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

UNIVERZÁLNÍ PASIVNÍ KMITOČTOVÁ VÝHYBKA - LABORATORNÍ PŘÍPRAVEK
UNIVERSAL PASSIVE FREQUENCY CROSSOVER - LABORATORY DEVICE

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE — Dominik Pacek
AUTHOR

VEDOUCÍ PRÁCE — Ing. Miroslav Balík, Ph.D.
SUPERVISOR

BRNO 2021

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

Bakalářská práce

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

Student: Dominik Pacek ***ID:*** 211567
Ročník: 3 ***Akademický rok:*** 2020/21

NÁZEV TÉMATU:

Univerzální pasivní kmitočtová výhybka - laboratorní přípravek

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Nastudujte zapojení s pasivními LC a RLC obvody, která se používají v pasivních kmitočtových výhybkách, korekcích a kompenzacích pro pasivní reproduktorové soustavy. V teoretickém popisu se soustřeďte na rozdílné vlastnosti těchto obvodů s idealizovanými a reálnými setrvačnými prvky, následně porovnejte charakteristiky obvodů s idealizovanými a reálnými setrvačnými prvky. Dále navrhněte a vyrobte univerzální kmitočtovou výhybku - laboratorní přípravek, na kterém bude možné jednotlivé prvky výhybky snadno a rychle zaměňovat a tím měnit parametry výhybky. Připravte laboratorní úlohu, která za pomocí tohoto přípravku bude seznamovat studenty s vlastnostmi LC a RLC obvodů používaných v pasivních kmitočtových výhybkách.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

[1] TOMAN, K. Reproduktory a reprosoustavy II. [Česko: s.n.], 2010. ISBN 978-80-254-9510-0.

[2] COLLOMS, M., DARLINGTON, P. High Performance Loudspeakers. John Wiley & Sons, 2005. ISBN 978--470094-30-3.

Termín zadání: 1.2.2021 ***Termín odevzdání:*** 4.8.2021

Vedoucí práce: Ing. Miroslav Balík, 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

Cílem této práce je teoreticky nastínit problematiku návrhu pasivní reproduktorové výhybky v kontextu návrhu reproduktorové soustavy a její řešení za použití reálných součástek. Praktická část práce se zabývá návrhem laboratorního přípravku pasivní reproduktorové výhybky, jeho konstrukcí a vytvořením laboratorní úlohy využívající přípravek k výuce kurzu reproduktory a reproduktorové soustavy.

Klíčová slova

Reproduktorová výhybka, laboratorní přípravek, filtr, reproduktor, modul

Abstract

The aim of this work is to theoretically outline the issues associated with design of a passive crossover network in the context of speaker system design and the solutions to the mentioned issues.The practical part of the work deals with the design of a laboratory passive crossover network, it’s construction and creation of laboratory task utilizing the crossover network for teaching loudspeakers and speaker systems course.

Keywords

Crossover network, laboratory equipment, filter, loudspeaker, module

Bibliografická citace:

PACEK, Dominik. *Univerzální pasivní kmitočtová výhybka - laboratorní přípravek.* Brno, 2021. Dostupné také z: https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/133491. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav telekomunikací. Vedoucí práce Miroslav Balík.

Prohlášení autora o původnosti díla

Jméno a příjmení studenta:	**Dominik Pacek**
VUT ID studenta:	**211567**
Typ práce:	**Bakalářská práce**
Akademický rok:	**2020/21**
Téma závěrečné práce:	**Univerzální pasivní kmitočtová výhybka – laboratorní přípravek**

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: 3. srpna 2021

---

podpis autora

Poděkování

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

V Brně dne: 3. srpna 2021

---

podpis autora

Obsah

SEZNAM OBRÁZKŮ **9**

SEZNAM TABULEK **10**

ÚVOD **11**

1. PASIVNÍ REPRODUKTOROVÉ VÝHYBKY A KOMPENZAČNÍ OBVODY V REPRODUKTOROVÉ SOUSTAVĚ **12**

2. FUNKCIONALITY REPRODUKTOROVÉ VÝHYBKY A KOMPENZAČNÍCH OBVODŮ 14

2.1 ROZDĚLENÍ DO KMITOČTOVÝCH PÁSEM 14
2.2 KOMPENZACE CITLIVOSTI REPRODUKTORŮ 15
2.3 KOMPENZACE NEVYROVNANÉ MODULOVÉ KMITOČTOVÉ CHARAKTERISTIKY 15
2.4 KOMPENZACE FÁZOVÉ KMITOČTOVÉ CHARAKTERISTIKY 15
2.5 KOMPENZACE KMITOČTOVÉ ZÁVISLOSTI IMPEDANCE 16
2.6 KOMPENZACE AKUSTICKÉHO ZKRATU NA NÍZKÝCH KMITOČTECH 17

3. ELEKTRICKÉ OBVODY PRO REALIZACI KMITOČTOVÝCH VÝHYBEK A KOMPENZAČNÍCH OBVODŮ **18**

3.1 FILTRY TYPU DOLNÍ PROPUST 18
3.2 FILTRY TYPU HORNÍ PROPUST 18
3.3 SHELVING FILTRY 19
3.4 PEAK FILTRY 19
3.5 NAPĚŤOVÝ DĚLIČ 20

4. ELEKTRICKÉ PRVKY OBVODŮ REPRODUKTOROVÝCH VÝHYBEK **21**

4.1 REZISTORY 21
4.2 CÍVKY 21
4.3 KONDENZÁTORY 22

5. MĚŘENÍ KMITOČTOVĚ ZÁVISLÝCH VLASTNOSTÍ REÁLNÝCH SOUČÁSTEK **23**

5.1 ELEKTRICKÝ ODPOR REZISTORŮ 23
5.2 INDUKČNOST A ELEKTRICKÝ ODPOR CÍVEK 24
5.3 KAPACITA A EKVIVALENTNÍ SÉRIOVÝ ODPOR KONDENZÁTORŮ 25

6. PŘÍPRAVEK UNIVERZÁLNÍ REPRODUKTOROVÉ VÝHYBKY **27**

6.1 POŽADAVKY NA PŘÍPRAVEK 27
6.2 NÁVRH MECHANICKÉHO PROVEDENÍ 27
6.2.1 Varianta se suchým zipem *27*
6.2.2 Varianta s horizontálně orientovanými moduly *28*
6.2.3 Varianta s vertikálně orientovanými moduly *29*
6.3 NÁVRH DESEK PLOŠNÝCH SPOJŮ 29
6.3.1 Základní deska *29*
6.3.2 Modul pro rezistory *30*
6.3.3 Moduly pro cívky *31*
6.3.4 Moduly pro kondenzátory *32*

6.3.5 Moduly pro propojky ... *33*

7. VÝROBNÍ DOKUMENTACE A PARAMETRY PŘÍPRAVKU ... 34

7.1 VÝROBNÍ DOKUMENTACE PŘÍPRAVKU ... 34
7.2 PARAMETRY PŘÍPRAVKU ... 34
7.2.1 Základní deska ... 34
7.2.2 Modul pro rezistory ... 35
7.2.3 Moduly pro cívky ... 35
7.2.4 Moduly pro kondenzátory ... 35
7.2.5 Moduly propojek ... 36

8. KONSTRUKCE PŘÍPRAVKU ... 37

8.1 KONSTRUKCE ZÁKLADNÍ DESKY ... 37
8.2 KONSTRUKCE MODULŮ ... 38

9. LABORATORNÍ ÚLOHA ... 39

9.1 POŽADAVKY NA OBSAH LABORATORNÍ ÚLOHY ... 39
9.2 OBSAH LABORATORNÍ ÚLOHY ... 39
9.2.1 Kalibrační měření ... 40
9.2.2 Kmitočtová závislost impedance reproduktorů a obvodů kompenzujících impedanční charakteristiky reproduktorů ... 41
9.2.3 Kmitočtová závislost modulu a fáze přenosu při zapojení kmitočtové výhybky ... 42
9.2.4 Kmitočtová závislost modulu a fáze přenosu při zapojení kmitočtových korekcí středobasové větve ... 43
9.2.5 Kmitočtová závislost modulu a fáze přenosu při zapojení kmitočtových korekcí vysokotónové větve ... 44
9.2.6 Kmitočtová závislost modulu a fáze přenosu při zapojení všech kmitočtových korekcí ... 45
9.2.7 Kmitočtová závislost impedance soustavy při zapojení všech obvodů ... 46
9.3 ZHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ LABORATORNÍ ÚLOHY ... 46

10. ZÁVĚR ... 47

LITERATURA ... 48

SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK ... 49

SEZNAM PŘÍLOH ... 50

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1.1: Schéma pasivní reproduktorové soustavy 11
Obr. 2.1: Kmitočtová závislost impedance basového reproduktoru [3] 16
Obr. 2.2: Vliv bafflestepu na modulovou frekvenční charakteristiku 17
Obr. 3.1: Zapojení filtrů typu dolní propust 18
Obr. 3.2: Zapojení filtrů typu horní propust 19
Obr. 3.3: Zapojení shelving filtrů 19
Obr. 3.4: Zapojení peak filtrů 20
Obr. 3.5: Zapojení napěťového děliče 20
Obr. 4.1: Náhradní schéma rezistoru 21
Obr. 4.2: Náhradní schéma cívky 22
Obr. 4.3: Náhradní schéma kondenzátoru 22
Obr. 5.1: Kmitočtová závislost impedance rezistorového modulu osazeného rezistorem 4,7Ω 23
Obr. 5.2: Kmitočtová závislost indukčnosti a stejnosměrného odporu cívkového modulu osazeného cívkou 1,5mH 24
Obr. 5.3: Kmitočtová závislost kapacity a ekvivalentního sériového odporu kondenzátorového modulu osazeného kondenzátorem 2,2μF 25
Obr. 6.1: Prototyp systému uchycení pomocí suchého zipu 28
Obr. 6.2: Vizualizace systému s horizontálně orientovanými moduly 28
Obr. 6.3: Vizualizace vrstev přípravku a uchycení konektoru Speakon 30
Obr. 6.4: Modul pro rezistory (Měřítko 1:1) 30
Obr. 6.5: Modul pro malé cívky (Měřítko 1:1) 31
Obr. 6.6: Modul pro velké cívky (Měřítko 1:1) 31
Obr. 6.7: Velký modul pro kondenzátory (Měřítko 1:1) 32
Obr. 6.8: Malý modul pro kondenzátory (Měřítko 1:1) 32
Obr. 6.9: Modul pro propojky (Měřítko 1:1) 33
Obr. 8.1: Vymezení distance mezi svrchní a prostřední DPS 37
Obr. 8.2: Uchycení cívky na cívkovém modulu 38
Obr. 8.3: Detail spodní hrany rezistorového modulu 38
Obr. 9.1: Graf modulové kmitočtové charakteristiky přípravku při přímém propojení vstupu a výstupu 40
Obr. 9.2: Graf fázové kmitočtové charakteristiky přípravku při přímém propojení vstupu a výstupu 40
Obr. 9.3: Graf impedanční kmitočtové charakteristiky obvodů kompenzujících impedanční kmitočtovou charakteristiku reproduktorů 41
Obr. 9.4: Graf impedanční kmitočtové charakteristiky reproduktorů před a po kompenzaci 42
Obr. 9.5: Graf modulové kmitočtové charakteristiky obvodů kmitočtových výhybek 42
Obr. 9.6: Graf fázové kmitočtové charakteristiky obvodů kmitočtových výhybek 43
Obr. 9.7: Graf modulové kmitočtové charakteristiky obvodů kmitočtových korekcí středobasové větve 43
Obr. 9.8: Graf fázové kmitočtové charakteristiky obvodů kmitočtových korekcí středobasové větve 44
Obr. 9.9: Graf modulové kmitočtové charakteristiky obvodů kmitočtových korekcí vysokotónové větve 44
Obr. 9.10: Graf modulové kmitočtové charakteristiky všech obvodů kmitočtových korekcí 45
Obr. 9.11: Graf fázové kmitočtové charakteristiky všech obvodů kmitočtových korekcí 45
Obr. 9.12: Graf impedanční kmitočtové charakteristiky soustavy při zapojení všech obvodů 46

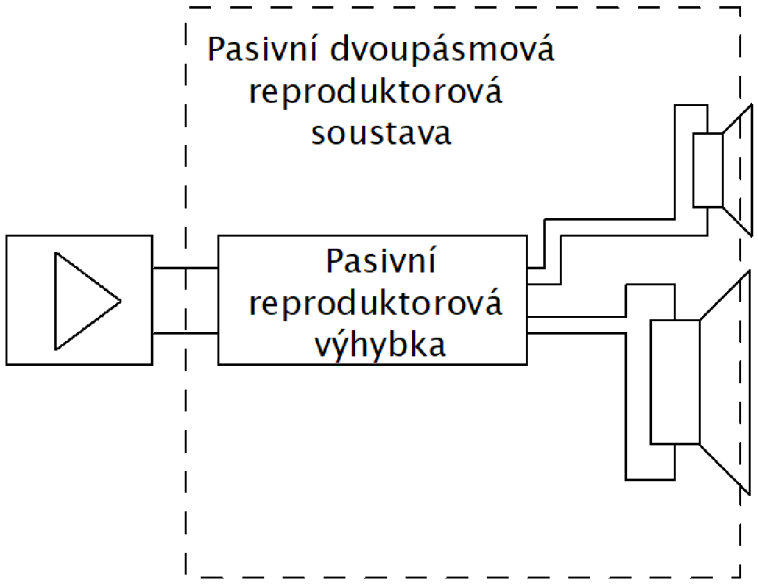
SEZNAM TABULEK

Tabulka 5.1: Porovnání vybraných parametrů měřených kondenzátorů 26
Tabulka 7.1: Technické parametry základní desky 34
Tabulka 7.2: Technické parametry modulu pro rezistory 35
Tabulka 7.3: Technické parametry modulů pro cívky 35
Tabulka 7.4: Technické parametry modulů pro kondenzátory 35
Tabulka 7.5: Technické parametry modulů propojek 36

ÚVOD

Pasivní reproduktorové výhybky jsou i dnes hojně využívány pro řešení problémů vznikajících při návrhu dílčích prvků elektroakustického řetězce. Nejčastěji se s nimi setkáme v podobě soustavy rezistorů, kondenzátorů a cívek umístěných uvnitř pasivní reproduktorové soustavy. Z toho vyplývají také omezení tohoto řešení ve srovnání s aktivními reproduktorovými výhybkami nebo digitálními signálovými procesory umístěnými v elektroakustickém řetězci ještě před koncovým zesilovačem. Jmenovitě např. velké rozměry používaných součástek, nemožnost změny parametrů elektrických obvodů a nemožnost změny topologie elektrických obvodů bez nutnosti fyzické záměny součástek.

V mé bakalářské práci se budu zabývat teorií reproduktorových výhybek a dále návrhem laboratorního přípravku, který bude používán pro laboratorní výuku předmětu reproduktory a reproduktorové soustavy. Pro účely výuky je nutné, aby přípravek umožňoval co nejjednodušší záměnu součástek a změnu topologie zapojení při zachování co nejmenších rozměrů přípravku a co nejmenších nákladů na jeho výrobu. To znamená překonání hlavních nedostatků, se kterými se řešení pomocí pasivních výhybek potýkají.



Obr. 1.1: Schéma pasivní reproduktorové soustavy

1. PASIVNÍ REPRODUKTOROVÉ VÝHYBKY A KOMPENZAČNÍ OBVODY V REPRODUKTOROVÉ SOUSTAVĚ

Při návrhu reproduktorové soustavy je jeden z nejčastějších požadavků reprodukce celého slyšitelného pásma od 20Hz do 20kHz s co nejmenším zkreslením a s omezeným maximálním zvlněním kmitočtové modulové charakteristiky, v Hi-Fi aplikacích běžně méně než 3dB. Sestrojit jeden reproduktor, který by tyto požadavky splňoval je prakticky nemožné (viz kapitola 3.1). Typická reproduktorová soustava se tedy skládá z dvou nebo více reproduktorů, pro dvě nebo více pásem. Tím vzniká potřeba rozdělit elektrický signál vstupující do reproduktorové soustavy na počet signálů odpovídající počtu pásem. Díky tomu bude každý reproduktor vyzařovat pouze frekvenční pásmo, které odpovídá jeho konstrukci. Z tohoto základního požadavku taky vyplývá samotný název reproduktorová výhybka. Problematikou rozdělení do kmitočtových pásem je věnována kapitola 3.1.

Další z nežádoucích vlastností reproduktorů, která je třeba kompenzovat, je rozdíl v citlivosti mezi reproduktory. Typickým příkladem je dvoupásmová soustava se středobasovým a výškovým reproduktorem. Výškové reproduktory mají zpravidla vyšší citlivost o řádově jednotky decibel. Pokud bychom tento rozdíl nekompenzovali, vyzařovala by reproduktorová soustava vysoké frekvence hlasitěji než středové a basové frekvence, tedy neměla by vyrovnanou modulovou kmitočtovou charakteristiku, což je jeden ze základních požadavků. Této problematice se věnuje kapitola 3.2.

