



ZÁPADOČESKÁ  
UNIVERZITA  
V PLZNI

Fakulta elektrotechnická  
Katedra technologií a měření

# BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Realizace přípravku pro návrh výhybek pro pasivní reprosoustavy

Autor práce: Tomáš Hanzlíček  
Vedoucí práce: Ing. Oldřich Tureček, Ph.D.

Plzeň 2020

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta elektrotechnická  
Akademický rok: 2019/2020

## ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE (projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: **Tomáš HANZLÍČEK**  
Osobní číslo: **E17B0073P**  
Studijní program: **B2612 Elektrotechnika a informatika**  
Studijní obor: **Elektronika a telekomunikace**  
Téma práce: **Realizace přípravku pro návrh výhybek pro pasivní reprosoustavy**  
Zadávací katedra: **Katedra aplikované elektroniky a telekomunikací**

### Zásady pro vypracování

1. Navrhněte systém kombinace rezistorů, induktorů a kapacitorů, který bude univerzálně použitelný pro ověřování zapojení pasivních reproduktorových výhybek různých topologií.
2. Navržený systém realizujte.
3. Funkčnost systému ověřte na realizaci reproduktorové výhybky s filtry typu horní a dolní propust 1., 2. a 3. řádu.

Rozsah bakalářské práce: **30 – 40 stran**  
Rozsah grafických prací: **podle doporučení vedoucího**  
Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná/elektronická**

Seznam doporučené literatury:

Stavíme reproduktorové soustavy, Sýkora Bohumil, A-Radio 10/97 – 9/2001

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Oldřich Tureček, Ph.D.**  
Katedra technologií a měření

Datum zadání bakalářské práce: **4. října 2019**  
Termín odevzdání bakalářské práce: **11. června 2020**



**Prof. Ing. Zdeněk Peroutka, Ph.D.**  
děkan



**Doc. Dr. Ing. Vjačeslav Georgiev**  
vedoucí katedry

V Plzni dne 4. října 2019

# Abstrakt

Cílem bakalářské práce bylo prostudovat, navrhnout a odměřit různé topologie reproduktorových výhybek. Navrhované topologie byly zpracovány od dvoupásmových po čtyřpásmové. Poté každá z těchto topologií pro 1., 2. a 3. řád. Rozdělení reproduktorů podle frekvence je velice důležité pro správné fungování reproduktorové soustavy, při špatném návrhu může dojít k znehodnocení zvuku či obsahu. V práci je uveden postup návrhu tlumivek se vzduchovým jádrem pomocí odvozených vzorců a požadovaných parametrů a následné odměření jejich skutečných parametrů. Dále výpočet součástek, zjednodušení přípravku a jeho zpracování, přičemž bylo potřeba součástky rozvrhnout tak, aby se vzájemně negativně neovlivňovaly. Přípravek bude dále sloužit pro měření a odzkoušení různých reproduktorových soustav.

## Klíčová slova

Reproduktor, vzduchové tlumivky, výhybka, kompenzace kmitací cívky, vyrovnání citlivosti

# Abstract

Hanzlíček, Tomáš. *Název práce v angličtině [Realizace přípravku pro návrh výhybek pro pasivní reprosoustavy]*. Pilsen, 2020. Bachelor thesis (in Czech). University of West Bohemia. Faculty of Electrical Engineering. Department of Technologies and Measurement. Supervisor: Oldřich Tureček

---

The aim of the bachelor thesis was to study, design and measure various topologies of loudspeaker. The proposed topologies were processed from two-way to four-way. Then each of these topologies for the 1st, 2nd and 3rd order. The division of speakers by frequency is very important for the proper functioning of the speaker system, poor design can degrade the sound or content. The work describes the design of inductors with an air core using derived formulas and required parameters and subsequent measurement of their actual parameters. Furthermore, the calculation of components, simplification of the preparation and its processing, while it was necessary to lay out the components so that they do not adversely affect each other. The device will also be used for measuring and testing various speaker systems.

## Keywords

Loudspeaker, air chokes, crossover, voice coil compensation, sensitivity compensation

## Prohlášení

Předkládám tímto k posouzení a obhajobě bakalářskou práci, zpracovanou na závěr studia na Fakultě elektrotechnické Západočeské univerzity v Plzni.

Prohlašuji, že jsem svou závěrečnou práci vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce. Jako autor uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této 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 § 270 trestního zákona č. 40/2009 Sb.

Také prohlašuji, že veškerý software, použitý při řešení této bakalářské práce, je legální.

V Plzni dne 18. června 2020

Tomáš Hanzlíček

.....

Podpis

# Obsah

Seznam obrázků	vii
Seznam tabulek	viii
Seznam symbolů a zkratk	ix
<b>1 Úvod</b>	<b>1</b>
<b>2 Součástky pro výhybky</b>  Převzato z [7]	<b>2</b>
2.1 Rezistory . . . . .	2
2.2 Tlumivky . . . . .	2
2.2.1 Tlumivky s vzduchovým jádrem . . . . .	2
2.2.2 Tlumivky s feromagnetickým jádrem . . . . .	3
2.2.3 Návrh tlumivek . . . . .	4
2.3 Kondenzátory . . . . .	5
2.3.1 Parametr ESR . . . . .	6
<b>3 Výhybky</b>	<b>7</b>
3.1 Rozdělení výhybek . . . . .	7
3.2 Návrh výhybek . . . . .	8
3.2.1 Příklad výpočtu třípásmové výhybky 3.řádu . . . . .	8
3.3 Kompenzace indukčnosti kmitací cívky . . . . .	11
3.4 Vyrovnání citlivosti reproduktorů . . . . .	12
3.5 Celkové zapojení třípásmové reproduktorové soustavy . . . . .	13
3.6 Zjednodušení přípravku . . . . .	13
<b>4 Měření</b>	<b>17</b>
4.1 Měření odporu tlumivek čtyřvodičovou metodou  Převzato z [4]  . . . . .	17
4.1.1 Schéma zapojení . . . . .	17
4.1.2 Postup měření . . . . .	18
4.1.3 Naměřené a vypočítané hodnoty . . . . .	18
4.2 Měření vzájemné indukčnosti . . . . .	18
4.2.1 Měření pomocí RLC meteru  Převzato z [8]  . . . . .	19

---

4.2.2	Schéma zapojení . . . . .	19
4.2.3	Naměřené a vypočítané hodnoty . . . . .	20
4.3	Závěr z měření . . . . .	21
<b>5</b>	<b>Závěr</b>	<b>22</b>
	<b>Reference, použitá literatura</b>	<b>23</b>
	<b>Přílohy</b>	<b>24</b>
<b>A</b>	<b>Topologie výhybek</b>	<b>24</b>
A.1	Dvoupásmové výhybky . . . . .	24
A.2	Třípásmové výhybky . . . . .	25
A.3	Čtyřpásmové výhybky . . . . .	27
<b>B</b>	<b>Rozsahy indukčností a kapacit</b>	<b>28</b>
<b>C</b>	<b>Modely a výkresy bedýnek</b>	<b>31</b>
<b>D</b>	<b>Tabulky měření vzájemné indukčnosti</b>	<b>40</b>



# Seznam obrázků

2.1	Zjednodušené náhradní schéma tlumivky . . . . .	2
2.2	Zjednodušené náhradní schéma tlumivky s feromagnetickým jádrem . . . . .	3
2.3	B-H charakteristika feromagnetika a vakua  Převzato z [10]  . . . . .	3
2.4	Kostra tlumivky . . . . .	4
2.5	Náhradní schéma svitkového kondenzátoru . . . . .	6
2.6	Náhradní schéma kondenzátoru s parametrem ESR . . . . .	6
3.1	Výhybky různých topologií . . . . .	7
3.2	Vzorce a schémata zapojení částí výhybek  Převzato z [5]  . . . . .	8
3.3	Schéma zapojení třípásmové výhybky se $4\Omega$ reproduktorem . . . . .	10
3.4	Schéma obvodu pro kompenzaci indukčnosti kmitací cívky reproduktoru . . . . .	11
3.5	Závislost kapacity C na různých hodnotách $L_e$ a $R_e$ . . . . .	12
3.6	Schéma obvodu pro vyrovnání citlivosti reproduktoru . . . . .	12
3.7	Celkové zapojení třípásmové reproduktorové soustavy . . . . .	14
3.8	Zjednodušené schéma výhybek s obvody pro vyrovnání citlivosti a kompenzaci kmitací cívky . . . . .	16
4.1	Metoda čtyřvodičového měření malých odporů  Převzato z [4]  . . . . .	17
4.2	Působení magnetické indukce mezi cívkami  Převzato z [6] . . . . .	19
4.3	Metoda měření vzájemné indukčnosti z výpočtu vlastních indukčností tlumivek . . . . .	19
A.1	Dvoupásmové výhybky 1. , 2. a 3. řádu . . . . .	24
A.2	Třípásmové výhybky 1. , 2. a 3. řádu . . . . .	25
A.3	Třípásmové výhybky 1. , 2. a 3. řádu . . . . .	26
A.4	Čtyřpásmové výhybky 1. , 2. a 3. řádu . . . . .	27
C.1	Model bedýnky č. 1 . . . . .	32
C.2	Víko bedýnky č. 1 . . . . .	33
C.3	Stěny bedýnky č. 1 . . . . .	34
C.4	Dno bedýnky č. 1 . . . . .	35
C.5	Model bedýnky č. 2 . . . . .	36
C.6	Víko bedýnky č. 2 . . . . .	37

C.7	Stěny bedýnky č. 2 . . . . .	38
C.8	Dno bedýnky č. 2 . . . . .	39

# Seznam tabulek

2.1	Tabulka změřených rozměrů koster tlumivek . . . . .	4
2.2	Tabulka vypočtených a skutečných hodnot vzduchových tlumivek . . . . .	5
3.1	Tabulka rozsahů indukčností a kapacit pro třípásmovou výhybku 3. řádu při $f_d=100-2000\text{Hz}$ a $f_h=2000-10000\text{Hz}$ . . . . .	9
3.2	Tabulka rozsahů indukčností a kapacit pro třípásmovou výhybku 3. řádu při $f_d=700-2000\text{Hz}$ a $f_h=2000-10000\text{Hz}$ . . . . .	10
3.3	Tabulka hodnot kondenzátorů a odporů pro kompenzační obvod s různými indukčnostmi kmitací cívky . . . . .	11
3.4	Tabulka hodnot odporů pro obvod vyrovnání citlivosti . . . . .	13
3.5	Tabulka rozsahů indukčností pro přípravek a jejich následovné navržení ze součástek . . . . .	14
3.6	Tabulka rozsahů kapacit pro přípravek a jejich následovné navržení ze součástek . . . . .	15
3.7	Doplňkové hodnoty kondenzátorů . . . . .	15
3.8	Hodnoty odporů pro realizaci obvodu na vyrovnání citlivosti reproduktoru . . . . .	15
4.1	Tabulka vypočtených a skutečných odporů navržených vzduchových cívek . . . . .	18
4.2	Tabulka naměřených a vypočtených vzájemných indukčností při vzdálenosti 2cm . . . . .	20
B.1	Tabulka hodnot mezních hodnot indukčností a frekvencí pro různé topologie výhybek . . . . .	29
B.2	Tabulka hodnot mezních hodnot kapacit a frekvencí pro různé topologie výhybek . . . . .	30
D.1	Tabulka naměřených vzájemných indukčností při vzdálenosti tlumivek 8cm . . . . .	41
D.2	Tabulka naměřených vzájemných indukčností při maximální možné blízkosti . . . . .	42

# Seznam symbolů a zkratek

$D_{1V}$ .....	Vnější průměr velké kostry pro tlumivky.
$D_{2V}$ .....	Vnitřní průměr velké kostry pro tlumivky.
$D_{1M}$ .....	Vnější průměr malé kostry pro tlumivky.
$D_{2M}$ .....	Vnitřní průměr malé kostry pro tlumivky.
$c$ .....	Výška vinutí tlumivky.
$c_{max}$ .....	Maximální výška vinutí tlumivky.
$l_p$ .....	Šířka vinutí tlumivky.
$L_1 - L_9$ .....	Indukčnosti výhybek.
$L_{vz1}$ .....	Indukčnost cívky při měření vzájemné indukčnosti.
$L_{vz2}$ .....	Indukčnost cívky při měření vzájemné indukčnosti.
$L_E$ .....	Indukčnost kmitací cívky.
$L_A$ .....	Indukčnost sériového spojení cívek.
$L_B$ .....	Indukčnost antisériového spojení cívek.
$L_{1V}, L_{2V}$ .....	Indukčnost cívky při měření vzájemné indukčnosti.
$M_x$ .....	Vzájemná indukčnost.
$C_1 - C_9$ .....	Kapacity výhybek.
$C$ .....	Kondenzátor kompenzačního obvodu.
$R$ .....	Odpor kompenzačního obvodu.
$R_1, R_2$ .....	Odporů vyrovnávacího obvodu.
$R_E$ .....	Odpor kmitací cívky.
$R_s$ .....	Sériový odpor.
$P_c$ .....	Celkový výkon výhybky.
$DP$ .....	Dolní propust.
$HP$ .....	Horní propust.
$PP$ .....	Pásmová propust.

# 1

## Úvod

Úkolem této bakalářské práce bylo prostudovat, navrhnout a odměřit přípravek pro měření různých topologií pro pasivní reproduktorové výhybky. Přípravek bude dále sloužit pro návrh výhybek na ZČU.

Prvním řešeným problémem byl rozsáhlý návrh výhybek, které se pohybovaly v topologiích dvoupásmových až čtyřpásmových a pro každou 1., 2. a 3. řád. Po výpočtu součástek pro jednotlivé výhybky došlo k omezení frekvenčních pásem z důvodů požadavku na vlastnosti tlumivek a realizovatelnosti kondenzátorů.

Dalším bodem byl návrh tlumivek. Na připravené kostry dvou rozměrů byl počítán průměr drátu a potřebný počet závitů tak, aby tlumivky splňovaly požadavek ohledně odporu a váhy. Po návrhu následovalo navíjení. Po navinutí se mohly ověřovat parametry, do kterých patřil odpor tlumivky, skutečný počet závitů a vzájemná indukčnost, která bude vznikat při umístění do bedýnek.

Po tomto všem se mohlo přejít na zjednodušování přípravku. Zjednodušování probíhalo úpravou hodnot součástek, snížením počtu tak, aby šla realizovat téměř každá topologie. Návrh bedýnek vycházel z měření vzájemné indukčnosti, a také aby bedny se všemi součástkami měly přijatelnou hmotnost.

## 2

# Součástky pro výhybky [Převzato z [7]]

## 2.1 Rezistory

Rezistory se ve výhybkách používají jako součástky realizující odporové děliče pro úpravu citlivosti reproduktorů nebo pro kompenzaci kmitacích cívek. Fungují na principu změny elektrické energie na teplo, proto je podstatná jejich zatížitelnost. Často se stává, že reproduktory se dotýkají tlumícího materiálu. To způsobuje špatné chlazení součástek, a proto se musí volit rezistory s co nejvyšší zatížitelností.

