

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta elektrotechnická
Katedra radioelektroniky

Laboratorní úloha na téma reproduktorových výhybek

Laboratory exercise on crossover networks

Bakalářská práce

Studijní program: Komunikace, Multimédia a Elektronika

Studijní obor: Multimediální technika

Vedoucí práce: Dr. Ing. Libor Husník

Jakub Krista

Praha 2016

České vysoké učení technické v Praze
Fakulta elektrotechnická
katedra radioelektroniky

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Student: **Jakub Krista**

Studijní program: Komunikace, multimédia a elektronika
Obor: Multimediální technika

Název tématu: **Laboratorní úloha na téma reproduktorových výhybek**

Pokyny pro vypracování:

Navrhněte a sestavte laboratorní úlohu na téma reproduktorových výhybek, kde by bylo možno demonstrovat vliv dobrého a špatného nastavení dělicího kmitočtu. Vypracujte též návod k úloze se základní teorií z oboru.

Seznam odborné literatury:

- [1] Dickason, V.: the Loudspeaker Cookbook, Audio Amateur Press, 1995
- [2] Sýkora, B.: Stavíme reproduktorové soustavy, seriál v Amatérské rádio, Praktická elektronika, 10/1997-12/2000
- [3] Toman, K.: Reproduktory a reprosoustavy II, Dexon, 2010

Vedoucí: Dr. Libor Husník Ing.

Platnost zadání: do konce letního semestru 2016/2017

L.S.

doc. Mgr. Petr Páta, Ph.D.
vedoucí katedry

prof. Ing. Pavel Ripka, CSc.
děkan

V Praze dne 19. 2. 2016

Abstrakt

Cílem práce je vytvořit laboratorní úlohu, která by demonstrovala vliv výhybek na reproduktorovou soustavu. Řešením bylo vyrobit laboratorní přípravek, kterým by bylo možné měnit dělicí kmitočty pro jednotlivé reproduktory, dále pak vytvoření návodu k měření a podpůrné programy pro výpočet součástí. Vytvořený přípravek umožňuje nastavení dělicích kmitočtů pro až třípásmovou reproduktorovou soustavu. Celá úloha je kompletní a připravená k použití.

Klíčová slova:

Reproduktorové výhybky, dynamický reproduktor, reproduktorové soustavy, laboratorní úloha,

Abstract

The main goal of this thesis is to create a laboratory exercise that would illustrate the crossover networks effect on loudspeaker systems. The task was solved by making laboratory equipment that would enable a change of crossover frequency for each speaker. Next step was to create a tutorial for this exercise as well as supporting programs for calculation of individual crossover components. The resulting laboratory equipment enables setting crossover frequency up to three way loudspeaker system. Whole laboratory exercise is complete and ready to use.

Key words:

Crossover networks, dynamic loudspeaker, loudspeaker systems, laboratory exercise

Prohlášení

„Prohlašuji, že jsem předloženou práci vypracoval samostatně a že jsem uvedl veškeré použité informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem o dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací.“

.....

Podpis studenta

V Praze dne 27. května 2016

Poděkování

Děkuji vedoucímu mé práce Dr. Ing Husníkovi za vedení práce a trpělivost. Dále děkuji rodině za podporu při studiu.

Obsah

1. Úvod.....	3
2. Elektroakustické měniče	4
2.1 Elektrodynamické měniče	6
2.1.1 Princip funkce	6
2.1.2 Základní provedení	6
2.1.2.1 Přímovyzářující elektrodynamický reproduktor	6
2.1.2.2 Kalotový reproduktor	8
2.1.3 Náhradní schéma	9
3. Druhy reproduktorových soustav.....	12
3.1 Dělení podle ozvučnice	12
3.1.1 Uzavřená ozvučnice.....	12
3.1.2 Bassreflex ozvučnice	13
3.2 Dělení podle pásem	14
4. Výhybky	15
4.1 Druhy výhybek.....	16
4.1.1 Aktivní	16
4.1.2 Pasivní	16
4.2 Kompenzace reproduktoru.....	17
4.2.1 Kompenzace impedance reproduktoru	17
4.2.2 Kompenzace citlivosti reproduktoru.....	18
4.3 Aproximace výhybek	19
4.3.1 Výhybka typu Linkwitz-Riley.....	19
4.3.2 Výhybka typu Butterworth.....	20
4.4 Postup návrhu výhybky	23
4.5 Program pro výpočet výhybky v prostředí MATLAB	24
5. Reproduktorová soustava	25
5.1 ARS1018	25
5.2 ARS1054	25

6. Přípravek	27
6.1 Realizované přípravky	27
6.2 Úpravy přípravku	27
6.3 Vlastnosti přípravku	28
6.4 Měření	29
6.4.1 ARS1018.....	30
6.4.2 ARS1054.....	33
6.5 Testovací signál	37
7. Návod k měření.....	38
7.1 Samotný návod.....	38
8. Závěr	44
9. Literatura	45
10. Přílohy	I

1. Úvod

Cílem této práce je návrh a zhotovení kompletní laboratorní úlohy na téma reproduktorové výhybky. To zahrnuje návrh a realizaci samotného měřícího přípravku a pochopitelně vytvoření návodu k laboratorní úloze.

Pro věrnou reprodukci se v kvalitních reprosoustavách používá více reproduktorů, nejčastěji se lze setkat s dvoupásmovými soustavami, kde horní část spektra zpracovává výškový reproduktor, který je na ně konstruovaný a naopak. Případně se používají i třípásmové reprosoustavy, které oddělují ještě střední kmitočtové pásmo. Výsledný přípravek by měl umožňovat jak nastavení dvoupásmové reprosoustavy, tak třípásmové.

Pokud by se signál pro jednotlivé reproduktory nerozdělil, pak by výsledek byl zkreslený a amplitudová charakteristika velmi nerovnoměrná, navíc by mohlo dojít k poškození reproduktorů. K rozdělení signálu pro jednotlivé reproduktory slouží právě výhybky, nejde o nic jiného než filtry, které propouští příslušnou část spektra. Nejtěžším úkolem při návrhu je nalézt ten nejideálnější dělicí kmitočet a strmost výhybky pro danou reprosoustavu. Musí se při tom počítat i s nerovnoměrnou impedanční charakteristikou, která znemožňuje přesný přímý výpočet součástek pro filtr. Správně nastavená výhybka by v místě dělicího kmitočtu neměla vykazovat převýšení ani pokles. Při hledání dělicího kmitočtu ale neexistuje pouze jedno správné řešení.

Pro potřeby laboratorní úlohy je teda potřeba sestavit takový přípravek, který by umožňoval měnit dělicí kmitočet pro jednotlivé reproduktory a byl použitelný pro 4Ω i 8Ω reproduktorovou soustavu.

2. Elektroakustické měniče

Aby bylo možné zvuk reprodukovat, tedy napodobit nějaký původní zvuk, je nutné vědět, jak vzniká sluchový vjem, ten vyvolávají změny tlaku okolního vzduchu, pro věrnou reprodukci původního zvuku je nutné tedy napodobit i změny tlaku vzduchu. Lidské ucho je schopno vnímat frekvence v rozsahu od 20Hz až 20KHz, tento rozsah však není u všech osob stejný a navíc s přibývajícím věkem, se maximální slyšitelná frekvence snižuje. Slyšitelný rozsah je poměrně velký a to 3 dekády, proto je problém realizace ideálního zvukového zdroje s takovou frekvenční charakteristikou, místo něj se používají neideální reproduktory.

Pokud vynecháme plazmové měniče, které využívají oblouk, k vytvoření změn tlaku a jiné nepříliš používané způsoby reprodukce, tak obecně reproduktory pomocí pístového pohybu převádějí změny elektrického napětí na změny tlaku vzduchu, tím je vyvolán zvukový vjem. Bohužel není možné zkonstruovat reproduktor, který by měl tak rozsáhlou frekvenční charakteristiku, jako je slyšitelné spektrum. Hlavním omezujícím faktorem je membrána a její rozměry a hmotnost. Pro reprodukci nízkých kmitočtů je důležité, aby plocha membrány byla co možná největší a stejně tak její výchylka, přičemž její pohyb je relativně pomalý a hmotnost proto není tak podstatná, pro vysoké kmitočty je potřeba, aby se membrána mohla pohybovat co nejrychleji, proto je potřeba, aby byla co nejlehčí.

Požadavky na kvalitní reprodukci jsou závislé na oblasti použití, někdy stačí, aby byla přenesena hlavně informace v řeči, to jsou telefony, rozhlas, atd. V hudebním průmyslu jde však většinou o co nejvěrnější reprodukci, požadujeme tedy co nejmenší zkreslení, krátkou impulzní odezvu, plochou amplitudovou charakteristiku a vysokou účinnost. V ideálním případě by všechny požadavky splňoval jeden reproduktor, ale z fyzikálního hlediska to není možné. Proto se u kvalitnějších reprosoustav používá více reproduktorů.

Reproduktor je převodník, který převádí změny napětí na změny akustického tlaku a proud na objemovou rychlost. Tedy z elektrické strany převádí na akustickou, proto se nazývá také jako elektroakustický měnič a celá problematika jako elektroakustika. Avšak je zde ještě mezipřevod a to na mechanickou stranu, kde napětí na mechanické straně odpovídá síle a síla odpovídá tlaku a proud rychlosti a ta objemové rychlosti. Vztahy mezi jednotlivými veličinami jsou popsány diferenciálně, ale používají se i linearizované vztahy, které při běžných provozních podmínkách fungují. Tyto vztahy lze popsat maticově pomocí převodních matic, tak jak je to v rovnici (1).

$$\begin{bmatrix} F \\ v \end{bmatrix} = A \cdot \begin{bmatrix} u \\ i \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} p \\ w \end{bmatrix} = \alpha \cdot \begin{bmatrix} u \\ i \end{bmatrix} \quad (1)$$

Principů převodu z elektrické strany na mechanickou je několik. Jeden z prvních byl elektromagnetický reproduktor, ten využívá permanentní magnet, nad jehož pólovými nástavci je umístěn jazýček, který prochází cívkou a je připojen k membráně. Změnou proudu protékajícího cívkou dojde k rozechvění jazýčku a tím i membrány. Vlastnosti takového reproduktoru jsou špatné. Dnes se používá v miniaturních provedeních jako levné řešení.

Pro signalizační účely se často používají piezoelektrické měniče, které fungují na principu piezoelektrického jevu. Po přivedení napětí na piezoelektrický materiál se změní jeho rozměry a tím se vyvolá změna tlaku. Při stlačování piezoelektrického materiálu se na jeho svorkách objeví elektrické napětí, které se využívá v mikrofonech a zejména pak v gramofonových přenoskách. V hudebním průmyslu se používají v levných vysokotónových reproduktorech, mají velké zkreslení a velmi zvlněnou frekvenční charakteristiku, proto se ve slyšitelném spektru používají jako signalizační, případně varovné, například při zapomenutých rozsvícených světlech v autě. Profesionální uplatnění naleznou v oblasti ultrazvuku, kde se používají například v sonarech.

Další z principů je elektrostatický měnič, který funguje na principu kondenzátoru. Přivedením napětí na elektrody měniče se vytvoří síla, která pohybuje elektrodou, která je umístěna mezi elektrodami, které jsou pevně uchyceny. Pohyblivá elektroda slouží jako membrána. Zpravidla se jedná o plastový plát pokrytý tenkou vrstvou uhlíku, aby byla membrána lehká. Mezi krajními elektrodami je konstantní napětí a na membráně je při klidovém režimu polovina tohoto napětí, aby byla uprostřed, pak stačí na klidové napětí superponovat signál a membrána se pohybuje. Výsledkem je reproduktor s plochou charakteristikou, výbornými směrovými vlastnostmi a nízkým zkreslením. Největší nevýhodou je reprodukce nízkých kmitočtů, způsobená malou výchylkou membrány. Často se proto reprosoustavy doplňují basovým elektrodynamickým měničem. Další nevýhodou je vysoká cena. Kromě reprosoustav se s tímto principem lze častěji setkat ve sluchátkách. Nejčastěji se však tento princip používá v mikrofonech, kde dosahuje výborné citlivosti.

Zdaleka nejpoužívanějšími v audio oblasti jsou dynamické reproduktory, které se používají se pro všechna pásma, liší se jen v provedení.

2.1 Elektrodynamické měniče

2.1.1 Princip funkce

Princip vychází ze vztahu:

$$d\mathbf{F} = i \cdot \mathbf{B} \times d\mathbf{l} \quad (2)$$

\mathbf{F} je vektor síly, i je proud protékající cívkou, \mathbf{B} je vektor magnetické indukce, \mathbf{l} je vektor délky vodiče.

Zjednodušeně pro kolmé vektory:

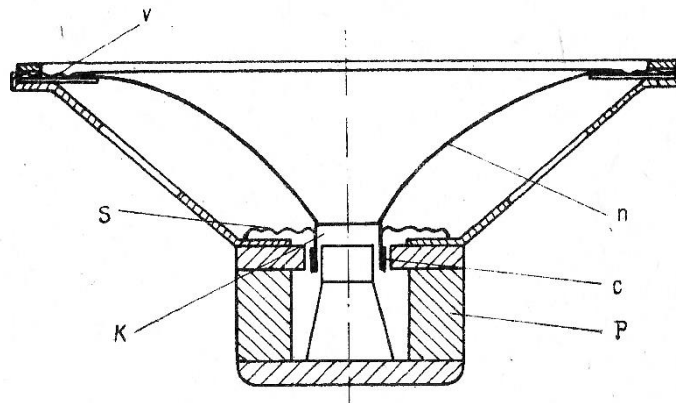
$$F = i \cdot B \cdot l \quad (3)$$

Aby výsledek $\sin(\alpha)$ vektorového součinu byl roven jedné tedy, aby vektory byly kolmé, je zajištěno konstrukcí. Síla - F , která pohybuje membránou, je dána magnetickou indukcí - B v mezeře mezi košem a kmitací cívkou, která je konstantní a je zajištěna permanentním magnetem přidělaným ke koši reproduktoru, ze vztahu je patrné že síla je přímo úměrná magnetické indukci, pakliže chceme vyvinout větší sílu, potřebujeme silnější magnet. Délka vodiče kmitací cívky se označuje l , tak je dána konstruktéry jako kompromis, protože pro velké příkony je požadavek na co největší průřez. S velkým průřezem se ale zmenšuje počet závitů, které je možné na membránu navinout a s rostoucím množstvím navinutého materiálu se zvyšuje hmotnost membrány, což je nežádoucí. Posledním parametrem je proud, který generuje výkonový zesilovač.

2.1.2 Základní provedení

2.1.2.1 Přímovyzařující elektrodynamický reproduktor

Na obrázku 1. Je řez přímovyzařujícím elektrodynamickým reproduktorem s kuželovou membránou. Princip funkce je u všech druhů elektrodynamických reproduktorů stejný. Liší se hlavně tvarem membrány, případně změnou uspořádání, ale princip je stejný.



Obr. 1 Řez elektrodynamickým reproduktorem, převzato z [4]

Základ elektrodynamických reproduktorů je v magnetickém obvodu. Zdrojem magnetické indukce reproduktoru je permanentní magnet, který je přichycen na zadní straně koše. Požadujeme po něm co největší magnetickou indukci, která je svedena pólovými nástavci do mezery mezi košem a cívkou. U kvalitnějších výškových reproduktorů se tato mezera vyplňuje ferrofluidem, který zlepšuje chlazení a snižuje rezonanční kmitočet a tím umožňuje fungování na nižších kmitočtech bez poškození. Na obrázku 1, je to vyšrafovaná část označená **P**. Vyrábí se z většinou z feritu s možností příměsí, dříve se používala (podle [3]) hlavně slitina AlNiCo.

Kmitací cívka, taktéž nazývaná „*kmitačka*“ je navinuta na spodní části membrány. Požadavek na ní je co nejmenší hmotnost a velký počet závitů, tedy co největší délku vodiče v magnetickém poli I , zároveň musí být dimenzována na odpovídající výkon, aby nedošlo k poškození. Tedy požadujeme co nejmenší a nejlehčí cívku s velkým počtem závitů navinutých vodičem s dostatečným průřezem a co nejmenší indukčností. Realizace cívky je tedy vždy kompromis, jak již bylo zmíněno v 2.1.1. Cívka je většinou měděná, u nejkvalitnějších reproduktorů je hliníková, u které je problémem technologický postup, protože hliník o malých průřezech při navinování praská, ale je lehčí a hlavně tepelná závislost oproti mědi je menší a tím pádem jsou vlastnosti reproduktoru stálejší. Na obr. 1 je označena písmenem **C**. Kostra, na které je navinuta, se často nazývá „*former*“. Různá provedení cívek jsou například v [2].

Úkolem membrány je převod z mechanické strany na akustickou. Velikost membrány se liší podle části spektra, kterou chceme reprodukovat, pro nízké kmitočty je potřeba velká plocha, ta může být nahrazena velkou výchylkou, ta však přináší nepříjemnost ve formě nelinearity tuhosti závěsu. Velká plocha membrány znamená, že bude i velká hmotnost membrány, to je problém pro vyzařování středních i vysokých kmitočtů, kvůli její setrvačnosti. Se zmenšením plochy se však zase zvyšuje směrovost reproduktoru, tedy výsledná realizace je opět kompromis. Po membráně požadujeme co nejvyšší tuhost, aby nedocházelo během pohybu k její deformaci. K deformaci dojde pohybem kmitací cívky, tedy ve středu reproduktoru, a šíří se vlivem setrvačnosti membrány k závěsu, kde se odrazí a vzniká stojaté vlnění. Různé body membrány tak kmitají různě a vyzařují s různou fází a tyto přídatky se sčítají. Dochází tím ke zhoršení amplitudové charakteristiky. Tento problém se řeší vyrobou membrány z tvrdšího a lehčího materiálu, pak se efekt kmitání samotné membrány vlivem stojatého vlnění přesune do neslyšitelného spektra. Membrány jsou většinou papírové, případně opatřeny nátěrem, je-li požadavek na vyšší tuhost, používá se například i titan další druhy materiálů včetně jejich vlastností jsou uvedeny ve zdroji [2]. Na obrázku 1 je membrána označena písmenem **n**.

Závěs reproduktoru udržuje membránu ve výchozí pozici tak, aby byla maximální výchylka na obě strany stejná. Určuje poddajnost v náhradním schématu. Materiál a provedení se určuje podle druhu a velikosti reproduktoru. Například u basových reproduktorů s malou plochou membrány, kde je pro dosažení nízkých frekvencí potřeba velké výchylky se závěs vyrábí z měkkého poddajného materiálu. Pohybem vzniká v závěsu tření, které snižuje účinnost, tedy malé basové reproduktory jsou méně účinné (citlivé). Zároveň odpor, který závěs klade, není lineární a tím vzniká zkreslení. Materiálem na takové závěsy může být třeba pěnový polyetylen. U reproduktorů s menší výchylkou se závěs tvoří pomocí „vlněk“ na membráně. U takových reproduktorů bývá zkreslení menší a tření také není tak velké, takže účinnost (citlivost) je vyšší. Na obrázku 1 je označen písmenem **V**.

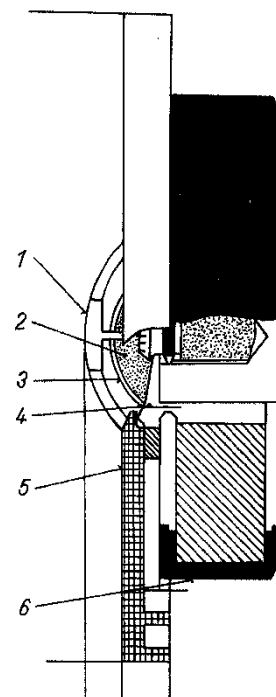
Středící membrána udržuje membránu v ose se vzduchovou mezerou tak, aby nedocházelo ke styku cívky s pólovými nástavci a jejímu následnému poškození. Měla by být maximálně prodyšná a klást minimální odpor pohybující se membráně. Na obrázku 1 je označena písmenem **S**.

Prachovka zabraňuje vniknutí prachu. U dražších modelů může být měděná a zároveň sloužit jako chladič kmitací cívky v tom případě není přilepena k membráně, ale je součástí magnetického obvodu. Problém může způsobovat objem vzduchu uzavřený pod prachovkou, v případě je-li prachovka přilepena k membráně. Požadavek na takovou prachovku je tedy prodyšnost a prachotěsnost. Na obrázku 1 je označena písmenem **K**.