Přestože jsou v běžné praxi používány reproduktory konstruované pouze pro vyzařování určité části slyšitelného pásma, jak bylo výše odůvodněno, jejich modulová kmitočtová charakteristika ani v těchto pásmech není dokonale rovná. Čím kvalitnější reproduktor, tím je toto zvlnění zpravidla menší. V případech, kdy jsme nuceni použít nějaký reproduktor se zvlněnou modulovou kmitočtovou charakteristikou, je možné ji pomocí vhodně naladěných filtrů vyrovnat, jak je uvedeno v kapitole 3.3.

Reálný reproduktor také nemá rovnou fázovou charakteristiku, některé kmitočty vyzařuje s fázovým posuvem oproti jiným. Kvůli nesprávnému sladění fázových charakteristik dvou nebo více reproduktorů nebo reprosoustav může vlivem fázového posuvu vznikat hřebenový filtr, který je pro zvukovou reprodukci nežádoucí. Více je uvedeno v kapitole 3.4.

Z konstrukce reproduktoru jakožto elektroakustického měniče vyplývá, že jeho impedance bude frekvenčně závislá. Tento fakt je důležitý při volbě zesilovače, jehož výstup bude přiveden na vstup reproduktorové soustavy. Je žádoucí, aby byl zesilovač zatěžován stejnou impedancí pro všechny zesilované kmitočty a je velmi nežádoucí, aby v nějakém kmitočtovém pásmu klesla impedance reproduktorové soustavy pod minimální dovolenou zatěžovací impedanci zesilovače, což by v případě nepřítomnosti

nadproudové ochrany mohlo poškodit koncový stupeň zesilovače. O kompenzaci kmitočtové závislosti impedance pojednává kapitola 3.5

Další funkcí výhybky je také kompenzace akustického zkratu na nízkých kmitočtech neboli bafflestep kompenzace. Projev tohoto efektu je závislý hlavně na tvaru ozvučnice, její velikosti a vyzařovaném kmitočtu reproduktorovou soustavou. Detailněji je popsán v kapitole 3.6

2. FUNKCIONALITY REPRODUKTOROVÉ VÝHYBKY A KOMPENZAČNÍCH OBVODŮ

Požadovaná funkcionalita výhybky přímo vychází z potřeby řešit problémy a kompenzovat nedostatky uvedené v předchozí kapitole. Je však na rozmyšlení, kolik z výše uvedených nedostatků je rozumné řešit a do jaké míry. U levných reproduktorů s velmi nevyrovnanou modulovou kmitočtovou charakteristikou se paradoxně můžeme dostat do situace, kdy by výroba výhybky kompenzující tuto nevyrovnanost pomocí třech sériových RLC obvodů tvořící tři peak filtry (viz kapitola 4.4) byla dražší jak samotný reproduktor. Rozhodně není podmínkou v praxi použít všechny níže uvedené kompenzace v rámci jedné reproduktorové soustavy. Použití každé z nich je situační a na zvážení inženýra navrhující danou reproduktorovou soustavu.

2.1 Rozdělení do kmitočtových pásem

Rozdělení zvukového signálu do kmitočtových pásem se v rámci pasivní reproduktorové výhybky provádí pomocí filtrů typu horní, dolní a pásmová propust. U typické dvoupásmové soustavy je použit filtr typu horní propust pro výškový reproduktor a filtr typu dolní propust pro středobasový reproduktor. U třípásmových a vícepásmových soustav je navíc použit filtr typu pásmová propust pro reproduktory vyzařující frekvence vymezené horní hranicí basového reproduktoru a spodní hranicí výškového reproduktoru.

Vhodné dělící frekvence filtrů se zvolí dle naměřených modulových frekvenčních charakteristik reproduktorů v ose i mimo ni. V případě, že není možné toto měření uskutečnit, většina solidních výrobců poskytuje ke svým reproduktorům v rámci dokumentace i výrobcem naměřené modulové frekvenční charakteristiky, fázové frekvenční charakteristiky, kmitočtové závislosti impedance a kmitočtové závislosti fáze impedance. Tyto údaje jsou však naměřené pouze na jednom vzorku daného modelu. Vlastnosti námi zakoupeného kusu se můžou od výrobcem udávaných značně lišit. Proto je vhodnější řešení uskutečnit toto měření svépomocí ještě před návrhem výhybky.

Vhodná strmost filtru se volí podle také podle výše uvedených charakteristik. Použitá strmost filtru má však vliv na složitost zapojení a počet součástek použitých ve výhybce. Čím vyšší strmost filtru, tím vyšší počet součástek. Typický problém, který vyžaduje použití filtru vyššího řádu je zamezení reprodukce nízkých frekvencí výškovým reproduktorem, u kterého hrozí mechanické poškození vlivem nadměrné výchylky membrány. Je proto opět na zvážení inženýra navrhujícího výhybku, jaká strmost filtru již bude splňovat požadované rozdělení pásma a ochranu výškového reproduktoru, ale zároveň budou náklady na její výrobu ještě přijatelné. V praxi se používají filtry se strmostí prvního až čtvrtého řádu.

Konkrétním zapojením a výběrem hodnot součástek se zabývají kapitoly 4.1 a 4.2.

2.2 Kompenzace citlivosti reproduktorů

Citlivost reproduktoru je parametr, který udává, jaký průměrný akustický tlak reproduktor vyvine ve vzdálenosti 1m při příkonu 1VA. Je to parametr přímo související s výkonovou účinností reproduktoru. Rozsah běžných hodnot je od 80dB/m/W u malých širokopásmových reproduktorů s průměrem membrány pod 10cm a subbasových reproduktorů s extrémní výchylkou až po 115dB/m/W u nejúčinnějších kompresních měničů pro PA použití. [1]

Velmi často se tedy při návrhu reproduktorové soustavy dostáváme do situace, kdy potřebujeme docílit rovné modulové frekvenční charakteristiky soustavy za použití reproduktorů s rozdílnou citlivostí. V případě pasivní reproduktorové výhybky se tato kompenzace realizuje snížením úrovně signálu pro reproduktor s vyšší citlivostí, protože nelze vytvořit pasivní filtr, který by umožnil zvýšení úrovně signálu pro reproduktor s nižší citlivostí.

Při konstrukci reproduktorové soustavy je vhodné vybírat reproduktory se stejnou nebo alespoň velmi blízkou hodnotou citlivosti. I když se obvody používané pro redukci citlivosti sestávají většinou jen z rezistorů, které jsou zpravidla levnější než cívky a kondenzátory používané ve výhybkách, můžeme výběrem reproduktorů se stejnou citlivostí docílit menší složitosti výhybky a zároveň snížením odpadního tepla, které obvody kompenzující citlivost reproduktorů produkují.

2.3 Kompenzace nevyrovnané modulové kmitočtové charakteristiky

Zvlnění modulové kmitočtové charakteristiky reproduktoru může obzvláště u méně kvalitních reproduktorů nabývat až +-10dB. Tuto nevyrovnanost výrobce většinou přiznává už v dokumentaci daného reproduktoru, případně je zjištěna až po zakoupení reproduktoru a přeměření modulové frekvenční charakteristiky. Opět můžou být ušetřeny náklady na výhybku a její složitost, když bude vybrán reproduktor s co nejrovnější modulovou frekvenční charakteristikou.

Pro kompenzaci případné nevyrovnanosti se používají filtry typu peak. Opět lze použít pouze peak filtry s přenosem menším než 0dB. Tyto filtry se používají většinou v reproduktorových soustavách vyšší cenové kategorie vzhledem k tomu, že jejich efekt se na výsledném zvuku podílí méně než filtry uvedené v kapitolách 3.1 a 3.2.

2.4 Kompenzace fázové kmitočtové charakteristiky

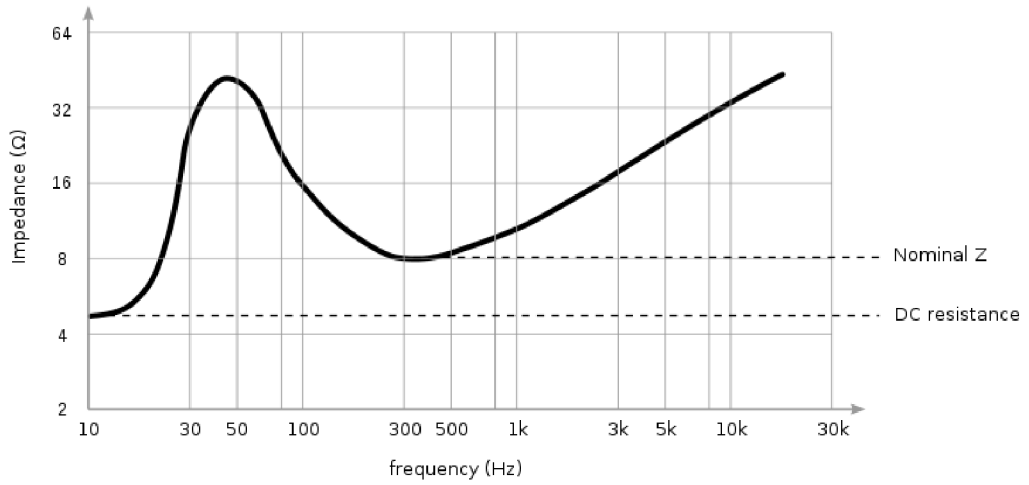
Fázová kmitočtová charakteristika reproduktoru také není rovná, obzvláště v oblasti vlastní rezonanční frekvence reproduktoru. Na fázi mají vliv také připojené obvody pasivní reproduktorové výhybky. Je žádoucí, aby všechny reproduktory soustavy vyzařovaly ve fázi neboli s stejným fázovým zpožděním pro odpovídající frekvence. Na

vzájemné fázové zpoždění reproduktorů má navíc také vliv zapuštění reproduktorů v přední desce soustavy. Už rozdíl v řádu centimetrů v hloubkovém umístění reproduktorů vůči posluchači resp. měřícímu mikrofonu může způsobit nezanedbatelný fázový posuv. [2]

Tvar fázové kmitočtové charakteristiky můžeme upravit pomocí fázovacích článků, což jsou pasivní obvody, které nemají vliv na tvar modulové kmitočtové charakteristiky, pouze ovlivňují tvar fázové kmitočtové charakteristiky. Pro předcházení problémů s fází je vhodné provést simulaci modulové kmitočtové charakteristiky a fázové kmitočtové charakteristiky reproduktorové soustavy včetně vlivu výhybky a zapuštění reproduktorů. Je možné tak případné problémy odhalit a vyřešit např. změnou hloubky zapuštění reproduktoru ještě před výrobou ozvučnice, což je levnější a jednodušší řešení než implementovat fázovací články do výhybky.

2.5 Kompenzace kmitočtové závislosti impedance

Kmitočtová závislost impedance také není rovná. Její typický průběh pro basový reproduktor je vidět na obrázku 3-1. Její modul má peak pro frekvenci odpovídající rezonanční frekvenci. Následná nejnižší hodnota modulu následující při rostoucí frekvenci se nazývá jmenovitá impedance. Od ní dále s rostoucí frekvencí roste modul impedance vlivem indukčnosti kmitací cívky reproduktoru. Pro výškový reproduktor vypadá charakteristika podobně, pouze je peak na typicky vyšší rezonanční frekvenci.



Obr. 2.1: Kmitočtová závislost impedance basového reproduktoru [3]

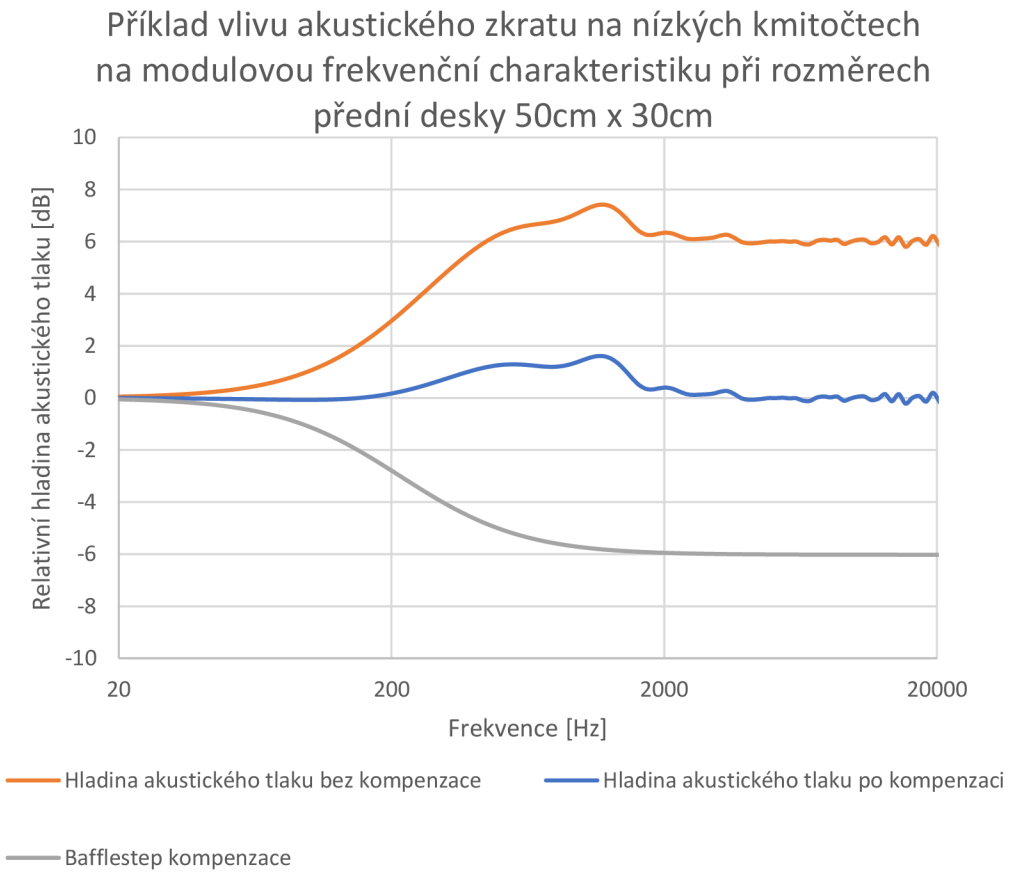
Nevhodným zapojením výhybky lze docílit toho, že modul kmitočtové závislosti impedance reproduktorové soustavy klesne pod minimální zatěžovací impedanci výkonového zesilovače a vlivem nadměrného proudu do zátěže může dojít k poškození

koncové části zesilovače, pokud nedisponuje nadproudovou ochranou. Proto je i na tento parametr nutné dbát při návrhu výhybky.

Pro kompenzaci růstu impedance s rostoucí frekvencí u reproduktorů se používá Zobelův filtr, který tento nárůst potlačí. [4]

2.6 Kompenzace akustického zkratu na nízkých kmitočtech

Kompenzace akustického zkratu na nízkých kmitočtech neboli bafflestep kompenzace má za úkol omezit nebo úplně eliminovat efekt poklesu hladiny akustického tlaku vyzářeného basovým reproduktorem na frekvencích s vlnovými délkami blížícími se rozměrů přední desky reproduktorové soustavy. Pro tyto nízké kmitočty se reproduktor chová jako kulový zářič, a tedy polovina vyzářené energie je vyzářena opačným směrem. S rostoucí frekvencí roste směrovost vyzařování a tím i modul frekvenční charakteristiky. [5]
Pro kompenzaci tohoto efektu se používá shelving filtr vložený na začátek výhybky nebo na začátek větve se středobasovým reproduktorem.



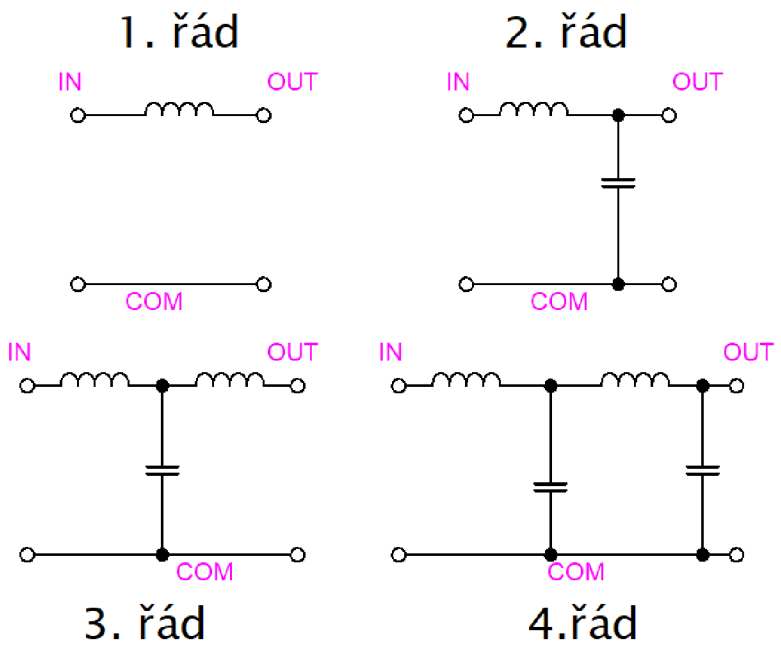
Obr. 2.2: Vliv bafflestepu na modulovou frekvenční charakteristiku

3. ELEKTRICKÉ OBVODY PRO REALIZACI KMITOČTOVÝCH VÝHYBEK A KOMPENZAČNÍCH OBVODŮ

V této kapitole jsou uvedena často používaná zapojení pasivních součástek R, L a C, pomocí kterých lze nejjednodušeji a nejefektivněji řešit problémy uvedené v kapitole 3.