## 2.2 Tlumivky

### 2.2.1 Tlumivky s vzduchovým jádrem

Tlumivky jsou součástkami pro výhybky. Reálné tlumivky se od ideálních liší velmi podstatně. Na obrázku 2.1 je vidět náhradní schéma tlumivky se vzduchovým jádrem. Parazitní kapacita je v akustickém pásmu zanedbatelná.

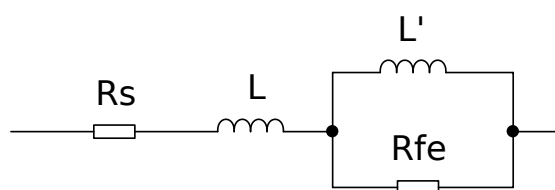
Stejnoseměrný odpor způsobuje dva efekty. Prvním jsou ztráty procházejícím proudem, a tím i ohřívání tlumivky. Druhým efektem je vliv na přenosovou charakteristiku. V sérii se signálovou cestou způsobuje snížení citlivosti. Pokud je paralelně, má vliv na dělicí frekvenci filtru. Pro omezení těchto důsledků je potřeba dodržet dvě pravidla. Prvním je velikost stejnosměrného odporu menší než desetina impedance reproduktoru, v jehož větvi je tlumivka zapojena a dále by jeho velikost neměla přesáhnout polovinu hodnoty indukčnosti tlumivky udávané v jednotkách mH.



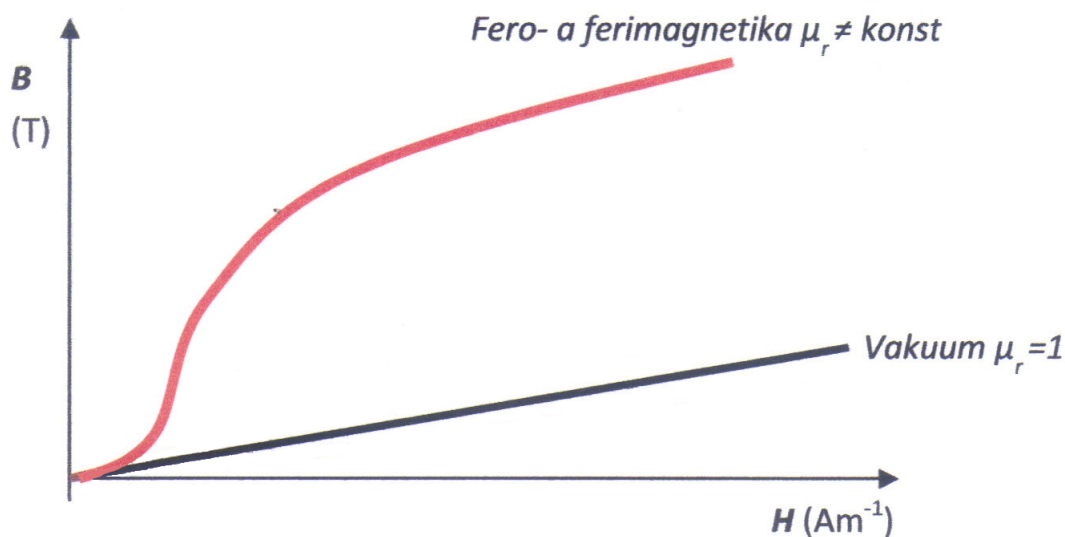
**Obr. 2.1:** Zjednodušené náhradní schéma tlumivky

## 2.2.2 Tlumivky s feromagnetickým jádrem

Při návrhu vzduchových tlumivek vysokých indukčností vzniká problém s hmotností tlumivky. Hmotnost tlumivky by neměla přesahovat váhu reproduktoru. Z tohoto důvodu se používají výhybky s feromagnetickým jádrem. Náhradní schéma těchto tlumivek ukazuje obrázek 2.2, kde  $R_s$  je stejnosměrný odpor,  $R_{fe}$  jsou ztráty ve feromagnetickém jádru a součet  $L$  a  $L'$  je jmenovitá indukčnost tlumivky. Dají se tak navrhout tlumivky o vysokých indukčnostech, to sebou ale přináší další problémy. Feromagnetické jádro je nelineární prostředí a indukčnost tlumivky tak závisí na procházejícím proudu, to způsobuje zkreslení. Dalším problémem jsou ztráty, které způsobují frekvenční závislost indukčnosti a stejnosměrného odporu. Tyto problémy se dají omezit vytvořením malé vzduchové mezery mezi tlumivkou a jádrem.

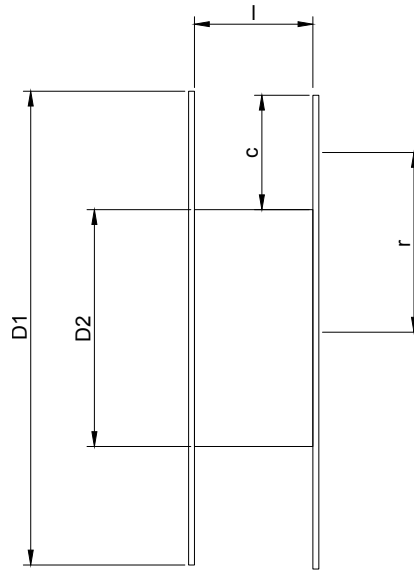


Obr. 2.2: Zjednodušené náhradní schéma tlumivky s feromagnetickým jádrem



Obr. 2.3: B-H charakteristika feromagnetika a vakua |Převzato z [10]|

### 2.2.3 Návrh tlumivek



**Obr. 2.4:** Kostra tlumivky

K výpočtu je potřeba znát požadovanou indukčnost a rozměry kostry tlumivky, na kterou se závity budou navíjet. Maximální výška závitů se určí jako rozdíl poloviny vnějšího průměru a poloviny vnitřního průměru. Zapsáno ve vzorci 2.1.

$$c_{max} = \frac{D1}{2} - \frac{D2}{2} \quad [m] \quad (2.1)$$

Velká kostra		
$D_{1V}$ [mm]	$D_{2V}$ [mm]	$l$ [mm]
80	40	20
Malá kostra		
$D_{1M}$ [mm]	$D_{2M}$ [mm]	$l$ [mm]
60	30	20

**Tab. 2.1:** Tabulka změřených rozměrů koster tlumivek

Dále je potřeba dopočítat střední poloměr závitů ze vzorce 2.2.

$$r = \frac{D2}{2} + \frac{c}{2} \quad [m] \quad (2.2)$$

Z těchto známých hodnot už můžeme dopočítat přibližný počet závitů dle vzorce 2.3 a přibližný stejnosměrný odpor. Hodnota  $c$  se volí s maximální hodnotou ze vzorce 2.1 (ve skutečnosti však bude o něco větší z důvodu nedokonalého výpočtu, kdy plochu závitů nelze dokonale vyplnit reálným drátem). Počet závitů je poté určen tak, že se při navíjení tlumivky navine o 10% závitů navíc z vypočítané hodnoty jako rezerva z důvodu



nepřesnosti výpočtů. Poté se měřením na RLC metru a postupným odmotáváním tlumivky zjistí skutečný počet závitů potřebných na požadovanou indukčnost. Dále už může probíhat navíjení reálných závitů. Výpočet 2.3 [Převzato z [9]]

$$N = \sqrt{\frac{L(19r + 28l + 31c)}{100a^2}} \quad [z] \quad (2.3)$$

$$S_{DRAT} \approx \frac{cl}{N} \quad [m^2] \quad (2.4)$$

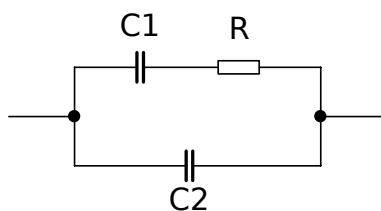
Závity podle indukčností			
L [uH]	N [z]	d [mm]	N <sub>SKUT</sub>
Malá kostra			
10	19.11	1.5	18.5
20	26.86	1.5	26
30	32.72	1.5	32
40	37.64	1.5	36
100	58.49	1.5	56
200	81.2	1.5	83
Velká kostra			
300	79.2	2	77
400	90.54	2	89
500	100.46	2	99
1000	137.82	2	137

**Tab. 2.2:** Tabulka vypočtených a skutečných hodnot vzduchových tlumivek

Závity dle výpočtů vycházely přibližně jako skutečné, jak je vidět z tabulky 2.2.

## 2.3 Kondenzátory

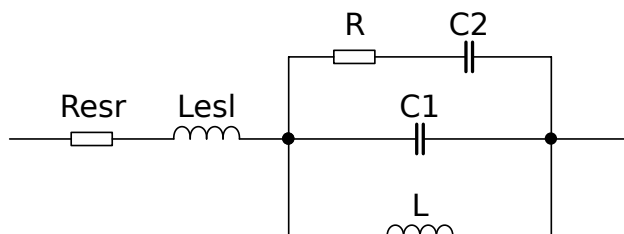
Pro realizaci výhybek se používají elektrolytické a svitkové kondenzátory a jako dielektrikum polyester, polypropylen nebo polykarbonát. Nejvíce teplotně stabilní jsou kondenzátory s polykarbonátem a mají dielektrické ztráty mezi polypropylenem a polyestrem. Nejpoužívanější jsou však polypropylénové kondenzátory. Problémem kondenzátorů jsou dielektrické ztráty (nejvíce u elektrolytických), které způsobují snižování kapacity a zvýšení parazitního odporu při zvyšování frekvence. Náhradní schéma je zobrazeno na obrázku 2.6.



Obr. 2.5: Náhradní schéma svitkového kondenzátoru

### 2.3.1 Parametr ESR

ESR je ekvivalentní sériový elektrický odpor u kondenzátorů. Je důležitý u filtračních kondenzátorů spínaných zdrojů, protože přes ně tečou velké proudy a na kondenzátoru by tím pádem vznikaly výkonové ztráty. Z tohoto důvodu požadujeme kondenzátory s nízkou hodnotou ESR. Hodnoty  $L_{ESL}$  a  $L$  lze v akustickém pásmu zanedbat.



Obr. 2.6: Náhradní schéma kondenzátoru s parametrem ESR

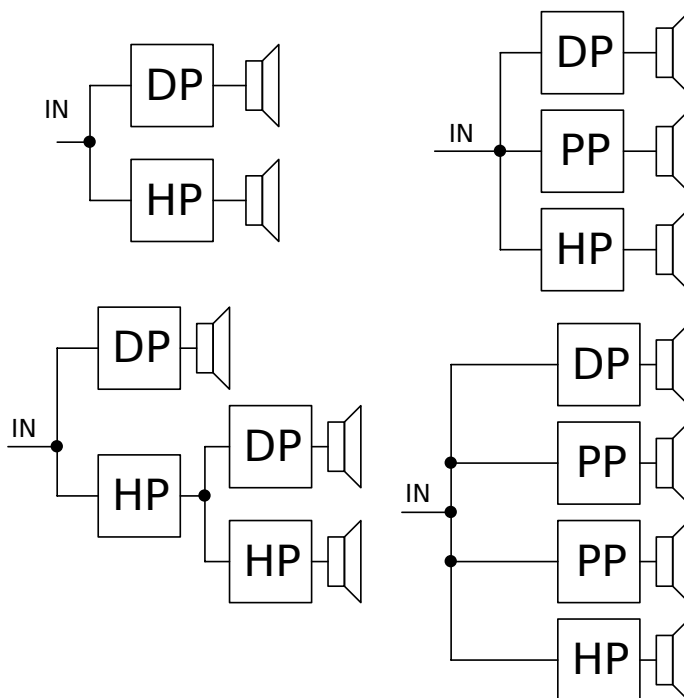
# 3

## Výhybky

Frekvenční výhybky jsou filtry, které mají na vstupu signál z akustického pásma, který je potřeba rozdělit na pásma pro akustické měniče, které jsou na výstupech těchto filtrů. Dělí se na aktivní a pasivní výhybky. Aktivní výhybky obsahují na rozdíl od pasivních koncové zesilovače.

### 3.1 Rozdělení výhybek

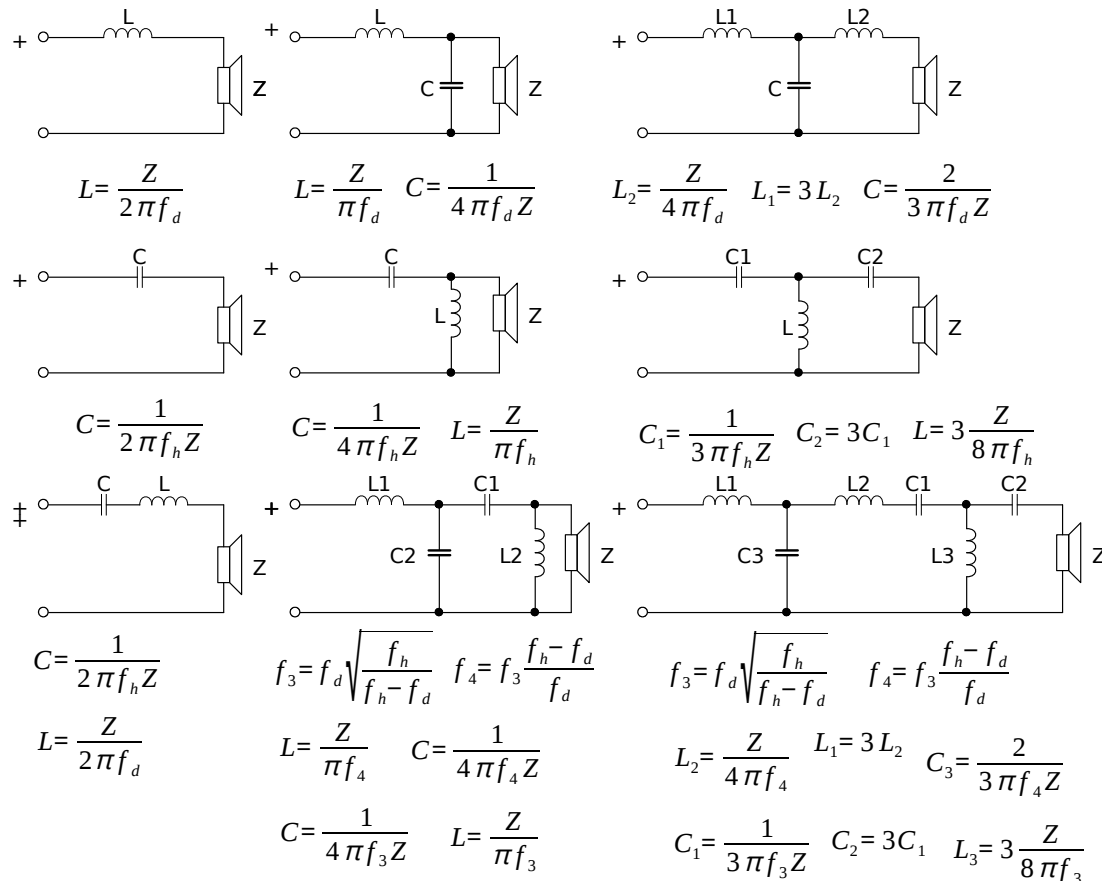
Pasivní výhybky můžeme rozdělovat podle strmostí na 1., 2. a 3. řádu. Výhybky vyšších řádů se používají spíše už jako aktivní. Dále je můžeme dělit podle topologií na 2-pásmové, 3-pásmové a 4-pásmové, které jsou složené z různých kombinací dolních, horních a pásmových propustí.



