízení byly vybrány následující základní ovládací prvky:

- Vstupní úroveň
- Výstupní úroveň
- Úroveň čistého signálu – „dry“
- Úroveň dozvuku – „wet“

## 2.4 Základní prvky

Srdcem celého efektu je již zmíněný pružinový modul. Pro tento modul je zapotřebí budič, který na svém výstupu snese nízkou impedanci. Na druhém konci modulu je nutné navrhnout snímací obvod s dostatečným zesílením pro kompenzaci útlumu pružinového modulu.

Na vstupu zařízení je zapotřebí zajistit převod symetrického signálu na nesymetrický a zařadit zesilovač s nastavitelným zesílením pro ovládnání vstupní citlivosti. Zároveň je zapotřebí přidat ochranné obvody zabraňující zničení zařízení.

Naopak na výstupu zařízení je nutné nesymetrický signál převést na symetrický. Opět je nutné zařadit zesilovač s ovladatelným zesílením, díky čemuž bude zajištěno ovládnání výstupní úrovně.

Aby bylo možné ovládat množství čistého signálu a dozvuku, je nutné za snímací obvod pružinového modulu zařadit sumační zesilovač, kdy úroveň jednotlivých větví bude možné ovládat pomocí potenciometrů.

## 2.5 Přidané prvky

U některých dostupných efektů typu reverb můžeme vidět obohacení, pro která může být daný reverb žádán. Pro navrhované zařízení byla vybrána obohacení v podobě šumové brány a zpětné vazby. Pro obohacení designu jsou do návrhu zařazeny VU metry.

Kombinace reverbu a šumové brány je poměrně často užívána. Typické využití je u bicí soupravy, konkrétně tom tomů. Prahová úroveň šumové brány bývá nastavena na vysokou hodnotu. Díky šumové bráně je upravena ADSR obálka průběhu signálu, kdy má reverb výrazně zkrácený sustain a release. Zavedením šumové brány přibude v návrhu další ovládací prvek – prahová úroveň (threshold).

Zpětná vazba bývá zavedena spíše u efektů typu delay. Nicméně u pružinového reverbu může představovat zajímavé obohacení. Úroveň zpětné vazby představuje další potřebný ovládací prvek.

## 3. JEDNOTLIVÉ BLOKY ZAŘÍZENÍ

V následující kapitole budou představeny jednotlivé funkční bloky, které byly rozděleny podle své funkce. V návrhu bylo vycházeno z již známých a osvědčených zapojení, především z knihy [2] a katalogového listů [3]. Na konci kapitoly jsou přehledně shrnuty napěťové úrovně v jednotlivých blocích.

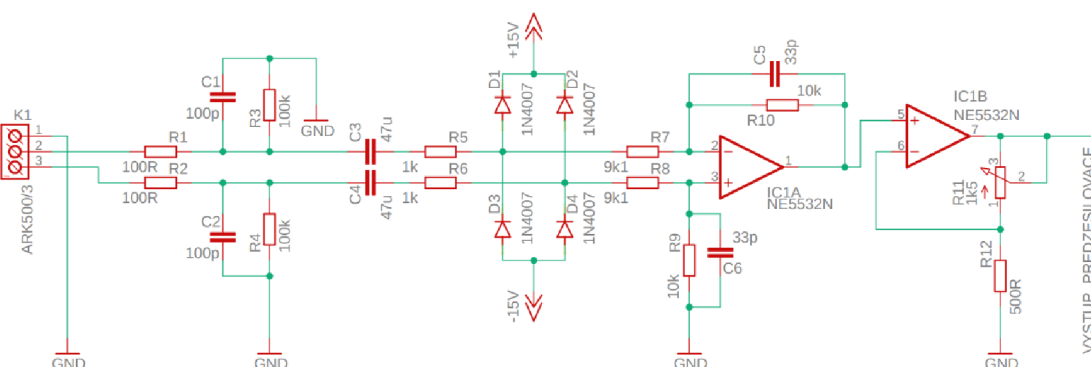
Tato kapitola obsahuje návrhy:

- vstupních obvodů
- obvodů kolem pružinového modulu
- šumové brány
- výstupních obvodů
- obvodů pro VU metry
- napájecího zdroje

### 3.1 Vstupní obvody

Základními funkcemi vstupních obvodů jsou převod symetrického signálu na nesymetrický a nastavení vstupní citlivosti. Výsledné schéma je na obr. 3.1. Vstupní část zařízení obsahuje následující obvody a prvky:

- RF filtry
- Oddělovací kondenzátory
- Přepětěová ochrana
- Rozdílový zesilovač s OZ
- Neinvertující zesilovač s OZ



Obrázek 3.1 Schéma vstupních obvodů

Vstupní RF (z angličtiny – Radio Frequency) filtry zabraňují průniku rádiových signálů o vysokých kmitočtech do zařízení. Tyto signály jsou svými kmitočty sice daleko za horní hranicí slyšitelného pásma (řádově MHz), ale mohou mít negativní vliv na některé polovodičové součástky, důsledkem čehož mohou tyto součástky produkovat

nežádoucí signál ve slyšitelném pásmu. Zde se jedná o dolní propusti s vysokým mezním kmitočtem, který lze spočítat podle rovnice (3.1) [4].

$$f_M = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot R \cdot C} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot 100 \cdot 100 \cdot 10^{-12}} \text{ Hz} \doteq 15,92 \text{ MHz} . \quad (3.1)$$

Odfiltrování stejnosměrné složky je zajištěno oddělovacími kondenzátory C3 a C4. Byly zvoleny kondenzátory o dostatečně velké kapacitě, aby nedocházelo k potlačení signálů ve slyšitelném pásmu o nízké frekvenci.

Ochrana proti přepětí je realizována čtyřmi diodami. Pokud se na některé z větví objeví vyšší napětí než 15 V + prahové napětí diody, dojde k otevření diod D1 a D2 a signál projde do zdroje, nikoliv dále do rozdílového zesilovače. Diody D3 a D4 fungují stejně, ovšem pro napětí opačné polaroty. Pro omezení proudu, který v případě přepětí poteče diodami, slouží dva rezistory R5 a R6.

Převod symetrického signálu na nesymetrický je realizován pomocí rozdílového zesilovače s operačním zesilovačem (IC1A). Na výstup tohoto zesilovače je přenesen rozdíl napětí na vstupech s určitým zesílením. Toto zesílení je dáno poměrem rezistorů R10 a R7. V případě tohoto zapojení je ovšem nutné k hodnotě R7 ještě připočíst hodnotu rezistoru R5, který je v sérii s rezistorem R7. Při realizaci musí být brán zřetel na přesné hodnoty rezistorů v obou větvích, tedy aby byly stejné hodnoty rezistorů R9 a R10, také musí být stejné hodnoty rezistorů R5 a R6, stejně tak R7 a R8. Pro posílení stability zesilovače se doporučuje použití kondenzátorů C5 a C6.

Zapojení je připraveno také pro signál nesymetrický, kdy v případě použití nesymetrického signálu dojde k uzemnění neinvertujícího vstupu OZ.

Ovládání vstupní citlivosti efektu je zajištěno pomocí neinvertujícího zesilovače s OZ (IC1B). Minimální hodnota zesílení tohoto zesilovače je 1 (0 dB). Maximální hodnota zesílení tohoto zesilovače je vypočtena v rovnici (3.2) [4].

$$A = 1 + \frac{R_{11MAX}}{R_{12}} = 1 + \frac{1500}{500} = 4 \approx 12 \text{ dB} . \quad (3.2)$$

### 3.2 Návrh obvodů kolem pružinového modulu

U budících a snímacích obvodů bylo důležité brát zřetel na vlastnosti pružinového modulu, které jsou popsány v kapitole 2.1. V tomto bloku byly navrženy i ovládací prvky pro ovládání množství „suchého“ neefektovaného signálu na výstupu a množství efektovaného signálu na výstupu. Také bylo navrženo ovládání zpětné vazby. Výsledné zapojení je patrné viz. Příloha A.

Kolem pružinového modulu byly navrženy a použity následující obvody a prvky:

- Sumační zesilovač sčítající původní signál a zpětnou vazbu
- Budící zesilovač pružinového modulu
- Konektory pro připojení pružinového modulu
- Neinvertující zesilovač pro kompenzaci útlumu pružinového modulu



- Sumační zesilovač sčítající původní a efektovaný signál

První ze sumačních zesilovačů je složen z OZ IC2A a rezistorů R13, R14, R15, potažmo i potenciometru R19. Toto součtové zapojení zesilovače s OZ má dvě vstupní větve – čistý signál a zpětnou vazbu. Zde je signál připraven pro zesilovač budící pružinový modul. Množství signálu zpětné vazby propouštěné do budícího zesilovače je ovládáno potenciometrem R19. Maximální zesílení větve zpětné vazby je vypočteno v rovnici (3.3) [4].

$$A = -\frac{R_{14}}{R_{15}} = -\frac{4700}{82000} = -0,057 \approx -24,8 \text{ dB} . \quad (3.3)$$

Mínus u hodnoty zesílení  $A$  znamená otočení polarity výstupního signálu. Mínus u přenosu v dB znamená útlum. Maximální přenos větve s čistým signálem je nastaven na 0 dB. Hodnota útlumu větve zpětné vazby je dostatečně nízká, aby nedošlo k přebuzení dalších obvodů při rezonanci pružin v pružinovém modulu.

Jelikož OZ NE5532 nelze zatížit impedancí nižší než přibližně 600  $\Omega$ , pro buzení pružinového modulu je použito zapojení z knihy [2]. Jedná se o zesilovač se sledovačem, který lze zatížit nízkou impedancí. Jako další možnost by se nabízelo zařadit do série s budící cívku pružinového modulu rezistor o hodnotě přibližně 575  $\Omega$  (stejnoseměrný odpor budící cívky  $R_s = 29 \Omega$ ). To by ale znamenalo vznik napěťového děliče a společně s útlumem pružinového modulu by byl signál příliš utlumen. Tomuto komplementárnímu sledovači je předřazen neinvertující zesilovač (IC2B), který zajišťuje další zesílení (přibližně +12,5 dB). Obvod by měl díky diodám D5 a D6 předcházet přechodovému zkreslení, neboť tyto diody zajišťují dostatečný klidový proud do bází tranzistorů T3 a T4.

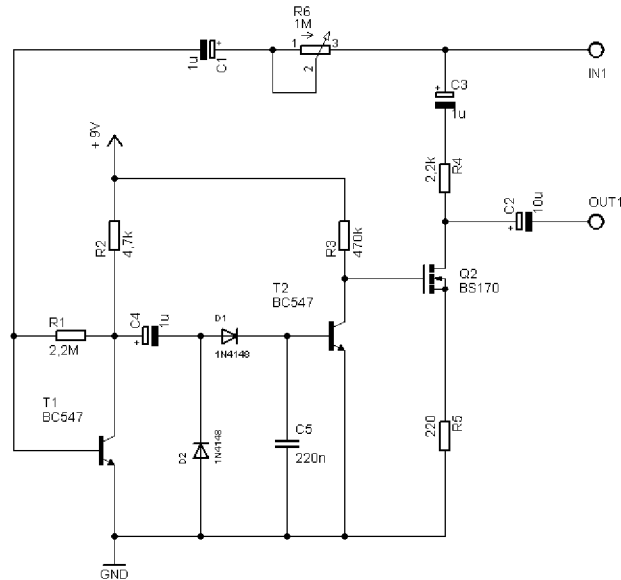
Pro připojení pružinového modulu jsou využity konektory RCA (Cinch). K propojení budou zapotřebí dva kabely RCA (samec) – RCA (samec).

Kvůli nízké impedanci snímací cívky pružinového modulu je za tuto cívku zařazen neinvertující zesilovač s OZ (IC3B), který má velmi vysokou vstupní impedanci, díky čemuž příliš nezatíží tuto cívku. Zesílení tohoto zesilovače je nastaveno rezistory R26 a R27 na 32 (+30,2 dB), aby došlo ke kompenzaci útlumu pružinového modulu.

Druhý sumační zesilovač je tvořen součástkami IC4A, R29, R30, R31, potažmo potenciometry R32 a R33. Má opět dvě vstupní větve. Na první z větví je přiveden signál z pružinového modulu, na druhou signál čistý. Úroveň těchto signálů vstupujících do sumačního zesilovače lze nastavit potenciometry R32 a R33. Maximální zesílení obou větví je nastaveno na 1 (0 dB).

### 3.3 Návrh šumové brány

Při návrhu bylo vycházeno ze schématu H&G AMPLIFIERS [6].



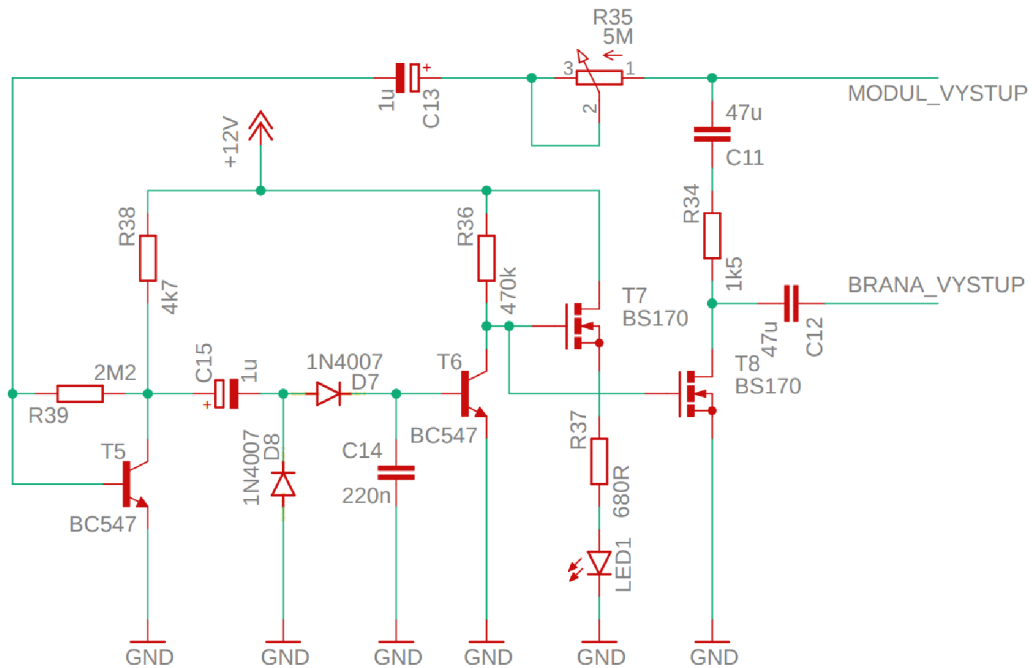
Obrázek 3.2 Východí schéma šumové brány [6]

Toto schéma bylo při návrhu upraveno a obohaceno o LED diodu indikující stav „gate active“. Dále došlo ke zvýšení hodnoty odporu potenciometru R6, rezistor R5 byl nahrazen zkratem. V návrhu bylo také počítáno s napájecím napětím 12 V. Výsledné zapojení je znázorněno na obr. 3.3.

Šumová brána má dva stavy – propustný a nepropustný. Základ tohoto zapojení představuje MOSFET T8. Pokud je T8 zavřený, signál projde přes C11, R34 a C12. Otevřením T8 dojde ke svedení signálu na zem. Signál prochází přes ovládací potenciometr R35, kterým lze nastavit úroveň prahové hodnoty. Tranzistor T5 funguje jako zesilovač. Zesílený signál prochází přes C15, který odfiltruje případnou stejnosměrnou složku. Díky diodě D8 dojde ke svedení záporných půlvln na zem, díky D7 dojde k propuštění kladných půlvln. Tyto diody tedy fungují jako usměrňovač.

Pokud je signál dostatečně silný, dojde k otevření T6, což zapříčiní uzemnění hradla MOSFETU T8. MOSFET je tedy zavřen a signál je propuštěn dále. Pokud je signál slabý, nenastane otevření T6, na hradle MOSFETU T8 je 12 V, je tak otevřen a signál je sveden na zem.

Funkce tranzistoru T7 je stejná jako u T8. Drain je připojen na 12 V a source přes rezistor R37 a LED1 na zem. Při otevření T8, tedy i T7 začne LED diodou procházet proud a indikuje tak stav, kdy signál neprochází do dalších bloků („gate active“).