3.1 Filtry typu dolní propust

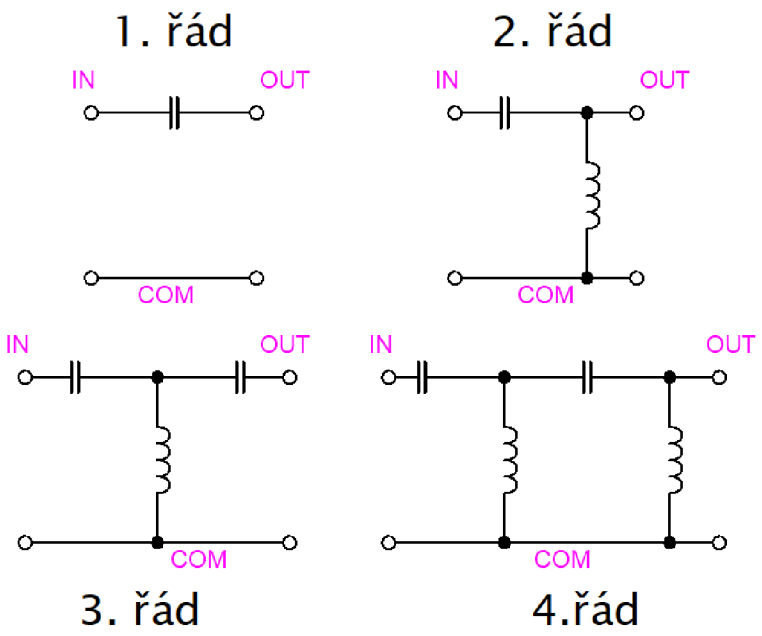
U filtru typu dolní propust (dále DP) také odpovídá řád filtru počtu akumulačních prvků v obvodu. DP prvního řádu je tvořena jednou cívkou. DP druhého řádu je tvořena kondenzátorem a cívkou. DP třetího řádu je tvořena dvěma cívkami a kondenzátorem a DP čtvrtého řádu je tvořena dvěma kondenzátory a dvěma cívkami.



Obr. 3.1: Zapojení filtrů typu dolní propust

3.2 Filtry typu horní propust

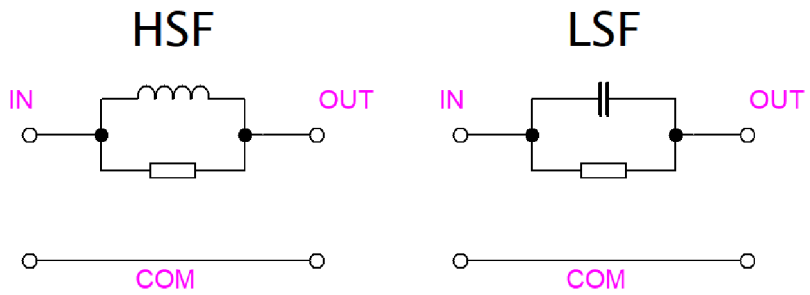
U filtru typu horní propust (dále HP) odpovídá řád filtru počtu akumulačních prvků v obvodu. HP prvního řádu je tvořena jedním kondenzátorem. HP druhého řádu je tvořena kondenzátorem a cívkou. HP třetího řádu je tvořena dvěma kondenzátory a cívkou a HP čtvrtého řádu je tvořena dvěma kondenzátory a dvěma cívkami.



Obr. 3.2: Zapojení filtrů typu horní propust

3.3 Shelving filtry

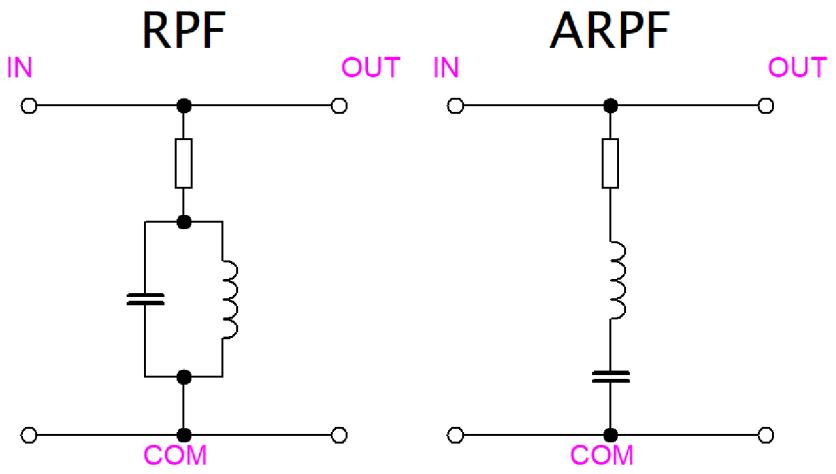
Existují dva typy shelving filtrů, high shelving filtr (HSF) a low shelving filtr (LSF). Můžeme je realizovat jak v paralelní, tak sériové topologii. Jsou tvořeny jedním akumulačním prvkem a rezistorem. [4]



Obr. 3.3: Zapojení shelving filtrů

3.4 Peak filtry

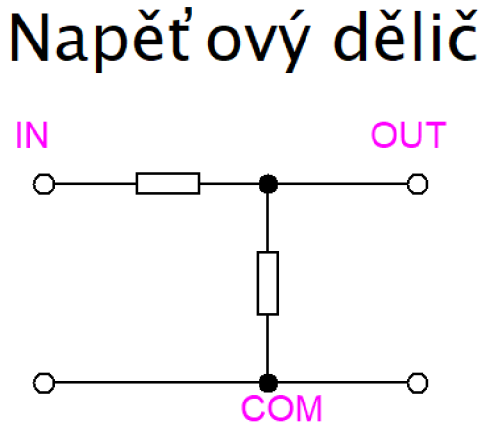
V pasivních výhybkách používáme dva typy peak filtrů. Rezonanční peak filtr (RPF) a antirezonanční peak filtr (ARPF). Prakticky lze realizovat sériovou i paralelní topologií, ale v praxi se využívá převážně paralelní topologie. RPF je v paralelní topologii realizován jako sério-paralelní RLC obvod připojený paralelně k zátěži. ARPF je v paralelní topologii realizován jako sériový RLC obvod připojený paralelně k zátěži. [4]



Obr. 3.4: Zapojení peak filtrů

3.5 Napěťový dělič

Nejjednodušší realizace kompenzace citlivosti reproduktoru je pomocí napěťového děliče. Ten je tvořen dvěma rezistory.



Obr. 3.5: Zapojení napěťového děliče

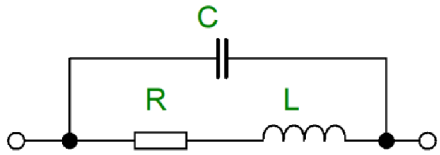
4. ELEKTRICKÉ PRVKY OBVODŮ REPRODUKTOROVÝCH VÝHYBEK

Tato kapitola se zabývá rozdílem mezi ideálními a reálnými součástkami používanými v elektrických obvodech uvedených v předchozí kapitole. Zároveň bude zmíněna technologie výroby a její vliv na parametry součástek.

4.1 Rezistory

Rezistor je elektronická součástka, jejíž základní charakteristická vlastnost je elektrický odpor. Ideální rezistor má kromě svého daného elektrického odporu nulovou kapacitní a induktivní reaktanci. Je tedy lineární, frekvenčně nezávislý.

Reálné rezistory mají kromě svého elektrického odporu také vlastní parazitní indukčnosti a kapacity, které mohou mít nezanedbatelný vliv na parametry elektrických obvodů uvedených v kapitole 4. Projevují se tedy jako kmitočtově závislá impedance.



Obr. 4.1: Náhradní schéma rezistoru

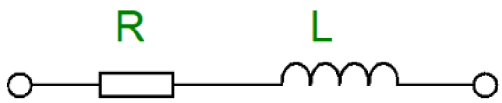
Elektrický odpor rezistorů je závislý na teplotě rezistoru. Tento jev se s výhodou využívá například u NTC a PTC termistorů, nicméně pro aplikaci v pasivní výhybce je tato vlastnost nežádoucí a opět může mít vliv na parametry elektrických obvodů výhybky

Reálné rezistory mají také výrobcem stanovený maximální ztrátový výkon, který jsou schopny bezpečně přeměnit na teplo. Je tedy nutné použít rezistor s dostatečně vysokým maximálním výkonem, jinak může dojít přehřátí a následnému zničení rezistoru.

4.2 Cívky

Cívka je elektronická součástka, jejíž základní charakteristická vlastnost je indukčnost. Ideální cívka kromě své indukčnosti nulový reálný odpor. Po připojení stejnosměrného napětí na její vývody se po ustálení chová jako zkrat.

Reálná cívka je tvořená vodičem o určitém průměru navinutém s určitým počtem závitů. Má tedy reálný odpor určený průměrem drátu, jeho délkou a rezistivitou. Parazitní kapacita cívky je způsobena blízkostí vzájemných závitů vinutí, nicméně v rámci kmitočtů relevantních pro pasivní reproduktorovou výhybku ji lze na rozdíl od stejnosměrného odporu cívky zanedbat.

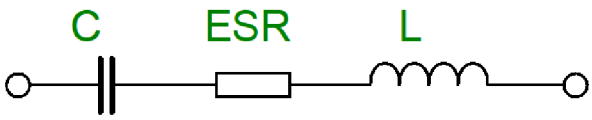


Obr. 4.2: Náhradní schéma cívky

V pasivních reproduktorových výhybkách se zpravidla používají vzduchové cívky. Vzduch má sice malou permeabilitu, takže oproti cívkám na feritových jádrech je potřeba pro stejnou hodnotu indukčnosti použít více závitů, ale zato je jejich indukčnost frekvenčně nezávislá a nemůže u nich dojít k přesycení jádra.

4.3 Kondenzátory

Kondenzátor je elektronická součástka, jejíž základní charakteristická vlastnost je kapacita. Ideální kondenzátor má kromě své kapacity nulový sériový odpor (ESR) a nulovou sériovou indukčnost. Po připojení stejnosměrného napětí se po ustálení chová jako rozpojený kontakt.



Obr. 4.3: Náhradní schéma kondenzátoru

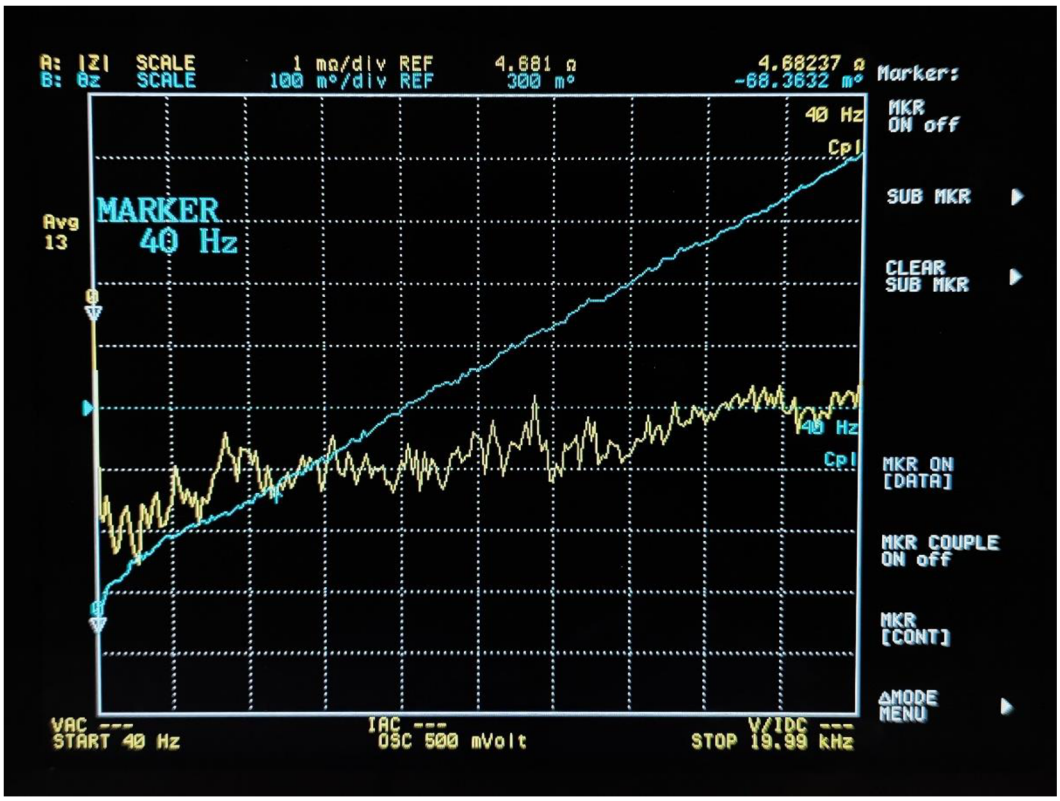
Parazitní indukčnost kondenzátoru je způsobena indukčností kovových přívodů a elektrod. ESR vyjadřuje souhrnně vyjadřuje vliv ztrát v dielektriku a v povrchové izolační vrstvě, vliv odporu elektrod, přívodních vodičů a odpor vyvolaný povrchovým jevem. ESR je kmitočtově závislé, v katalogových listech se udává pro určitý kmitočet.

5. MĚŘENÍ KMITOČTOVĚ ZÁVISLÝCH VLASTNOSTÍ REÁLNÝCH SOUČÁSTEK

Aby bylo možné objektivně zhodnotit vliv kmitočtové závislosti vlastností a parazitních vlastností součástek, kterými jsou osazovány moduly přípravku, byly tyto vlastnosti proměřeny pomocí impedančního analyzátoru Agilent 4294A. Měření byla prováděna v pásmu 40Hz – 20kHz, ve kterém spodní hranice odpovídá nejnižšímu možnému kmitočtu rozsahu analyzátoru a horní hranice odpovídá horní hranici slyšitelného pásma. Měřeno bylo pomocí kmitočtově rozmítaného sinusového průběhu. Odečítání hodnot za účelem katalogizace modulů bylo prováděno na kmitočtech 40 Hz, 2 kHz a 10 kHz.

5.1 Elektrický odpor rezistorů

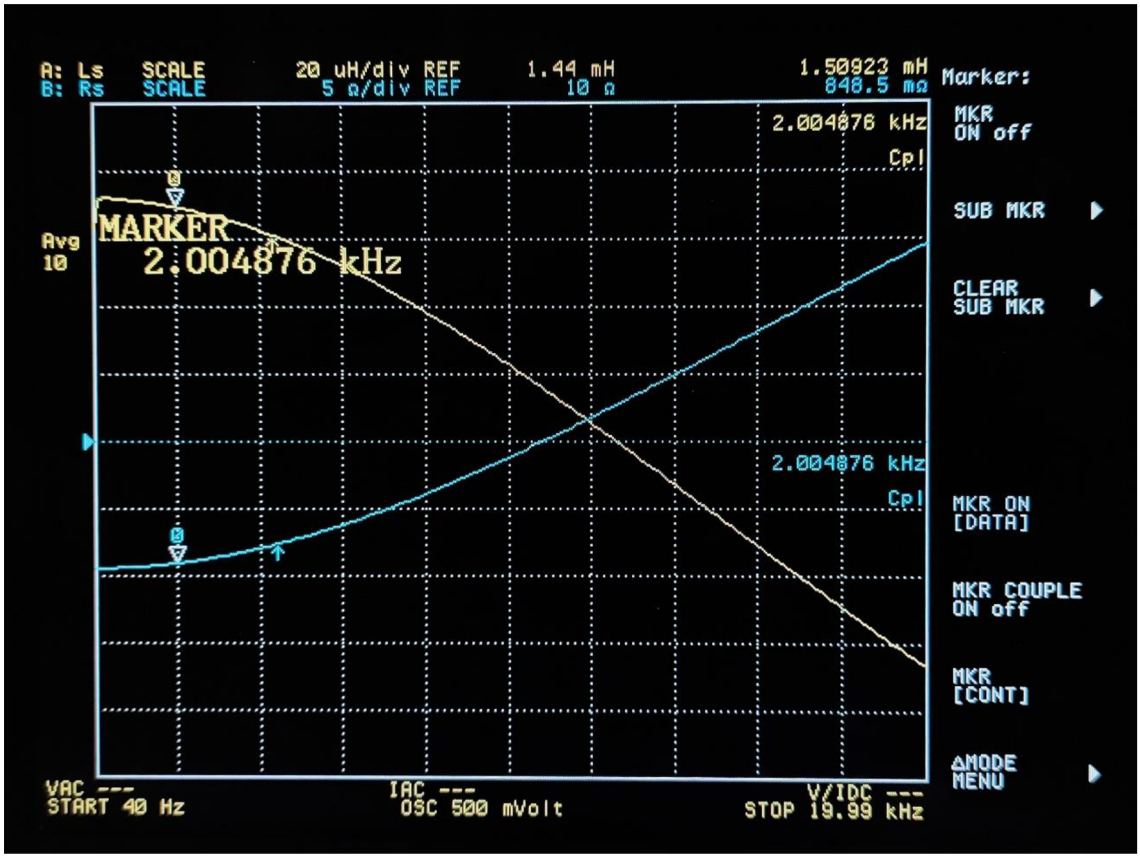
U rezistorových modulů byla ověřována pomocí analyzátoru míra kmitočtové závislosti elektrického odporu. Dle našeho měření se změna velikosti elektrického odporu v závislosti na frekvenci u modulů osazených běžnými pětiwattovými rezistory pohybuje v řádu jednotek miliohmů a je tedy pro účely návrhu pasivních reproduktorových výhybek zcela zanedbatelná.