Obr. 3.1: Výhybky různých topologií

## 3.2 Návrh výhybek

Při návrhu a výpočtu součástek bylo postupováno podle vzorců z obrázku 3.2. Frekvence byly voleny v závislosti na druhu propusti, poté byly upraveny s ohledem na odpor tlumivek, který měl být maximálně  $0,1\Omega$ , jak je popsáno v dalších odstavcích.



Obr. 3.2: Vzorce a schémata zapojení částí výhybek [Převzato z [5]]

### 3.2.1 Příklad výpočtu třípásmové výhybky 3.řádu

Jako příklad výpočtu je zde uvedena třípásmová výhybka 3.řádu se  $4\Omega$  reproduktory. Jako první bylo potřeba zvolit rozsahy dělicích frekvencí, ty byly voleny s ohledem na vlastnosti basových (hloubkových), středových a výškových reproduktorů. Basové reproduktory jsou určeny pro nízké kmitočty a to od 50 - 5000 Hz. Středové pro kmitočty od 400 do 6000 Hz a výškové pro kmitočty od 2000 do 20000 Hz. Pro výpočty výhybky byly zvoleny rozsahy dělicích frekvencí s ohledem na vlastnosti reproduktorů jako  $f_d = 100 - 2000\text{Hz}$  a  $f_h = 2000 - 10000\text{Hz}$ .

Jelikož přípravek bude univerzální, bylo potřeba spočítat nejvyšší a nejnižší hodnoty součástek pro všechny výhybky. K výpočtu dále posloužily hodnoty odporu reproduktoru, které byly v rozsahu 4 -  $8\Omega$  a zvolené frekvence.

Výpočet dolní propusti:

$$L_2 = \frac{Z_{REP}}{4\pi f_{dmin}} ; L_1=3L_2 ; C_1=\frac{2}{3\pi f_{dmin}Z} \quad [H; H; F] \quad (3.1)$$

Výpočet horní propusti:

$$C_2 = \frac{1}{3\pi f_{hmin}Z_{REP}} ; C_3=3C_2 ; L_3=\frac{3Z_{REP}}{8\pi f_{hmin}} \quad [F; F; H] \quad (3.2)$$

Výpočet pásmové propusti:

U pásmové propusti bylo potřeba spočítat také maximální a minimální hodnoty  $f_3$  a  $f_4$ , ze kterých vychází výpočty pro hodnoty součástek.

$$f_3 = f_{dmin} \sqrt{\frac{f_{hmin}}{f_{hmin} - f_{dmin}}} ; f_4 = f_3 \frac{f_{hmin} - f_{dmin}}{f_{dmin}} \quad [Hz; Hz] \quad (3.3)$$

$$L_5 = \frac{Z_{REP}}{4\pi f_4} ; L_4=3L_5 ; C_4=\frac{2}{3\pi f_4 Z} \quad [H; H; F] \quad (3.4)$$

$$C_5 = \frac{1}{3\pi f_3 Z_{REP}} ; C_6=3C_5 ; L_6=\frac{3Z_{REP}}{8\pi f_3} \quad [F; F; H] \quad (3.5)$$

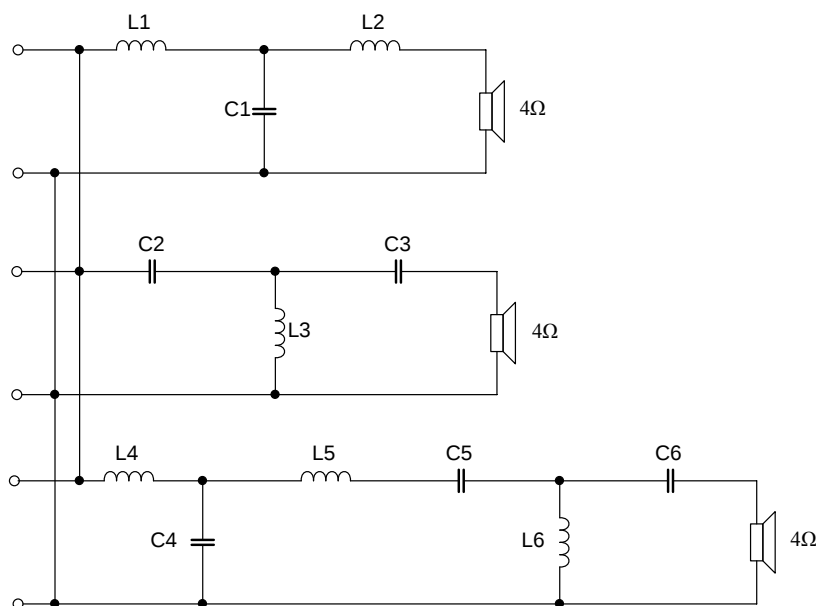
Těmito výpočty byly zjištěny nejvyšší hodnoty indukčností a nejnižší hodnoty kapacit. Tyto výpočty byly poté opakovány pro hodnoty  $f_{hmax}$  a  $f_{dmax}$  pro zjištění nejnižších hodnot indukčností a nejvyšších hodnot kapacit. Rozsahy těchto hodnot zobrazuje tabulka 3.1.

L1	477,5uH – 9549,3uH
L2	159,12uH – 3183,1uH
L3	45,3uH – 238,7uH
L4	100,6uH – 489,9uH
L5	33,5uH – 163,3uH
L6	214,9uH – 4653,8uH
C1	26,5uF – 530,5uF
C2	13,3uF – 39,8uF
C3	7,5uF – 39,8uF
C4	5,6uF – 27,2uF
C5	11,9uF – 258,3uF
C6	35,8uF – 775,6uF

**Tab. 3.1:** Tabulka rozsahů indukčností a kapacit pro třípásmovou výhybku 3. řádu při  $f_d=100-2000\text{Hz}$  a  $f_h=2000-10000\text{Hz}$

Jak je vidět z tabulky 3.1 pro nízké frekvence vycházely hodnoty indukčností až 9mH, což by odpovídalo odporu přibližně  $1,8\Omega$ . Proto musely být frekvence dále upravovány,

aby se odpor dostal pod  $0,4\Omega$ , tedy  $1/10$  odporu reproduktoru. Výsledné dělicí frekvence tak u třípásmové výhybky vyšly  $f_d = 700 - 2000\text{Hz}$  a  $f_h = 2000 - 10000\text{Hz}$ . Výsledné rozsahy pro třípásmovou výhybku zobrazuje tabulka 3.2.



**Obr. 3.3:** Schéma zapojení třípásmové výhybky se  $4\Omega$  reproduktorem

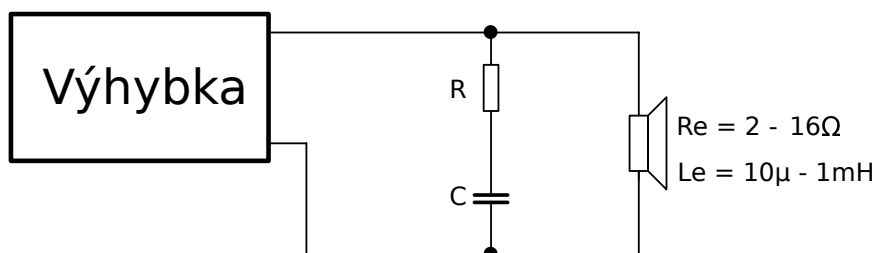
Obrázek 3.3 ukazuje třípásmovou reproduktorovou soustavu bez obvodů na kompenzaci kmitací cívky a vyrovnání citlivosti reproduktorů. Skládá se z jedné dolní propusti, jedné horní propusti a jedné pásmové propusti. Tato výhybka se také může skládat ze dvou dolních propustí a dvou horních propustí, kde kombinace dolní a horní propusti pak tvoří přibližně pásmovou propust.

$L_1$	477.5uH - 1364.2uH
$L_2$	159.2uH - 455.7uH
$L_3$	45.3uH - 101.6uH
$L_4$	100.6uH - 592.2uH
$L_5$	33.5uH - 197.4uH
$L_6$	214.9uH - 549.9uH
$C_1$	26.5uF - 75.8uF
$C_2$	2.5uF - 5.6uF
$C_3$	7.5uF - 16.9uF
$C_4$	5.6uF - 32.9uF
$C_5$	11.9uF - 30.6uF
$C_6$	35.8uF - 91.6uF

**Tab. 3.2:** Tabulka rozsahů indukčností a kapacit pro třípásmovou výhybku 3. řádu při  $f_d=700-2000\text{Hz}$  a  $f_h=2000-10000\text{Hz}$

### 3.3 Kompenzace indukčnosti kmitací cívky

Výhybka zatížená reproduktorem může mít znehodnocený přenos z důvodu frekvenční závislosti impedance tohoto reproduktoru, proto se provádí kompenzace kmitací cívky reproduktoru. Využívá se sériové spojení kondenzátoru a rezistoru paralelně připojeného k výhybce, které poté poskytne pro výhybku téměř činnou zátěž. Hodnoty odporu a kondenzátoru se vypočítají dle vzorců 3.6, 3.7 [Převzato z [1]] [Převzato z [2]].



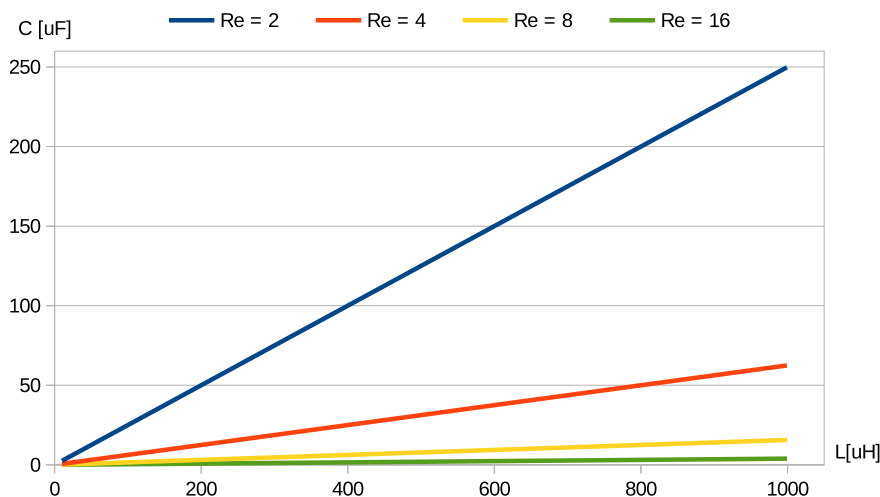
**Obr. 3.4:** Schéma obvodu pro kompenzaci indukčnosti kmitací cívky reproduktoru

$$R \approx R_E \quad [\Omega] \quad (3.6)$$

$$C = \frac{L_E}{R_E^2} \quad [F] \quad (3.7)$$

	$R_e = 2$	$R_e = 4$	$R_e = 8$	$R_e = 16$
L [uH]	C [uF]	C [uF]	C [uF]	C [uF]
10	2,5	0,6	0,2	0,04
100	25	6,3	1,6	0,4
200	50	12,5	3,1	0,8
300	75	18,8	4,7	1,2
400	100	25	6,3	1,6
500	125	31,3	7,8	2
600	150	37,5	9,4	2,3
700	175	43,8	10,9	2,7
800	200	50	12,5	3,1
900	225	56,3	14,1	3,5
1000	250	62,5	15,6	3,9

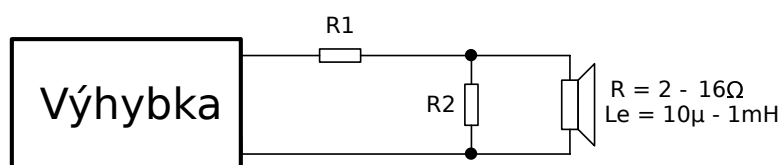
**Tab. 3.3:** Tabulka hodnot kondenzátorů a odporů pro kompenzační obvod s různými indukčnostmi kmitací cívky



Obr. 3.5: Závislost kapacity C na různých hodnotách Le a Re

### 3.4 Vyrovnání citlivosti reproduktorů

Reproduktor svou konstrukcí udává svoji citlivost, kterou ve většině případů nelze ovlivnit. Basové reproduktory mají obvykle nižší citlivost z důvodu jejich menších rozměrů oproti vysokotónovým. Je dána jako rozdíl mezi nejvyšší a nejnižší složkou signálu. Z důvodu toho, že by reproduktor s vyšší citlivostí hrál hlasitěji, je třeba tento problém kompenzovat. Ke kompenzaci se používá odporový dělič, který je umístěn mezi výhybkou a reproduktorem. Hodnoty odporů se vypočítají pomocí vzorců 3.8, 3.9 [Převzato z [1]] [Převzato z [2]].



Obr. 3.6: Schéma obvodu pro vyrovnání citlivosti reproduktoru

$$R_2 = 10^{\frac{A}{20}} \frac{R_E}{1 - 10^{\frac{A}{20}}} \quad [\Omega] \quad (3.8)$$

$$R_1 = R_E - \frac{1}{\frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_E}} \quad [\Omega] \quad (3.9)$$

Napěťový dělič způsobuje výkonové ztráty na jednotlivých odporech. Proto pokud chceme z reproduktoru dostávat určitý výkon, musíme zvýšit výkon dodávaný do výhybky. Požadovaný výkon lze určit ze vzorce 3.14 [Převzato z [1]].