Obrázek 3.3 Výsledné schéma šumové brány

### 3.4 Návrh výstupních obvodů

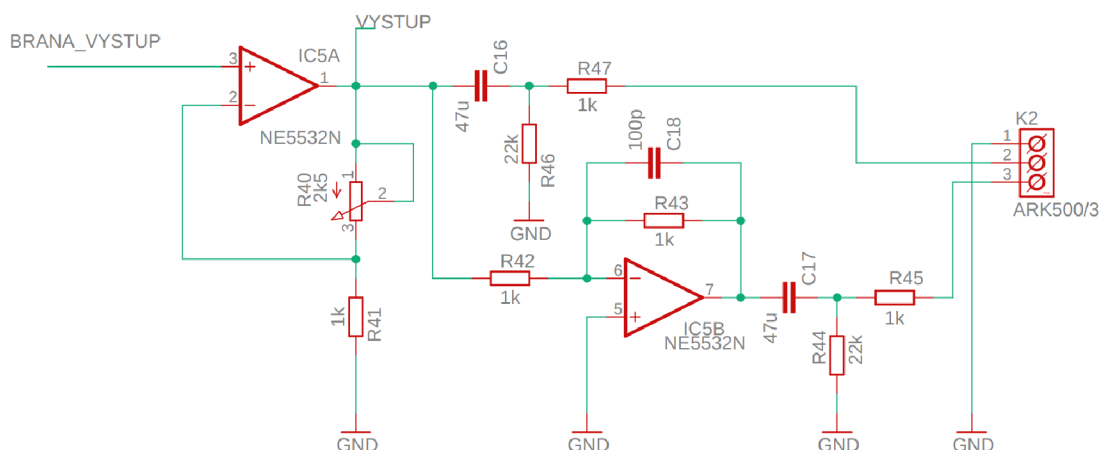
Ve výstupních obvodech je nesymetrický signál převeden na symetrický s možností ovládní výstupní úrovně. Výstupní část zařízení je znázorněna na schématu na obr. 3.4 a sestává z následujících obvodů a prvků:

- Neinvertující zesilovač s OZ s ovladatelným zesílením
- Invertující zesilovač s OZ
- Oddělovací kondenzátory

Neinvertující zesilovač sestává ze součástek IC5A, R40 a R41. Slouží k nastavení výstupní úrovně zařízení. Jeho zesílení lze nastavit v rozsahu 1 až 3,5 (0 až 10,9 dB).

Výstup neinvertujícího zesilovače je rozdělen do dvou větví. Obě větve od výstupu odděluje kondenzátor pro odfiltrování případné stejnosměrné složky (C16 a C17) a rezistory R45 a R47, které zajišťují ochranu před přetížením OZ při buzení malých impedancí připojených k výstupu zařízení. Rezistory R44 a R46 zajišťují, aby na kondenzátorech C16 a C17 nezůstal po odpojení konektoru žádný náboj. První z větví je připojena přímo na výstup.

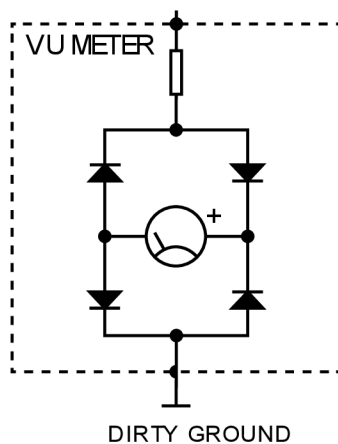
Druhá větev je invertována invertujícím zesilovačem s OZ sestávajícím ze součástek IC5B, R42 a R43. Zesílení tohoto zesilovače je nastaveno na 1 (0 dB), což zajišťuje, že na výstupu budou navzájem invertované signály o stejném napětí.



Obrázek 3.4 Schéma výstupních obvodů

### 3.5 Návrh obvodů pro VU metry

VU metr obsahuje usměrňovací diody a obvykle jeden odpor ke snížení procházejícího proudu, jak je vidět na schématu na obr. 3.5.

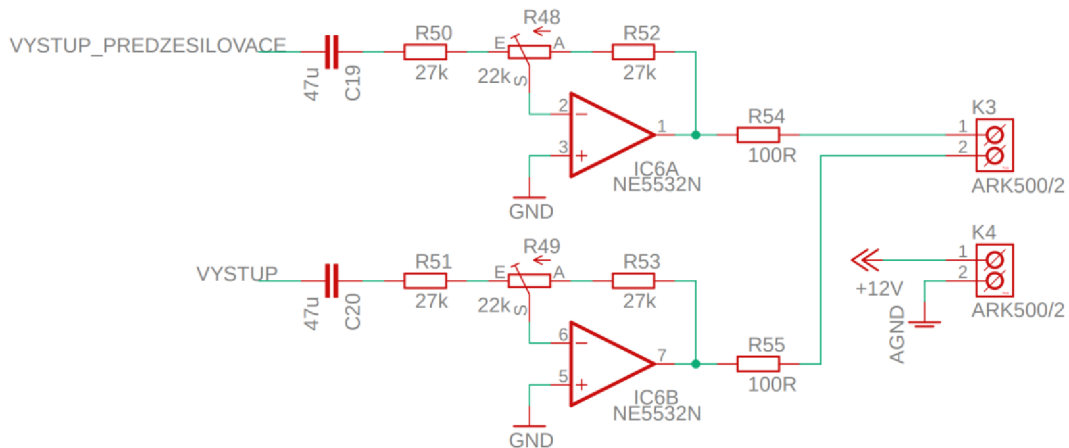


Obrázek 3.5 Schéma VU metru [2]

Usměrnění zapříčiní zkreslení proudu, který těmito diodami prochází, zároveň je tento proud relativně velký, proto je VU metr připojen na „dirty ground“, nikoliv na signálovou zem. Tyto země je při návrhu DPS spojit ve vhodném místě, kdy nedojde k rušení užitečného audio signálu.

Obvody pro VU metry jsou znázorněny na schématu na obr. 3.6 a sestávají z následujících obvodů a prvků:

- Oddělovací kondenzátory
- Invertující zesilovače s OZ
- Konektory pro měřený signál a napájení



Obrázek 3.6 Schéma obvodů pro VU metry

Použití oddělovacích kondenzátorů (C19 a C20) je velmi důležité, neboť VU metry reagují i na případnou stejnosměrnou složku, kterou je nutné odfiltrovat.

Invertující zesilovač je tvořen součástkami IC6A, R50, R52, R48 a druhý invertující zesilovač součástkami IC6B, R51, R53 a R49. Díky trimrům lze měnit zesílení v rozmezí -5,2 až +5,2 dB. Je totiž nezbytné nastavit hodnotu ukazovanou VU metry, kdy 0 VU musí odpovídat +4 dBu. Rezistory R54 a R55 jsou ve schématu zahrnuty pro posílení stability OZ.

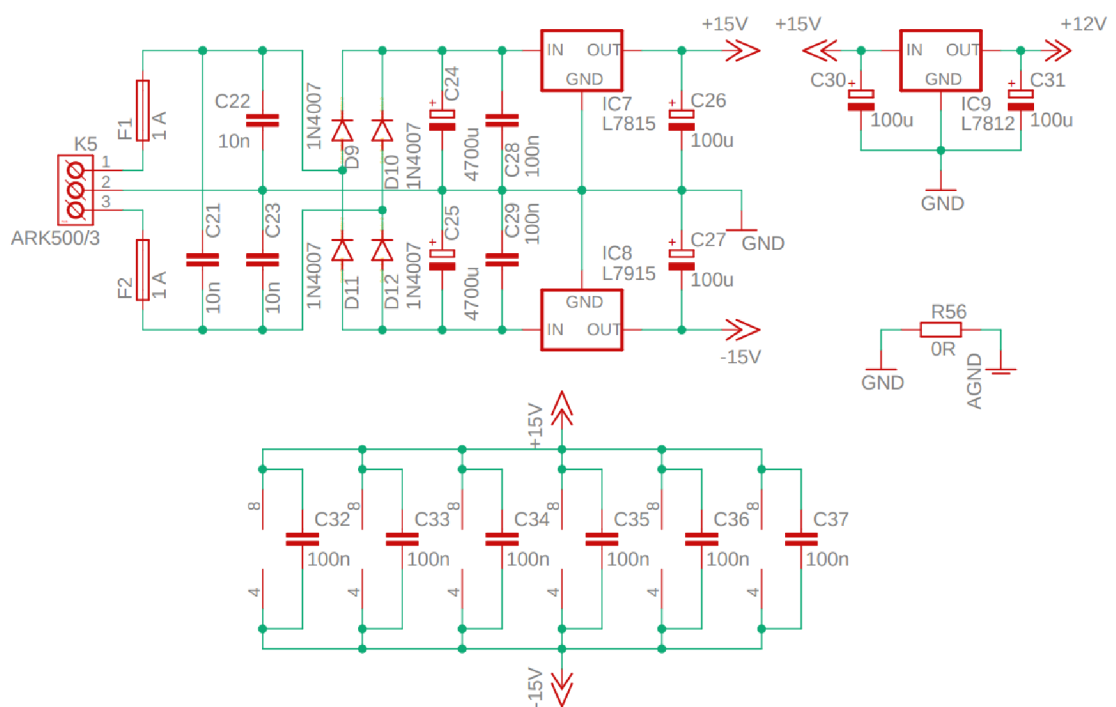
Jelikož jsou zvolené VU metry i podsvícené, je nutné přivést na napájecí svorky 12 V.

### 3.6 Návrh napájecího zdroje

Napájecí zdroj byl navržen podle knihy [2] a je znázorněn na obr. 3.7. Pro transformaci síťového napětí je předpokládáno použití toroidního transformátoru 2 x 17 V. Pro stabilizaci napětí bylo využito obvodů L7815 a L7915. U napájecích kontaktů operačních zesilovačů jsou přidány kondenzátory (C32 až C37 v obr. 3.7) vzhledem ke katalogovému listu OZ NE5532N [3].

Pro napájení šumové brány a VU metrů byl navržen obvod pro snížení napětí na 12 V pomocí obvodu L7812.

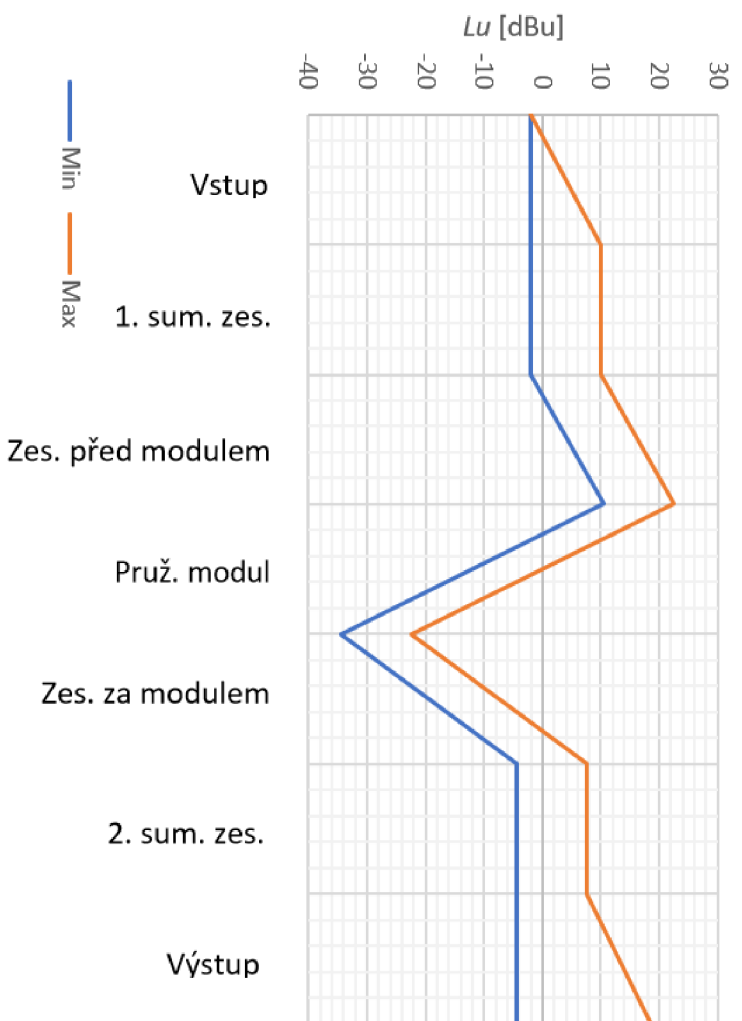
Pro spojení signálové země a „dirty ground“ je v návrhu propojka R56.



Obrázek 3.7 Schéma napájecího zdroje

### 3.7 Napět'ové úrovně jednotlivých bloků

Na vstupu a výstupu zařízení je očekávána hodnota - 2 dBu (nominální úroveň mixážních pultů [7]). Pro určení zesílení jednotlivých zesilovačů v obvodu bylo důležité brát zřetel na přenos pružinového modulu. Maximální a minimální úrovně v jednotlivých blocích zařízení jsou znázorněny v grafu na obr. 3.8.

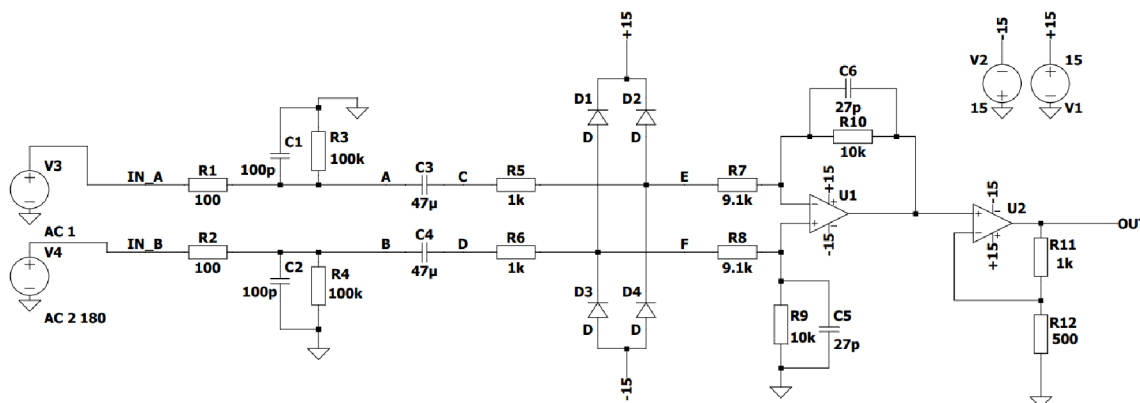


Obrázek 3.8 Graf napěťových úrovní jednotlivých bloků

## 4. SIMULACE A TESTOVÁNÍ

V následující kapitole jsou obsaženy simulace navrhovaných obvodů. Všechny simulace byly prováděny v programu LTSpice. Šumová brána byla i zapojena na nepájivém poli a podrobena testování.

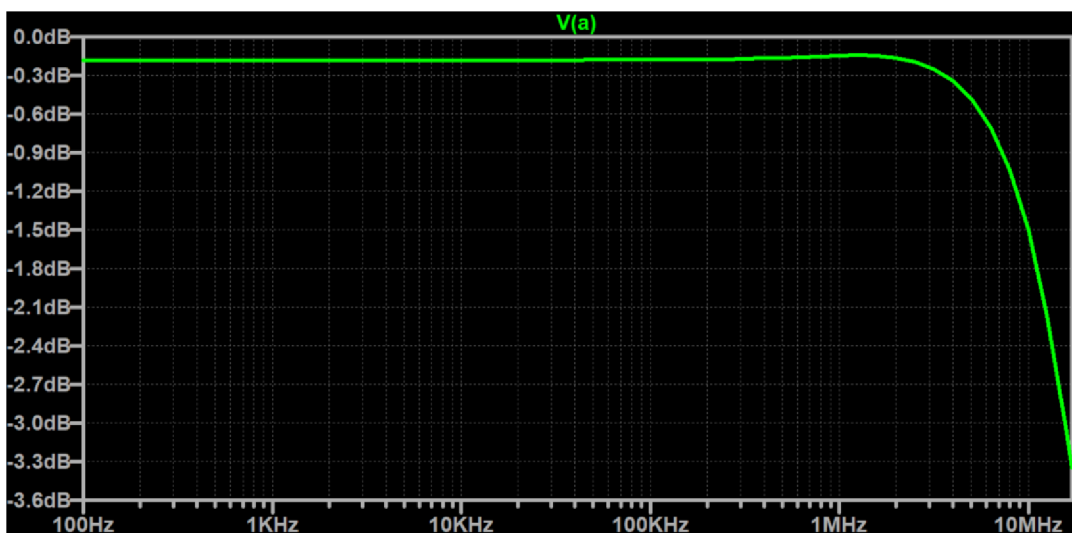
### 4.1 Simulace vstupních obvodů



Obrázek 4.1 Schéma vstupních obvodů v programu LTSpice

Ve schématu na obr. 4.1 jsou vyznačeny měřící body pro přehlednější simulace.