Všechno pohromadě drží koš, požadavky na něj jsou dostatečná pevnost a případně nízká hmotnost. Vyrábí se z oceli nebo hliníku.

2.1.2.2 Kalotový reproduktor

Princip kalotového reproduktoru je stejný jako klasického přímovyozařujícího, opět se jedná o elektrodynamický reproduktor, avšak je nepřímovyozařující. Reproduktor má vrchlíkovou membránu, která je opačně umístěná než u výše uvedeného. Membrána vyozařuje do krátkého vlnovodu. Před membránou může být umístěna fázová vsuvka, která srovnává fáze signálu vygenerovaného v různých místech membrány, zejména pak mezi vrškem a základnou membrány, taky zabraňuje, aby někdo zvidavostí poškodil kalotu promáčknutím. Vnitřek kaloty bývá vyplněn tlumícím materiálem, který zlepšuje tlumení membrány. Díky tvaru membrány a celkové konstrukci má toto provedení reproduktoru výborné směrové vlastnosti a malé zkreslení. Na výrobu kaloty se používají různé materiály, mají vliv na směrovost a výsledný zvuk, používá se papír, textilie, polymery, titan i hliník a další materiály. Koš bývá uzavřený, takže nezáleží na tom, do jaké ozvučnice bude osazen a není ovlivňován ostatními reproduktory. U výškových reproduktorů je však nutno dávat si pozor na ostré hrany, na kterých by mohlo docházet k difracím. Tento druh výškových reproduktorů se používá pro ozvučení bytových prostorů v Hi-Fi soustavách. Řez reproduktorem je na obr. 2, jedná se přímo o typ ARV360X, který je osazený ARS 1018 i ARS1054, pouze s odlišnou impedancí.

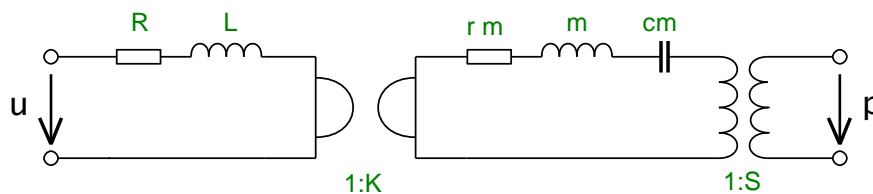


Konstrukční řešení vysokotónového reproduktoru: 1 fázový kompenzátor, 2 tlumící výplň, 3 membrána, 4 kmitací cívka, 5 zvukovod, 6 magnetický systém

Obr. 2 Řez reproduktorem ARV360X, převzato z [3]

2.1.3 Náhradní schéma

Na obrázku 3 je náhradní schéma dynamického reproduktoru, kde jsou patrné všechny tři oblasti měniče. Na elektrické straně je rezistor a induktor, to jsou vlastnosti kmitací cívky, zanedbávají se zde vířivé proudy, které ve výsledku způsobují to, že indukčnost a odpor se mění v závislosti na frekvenci. Převodníkem mezi mechanickou a elektrickou stranou je gyrátor, což je pouze teoretická součástka, která invertuje zapojení, pokud bychom tedy chtěli součástky za ním převést na elektrickou stranu, pak součástky zapojené sériově budou zapojeny paralelně a z kapacitorů se stanou induktory a naopak. Jeho převod je dále definován gyrační konstantou. Převod z mechanické na akustickou stranu je nahrazen pomocí ideálního transformátoru s převodem 1:S, kde S je stanoveno pomocí plochy membrány. Prvky na mechanické straně, jsou r_m , to je mechanický odpor ten říká, kolik energie se ztratí pohybem membrány, tedy tření hlavně pak v materiálu závěsu. Prvek m je inertor jehož vlastností je hmotnost tím se myslí hmotnost membrány včetně kmitací cívky. Poslední je c_m – elastor, který je určen poddajností závěsu.

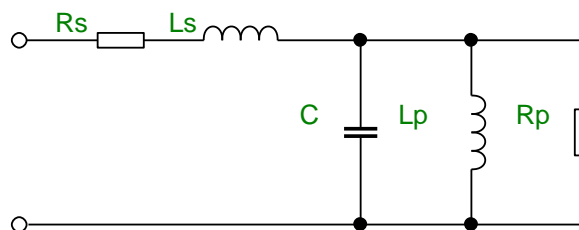


Obr. 3 Náhradní schéma reproduktoru

Když se náhradní schéma převede čistě na elektrickou stranu, dostaneme zjednodušené schéma, které je na obrázku 4 je zde vidět, jak přibližně bude vypadat impedanční charakteristika. Prvky R a L budou mít za následek, že impedance bude od nějaké frekvence růst a minimální hodnota impedance je dána odporem R . Prvky L_p , C_m a R_p odpovídají prvkům m , c_m a r_m převedeným z mechanické části přes gyrátor a tvoří paralelní rezonanční obvod, frekvence rezonančního obvodu se vypočítá pomocí Thompsonova vztahu:

$$f = \frac{1}{2 \cdot \pi \sqrt{C \cdot L_p}} \quad (4)$$

Rezistor R_p má vliv na jakost rezonančního obvodu, čím větší je, tím méně energie se na něm ztratí a tím ostřejší bude průběh rezonance. V místě rezonance membrána reproduktoru dosahuje největších výchylek, jestliže reproduktor není umístěn v ozvučnici a na jeho svorky je přiveden nominální výkon, může pak snadno dojít k jeho poškození, to platí hlavně u basových reproduktorů, kde je možnost poškození závěsu. U výškových reproduktorů tento problém nehrozí, avšak připojíme-li na svorky výškového reproduktoru signál s frekvencí okolo, nebo dokonce pod rezonančním kmitočtem, kde se tyto reproduktory nepoužívají, pak může dojít k poškození cívky, protože se bude nadměrně ohřívat vlivem protékajícího proudu, až dojde k jejímu spálení.



Obr. 4 Zjednodušené schéma reproduktoru převedené na elektrickou stranu

Impedance simulovaná podle obr. 4 může vypadat například jako na obrázku 5. K nalezení hodnot součástek existuje postup, který vychází ze změřené impedanční charakteristiky. Z průběhu impedance odečteme maximální absolutní hodnotu impedance v rezonanci a frekvenci rezonance. Jako další vypočteme hodnotu impedance podle vztahu:

$$R = \sqrt{R_{ss} \cdot Z} \quad (5)$$

Při této hodnotě impedance odečteme z průběhu frekvence z oblasti rezonančního vrcholu odpovídající této hodnotě, pojmenujeme je f_1, f_2 . Z maxima impedance Z a stejnosměrného odporu se vypočítá hodnota paralelního odporu:

$$R_p = Z - R_{ss} \quad (6)$$

Dále vypočteme pomocnou proměnnou:

$$r = \frac{Z}{R_s} \quad (7)$$

Z vypočtených a odečtených hodnot lze vypočítat činitele jakosti:

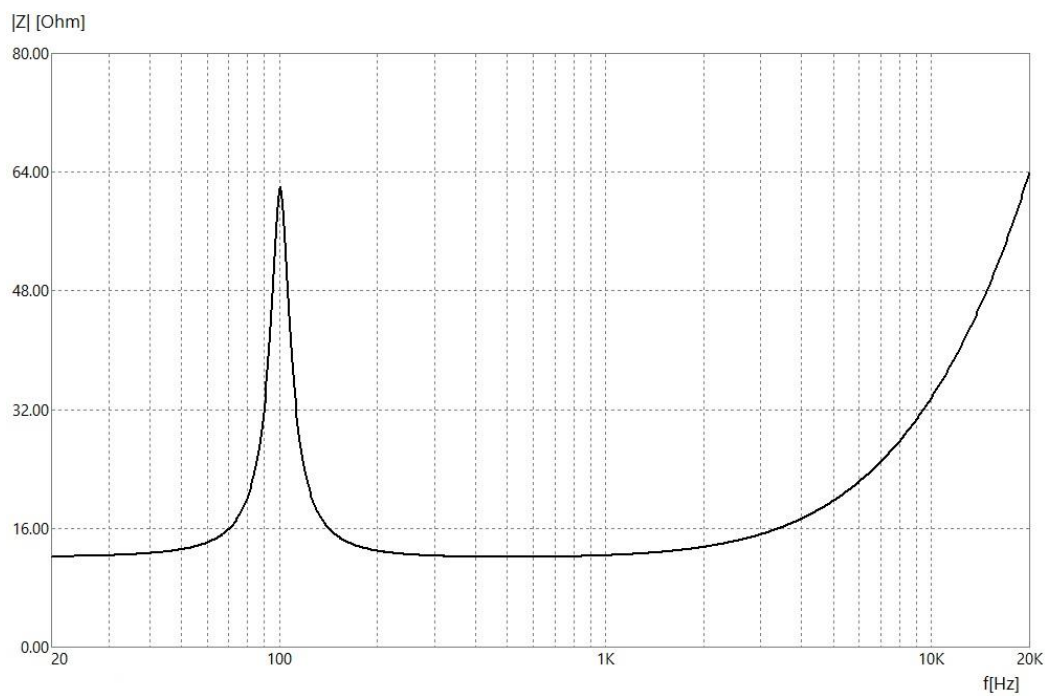
$$Q_{ms} = f_r \frac{\sqrt{r}}{f_2 - f_1}, \quad Q_{es} = \frac{Q_{ms}}{r - 1}, \quad Q_{ts} = \frac{Q_{ms}}{r} \quad (8)$$

Indexy jednotlivých činitelů znamenají: ms – mechanický, es – elektrický, ts – celkový.

Z činitelů jakosti je možné přímo vypočítat hodnoty paralelních prvků v náhradním obvodu ve vzorcích je ještě jedna pomocná proměnná R_{pp} a je to paralelní kombinace R_{ss} a R_p :

$$L_p = \frac{R_{pp}}{2\pi f_R Q_{ts}}, \quad C = \frac{Q_{ts}}{2\pi f_R R_{pp}} \quad (9)$$

Takto vypočtené hodnoty již lze dosadit do zjednodušeného náhradního schématu na obr. 4. Z takto nalezených hodnot je možné simulovat impedanční charakteristiku, která je na obr. 5. Rozdíl oproti skutečnému průběhu je způsoben zanedbáním vířivých proudů. Pomocí činitelů jakosti lze také porovnávat zejména basové reproduktory a jejich vhodnost například pro umístění v bassreflexové ozvučnici. Postup je převzat z [1]. Parametry lze také změřit pomocí softwaru dostupného pro PC, kde se využije výstup a vstup zvukové karty jako D/A a A/D převodník. Měření a výpočet činitelů jakosti se značně urychlí, zároveň programy většinou umožňují i pokročilé metody jako přidání hmotnosti na membránu, nebo uzavření reproduktoru do ozvučnice o známém objemu, tyto metody umožňují výpočet dalších parametrů, které pomohou s návrhem ozvučnice. Jeden z těchto programů je například ARTA [8], umožňuje i měření impulsní odezvy a spektrum. Pro měření impedance slouží podprogram LIMP, ve kterém lze například měřit i cívky a kondenzátory pro výhybky. Měření vyšších harmonických, tedy harmonické zkreslení lze změřit v podprogramu STEPS.



Obr. 5 Průběh impedance simulovaný podle zjednodušeného schématu reproduktoru

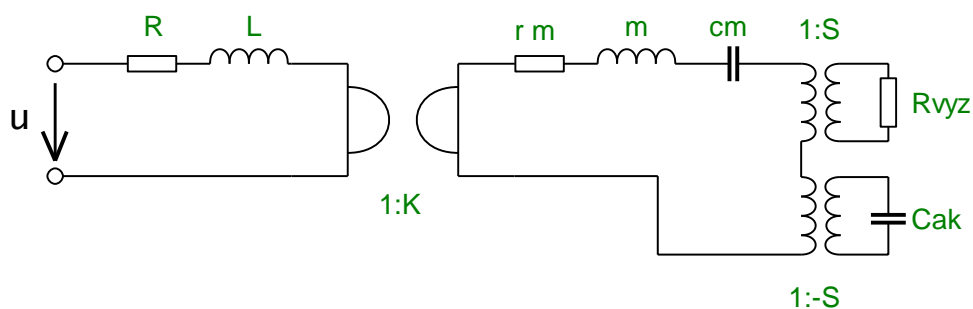
3. Druhy reproduktorových soustav

3.1 Dělení podle ozvučnice

Ozvučnice zamezuje akustickým zkratům, ke kterým by docházelo hlavně na nižších kmitočtech a samozřejmě poskytuje ozvučnice uchycení reproduktorů. Z teoretického hlediska je nejjednodušší ozvučnice typu nekonečné rozlehlé roviny, kde rovina zamezuje akustickému zkratu. Prakticky je to pochopitelně nerealizovatelné. Tento druh reprosoustav, pochopitelně s konečnou plochou volenou tak, aby při použití daného reproduktoru ke zkratům docházelo minimálně, se používal dříve, například v televizorech a rádiích, kde se používaly širokopásmové reproduktory a reproduktor byl tak součástí šasi zařízení a nejnižší frekvence vyzařená reproduktorem byla poměrně vysoká.

3.1.1 Uzavřená ozvučnice

Uzavřená ozvučnice je typ reprosoustavy kde se v uzavřeném a zatlumeném prostoru akustická vlna utlumí, z fyzikálního hlediska se přemění na teplo. Nevýhodou jsou změny tlaku uvnitř ozvučnice, které jsou větší, čím větší je plocha membrány a velikost výchylky membrány. Vždy jsou tedy omezeny nízké kmitočty při srovnání s nekonečně rozlehlou rovinou, pro minimalizaci tohoto efektu je nutné zvětšit objem, který má vliv na akustickou poddajnost. Náhradní schéma je na obrázku 6. Oproti samostatnému reproduktoru zde přibyl další transformátor, který má převodní konstantu s opačným znaménkem oproti přední membráně, která vyzařuje do R_{vyz} , tedy do impedance prostoru, ta je na obr. 3 zanedbána. Zadní membrána vyzařuje do uzavřené ozvučnice, která se nahrazuje akustickou poddajností. Po převedení na elektrickou stranu zjistíme, že rezonanční kmitočet se posunuje vždy k vyšším kmitočtům. Čím větší akustická poddajnost, která je přímo úměrná objemu ozvučnice, tím menší rezonanční kmitočet, nikdy však není menší než bez ozvučnice. Často se ozvučnice vyplňují tlumícím materiálem, který sice zmenší objem, ale zachovává se rezonanční kmitočet. Tlumení by podle [3] nemělo přesáhnout 30% objemu, protože pak představuje velký akustický prostor a dochází k nadkritickému tlumení rezonance reproduktoru, ale tlumení potlačuje vznik stojatých vln.



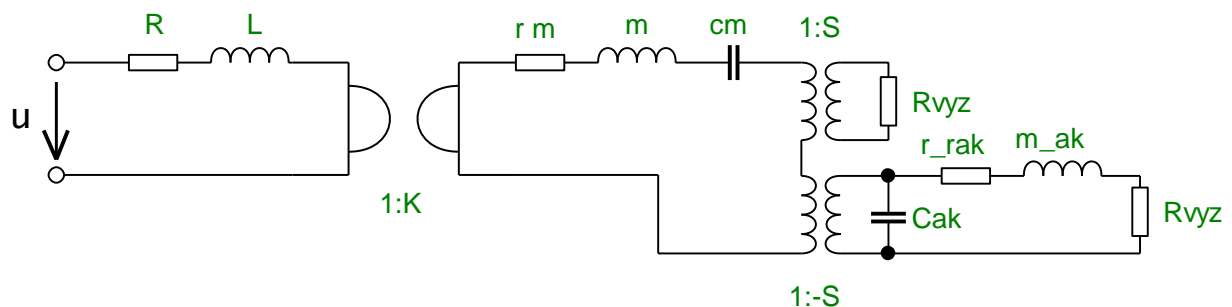
Obr. 6 Náhradní schéma reproduktoru v uzavřené ozvučnici

Výhodou je, že pokles pod rezonančním kmitočtem je 12 dB/dek. Dále se do ozvučnice nedostává prach, atd. A v neposlední řadě je jednodušší na návrh. Analýzu uzavřené ozvučnice lze nalézt na [11].

3.1.2 Bassreflex ozvučnice

Bassreflexová ozvučnice umožňuje oproti uzavřené ozvučnici menší objem pro stejný minimální kmitočet reproduktorové soustavy. Liší se tím, že součástí návrhu je bassreflexový nátrubek, který je vlastně vlnový rezonátor. Využívá se vlny vytvořené zadní stranou membrány, která se odrazí od zadní stěny ozvučnice, tím získá stejnou fázi jako vlna od přední strany membrány a tyto dvě vlny se ve výsledku sečtou. Oproti předchozím dvěma typům ozvučnic je tato efektivnější, ale při nesprávném zvolení rozměrů bassreflexu, může docházet k tomu, že se na amplitudové charakteristice reprosoustavy vytvoří hrb, který může při poslechu působit rušivě. Zároveň, jak už bylo zmíněno, strmost s jakou klesá amplitudová charakteristika pod dolním mezním kmitočtem, je větší, než u uzavřené ozvučnice a tedy i více slyšitelná. Její návrh je pracnější a v případě, že se s časem změní vlastnosti reproduktoru, tak se rozladí celá soustava. Náhradní schéma je na obrázku 7. Oproti uzavřené ozvučnici přibyl další vyzářovací odpor, který zvyšuje účinnost, kromě něj ještě r_{ak} a m_{ak} , což je odpor a hmotnost vzduchu v nátrubku. Tyto prvky způsobují to, že se na impedanční charakteristice objeví, kromě rezonančního kmitočtu ještě jeden menší vrchol toho rezonančního obvodu. Oproti uzavřené ozvučnici je pokles pod rezonančním kmitočtem 24 dB/okt. Analýzu bassreflexové ozvučnice je v [12].

Místo bassreflexového nátrubku se někdy používají pasivní zářiče, to jsou reproduktory bez elektrické části, tedy jen koš a membrána se závěsem. Nastavují se pomocí přídavné hmotnosti ke kmitací části. Oproti bassreflexovému nátrubku se na charakteristice neobjeví hrb. Avšak provedení je dražší a má menší účinnost.



Obr. 7 Náhradní schéma reproduktoru v ozvučnici typu bassreflex

3.2 Dělení podle pásem

Další časté dělení reprosoustav je podle počtu pásem. Odpovídá tomu, na kolik frekvenčních pásem rozdělíme užitečný signál před převedením na akustickou stranu. Nejjednodušším a asi nejběžnějším typem jsou jednopásmové reprosoustavy. Zde se signál nijak nedělí a všechny signál zpracovává jeden reproduktor, který je středový, případně širokopásmový. Jeden reproduktor však nemůže pokrýt celé slyšitelné spektrum, protože pro generování nízkých kmitočtů, je potřeba velké výchylky membrány s velkou plochou, taková membrána má velkou hmotnost. To při nízkých kmitočtech není tak kritické avšak u vysokých kmitočtů potřebujeme co největší rychlost membrány, tedy i nejmenší hmotnost. U jednopásmových reprosoustav, je výběr reproduktoru kompromis, dochází k frekvenčnímu omezení reprodukováného signálu a ke zkreslení na krajích pásma.

Dvoupásmové reprosoustavy jsou nejběžnější v oblasti Hi-Fi. O střední kmitočty se dělí výškový a basový případně středobasový reproduktor. Výhoda těchto reprosoustav oproti třípásmovým je to, že realizace je jednodušší, kvůli menšímu počtu reproduktorů a jednodušší výhybce, proto jsou jako komerční mnohem častější, ale jsou zde požadavky na kvalitní basový měnič.

Třípásmové reprosoustavy přidáním dalšího pásma se oddělí střední kmitočty. Na těchto kmitočtech je lidské ucho nejcitlivější jak na zkreslení, tak na nerovnost amplitudové charakteristiky, je to oblast přibližně 500Hz až 4kHz, jak vyplývá z křivek stejné hlasitosti. Na středotónové reproduktory je zároveň požadavek přibližně stejné výkonové zatížitelnosti jako na basové reproduktory, přitom basové reproduktory mají ve většině případů vyšší zatížitelnost, z toho vyplývá, že výkon třípásmové reprosoustavy je omezen právě výkonem středotónového reproduktoru a to je z hlediska levnějších komerčních produktů nežádoucí, protože v tomto segmentu se prodává hlavně výkon.