Au [dB]	-3		-4		-5		-6		-7		-8		-9	
$R_{REP}$	$R_1$	$R_2$	$R_1$	$R_2$	$R_1$	$R_2$	$R_1$	$R_2$	$R_1$	$R_2$	$R_1$	$R_2$	$R_1$	$R_2$
2	0,6	4,8	0,7	3,4	0,9	2,6	1	2	1,1	1,6	1,2	1,3	1,3	1,1
4	1,2	9,7	1,5	6,8	1,8	5,1	2	4	2,2	3,2	2,4	2,6	2,6	2,2
8	2,3	19,4	3	13,7	3,5	10,3	4	8	4,4	6,5	4,8	5,3	5,2	4,4
16	4,7	38,8	5,9	27,4	7	20,6	8	1,61	8,9	12,9	9,6	10,6	10,3	8,8

**Tab. 3.4:** Tabulka hodnot odporů pro obvod vyrovnání citlivosti

$$I_{REP} = \sqrt{\frac{P_{REP}}{R_{REP}}} \quad [A] \quad (3.10)$$

$$U_{REP} = U_{R2} = I_{REP} R_{REP} \quad [V] \quad (3.11)$$

$$I_{R2} = \frac{U_{R2}}{R_2} \quad [A] \quad (3.12)$$

$$I_{R1} = I_{R2} + I_{REP} \quad [A] \quad (3.13)$$

$$P_{R1} = I_{R1}^2 R_1 ; P_{R2} = I_{R2}^2 R_2 \quad [W; W] \quad (3.14)$$

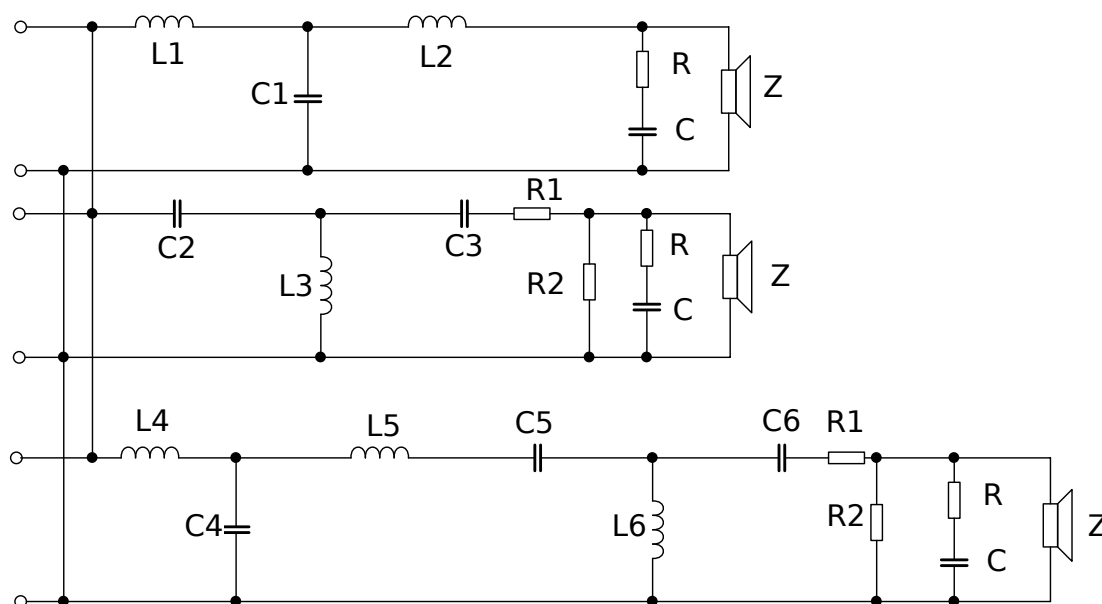
Celkový požadovaný výkon, který budeme muset dodávat do výhybky, je roven součtu  $P_{R1}$ ,  $P_{R2}$  a  $P_{REP}$

### 3.5 Celkové zapojení třípásmové reproduktorové soustavy

Na obrázku 3.7 je vidět celkové zapojení na příkladu třípásmové reproduktorové soustavy s obvody na kompenzaci kmitací cívky a vyrovnání citlivosti reproduktoru.

### 3.6 Zjednodušení přípravku

Z ekonomických důvodů bylo potřeba vymyslet, jak počty součástek zjednodušit tak, aby šly zapojit všechny topologie různých řádů. Jelikož výhybky končí u čtyřpásmových, stačilo tedy vytvořit přípravek, který se bude skládat ze dvou pásmových propustí s navrženými rozsahy, které pokryjí zapojení všech topologií výhybek. Dále bylo potřeba vybrat rozsahy součástek, které se budou používat. To vyplývalo z výpočtu všech výhybek pro zvolené dělicí frekvence. Každá součástka se bude skládat z dekády, kterou budou



**Obr. 3.7:** Celkové zapojení třípásmové reproduktorové soustavy

realizovat hodnoty zobrazené v tabulkách 3.5 a 3.6. Měřící přípravek se tak bude skládat z 6 indukčních dekád a 6 kapacitních dekád pro realizace různých topologií výhybek. Dále bude potřeba 2 odporové dekády pro realizaci obvodu k vyrovnání citlivosti a 1 odporovou a 1 kapacitní dekádu pro kompenzaci kmitačky. Součástky budou uloženy v navržených bedýnkách které jsou zobrazeny v přílohách C.1 až C.8.

	L [uH]	L [uH]									
L1	10-2000	1x1000	2x500	1x400	1x300	1x200	1x100	1x40	1x30	1x20	1x10
L2	31-538	1x1000		1x400	1x300	1x200	1x100	1x40	1x30	1x20	1x10
L3	47-1500	1x1000	1x500	1x400		1x200	1x100	1x40	1x30	1x20	1x10
L4	11-1168	1x1000	2x500	1x400	1x300	1x200	1x100	1x40	1x30	1x20	1x10
L5	49-292				1x300	1x200	1x100	1x40	1x30	1x20	1x10
L6	102-817	1x1000		1x400	1x300	1x200	1x100	1x40	1x30	1x20	1x10

**Tab. 3.5:** Tabulka rozsahů indukčností pro přípravek a jejich následovné navržení ze součástek

R [ $\Omega$ ]											
0,1	0,2	0,3	0,4	1	2	3	4	10	20	30	40

**Tab. 3.6:** Hodnoty odporů pro realizaci obvodu na vyrovnání citlivosti reproduktoru

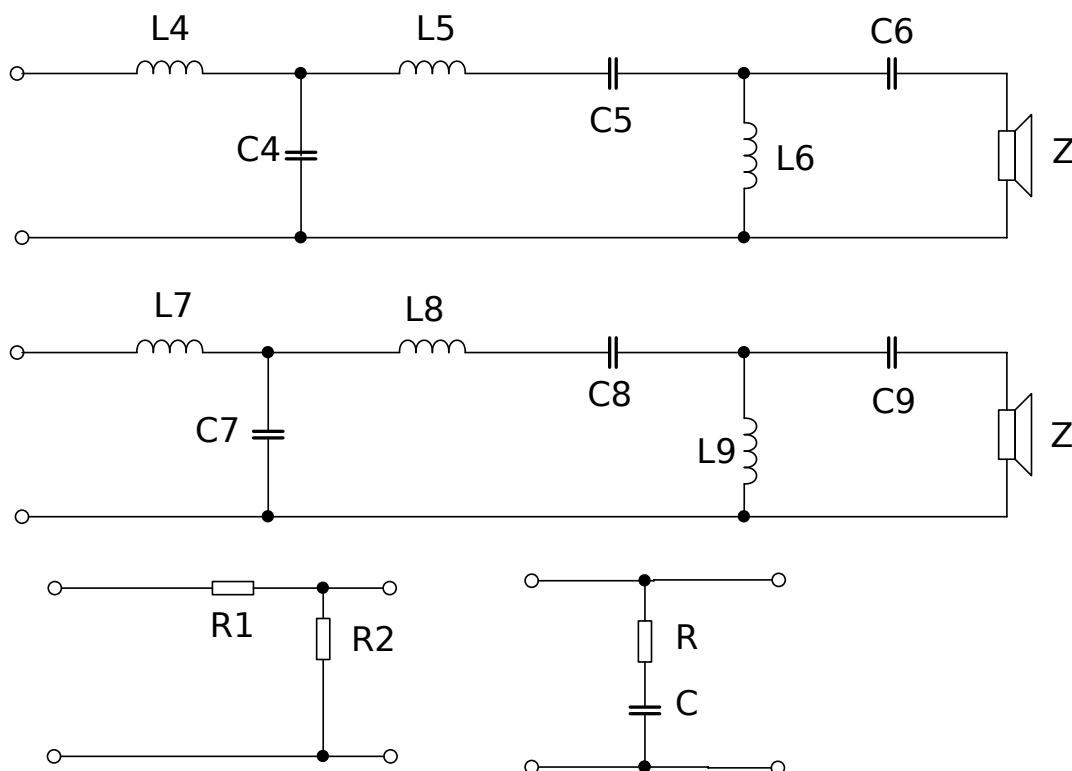
	Rozsahy	C [uF]									
C1	1-636	1x200	1x100	1x40	1x30	1x20	1x10	1x6,6	4/3,3	1x2,2	1x1
C2	1-31				1x30	1x20	1x10	1x6,6	4/3,3	1x2,2	1x1
C3	7-72			1x40	1x30	1x20	1x10	1x6,6	4/3,3	1x2,2	1x1
C4	1,9-374	1x200	1x100	1x40	1x30	1x20	1x10	1x6,6	4/3,3	1x2,2	1x1
C5	2-8							1x6,6	4/3,3	1x2,2	1x1
C6	8-23					1x20	1x10	1x6,6	4/3,3	1x2,2	1x1

Kompenzace											
Rozsah [uF]	C [uF]										
0,04-250		2x100	2x40	2x30	2x20	2x10	2x6,6	2x4/3,3	2x2,2	2x1	

**Tab. 3.7:** Tabulka rozsahů kapacit pro přípravky a jejich následovně navržené ze součástek

C [uF]		
4x0,68	3x0,33	2x0,5
2x0,1	2x0,22	

**Tab. 3.8:** Doplnkové hodnoty kondenzátorů



**Obr. 3.8:** Zjednodušené schéma výhybek s obvody pro vyrovnání citlivosti a kompenzaci kmitací cívky

# 4

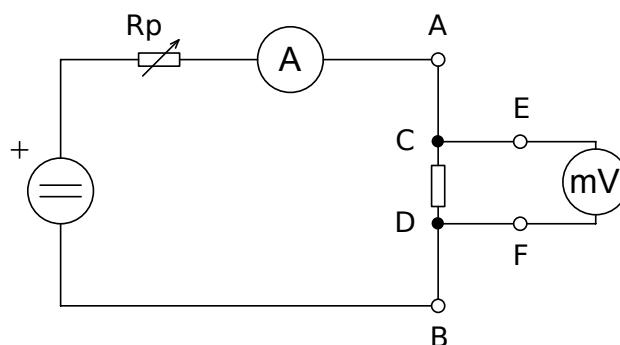
## Měření

### 4.1 Měření odporu tlumivek čtyřvodičovou metodou

[Převzato z [4]]

Metoda čtyřvodičového měření odporu se používá při měření velmi malých odporů. Její výhodou je odstranění vlivu odporu přívodu a odporů svorek. Procházející proud vytváří úbytek napětí, který je přímo úměrný odporu měřené tlumivky. Na obrázku 4.1 je zobrazeno schéma zapojení této metody. Ze schématu je vidět, že odpor je připojen ke zdroji konstantního proudu a na svorkách E a F je připojen voltmetr. Z tohoto zapojení plyne, že voltmetr neměří úbytek napětí na proudových svorkách A a B. Problémem při měření touto metodou může být vliv termoelektrických napětí, které vznikají v kontaktech. Tento problém lze omezit dvojným měřením při komutaci proudu, kdy úbytek napětí na odporu bude mít opačnou polaritu [Převzato z [4]].

#### 4.1.1 Schéma zapojení



Obr. 4.1: Metoda čtyřvodičového měření malých odporů [Převzato z [4]]

### 4.1.2 Postup měření

K měření byl použit zapůjčený miliohmometr. Nejprve se zkratovaly napěťové svorky, poté se zkratovaly proudové svorky. Spojením těchto zkratů se poté provedlo nulování miliohmometru. Zapojením proudových svorek na konce tlumivky a napěťových svorek blíže k tlumivce proběhlo měření odporu.

### 4.1.3 Naměřené a vypočítané hodnoty

Výpočet odporů podle vzorce 4.1 počítán s hodnotami z kapitoly 3. Výpočet je pouze přibližný vzhledem k tomu, že skutečný střední poloměr závitů je jiný než vypočtený.

$$R = \rho \frac{l}{S} = \rho \frac{N2\pi r}{\frac{\pi d^2}{4}} \quad [\Omega] \quad (4.1)$$

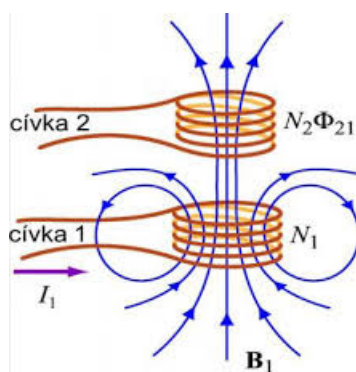
L [uH]	R <sub>VYP</sub> [Ω]	R <sub>SKUT</sub> [Ω]
Malá kostra		
10	0.018	0.021
20	0.026	0.029
30	0.032	0.037
40	0.038	0.042
100	0.062	0.68
200	0.091	0.087
Velká kostra		
300	0.071	0.075
400	0.083	0.089
500	0.098	0.105
1000	0.15	0.23

**Tab. 4.1:** Tabulka vypočtených a skutečných odporů navržených vzduchových cívek

## 4.2 Měření vzájemné indukčnosti

Vzájemná indukčnost je indukčnost, která vzniká, pokud jsou dvě cívky ve svojí blízkosti. První cívkou prochází elektrický proud  $I$ , který vytváří magnetický tok  $\varphi_1$ . Tento magnetický tok prochází také cívkou číslo 2, která je v blízkosti a není připojena na zdroj proudu. Dojde-li k časové změně proudu v první cívce, do cívky číslo 2 se dle vzorce 4.2 indukuje napětí. |Převzato z [6]|.

$$u_{i2} = -M \frac{\Delta I_1}{\Delta t} \quad [uH] \quad (4.2)$$



Obr. 4.2: Působení magnetické indukce mezi cívkami [Převzato z [6]].

#### 4.2.1 Měření pomocí RLC meteru [Převzato z [8]]

Metoda měření pomocí RLC meteru je vhodná pro měření vzájemných indukčností vzduchových tlumivek. Je totiž založená na principu superpozice, který v nelineárním prostředí nelze předpokládat. Zapojíme-li tlumivky za sebou tak, že se magnetický tok primárního vinutí sčítá s tokem druhé tlumivky, je výsledná vlastní indukčnost tohoto zapojení:

$$L_A = L_{1V} + L_{2V} + 2M_X \quad [uH] \quad (4.3)$$

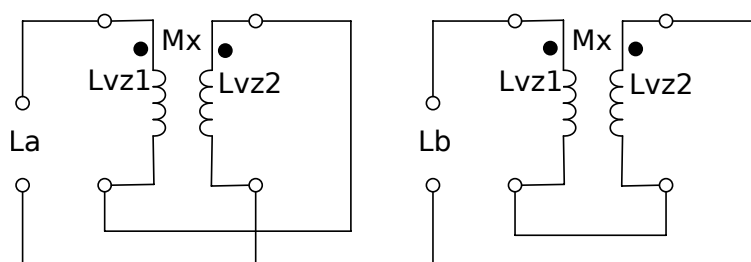
Pokud se zapojení otočí, magnetické toky se odčítají a výsledná vlastní impedance je dána jako:

$$L_B = L_{1V} + L_{2V} - 2M_X \quad [uH] \quad (4.4)$$

Výsledná vzájemná indukčnost je dána vztahem 4.5

$$M_X = \frac{L_A - L_B}{4} \quad [uH] \quad (4.5)$$

#### 4.2.2 Schéma zapojení



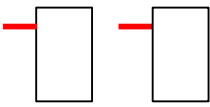
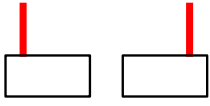
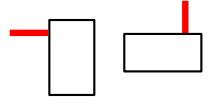
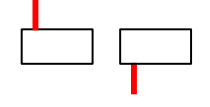
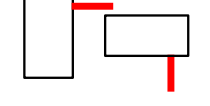
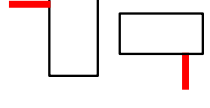
Obr. 4.3: Metoda měření vzájemné indukčnosti z výpočtu vlastních indukčností tlumivek

Schéma zapojení se skládá ze sériového spojení tlumivek a antisériového spojení tlumivek.