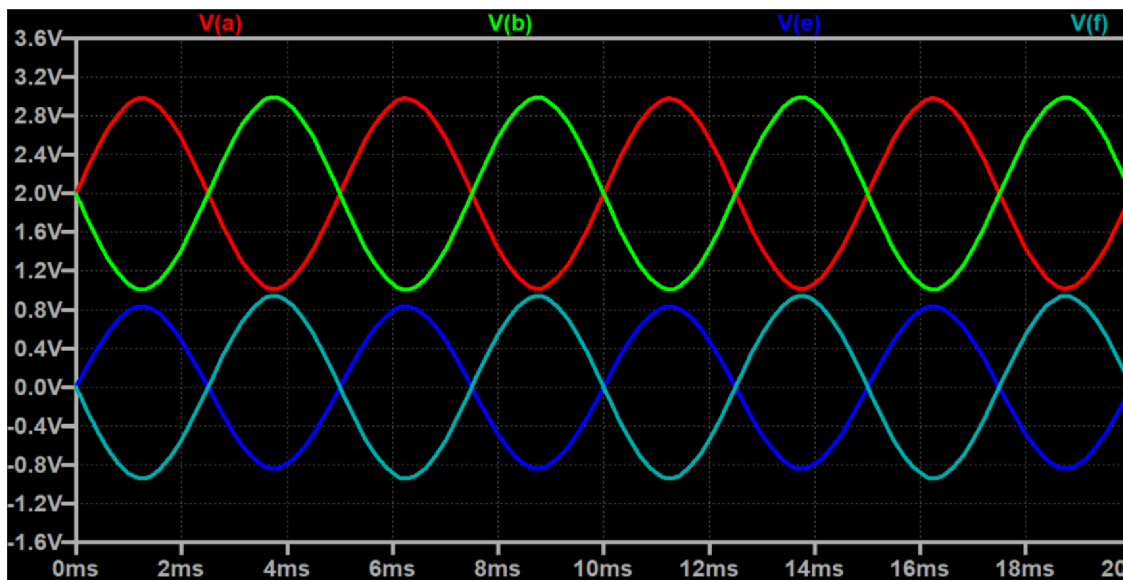
Prvním obvodem signálové cesty vstupních obvodů jsou RF filtry. Mezní frekvence těchto filtrů byla vypočtena v kapitole 3.1. Tyto filtry byly podrobeny AC analýze na obou vstupních větvích. Modulová kmitočtová charakteristika jednoho z RF filtrů je na obr. 4.2.



Obrázek 4.2 Modulová kmitočtová charakteristika RF filtru

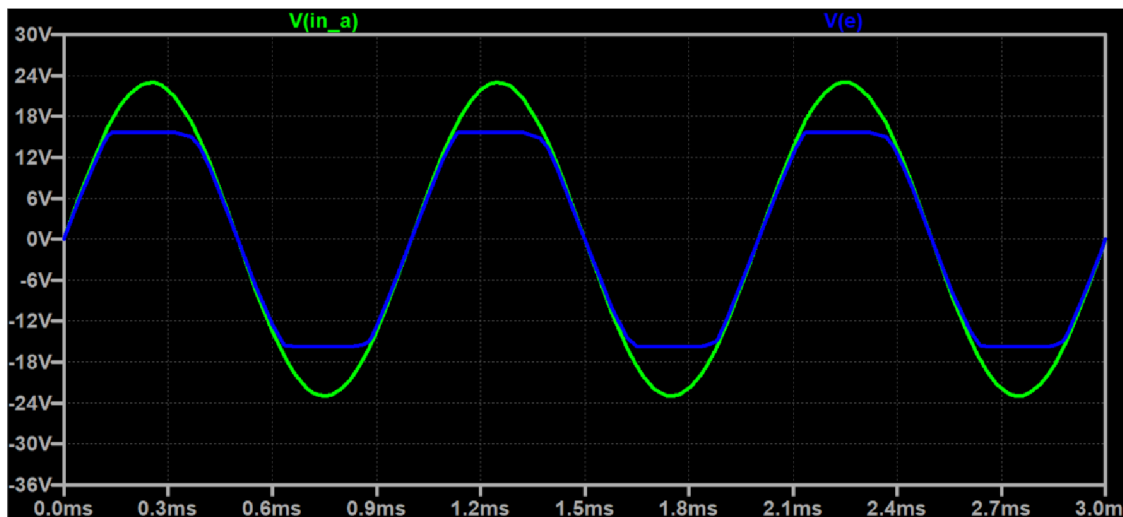


Pro simulaci funkce oddělovacích kondenzátorů byla využita transientní analýza. Na zdrojích byla záměrně nastavena stejnosměrná složka 2 V, kterou oddělovací kondenzátory odfiltrovaly. Výsledné průběhy jsou patrné na obr. 4.3.



Obrázek 4.3 Simulace funkce oddělení stejnosměrné složky

Transientní analýze byl podroben i obvod z diod chránící před přepětím. Ze simulace (obr. 4.4) je očividné, že napěťové špičky přesahující napájecí napětí  $\pm 15$  V (plus prahové napětí diod) byly diodami ořezány.



Obrázek 4.4 Simulace funkce omezení přepětí

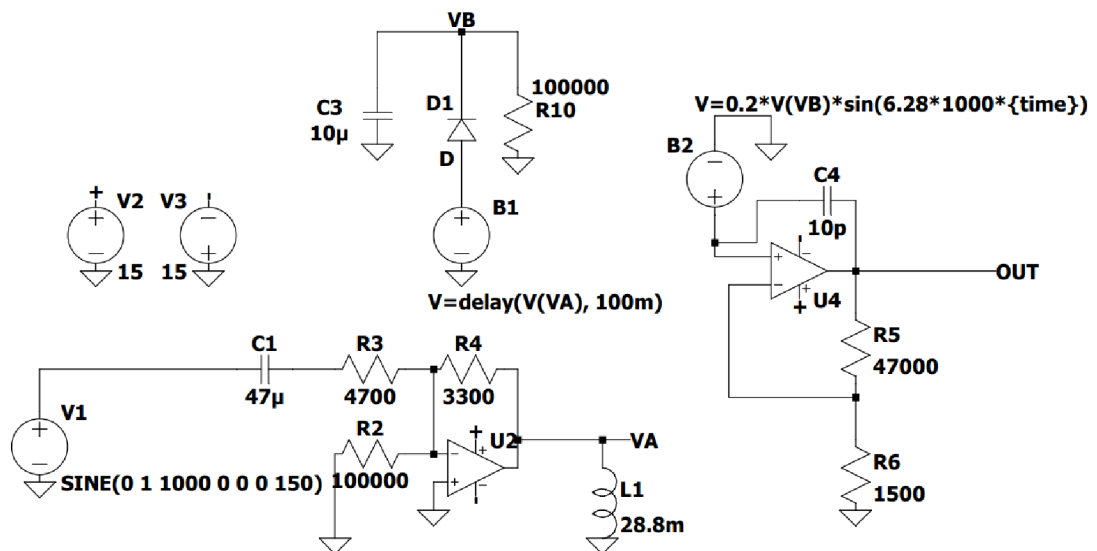
## 4.2 Simulace pružinového modulu

Pro simulaci pružinového modulu byl v programu LTSpice vytvořen náhradní obvod, který lze vidět na obrázku 4.5. Cívka L1 představuje zátěž stejnou jako je budící cívka pružinového modulu. Její stejnosměrný odpor byl zjištěn v kapitole 2.1.1. Indukčnost cívky byla vypočtena podle rovnice (4.1) [8] níže:

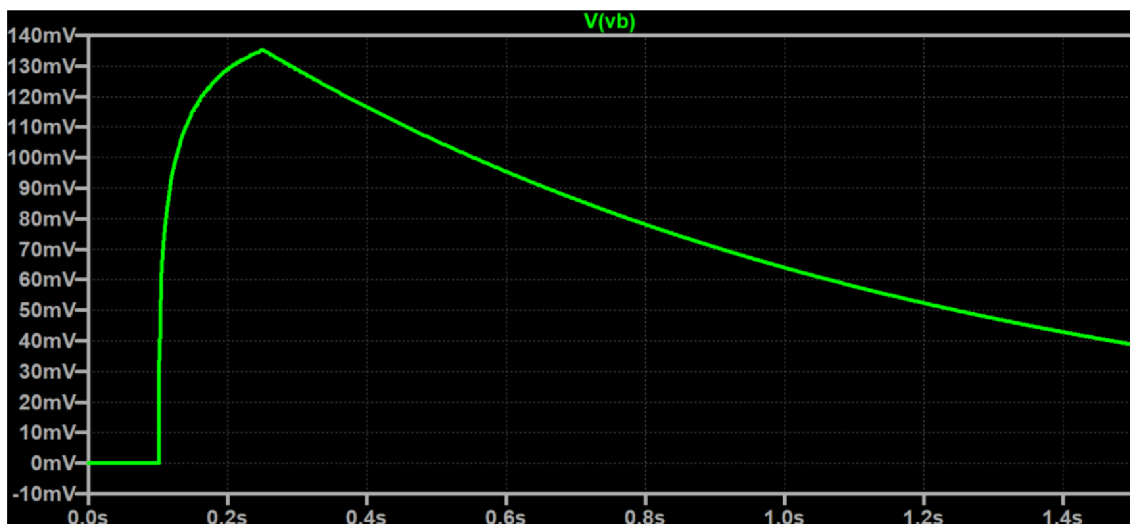
$$L = \frac{X_L}{\omega} = \frac{\sqrt{Z_L^2 + R_L^2}}{2\pi f} = \frac{\sqrt{359^2 + 29^2}}{2\pi \cdot 1977} \doteq 28,8 \text{ mH}, \quad (4.1)$$

$X_L$  představuje induktivní reaktanci cívky,  $Z_L$  impedanci na kmitočtu  $f$ ,  $R_L$  stejnosměrný odpor cívky. Hodnoty impedance a kmitočtu byly odečteny z grafu na obrázku 2.2. V náhradním schématu na obrázku 4.5 se nachází součtové zapojení s OZ (U2), neboť toto se vyskytuje i ve výsledném schématu. V náhradním schématu není zahrnut obvod sledovače, jelikož OZ U2 je ideálním modelem OZ, tudíž v simulaci nebude přetížen vlivem nízké impedance cívky.

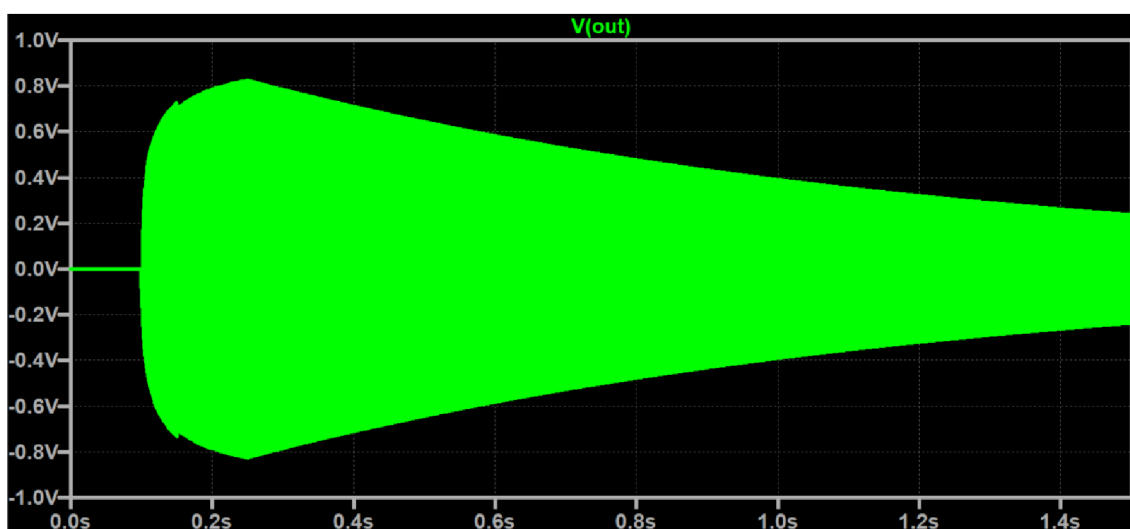
Napětí zdroje B1 je řízeno napětím VA. Toto napětí je zde pouze zopakováno se zpožděním 100 ms, čímž je simulována doba náběhu napětí na výstupní cívce. Následně je toto napětí usměrněno diodou a nabíjí kondenzátor C3. Po vypnutí budícího zdroje dochází k vybití tohoto kondenzátoru přes R10, což simuluje dobu dozívání pružinového modulu. Napětí VB tedy představuje konstantu, která řídí zdroj B2, který generuje harmonickou funkci o stejném kmitočtu jako zdroj (zde 1 kHz). Na zdroji B2 je také nastaven útlum shodný s útlumem pružinového modulu.



Obrázek 4.5 Náhradní obvody pro simulaci pružinového modulu



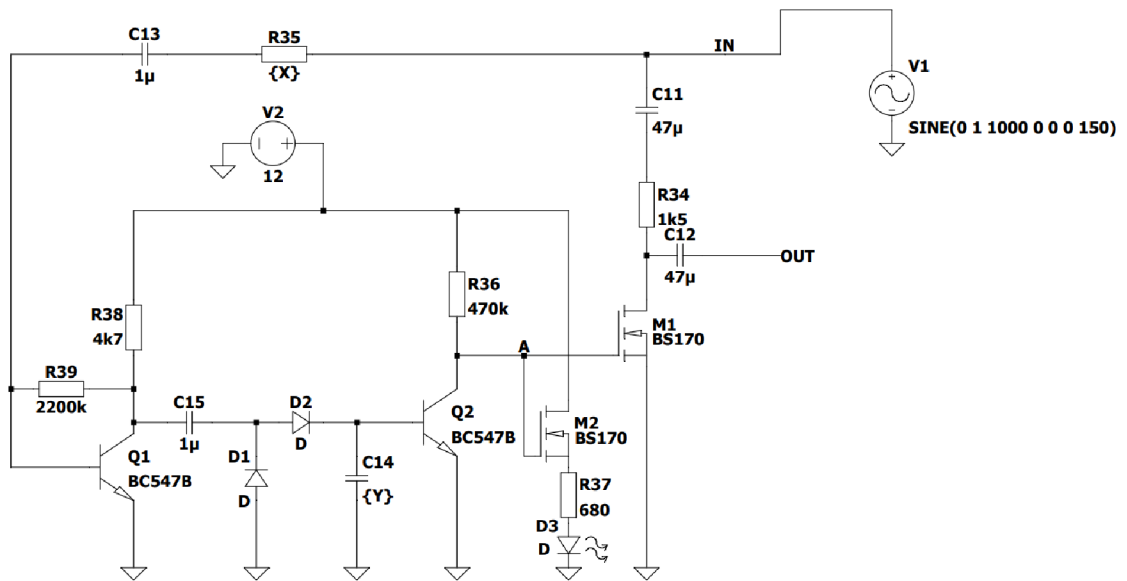
Obrázek 4.6 Vybíjení kondenzátoru C3 po vypnutí budícího zdroje



Obrázek 4.7 Výsledný průběh simulace pružinového modulu

Na obrázku 4.6 je znázorněn průběh napětí v bodě  $VB$  na obr. 4.5. Zde je znázorněno nabíjení kondenzátoru C3 a jeho postupné vybíjení po vypnutí budícího zdroje. Průběh na obr. 4.7 poté znázorňuje průběh měřený na výstupu, kdy signál o kmitočtu 1 kHz svou amplitudou odpovídá napětí v bodě  $VB$ .