4. Výhybky

Výhybky slouží k rozdělení frekvenčního spektra signálu tak, aby každý reproduktor v dané reproduktorové soustavě měl na svém vstupu signál, který ho nepoškodí (to platí zejména pro výškové reproduktory) a zároveň signál, který dokáže nejlépe zpracovat a nedocházelo ke zkreslení reprodukce. Z hlediska celé reproduktorové soustavy se nejčastěji hodnotí amplitudová charakteristika, která by měla být v celém slyšitelném spektru konstantní.

Základní parametr výhybek je strmost, udává se v decibelech na dekádu, to znamená, o kolik decibel vzroste, respektive klesne, přenos na dvojnásobku, respektive polovině, vztažného kmitočtu. Pro ideální výhybku existuje několik požadavků, v nichž vyžadujeme takovou vzájemnou vlastnost jejich přenosových funkcí, aby výsledek byl konstantní. Funkce $H(j\omega)$ je přenosová funkce horní propusti a $L(j\omega)$ je přenosová funkce dolní propusti.

Podmínka konstantní amplitudy a fáze:

$$L(j\omega) + H(j\omega) = konst. \quad (10)$$

Říká, že amplituda i fáze akustického tlaku je konstantní.

Konstantní amplituda akustického tlaku:

$$|L(j\omega) + H(j\omega)| = konst. \quad (11)$$

Tato podmínka vychází z předchozí, ale vzhledem k tomu, že je v absolutní hodnotě, tak vynechává komplexní rovinu, tedy fázi. Výsledný tlak vytvořený ideálními reproduktory je přímo úměrný napětí, tedy změny tlaku jsou v celém frekvenčním spektru konstantní. Splňují ji všechny stupně výhybky typu Linkwitz-Riley a liché stupně Butterworth.

Konstantní zpoždění:

$$fáze(L(j\omega) + H(j\omega)) = konst. \quad (12)$$

Požadavek vychází také z (10) a říká, že zpoždění (fáze) má být konstantní. Nejjednodušší splnění této podmínky je pomocí FIR filtru, tedy filtru s konečnou impulzní odezvou, který se nejjednodušeji realizuje číslicově, tedy řešení vede na digitální zpracování signálu a to na aktivní výhybku. Tato podmínka se často ignoruje.

Konstantní celkový příkon:

$$|L(j\omega)|^2 + |H(j\omega)|^2 = konst. \quad (13)$$

Příkon dodávaný do reprosoustavy s výhybkou splňující tuto podmínku je konstantní. Podmínku splňují výhybky typu Butterworth.

4.1 Druhy výhybek

4.1.1 Aktivní

Aktivní výhybky na rozdíl od pasivních jsou sestaveny z RC filtrů a to zejména kvůli snazší realizaci, menším rozměrům a nižší ceně rezistorů oproti indukčnostem. Aktivní filtry jsou umístěny v nevýkonové signálové cestě tedy před výkonovým zesilovačem, takže ztráty na rezistorech se snadno korigují. Jako zesilovací a oddělovací prvek se používají operační zesilovače s nízkým šumem. V aktivním provedení je jednodušší realizace vyšších stupňů výhybek. Nevýhoda je potřeba samostatného výkonového zesilovače pro každé pásmo. Výhoda použití aktivních výhybek je zřejmá hlavně v segmentu ozvučování velkých prostorů - PA, kde je požadavek na vysoké výkony a cívky a kondenzátory by byly příliš rozměrné a drahé. Další výhodou je jednoduchá přeladitelnost. Další možností řešení aktivní výhybky je realizace na číslicové úrovni pomocí DSP procesorů je možné splnit i podmínku konstantního zpoždění, tedy filtr s konečnou impulzní odezvou – FIR.

4.1.2 Pasivní

Jsou umístěny za výkonovým zesilovačem, tedy výkon jde skrze ně. Proto se sestavují z LC článků, aby ztráty byly dány jen neideálnostmi cívek a kondenzátorů. Je proto nutné kondenzátory a cívky správně dimenzovat.

Cívky se dimenzují podle protékajícího proudu tak, aby nedošlo k poškození vodiče, jímž je navinuta, tedy podle jeho efektivní hodnoty. Proud můžeme určit podle známého vzorce:

$$I = \sqrt{\frac{P_{max}}{Z_{jm}}}$$

Průřez vodiče volíme podle proudové hustoty, která se pro cívku vinutou smaltovaným drátem pohybuje okolo $J = 3A/mm^2$, pak lze již jednoduše vypočítat minimální průřez vodiče.

$$S = \frac{I}{J}$$

Nejjednodušší určení počtu závitů je navinutí například 20 závitů, změření indukčnosti (např. pomocí programu LIMP [7]) a výpočtu indukčnosti na závit, kterou pak stačí vynásobit požadovanou indukčností. Namotanou cívku opět přeměříme. Pokud je příliš velká reálná část impedance, tedy špatný činitel jakosti, lze ji zmenšit větším průřezem vodiče, nebo navinutím na jádře s větší permeabilitou např. feritovém, kde stačí méně závitů, ale může dojít k přesycení jádra a zároveň je permeabilita teplotně a frekvenčně závislá. Cívky na jádře s velkou permeabilitou řeší problém cívek s velkou indukčností, které jsou velké. Většinou se však používají vzduchové cívky. V případě, že výhybka obsahuje více cívek, pak je nutné umístit tyto cívky tak, aby mezi nimi nebyla vzájemná indukčnost, nebo maximálně potlačená. Tedy umístit je dál od sebe a pootočené.

Nejvhodnější kondenzátory pro výhybky jsou fóliové, které se ve výhybkách používají, protože mají velkou stálost parametrů časovou, teplotní i frekvenční a nerozladí výhybku. Kromě kapacity se zaměřujeme na maximální provozní napětí kondenzátorů, to bývá často uvedeno jako maximální, nikoliv střední, nebo efektivní hodnota, proto je vždy lepší volit o něco vyšší hodnotu, než jakou jsme spočítali. Často se lze často setkat s bipolárními kondenzátory, které jsou podstatně levnější než fóliové,

ale jejich parametry se s časem výrazně zhoršují, zároveň mají horší ztrátový činitel a tím se ohřívají. V nejhorsších případech jsou osazeny i elektrolytické kondenzátory, které jsou naprosto nevhodné už jen z toho důvodu, že mají určenou polaritu.

4.2 Kompenzace reproduktoru

4.2.1 Kompenzace impedance reproduktoru

Jak bylo zmíněno v kapitole 2.3, impedance reproduktoru není konstantní. To může způsobit například, že výhybka 1. stupně pro basový reproduktor nemusí vůbec fungovat, protože se zde hodně projevuje rostoucí impedance kmitací cívky. Pokud využijeme výhybku druhého stupně, tak fungovat bude, ale měřením zjistíme, že dělicí kmitočet je oproti teoretickému výpočtu posunutý. V tu chvíli jsou dvě možnosti a to upravit hodnoty součástek tak, aby dělicí frekvence byla tam, kde požadujeme, tedy přepočítáváme hodnoty, dokud neodpovídají požadavku, počítáme hodnoty pro jiný dělicí kmitočet, dokud i s reálným reproduktorem nedosáhneme požadovaného výsledku.

Druhá možnost, pokud se nedaří nastavit ideální dělicí kmitočet, je kompenzovat impedanční charakteristiku reproduktoru. U basového měniče kompenzujeme vliv indukčnosti kmitací cívky, protože právě v té oblasti se nachází dělicí kmitočet. V případě výškového reproduktoru kompenzujeme oblast rezonance, kde by mohla výhybka mít nižší útlum a zároveň by mohlo dojít k poškození měniče. V případě třípásmové soustavy ještě středový reproduktor, který je vhodné kompenzovat v obou oblastech, zde se kompenzace jeví jako nevhodná, protože v případě, že všechny výhybky budou druhého stupně a nebude se provádět kompenzace citlivosti, tak se výhybka bude skládat z 18 součástek oproti 8, které jsou nutné pro samostatné výhybky, proto se většinou nekompenzují všechny reproduktory, ale jen ty kde je to nutné.

Při kompenzaci indukčnosti kmitací cívky, způsobují problém vířivé proudy, které mají za následek to, že indukčnost není s frekvencí konstantní. Tedy není možné přesně určit hodnoty součástek a jejich volba je kompromis, který je nutné ověřit měřením. Kompenzace se provádí sériovou kombinací rezistoru a kondenzátoru připojenou paralelně k svorkám reproduktoru. Výchozí hodnoty pro kompenzaci lze určit podle následujících vztahů z [2]:

$$C_k = \frac{L_s}{R_k^2}, R_k = 1,25 \cdot R_s \quad (14)$$

Rezonanční oblast je na kompenzaci jednodušší, protože výpočty fungují poměrně přesně. Nicméně stejně je nutné ověřit kompenzaci měřením. Rezonance reproduktoru je dána paralelní kombinací C , L_p a R_p z náhradního schématu, kompenzace se tedy provádí sériovým rezonančním obvodem R_k , C_k a L_k , připojeným paralelně k svorkám reproduktoru.

$$R_k = R_s \left(1 + \frac{R_s}{R_p} \right), C_k = \frac{L_p}{R_s^2}, L_k = C_p \cdot R_s^2 \quad (15)$$

4.2.2 Kompenzace citlivosti reproduktoru

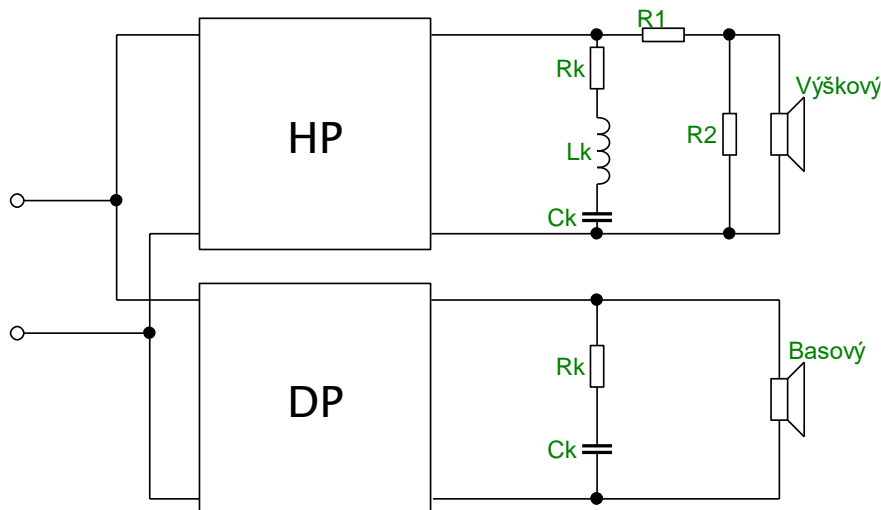
Reproduktory většinou nemají stejnou citlivost, to je způsobeno konstrukcí reproduktorů. Nestejná citlivost má za následek schod na frekvenční charakteristice, ten je pochopitelně nežádoucí. Nejmenší citlivost mají ve většině případů basové měniče a hlavně ty s gumovým závěsem. Středové a výškové měniče mají vyšší účinnost. Možností řešení toho problému je několik, například TESLA ve svých 4Ω soustavách někdy používala 8Ω výškový reproduktor a 4Ω basový tím se výškový reproduktor utlumil o 3dB. Nejjednodušším způsobem je do série s reproduktorem vřazený rezistor. Sofistikovanější řešení je napěťový dělič, který má výhodu v tom, že zároveň částečně linearizuje impedanční charakteristiku. Odvození vztahu vychází z dvou podmínek, aby napětí na reproduktoru bylo správně zmenšeno a aby impedance děliče včetně reproduktoru byla shodná s nominální. Tedy:

$$\text{Útlum} = 20 \log \frac{U_i}{U_r}, R_{nom} = R_1 + R_2 || R_r \quad (16)$$

Z toho lze snadno odvodit výsledné vztahy, přičemž odpor reproduktoru a nominální odpor můžeme prohlásit za stejné:

$$R_1 = R_{nom} - R_{nom} \cdot 10^{-\frac{\text{útlum}}{20}}, R_2 = -\frac{R_1 \cdot R_{nom} - R_{nom}^2}{R_1} \quad (17)$$

Všechny komponenty se zapojují v posloupnosti, jak je na obr. 8.



Obr. 8 Schéma zapojení výhybek a kompenzací

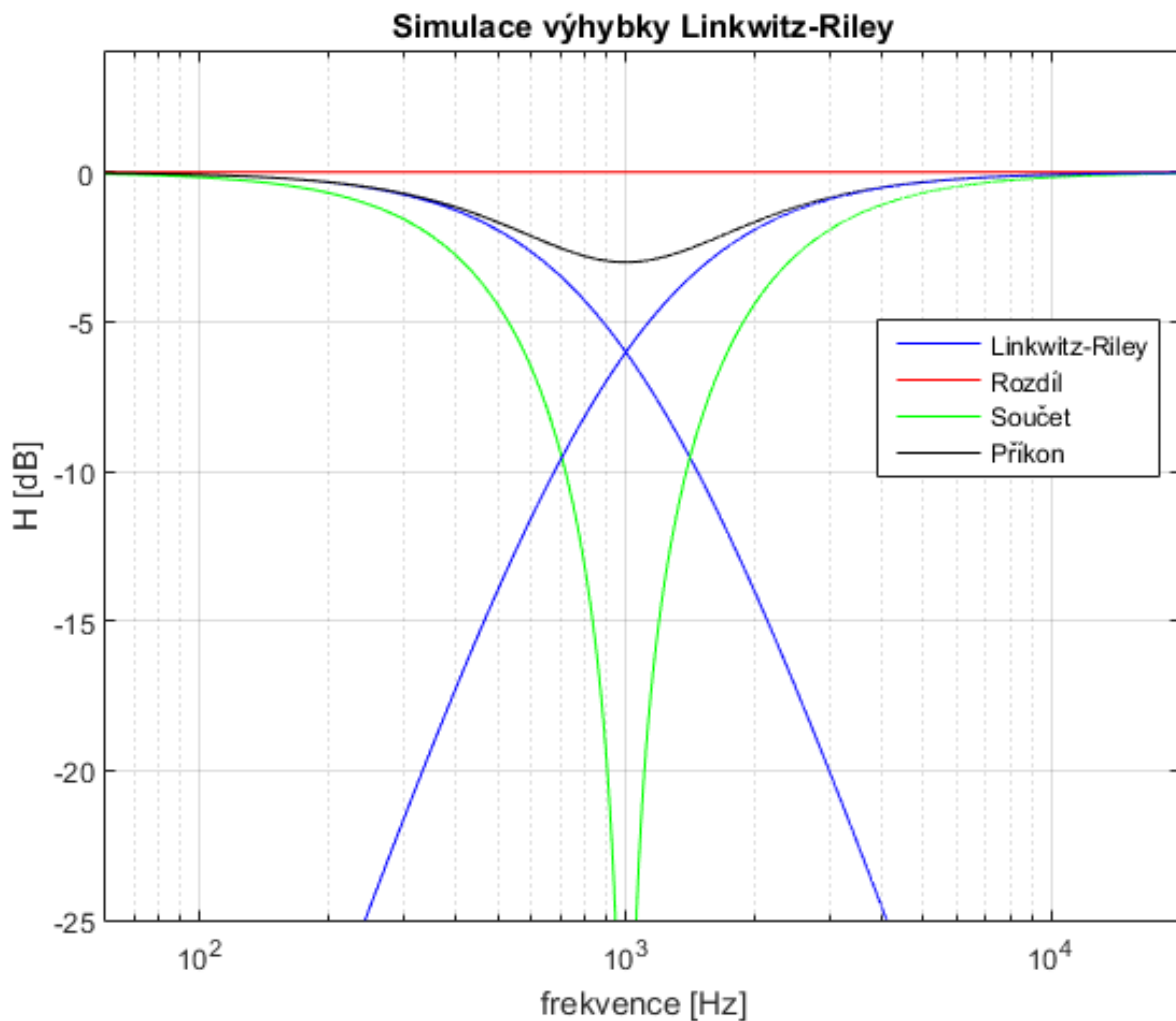
4.3 Aproximace výhybek

4.3.1 Výhybka typu Linkwitz-Riley

Jak již bylo zmíněno, tato výhybka v případě všech stupňů splňuje podmínku konstantní amplitudy, takže jsou-li dělicí kmitočty zvoleny shodně, pak je přenos roven jedné, proto se v angličtině nazývají jako „*all pass*“ filtry. Na obrázku 9 je simulace výhybky Linkwitz-Riley druhého stupně. Přenosová funkce filtru druhého stupně je:

$$DP(f) = \frac{1}{1 + j\frac{f}{Q \cdot f_0} + \left(\frac{f}{f_0}\right)^2}, HP(f) = -\frac{\left(\frac{f}{f_0}\right)^2}{1 + j\frac{f}{Q \cdot f_0} - \left(\frac{f}{f_0}\right)^2} \quad (18)$$

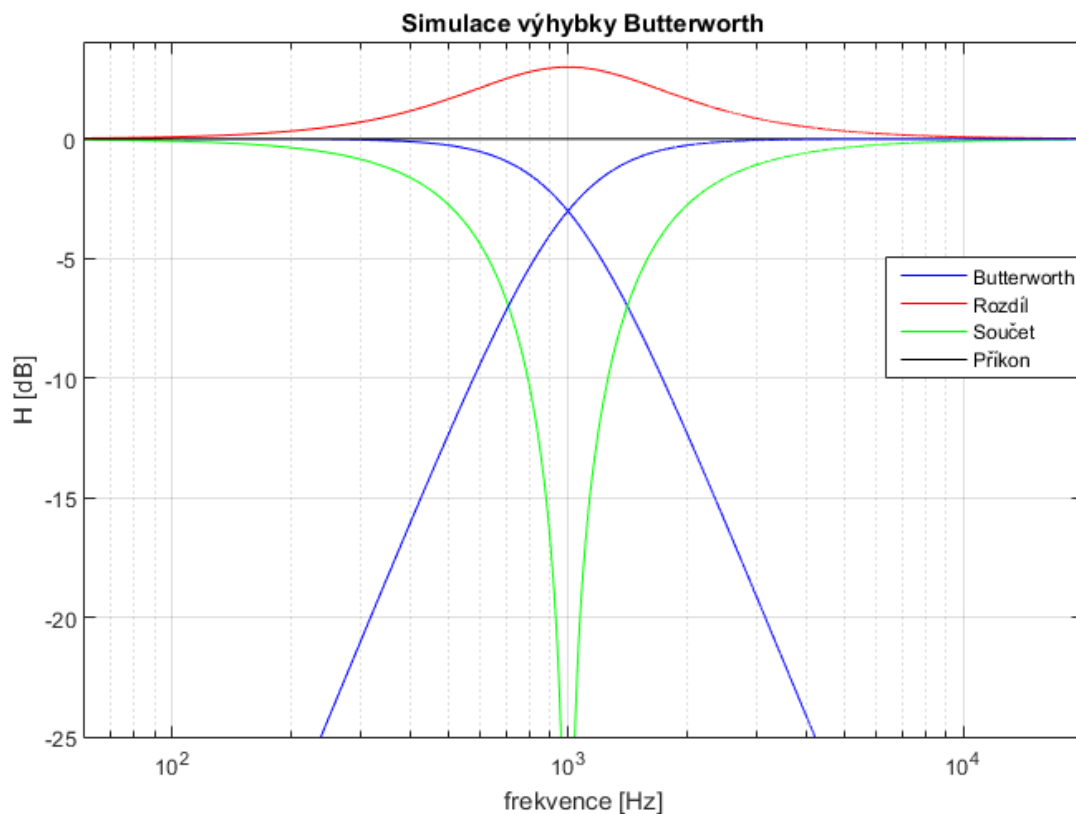
Kde Q je činitel jakosti, pro Linkwitz-Riley je $Q = 0,5$. Pro simulaci byla dělicí frekvence zvolena jako $f_0 = 1000\text{Hz}$. Lze všimnout toho, že součet přenosových funkcí ve výsledku na dělicí frekvenci způsobí velký a ostrý pokles, ale rozdíl má výsledek konstantní. To znamená, že při samotné realizaci je důležité jeden z reproduktorů přepólovat. Příkon reproduktorů na grafu vykazuje pokles o 3dB na dělicím kmitočtu. Popsané typy aproximací výhybek lze nalézt na stránkách S. Linkwitz [10].