### 4.2.3 Naměřené a vypočítané hodnoty

Naměřené tabulky jsou pro vzdálenosti 2 cm z důvodu umístění tlumivek do beden. Měření při dalších vzdálenostech jsou zobrazeny v příloze D.

$$\frac{L_{1V}}{M_X} = \frac{L_{1V}}{M_X} 100 \quad [\%] \quad (4.6)$$

Měření vzájemné indukčnosti RLC metrem						
Natočení	$L_{1V}$ [uH]	$L_{2V}$ [uH]	$L_A$ [uH]	$L_B$ [uH]	$M_X$ [uH] 2 cm od sebe	$L_{1V}/M_X$ [%]
	20	30	50,5	48,4	0,525	2,63
	100	100	204,6	189	3,9	3,90
	300	300	671	523	37	12,33
	600	1000	1815	1296,6	129,6	21,60
	20	30	49,5	49,9	0,1	0,50
	100	100	199	196	0,75	0,75
	300	300	609	589,4	4,9	1,63
	600	1000	1602	1535,2	16,7	2,78
	20	30	49,7	49,5	0,05	0,25
	100	100	198,9	198	0,225	0,23
	300	300	592	587	1,25	0,42
	600	1000	1567	1547,4	4,9	0,82
	20	30	49,9	49,3	0,15	0,75
	100	100	198,8	195,7	0,775	0,78
	300	300	605,6	592	3,4	1,13
	600	1000	1605	1538,4	16,65	2,78
	20	30	50,1	49,4	0,175	0,88
	100	100	197,9	197,7	0,05	0,05
	300	300	598,5	595,6	0,725	0,24
	600	1000	1603	1542	15,25	2,54
	20	30	50	49,8	0,05	0,25
	100	100	196,3	195,8	0,125	0,13
	300	300	602	596	1,5	0,50
	600	1000	1579	1568,8	2,55	0,43

**Tab. 4.2:** Tabulka naměřených a vypočtených vzájemných indukčností při vzdálenosti 2cm

### 4.3 Závěr z měření

Jak je vidět z tabulky 4.1, skutečné hodnoty odporů se liší v rozmezí  $0.003 - 0.006\Omega$ . Průměr drátu byl volen tak, aby hodnoty odporu nepřesáhly  $1/10$  odporu reproduktoru.

Z tabulky 4.2 lze vidět, že vzájemné indukčnosti nejlépe vycházely při takovém natočení, že začátek vinutí první cívky směřuje doleva při svislé poloze a začátek vinutí druhé cívky směřuje při vodorovné poloze dolů. Natočení, kdy jedna tlumivka je ve svislé poloze a jedna tlumivka v poloze vodorovné, vycházely velmi podobně, proto se tlumivky budou takto umisťovat do přípravku. Nejhorší natočení bylo takové, že začátek vinutí první cívky směřuje doleva při svislé a začátek vinutí druhé cívky také doleva při svislé poloze. Při tomto natočení by se cívky vzájemně ovlivňovaly, a to by mohlo ve výsledku ovlivňovat parametry reproduktorových soustav.



# 5

## Závěr

Cílem bakalářské práce bylo prostudovat, navrhnout a realizovat přípravek pro měření různých reproduktorových výhybek.

Byly navrženy dvoupásmové, třípásmové a čtyřpásmové reproduktorové výhybky, které vedly k návrhu měřicího přípravku. Měřicí přípravek se bude skládat z induktivních a kapacitních dekád. Pro správné fungování reproduktorových výhybek byly navrženy obvody pro kompenzaci kmitací cívky a vyrovnání citlivosti. K návrhu byly navrženy a realizovány tlumivky hodnot od 10uH do 1mH, které byly individuálně navíjeny. Dohromady bylo navinuto 56 tlumivek. Přípravek bude dále obsahovat 76 kondenzátorů pro realizaci výhybek a kompenzačních obvodů a také 22 rezistorů.

Vše bude umístěno v navržených bednách o rozměrech 736x386x186mm a 526x386x186mm. Bedny budou vyrobeny z překližek, kde víko bedny budou z části tvořit plechové panely pro usazení součástek. Součástky se budou propojovat přes banánové konektory. Tlumivky budou uloženy v bedně dle měření vzájemné indukčnosti, přibližně 2cm od sebe a v poloze, kdy jedna tlumivka bude vodorovně a druhá svisle. Do menší bedny se budou umísťovat tlumivky o hodnotách od 300uH do 1uH, vždy 4 v řadě s mezerou 2 cm. Do bedny druhé se umístí tlumivky o hodnotách 10uH až 200uH, vždy po 6 ve sloupci. Ve druhé bedně budou také umístěny všechny rezistory a kondenzátory. Až budou bedny vyrobené, umístí se do beden součástky a proběhne ověření funkčnosti měřicího přípravku na realizaci reproduktorové výhybky s filtry horní a dolní propusti 1., 2. a 3. řádu. Celková váha přípravku se bude pohybovat kolem 35kg, rozdělených do obou beden.

# Literatura

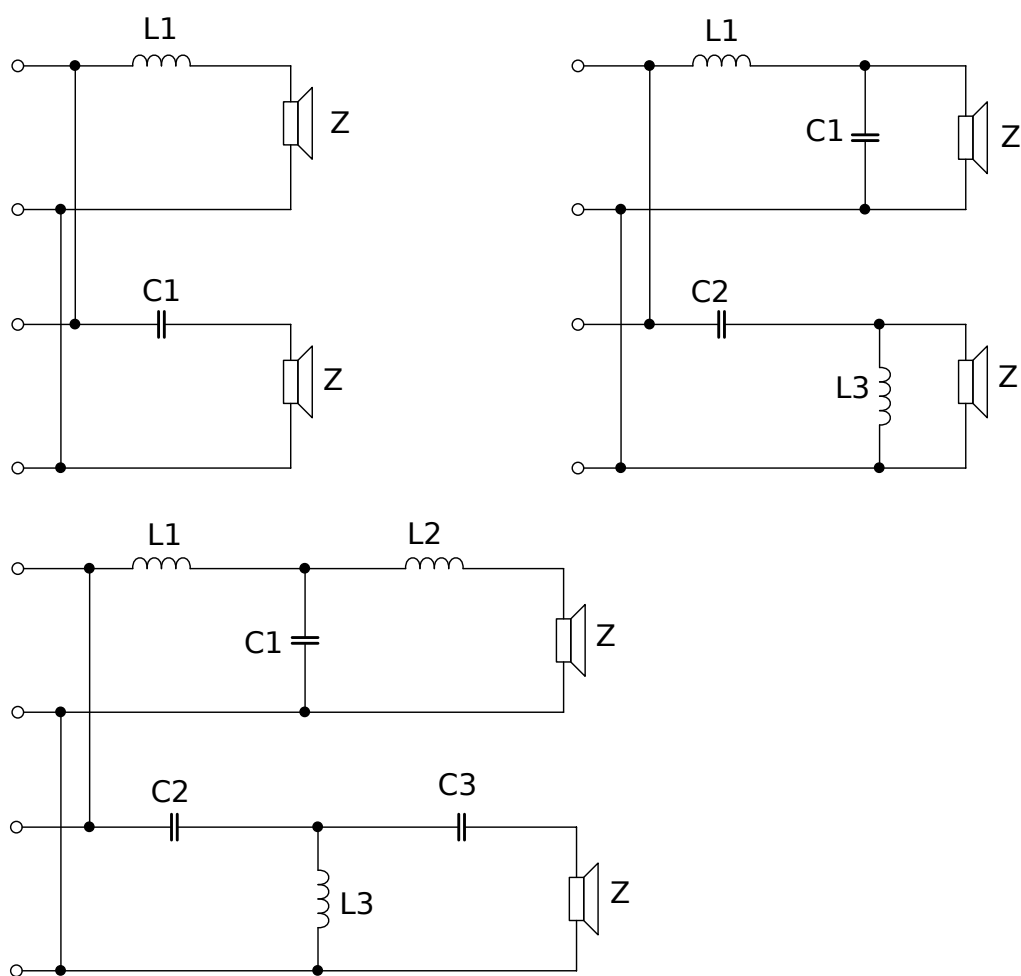
- [1] FOŘT, Josef. *Konstrukce širokopásmového akustického zdroje*. Plzeň, 2018. Bakalářská práce. Západočeská univerzita v Plzni. Vedoucí práce Ing. Oldřich Tureček Ph.D.
- [2] KOČVARA, Pavel. *Dvoupásmová stereofonní reproduktorová soustava*. Brno, 2013. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně. Vedoucí práce Doc. Ing. Tomáš Kratochvíl, Ph.D.
- [3] HÜTTL, Ing. Ondřej. *Nízkofrekvenční reprosoustava s ozvučnicí z alternativních materiálů*. Brno, 2007. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně. Vedoucí práce Doc. Ing. Tomáš Kratochvíl, Ph.D.
- [4] HAASZ CSc., prof. Ing. Vladimír, prof. Ing. Jan HOLUB Ph.D., Ing. Michal JANOŠEK Ph.D. a Ing. Vojtěch PETRUCHA Ph.D.. *Elektrická měření : Přístroje a metody*. 3. Praha: ČVUT, 2018. ISBN 978-80-01-06412-2.
- [5] *Konstrukce reproduktorových výhybek*. DEXON [online]. Karviná – Staré Město, 2009 [cit. 2020-06-01]. Dostupné z: <https://www.dexon.cz/clanky/konstrukce-teorie/konstrukce-reproduktorovych-vyhybek.html>
- [6] MAŤÁTKO, Ing. Milan. *Magnetické pole - Indukce*. In: [Www.stavskola.cz](http://www.stavskola.cz) [online]. [cit. 2020-06-05]. Dostupné z: <https://www.stavskola.cz/vyukove-prezentace>
- [7] SÝKORA, Bohumil. *Stavíme reproduktorové výhybky*. Amatérské rádio. 2001, (1-48).
- [8] TŮMOVÁ CSC., doc. Ing. Olga, doc. Ing. Václav ČTVRTNÍK CSC., Ing. Josef GRIG CSC. a Ing. ŠVARNÝ PH.D. *Elektrická měření: Měřící metody*. 2. vydání. Plzeň: Technologii a měření, 2005.
- [9] *Přibližné výpočty vzduchových cívek: Vícevrstvá vzduchová cívka*. Radioamatérská dílna [online]. 2009 [cit. 2020-06-17]. Dostupné z: <http://pjenicek.sweb.cz/radio/clanky/vypoctcivky1.html>
- [10] *Magnetické materiály* [online]. [cit. 2020-06-17]. Dostupné z: <https://publi.cz/books/353/07.html>

# Příloha A

## Topologie výhybek

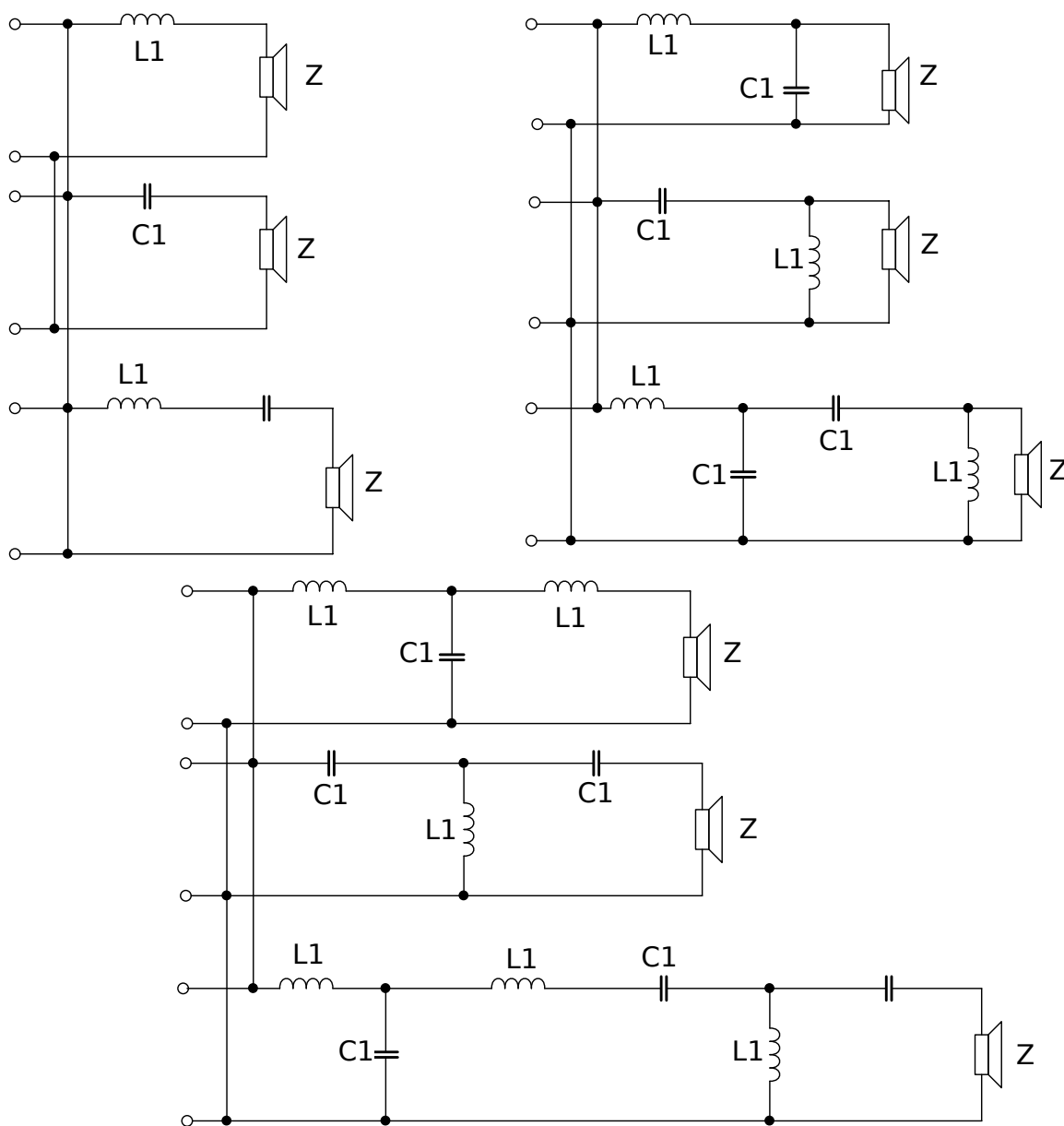
V příloze jsou zobrazeny příklady topologií realizovatelné z měřicího přípravku.