### 4.3 Simulace a testování šumové brány

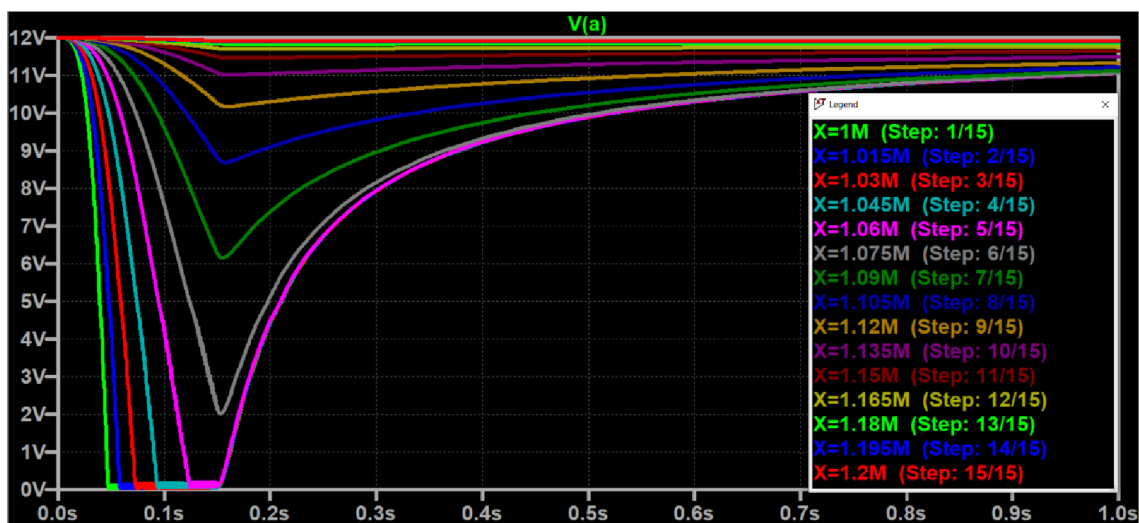


Obrázek 4.8 Schéma šumové brány v programu LTSpice

Funkce šumové brány byla vysvětlena v kapitole 3.3. Pro simulace bylo využito transientní analýzy. Sonda byla umístěna na gate obou MOSFET tranzistorů, kde lze názorně pozorovat přechod z otevřeného do zavřeného stavu (bod A na obr. 4.8). Na zdroji byl nastaven harmonický signál o kmitočtu 1 kHz, jehož amplituda měla hodnotu  $2 V_{pp}$ . Na zdroji bylo nastaveno provedení 150 period zmíněného signálu.

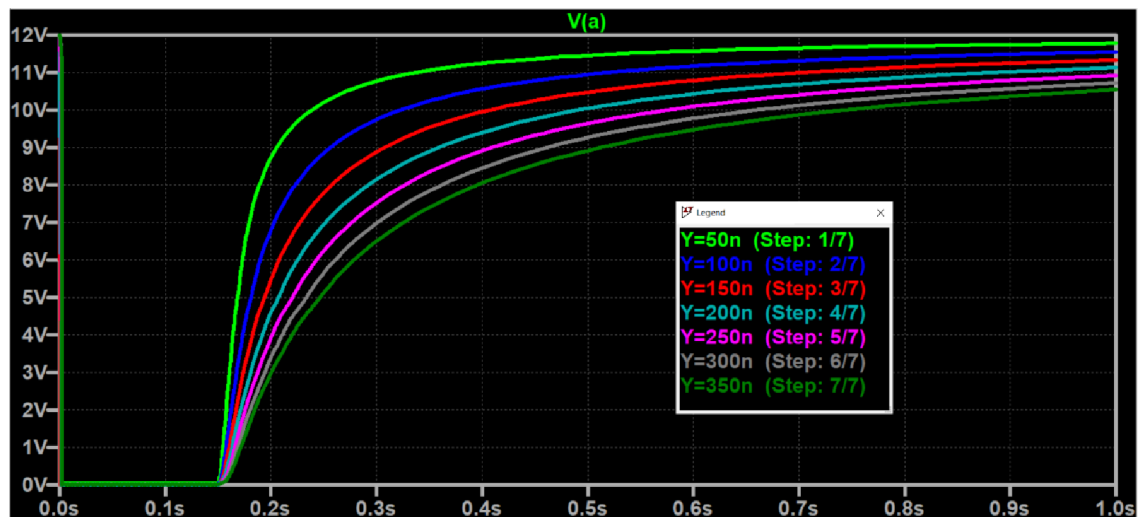
Nejprve proběhlo krokování hodnoty odporu rezistoru R35 (parametr X) ve schématu na obr. 4.8. Tímto krokováním je simulována změna hodnoty příslušného potenciometru ovládajícího prahovou hodnotu. Krokování bylo nastaveno pouze v rozmezí  $1 M\Omega$  až  $1,2 M\Omega$ , neboť v tomto rozmezí je přechod z nepropustného stavu do propustného a zpět nejpatrnější. Během simulace byla hodnota kondenzátoru C14 nastavena na 220 nF (parametr Y). Z průběhů na obrázku je patrné, že nastavený odpor správně ovládá prahovou úroveň šumové brány. Z grafu na obr. 4.9 je patrné, že při hodnotě odporu  $1,5 M\Omega$  už zůstává šumová brána stále „uzavřená“.

Dále z obrázku 4.9 lze vypočítat vliv hodnoty odporu potenciometru na dobu přechodu šumové brány do otevřeného stavu a dobu přechodu zpět do uzavřeného stavu.



Obrázek 4.9 Krokování odporu potenciometru šumové brány

Časový průběh napětí na hradlech MOSFETů také záleží na kapacitě kondenzátoru C14 (podle schématu na obrázku 4.8). Tato kapacita byla v další simulaci krokována od 50 nF do 300 nF s krokem 50 nF (parametr Y). Odpor rezistoru R35 byl nastaven na 1 M $\Omega$ . Budící zdroj byl nastaven na provedení 150 cyklů harmonického signálu o kmitočtu 1 kHz a amplitudě 2 V<sub>pp</sub>. Z průběhů na obrázku 4.10 je patrné, že kapacita kondenzátoru C3 ovlivňuje dobu, kdy šumová brána přechází do nepropustného stavu.



Obrázek 4.10 Vliv kapacity C3 na časový průběh napětí na hradlech MOSFETů

Při testování na nepájivém poli bylo zjištěno, že i při maximálním nastaveném odporu potenciometru nejsilnější signály prošly, nicméně se jednalo o velmi silné signály, tudíž pomocí potenciometru 5 M $\Omega$  lze nastavit dostatečně vysokou prahovou hodnotu pro použití šumové brány v kombinaci s navrhovaným efektem.

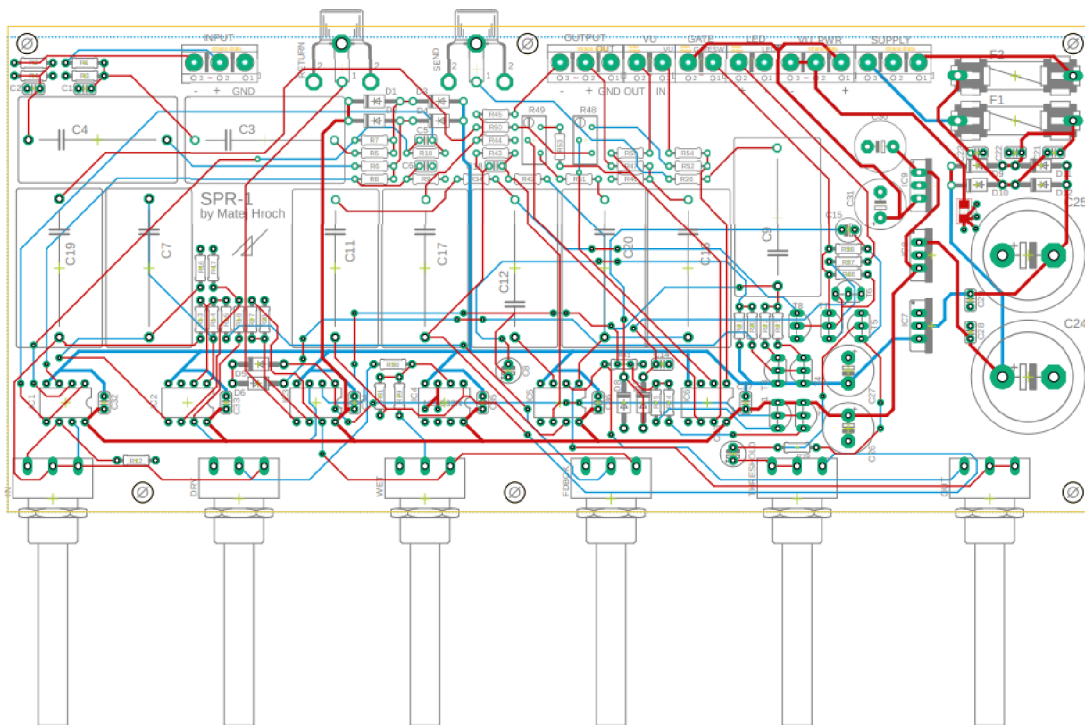
## 5. NÁVRH DESKY PLOŠNÝCH SPOJŮ

V následující kapitole bude představen návrh DPS v prostředí Autodesk Eagle. Pro jednoduchost konstrukce bylo využito vývodových součástek. Jelikož bude výsledné zařízení namontované do rackové krabice, je důležité správně navrhnout velikost desky a rozmístění součástek, zejména potenciometrů, které budou montované do čelního panelu. Pro DPS bylo vybráno dvouvrstvé provedení. Celkem byly navrženy dvě desky. První deska slouží pro zapojení všech funkčních obvodů včetně potenciometrů. Druhá deska slouží pouze pro konektory.

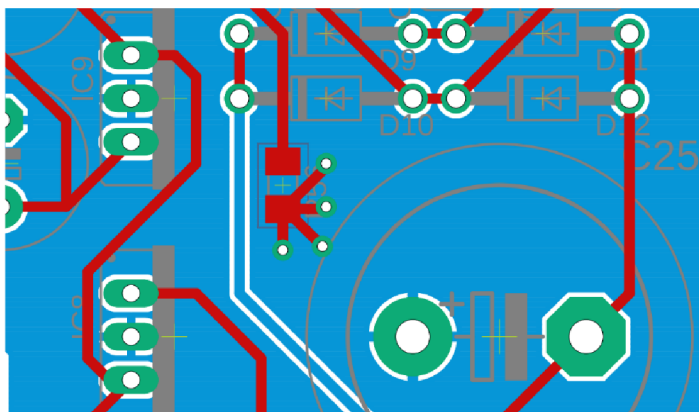
### 5.1 Návrh hlavní desky

Návrh hlavní desky probíhal se zřetelem na intuitivní a uživatelsky přívětivé rozmístění ovládacích prvků (potenciometrů). Tyto potenciometry byly rovnoměrně umístěny k jedné straně desky. Na opačnou stranu desky byly umístěny všechny konektory a svorkovnice pro propojení s ostatními částmi zařízení.

U operačních zesilovačů byl brán zřetel na správné umístění kondenzátorů, které musí být umístěny co nejbližší k pouzdru OZ (C32 až C37). V pravé části desky (vzhledem k obr. 5.1) se nachází součástky napájecího zdroje. Jelikož se na desce nepracuje se síťovým napětím, není nutné zdroj od ostatních součástí oddělit nutnou mezerou. Na spodní straně desky se nachází zemní plocha téměř přes celý obsah desky.



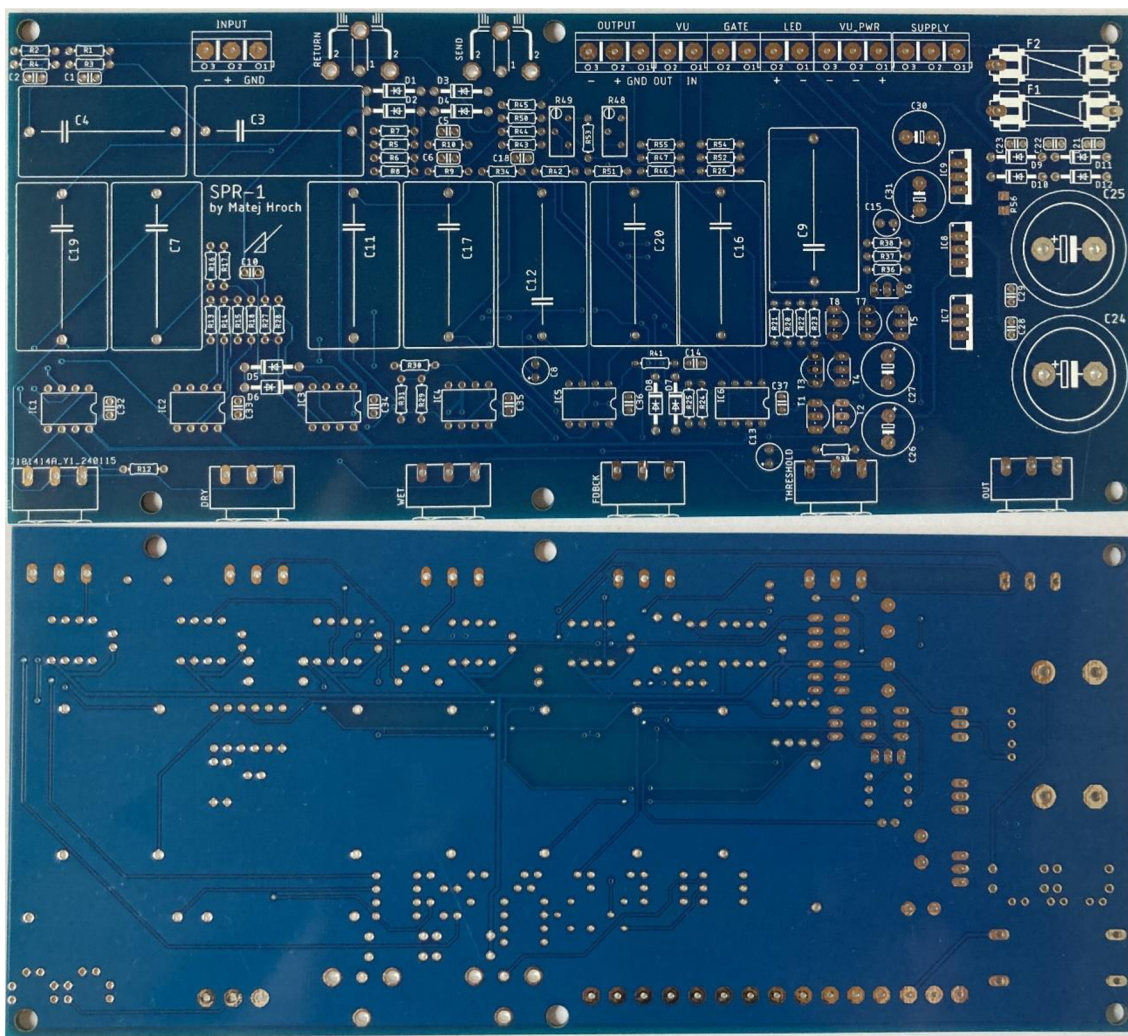
Obrázek 5.1 Návrh DPS – hlavní deska



Obrázek 5.2 Propojení zemí na hlavní desce

Obrázek 5.2 znázorňuje propojení zemí. Je tak učiněno u největšího kondenzátoru napájecího zdroje.

Na obr. 5.3 lze vidět hotovou hlavní desku z horní i spodní strany. Na obou stranách desky je nanesena nepájivá maska. Na horní straně se nachází popisky jednotlivých součástek, popř. jsou popsány jednotlivé kontakty svorkovnic.



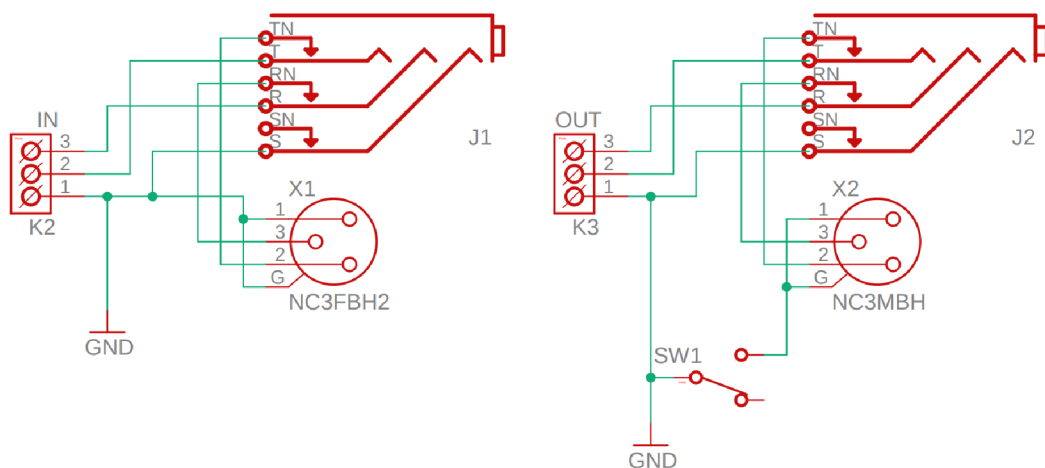
Obrázek 5.3 Hotová hlavní deska – horní a dolní strana

## 5.2 Návrh desky pro konektory

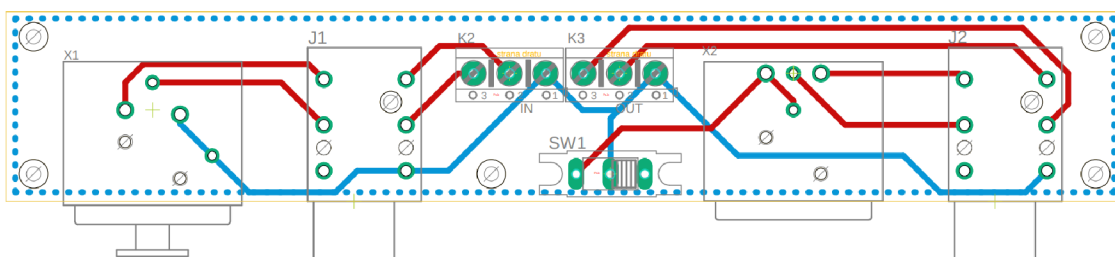
Návrh druhé desky byl nezbytný, neboť konektory pro připojení vstupu a výstupu se nachází na zadní straně zařízení. Pro co největší univerzálnost jsou v návrhu uvažovány konektory XLR a TRS jack. Konektory J1 a J2 ve schématu na obr. 5.4 jsou rozpinací. Po připojení pomocí TRS, popřípadě TS jacku dojde k odpojení XLR konektoru. Výstupní XLR konektor X2 je obohacen o spínač SW1, který slouží k přerušení případné zemní smyčky.

