

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

Katedra aplikované elektroniky a telekomunikací

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Pasivní útlumové členy

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
Fakulta elektrotechnická
Akademický rok: 2016/2017

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE
(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **František KORDÍK**
Osobní číslo: **E14B0144P**
Studijní program: **B2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor: **Elektronika a telekomunikace**
Název tématu: **Pasivní útlumové členy**
Zadávací katedra: **Katedra aplikované elektroniky a telekomunikací**

Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

1. Popište zapojení pasivních útlumových členů. Diskutujte vhodnost použití dostupných součástek.
2. Navrhněte útlumové členy dle zadaných parametrů.
3. Navržené členy realizujte a proveďte na nich měření.

Rozsah grafických prací: **podle doporučení vedoucího**

Rozsah kvalifikační práce: **30 - 40 stran**

Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná/elektronická**

Seznam odborné literatury:

Student si vhodnou literaturu vyhledá v dostupných pramenech podle doporučení vedoucího práce.

Vedoucí bakalářské práce:

Ing. Zdeněk Kubík, Ph.D.


Katedra aplikované elektroniky a telekomunikací

Datum zadání bakalářské práce: **14. října 2016**

Termín odevzdání bakalářské práce: **8. června 2017**


Doc. Ing. Jiří Hammerbauer, Ph.D.
děkan




Doc. Dr. Ing. Vjačeslav Georgiev
vedoucí katedry

V Plzni dne 14. října 2016

Abstrakt

Bakalářská práce je zaměřena na pasivní útlumové články. Cílem je návrh a realizace útlumového článku s útlumem 20 dB. Toho je dosaženo pomocí několika variant π a T článků. Nejdříve jsou vypočteny hodnoty rezistorů a zapojení je simulováno v programu LTspice. Poté jsou útlumové články vyrobeny spolu s plechovou krabičkou, která slouží jako stínění. Následně jsou změřeny amplitudové frekvenční charakteristiky článků v pásmu 30MHz až 1,5 GHz.

Klíčová slova

Pasivní útlumové články, π článek, T článek, útlum, měření, simulace

Abstract

The bachelor thesis is focused on passive attenuators. The aim is designed and implemented a 20 dB attenuator. This is achieved by several variants of π and T attenuator. At first, the resistor values are calculated and the calculated attenuator is simulated in the LTspice. Thereafter, the attenuators are made with a tin box which represents shielding. Subsequently, amplitude frequency characteristics of attenuators are measured in the frequency band from 30 MHz to 1.5 GHz.

Key words

Passive attenuators, π -pad attenuator, T-pad attenuator, attenuation, measurement, simulation

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou/bakalářskou práci vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů uvedených v seznamu, který je součástí této diplomové práce.

Dále prohlašuji, že veškerý software, použitý při řešení této bakalářské/diplomové práce, je legální.



.....
podpis

V Plzni dne 7.6.2017

František Kordík

Obsah

OBSAH	1
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK	2
ÚVOD	3
PASIVNÍ ÚTLUMOVÉ ČLÁNKY – TEORIE	4
1.1 ZÁKLADNÍ TEORIE DVOJBRANŮ.....	4
1.1.1 Rozdělení dvojbranů.....	5
1.1.2 Charakteristické matice dvojbranů.....	7
1.2 VÝPOČTY REZISTORŮ PRO POŽADOVANÝ ÚTLUM.....	9
1.2.1 Výběr součástek pro útlum 20 dB.....	10
2 SIMULACE V LTSPICE	12
3 PRAKTICKÁ ČÁST	14
3.1 NÁVRH DESEK PLOŠNÝCH SPOJŮ.....	14
3.2 VÝROBA DESEK PLOŠNÝCH SPOJŮ.....	15
3.3 VÝROBA KRABÍČKY PRO PLOŠNÉ SPOJE.....	16
3.4 MĚŘENÍ FREKVENČNÍCH CHARAKTERISTIK.....	17
3.5 NAMĚŘENÉ FREKVENČNÍ CHARAKTERISTIKY.....	18
ZÁVĚR	22
SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ	24