### A.1 Dvoupásmové výhybky

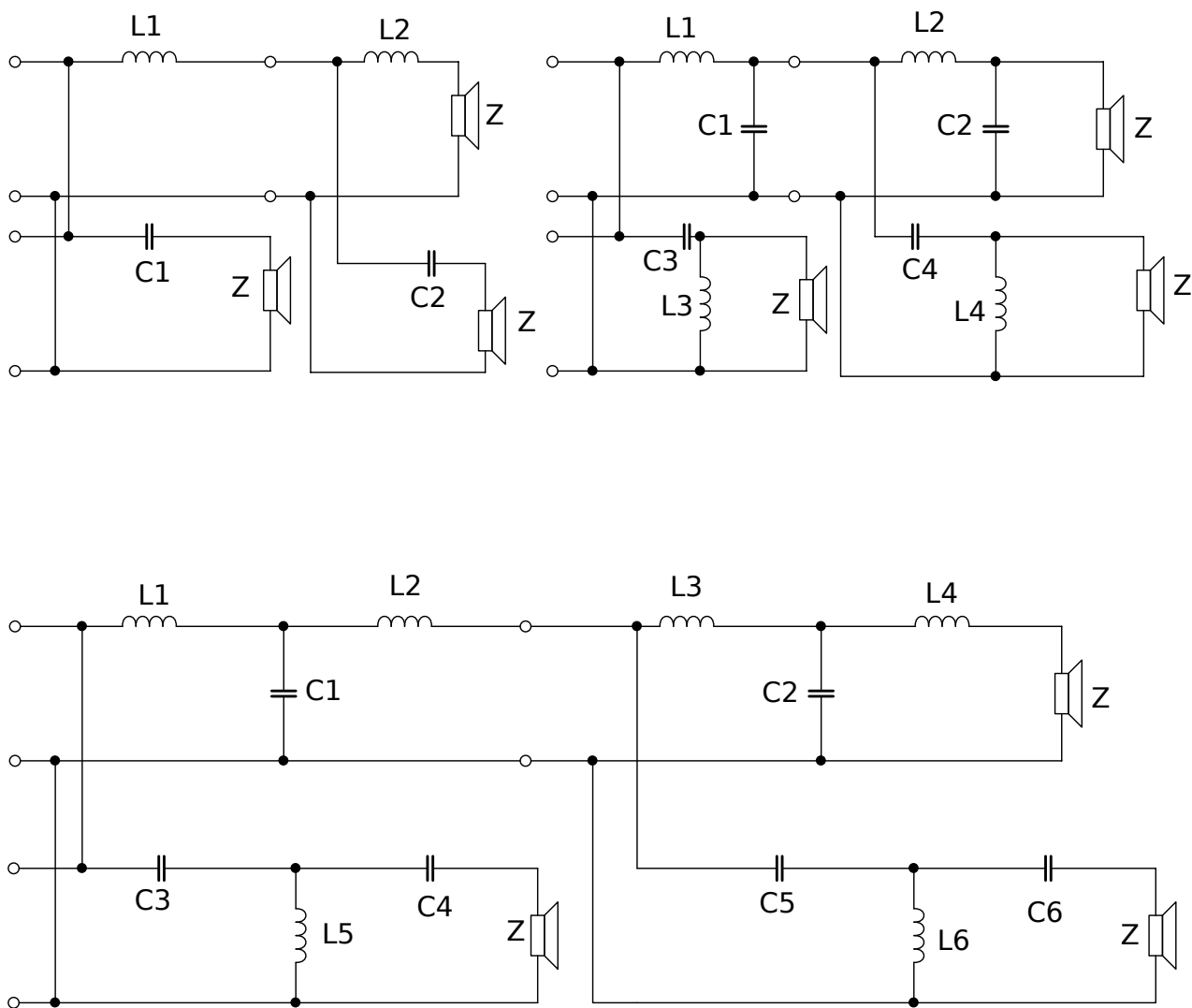


Obr. A.1: Dvoupásmové výhybky 1. , 2. a 3. řádu

## A.2 Třípásmové výhybky

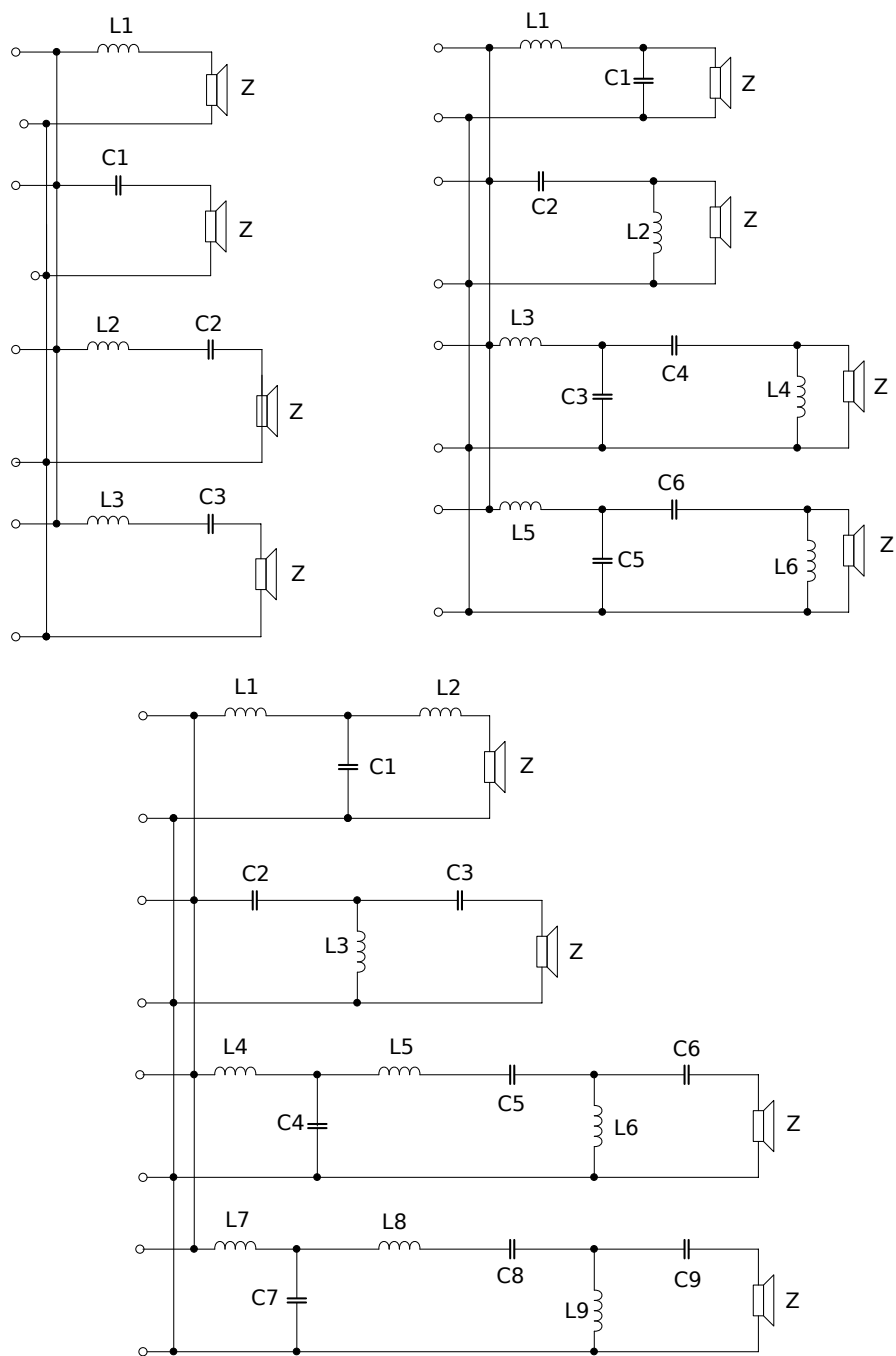


Obr. A.2: Třípásmové výhybky 1. , 2. a 3. řádu



Obr. A.3: Třípásmové výhybky 1. , 2. a 3. řádu

## A.3 Čtyřpásmové výhybky



Obr. A.4: Čtyřpásmové výhybky 1. , 2. a 3. řádu

# Příloha B

## Rozsahy indukčností a kapacit

V následujících tabulkách jsou zobrazeny hodnoty tlumivek a kondenzátorů pro různá zapojení a různá frekvenční pásma.

	2-pásmové		3-pásmové				4-pásmové		
	f [Hz]	L [uH]	f [Hz]	L [uH]	f [Hz]	L [uH]	f [Hz]	L [uH]	
Horní propust	4 Ω	1k – 10k	1274 – 48	7,4k – 10,55k	271 – 46	2k-10k	637 – 48	3,4k – 7400k	375 – 69
	8 Ω	1,5k – 10k	1698 – 96	7,4k – 10,55k	345 – 91	2k-10k	1274 – 95	3,4k – 7400k	749 – 137
Dolní Propust	4 Ω	1k – 10k	1274 – 32	700-2k	1819 – 159	700-2k	1819 – 159	700 - 2k	1819 – 159
	8 Ω	1,5k – 10k	1698 - 64	1,3k-2k	1959 – 319	1,3k-2k	1959 – 319	1,3k-2k	1959 – 319
Pásmová propust	4 Ω			2k-7,4k	1678 – 20			700 - 2,1k	1486 – 20
	8 Ω			2k-7,4k	1779 – 10			700 – 3,4k	2153 – 10
Horní propust 2	4 Ω					2k-10k	1819 – 239		
	8 Ω					2k-10k	1959 – 478		
Dolní Propust 2	4 Ω					700-2k	637 – 32		
	8 Ω					1,3k-2k	1274 – 63		
Pásmová propust 2	4 Ω							3,4k – 7,4k	606 – 10
	8 Ω							3,4k – 7,4k	1168 – 6

**Tab. B.1:** Tabulka hodnot mezních hodnot indukčnosti a frekvencí pro různé topologie výhybek

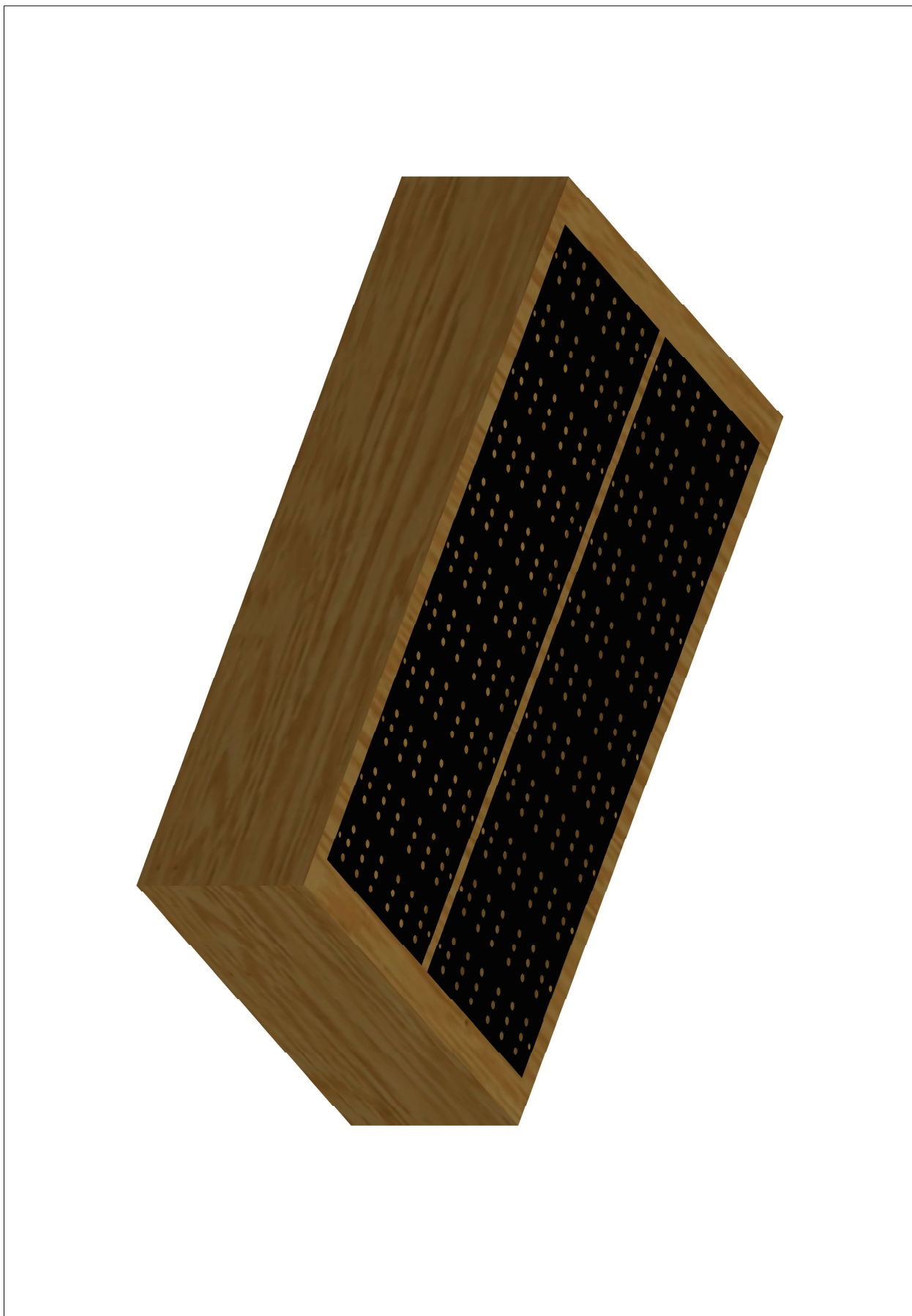


	2-pásmové		3-pásmové				4-pásmové	
	f [Hz]	C [uF]	f [Hz]	C [uF]	f [Hz]	C [uF]	f [Hz]	C [uF]
Horní propust	4 $\Omega$	2-79,58	7,4k – 10,55k	1,9-16,93	2k-10k	9,95-113,68	3,4k – 7400k	2,84-23,41
	8 $\Omega$	1-39,79	7,4k – 10,55k	0,94-5,38	2k-10k	4,97-30,61	3,4k – 7400k	1,42-11,7
Dolní Propust	4 $\Omega$	2-53,05	700-2k	9,95-75,79	700-2k	9,95-75,79	700 - 2k	9,95-75,79
	8 $\Omega$	1-17,68	1,3k-2k	4,97-20,4	1,3k-2k	4,97-20,4	1,3k-2k	4,97-20,4
Pásmová propust	4 $\Omega$		2k-7,4k	2,1-135,45			700 - 2,1k	6,38-303,15
	8 $\Omega$		2k-7,4k	1,05-172,06			700 – 3,4k	3,19-636,62
Horní propust 2	4 $\Omega$				2k-10k	1,97-39,79		
	8 $\Omega$				2k-10k	0,98-19,89		
Dolní Propust 2	4 $\Omega$				700-2k	1,97-26,53		
	8 $\Omega$				1,3k-2k	0,98-13,26		
Pásmová propust 2	4 $\Omega$						3,4k – 7,4k	3,73-187,25
	8 $\Omega$						3,4k – 7,4k	1,9-374,48