Obr. 5.1: Kmitočtová závislost impedance rezistorového modulu osazeného rezistorem 4,7Ω

5.2 Indukčnost a elektrický odpor cívek

U cívkových modulů byla ověřována pomocí analyzátoru míra kmitočtové závislosti indukčnosti a také velikosti stejnosměrného odporu. Dle našeho měření s moduly osazenými vzduchovými cívkami běžně používanými v pasivních reproduktorových výhybkách jsou obě výše zmíněné veličiny značně závislé na kmitočtu. Indukčnost s rostoucím kmitočtem klesá řádově o jednotky procent. Stejnosměrný odpor s rostoucím kmitočtem roste řádově o stovky procent.

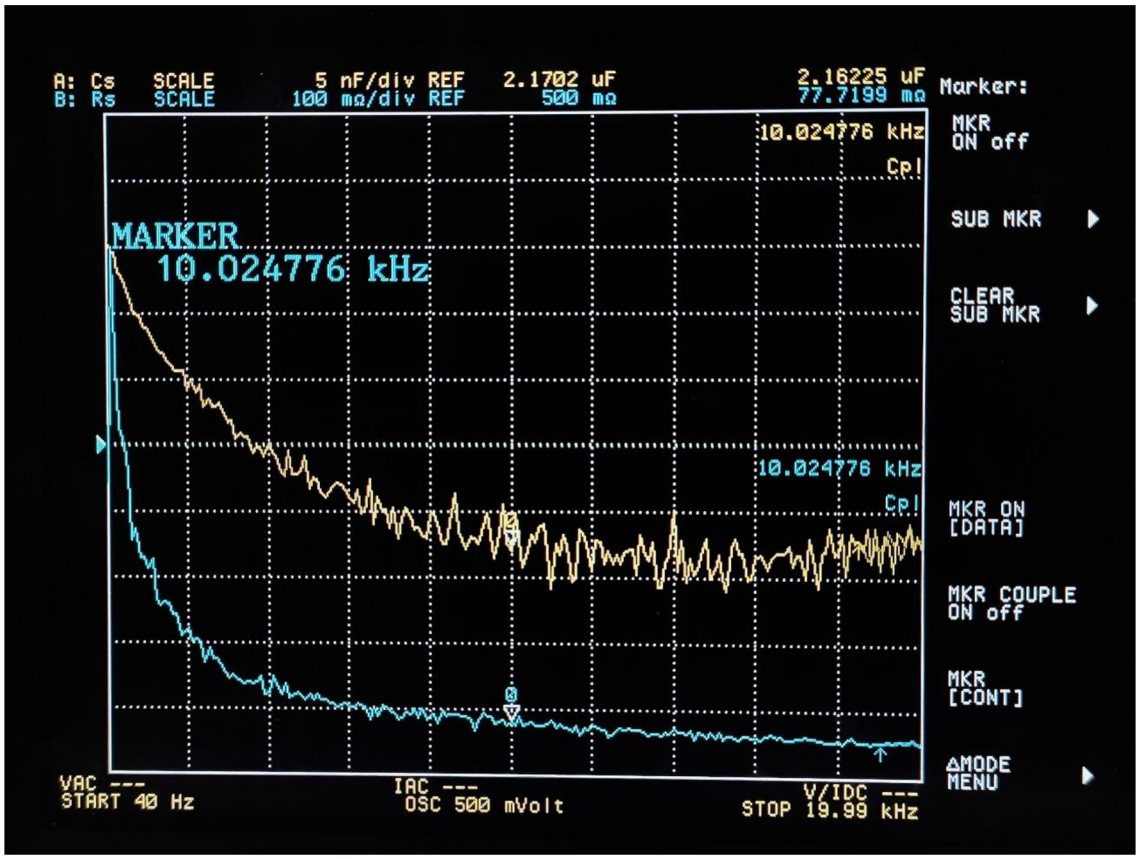


Obr. 5.2: Kmitočtová závislost indukčnosti a stejnosměrného odporu cívkového modulu osazeného cívkou 1,5mH

Tyto skutečnosti je vhodné zohlednit už při návrhu pasivní reproduktorové výhybky v simulačních programech, kde díky znalosti kmitočtových rozsahů, ve kterých pracují námi navržené obvody, lze přesně dosadit za stejnosměrný odpor cívky hodnotu odpovídající tomuto kmitočtovému rozsahu.

5.3 Kapacita a ekvivalentní sériový odpor kondenzátorů

U kondenzátorových modulů byla ověřována pomocí analyzátoru míra kmitočtové závislosti kapacity a také velikosti ekvivalentního sériového odporu. Dále byl pozorován rozdíl v parametrech mezi kondenzátory značky Monacor s různými dielektriky (MKT a MKP). Dle našeho měření s moduly osazenými svitkovými kondenzátory značky Monacor ve slyšitelném pásmu kapacita s rostoucím kmitočtem klesá řádově o jednotky procent a ekvivalentní seriový odpor s rostoucím kmitočtem klesá řádově o stovky procent. Kondenzátory ze série MKTA s polyesterovým dielektrikem mají řádově o desítky procent vyšší ekvivaletní sériový odpor než kondenzátory ze série MKPA s polypropylénovým dielektrikem. Z dat je také patrná závislost velikosti ekvivalentního sériového odporu na kapacitě kondenzátoru. Kondenzátory s vyššími kapacitami mají nižší ekvivalentní sériový odpor.



Obr. 5.3: Kmitočtová závislost kapacity a ekvivalentního sériového odporu kondenzátorového modulu osazeného kondenzátorem 2,2µF

Tabulka 5.1: Porovnání vybraných parametrů měřených kondenzátorů

Kondenzátor	**ESR při kmitočtu 2kHz [mΩ]**	**ESR při kmitočtu 10kHz [mΩ]**
MKTA 2,2μF	208	78
MKTA 6,8μF	75	35
MKPA 2,7μF	19,2	15,5

Vysoká hodnota ekvivalentního sériového odporu kondenzátoru může být problematická zejména při návrhu ARPF a RPF, kde způsobuje snížení kvality filtru, což je zpravidla nežádoucí s ohledem na to, že tyto typy filtrů používáme nejčastěji ke korekci ojedinělého propadu nebo vrcholu v kmitočtové charakteristice.

6. PŘÍPRAVEK UNIVERZÁLNÍ REPRODUKTOROVÉ VÝHYBKY

Cílem praktické části bakalářské práce je navrhnout a zkonstruovat přípravek univerzální reproduktorové výhybky uzpůsobený pro laboratorní výuku. V této kapitole je uveden postup vývoje přípravku včetně všech jeho součástí.

6.1 Požadavky na přípravek

Požadavky na přípravek vychází z bakalářské práce [6] v rámci které měl být obdobný přípravek navrhnut a zkonstruován, ale nebyl. Tato bakalářská práce navazuje na požadavky, které byly částečně vymezeny v již zmíněné bakalářské práci [6].

Těmi požadavky včetně nově zadaných jsou:

- Výhybka pro dvoupásmovou reproduktorovou soustavu s bafflestep korekcí
- Větev pro výškový reproduktor umožňující zapojení filtru HP prvního až čtvrtého řádu s možností změny kvality, kompenzace citlivosti reproduktoru, RPF, ARPF, shelving filtr v sériové topologii a kompenzace modulu impedanční charakteristiky reproduktoru
- Větev pro basový reproduktor umožňující zapojení filtru LP prvního až čtvrtého řádu s možností změny kvality, RPF, ARPF, shelving filtr v sériové topologii a kompenzace modulu impedanční charakteristiky reproduktoru
- Robustní systém snadné a rychle záměny součástek s minimálním opotřebením
- Nejmenší možné rozměry přípravku
- Nejmenší možné náklady na výrobu přípravku

6.2 Návrh mechanického provedení

Už od začátku vývoje se počítalo s DPS jako hlavním konstrukčním materiálem pro přípravek díky jejím dobrým mechanickým vlastnostem, možností vodivých propojů možnosti opracování pomocí CNC frézy do téměř libovolného tvaru při zadání k výrobě.

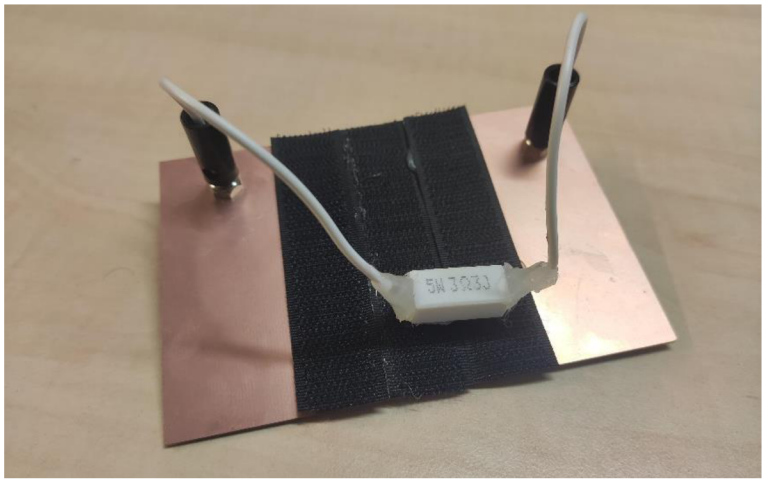
V rámci vývoje bylo uvažováno nad třemi variantami provedení.

6.2.1 Varianta se suchým zipem

Návrh prvního systému uchycení součástek spočíval ve vytvoření základní DPS, jejíž svrchní strana by byla pokrytá háčky suchého zipu, mezi kterými by byly umístěny 4mm dutinkové konektory, které by byly měděnými cestičkami DPS mezi sebou propojeny tak, aby po připojení součástek opatřených přívody s 4mm banánky tvořily požadovaný elektrický obvod. Na součástky by byl připevněn protikus suchého zipu, pomocí kterého by je bylo možné umístit na libovolné místo na svrchní stranu DPS a pomocí pohyblivých

přívodů zakončených 4mm banánky připojit do 4mm dutinek v DPS.

Tento návrh byl zamítnut hlavně z důvodů nespolehlivého připevnění protikusu suchého zipu na součástku, časově náročné přípravy součástky pro použití na DPS a odhadované poruchovosti pohyblivých přívodů. Na obr. 6.1 je vyfocen prototyp systému.

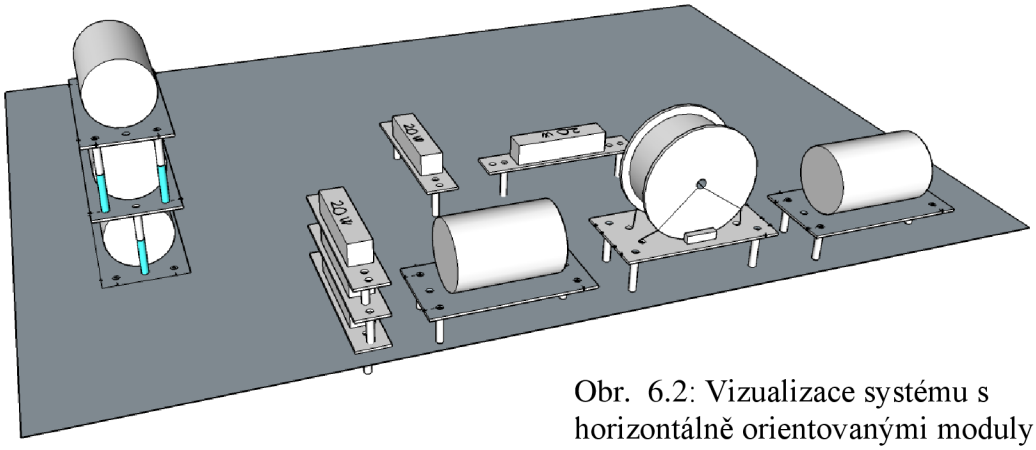


Obr. 6.1: Prototyp systému uchycení pomocí suchého zipu

6.2.2 Varianta s horizontálně orientovanými moduly

Návrh druhého systému uchycení součástek spočíval ve vytvoření základní DPS, jejíž svrchní strana by obsahovala 4mm dutinky, které by byly měděnými cestičkami DPS mezi sebou propojeny podobně jak u předchozí varianty tak, aby po připojení součástky umístěné na modulu z DPS tvořily požadovaný elektrický obvod. Tato varianta již neumožňuje volné umístění součástky, ale vymezuje přesně danou rozteč konektorů, na kterou přesně pasuje soustava konektorů umístěná na modulu.

Tento návrh byl později zamítnut hlavně z důvodů vysokého počtu konektorů a s tím spojenými vysokými náklady. Na obr. 6.2 je vizualizace tohoto systému.



Obr. 6.2: Vizualizace systému s horizontálně orientovanými moduly

6.2.3 Varianta s vertikálně orientovanými moduly

Návrh třetího systému uchycení součástek spočívá ve vytvoření základní DPS, jejíž svrchní strana by obsahovala samice konektoru Gold 2mm, které by byly měděnými cestičkami DPS mezi sebou propojeny podobně jak u předchozí varianty tak, aby po připojení součástky umístěné na modulu z DPS tvořily požadovaný elektrický obvod. Orientace DPS modulu je však v této variantě kolmá na základní DPS. Tato varianta používá mnohem menší počet konektorů a je zároveň navržena pro menší a levnější konektory Gold 2mm, díky tomu je také mnohem méně nákladná. Zároveň při změně orientace DPS modulu mohlo dojít ke zmenšení modulů samotných, což dále vede k úspoře nákladů díky zmenšení základní DPS.

Nevýhoda varianty je menší přehlednost zapojené topologie a méně robustní spojení modulů se základní DPS. Při celkovém zhodnocení však tato varianta nejlépe splňovala zadané požadavky, byla tedy proto zvolena pro další vývoj.

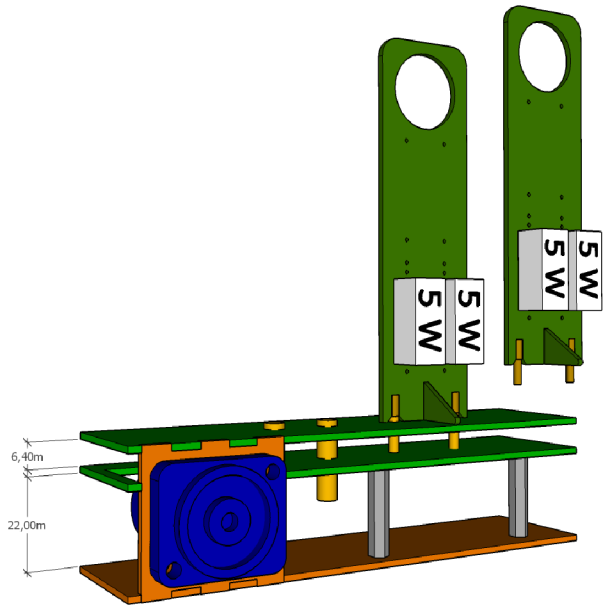
Pro zvýšení stability byly všechny moduly na své spodní hraně vybaveny slotem pro vložení trojúhelníkové podpěry, který zvýší stabilitu modulu a zredukuje mechanickou zátěž Gold 2mm konektorů. Způsob uchycení modulů na základní desce je patrný z obr. 6.3.

6.3 Návrh desek plošných spojů

Při návrhu DPS bylo vycházeno z výrobních limitací firmy JLCPCB, jelikož v jejich online konfigurátoru vycházely náklady na základní desku nejmenší v porovnání s jinými českými i zahraničními výrobci. Tloušťka desky pro DPS modulů i základní DPS byla zvolena 1,6mm jakožto nejběžnější rozměr. Tloušťka měděné vrstvy na obou stranách DPS byla zvolena 35µm. Návrhy DPS byly vypracovány v programu Eagle. Základní DPS i DPS modulů jsou navrhovány principem dělených spojů pro minimalizaci reálného odporu měděných cest.