Rozmístění komponentů na desce je provedeno tak, aby bylo připojení co nejvíce uživatelsky přívětivé. Spodní strana desky je pokryta měděnou plochou připojenou k zemi, většina spojů je realizována na horní straně desky. Stejně jako v případě hlavní desky je i tato deska navržena v rámci konstrukční třídy 4. Návrh desky je na obr. 5.5.





Obrázek 5.4 Schéma desky pro konektory



Obrázek 5.5 Návrh DPS – deska pro konektory

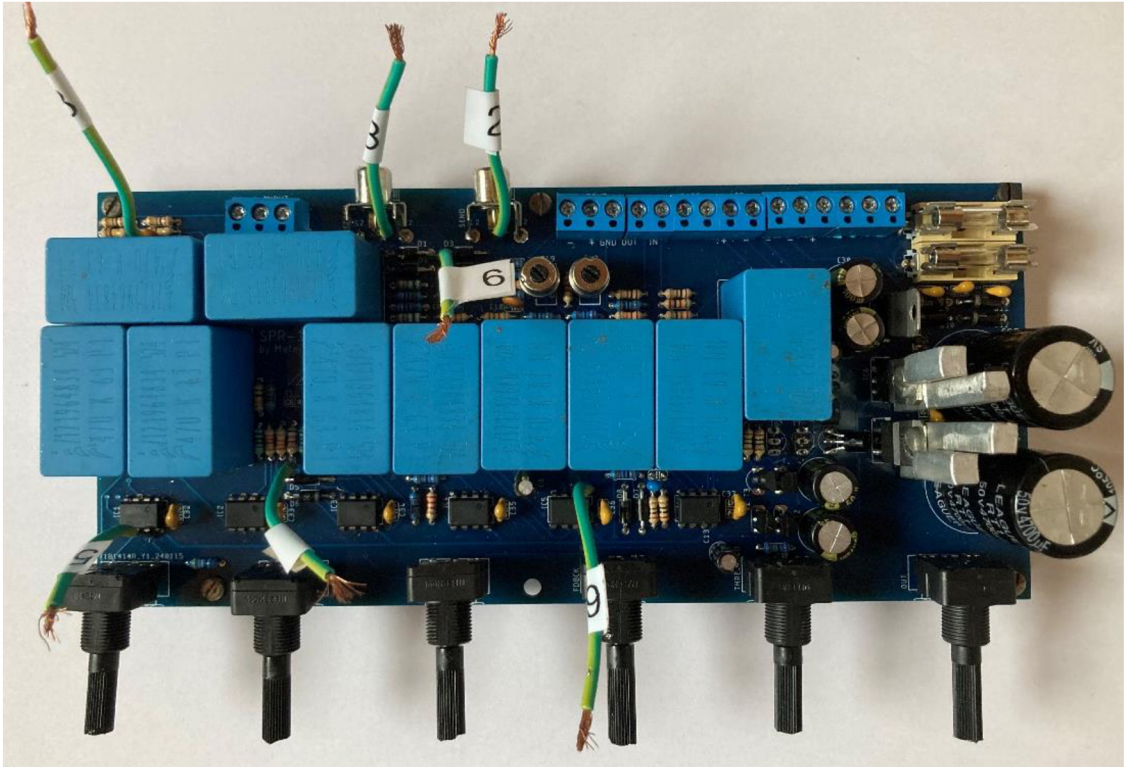
Na obr. 5.6 lze vidět hotovou desku pro konektory z obou stran. Stejně jako u hlavní desky, i zde se na horní straně desky nachází popisky pro jednotlivé komponenty.



Obrázek 5.6 Hotová deska pro konektory – horní a dolní strana

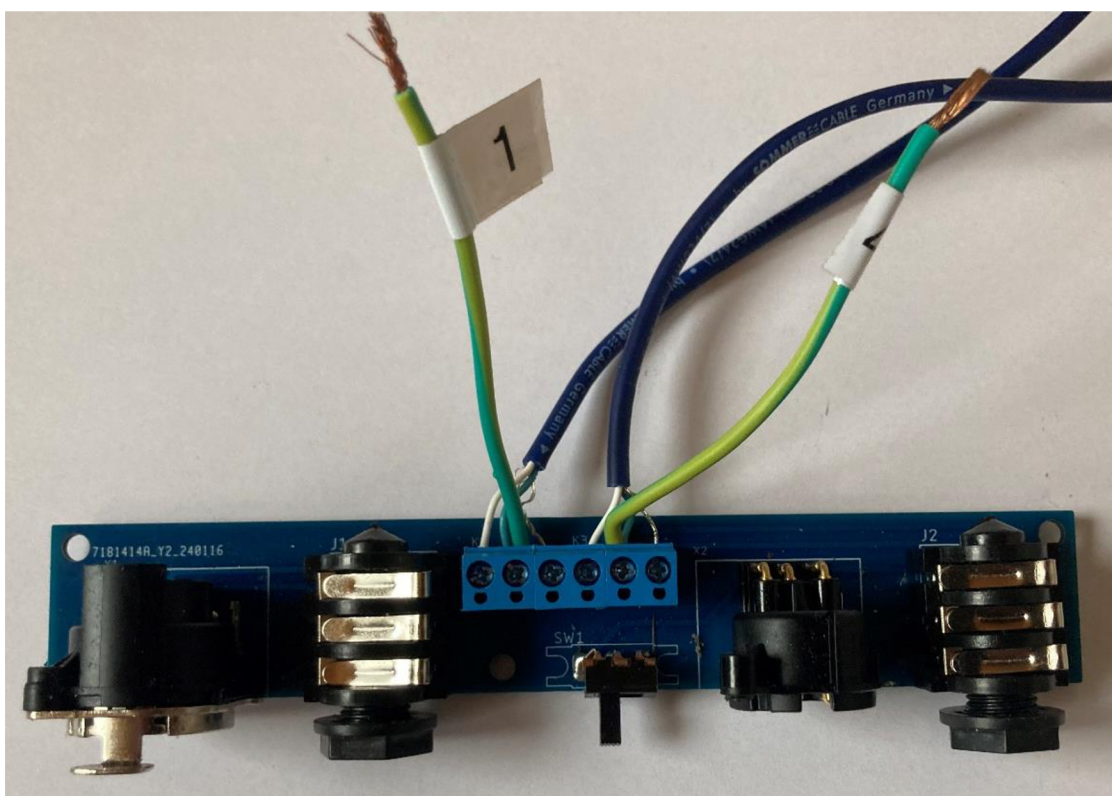
### 5.3 Osazování desek

Před osazením desek došlo k zkrácení ovládacích prvků potenciometrů pro přizpůsobení k přednímu panelu. Po osazení všech součástek byly naletovány vodiče představující jednotlivé měřicí body viz. Příloha D a Příloha E. Osazená hlavní deska s měřicími vývody je zobrazena na obrázku 5.8. Po provedení všech potřebných měření byly tyto vodiče odletovány pryč.



Obrázek 5.7 Osazená hlavní deska s měřicími vývody

Na desku s konektory nebylo nutné letovat měřicí vývody, neboť je stačilo přidat do svorkovnice. Obrázek 5.8 znázorňuje osazenou desku s konektory včetně měřících bodů.



Obrázek 5.8 Osazená deska pro konektory s měřicími vývody

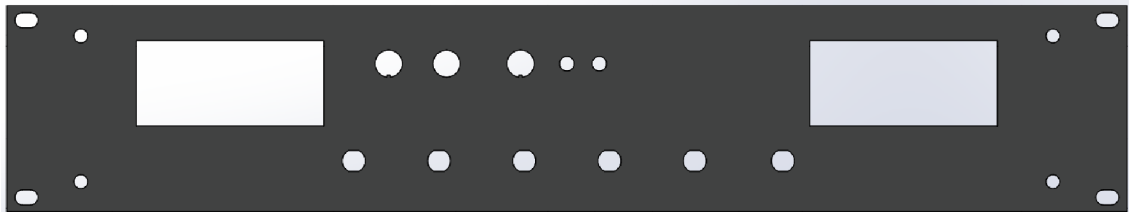
## 6. MECHANICKÁ KONSTRUKCE ZAŘÍZENÍ

V následující kapitole je popsána konstrukce zařízení po mechanické stránce. Konstrukce spočívala ve správné přípravě montážní krabice, návrhu čelního panelu a vzájemné propojení součástí.

Pro zařízení byla zakoupena racková krabice s rackovou výškou 2 U (88,9 mm). Tato montážní krabice je snadno smontovatelná a na horním krytu obsahuje chladicí otvory.

### 6.1 Návrh čelního panelu

Montážní krabice je sice dodávána s čelním panelem, ale pro lepší vzhled a přesnost jednotlivých otvorů byl pro zařízení navržen čelní panel, který je zhotoven z nerezové oceli vypálením pomocí laseru. Hotový návrh z prostředí SolidWorks znázorňuje obrázek 6.1. Čelní panel byl po vyhotovení opatřen popisky.



Obrázek 6.1 Návrh čelního panelu v SolidWorks

### 6.2 Zadní konektory

Pro zadní konektory byla vyrobena samostatná deska plošných spojů (kapitola 5.2). Pro tuto desku bylo nutné v zadní desce vytvořit otvory pro XLR konektory, konektory TRS jack a pro přepínač přerušování zemní smyčky. Zároveň byl vytvořen otvor pro konektor na připojení síťového napětí. Na obr. 6.2 jsou znázorněny všechny otvory na zadním panelu včetně popisek. Na obr. 6.3 se nachází již osazený zadní panel.



Obrázek 6.2 Neosazený zadní panel



Obrázek 6.3 Osazený zadní panel

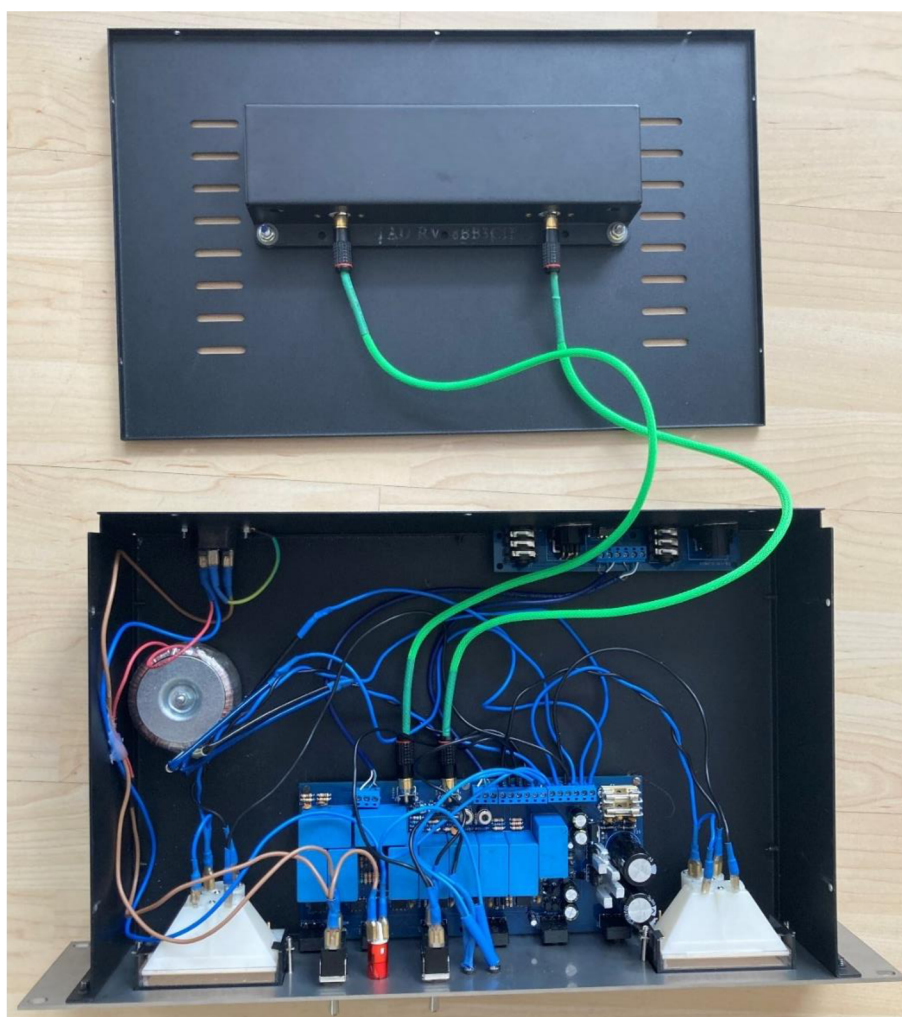
### 6.3 Kompletace zařízení

Z rozvržení čelního a zadního panelu vyplývá i umístění hlavní desky, zadní desky s konektory, VU metrů a ostatních prvků na čelním panelu. Toroidní transformátor byl umístěn blízko síťového konektoru. Pružinový modul byl přišroubován na horní kryt rackové krabice. Hlavní deska byla přišroubována na distanční sloupky o výšce 5 mm.

Pro propojení byly použity konektory Faston, které byly na jednotlivé vodiče krimpovány. Všechny Faston konektory jsou opatřeny izolační bužírkou.

Pro připojení pružinového modulu byly vyrobeny dva propojovací kabely cinch – cinch.

Pro indikaci zapnutého zařízení je na panelu umístěna červená doutnavka. Druhý z vypínačů slouží k aktivaci šumové brány. Pro indikaci zapnuté šumové brány byla na panel přidána LED dioda. V panelu je také umístěna LED dioda indikující stav „gate active“ viz. kapitola 3.3. Rozložení všech součástí je znázorněno na obr. 6.4. Pohled na hotové zařízení z čelní strany znázorňuje obr. 6.5.



Obrázek 6.4 Vnitřní rozmístění všech součástí



Obrázek 6.5 Čelní pohled na hotové zařízení

## 7. MĚŘENÍ A TESTOVÁNÍ HOTOVÉHO ZAŘÍZENÍ

V následující kapitole bude představeno počáteční nastavení zařízení, měření jednotlivých součástí a ověřování funkcí jednotlivých bloků.

Pro testování byly ve schématu vytyčeny měřící body. Tyto body byly zhotoveny i na desce plošných spojů pomocí vodičů pro snadné připojení krokosvorek. Rozmístění měřících bodů ve schématu znázorňuje Příloha D a Příloha E.

Body 2, 3 a 7 (viz. Příloha D) byly vytyčeny pro kontrolní měření přenosu pružinového modulu (viz. kapitola 2.1.3, kde byly obvody pouze na nepájivém poli). Toto kontrolní měření přineslo stejné výsledky jako v kapitole 2.1.3.

### 7.1 Nastavení VU metrů

Pro nastavení VU metrů slouží dva trimry v budících obvodech pro VU metry. Před samotným nastavováním bylo nutné dosáhnout hodnoty napětí + 4 dBu v místě, kde bude napětí měřeno pomocí VU metru (body 5 a 6 viz. Příloha E). Při nastavování vstupního VU metru byl na vstup zařízení připojen generátor a v bodu č. 5 (viz. Příloha E) byla měřena efektivní hodnota napětí pomocí osciloskopu. V případě měření výstupního VU metru byl generátor připojen na návratovou svorku pružinového modulu (součástka X2, Příloha A) a v bodě č. 6 (viz. Příloha E) byla měřena efektivní hodnota napětí.