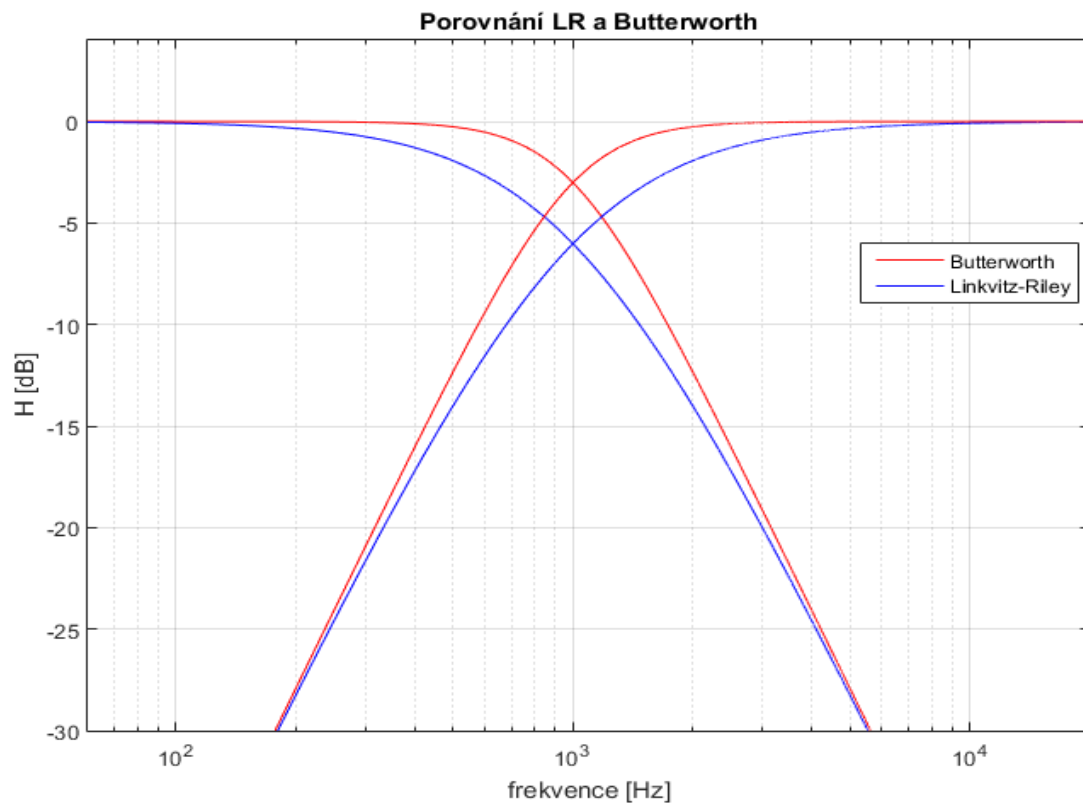
Obr. 9 Simulace průběhu výhybky typu Linkwitz-Riley

4.3.2 Výhybka typu Butterworth

Tato výhybka splňuje podmínku konstantního příkonu a zároveň v případě lichých stupňů i podmínku konstantní amplitudy. Přenosová funkce je stejná jako pro Linkwitz-Riley, tedy rovnice (18), ale $Q = \frac{1}{\sqrt{2}}$. Při pohledu na simulaci této výhybky na obr. 10 je patrné, že podmínka konstantního příkonu je opravdu splněna. Amplituda v případě součtu opět vykazuje propad, tak jako u typu Linkwitz-Riley, ale při rozdílu je v místě dělicího kmitočtu převýšení o 3dB. Tento typ výhybky je také nazýván v anglicky psané literatuře jako „*maximally flat*“, tedy maximálně plochý. Porovnání je na obr. 11. Výhybka typu Butterworth má útlum na dělicím kmitočtu 3dB, oproti tomu typ Linkwitz-Riley má 6dB, to platí bez ohledu na stupeň výhybky.

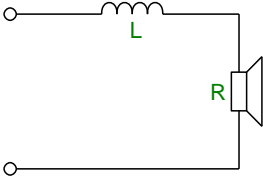
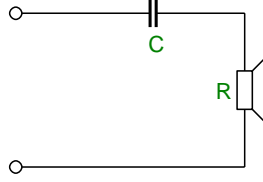
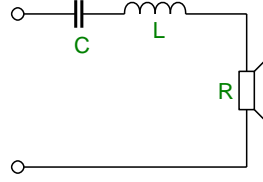
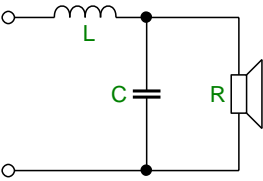
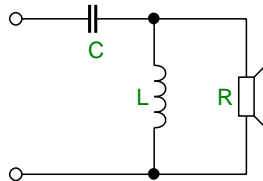
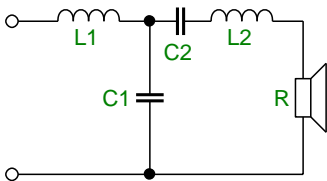
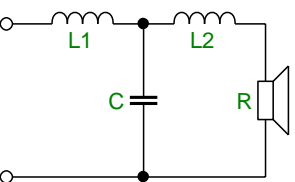
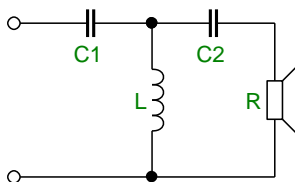
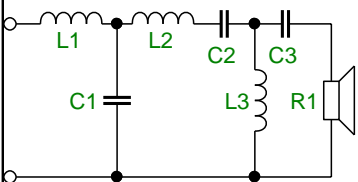


Obr. 10 Simulace průběhu výhybky typu Butterworth



Obr. 11 Porovnání výhybek Linkwitz-Riley a Butterworth

Konkrétní vzorce pro výpočet součástek výhybky a schémata zapojení výhybek jsou v následující tabulce 1. Možných jiných aproximací je mnoho více jich lze nalézt v [6].

Výhybky 1.řádu		
Dolní propust	Horní propust	Pásmová propust
 $L = \frac{Z}{2\pi f_d}$	 $C = \frac{1}{2\pi f_h Z}$	 $C = \frac{1}{2\pi f_d Z}, L = \frac{Z}{2\pi f_h}$
Výhybky 2.řádu		
Dolní propust	Horní propust	Pásmová propust
		
$L = \frac{Z}{2\pi f Q}, C = \frac{Q}{2\pi f Z}, BW Q = \frac{1}{\sqrt{2}}, L - R Q = \frac{1}{2}$		
Výhybky 3.řádu		
Dolní propust	Horní propust	Pásmová propust
		
$L_1 = \frac{3R_d}{4\pi f_d}, C = \frac{2}{3\pi f_d R_d}$ $L_2 = \frac{R_d}{4\pi f_d}$	$C_1 = \frac{1}{3\pi f_h R_h}, L = \frac{3R_h}{8\pi f_h}$ $C_2 = \frac{1}{\pi f_h R_h}$	

Tabulka 1 Přehled zapojení výhybek a příslušné vztahy pro výpočet součástek

4.4 Postup návrhu výhybky

Návrh výhybky probíhá až jako poslední fáze při stavbě reprosoustavy. Aby bylo možné se rozhodnout pro dělicí kmitočty, je nutné změřit reproduktory osazené v ozvučnici, ve které budou provozovány. Reprodukory rovněž musí být „zahořelé“, to znamená, že musí mít za sebou několik hodin provozu, tím se ustálí parametry, například poddajnost závěsu membrány. Jestliže máme osazenou reprobrednu reproduktory, tak změříme amplitudovou a impedanční charakteristiku.

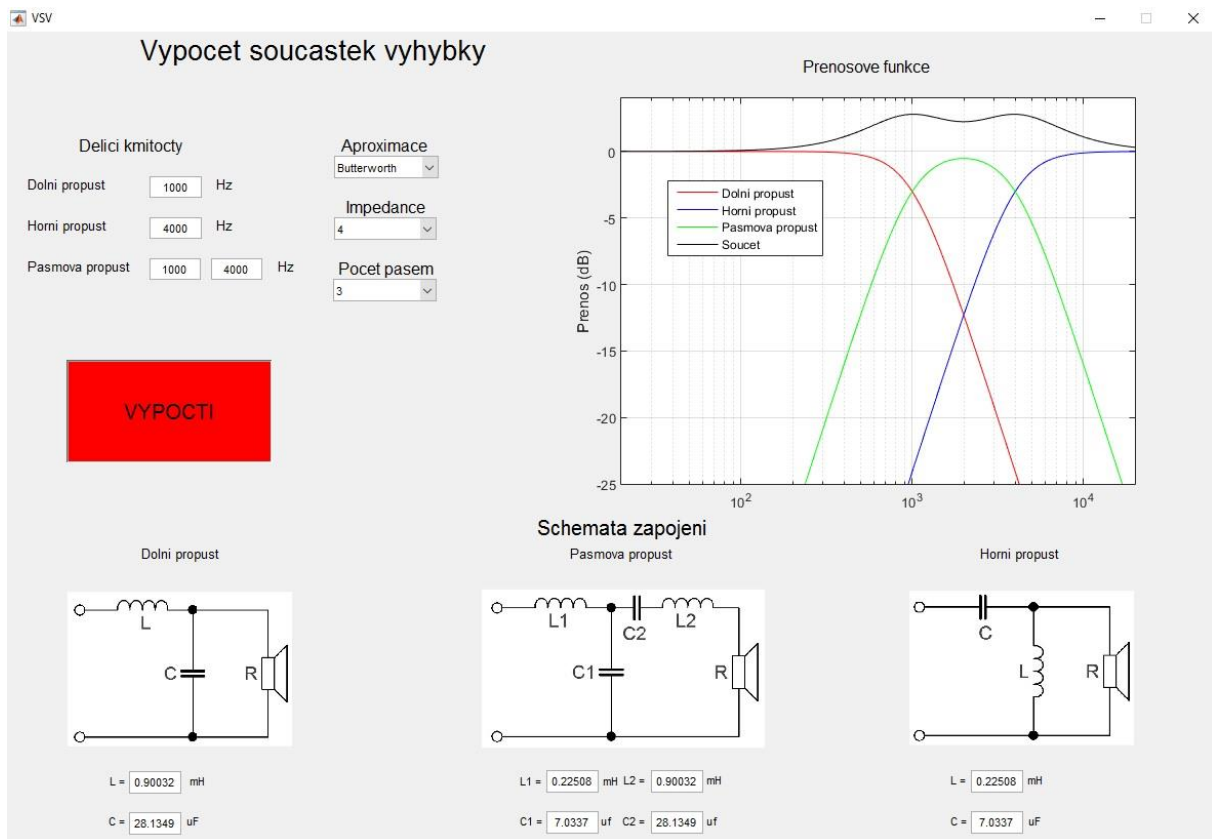
Dále se rozhodneme, jestli je nutné provést kompenzaci impedance u některého z reproduktorů, případně jestli se některý reproduktor musí utlumit. Provedeme a měřením ověříme, jestli jsme kroky, pro které jsme se rozhodli, provedli správně, tedy jestli jsou správně zvolené součástky, atd. Dalším krokem je návrh samotných výhybek. Dělicí kmitočty určíme z amplitudové charakteristiky měničů, ve které může ještě být vyneseny vyšší harmonické, tedy harmonické zkreslení měniče, u výškových reproduktorů je vhodné zohlednit i impedanční charakteristiku, pak určíme strmost výhybek, jak u dělicího kmitočtu, tak u strmosti je nutné zohlednit doporučení výrobce.

Nyní máme určené dělicí kmitočty a rozhodneme se pro aproximaci, výše jsou uvedeny Likwitz-Riley a Butterworth, vzorečky a zapojení jsou v tabulce 1. Vypočítáme hodnoty, zaokrouhlíme k řadám součástek, případně přesný kondenzátor složíme a u cívky přimotáme (odmotáme) několik závitů. Sestavíme výhybku a ověříme její funkci měřením. V případě, že dělicí kmitočty je nižší (vyšší) než plánovaný, pak hodnotu součástek vypočítáme pro vyšší (nižší) frekvenci. Celý postup opakujeme, dokud výhybka není správně naladěna.

4.5 Program pro výpočet výhybky v prostředí MATLAB

Pro zrychlení výpočtu součástek výhybky pro laboratorní úlohu jsem vytvořil dva programy v prostředí MATLAB, které jsou vzájemně inverzní. Jeden z nich umožní výpočet samotných součástek výhybky druhého stupně. Vstupními parametry jsou dělicí kmitočty, počet pásem, výběr činitele jakosti (aproximace) a impedance. S impedancí se počítá, že je čistě reálná a frekvenčně nezávislá. Výpočet součástek je založen na vzorcích (18), vzhledem k tomu, že pásmová propust je tvořena kaskádním zapojením dolní a horní propusti, tak její přenosová funkce je rovna součinu přenosových funkcí dolní a horní propusti. Kromě vypočtených součástek program zároveň zobrazí přenosové funkce včetně jejich součtu a zobrazí zapojení výhybek. Při zvolení počtu pásem (2 nebo 3) se zobrazí, případně zmizí části z grafického rozhraní, aby nezpůsobovaly zmatky. Náhled grafického rozhraní je na obr. 12.

Druhý program slouží k výpočtu přenosové funkce z vybraných součástek. Hodnoty součástek jsou vstupní parametry, další jsou impedance a počet pásem. Kromě přenosových funkcí a jejich součtu program vypočte jednotlivé činitele jakosti a dělicí frekvence pro pokles o 6 dB.



Obr. 12 Grafické rozhraní programu pro výpočet součástek výhybky

5. Reproduktorová soustava

5.1 ARS1018

Reproduktorová soustava od výrobce TESLA. Jedná se o dvoupásmovou reposoustavu se jmenovitou impedancí 8Ω . Je zhotovena z dřevotřísky, na které je lamino. Reproduktry jsou kryty rámečkem s průzvučnou tkaninou, který lze jednoduše sejmout. Jedná se o uzavřenou ozvučnici o rozměrech $360 \times 250 \times 215$ mm a s objemem 12l, v ozvučnici je textilní tlumení. Výrobce udává frekvenční rozsah 40 – 20000Hz a citlivost 84dB, trvalý maximální příkon reposoustavy je 20VA, špičkový hudební je pak 60VA. Část informací je z výrobního štítku a zbytek z [7].

Basový reproduktor osazený v reposoustavě je ARN5608, jedná se o basový elektrodynamický reproduktor s gumovým závěsem a papírovou membránou. Materiál magnetu je ferit. Maximální trvalý příkon je 15W. Udávaná citlivost je 88dB a vlastní rezonance 35Hz. Kmitočtový rozsah 40 – 4000Hz. Informace z [7]

Výškový reproduktor je elektrodynamický kalotový ARV3608. Magnet je také zhotoven z feritu. Maximální trvalý příkon je 10W a udávaná citlivost 89dB. Rezonanční kmitočet 1200Hz a kmitočtový rozsah 2000 – 20000Hz, výrobce udává, že nejnižší dělicí kmitočet má být právě 2000Hz a strmost 12dB/dek. Řez reproduktorem je na obrázku 2. Informace jsou z datového listu, který se nachází na [7]

Výrobce vhodně zvolil reproduktory do soustavy, protože citlivosti jsou podobné a zároveň frekvenční charakteristiky se překrývají. Původní navržená výhybka je druhého stupně. Hodnoty součástek původní výhybky pro dolní propust jsou $L = 2,2mH$ a $C = 8,8\mu F$, horní propust pak $L = 0,48mH$ a $C = 4\mu F$. Dělicí frekvence pro impedanci 8Ω vycházejí 1100Hz a 2700Hz, to je více než oktáva, což by mohlo znamenat propad v amplitudové charakteristice.

5.2 ARS1054

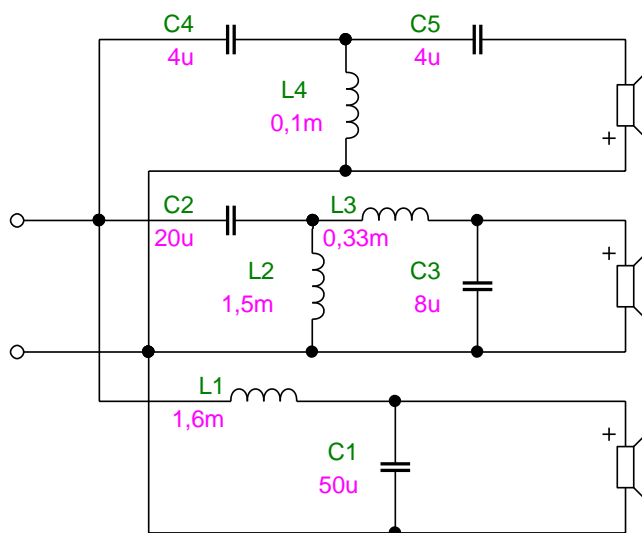
Výrobce reposoustavy je TESLA, jedná se o třípásmovou reposoustavu se jmenovitou impedancí 4Ω . Ozvučnice je vyrobena ze dřevotřísky a opatřena laminem. Reproduktry jsou také chráněny rámečkem s průzvučnou tkaninou, který lze snadno sejmout. Ozvučnice je uzavřená s rozměry $680 \times 400 \times 318$ mm, objem je 50l, v ozvučnici je textilní tlumení. Výrobce udávaný rozsah je 26-20000Hz s charakteristickou citlivostí 88dB. Udávaný příkon je 40W špičkový hudební příkon 120W.

ARN 8604 je basový reproduktor s papírovou membránou uchycenou na gumovém závěsu. Udávaný rezonanční kmitočet 20Hz (max 28Hz) a kmitočtový rozsah 35-1000Hz. Magnet je vyroben z feritu. Maximální příkon je 30W a citlivost 89dB.

Středový reproduktor je ARS4604 s papírovým závěsem i membránou. Rezonanční kmitočet je udávaný okolo 250Hz a kmitočtový rozsah 500-4000Hz. Maximální trvalý příkon je 20W, citlivost 89dB a impedance 4Ω . Magnet je vyroben z feritu. Zadní stěna reproduktoru je uzavřena v plastové nádobě, která ho izoluje od zbytku reposoustavy a nemusí tak být ozvučnice rozdělena, aby nedocházelo ke vzájemnému ovlivňování reproduktorů.

Výškový reproduktor je použit ARV3604, který je totožný s jako v ARS1018, liší se pouze impedancí, která je 4Ω .

Původní výhybka je na obrázku 13. Výrobce použil pro dolní a pásmovou propust výhybku druhého stupně a pro horní propust výhybku třetího stupně, zřejmě kvůli ochraně výškového reproduktoru. Pro reálnou impedanci 4Ω je dělicí kmitočet dolní propusti 600Hz , pásmové propusti 1000Hz až 3500Hz pro horní propust je to 5000Hz . Činitel jakosti odpovídá přibližně aproximaci Butterworth, kromě horní propusti, která má mírný překmit nad 0 dB před dělicím kmitočtem, tedy činitel jakosti je přes 1.



Obr. 13 Zapojení originální výhybky reprosoustavy ARS1054

6. Přípravek

6.1 Realizované přípravy

První realizovaný přípravek byl určený pro dvoupásmovou ARS1018, obsahoval tři možnosti nastavení výhybek druhého stupně, s dělicími kmitočty nastavenými 1,2kHz a 4kHz, 2,1kHz a 3,1kHz, 2,1kHz a 2,6kHz. Obsahoval tedy původní výhybku od výrobce a výhybky s dělicími kmitočty určenými tak, aby mezi jednotlivými pásmy vznikl propad, který je dobře slyšitelný. Cívky byly umístěny uvnitř konstrukční krabíčky, na které bylo přidělané nepájivé pole, kde byly umístěny fóliové kondenzátory. Všechny tyto komponenty byly spojeny pomocí drátků. Ovládání se provádělo jediným otočným přepínačem, což neumožňovalo volnost nastavení, zároveň propojení pomocí drátků se často přerušovalo, navíc na přípravku nebyly žádné popisky.