Seznam symbolů a zkratek

$\overline{U}_1, \overline{U}_2$	Fázor napětí [V]
$\overline{I}_1, \overline{I}_2$	Fázor proudu [A]
A.....	Přenos dvojbranu [dB]
B.....	Útlum dvojbranu [dB]
U_1, U_2	Napětí na vstupu/výstupu dvojbranu [V]
P_1, P_2	Výkon na vstupu/výstupu dvojbranu [W]
f.....	Frekvence [Hz]
R_1, R_2	Hodnoty rezistorů [Ω]
\overline{Z}	Impedanční matice
\overline{Y}	Admitanční matice
\overline{S}	Vysokofrekvenční matice
$z_{11}, z_{12}, z_{21}, z_{22}$	Prvky impedanční matice
$y_{11}, y_{12}, y_{21}, y_{22}$	Prvky admitanční matice
$s_{11}, s_{12}, s_{21}, s_{22}$	Prvky vysokofrekvenční matice
a_1, a_2	Komplexní napěťové vlny působící na bránu dvojbranu
b_1, b_2	Komplexní napěťové vlny odražené od brány dvojbranu
U_{i1}, U_{i2}	Napětí zdrojových vln [V]
U_{r1}, U_{r2}	Napětí odražených vln [V]
R_0	Impedance konektoru [Ω]
SMD.....	Součástky určené pro povrchovou montáž

Úvod

Bakalářská práce se zabývá pasivními útlumovými členy. Zkoumá teorii dvojbranů: jejich rozdělení, útlum, charakteristické matice. Poté přechází k samostatným útlumovým článkům. Cílem je navrhnout článek s útlumem 20 dB, vyrobit ho a prozkoumat jeho chování i na vyšších frekvencích. K tomu byly zvoleny dva typy článků s odlišnou topologií: π a T.

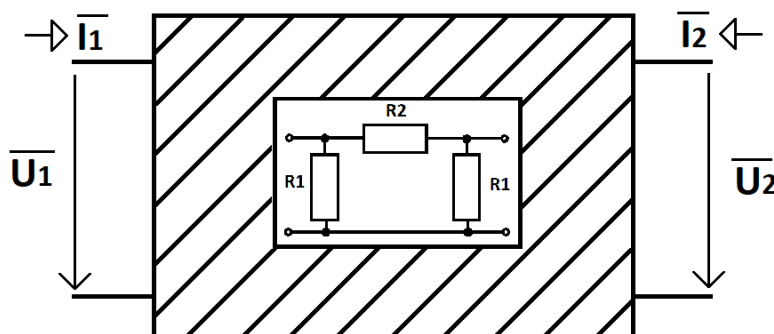
Nejdříve je třeba vybrat vhodné součástky a odsimulovat zapojení na počítači v programu LTspice. V případě úspěšné simulace navrhnout plošný spoj a následně ho vyrobit. Kvůli vysokým kmitočetům bude nutné vyrobit plechovou krabičku, která zajistí stínění útlumového článku. Následuje zprovoznění výsledného výrobku a měření amplitudových frekvenčních charakteristik spektrálním analyzátozem. Z naměřených hodnot následně vytvořit grafy a zhodnotit chování výrobku v proměřeném pásmu.

Pasivní útlumové články – teorie

Pasivní útlumový článek je rezistorová síť, která slouží ke snížení úrovně signálu. Články se zapojují mezi zdroj a zátěž, přičemž hodnota útlumu je pevně stanovena. Složením pouze z rezistorů docílíme toho, že utlumený signál netrpí zkreslením nebo fázovým posunem. Článek lze použít pro útlum (zvýšení rozsahu měřících přístrojů), přizpůsobení impedance (oscilátoru, zesilovače) nebo izolaci mezi zdrojem a zátěží. [1]

1.1 Základní teorie dvojbranů

Dvojbran – libovolný obvod, který má dva páry svorek (vstupní a výstupní). Na obr. 1 je zobrazeno jeho obecné schéma. K rozboru chování obvodu ho stačí popsat pouze vztahy mezi napětími a proudy na vstupu a výstupu. Napětí a proudy uvnitř dvojbranu jsou z pohledu jeho vnějšího popisu nepodstatné. Vnitřní struktura dvojbranu může být jakákoliv. [2]