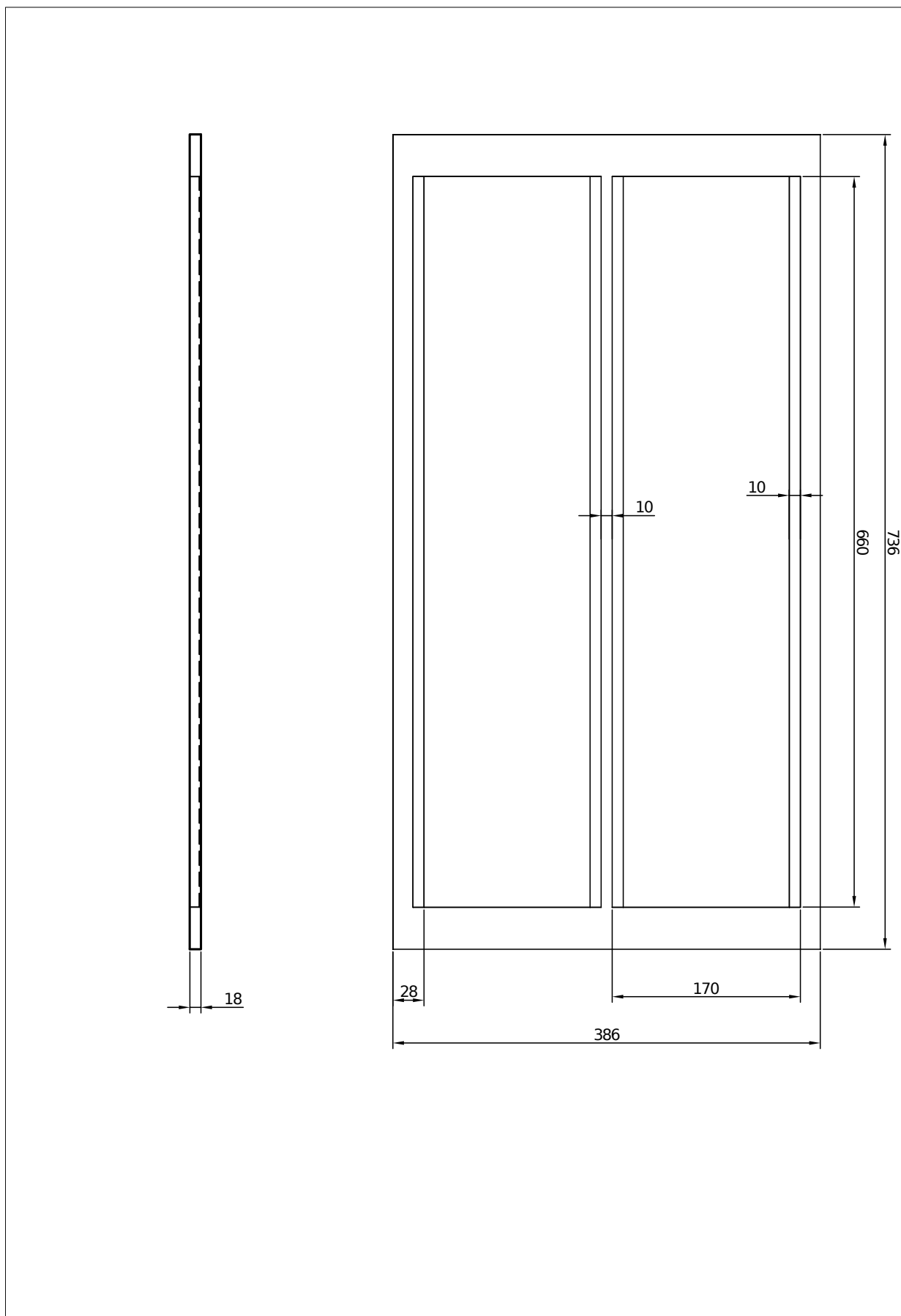
**Tab. B.2:** Tabulka hodnot mezních hodnot kapacit a frekvencí pro různé topologie výhybek