Druhý přípravek určený pro třípásmovou ARS1054 měl již součástky připájené k desce plošných spojů, dělicí kmitočty se volily samostatně pro každé pásmo, tedy volnost již byla větší a zároveň i spolehlivost. Na přípravku byly napsány přímo dělicí kmitočty pro reálnou zátěž podle aproximace LR. Kondenzátory byly bipolární.

6.2 Úpravy přípravku

Úkolem bylo vytvořit jeden univerzální přípravek. Přípravek určený pro třípásmovou reprosoustavu byl umístěn v masivním boxu, proto jsem se rozhodl přestavět tento tak, aby byl univerzálnější. Původní plošné spoje byly příliš rozměrné a celkově byly navrženy neefektivně, což mě následně vedlo k jejich přepracování. Zároveň jsem se rozhodl zvýšit volnost nastavení tím, že každá součástka se bude volit samostatným otočným přepínačem, tím odpadly duplicitní součástky, které byly v jednotlivých sekcích, a jejich přesunutím do jiných se zvýšila možnost nastavení dělicího kmitočtu. Součástky jsou vždy propojeny tak, aby tvořily filtr 2. stupně, případně lze odpojením součástky, tedy nastavením otočného přepínače do krajní polohy, vytvořit filtr 1. stupně, to však neplatí pro pásmovou propust.

Po sepsání všech demontovaných součástek jsem zjistil přebytek některých cívek, které měly stejnou hodnotu, a proto jsem rozhodl pro přimotání a odmotání několika závitů, aby mohl být výběr indukčnosti plynulejší. Měření indukčností jsem prováděl pomocí programu ARTA, resp. jeho podprogramu LIMP [8].

Po rozhodnutí se, jak bude zapojení vypadat, jsem navrhnul desky plošných spojů v programu EAGLE [9]. Na plošné spoje jsem umístil nejdřív jen otočné přepínače a kondenzátory, pro možnost budoucího rozšíření jsem předpřipravil, vždy alespoň dvě místa pro další kondenzátory. Cuprexit pro horní a dolní propust jsem volil o rozměrech 160x100mm a pro pásmovou propust 200x100. Volnou plochu plošných spojů jsem vyplnil cívkami, na tři plošné spoje je vtěsnáno 11 cívek, zbytek cívek je přišroubovaný pomocí vrutů k šasi a plošným spojením jsou spojeny pomocí drátů. Na rozšíření o další cívky jsou na plošném spoji připraveny pájecí plošky určené pro další vodiče k cívkám. Všechny cívky jsou navíc přilepeny pomocí tavné pistole, aby nedošlo k jejich odtržení. Cívek mimo plošný spoj je 10, aby nevznikl z propojovacích vodičů jeden velký uzel, jsou opatřeny polyethylovou spirálovou bužirkou, kterou jsou opatřeny i vodiče, které vedou k vstupním a výstupním svorkám. Návrhy plošných spojů a schémata zapojení jsou v příloze obr. D-I.

Fotografie hotového přípravku jsou v příloze obrázky A-C.

6.3 Vlastnosti přípravku

Rozsah nastavení dělicích frekvencí se pohybují v rozsazích, které jsou uvedeny v tabulce 2. Činitel jakosti je nastavitelný v široké škále.

Rozsahy dělicích kmitočtů pro zátěž 4Ω				Pro 8Ω	
DP (Hz)	450		1000		2000
PP (Hz)	450	1000	2200	5000	
HP (Hz)	2000		6000		4000

Tabulka 2 Rozsahy kmitočtů přípravku

Hodnoty součástek, které lze v jednotlivých sekcích zvolit jsou v tabulce 3.

DP		PP				HP	
L (mH)	C (μF)	L ₁ (mH)	C ₁ (μF)	L ₂ (mH)	C ₂ (μF)	L (mH)	C (μF)
1	3,3	0,25	4,7	1,5	20	0,25	3,3
1,3	6,8	0,33	6	1,8	33	0,33	4
1,5	8,2	0,39	6,8	2,2	47	0,39	4,7
1,8	20	0,56	10	2,7	53	0,48	6
2,2	22					0,52	6,8
2,7	25					0,56	8,2
	33					0,64	10
	47						

Tabulka 3 Hodnoty součástek osazených v jednotlivých sekcích přípravku

Hodnoty součástek se otočným přepínačem volí od nejmenší po největší, přičemž poslední pozice je vždy nezapojená, je tak možné nastavit i výhybku prvního stupně (6db/dek).

6.4 Měření

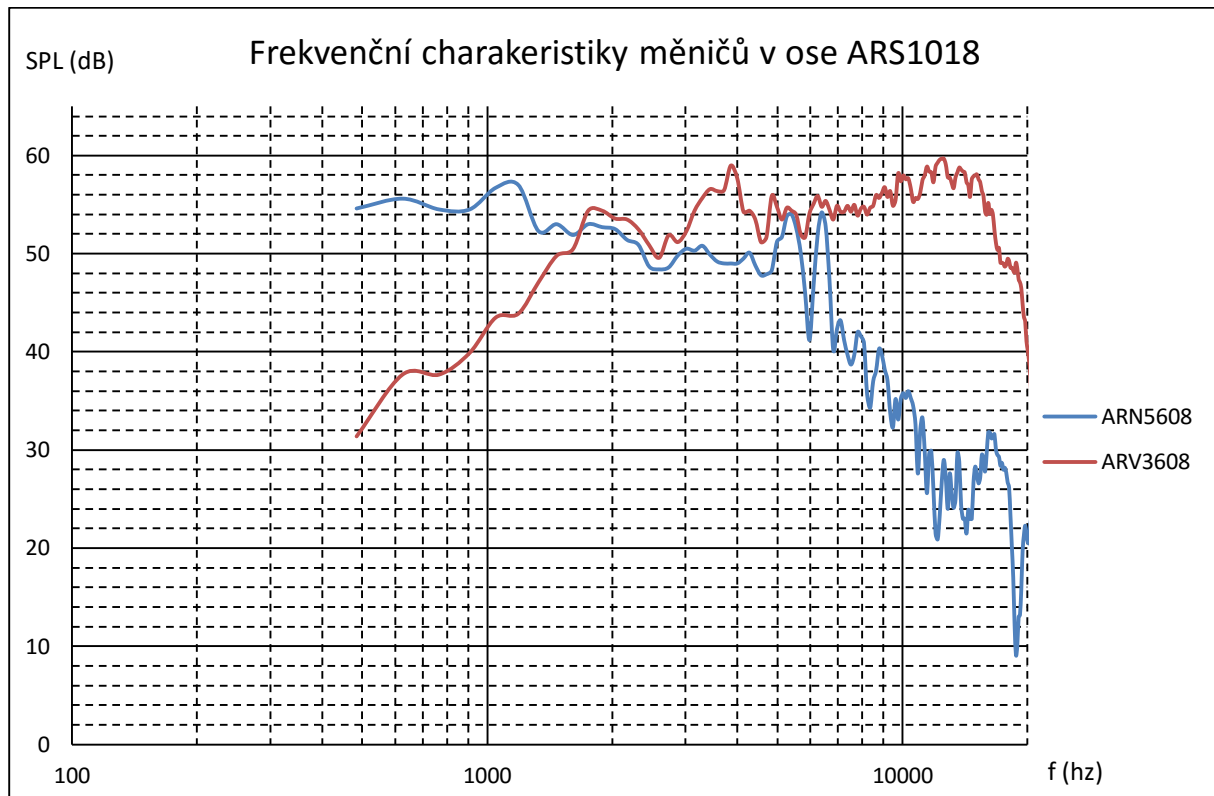
Měření bylo provedeno pomocí stejné sady přístrojů, které budou k dispozici při měření úlohy, tedy reproduktorové soustavy, generátor NTI Minirator, spektrální analyzátor NTI XL2, PC, zesilovač a vyrobený přípravek. Amplitudové charakteristiky byly měřeny ve vzdálenosti 50cm v ose reproduktorové soustavy. Místnost, kde měření probíhalo, nebyla bezodrazová a pronikal do ní okolní šum. Jako zdroj signálu sloužil NTI Minirator a budící signál bílý šum. Mezi zdrojem signálu a reproduktorovou soustavou, nebo přípravkem byl připojen ještě audio zesilovač, neboť maximální výstupní úroveň Miniratoru je příliš nízká. Na zesilovači jsem nastavil takové zesílení, aby byl odstup měřeného signálu od okolního pronikajícího šumu dostatečný.

Nevýhodu měření spektra pomocí NTI XL2 je to, že v režimu FFT nepoužívá logaritmickou frekvenční osu a jednotlivé vzorky jsou rozděleny ekvidistantně, to je patrné i z následujících grafů, které jsou z přístroje exportovány, pro rozsah 484.38 Hz - 20.453 kHz analyzátor vypočte 143 vzorků ve vzdálenosti 140,62 Hz. Možnost jak to obejít je přepnutí rozsahu na 58 Hz - 1,722 kHz a změřit tak spektrum „*na dvakrát*“, nebo výběr možnosti Real Time Analyzer, kdy se na displeji objeví bargrafy s krokem 1/3 oktávy v rozsahu 6,3Hz až 20kHz.

6.4.1 ARS1018

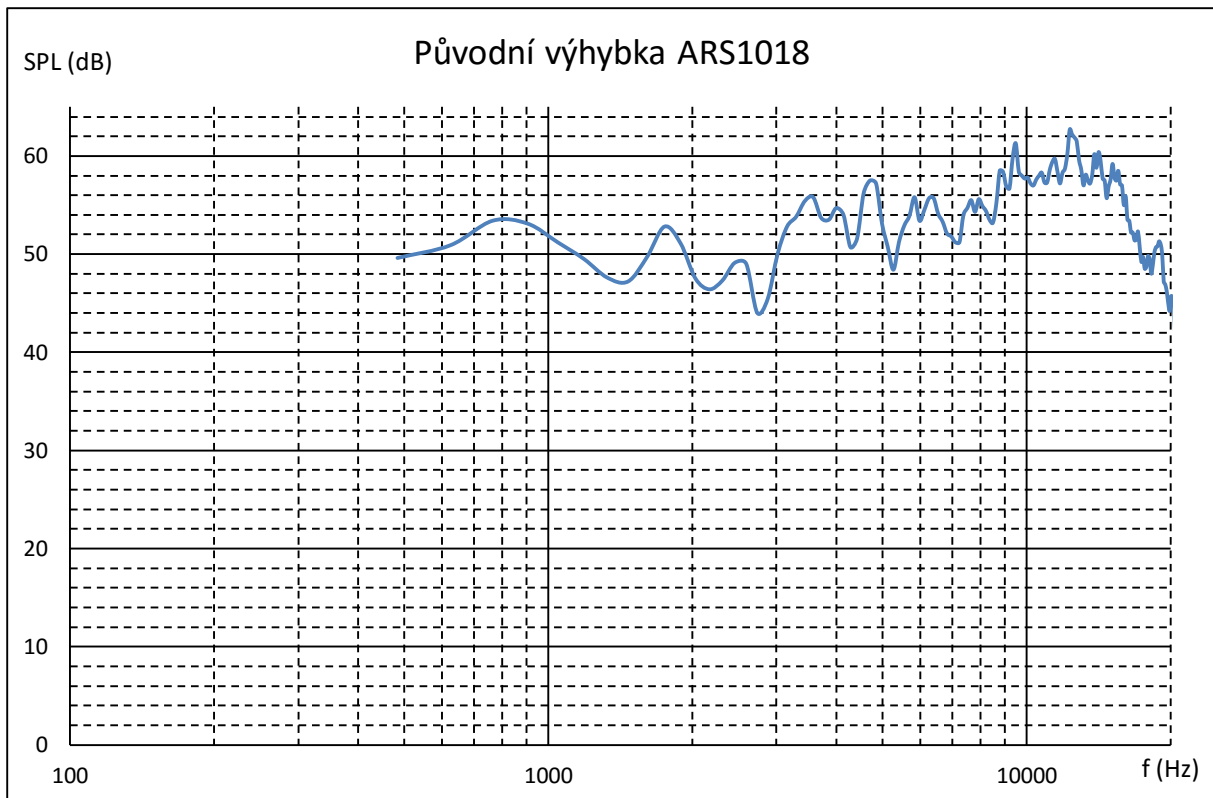
Na obrázku 14 jsou amplitudové charakteristiky obou měničů osazených v reprosoustavě ARS1018. Basový měnič ARN5608 má použitelné pásmo až do 4-5kHz, výrobce udává 4kHz, takže tento parametr odpovídá, dále už je charakteristika velmi zvlněná a klesá.

Kalotový výškový reproduktor ARV3608 je použitelný od 2kHz, což je zároveň doporučený dělicí kmitočet udávaný výrobcem. Okolo 16kHz začíná charakteristika strmě padat dolů, výrobce udává jmenovitý kmitočtový rozsah až 18kHz, takže je zde mírný rozdíl.



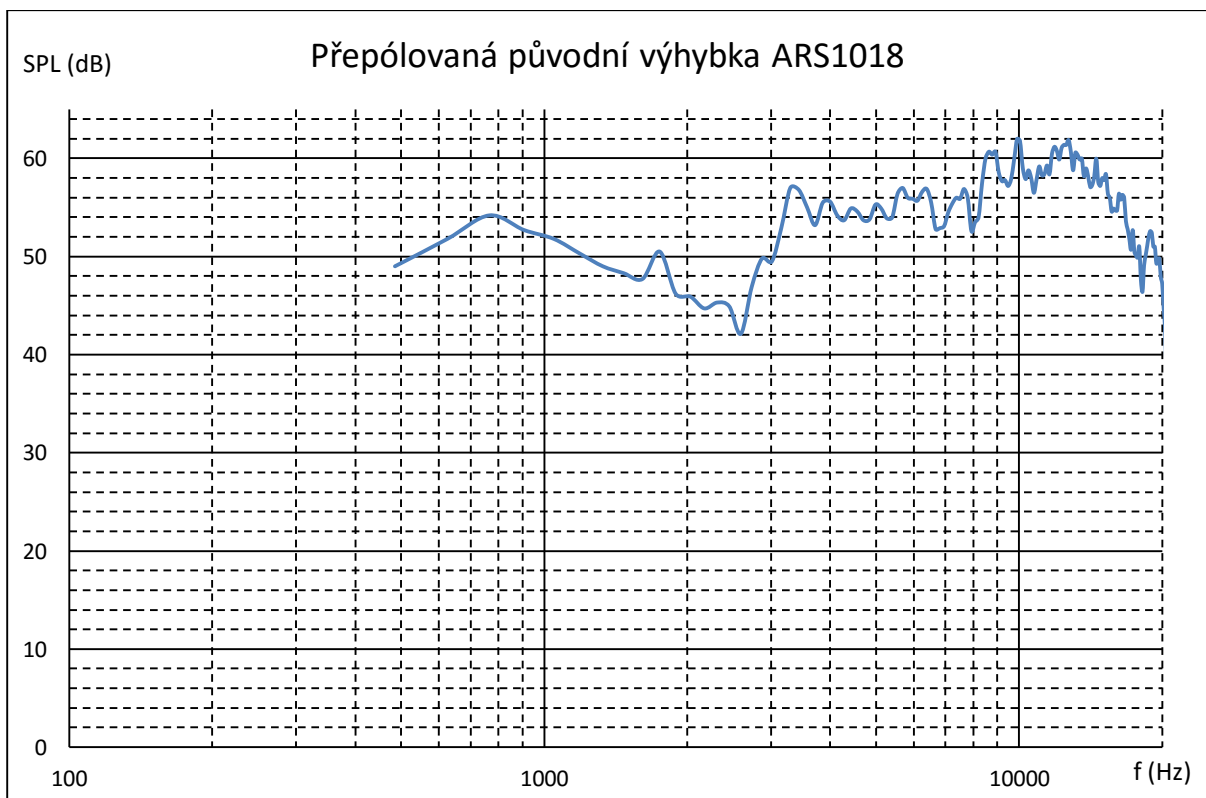
Obr. 14 Amplitudové charakteristiky měničů reprosoustavy ARS1018

Amplitudová charakteristika s nastavením originální výhybky je na obrázku 15, jak bylo zmíněno v kapitole 5.1, na amplitudové charakteristice se opravdu objevil propad, vzhledem k tomu, že se jedná o originální výhybku, která byla demontována z ozvučnice, pak lze předpokládat, že výrobce osadil výhybku špatnými součástkami.



Obr. 15 Amplitudová charakteristika ARS1018 s nastavením původní výhybky

Zapojením obou reproduktorů stejně se situace, podle očekávání, ještě značně zhoršila, jak je vidět na obrázku 16.



Obr. 16 Amplitudová charakteristika ARS1018 s nastavením původní přepólované výhybky

Po posunutí dělicího kmitočtu basového reproduktoru na frekvenci přibližně 2,4kHz se amplitudová charakteristika srovnala, viz obr. 17.



Obr. 17 Amplitudová charakteristika ARS1018 s nastavením upravené původní výhybky

V tabulce 4 jsou hodnoty součástek výhybky použitých v jednotlivých měření.

	DP		HP	
	L (mH)	C (μF)	L (mH)	C (μF)
Původní	2,2	8,8	0,48	4
Obr. 17	1	6,8	0,48	4

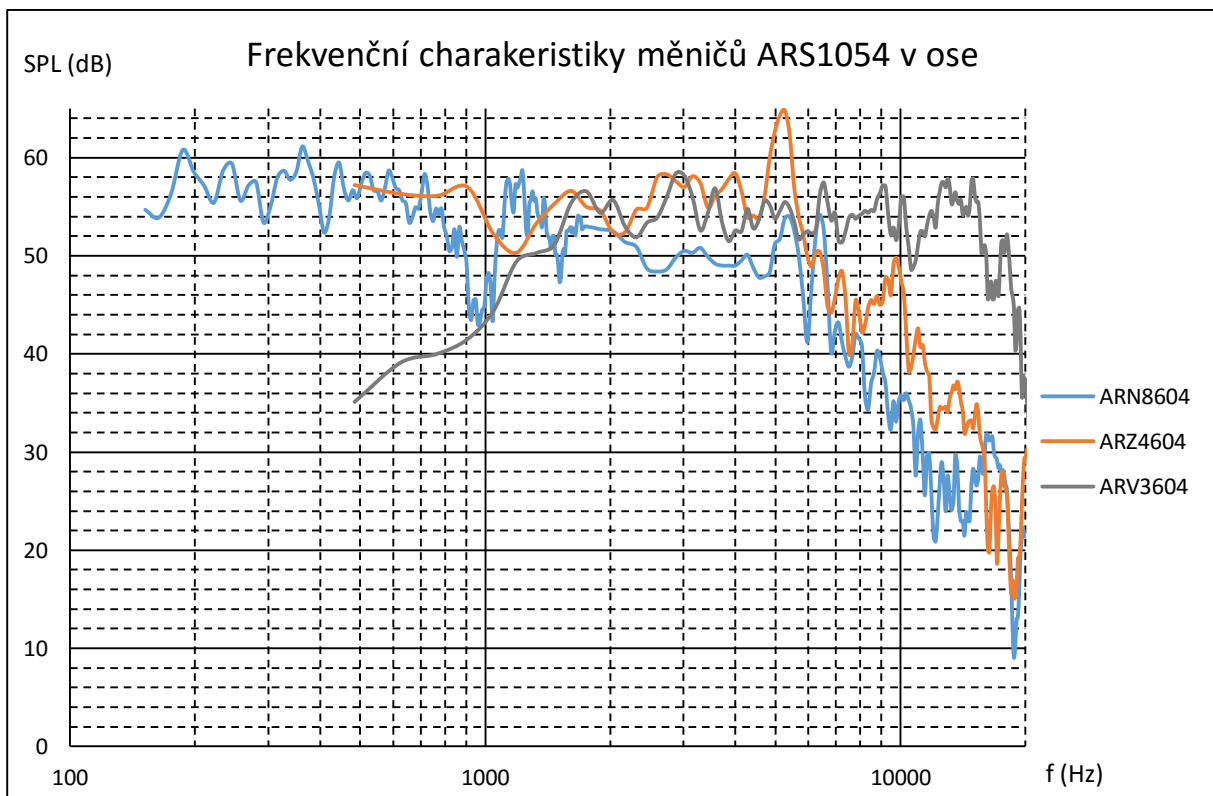
Tabulka 4 Hodnoty součástek pro změřené nastavení výhybky pro reprosoustavu ARS1018

6.4.2 ARS1054

Na obr. 18 jsou charakteristiky samostatných reproduktorů. Basový měnič ARN8604 má kmitočtový rozsah zhruba do 1kHz, kde je poměrně velký propad o zhruba 4dB. Výrobce udává rozsah do 1kHz, což odpovídá. Ve srovnání s reproduktorem ARN5608 na obr. 14 není vhodný do dvoupásmové reprosoustavy vzhledem k malému frekvenčnímu rozsahu.