Obr. 1 Obecné schéma dvojbranu

- *Přenos dvojbranu A*

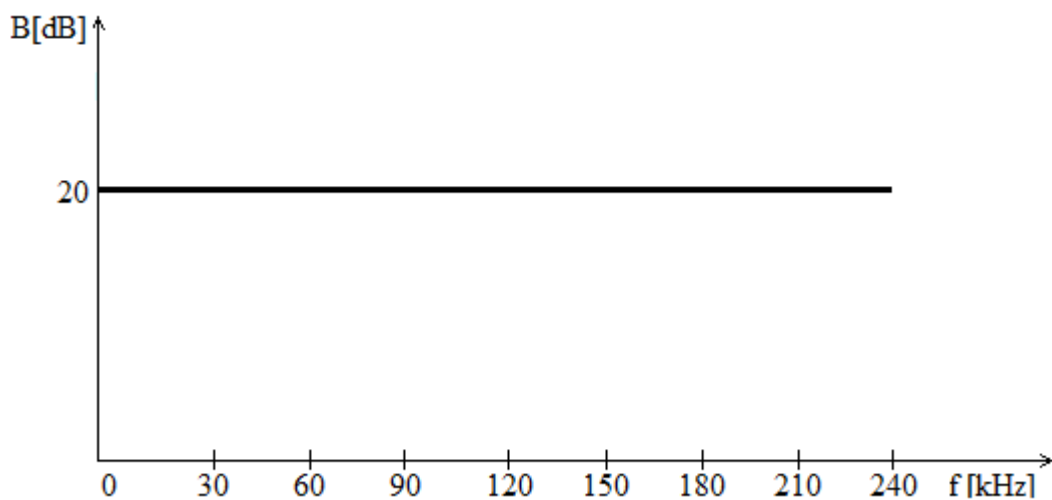
Dává informaci o tom, jakým způsobem dvojbran mění signál. Jedná se o poměr veličiny na vstupu a výstupu, většinou vyjádřen v decibelech. Rovnice (1) popisuje jeho výpočet z napětí a rovnice (2) pomocí výkonů. Dvojbran vstupní signál zesiluje, pokud je $A[\text{dB}] > 0$. V tomto případě přenos nazýváme zisk. Naopak při $A[\text{dB}] < 0$ je signál zeslaben a přenos nazýváme útlum. Útlum se značí B a jedná se o kladné číslo. Pokud např. $B = 20 \text{ dB}$, potom $A = -20 \text{ dB}$. [3]

$$B = 20 \log \frac{U_2}{U_1} \text{ [dB]} \quad (1)$$

$$B = 10 \log \frac{P_2}{P_1} \text{ [dB]} \quad (2)$$

- **Amplitudová frekvenční charakteristika**

Obecně se jedná o závislost amplitudy na frekvenci. V našem případě amplitudu znázorňuje útlum B. Příklad amplitudové frekvenční charakteristiky pasivního útlumového članku s útlumem 20 dB je vidět na obr. 2.



Obr. 2 Amplitudová frekvenční charakteristika

1.1.1 Rozdělení dvojbranů

Podle fyzikální struktury:

- **Lineární a nelineární**

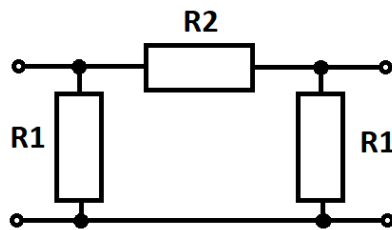
Lineární obsahují pouze lineární prvky. Nelineární obsahují i nelineární prvky, například: diody, transistory, operační zesilovače.

- **Aktivní a pasivní**

Aktivní obsahují zdroje, pasivní pouze prvky: rezistory, cívky, kondenzátory. Aktivní se dále dělí na autonomní (obsahují nezávislé zdroje napětí a proudu, můžou trvale dodávat činný výkon) a neautonomní (s řízenými zdroji).

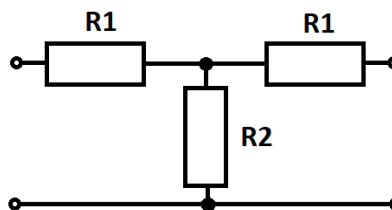
Podle topologie:

- **Π článek**



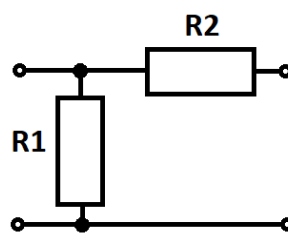
Obr. 3 π článek

- **T článek**



Obr. 4 T článek

- **Γ článek**



Obr. 5 Γ článek

1.1.2 Charakteristické matice dvojbranů

Vztahy mezi vstupními a výstupními veličinami lze vyjádřit pomocí charakteristických matic. Prvky matic lze zjistit z rovnic obvodu nebo ze stavu naprázdno (nezatížené svorky) a nakrátko (zkratované svorky) - výpočtem nebo měřením.