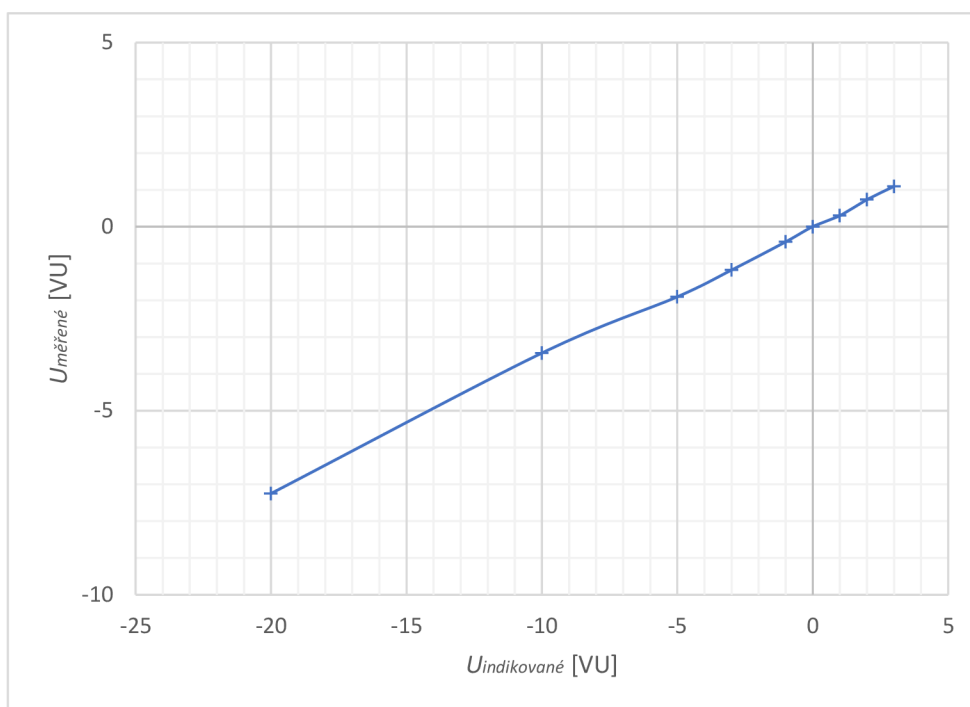
Následně se otáčením jezdce příslušného trimru dosáhlo bodu, kdy bylo na VU metru možné odečíst hodnotu 0 VU, která odpovídá hodnotě + 4 dBu.

### 7.2 Měření přesnosti VU metrů

Měření přesnosti VU metrů spočívalo v nastavování hodnoty napětí na generátoru tak, aby VU metr ukazoval hodnoty vyznačené na jeho měřítku. Po dosažení hodnot na měřítku byla na osciloskopu odečtena hodnota napětí, která odpovídala indikované hodnotě na VU metru.

Následovalo porovnání hodnot napětí, které by měl VU metr správně indikovat, s hodnotami napětí, které VU metr skutečně indikoval. Tyto hodnoty byly pro přehlednost vyneseny do grafu na obr. 7.1, kdy vodorovná osa znázorňuje hodnoty VU indikované měřidlem a svislá osa představuje odpovídající hodnoty napětí měřené osciloskopem následně převedených na jednotky VU.

Z výše zmíněného grafu je patrné, že VU metry indikují s hrubou nepřesností. Vzhledem k tomu, že tato měřidla mají v zařízení spíše estetickou funkci, nepředstavuje jejich nepřesnost příliš závažný problém.



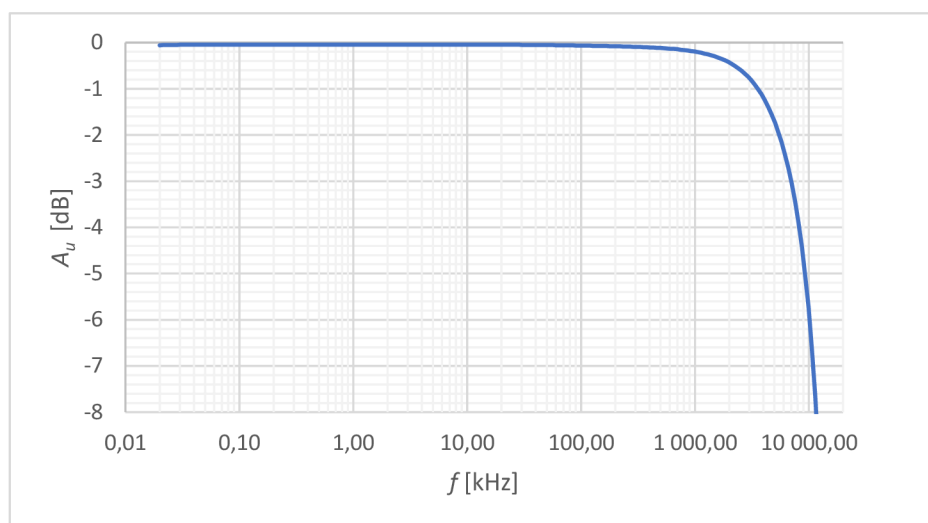
Obrázek 7.1 Graf porovnání indikované a měřené hodnoty

### 7.3 Ověření funkce vstupních RF filtrů

Pro ověření funkce RF filtrů bylo využito přístroje Bode 100, kdy měření předcházela kalibrace. Byla měřen přenos mezi body 1 a 8 (viz. Příloha D) v rozmezí 20 Hz až 16 MHz.

Výsledek měření byl vyneseno do grafu na obrázku 7.2. Z grafu je patrné, že poklesu o 3 dB je dosaženo už na kmitočtu 7 MHz. RF filtry jsou tedy patrně ovlivněny dalšími součástkami vstupních obvodů. Přenos ve slyšitelném pásmu 20 Hz až 20 kHz není RF filtry nijak ovlivněn.



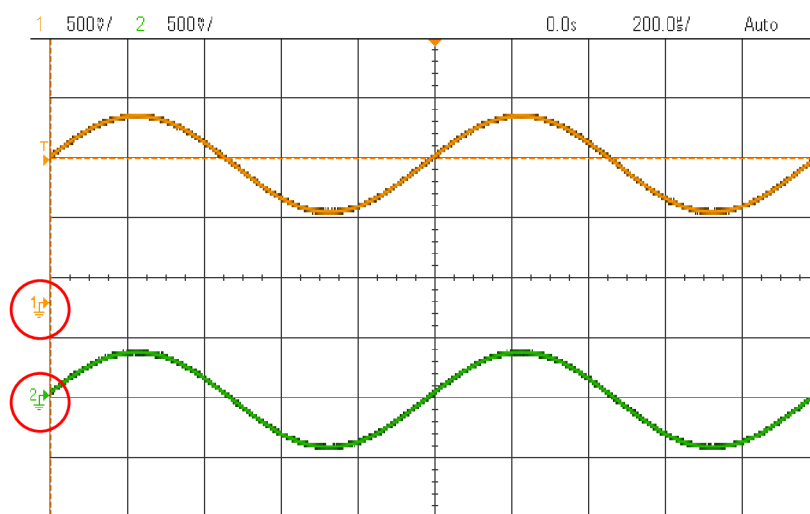


Obrázek 7.2 Ověření funkce RF filtrů

## 7.4 Ověření funkce oddělovacích kondenzátorů

Pro ověření funkce byl připojen na měřicí bod 1 (viz. Příloha D) a zem generátor s harmonickým průběhem o amplitudě  $800 \text{ mV}_{pp}$  a kmitočtu  $1 \text{ kHz}$ . Na generátoru byla také nastavena stejnosměrná složka o hodnotě  $1,2 \text{ V}$ . Tento signál znázorňuje oranžový průběh na obrázku 7.3. Stejnosměrná složka je zde patrná díky oranžové zemní značce, kterou vyznačuje červený kruh.

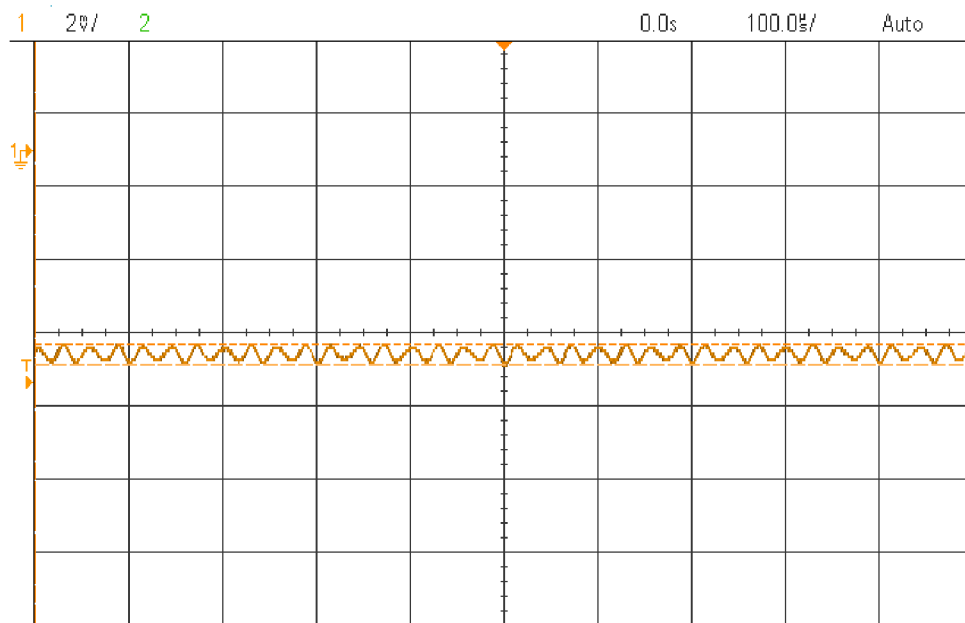
Sonda osciloskopu byla umístěna do měřicího bodu 9 (viz. Příloha D). Měřený průběh znázorňuje zelený průběh v grafu na obr. 7.3. Vzhledem k zelené zemní značce v červeném kruhu lze tvrdit, že byla stejnosměrná složka oddělovacími kondenzátory odfiltrována.



Obrázek 7.3 Ověření funkce oddělovacích kondenzátorů

## 7.5 Měření pronikání rušení z napájecího zdroje

Před měřením rušení z napájecího zdroje byly svorky vstupního konektoru zkratovány se zemním vodičem. Sonda osciloskopu byla připojena na výstup zařízení (bod 4 viz. Příloha E). Měřený průběh je patrný z obrázku 7.4. Změřená amplituda zkoumaného signálu činila  $575 \mu\text{V}_{\text{pp}}$ . Kmitočet tohoto signálu činil přibližně 30 kHz. Tento signál se tedy vyskytuje mimo slyšitelné pásmo a jeho amplituda je velmi nízká. Z toho lze usoudit, že na výstup zařízení neproniká rušení z napájecího zdroje.

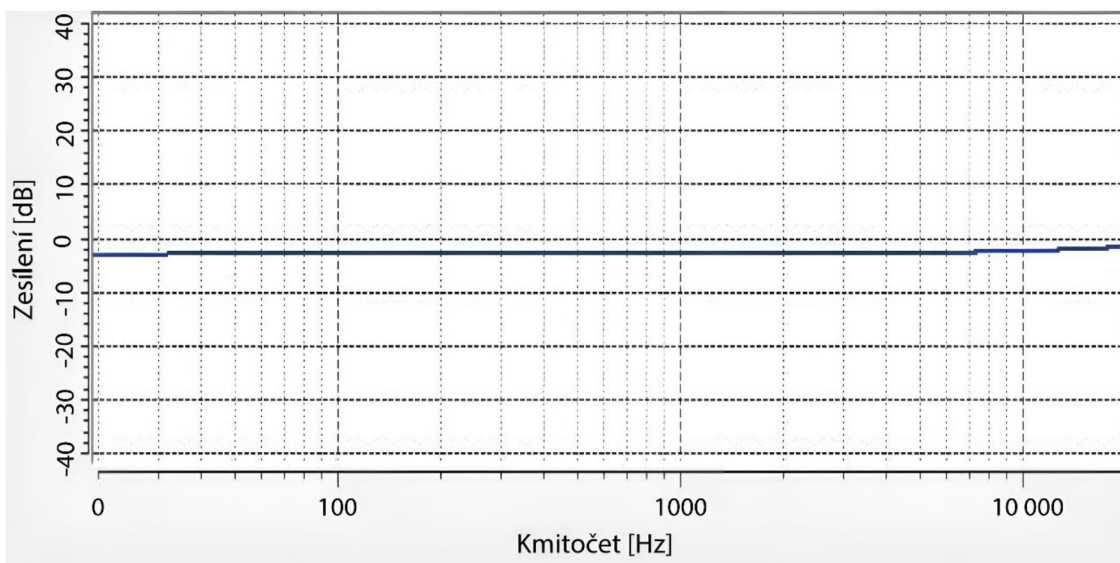


Obrázek 7.4 Měření pronikání rušení z napájecího zdroje

## 7.6 Měření pomocí Audio FX Analyzer

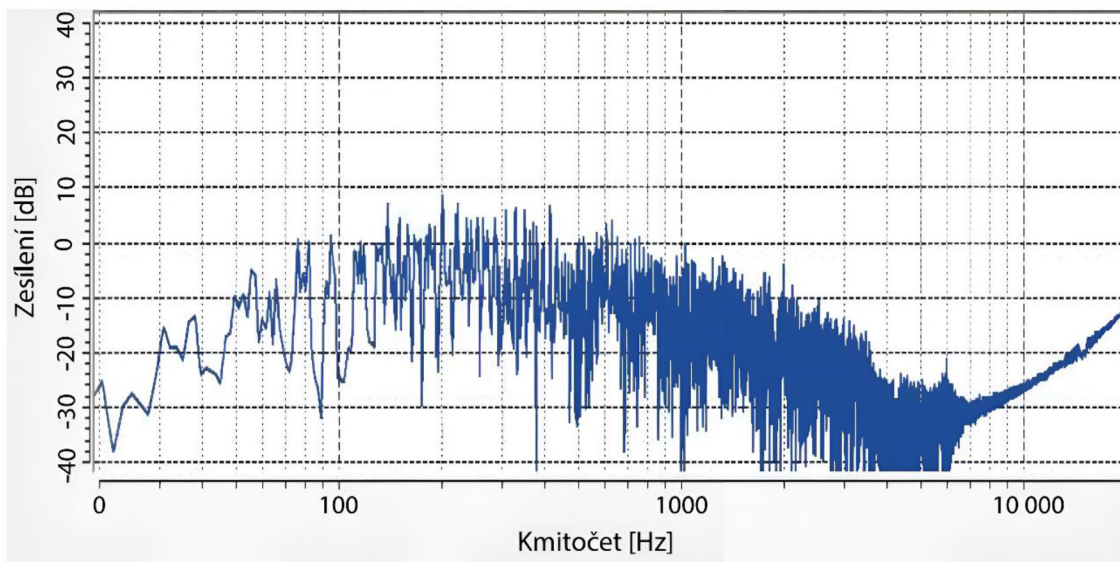
Pomocí aplikace Audio FX Analyzer byla změřena kmitočtová a impulsní odezva pro různá nastavení efektu.

První kontrolní měření spočívalo v měření kmitočtové odezvy pro maximální nastavení větve suchého signálu (ovládací prvek dry) a zcela vypnutého efektového signálu (ovládací prvek wet). Výsledek tohoto měření je na grafu na obr. 7.5. Kmitočtová odezva je v celém rozsahu konstantní, pouze na vysokých kmitočtech je patrný drobný nárůst. V pásmu, kde je charakteristika konstantní, lze pozorovat útlum přibližně 2 dB.