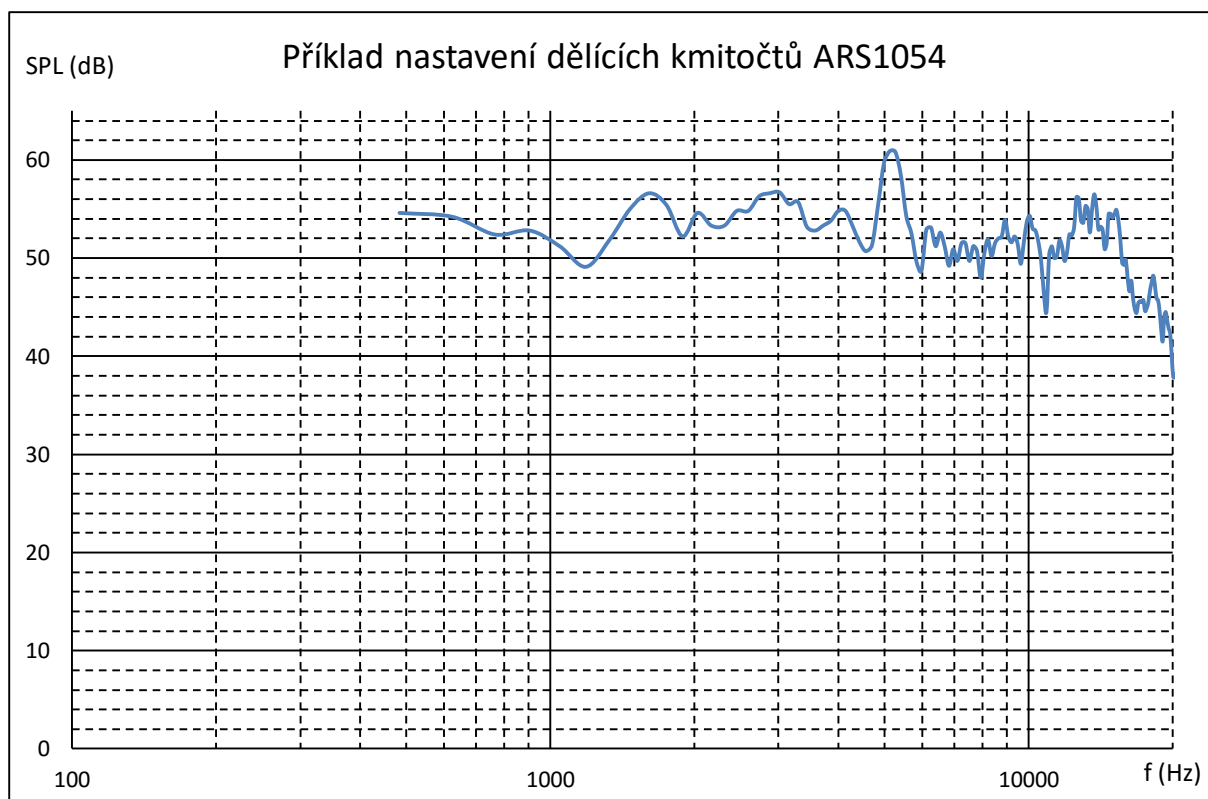
Středotónový reproduktor ARZ4604 má, podle naměřených hodnot, rozsah zhruba od 500Hz do 4kHz, za kterými se nachází výrazné převýšení a následný strmý pokles. S tím je nutno počítat při volbě dělicího kmitočtu, aby to bylo dostatečně potlačeno. Výrobce udává rozsah 500Hz až 4kHz, takže opět odpovídá.

Kalotový výškový reproduktor ARV3604 je použitelný od 2kHz, což je doporučený dělicí kmitočet udávaný výrobcem. Okolo 16kHz začíná charakteristika strmě padat dolů, výrobce udává jmenovitý kmitočtový rozsah až 18kHz, takže je zde mírný rozdíl.



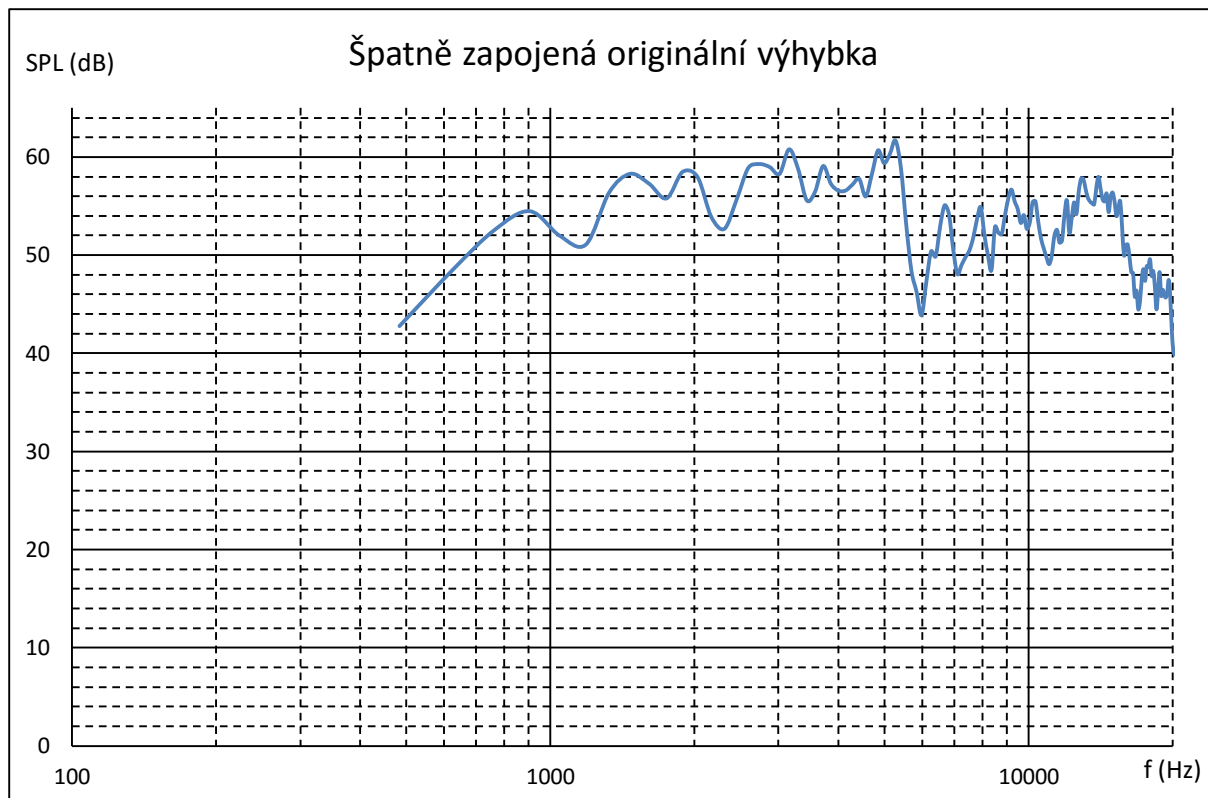
Obr. 18 Amplitudové charakteristiky měničů reprosoustavy ARS1054

Na obr. 19 je příklad, jak může vypadat frekvenční charakteristika, když studenti vypočítají součástky pro dělicí kmitočty 800Hz a 3kHz a neprovedou korekci dělicích kmitočtů. Z obrázku je patrné, že dělicí kmitočty neodpovídají. Za 1kHz se objevuje propad způsobený rozchodem dělicích kmitočtů dolní a pásmové propusti. V oblasti okolo 4kHz se projevuje převýšení středotónového reproduktoru, které je patrné i na obrázku 18 a není zde patrný vliv výškového reproduktoru, tedy dělicí kmitočtů se pohybuje okolo 6kHz. Je tedy nutné provést korekci, kterou je posunutí horního dělicího kmitočtu pásmové i horní propusti níže a upravit přechod mezi basovým a středotónovým reproduktorem.



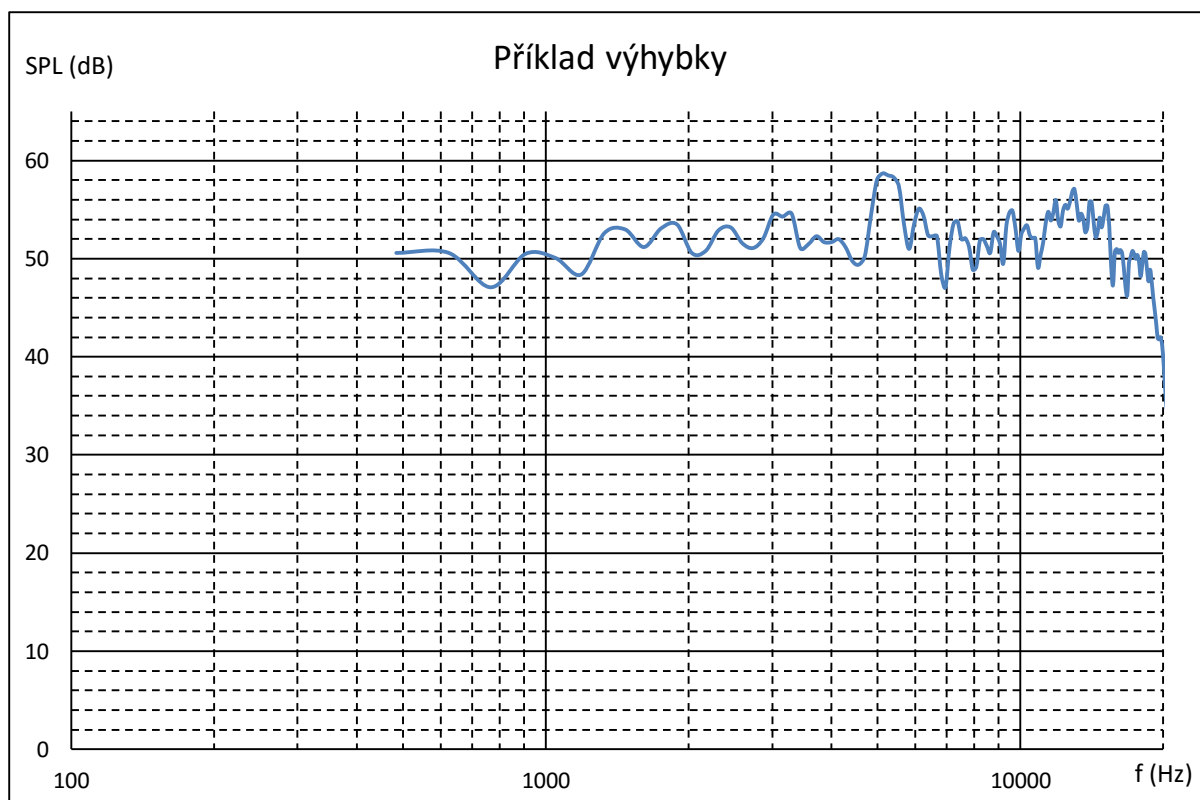
Obr. 19 Amplitudová charakteristika ARS1054, nastavení dělicích kmitočtů podle vzorců na 800Hz a 3kHz

Na obrázku 20 je nastavení výhybky shodné s výrobcem s tím rozdílem, že horní propust je druhého stupně. Avšak všechny reproduktory jsou zapojeny stejně, tedy středový reproduktor není přepólovaný. To má za následek, že se na dělicích kmitočtech místo součtu příspěvků reproduktorů objevuje rozdíl a s ním i výrazné propady na amplitudové charakteristice.



Obr. 20 Amplitudová charakteristika ARS1054, nastavení původní výhybky, špatně připojené reproduktory

Na obrázku 21. je výhybka, kde je posunutý dělicí kmitočet dolní propusti na 500Hz a kmitočet pásmové propusti je nastaven na 1kHz, tím se tento přechod trochu srovnal. Kmitočty horní a pásmové propusti jsou posunuty blíže k sobě a charakteristika opět trochu srovnala.



Obr. 21 Amplitudová charakteristika ARS1054, příklad jinak zvolené výhybky

Součástky, které byly v jednotlivých měření zvoleny, jsou v tabulce 5.

	DP		HP		PP			
	L (mH)	C (μ F)	L (mH)	C (μ F)	L1 (mH)	C1 (μ F)	L2 (mH)	C2 (μ F)
Obr.teo	1	33	0,25	4	0,33	10	1,5	33
Obr. Prep	1,5	47	0,25	6	0,33	6,8	1,5	20
Obr. Mujs	2,7	47	0,25	4,7	0,26	10	1,5	20

Tabulka 5 Hodnoty součástek pro změněné nastavení výhybky pro reposoustavu ARS1054

6.5 Testovací signál

Nejvhodnější pro subjektivní testování jsou zejména skladby, které subjekt dobře zná, protože ví, co by měl slyšet a pozná propady, případně převýšení na celkové amplitudové charakteristice.

Další možností je signál s konstantní amplitudou a jednou frekvenční složkou, jejíž frekvence se postupně zvyšuje, případně snižuje. Pro takové subjektivní hodnocení jsem vytvořil program v prostředí MATLAB, kde jsou vstupními parametry počáteční a koncová frekvence a čas rozmítání. Výstup je pak rovnou odeslán na zvukovou kartu.

Pro objektivní měření budou mít studenti spektrální analyzátor, pomocí kterého budou moci měřit jak amplitudové charakteristiky samotných reproduktorů, aby se rozhodli pro dělicí kmitočty, tak výslednou amplitudovou charakteristiku se zapojenou výhybkou. Pro buzení je vhodné použít bílý šum a na spektrálním analyzátoru nastavit průměrování s dostatečným počtem vzorků, aby vykreslená charakteristika byla neměnná.

7. Návod k měření

Měření jsem směřoval tak, aby si student odnesl základní přehled o reproduktorových výhybkách a sám slyšel, co může špatně nastavená výhybka způsobit a proč je nutné jim věnovat pozornost. Dalším bodem je, subjektivní hodnocení výhybky a následné porovnání s objektivním měřením pomocí spektrálního analyzátoru.

7.1 Samotný návod

Měření na reproduktorových výhybkách

Cíl měření

Vyzkoušet teoretický návrh součástek výhybky druhého stupně, zhodnocení na reálné reprosoustavě a následné odladění výhybky. Srovnání subjektivního hodnocení s objektivním.

Vybavení:

PC

Přenosný audio spektrální analyzátor s mikrofonem – NTI audio XL2

Přenosný audio generátor – NTI Audio MR Pro Minirator

Měřicí přípravek

Zesilovač

Reprosoustavy - ARS1018, ARS1054

Teoretický rozbor:

Výhybky slouží k rozdělení frekvenčního spektra signálu tak, aby každý reproduktor v dané reproduktorové soustavě měl na svém vstupu signál, který ho nepoškodí (to platí zejména pro výškové reproduktory) a zároveň signál, který dokáže nejlépe zpracovat a nedocházelo ke zkreslení reprodukce. Z hlediska celé reproduktorové soustavy se nejčastěji hodnotí amplitudová charakteristika, která by měla být v celém slyšitelném spektru konstantní.

Návrh výhybky se provádí až ve finálním stádiu, tedy ozvučnice je osazená a ztlumená příslušným materiálem. Reproduktory by měly být zahřelé, to znamená, že reproduktor byl několik hodin v provozu, tím se zmenší a ustálí tuhost membrány, zejména u basových a středobasových reproduktorů, které mají velkou výchylku membrány.

Pasivní výhybky se realizují pomocí LC filtrů zpravidla 1 až 3 stupně. LC filtry se používají, protože oproti RC filtrům mají podstatně menší ztráty, které jsou dány pouze nedokonalostí cívek a kondenzátorů, tedy jejich činiteli jakosti. Stupeň filtru přímo odpovídá počtu použitých součástek (výjimkou je pásmová propust, kde je potřeba dvojnásobek součástek). S počtem použitých součástek souvisí i to proč se výhybky vyšších stupňů u pasivních výhybek nerealizují, jednak protože by zabíraly mnoho prostoru a ladění výhybky (změny dělicího kmitočtu) by bylo náročnější. Výhybky vyšších řádů jsou zároveň náročnější na toleranci součástek. Základní parametr filtru je strmota a u výhybek se udává v dB/okt (6dB/okt odpovídá 20dB/dek), to znamená, že na každé oktávě, to je dvojnásobek nebo polovina vztažného kmitočtu, je útlum daný počtem decibelů. Například dolní propust druhého stupně se strmostí 12dB/okt a mezním kmitočtem 1kHz bude mít útlum na 2kHz 12dB a na 4kHz je útlum 24dB. Stupeň filtru odpovídá i strmosti daného filtru a ta je dána 6-stupně. Porovnání 1. 2. a 3. stupně je na obr. 1. Při zapojování výhybky je nutné počítat ještě s fází, jinak by se na výsledné charakteristice objevil ostrý propad, jako na obrázku 2, kde je součet přenosových funkcí. Pro výhybku 2. stupně stačí přepólovat jeden reproduktor. Pro třípásmovou reprosoustavu je to středový reproduktor.

Z hlediska činitele jakosti (Q) se používají pro svoje vlastnosti hlavně dva typy (aproximace) filtrů a to Butterworth ($Q = 1/\sqrt{2}$), také nazývaný jako filtr s maximálně plochou amplitudovou charakteristikou, a typ Linkwitz-Riley ($Q = 0,5$). Aproximace jsou na obr. 2. Obě tyto výhybky splňují

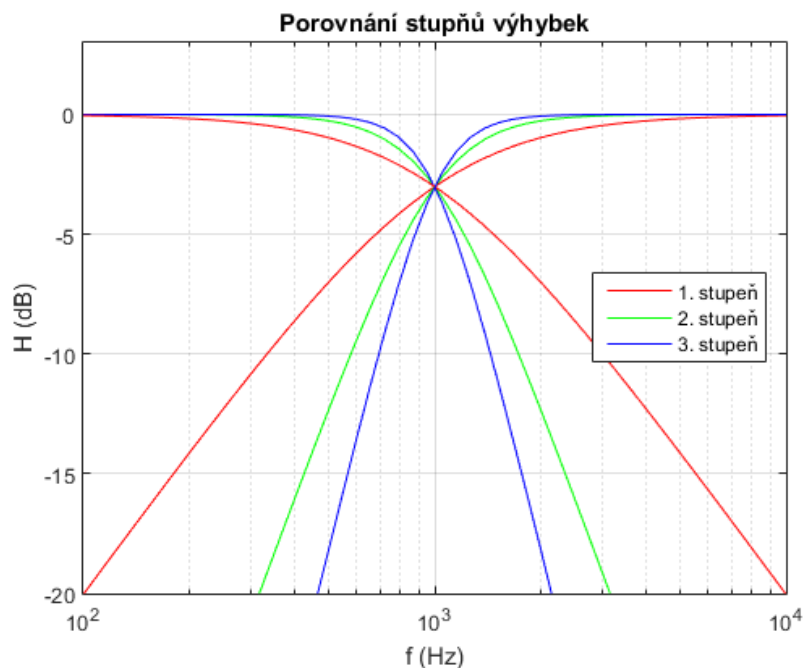
různé požadavky na ideální výhybku. Zatímco Butterworth splňuje podmínku konstantního příkonu, to znamená, že příkon dodávaný do reprosoustavy je v celém frekvenčním spektru konstantní, tedy součet druhých mocnin dílčích přenosových funkcí je 1 (0dB), tak je to v rovnici (1).

$$|L(j\omega)|^2 + |H(j\omega)|^2 = konst. \quad (1)$$

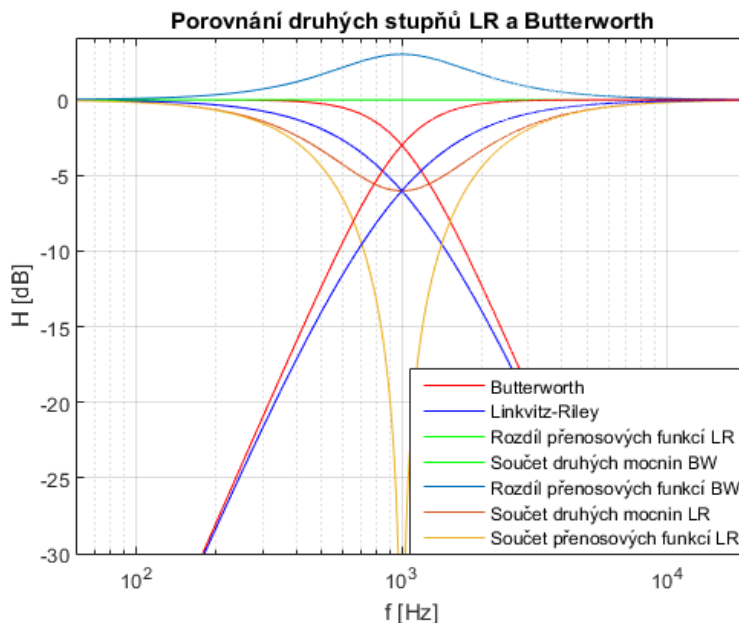
Linkwitz-Riley splňuje podmínku konstantní amplitudy, zjednodušeně to znamená, že v celém frekvenčním spektru je amplituda akustického tlaku reprosoustavy konstantní, matematicky vyjádřeno v rovnici (2).

$$|L(j\omega) + H(j\omega)| = konst. \quad (2)$$

Podmínku konstantní amplitudy akustického tlaku splňují i filtry typu Butterworth lichého řádu u sudých řádů na mezní frekvenci vykazuje převýšení 3dB a Linkwitz-Riley má na zlomové frekvenci z příkonového hlediska pokles o 3dB. Porovnání aproximací Butterworth a Linkwitz-Riley druhého řádu je na obr. 2. Ani jedna z těchto aproximací nevykazuje zvlnění, jak v propustném, tak potlačeném pásmu. Samozřejmě se mohou volit i různé kompromisy, které se v dané situaci můžou ukázat jako vhodnější. V tabulce 1 jsou vzorce a zapojení, které jsou obsaženy programem.