- **Impedanční matice Z :** $U_1, U_2 = f(I_1, I_2)$

$$\begin{bmatrix} U_1 \\ U_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} z_{11} & z_{12} \\ z_{21} & z_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$\bar{Z} = \begin{bmatrix} z_{11} & z_{12} \\ z_{21} & z_{22} \end{bmatrix} \quad (4)$$

- **Admitanční matice Y :** $I_1, I_2 = f(U_1, U_2)$

$$\begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} y_{11} & y_{12} \\ y_{21} & y_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_1 \\ U_2 \end{bmatrix} \quad (5)$$

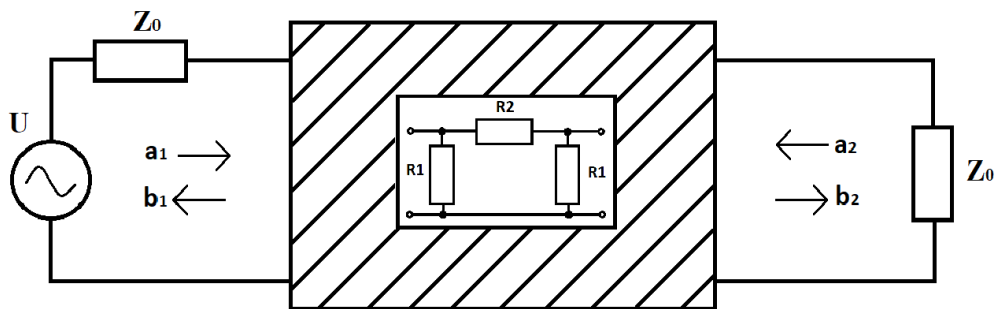
$$\bar{Y} = \begin{bmatrix} y_{11} & y_{12} \\ y_{21} & y_{22} \end{bmatrix} \quad (6)$$

U symetrických dvojbranů (π - příčně, T - podélně) se $z_{11} = z_{22}$ ($y_{11} = y_{22}$). Pokud dvojbran obsahuje pouze pasivní prvky, je reciprocitní $z_{12} = z_{21}$ ($y_{12} = y_{21}$). [2]

- **Vysokofrekvenční matice S**

Na vysokých frekvencích není možné používat výše zmíněné parametry (z , y). K charakterizaci proto využíváme parametry s . Při uvedení do stavů nakrátko a naprázdno by mohlo docházet k oscilacím a výsledky by nebyly odpovídající. Nelze také sledovat výstup v závislosti na vstupu, poměr napětí a proud je závislý na pozici v obvodu. Je nutné vyslat zdrojovou vlnu a sledovat vlnu postupnou a odraženou. Pro změření těchto parametrů je potřeba zdroj vln a zátěž, připojené pomocí nízkoztrátových přenosových vedení. Tím se zamezí oscilacím a tyto parametry lze použít pro charakterizaci vysokofrekvenčních

pasivních i aktivních prvků. Díky přenosovému vedení lze měřit parametry v určité vzdálenosti od dvojbranu. Toto se hodí, pokud je měřené zařízení hůře přístupné. Je třeba zavést nové proměnné a_i , b_i . Jsou to normalizované komplexní napěťové vlny působící na bránu dvojbranu a odražené od brány dvojbranu. Na obr. 6 je vidět schéma dvojbranu s naznačenými zdrojovými a odraženými vlnami.



Obr. 6 Dvojbran se zdrojovými a odraženými vlnami

Zobecněné nezávislé parametry (a_i) a závislé parametry (b_i) popisují následující rovnice:

$$a_1 = \frac{U_1 + I_1 Z_0}{2\sqrt{Z_0}} = \frac{U_{i1}}{\sqrt{Z_0}} \quad (7)$$

$$a_2 = \frac{U_2 + I_2 Z_0}{2\sqrt{Z_0}} = \frac{U_{i2}}{\sqrt{Z_0}} \quad (8)$$

$$b_1 = \frac{U_1 - I_1 Z_0}{2\sqrt{Z_0}} = \frac{U_{r1}}{\sqrt{Z_0}} \quad (9)$$

$$b_2 = \frac{U_2 - I_2 Z_0}{2\sqrt{Z_0}} = \frac{U_{r2}}{\sqrt{Z_0}} \quad (10)$$

U_{i1} , U_{i2} jsou napětí zdrojových vln na vstupní/výstupní bráně a U_{r1} , U_{r2} jsou napětí vln odražených od vstupní/výstupní brány. Charakteristická matice vypadá takto:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{b}_1 \\ \mathbf{b}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{s}_{11} & \mathbf{s}_{12} \\ \mathbf{s}_{21} & \mathbf{s}_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{a}_1 \\ \mathbf{a}_2 \end{bmatrix} \quad (11)$$