6.3.1 Základní deska

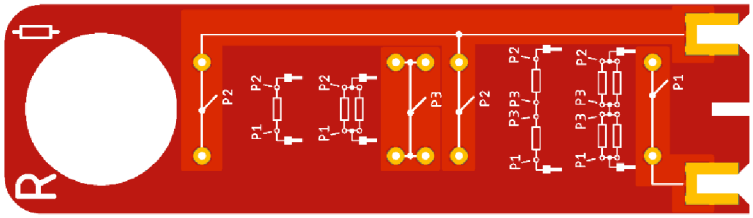
Přípravek základní desky je tvořen ze třech DPS s vnějšími rozměry 378mm x 199mm. Tyto DPS budou v hotovém přípravku umístěny nad sebou a vzájemně mechanicky upevněny distančními sloupky (prostřední se spodní) a zapájenými Gold 2mm konektory (svrchní a prostřední). Takto spojené DPS tvoří nosnou konstrukci přípravku. Na svrchní desce jsou ve vrstvě silkscreen označeny pozice modulů a jejich rozdělení do sekcí. Při rozmisťování pozic pro součástky byl kladen důraz na to, aby shodně orientované moduly s cívkami byly od sebe co nejdále pro minimalizaci vzájemného ovlivňování. Dále také byly pozice rozmisťovány tak, aby jejich umístění na desce odpovídalo umístění ve schématu pro průchod signálu z levé strany na pravou. Na levé a pravé straně DPS jsou výřezy pro upevnění malé DPS sloužící k upevnění Speakon konektoru viz obr. (6.3)



Obr. 6.3: Vizualizace vrstev přípravku a uchycení konektoru Speakon

6.3.2 Modul pro rezistory

DPS modulu pro rezistory má rozměry 100mm x 28mm. V horní části je kulatý otvor o průměru 20mm, který slouží jako ergonomický úchyt. Horní rohy jsou zaoblené. Deska umožňuje zapojení jednoho rezistoru, zapojení dvou rezistorů sériově nebo paralelně, zapojení třech rezistorů sérioparalelně a zapojení čtyř rezistorů sérioparalelně. Deska byla navržena pro 5W rezistory z nabídky GME. Ve spodní hraně DPS je výkroj s 2mm měděnými ploškami po jeho obvodu pro umístění a zapájené dvou samců Gold 2mm konektoru.



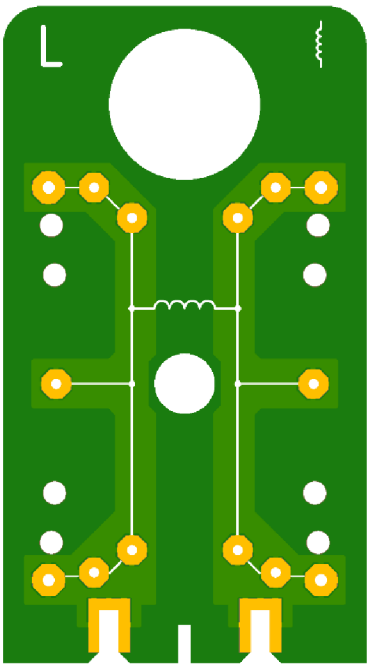
Obr. 6.4: Modul pro rezistory (Měřítko 1:1)

6.3.3 Moduly pro cívky

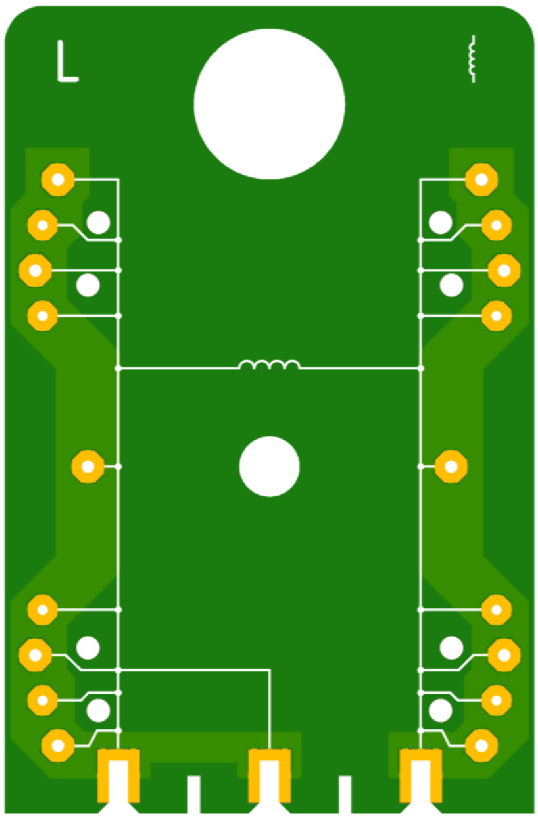
Moduly pro cívky byly navrhnuty dva, kvůli velkému rozptylu rozměrů požadovaných cívek. Pro cívky z katalogu Monacor navinuté na kostřičkách o průměru 48mm a 37mm byl navrhnut menší modul s totožnou funkčností. Při umístění těchto malých cívek na větší modul stavěný pro kostřičky o průměru 59mm a 70mm by přebytečná plocha modulu zhoršovala přehlednost zapojené topologie. Zároveň tak dojde k úspoře nákladů díky menším rozměrům DPS.

DPS menšího modulu pro cívky má rozměry 87mm x 48mm. V horní části je kulatý otvor o průměru 20mm, který slouží jako ergonomický úchyt. Horní rohy jsou zaoblené. Deska umožňuje zapojení pouze jedné cívky naráz a je navržena na míru pro kostřičky o rozměrech 48mm a 37mm z katalogu firmy Monacor. Díky univerzálnímu způsobu uchycení cívky pomocí stahovacích pásků je však možné na modul umístit cívku s kostřičkou libovolného průměru do 48mm.

DPS většího modulu pro cívky má rozměry 107mm x 70mm. V horní části je kulatý otvor o průměru 20mm, který slouží jako ergonomický úchyt. Horní rohy jsou zaoblené. Deska umožňuje zapojení pouze jedné cívky naráz a je navržena na míru pro kostřičky o rozměrech 70mm a 59mm z katalogu firmy Monacor. Díky univerzálnímu způsobu uchycení cívky pomocí stahovacích pásků je však možné na modul umístit cívku s kostřičkou libovolného průměru do 70mm.



Obr. 6.5: Modul pro malé cívky (Měřítko 1:1)



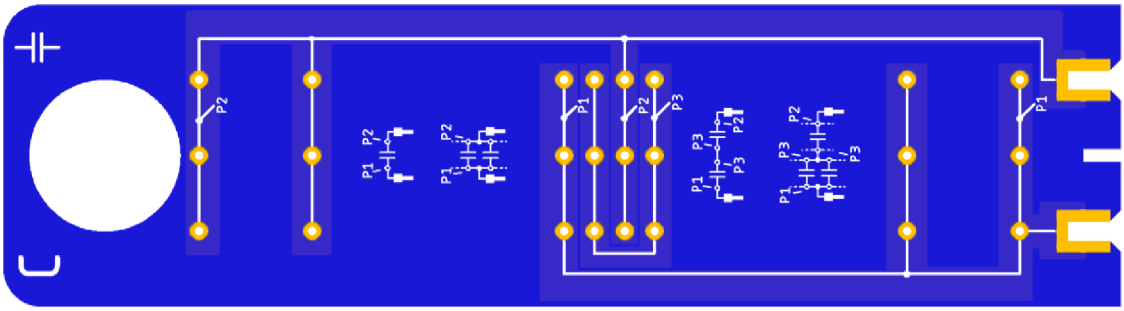
Obr. 6.6: Modul pro velké cívky (Měřítko 1:1)

6.3.4 Moduly pro kondenzátory

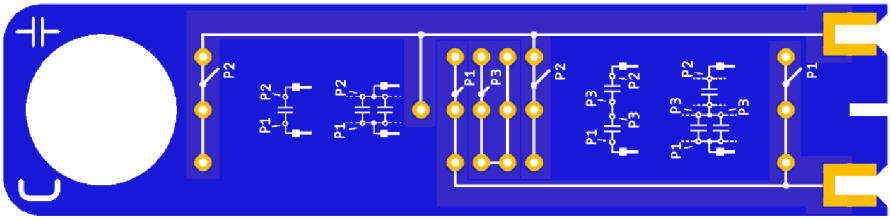
Moduly pro kondenzátory byly navrhnuty dva. Větší modul byl navrhnut speciálně pro zapojení do obvodu RPF, kde je vyžadována velká kapacita. Menší modul je použit ve všech ostatních obvodech.

DPS menšího modulu pro kondenzátory má rozměry 117,5mm x 28mm. V horní části je kulatý otvor o průměru 20mm, který slouží jako ergonomický úchyt. Horní rohy jsou zaoblené. Deska umožňuje zapojení jednoho kondenzátoru, dvou kondenzátorů paralelně nebo sériově, třech kondenzátorů sérioparalelně nebo paralelně a čtyř kondenzátorů sérioparalelně nebo paralelně. Maximální kapacita osazení je 10,8µF při zapojení čtyř kondenzátorů 2,7µF paralelně.

DPS většího modulu pro kondenzátory má rozměry 148,5mm x 40mm. V horní části je kulatý otvor o průměru 20mm, který slouží jako ergonomický úchyt. Horní rohy jsou zaoblené. Deska umožňuje zapojení jednoho kondenzátoru, dvou kondenzátorů paralelně nebo sériově, třech kondenzátorů sérioparalelně nebo paralelně a čtyř kondenzátorů sérioparalelně nebo paralelně. Maximální kapacita osazení je 40µF při zapojení čtyř kondenzátorů 10µF paralelně.



Obr. 6.7: Velký modul pro kondenzátory (Měřítko 1:1)



Obr. 6.8: Malý modul pro kondenzátory (Měřítko 1:1)

6.3.5 Moduly pro propojky

Modul pro propojky byl navržen za účelem nahrazení neosazené pozice zkratem. Nezbytné to je např. při neosazení obvodu kompenzujícího bafflestep nebo při osazení sekce pro sériový RLC obvod pouze dvěma součástkami.

DPS propojkového modulu má rozměry 80mm x 28mm. V horní části je kulatý otvor o průměru 20mm, který slouží jako ergonomický úchyt. Horní rohy jsou zaoblené. V měděné vrstvě desky je pouze jednoduché propojení kontaktů pro Gold 2mm konektory mezi sebou.

Obr. 6.9: Modul pro propojky (Měřítko 1:1)

7. VÝROBNÍ DOKUMENTACE A PARAMETRY PŘÍPRAVKU

7.1 Výrobní dokumentace přípravku

Výrobní dokumentace přípravku je obsažena v souboru s názvem „Univerzalni_vyhybka_Dominik_Pacek_priloha.zip“ který byl odevzdán spolu se seminární prací do e-learningu VUT. Obsahuje Eagle soubory se schématy a deskami ke všem součástek přípravku tvořených z DPS ve verzi, která byla zadána k výrobě výrobci JLCPCB.

7.2 Parametry přípravku

Zde jsou uvedeny základní technické parametry dílčích součástí laboratorního přípravku.

7.2.1 Základní deska

Tabulka 7.1: Technické parametry základní desky

Typ modulu	Základní deska
Délka [mm]	199
Šířka [mm]	378
Výška [mm]	40
Vstupní a výstupní konektory	SPEKON Neutrik NL-4MP
Konektory pro připojení modulů	Gold 2mm
Konektory pro připojení sond	Gold 4mm
Barva nepájivé masky	černá

7.2.2 Modul pro rezistory

Tabulka 7.2: Technické parametry modulu pro rezistory

Typ modulu	Modul pro rezistory
Výška [mm]	100
Šířka [mm]	28
Možnosti zapojení vícero součástek	Ano (2x paralelní, 2x sériové, 3x sérioparalelní, 4x sérioparalelní)
Barva nepájivé masky	červená

7.2.3 Moduly pro cívky

Tabulka 7.3: Technické parametry modulů pro cívky

Typ modulu	Malý modul pro cívky	Velký modul pro cívky
Výška [mm]	87	107
Šířka [mm]	48	70
Maximální průměr osaditelné kostřičky [mm]	48	70
Možnosti zapojení vícero součástek	Ne	Ne
Barva nepájivé masky	zelená	zelená

7.2.4 Moduly pro kondenzátory

Tabulka 7.4: Technické parametry modulů pro kondenzátory

Typ modulu	Malý modul pro kondenzátory	Velký modul pro kondenzátory
Výška [mm]	117,5	148,5
Šířka [mm]	28	40
Maximální kapacita osazeného modulu [μF]	10,8	40
Možnosti zapojení vícero součástek	Ano (2x paralelní, 2x sériové, 3x serioparalelní, 3x paralelní, 4x serioparalelní, 4x paralelní)	Ano (2x paralelní, 2x sériové, 3x serioparalelní, 3x paralelní, 4x serioparalelní, 4x paralelní)
Barva nepájivé masky	modrá	modrá

7.2.5 Moduly propojek

Tabulka 7.5: Technické parametry modulů propojek

Typ modulu	Modul pro rezistory
Výška [mm]	80
Šířka [mm]	28
Barva nepájivé masky	černá

8. KONSTRUKCE PŘÍPRAVKU

Přestože byl přípravek navrhován tak, aby jeho realizace z dodaných součástí byla co nejjednodušší, byl tento proces relativně časově náročný. Průměrná doba kompletace modulu je kolem třiceti minut. Kompletace jedné základní desky trvá okolo šesti hodin, hlavně z důvodu pájení velkého počtu Gold 2mm konektorů. Konstrukce přípravku probíhala z větší části v laboratořích ÚTKO. Některé fáze konstrukce byly prováděny v podmínkách domácí dílny.

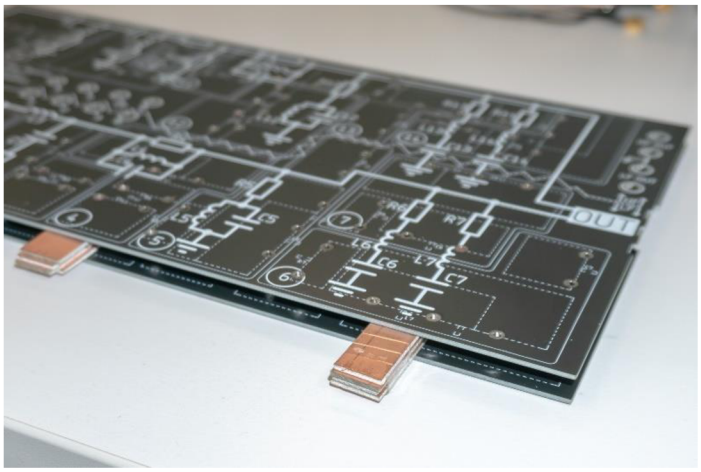
8.1 Konstrukce základní desky

V rámci konstrukce základní desky je potřeba přišroubovat distanční sloupky k prostřední DPS, zafixovat svrchní a prostřední DPS v přesně dané vzdálenosti od sebe, osadit DPS Gold 2mm a 4mm konektory, které po zapájení přebírají funkci mechanického upevnění a udržování distance mezi svrchní a prostřední DPS, připevnit Speakon konektory na svoje opěrné DPS a připájet jejich pohyblivé přívody k prostřední DPS, přilepit opěrné DPS na boky přípravku a nakonec připevnit přístrojové nožičky.

Svrchní DPS obsahující potisk s popiskami a prostřední DPS obsahující vodivé spoje byly objednány od výrobce JLCPCB. Spodní DPS sloužící jako mechanická opora pro distanční sloupky byla za účelem snížení nákladů vyrobena z textitu. Ostré hrany DPS je vhodné před dalšími procesy konstrukce zaoblit brusným papírem, aby bylo zamezeno možnému poranění.

Pro docílení správných distancí mezi svrchní a střední DPS, a také správného přesahu Gold 2mm konektorů nad vrchní DPS, bylo nezbytné vyrobit pomocné přípravky sloužící k vymezení těchto vzdáleností. Distance mezi svrchní a prostřední DPS byla vymezena pomocí cuprexitových odřezků. Vzdálenost přesahu Gold 2mm konektorů nad svrchní DPS byla vymezena výškou hlavičky šroubu M2,5.

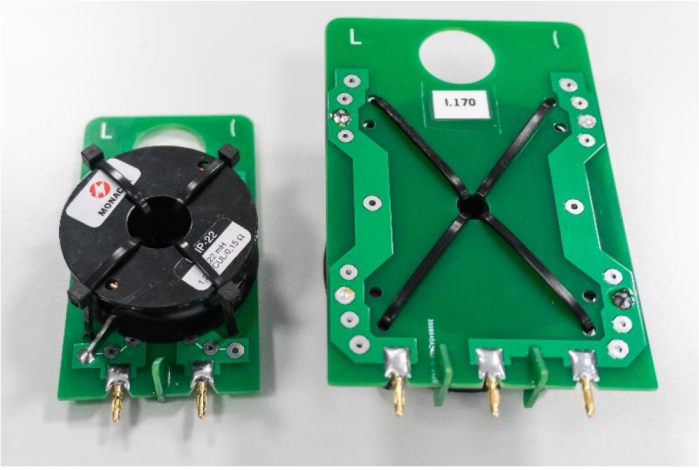
Opěrné DPS Speakon konektorů byly k základní desce přilepeny dvousložkovým lepidlem Hysol 9483. Pro konstrukci přípravku byla použita olovnatá pájka.