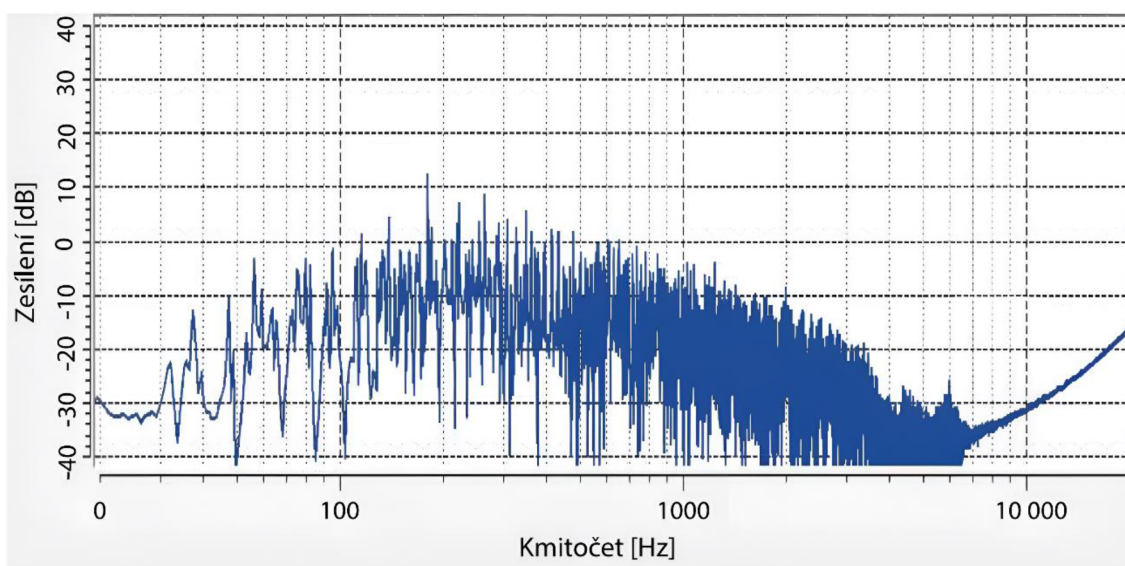


Obrázek 7.5 Kmitočtová odezva neefektovaného signálu

Další měření spočívalo opět v zjištění kmitočtové odezvy pouze při aktivované větvi s efektným signálem (dry). Došlo k provedení dvou měření, kdy při prvním byl ovládací potenciometr zpětné vazby (feedback) nastaven na minimum, výsledek je patrný na grafu na obr. 7.6. V druhém případě byl ovládací potenciometr zpětné vazby nastaven na maximum, výsledek je znázorněn na grafu na obr. 7.7.



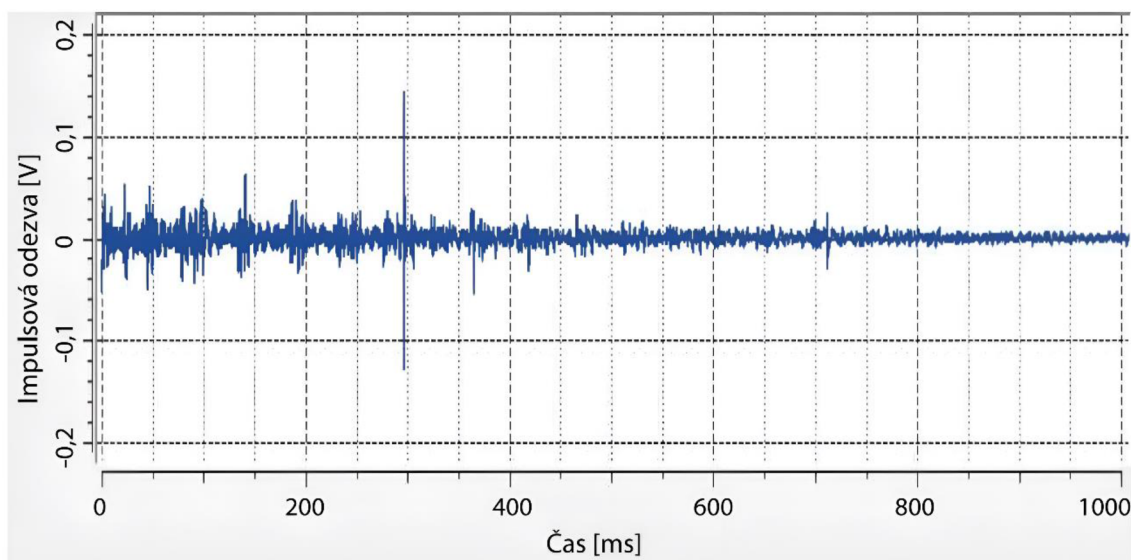
Obrázek 7.6 Kmitočtová odezva efektného signálu



Obrázek 7.7 Kmitočtová odezva efektovaného signálu se zavedením zpětné vazby

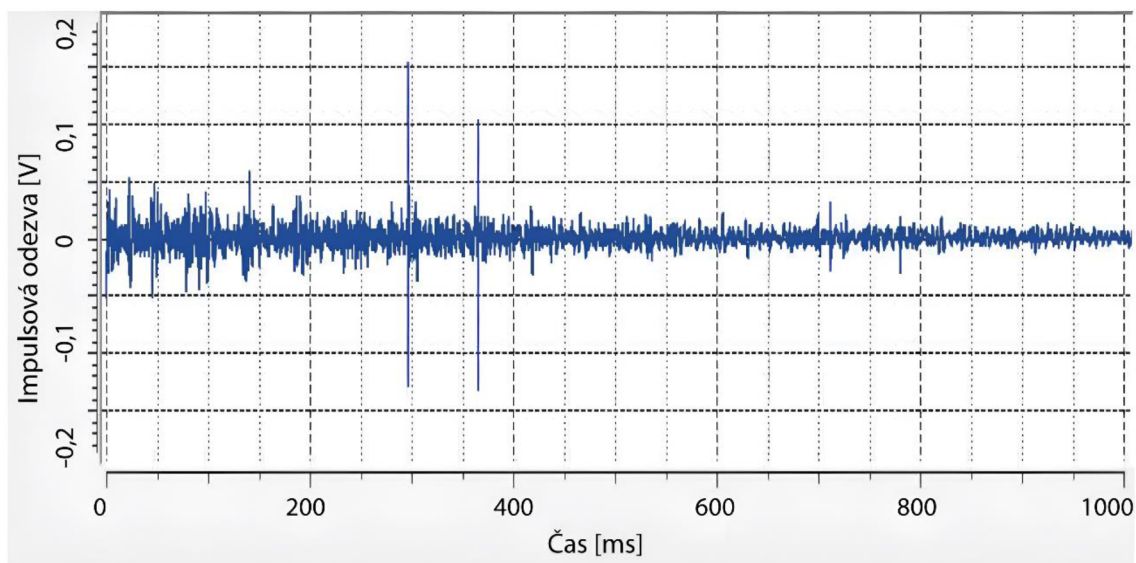
Výše znázorněné charakteristiky jsou ovlivněny zejména přenosem pružinového modulu (měřen v kapitole 2.1.3). Při zavedení zpětné vazby dojde ke zhuštění lokálních maxim a minim v měřené charakteristice a k výraznějším rozdílům mezi přenosy jednotlivých maxim a minim.

Další měření spočívalo ve zjištění impulsní odezvy efektu. Opět proběhlo měření pouze při maximálním nastavení efektovaného signálu „wet“ bez zpětné vazby. Výsledná impulsní odezva pro 1 sekundu je vynesena do grafu na obr. 7.8.



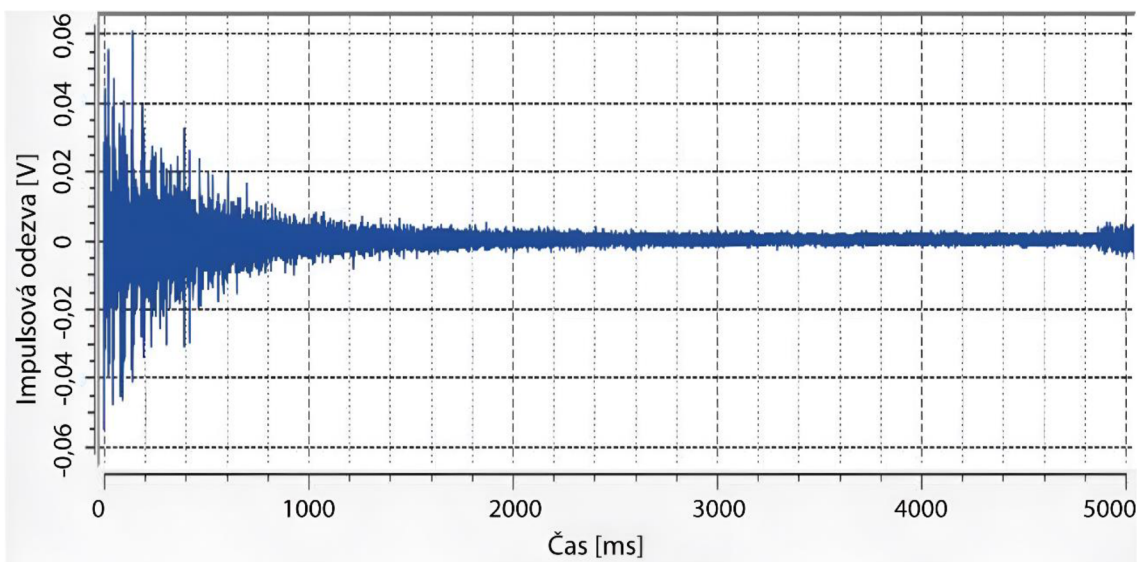
Obrázek 7.8 Impulsní odezva pro efektovaný signál – 1000 ms

Do grafu na obr. 7.9 je vynesena impulsní odezva po zavedení zpětné vazby (opět pro 1 sekundu). Můžeme pozorovat, že dojde k výraznému nárůstu zákmitu v čase 360 ms.

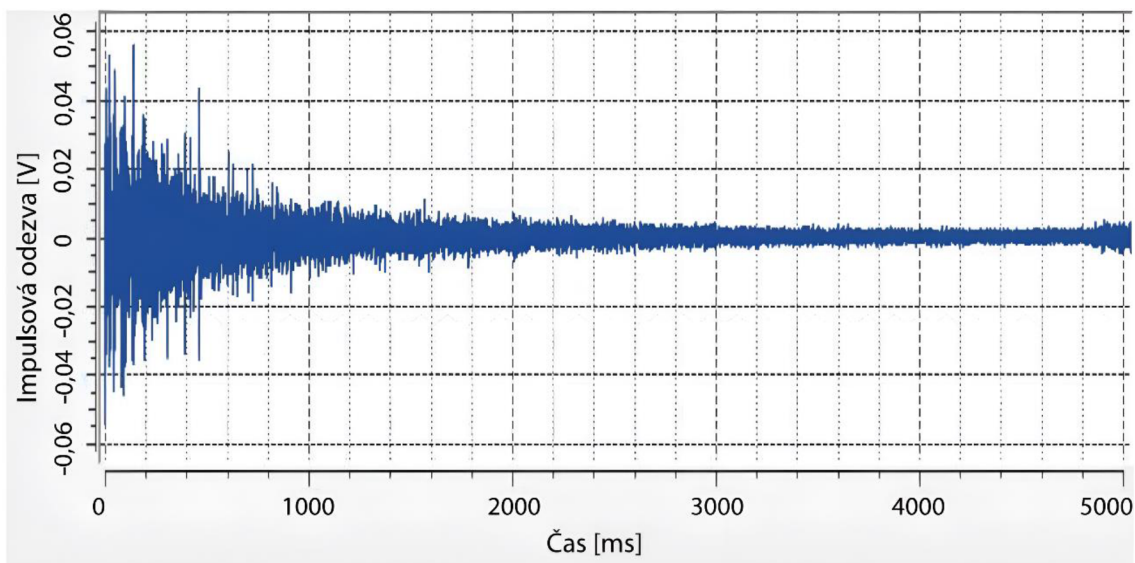


Obrázek 7.9 Impulsní odezva pro efektovaný signál se zpětnou vazbou – 1000 ms

Následující měření impulsní odezvy probíhala pro časový úsek 5 sekund. V grafu na obrázku 7.10 je výsledná impulsní odezva pro čistě efektovaný signál. Graf na obrázku 7.11 znázorňuje impulsní odezvu po zavedení zpětné vazby. Z grafů je patrné, že po zavedení zpětné vazby se lehce prodlouží doba dozvuku, jelikož díky zpětné vazbě efekt doznívá povlovněji.



Obrázek 7.10 Impulsní odezva pro efektovaný signál – 5000 ms



Obrázek 7.11 Impulsní odezva pro efektovaný signál se zpětnou vazbou – 5000 ms

Je zřejmé, že impulsní odezvy pro 1 s a 5 s se liší. Aplikace Audio FX Analyzer pro měření využívá logaritmicky přeladovaný signál a následně vypočítá impulsní odezvu. U měření pro 1 s a pro 5 s se liší rychlost přeladování signálu, tudíž se změní odezva pružinového modulu.

## 8. ZÁVĚR

V práci byl popsán vývoj dozvukových efektů typu reverb se zaměřením na pružinový reverb. Byla vysvětlena konstrukce a princip funkce pružinového modulu.

Pro návrh celkové koncepce zařízení bylo nutné změřit parametry pružinového modulu, neboť není dodáván s katalogovým listem. Byla zjištěna vstupní a výstupní impedance a přenos pružinového modulu. Celkový koncept zařízení byl navržen s ohledem na standardy používané v audiotechnice.

Jednotlivé bloky zařízení byly navrhnuty tak, aby výsledné zařízení bylo odolné proti poškození a univerzální na použití. Vstupní a výstupní signál může být symetrický i nesymetrický. Funkce zásadních částí zařízení byla ověřena a odladěna simulacemi. Základní bloky zařízení byly testovány na nepájivém poli. Součástky pro konstrukci zařízení byly vybírány tak, aby byly k dostání. Dostupnost součástek byla ověřena na českých e-shopech.

Vzhledem k návrhu jednotlivých bloků zařízení byl proveden návrh DPS a panelů montážní krabice. Výsledné zařízení bylo sestaveno a doplněno popisky pro přehledné používání.

Hotový efekt byl podroben řadě měření pro zjištění a ověření jeho parametrů.

Největší přítěž činil útlum pružinového modulu, který je kmitočtově závislý s velkým rozptylem hodnot útlumu. Bylo tak složité najít správnou hodnotu zesílení jednotlivých bloků.

Výsledkem práce je tedy funkční zařízení kompatibilní s komerčně užívanou studiovou technikou. Co se poslechových vlastností týče, je zvuk efektu srovnatelný s jinými efekty typu pružinový reverb (např. efekty zabudované v kytarových zesilovačích Marshall, emulace Waves Audio apod). Ve zvuku efektu je patrný typický prvotní záchvěv pružin a specifické doznívání.

Oproti komerčně užívaným efektům typu pružinový reverb je sestavené zařízení unikátní v podobě zavedení zpětné vazby. Zpětná vazba přidává originální zvukový aspekt, který není u pružinových reverbů běžný, nicméně přidává další možnosti originálního využití tohoto efektu. Šumová brána umožňuje s efektem pracovat v dynamické rovině, z čehož vyplývají další možnosti využití efektu.