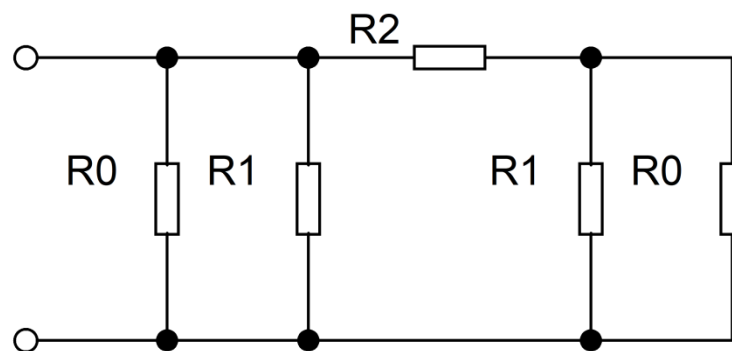
$$\bar{\mathbf{S}} = \begin{bmatrix} \mathbf{s}_{11} & \mathbf{s}_{12} \\ \mathbf{s}_{21} & \mathbf{s}_{22} \end{bmatrix} \quad (12)$$

Parametry s_{11} a s_{21} se stanoví připojením impedančně přizpůsobené zátěže na výstup dvojbranu ($a_2 = 0$). Připojením přizpůsobené zátěže na vstup můžeme určit parametry s_{22} a s_{12} ($a_1 = 0$). [4]

1.2 Výpočty rezistorů pro požadovaný útlum

Hodnoty rezistorů R_1 a R_2 lze snadno vypočítat pomocí požadovaného útlumu B a impedance R_0 . Výsledný vztah je popsán pro π článek rovnicemi (13), (14) a výpočet pro T článek zobrazují rovnice (15), (16). Impedance R_0 představuje impedanci konektoru, který se v našem případě rovná 50Ω na vstupu i výstupu. Níže jsou zobrazena schémata pro odvození vztahů u obou článků.

- *II článek*

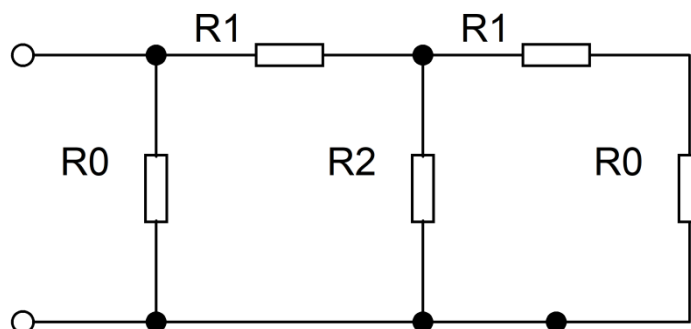


Obr. 7 Schéma pro odvození vztahu pro výpočet rezistorů π článku

$$R_1 = \frac{(B + 1)R_0}{B - 1} \quad [\Omega] \quad (13)$$

$$R_2 = \frac{(B^2 - 1)R_0}{2B} \quad [\Omega] \quad (14)$$

- **T článek**



Obr. 8 Schéma pro odvození vztahu pro výpočet rezistorů T článku

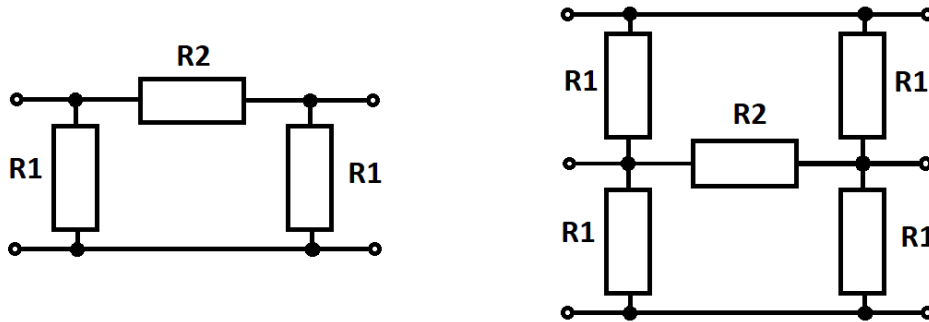
$$R_1 = \frac{(B - 1)R_0}{B + 1} \quad [\Omega] \quad (15)$$