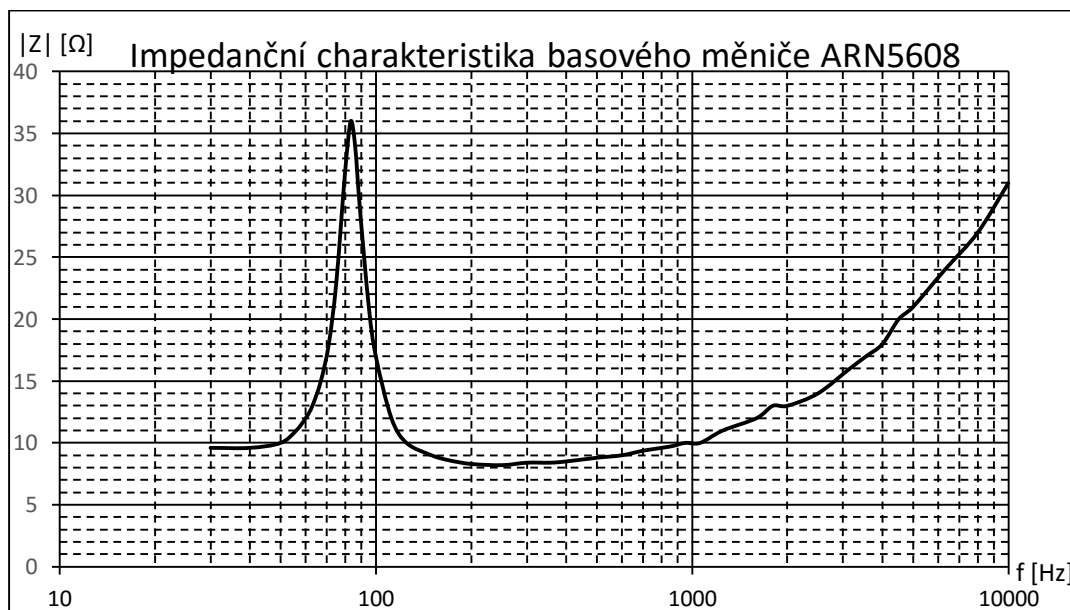


Obr. I Porovnání 1. až 3. stupně aproximace Butterworth, dělící kmitočet 1kHz

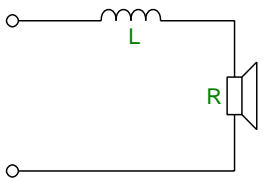
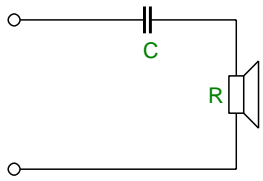
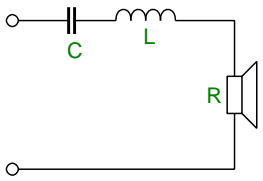
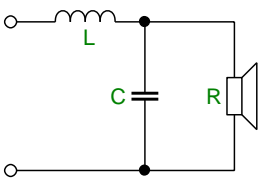
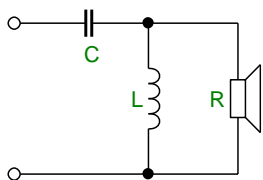
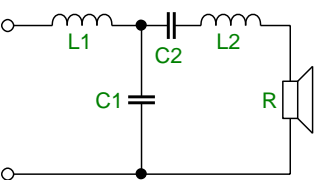
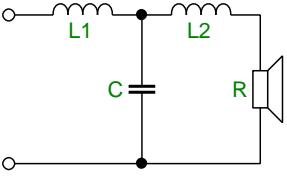
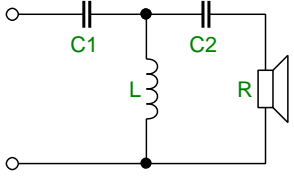
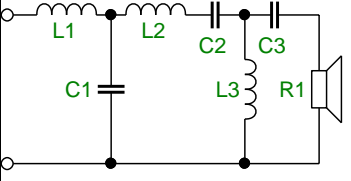


Obr. II Srovnání vlastností aproximace LR a BW

Výrobci reproduktorů udávají jmenovitou hodnotu impedance většinou 2, 4, 8, 16Ω, mohlo by se proto zdát, že impedance v závislosti na frekvenci je konstantní. To ovšem není pravda na obr. 1 je změřená charakteristika basového měniče ARN5608 použitého v reprosoustavě ARS1018. Nekonstantní průběh impedance má za následek, že výpočet výhybky, zejména pak prvního stupně by byl úplně zbytečný, protože výhybka by byla rozladěná. Kvůli tomuto faktu se realizuje kompenzace impedance reproduktoru. Kompenzují se dvě věci a to indukčnost kmitací cívky a rezonance paralelního RLC v náhradním schématu. Kompenzace impedance se provádí sériovým RLC obvodem pro kompenzaci rezonance, nebo sériovým spojením RC pro kompenzaci kmitací cívky, to však výhybku komplikuje a prodražuje. Další variantou je vyjít z teoretických výpočtů a postupně výhybku odladit a přepočítávat pro různé kmitočty, dokud nejsme spokojeni s amplitudovou charakteristikou reprosoustavy.



Obr. III Impedanční charakteristika měniče ARN5608

Výhybky 1.řádu		
Dolní propust	Horní propust	Pásmová propust
 $L = \frac{Z}{2\pi f_d}$	 $C = \frac{1}{2\pi f_h Z}$	 $C = \frac{1}{2\pi f_d Z}, L = \frac{Z}{2\pi f_h}$
Výhybky 2.řádu		
Dolní propust	Horní propust	Pásmová propust
		
$L = \frac{Z}{2\pi f Q}, C = \frac{Q}{2\pi f Z}, BW Q = \frac{1}{\sqrt{2}}, L - R Q = \frac{1}{2}$		
Výhybky 3.řádu		
Dolní propust	Horní propust	Pásmová propust
		
$L_1 = \frac{3R_d}{4\pi f_d}, C = \frac{2}{3\pi f_d R_d}$ $L_2 = \frac{R_d}{4\pi f_d}$	$C_1 = \frac{1}{3\pi f_h R_h}, L = \frac{3R_h}{8\pi f_h}$ $C_2 = \frac{1}{\pi f_h R_h}$	

Tabulka I Vzorce pro výpočet součástek výhybek a jejich zapojení

Zapojení měření:



Obr. IV Blokové schéma zapojení měření

Měření:

V úvodu měření si zvolte, jestli budete měřit na dvoupásmové (ARS1018, 8Ω), nebo třípásmové (ARS1054, 4Ω) reprosoustavě. Třípásmová reprosoustava je časově náročnější, ale zajímavější co se týče nastavování pásmové propusti.

Jako zdroj signálu může být použit NTI Audio MR Pro Minirator, nebo osobní počítač. Zdroj signálu se k zesilovači připojuje pomocí konektoru RCA do vstupu AUX, jedná se o linkový vstup. Úroveň vstupního signálu by měla být 0dBV (1V). Na Miniratoru se nastaví jednotky dBV a úroveň 0. Na zesilovači zvolíme správný výstup, ekvalizér a balance nastavíme na výchozí hodnotě. Pomocí banánků připojíme reproduktor, případně přípravek a reproduktorovou soustavu. Do řetězce se pustí vstupní signál a ovladačem hlasitosti na zesilovači se nastaví takové zesílení, aby byl dostatečný odstup signálu od okolního šumu. Pro objektivní měření použijte spektrální analyzátor NTI XL2 s mikrofonom. V levém horním rohu přepněte na mód FFT. Pro zlepšení odečítání z displeje je možné změnit rozlišení dB/div, vybráním nejvyšší hodnoty na ose y. Pokud se spektrum mění příliš rychle, pak změňte čas průměrování – τ . Přesnou hodnotu příslušného kmitočtu lze odečíst pomocí kurzoru.

Pro určení dělicích kmitočtů je nutné znát amplitudovou charakteristiku jednotlivých reproduktorů. K tomu vyžijte spektrální analyzátor a audio generátor. Pro buzení je nejvhodnější použít bílý šum, ve kterém jsou zastoupeny všechny složky spektra stejně, na generátoru stisknete tlačítko WAVE a vyberte WNOISE. Mikrofon spektrálního analyzátoru mějte v ose reprosoustavy ve vzdálenosti alespoň 50cm, odečtete použitelný rozsah a poznamenejte si ho. U výškového reproduktoru ARV3604 (AR3608) výrobce udává, že nejnižší možný dělicí kmitočet jsou 2kHz, jinak by mohlo dojít k poškození reproduktoru.

Na PC si spusťte v programu MATLAB skript VSV.m, který počítá hodnoty součástek výhybek pro čistě reálnou zátěž. Impedanci vyberte podle reprosoustavy a aproximaci si zvolte libovolně. K vypočteným součástkám vyberte nejbližší hodnoty, které jsou obsaženy v přípravku, pokud si chcete ověřit jak bude vypadat přenos výhybky s těmito součástkami, pak to lze ověřit ve skriptu VPF.m, který ze zadaných součástek vypočte přenosovou funkci, činitel jakosti a frekvence pro pokles o 6dB. Zvolte otočnými přepínači hodnoty součástek na přípravku a ověřte jak úspěšně je výhybka nastavena. Pro objektivní měření lze využít opět generátor bílého šumu a spektrální analyzátor. Pro subjektivní měření lze využít skript Test.m, který generuje rozmítaný sinusový signál podle vstupních parametrů, nebo použijte libovolnou audio stopu a posuďte jak nastavení dopadlo.

Pro ladění konkrétního filtru výhybky odpojte ostatní reproduktory a nechte připojen jen reproduktor, na kterém je potřeba dělicí kmitočet výhybky upravit. Součástky zvolte tak, že přepočítáte hodnoty ve skriptu pro větší, nebo menší dělicí kmitočet, podle situace. Pro měření opět použijte spektrální analyzátor a generátor. Upravujte hodnoty součástek, dokud amplitudová charakteristika samostatného reproduktoru není nastavena podle vašich představ, potom připojte i ostatní reproduktory a proveďte hodnocení celku. Postup opakujte, dokud nejste s výsledkem spokojeni.

Zkuste si zjistit, jak subjektivně umíte hodnotit nastavení výhybky, jestli poznáte převýšení, nebo propady a jestli je lepší použít rozmítaný sinusový signál, nebo například oblíbenou skladbu. Zvolte nejvhodnější součástky pro výhybku a určete kmitočtový rozsah reprosoustavy v tolerančním pásmu 10dB. Vaše nastavení porovnejte s původní výhybkou.

8. Závěr

Cílem práce bylo vytvořit laboratorní úlohu zabývající se měřením reproduktorových výhybek. To zahrnovalo navrhnutí přípravku pro měření, který by umožňoval změnu dělicího kmitočtu a fungoval by pro dvoupásmovou 8Ω i třípásmovou 4Ω reprosoustavu. Dalším bodem bylo vytvoření návodu k měření, aby student věděl, jak má měřit.

Výroba přípravku zahrnovala spojení dvou rozestavěných přípravků a vytvoření jednoho univerzálního. To mě vedlo k tomu, že se na vytvořeném přípravku otočnými přepínači volí jednotlivé hodnoty součástek výhybky. To umožňuje, jak změnu dělicího kmitočtu, tak změnu činitele jakosti výhybky. Případně je i možnost některé součástky odpojit, tedy vytvořit výhybku 1. stupně.

Dalším bodem bylo vytvoření návodu pro měření, tam jsem klad důraz na to, aby student zjistil, proč se výhybky používají a jaký mají vliv na výslednou reprodukci a také, aby si vyzkoušel, jak přesné může být subjektivní hodnocení a jeho porovnání s objektivním měřením pomocí spektrálního analyzátoru.

Pro usnadnění průběhu měření jsem vytvořil v prostředí MATLAB tři programy. Hlavní z nich počítá hodnoty součástek v jednotlivých sekcích podle zadaných dělicích kmitočtů. Další program je inverzní k tomuto a počítá přenosovou funkci na základě součástek a poslední program generuje rozmítaný sinusový signál pro subjektivní hodnocení výhybky.

Výsledkem je tedy plnohodnotná laboratorní úloha zaměřená na zkoumání vlivu výhybky na reproduktorovou soustavu.

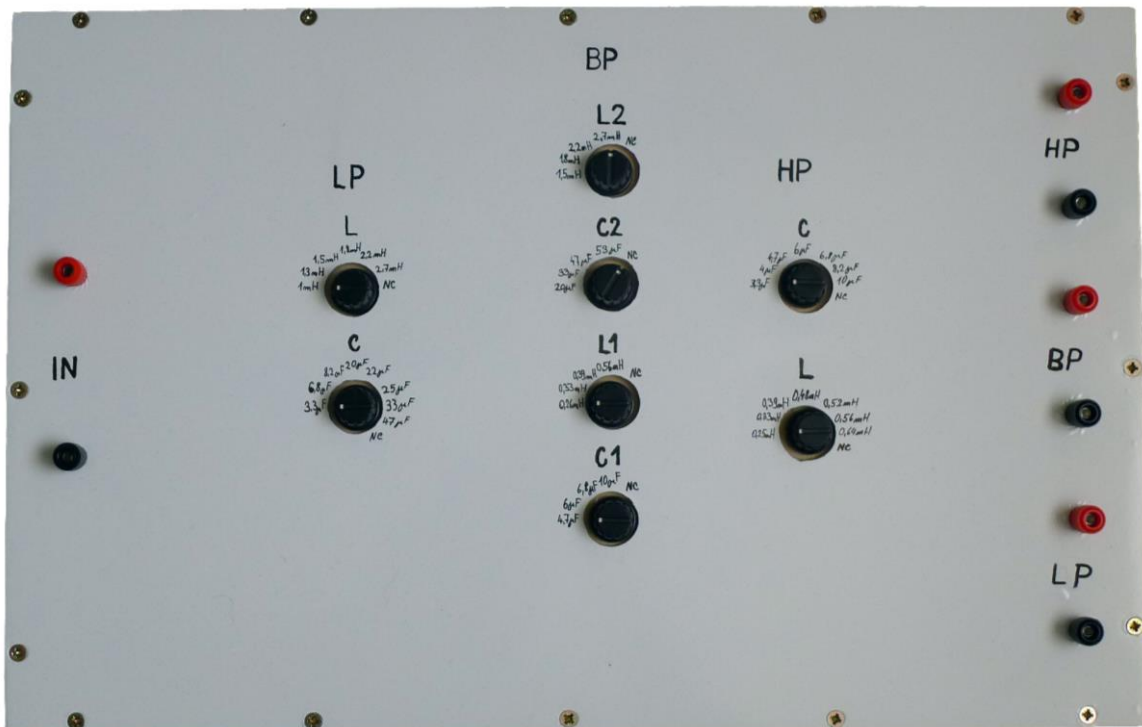
9. Literatura

1. SÝKORA, Bohumil. *Stavíme reproduktorové soustavy I - XXXIX. Amatérské rádio. Praktická elektronika*. 10/1997-12/2000.
2. TOMAN, Kamil. *Reproduktory a reprosoustavy II*, DEXON 2010
3. SVOBODA, L. ŠTEFAN, M. *Reproduktory a reproduktorové soustavy*. 3. vydání, Praha: SNTL 1983.
4. NEČÁSEK, S. JANEČEK, J., RAMBOUSEK, J. *Elektronické a elektroakustické součástky, jejich volba a použití*, Praha: SNTL 1980.
5. Sýkora, Bohumil. *Reproduktory a reproduktorové soustavy trochu jinak. Amatérské rádio*, B/5, 1993.
6. DICKASON, V. *Loudspeaker Design Cookbook*. 7th Edition Book, Peterborough, New Hampshire: Audio Amateur Press, 2006. ISBN 1-882580-47-8.
7. www.repromania.net
8. <http://www.artalabs.hr/>
9. <http://www.cadsoftusa.com/>
10. <http://www.linkwitzlab.com/>
11. Small, Richard H. Closed-Box Loudspeaker Systems - Part 1: Analysis. *Journal of the Audio Engineering Society*, Vol. 20 Issue 10 pp. 798-808
12. Small, Richard H. Vented-Box Loudspeaker Systems - Part 1: Small - Signal Analysis. *Journal of the Audio Engineering Society*, Vol. 21 Issue 5 pp. 363-372

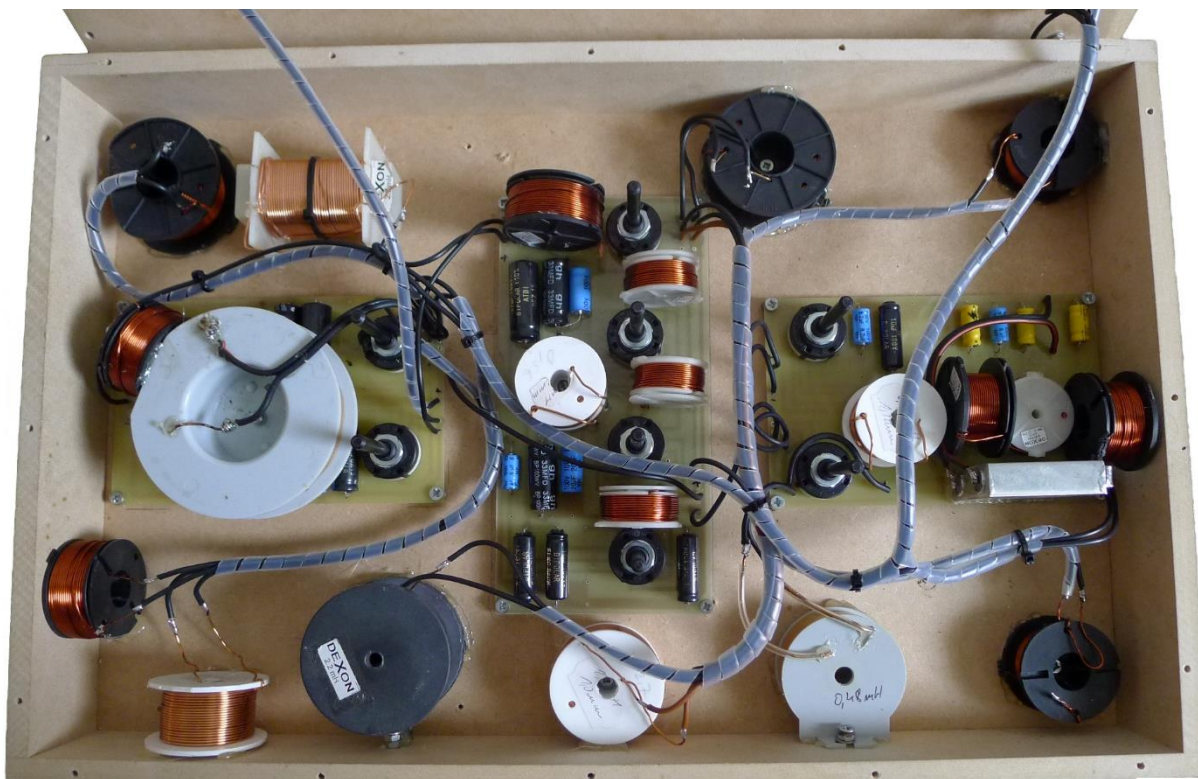
10. Přílohy

Seznam příloh:

Obr. A Ovládací panel vytvořeného přípravku	II
Obr. B Detail vnitřního uspořádání a zapojení vytvořeného přípravku	II
Obr. C Odklopený ovládací panel vytvořeného přípravku.....	III
Obr. D Schéma zapojení horní propusti.....	IV
Obr. E Schéma zapojení dolní propusti.....	IV
Obr. F Schéma zapojení pásmové propusti	V
Obr. G Plošný spoj pásmové propusti.....	VI
Obr. H Plošný spoj horní propusti	VII
Obr. I Plošný spoj dolní propusti.....	VII



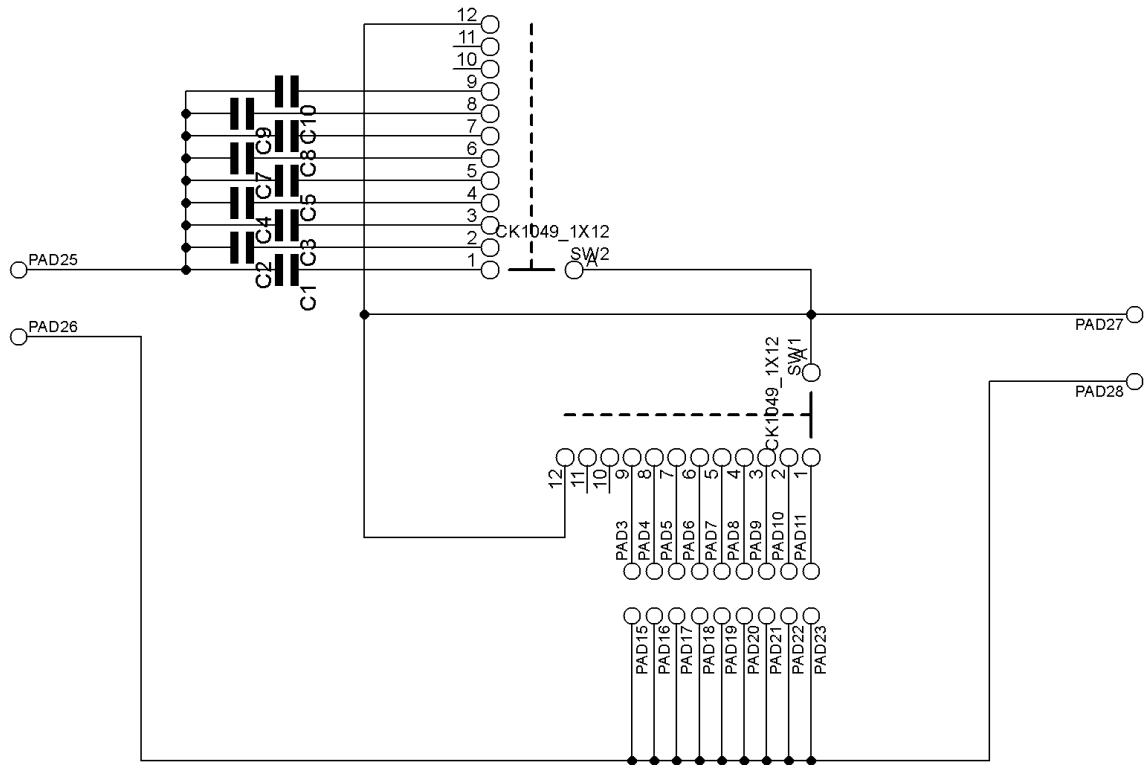
Obr. A Ovládací panel vytvořeného přípravku



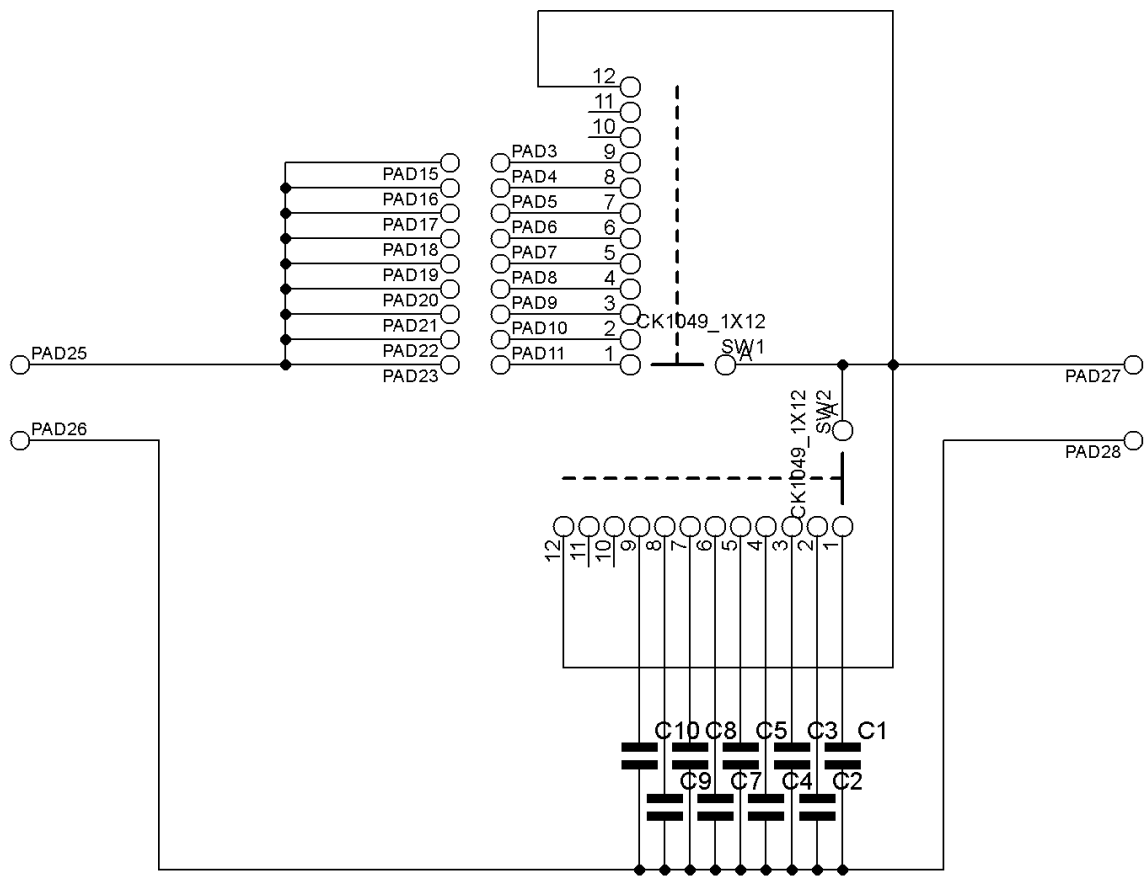
Obr. B Detail vnitřního uspořádání a zapojení vytvořeného přípravku



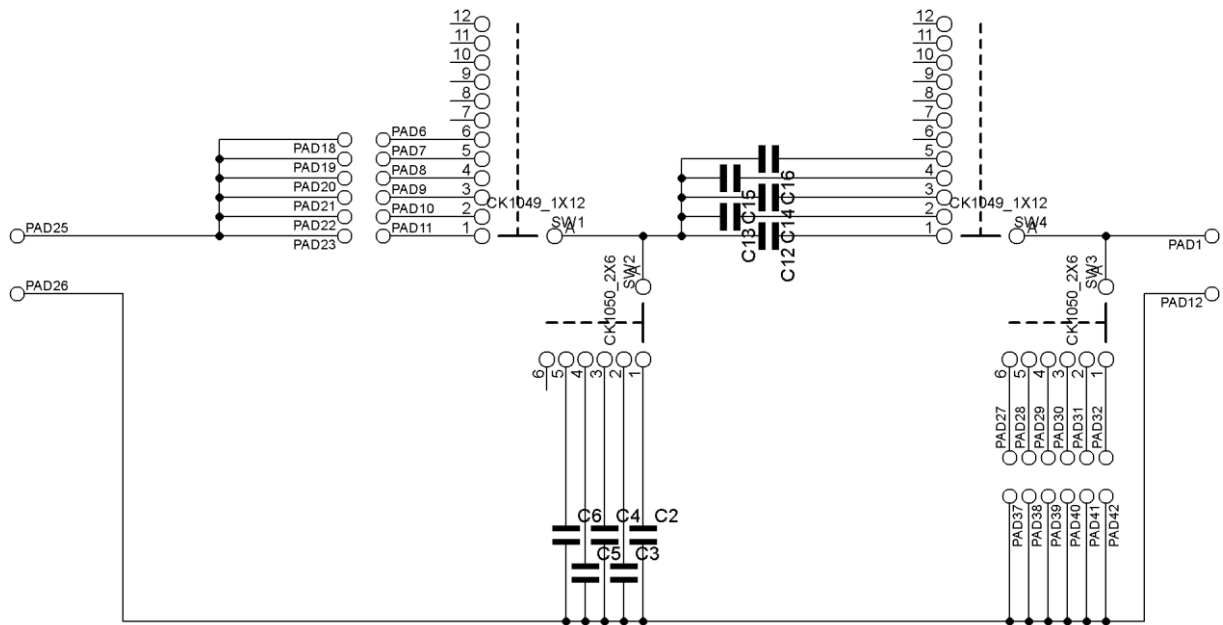
Obr. C Odklopný ovládací panel vytvořeného přípravku



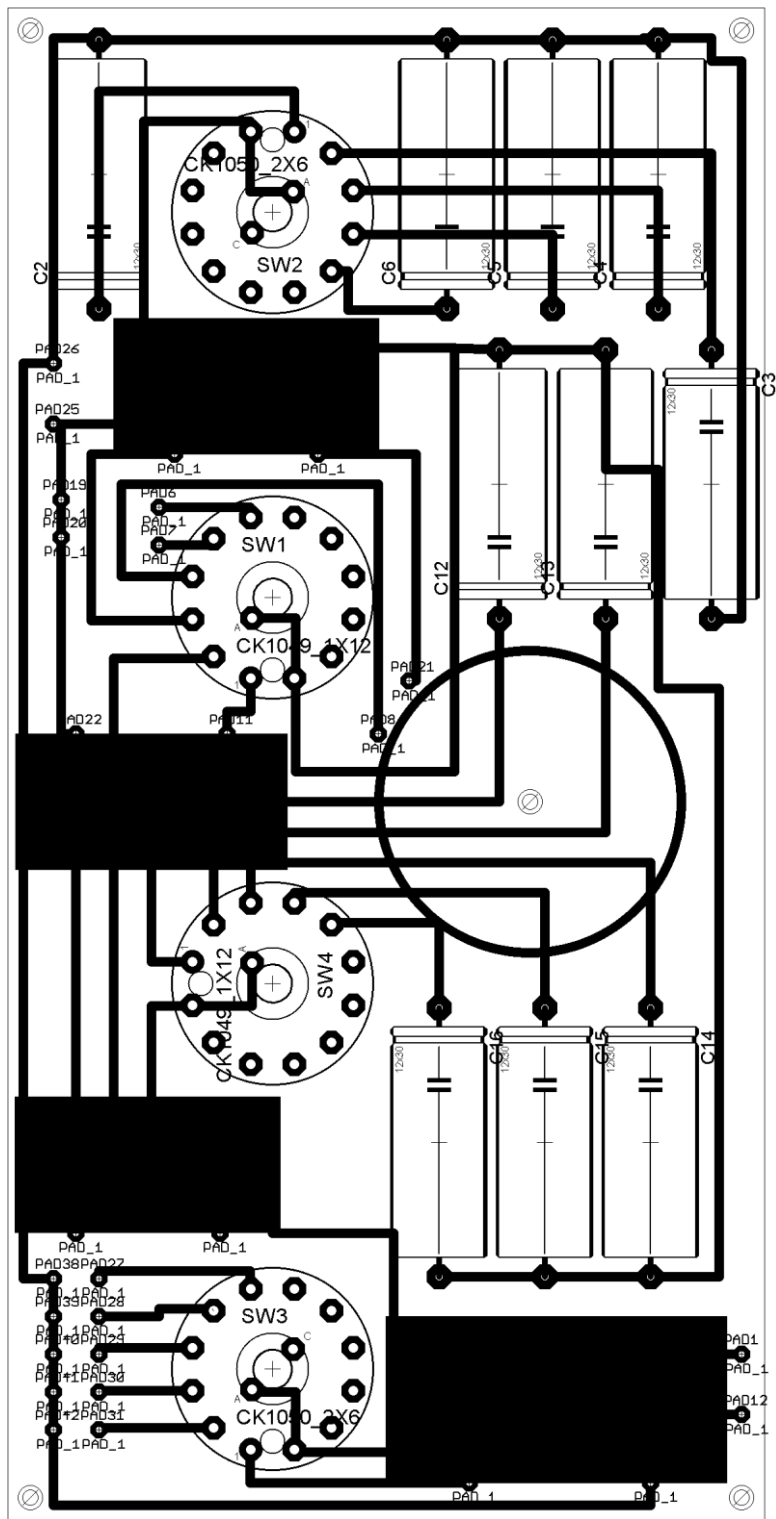
Obr. D Schéma zapojení horní propusti



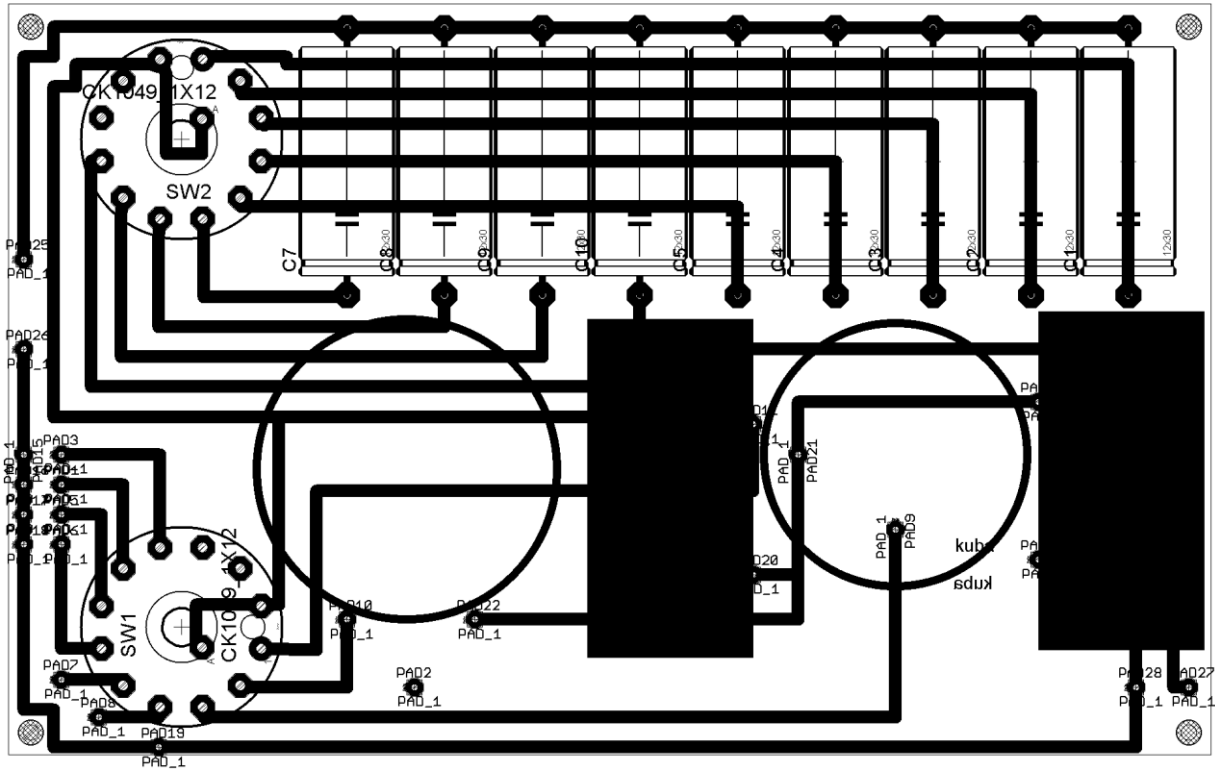
Obr. E Schéma zapojení dolní propusti



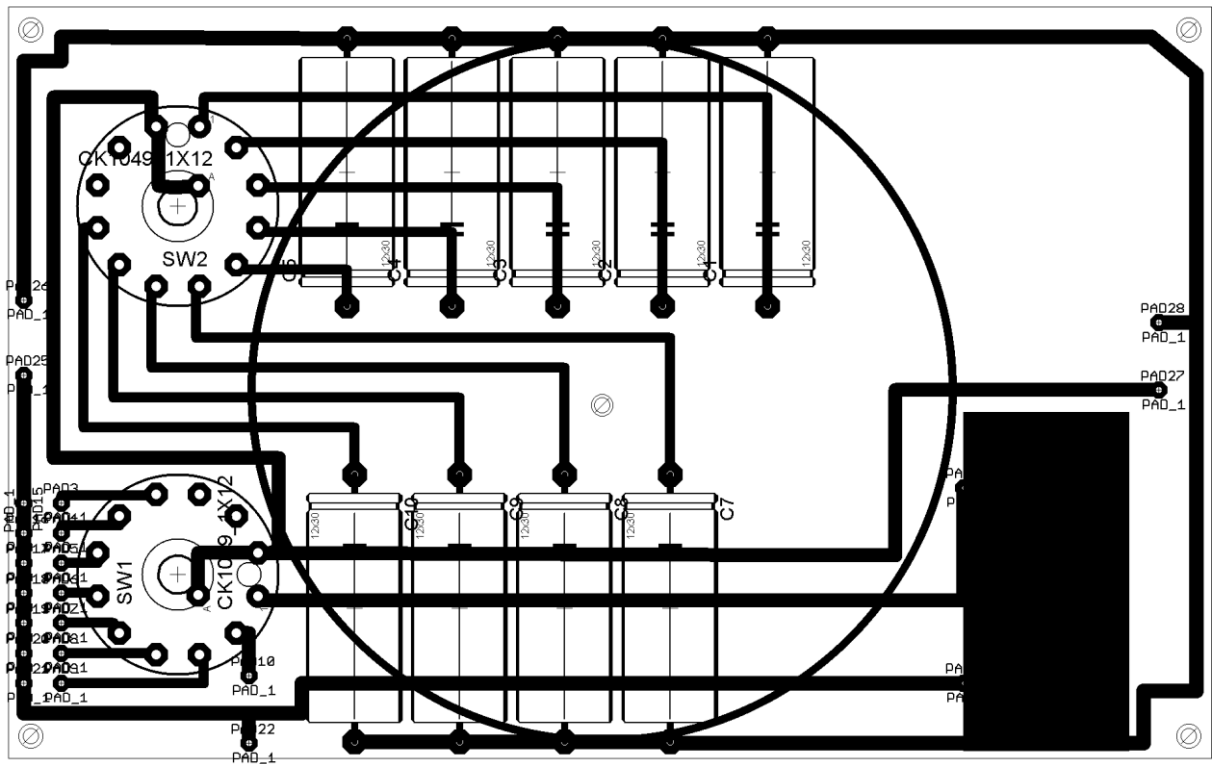
Obr. F Schéma zapojení pásmové propusti



Obr. G Plošný spoj pásmové propusti



Obr. H Plošný spoj horní propusti



Obr. I Plošný spoj dolní propusti