## LITERATURA

- [1] DAVIS, Gary; JONES, Ralph a SAVOIT, Lee. *Sound reinforcement handbook*. Second edition. Milwaukee: Hal Leonard Corporation, [1989]. ISBN 978-0-88188-900-0.
- [2] SELF, Douglas. *Small signal audio design*. Burlington, MA: Focal Press, c2010. ISBN 978-0-240-52177-0.
- [3] Texas Instruments Inc. *NE5532 Datasheet*. 2005. Dostupné také z: <https://html.alldatasheet.com/html-pdf/27244/TI/NE5532/245/10/NE5532.html>
- [4] VRBA, Kamil a MIŠUREC, Jiří. *Technika analogových obvodů*. Brno: Vysoké učení technické v Brně – Nakladatelství VUTIUM, 2020. ISBN 978-80-214-5901-4.
- [5] *Pružinový hal pro kytarová komba*. Praktická elektronika C - Stavebnice a konstrukce, A Radio. Praha: Amaro, 2000, 4(3), 22-23. ISSN 1212-1843.
- [6] H&G AMPLIFIERS. *Guitar Noise Gate*. H&G Amplifiers [online]. 2015 [cit. 2023-12-01]. Dostupné z: <https://www.hgamps.com/guitar-noise-gate/>
- [7] SCHIMMEL, Jiří. *Studiová technika: Mixážní pult* [online]. [cit. 2023-12-01]. Dostupné z: [https://moodle.vut.cz/pluginfile.php/529771/mod\\_resource/content/14/STE\\_06\\_Mixpult.pdf](https://moodle.vut.cz/pluginfile.php/529771/mod_resource/content/14/STE_06_Mixpult.pdf)
- [8] *Elektrotechnický základ* [online]. In: Hluboká nad Vltavou, 2011, s. 87–91 [cit. 2023-12-01]. Dostupné z: [https://www.sosehl.cz/uploads/2020/11/Elektrotechnicky\\_zaklad\\_ucebni\\_text.pdf](https://www.sosehl.cz/uploads/2020/11/Elektrotechnicky_zaklad_ucebni_text.pdf)



## SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK

### Zkratky:

FEKT	Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií
VUT	Vysoké učení technické v Brně
OZ	Operační zesilovač
ADSR	Attack, decay, sustain, release
VU	Volume unit
RF	Radio frequency
DPS	Deska plošných spojů
AC	Alternating current
PP	Peak to peak

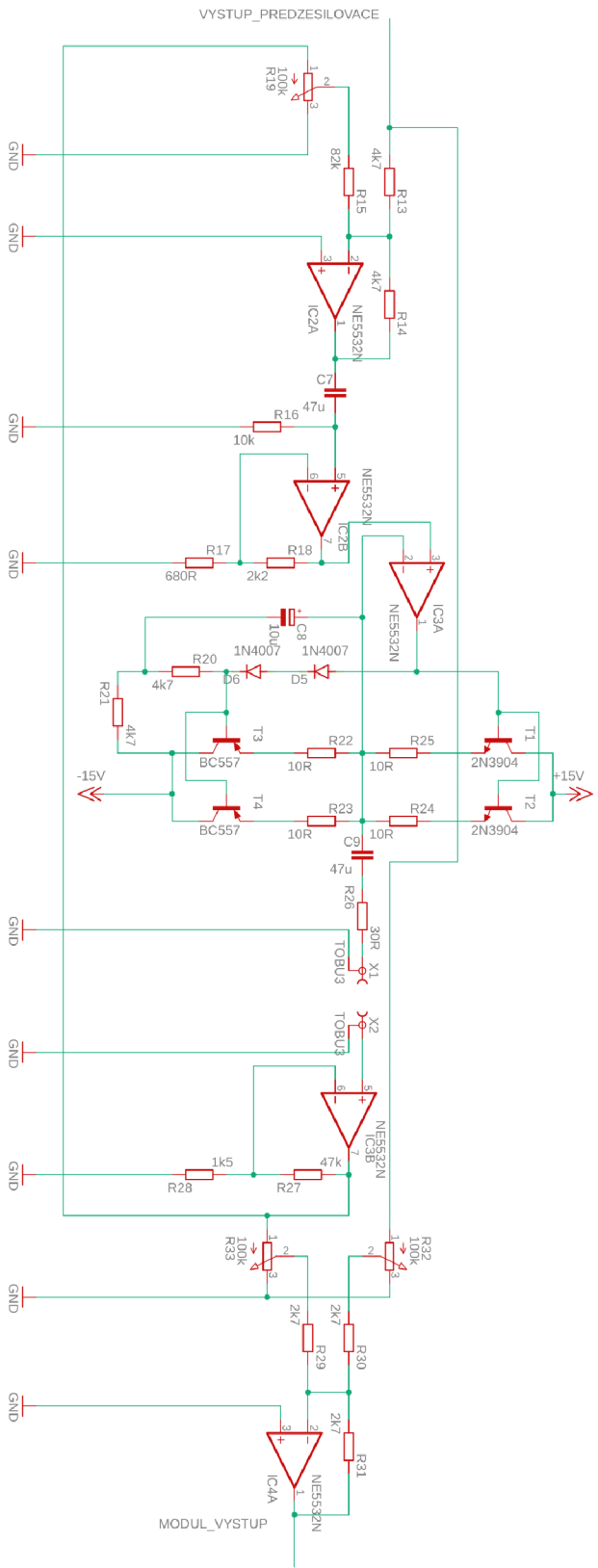
### Symbols:

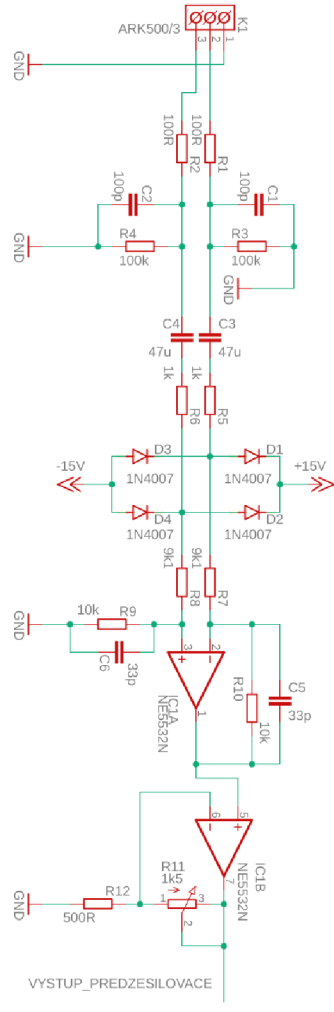
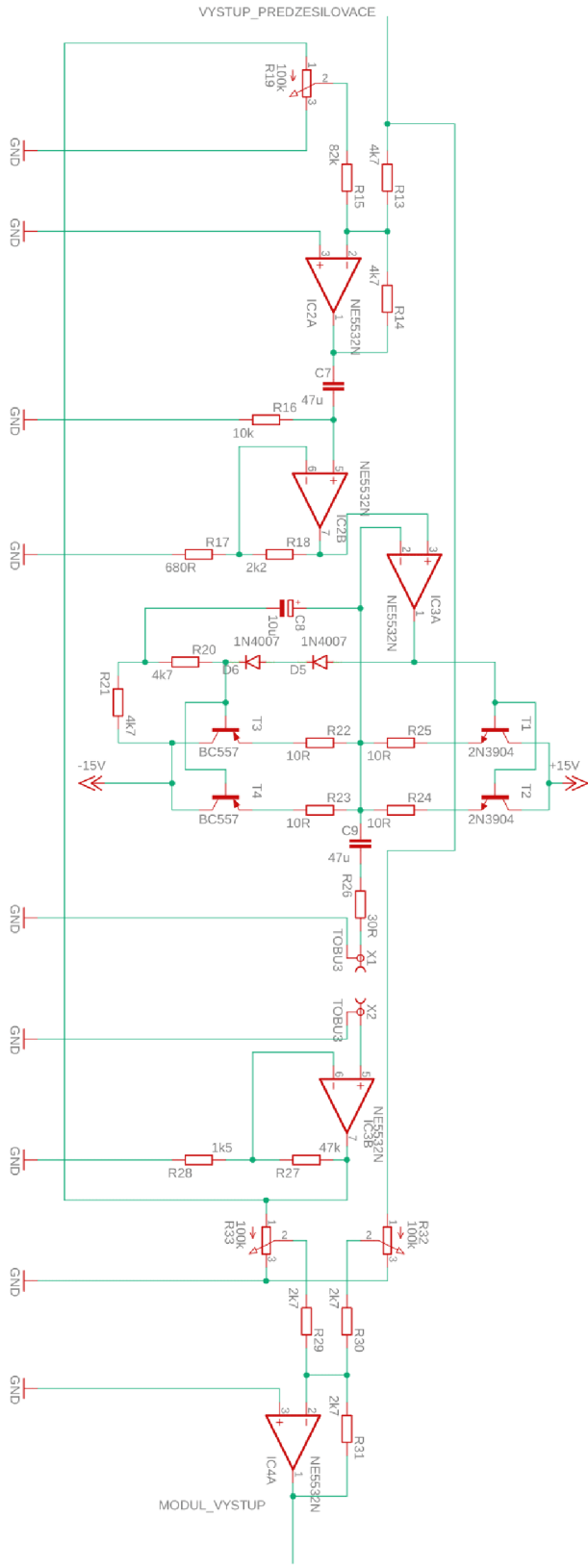
$f_M$	mezní kmitočet	(Hz)
$R$	elektrický odpor	( $\Omega$ )
$C$	kapacita	(F)
$X_L$	induktivní reaktance	( $\Omega$ )
$Z_L$	impedance cívky	( $\Omega$ )
$f$	kmitočet	(Hz)
$R_L$	stejnoseměrný odpor cívky	( $\Omega$ )

## **SEZNAM PŘÍLOH**

<b>PŘÍLOHA A - SCHÉMA OBVODŮ KOLEM PRUŽINOVÉHO MODULU .....</b>	<b>58</b>
<b>PŘÍLOHA B - CELKOVÉ SCHÉMA – ČÁST A.....</b>	<b>59</b>
<b>PŘÍLOHA C - CELKOVÉ SCHÉMA – ČÁST B.....</b>	<b>60</b>
<b>PŘÍLOHA D - CELKOVÉ SCHÉMA S MĚŘÍCÍMI BODY – ČÁST A.....</b>	<b>61</b>
<b>PŘÍLOHA E - CELKOVÉ SCHÉMA S MĚŘÍCÍMI BODY – ČÁST B .....</b>	<b>62</b>

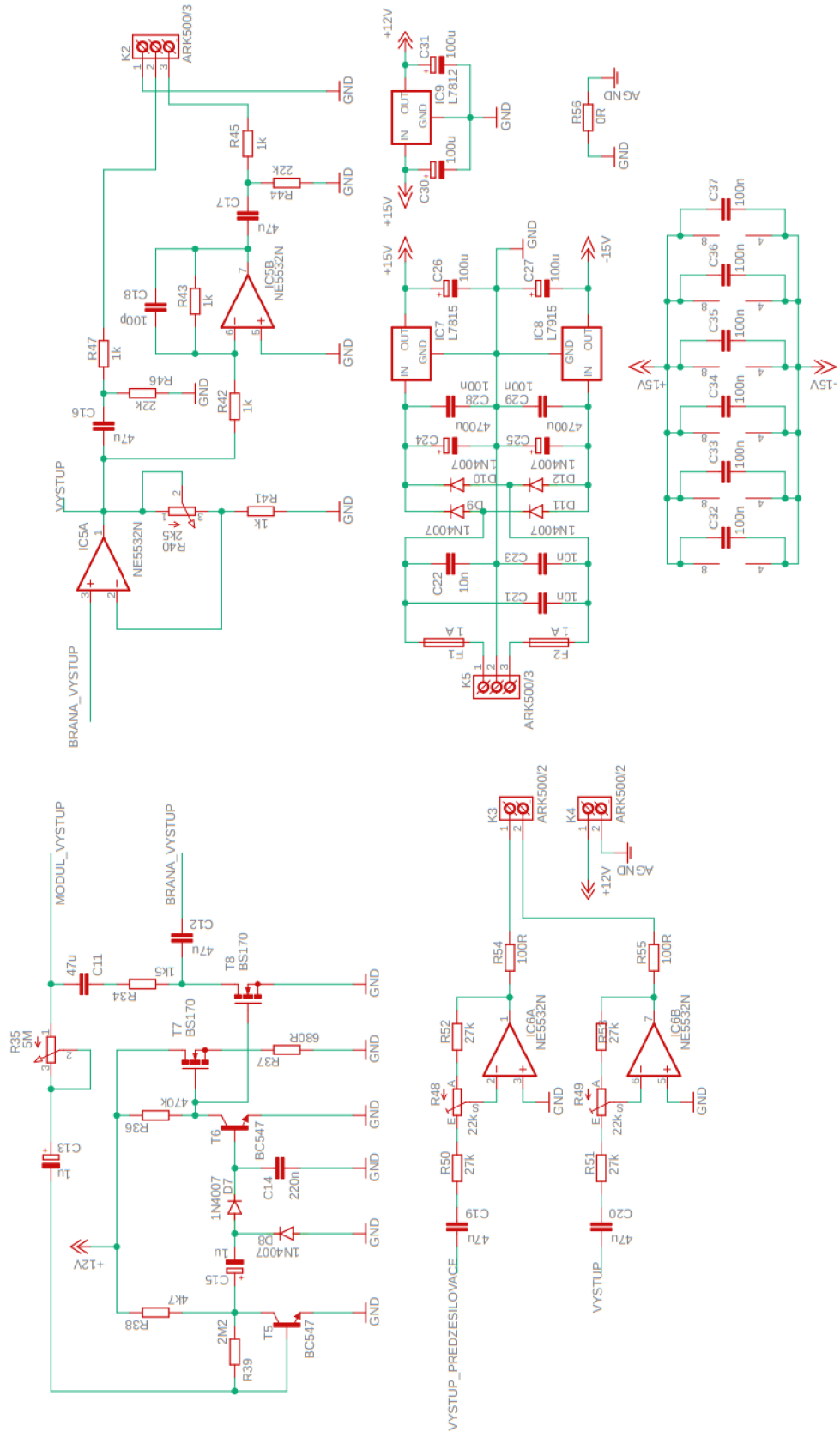
# Příloha A - Schéma obvodu kolem pružinového modulu





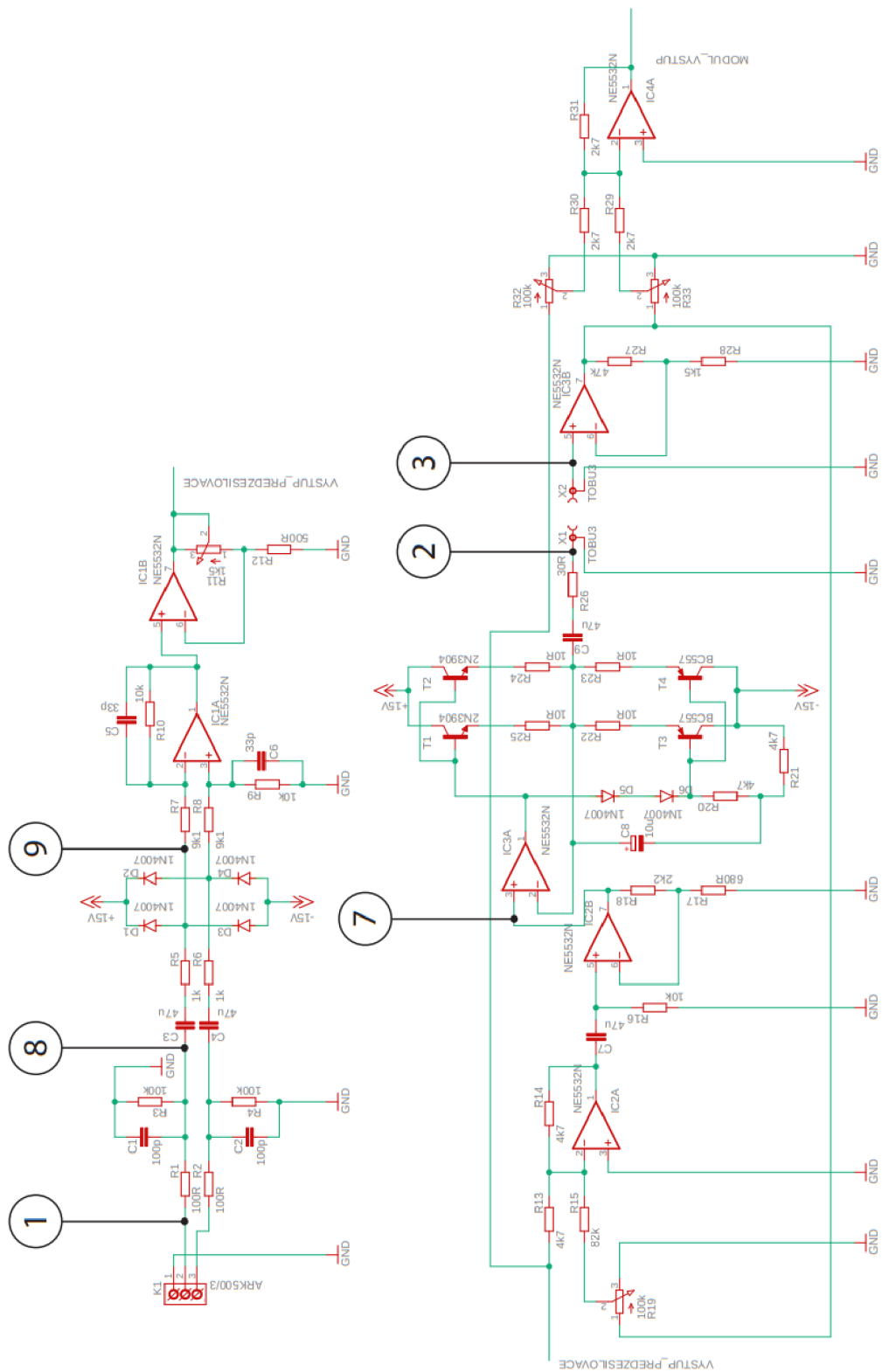
**Příloha B - Celkové schéma – část A**

# Příloha C - Celkové schéma – část B



# Příloha D - Celkové schéma s měřicími body

## – část A



# Příloha E - Celkové schéma s měřícími body – část B