$$R_2 = \frac{2LB}{(B^2 - 1)} \quad [\Omega] \quad (16)$$

1.2.1 Výběr součástek pro útlum 20 dB

Nejdříve bylo nutné vypočítat hodnoty rezistorů pro oba články. Kromě hodnot u klasických článků byly vypočteny i hodnoty pro články symetrické, kde jsou rezistory spojené paralelně. Varianty útlumových článků jsou popsány na obrázcích 9 a 10. Vypočtené hodnoty byly porovnány s vyráběnými hodnotami rezistorů řady E12. Po výběru nejbližších hodnot je nutné zadat je zpět do vzorce pro výpočet útlumu a ověřit, jestli se zásadně nezměnila jeho hodnota. Vzorec pro výpočet útlumu zobrazují rovnice (17) a (18). V níže uvedených tabulkách jsou zobrazeny vypočtené a zvolené hodnoty rezistorů pro jednotlivé články a také jejich vypočtený útlum. Díky paralelnímu spojení vyšel u π článku lépe než u klasického.

• *Π* článek



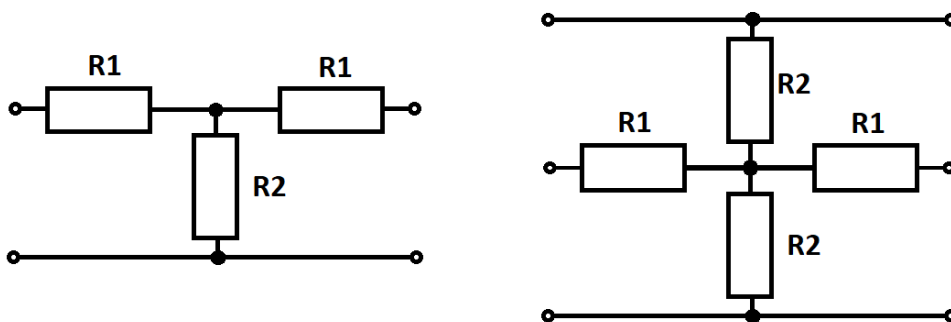
Obr. 9 π článek klasický (vlevo) a symetrický (vpravo)

$$B = 20 \log \left(\frac{\frac{R_0 R_1}{R_0 + R_1}}{\frac{R_0 R_1}{R_0 + R_1} + R_2} \right) \text{ [dB]} \quad (17)$$

Tab. 1 Vypočtené a zvolené rezistory u π článku

Vypočtené		Zvolené pro klasický		Zvolené pro symetrický	
R_1 [Ω]	61	R_1 [Ω]	68	R_1 [Ω]	150
R_2 [Ω]	247,5	R_2 [Ω]	270	R_2 [Ω]	270
B [dB]	20	B [dB]	20,3	B [dB]	20

• *T* článek



Obr. 10 T článek klasický (vlevo) a symetrický (vpravo)

$$B = 20 \log \left(\frac{\frac{R_2(R_0+R_1)}{R_0+R_1+R_2}}{\frac{R_2(R_0+R_1)}{R_0+R_1+R_2} + 2R_1} \right) \text{ [dB]} \quad (18)$$

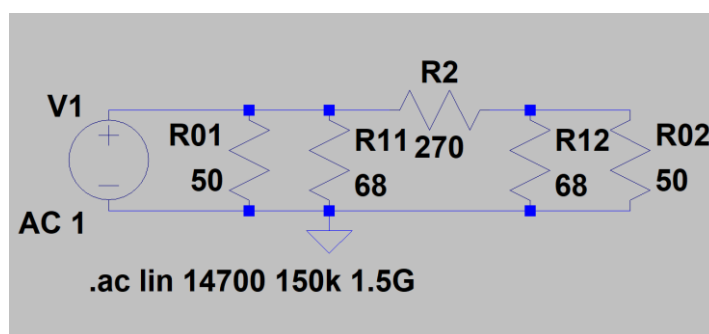
Tab. 2 Vypočtené a zvolené rezistory u T článku

Vypočtené		Zvolené pro klasický		Zvolené pro symetrický	
R ₁ [Ω]	40,9	R ₁ [Ω]	39	R ₁ [Ω]	39
R ₂ [Ω]	10,1	R ₂ [Ω]	10	R ₂ [Ω]	18
B [dB]	20	B [dB]	19,7	B [dB]	20,45