# **Příloha C**

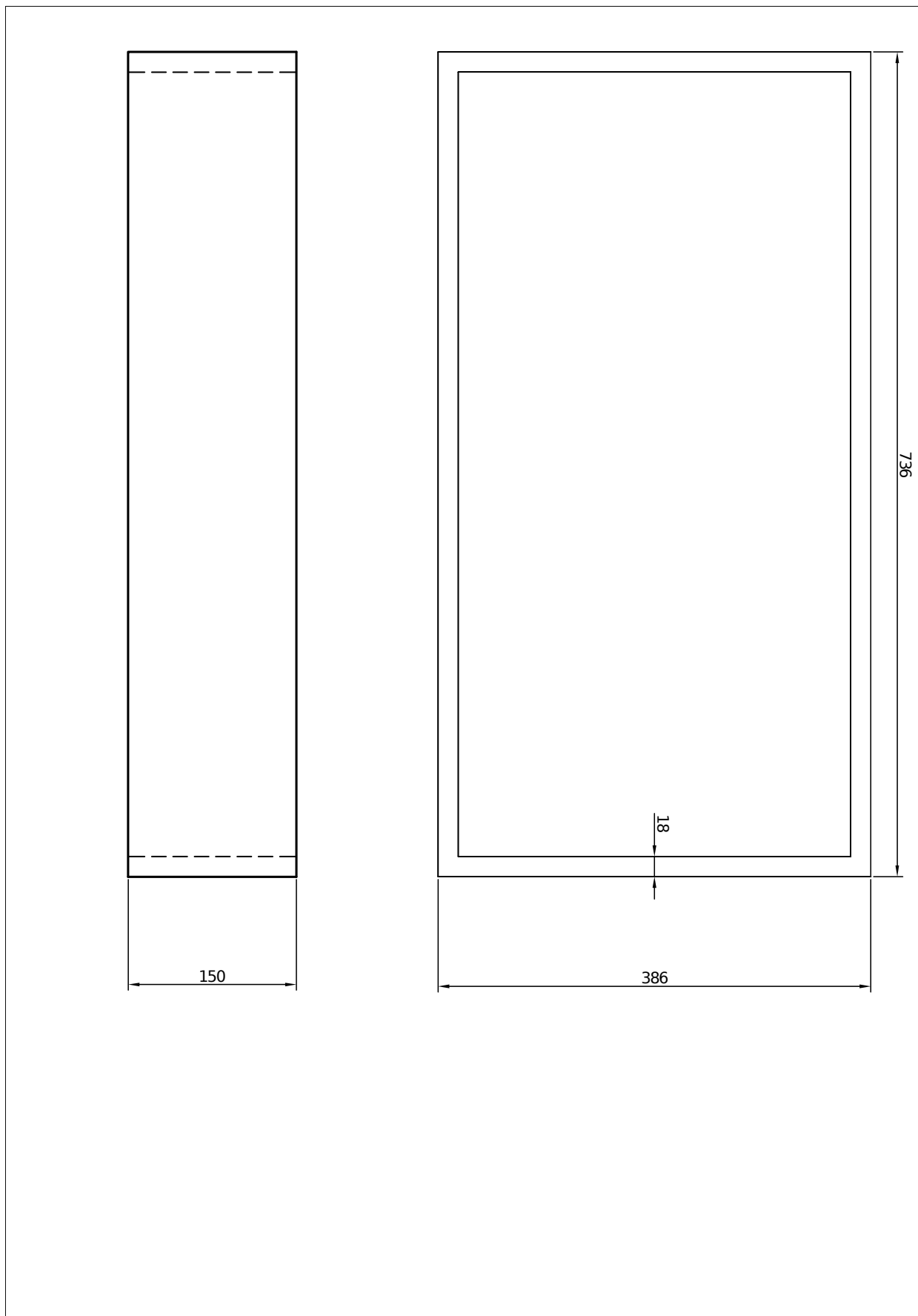
## **Modely a výkresy bedýnek**



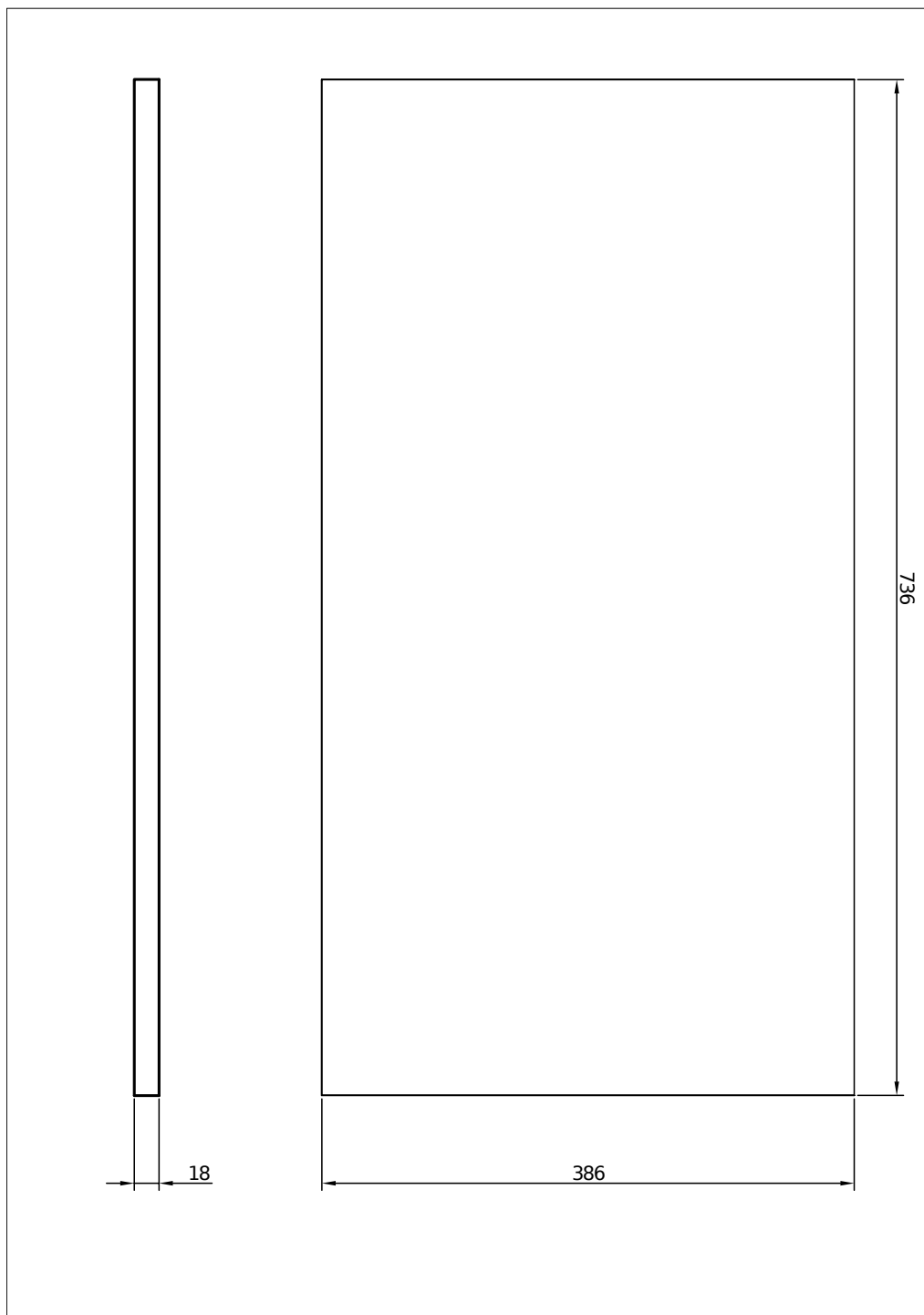
**Obr. C.1:** Model bedýnky č. 1



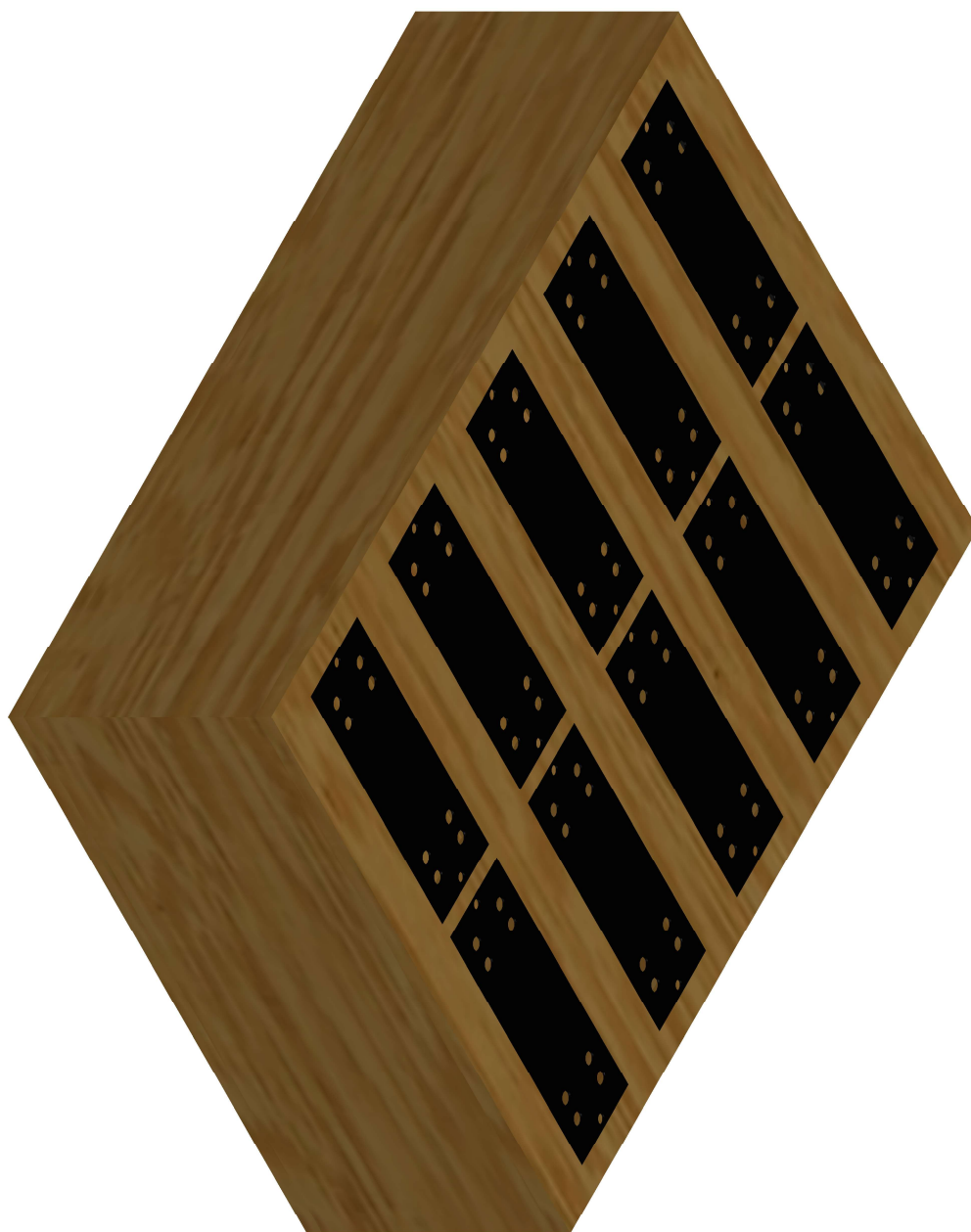
Obr. C.2: Víko bedýnky č. 1



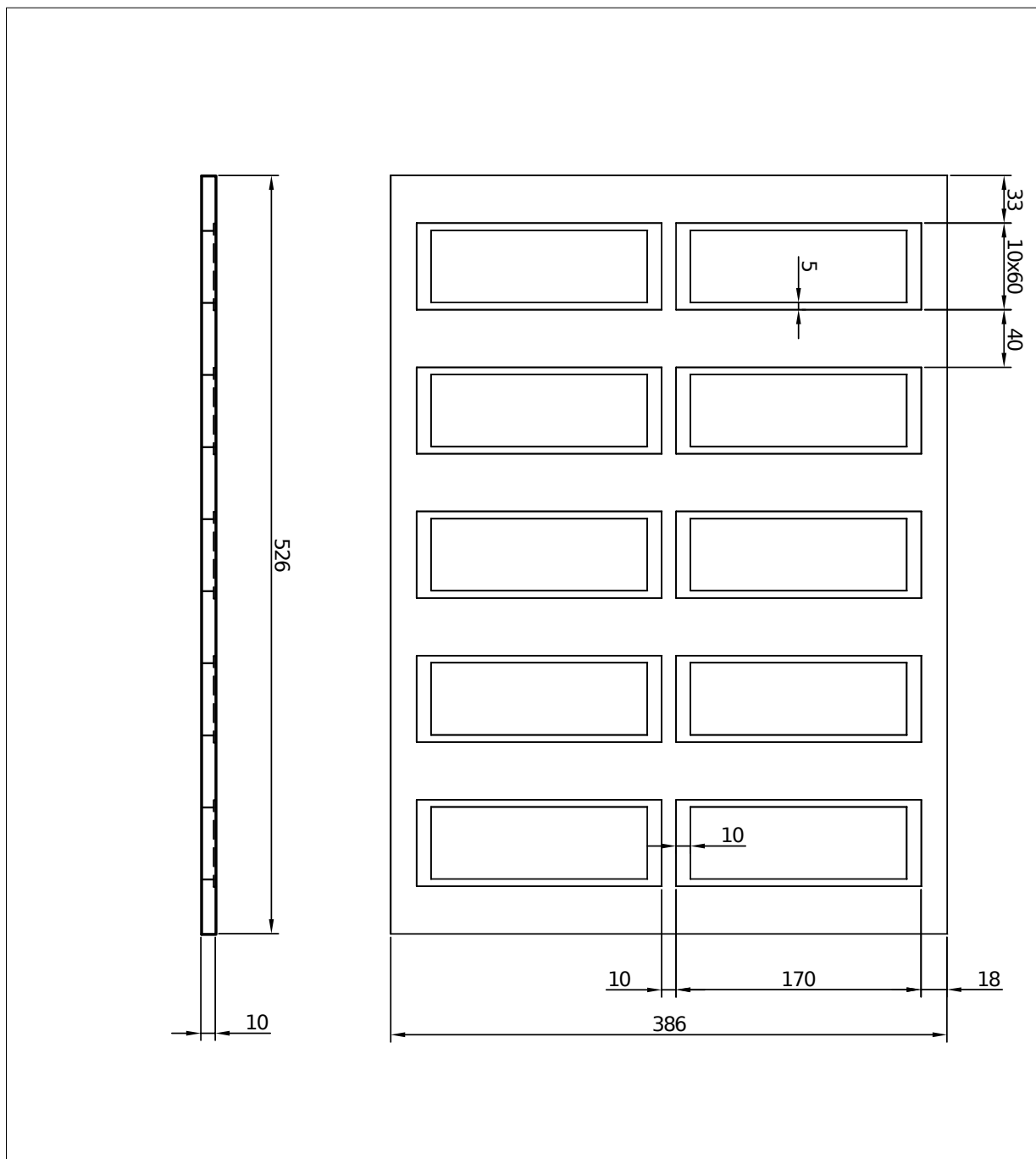
Obr. C.3: Stěny bedýnky č. 1



Obr. C.4: Dno bedýnky č. 1

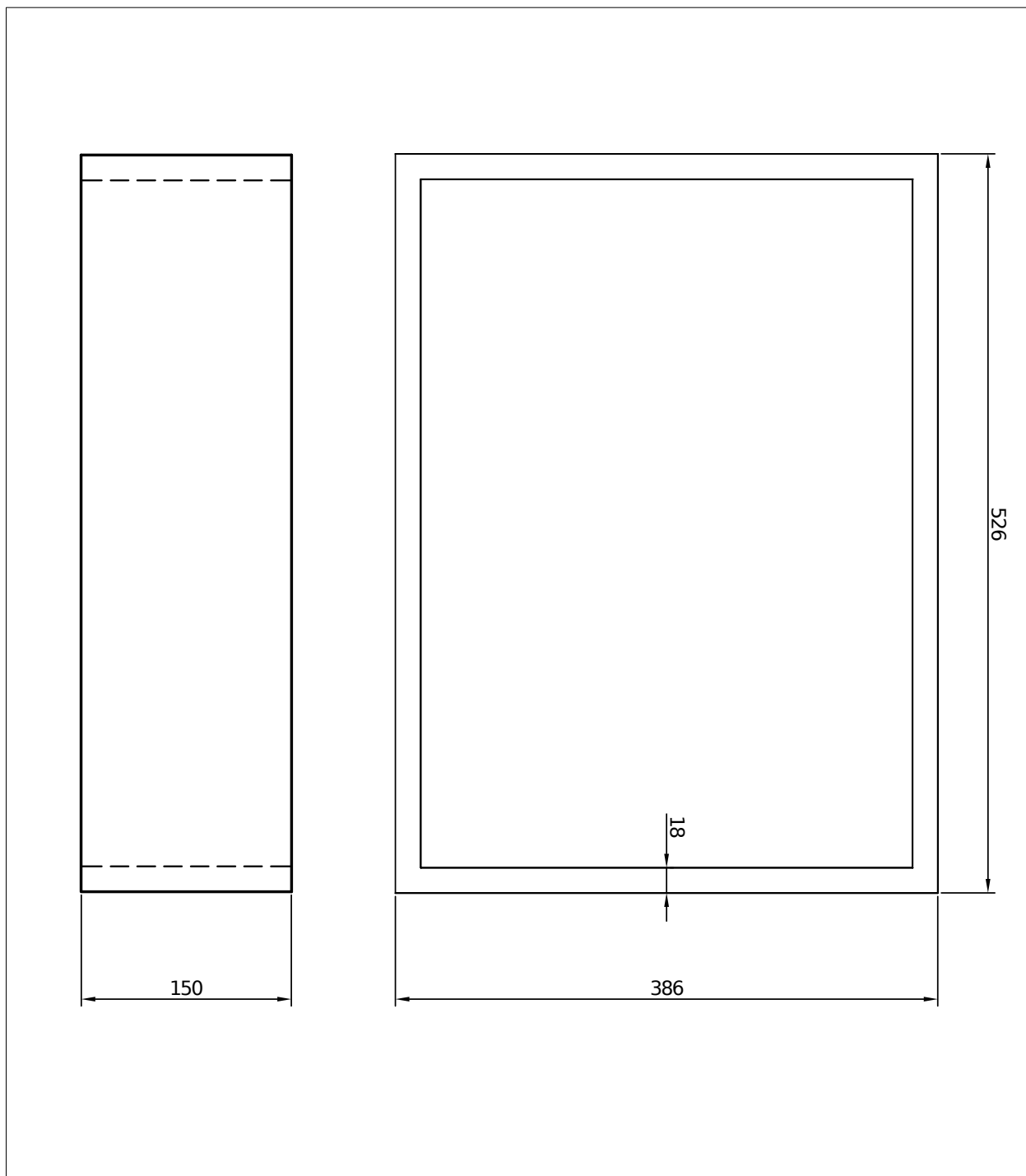


**Obr. C.5:** Model bedýnky č. 2

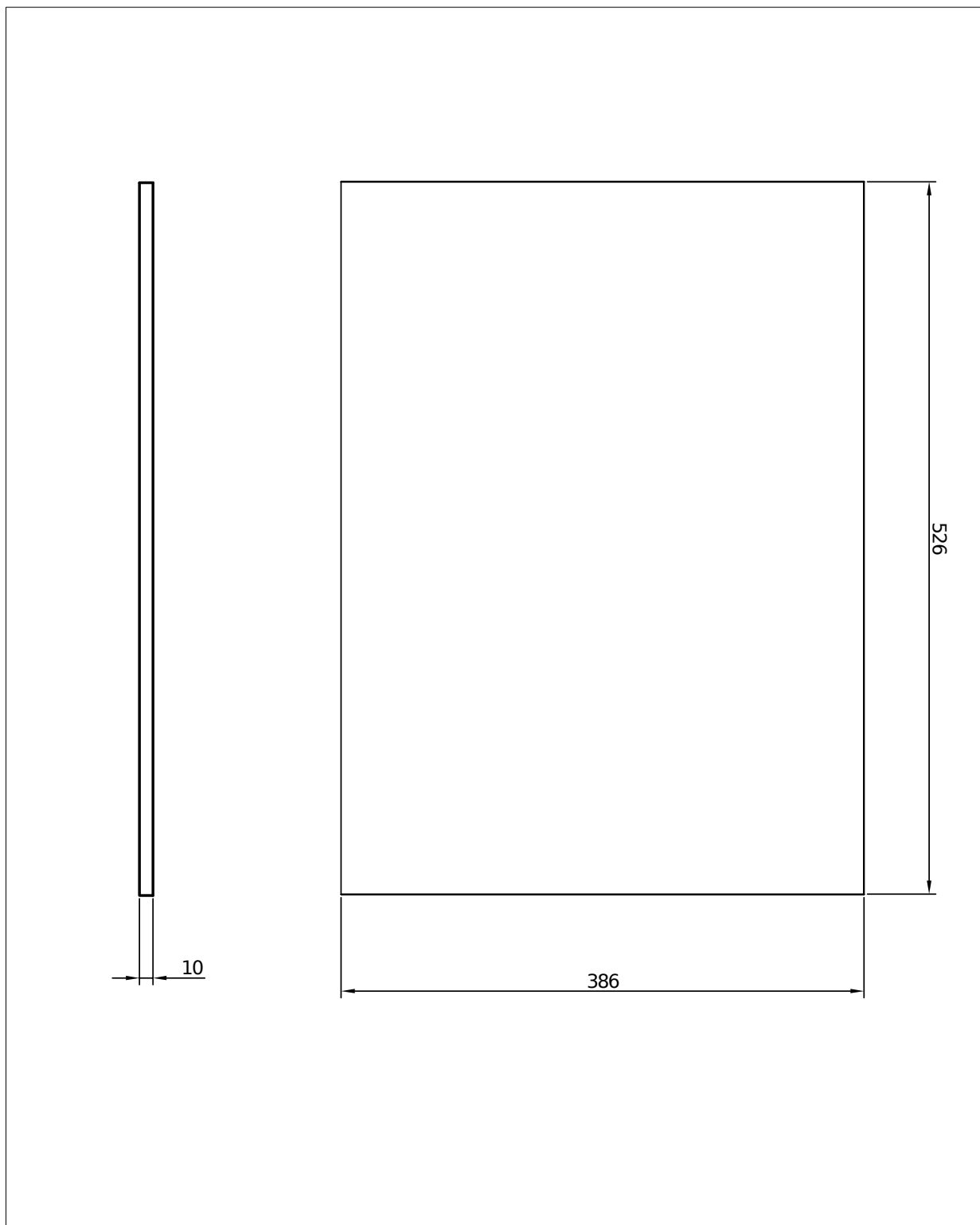


Obr. C.6: Viko bedýnky č. 2





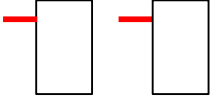
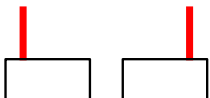

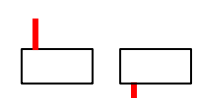
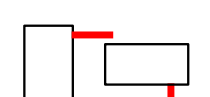

Obr. C.7: Stěny bedýnky č. 2



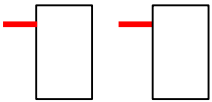
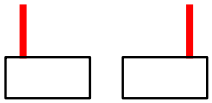
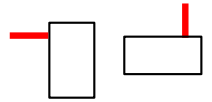
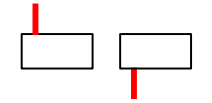
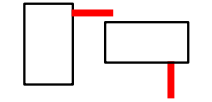
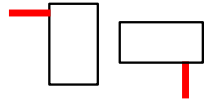
**Obr. C.8:** Dno bedýnky č. 2

# Příloha D

## Tabulky měření vzájemné indukčnosti

Měření vzájemné indukčnosti RLC metrem						
Natočení	$L_{1V}$ [uH]	$L_{2V}$ [uH]	$L_A$ [uH]	$L_B$ [uH]	$M_X$ [uH] 8 cm od sebe	$L_{1V}/M_X$ [%]
	20	30	39,6	37,9	0,425	2,13
	100	100	202,2	189,2	3,25	3,25
	300	300	611,7	570	10,425	3,48
	600	1000	1684	1455,2	57,2	9,53
	20	30	39,2	38,1	0,275	1,38
	100	100	198,2	195,2	0,75	0,75
	300	300	600	578,7	5,325	1,78
	600	1000	1622	1556,1	16,475	2,75
	20	30	39,2	39,1	0,025	0,13
	100	100	195,6	195,1	0,125	0,13
	300	300	592,6	588,4	1,05	0,35
	600	1000	1611	1590	5,25	0,88
	20	30	38,9	38,7	0,05	0,25
	100	100	197,8	195,3	0,625	0,63
	300	300	595,8	582,5	3,325	1,11
	600	1000	1611	1542	17,25	2,88
	20	30	39,6	38,9	0,175	0,88
	100	100	198,2	197	0,3	0,30
	300	300	593	586,9	1,525	0,51
	600	1000	1597,7	1564	8,425	1,40
	20	30	39,3	39,1	0,05	0,25
	100	100	197	196,6	0,1	0,10
	300	300	592	591	0,25	0,08
	600	1000	1588,5	1546,5	10,5	1,75

**Tab. D.1:** Tabulka naměřených vzájemných indukčností při vzdálenosti tlumivek 8cm

Měření vzájemné indukčnosti RLC metrem						
Natočení	$L_{1V}$ [uH]	$L_{2V}$ [uH]	$L_A$ [uH]	$L_B$ [uH]	$L_X$ [uH] téměř u sebe	$L_{1V}/M_X$ [%]
	20	30	53,5	45	2,125	10,63
	100	100	218,7	174,2	11,125	11,13
	300	300	733,2	450	70,8	23,60
	600	1000	1965	1169	199	33,17
	20	30	50,2	49,2	0,25	1,25
	100	100	201,6	193,8	1,95	1,95
	300	300	617	579,4	9,4	3,13
	600	1000	1633	1510,5	30,625	5,10
	20	30	49,8	49,3	0,125	0,63
	100	100	199	197,5	0,375	0,38
	300	300	603,2	585,2	4,5	1,50
	600	1000	1551,8	1525,2	6,65	1,11
	20	30	50,2	49,1	0,275	1,38
	100	100	201,6	194	1,9	1,90
	300	300	616,3	582	8,575	2,86
	600	1000	1626	1509,9	29,025	4,84
	20	30	49,8	49,3	0,125	0,63
	100	100	199	197,2	0,45	0,45
	300	300	591	587,5	0,875	0,29
	600	1000	1604	1522,7	20,325	3,39
	20	30	49,7	49,2	0,125	0,63
	100	100	197,3	196	0,325	0,33
	300	300	607,7	595,7	3	1,00
	600	1000	1597,7	1582,7	3,75	0,63

**Tab. D.2:** Tabulka naměřených vzájemných indukčností při maximální možné blízkosti