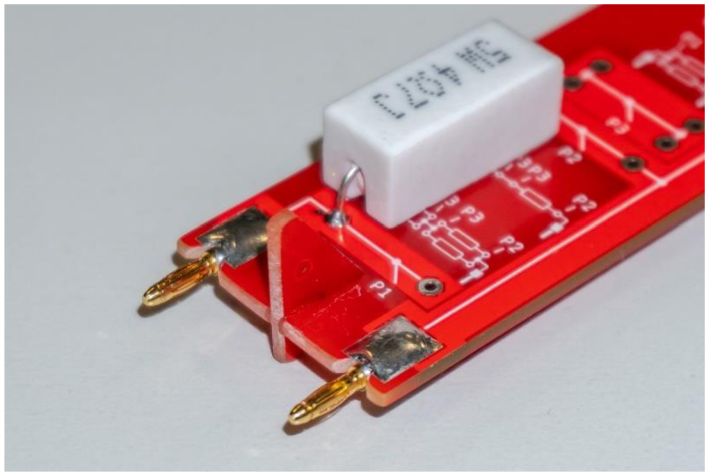
Obr. 8.1: Vymezení distance mezi svrchní a prostřední DPS

8.2 Konstrukce modulů

V rámci procesu konstrukce modulů je potřeba ruční bruskou vyříznout do spodní hrany DPS zářez ve tvaru písmene V, tak aby bylo možné umístit Gold 2mm konektor na určené místo (tento proces je nutný kvůli technologické limitaci výroby JLCPCB, kdy výrobce neumožňuje provést zářez frézou do bočně pokoveného otvoru). Dále je potřeba ke spodní hraně DPS přilepit trojúhelníkovou podstavu, připájet Gold 2mm konektory a osadit modul vhodnou součástkou. Při osazování cívek na cívkové moduly je navíc potřeba přichytit kostru cívky k DPS pomocí stahovacích pásků viz obr. 8.2.



Obr. 8.2: Uchycení cívky na cívkovém modulu



Obr. 8.3: Detail spodní hrany rezistorového modulu

Za účelem katalogizace modulů byl navíc vyroben systém označení a každý modul obdržel unikátní označení, podle kterého jej lze dohledat v tabulce, kde je možné uvést přesné hodnoty veličin změřených na impedančním analyzátoru. To je vhodné zejména u modulů osazených cívkami s upraveným vinutím.

9. LABORATORNÍ ÚLOHA

Laboratorní úloha, která vznikla v rámci této bakalářské práce bude zařazena do kurzu Reproduktory a reproduktorové soustavy. Doba trvání laboratorního vyučování v rámci kurzu je 170 minut. Na tvorbě výstupního protokolu a textu zadání laboratorní úlohy se podílel ing. Holínský v rámci zadání jeho diplomové práce. Dokument obsahující zadání laboratorní úlohy, výstupní protokol a projekt systému apX jsou obsaženy v archivu odevzdaném jako příloha bakalářské práce.

9.1 Požadavky na obsah laboratorní úlohy

Laboratorní úloha je tematicky umístěna v první části úloh, kterým předchází půlsemestrální test. Za pomocí přípravku modulární pasivní reproduktorové výhybky má studentům umožnit jednoduše zapojit a proměřit většinu elektrických obvodů typicky používaných v pasivních reproduktorových výhybkách. Výstupní protokol úlohy pak umožňuje přehledné zobrazení výsledků pro zhodnocení vlastností těchto obvodů.

Vzhledem k tomu, že každé zadání laboratorní úlohy má pouze jedno pracoviště, může se stát, že tato laboratorní úloha bude vykonávána studenty dříve, než bude v rámci kurzu uvedena teorie k obsahu laboratorní úlohy. Je tedy nezbytné, aby v teoretickém úvodu úlohy byly ve formě shrnutí obsaženy všechny potřebné informace k tématu, s jejichž znalostí je možné laboratorní úlohu vyřešit.

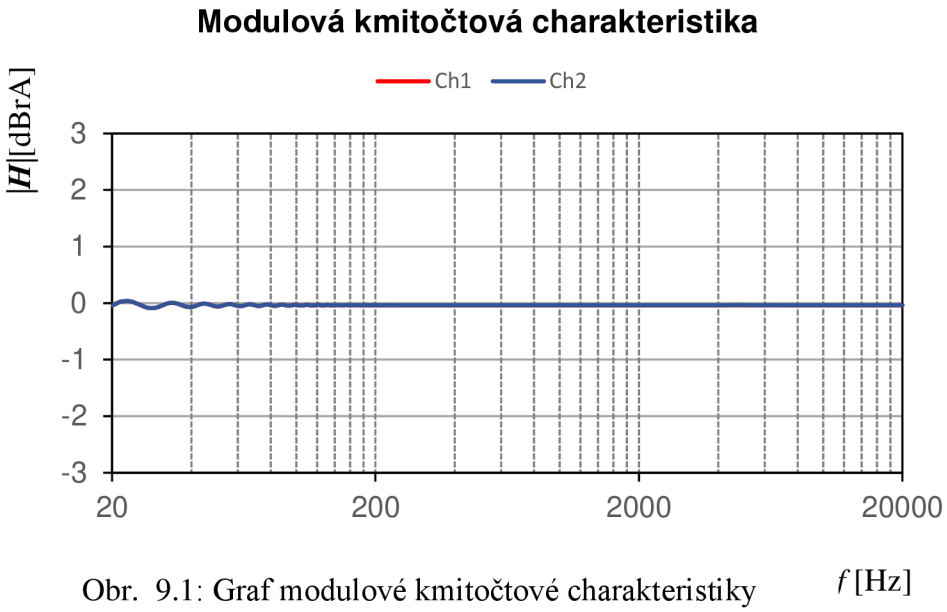
9.2 Obsah laboratorní úlohy

V rámci laboratorní úlohy je proveden soubor měření konkrétního zapojení a jeho dílčích částí, které představuje analytickým postupem optimálně naladěnou pasivní reproduktorovou výhybku pro kombinaci reproduktorů Monacor SPH-170 a Monacor DT-25N. Každé opakování laboratorní úlohy je tedy prováděno se stejnými moduly za účelem dosažení stejného optimálního výsledku. Jednotky dBrA a dBrB uvedené v grafu vycházejí z potřeby měřit různé body budícími signály o různé amplitudě. Pro všechna grafická znázornění však platí, že 0dBrA nebo 0dBrB znamená přenos se zesílením 0dB. Pouze je použita pro zobrazení jiná vztažná hodnota napětí.

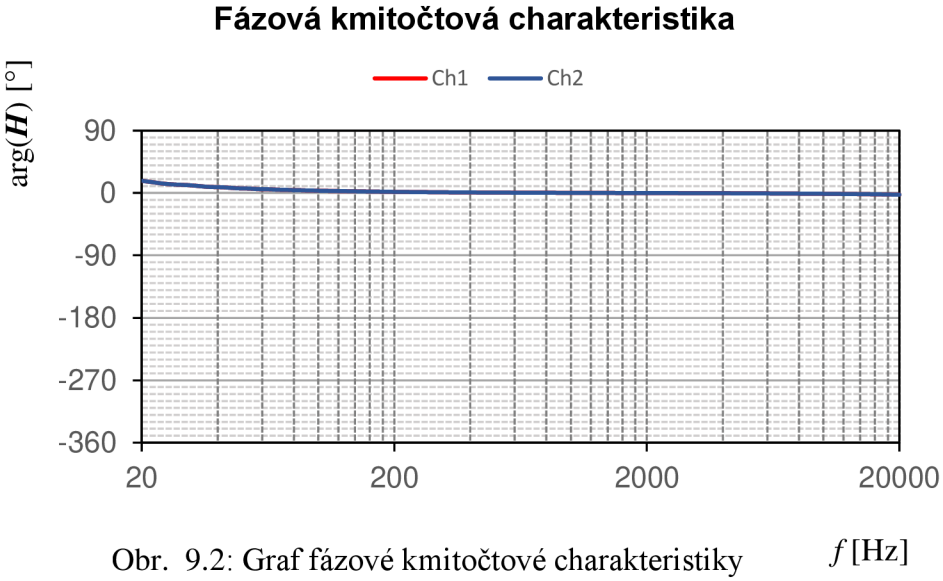
Všechna grafická znázornění uvedená v následujících podkapitolách jsou vyňata z výstupního protokolu, do kterého byla naimportována data z apX, která byla získána během kontrolního průchodu laboratorní úlohou. Jsou to tedy zobrazení, kterých má student v rámci průchodu laboratorní úlohou docílit.

9.2.1 Kalibrační měření

První bod laboratorní úlohy je provedení kalibračního měření, během kterého je na vstup základní desky přiveden výstup koncového zesilovače a výstup základní desky je měřen analogovými vstupy zařízení apX. Na základní desce jsou zapojeny propojky tak, aby byl přímo propojen vstup s výstupem. Výsledné zesílení a fázový posuv je následně ve výstupním protokolu odečítán od každého dalšího měření s výjimkou měření impedance.



Obr. 9.1: Graf modulové kmitočtové charakteristiky přípravku při přímém propojení vstupu a výstupu



Obr. 9.2: Graf fázové kmitočtové charakteristiky přípravku při přímém propojení vstupu a výstupu

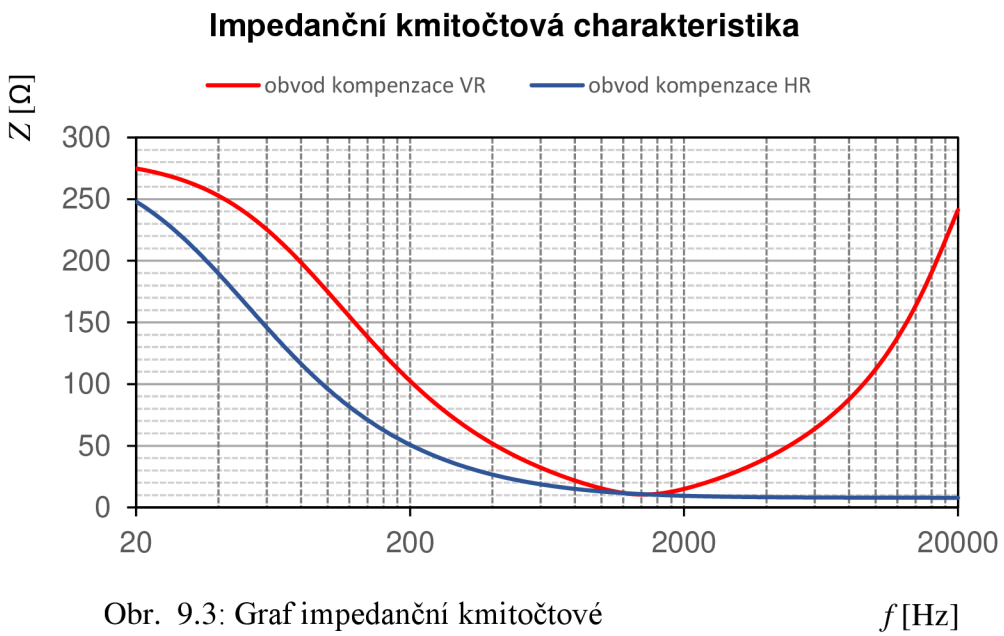
Zvlnění modulové kmitočtové charakteristiky je v řádu desetin decibelu a pravděpodobně způsobeno měřícím systémem apX. Fázová kmitočtová charakteristika má na nejnižších kmitočtech odchylku kolem 17°, která s rostoucím kmitočtem klesá. Ta je způsobena měřícím systémem apX.

9.2.2 Kmitočtová závislost impedance reproduktorů a obvodů kompenzujících impedanční charakteristiky reproduktorů

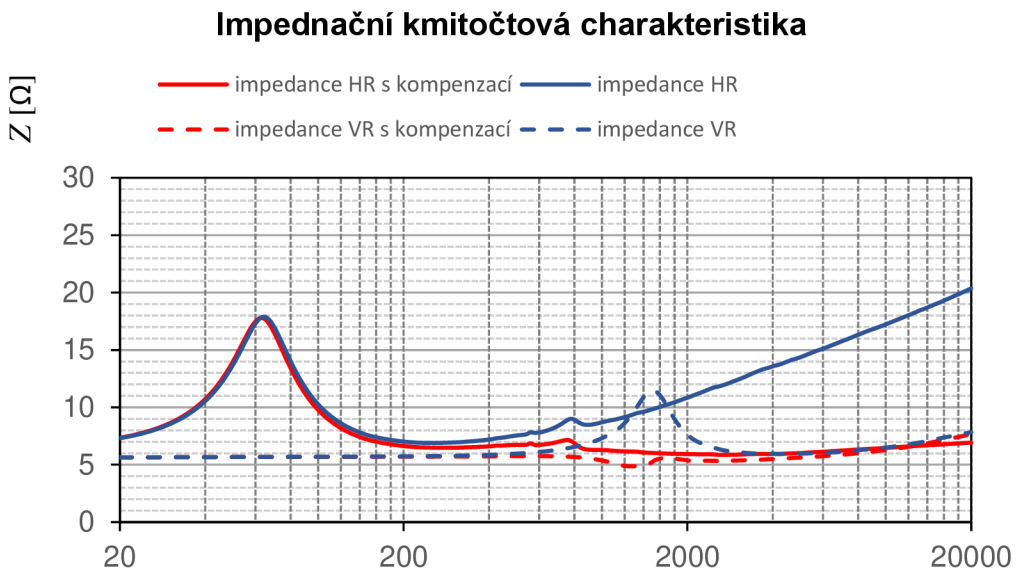
V tomto bodě jsou na základní desce zapojeny obvody pro kompenzaci impedanční charakteristiky středobasového a vysokotónového reproduktoru, popořadě sériový RC obvod připojený paralelně ke středobasové větvi a sériový RLC obvod připojený paralelně k vysokotónové větvi. Mezi koncovým zesilovačem a základní deskou je zapojen bočník o hodnotě odporu 0,1Ω. Impedance je v měřícím sytému apX vypočtena dle vzorce (9.1), kde Z je měřená impedance, U je napětí na výstupu základní desky pro měřenou větev, U_b je úbytek napětí na bočníku pro měřenou větev a R_b je elektrický odpor bočníku.

$$Z = \frac{U}{U_b} \cdot \mathrm{R_b} \tag{9.1}$$

V rámci bodu jsou nejdříve změřeny charakteristiky samotných obvodů bez připojené zátěže, poté probíhá měření s reproduktory jako zátěží.



Obr. 9.3: Graf impedanční kmitočtové charakteristiky obvodů kompenzujících impedanční kmitočtovou charakteristiku reproduktorů



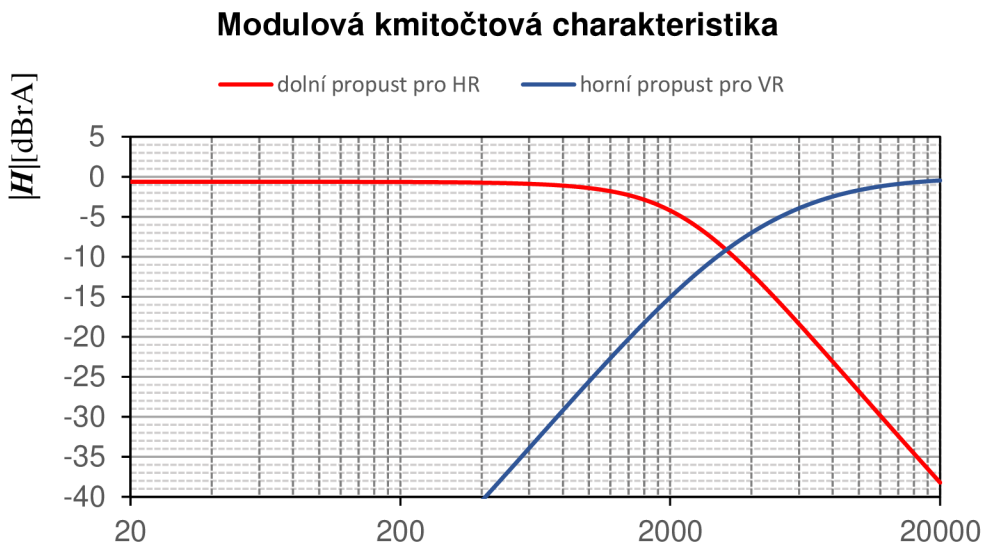
Obr. 9.4: Graf impedanční kmitočtové charakteristiky reproduktorů před a po kompenzaci

f [Hz]

Z grafických znázornění na obrázcích 7.3 a 7.4 lze velmi jednoduše vyčíst fungování obvodů kompenzujících impedanční kmitočtovou charakteristiku reproduktorů.