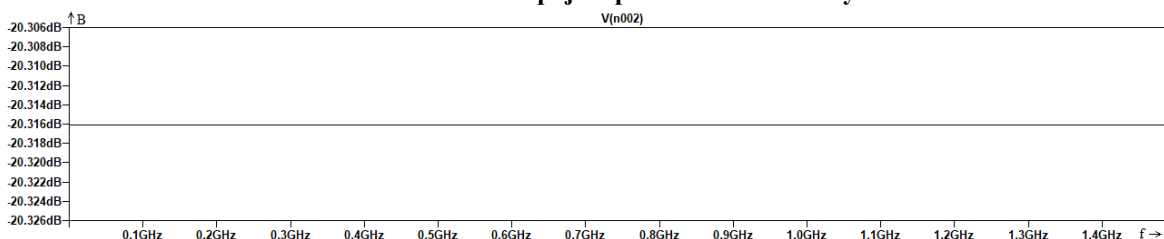
2 Simulace v LTspice

Po vypočtení jednotlivých hodnot rezistorů byla provedena počítačová simulace v programu LTspice, aby byla ověřena správná funkce obvodů. Na obrázcích níže jsou vidět jednotlivá zapojení a jejich amplitudové frekvenční charakteristiky. U π článků se nasimulovaná hodnota útlumu shodovala s vypočteným. Naopak u T článků hodnota přesně neodpovídala, ale lišila se maximálně o 0,2 dB.