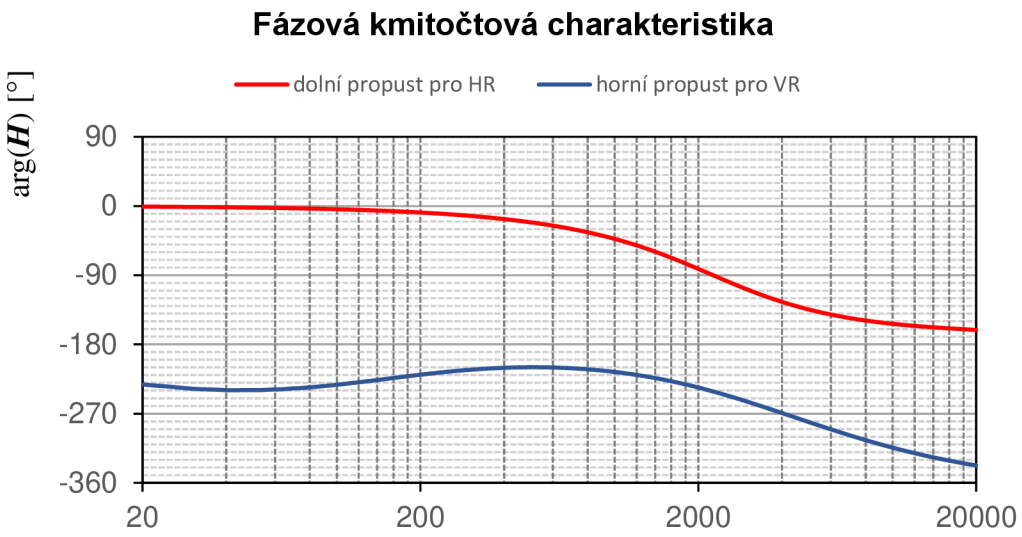
9.2.3 Kmitočtová závislost modulu a fáze přenosu při zapojení kmitočtové výhybky

Při měření tohoto bodu jsou na základní desce zapojeny pouze obvody kmitočtové výhybky středobasové a vysokotónové větve. Obvody kompenzace impedance jsou vypojeny, měření probíhá s umělou zátěží tvořenou rezistory.



Obr. 9.5: Graf modulové kmitočtové charakteristiky obvodů kmitočtových výhybek

f [Hz]

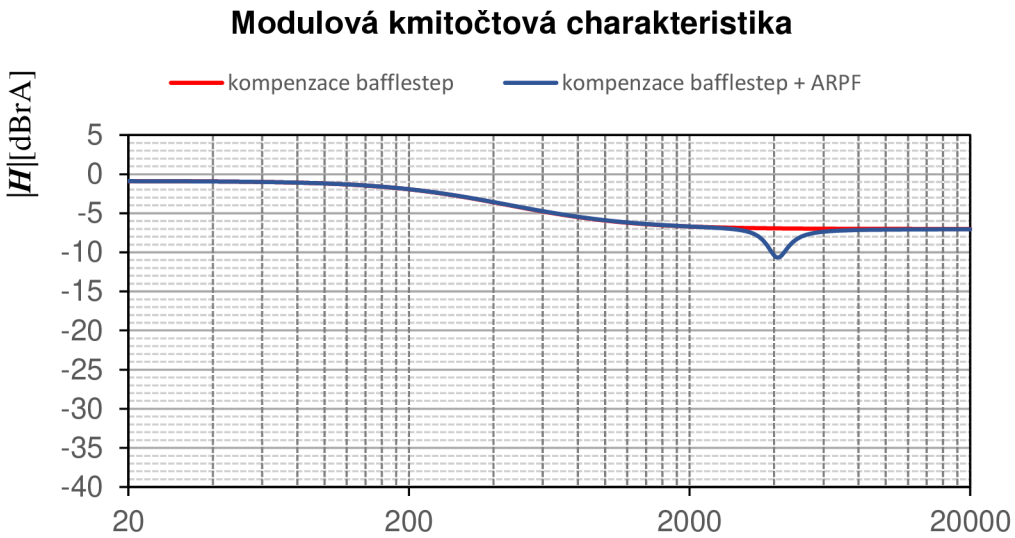


Obr. 9.6: Graf fázové kmitočtové charakteristiky obvodů kmitočtových výhybek

f [Hz]

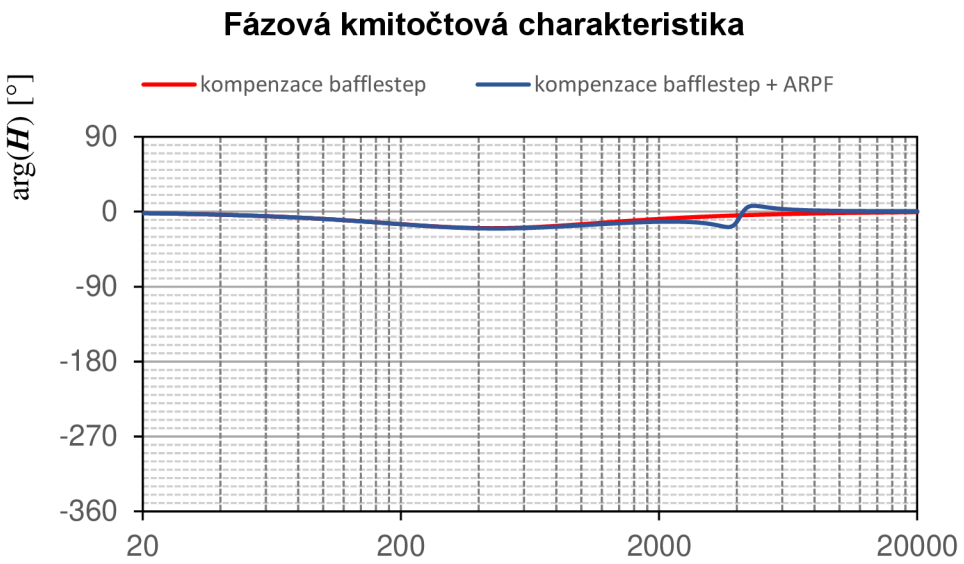
9.2.4 Kmitočtová závislost modulu a fáze přenosu při zapojení kmitočtových korekcí středobasové větve

Při měření tohoto bodu je nejdříve zapojen pouze obvod kompenzace bafflestepu a následně pro druhé měření je k němu připojen obvod ARPF kompenzující ojedinělou nevyrovnanost charakteristiky.



Obr. 9.7: Graf modulové kmitočtové charakteristiky obvodů kmitočtových korekcí středobasové větve

f [Hz]

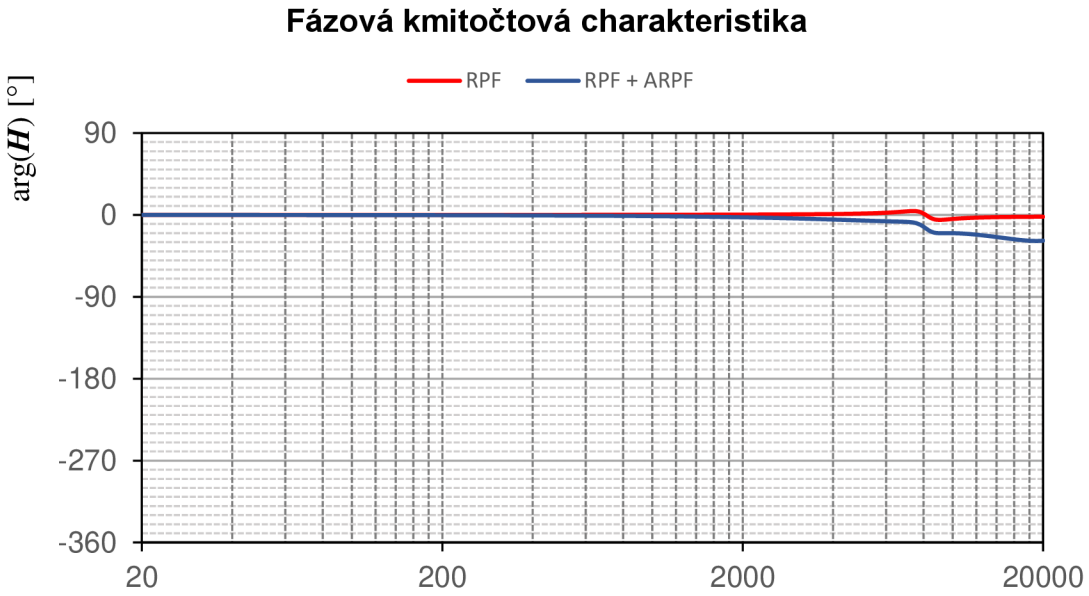


Obr. 9.8: Graf fázové kmitočtové charakteristiky obvodů kmitočtových korekcí středobasové větve

f [Hz]

9.2.5 Kmitočtová závislost modulu a fáze přenosu při zapojení kmitočtových korekcí vysokotónové větve

Při měření tohoto bodu je nejdříve zapojen pouze obvod RPF se sériově řazeným rezistorem pro snížení citlivosti a následně při druhém měření je navíc připojen obvod ARPF se středním kmitočtem nad 20kHz pro potlačení růstu citlivosti vysokotónového reproduktoru na kmitočtech nad 15kHz.

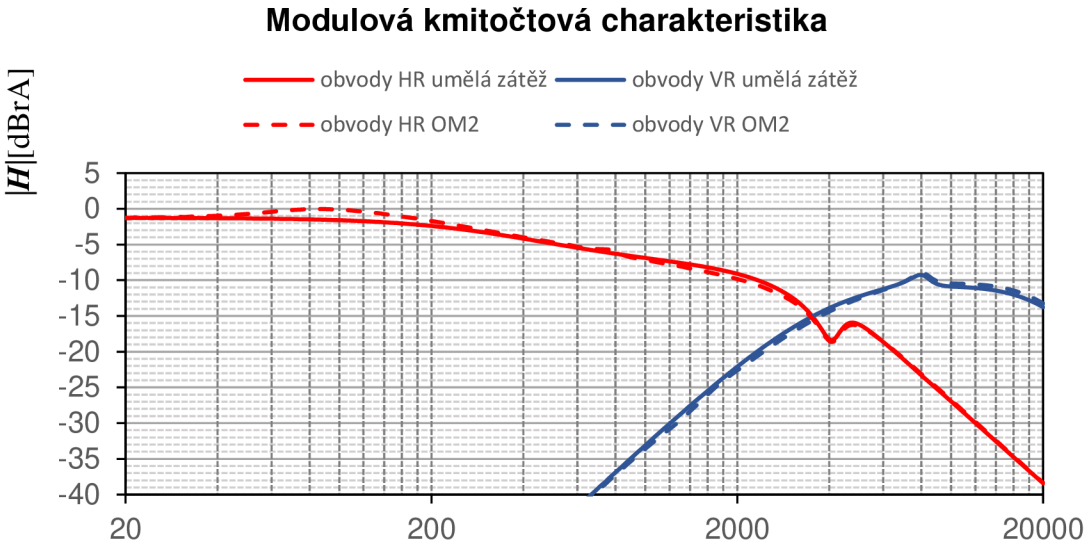


Obr. 9.9: Graf modulové kmitočtové charakteristiky obvodů kmitočtových korekcí vysokotónové větve

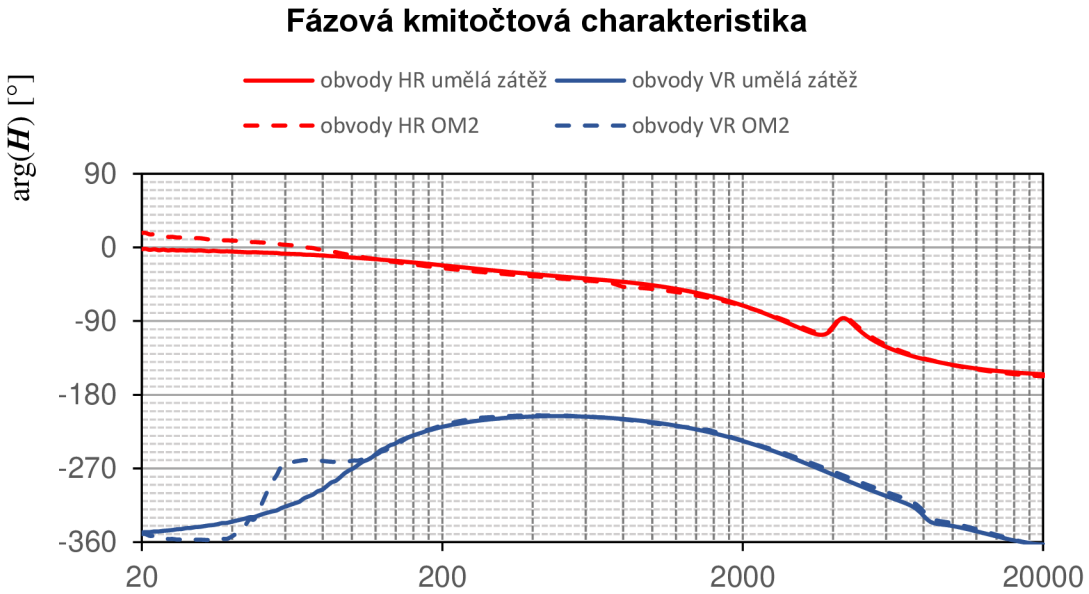
f [Hz]

9.2.6 Kmitočtová závislost modulu a fáze přenosu při zapojení všech kmitočtových korekcí

Pro první měření v rámci tohoto bodu laboratorní úlohy jsou zapojeny všechny v předchozích bodech samostatně měřené obvody s výjimkou kompenzace impedance reproduktorů, protože měření probíhá při zatížení umělou zátěží. V druhém měření je pak místo umělé zátěže zapojena reproduktorová soustava osazena reproduktory a na základní desce přípravku jsou navíc zapojeny i obvody kompenzace impedance.



Obr. 9.10: Graf modulové kmitočtové charakteristiky všech obvodů kmitočtových korekcí



Obr. 9.11: Graf fázové kmitočtové charakteristiky všech obvodů kmitočtových korekcí

9.2.7 Kmitočtová závislost impedance soustavy při zapojení všech obvodů

Pro změření tohoto bodu je nutné opět použít bočník. Měříme tedy jedním kanálem úbytek napětí na bočníku zapojeného mezi koncovým zesilovačem a základní deskou přípravku a druhým kanálem napětí na vstupních svorkách základní desky.

Obr. 9.12: Graf impedanční kmitočtové charakteristiky soustavy při zapojení všech obvodů

9.3 Zhodnocení výsledků laboratorní úlohy

V rámci laboratorní úlohy studenti s využitím laboratorního přípravku osazeného běžně používanými pasivními součástkami zapojí většinu nejčastěji používaných obvodů v pasivních reproduktorových výhybkách a proměří a zhodnotí jejich kmitočtové charakteristiky.

10. ZÁVĚR

Výstupem práce je sada přípravku sestávající se ze dvou základních desek a sedmdesáti pěti osazených modulů, které je možné použít pro laboratorní výuku nebo prototypování obvodů pasivních reproduktorových výhybek. Dále byla jakožto součást bakalářské práce zpracována laboratorní úloha využívající výše zmíněný přípravek k výuce kurzu Reproduktory a reproduktorové soustavy.

Přípravek splňuje předem dané požadavky na malé rozměry, jednoduchou a rychlou záměnu součástek a nízké náklady. Mechanické provedení včetně propojení mezi základní deskou a moduly se jeví po testovacím používání jako dostatečně odolné a spolehlivé pro dlouhodobé laboratorní použití.

Před zahájením laboratorní výuky kurzu v letním semestru by bylo vhodné za asistence studentů uskutečnit zkušební průchod laboratorní úlohou a na základě zpětné vazby upravit nesrovnalosti v zadání, případně upravit náročnost úlohy.

V práci lze navázat kompletací dalších modulů pro rozšíření sady, případně lze revidovat návrhy DPS za účelem opravení nedokonalostí návrhu, které se ukázaly až při praktickém používání přípravku např. umístění popisků na modulech, mechanismus uchycení Speakon konektoru, rozměrová tolerance v místech spojení aj.

LITERATURA

[1] SVOBODA, Ladislav a Miloslav ŠTEFAN. Reproduktory a reproduktorové soustavy. Praha: SNTL, 1983. s. 69. Dostupné také z: https://dnnt.mzk.cz/uuid/uuid:52ed9560-27d8-11e6-a3d3-001018b5eb5c

[2] TOMAN, Kamil. Reproduktory a reprosoustavy II. Česko: s.n., c2010. s. 122. ISBN 978-80-254-9510-0. Dostupné také z: https://dnnt.mzk.cz/uuid/uuid:63d74cd0-5ddd-11e8-983f-005056827e51

[3] Kmitočtová závislost impedance basového reproduktoru. In: Wikipedia [online]. [cit. 2020-12-10]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/File:Speaker_impedance.svg

[4] BALÍK, Miroslav. Reproduktorové soustavy: Kmitočtové filtry s LC a RLC obvody. Brno, 2020.

[5] Eliott Sound Products: Baffle Step Compensation [online]. 2001 [cit. 2020-12-10]. Dostupné z: https://sound-au.com/bafflestep.htm

[6] VYDARENÝ, Ján. *Pasivní kmitočtové výhybky pro dvoupásmové reproduktorové soustavy*. Brno, Rok, 72 s. Diplomová práca. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav telekomunikací. Vedoucí práce: Ing. Miroslav Balík, Ph.D.

SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK

Zkratky:

RLC (obvod)	…	elektrický obvod sestavený z rezistance, kapacitance a induktance
Hi-Fi	…	high fidelity
VA	…	voltampér
PA	…	public address
bafflestep	…	projev akustického zkratu na nízkých kmitočtech
dB	…	decibel
DP	…	dolní propust
HP	…	horní propust
HSF	…	high shelving filtr
LSF	…	low shelving filtr
RPF	…	rezonanční peak filtr
ARPF	…	antirezonanční peak filtr
NTC	…	negative temperature coefficient
PTC	…	positive temperature coefficient
ESR	…	equivalent series resistance
DPS	…	deska plošných spojů
CNC	…	computer numerical control (fréza)
CAM	…	computer-aided manufacturing systém
VR	…	vysokotónový reproduktor
HR	…	hlubokotónový reproduktor
ÚTKO	…	Ústav telekomunikací

Symboly:

f	…	frekvence	[Hz]
Z	...	impedance	[Ω]
U	...	napětí	[V]
R	...	elektrický odpor	[Ω]

SEZNAM PŘÍLOH

PŘÍLOHA A - KOMPLETNÍ SADA PŘÍPRAVKU 51

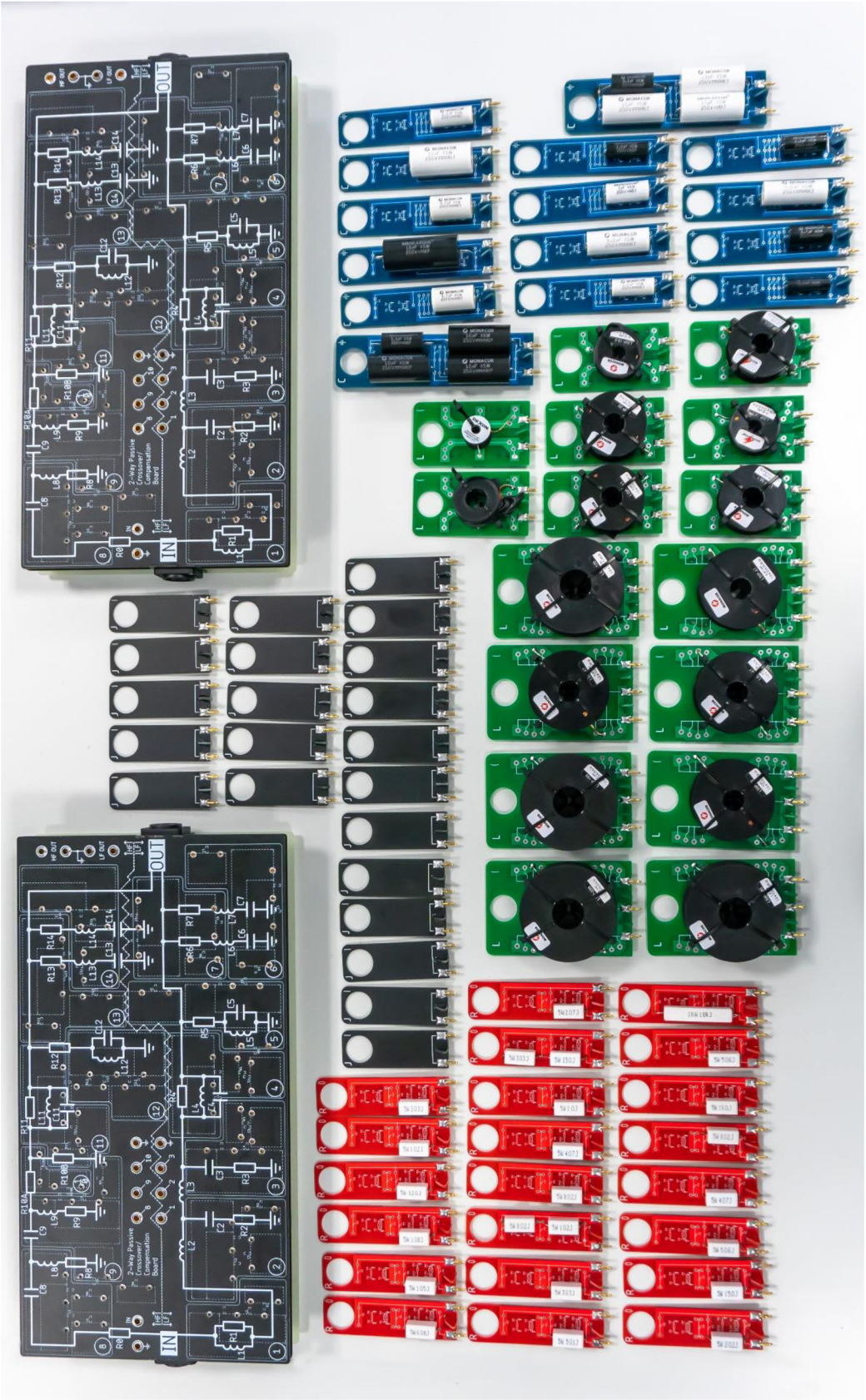
PŘÍLOHA B - SVRCHNÍ ZÁKLADNÍ DESKA 52

PŘÍLOHA C - UKÁZKA VŠECH DRUHŮ MODULŮ 53

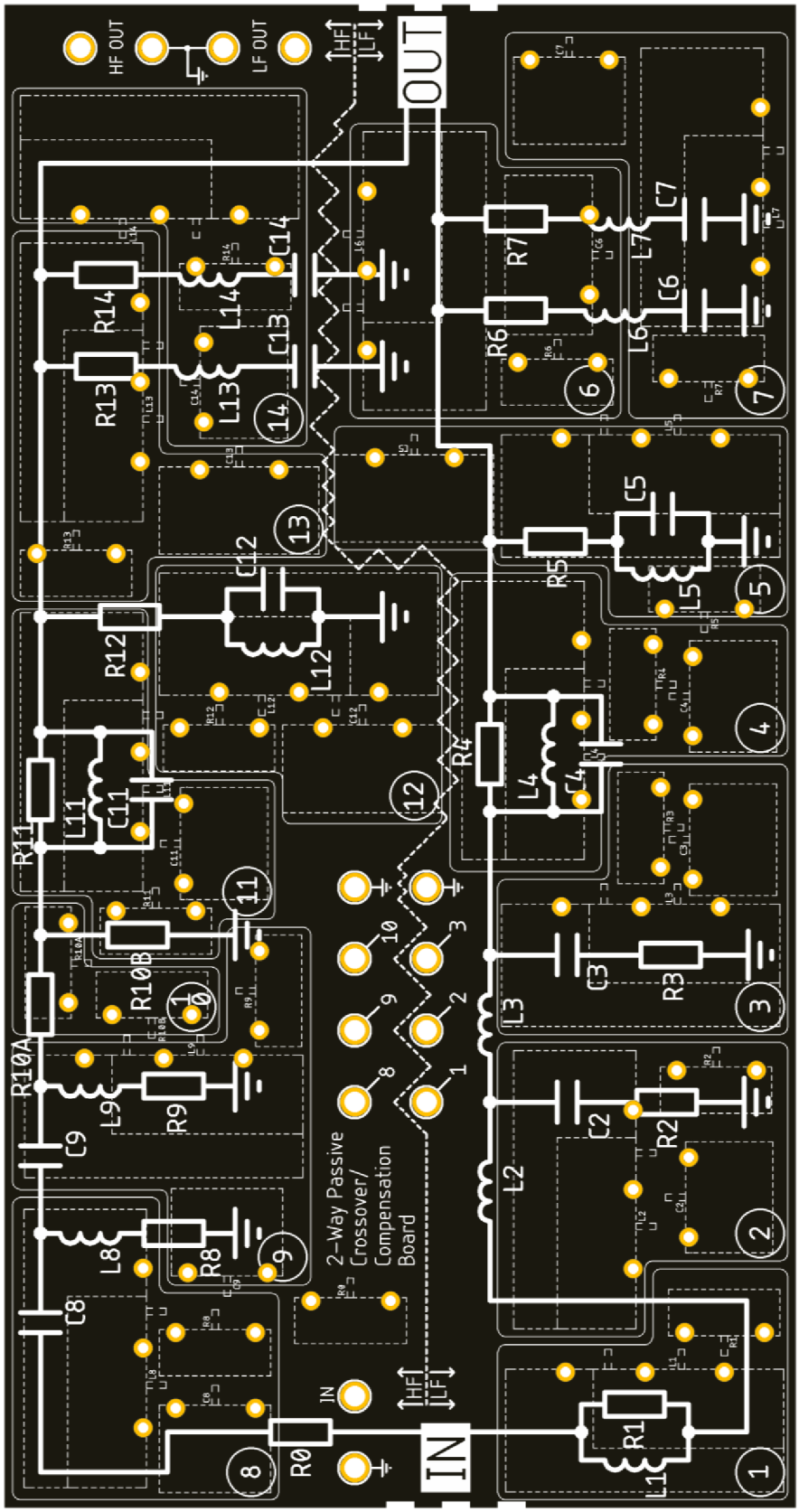
PŘÍLOHA D - PARAMETRY SOUČÁSTEK Z KATALOGU MONACOR 54

PŘÍLOHA E - ARCHIV SE SOUBORY 56

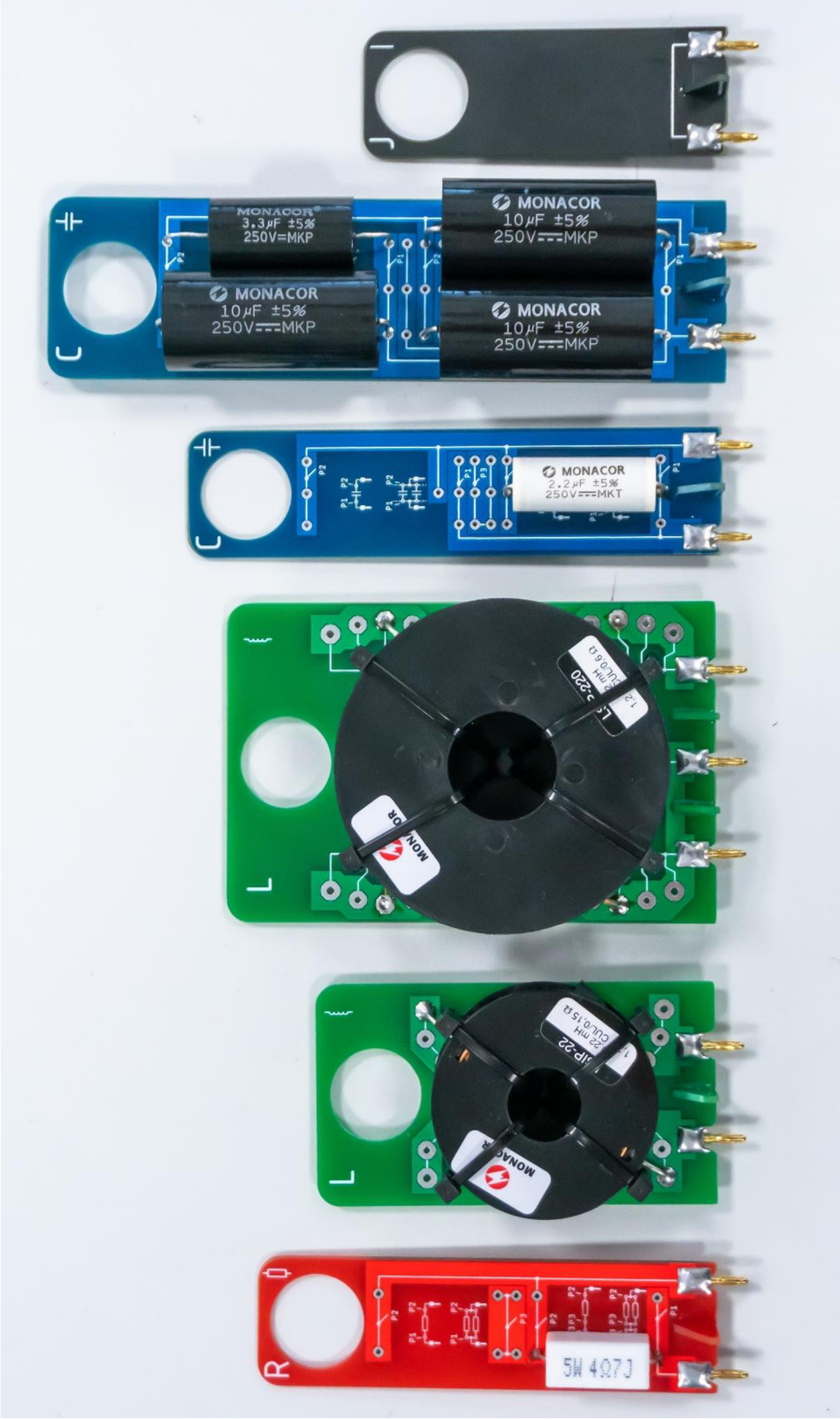
Příloha A - Kompletní sada přípravku



Příloha B - Svrchní základní deska



Příloha C - Ukázka všech druhů modulů



Příloha D - Parametry součástek z katalogu Monacor

Cívky vinuté drátem o průměru 0,85mm				
Model	**Indukčnost [mH]**	**Odpor [Ω]**	**Průměr [mm]**	**Výška [mm]**
LSIP-10/2	0,1	0,2	48	19
LSIP-15/2	0,15	0,2	37	11
LSIP-18/2	0,18	0,2	37	11
LSIP-22/2	0,22	0,25	38	11
LSIP-27/2	0,27	0,35	48	19
LSIP-33/2	0,33	0,4	48	19
LSIP-39/2	0,39	0,4	48	19
LSIP-47/2	0,47	0,45	48	19
LSIP-56/2	0,56	0,5	48	19
LSIP-68/2	0,68	0,55	48	19
LSIP-82/2	0,82	0,6	48	19
LSIP-100/2	1	0,7	48	19

Cívky vinuté drátem o průměru 1mm				
Model	**Indukčnost [mH]**	**Odpor [Ω]**	**Průměr [mm]**	**Výška [mm]**
LSIP-15/1	0,15	0,15	48	19
LSIP-18/1	0,18	0,2	48	19
LSIP-22/1	0,22	0,15	48	19
LSIP-27/1	0,27	0,25	48	19
LSIP-33/1	0,33	0,3	48	19
LSIP-39/1	0,39	0,3	48	19
LSIP-47/1	0,47	0,35	48	19
LSIP-56/1	0,56	0,4	48	19
LSIP-68/1	0,68	0,45	48	19
LSIP-82/1	0,82	0,5	48	19
LSIP-100/1	1	0,55	59	19
LSIP-120/1	1,2	0,6	59	19
LSIP-150/1	1,5	0,65	59	19
LSIP-180/1	1,8	0,7	59	19
LSIP-220/1	2,2	0,8	70	30

Cívky vinuté drátem o průměru 1,2mm				
Model	**Indukčnost [mH]**	**Odpor [Ω]**	**Průměr [mm]**	**Výška [mm]**
LSIP-15	0,15	0,15	48	19
LSIP-18	0,18	0,15	48	19
LSIP-22	0,22	0,15	48	19
LSIP-27	0,27	0,2	48	19
LSIP-33	0,33	0,2	48	19
LSIP-39	0,39	0,25	59	19
LSIP-47	0,47	0,25	59	19
LSIP-56	0,56	0,3	59	19
LSIP-68	0,68	0,35	59	19
LSIP-82	0,82	0,35	59	19
LSIP-100	1	0,4	59	19
LSIP-120	1,2	0,45	70	30
LSIP-150	1,5	0,5	70	30
LSIP-180	1,8	0,55	70	30
LSIP-220	2,2	0,6	70	30
LSIP-270	2,7	0,65	70	30
LSIP-350	3,3	0,75	70	30

Kondenzátory MKT				
Model	**Kapacita [µF]**	**Vzdálenost pinů [mm]**	**Průměr [mm]**	**Délka [mm]**
MKTA-10	1	25	10	24
MKTA-15	1,5	25	12	24
MKTA-22	2,2	32,5	12	31
MKTA-27	2,7	32,5	12,5	31
MKTA-30	3	32,5	14	31
MKTA-33	3,3	32,5	14,5	31
MKTA-39	3,9	32,5	16	31
MKTA-47	4,7	32,5	17	31
MKTA-68	6,8	47,5	16	46
MKTA-82	8,2	47,5	17,5	46
MKTA-100	10	47,5	19,5	46
MKTA-120	12	47,5	21	46
MKTA-150	15	47,5	23	46
MKTA-220	22	47,5	27,5	46
MKTA-330	33	57,5	30	56
MKTA-470	47	57,5	35	56
MKTA-680	68	62,5	39	61

Příloha E - Archiv se soubory

Jako příloha bakalářské práce je v informačním systému nahrán soubor s názvem „Univerzalni_vyhybka_Dominik_Pacek_priloha.zip“, který obsahuje výrobní podklady k DPS, textové zadání laboratorní úlohy, nevyplněný výstupní protokol, ukázkově vyplněný výstupní protokol a projekt apX bez naměřených dat.