- *II* článek klasický

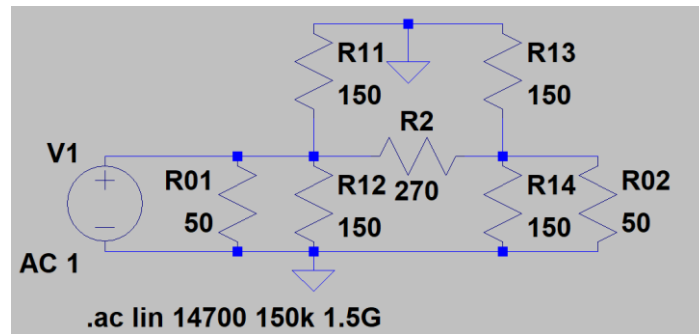


Obr. 11 Schéma zapojení pro π článek klasický

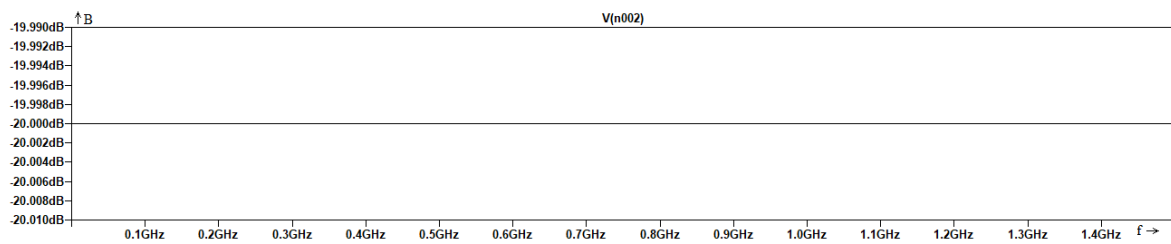


Obr. 12 Frekvenční charakteristika pro π článek klasický

- *Π článek symetrický*

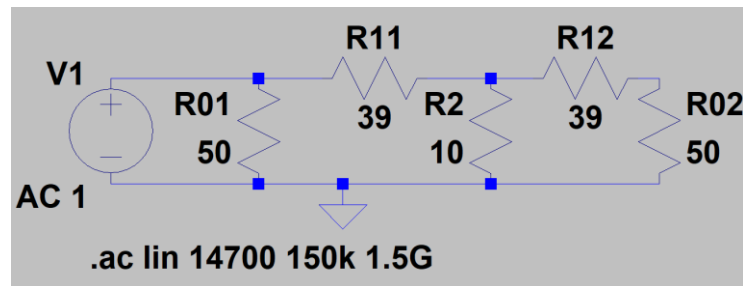


Obr. 13 Schéma zapojení pro π článek symetrický

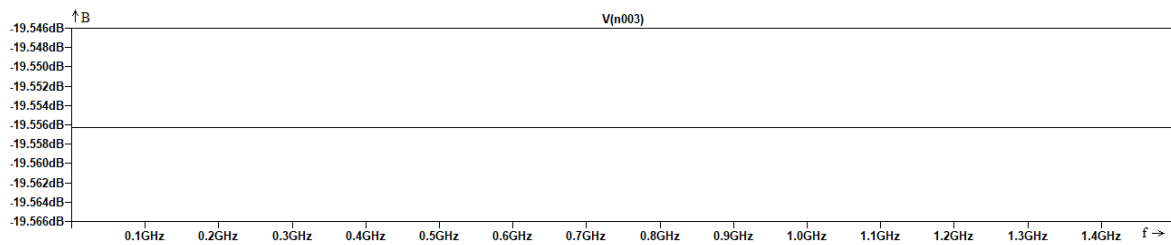


Obr. 14 Frekvenční charakteristika pro π článek symetrický

- *T článek klasický*

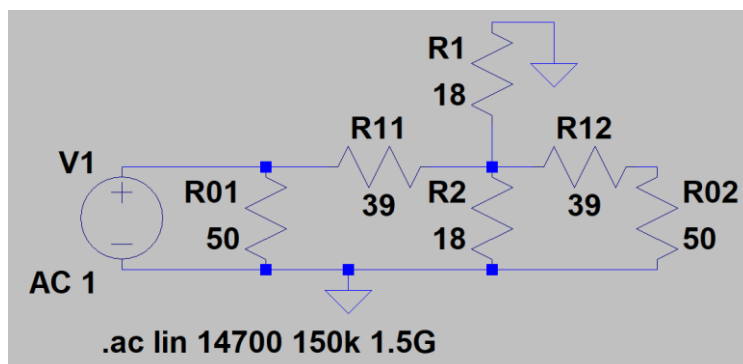


Obr. 15 Schéma zapojení pro T článek klasický

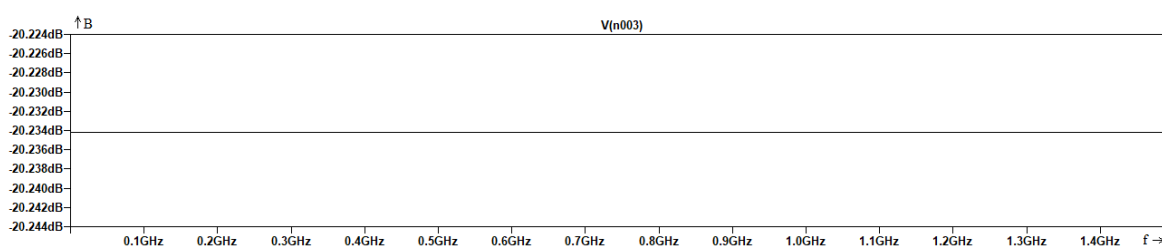


Obr. 16 Frekvenční charakteristika pro T článek klasický

- **T článek symetrický**



Obr. 17 Schéma zapojení pro T článek symetrický



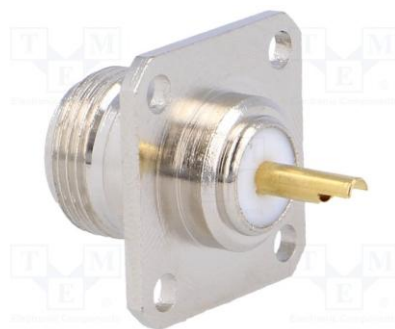
Obr. 18 Frekvenční charakteristika pro T článek symetrický

3 Praktická část

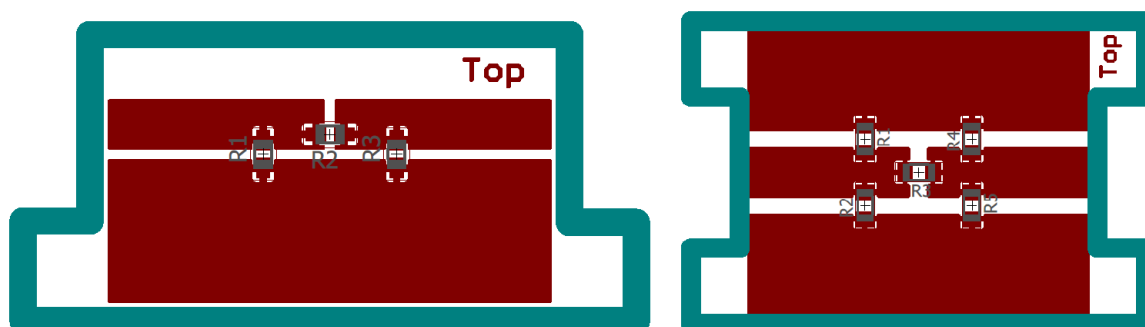
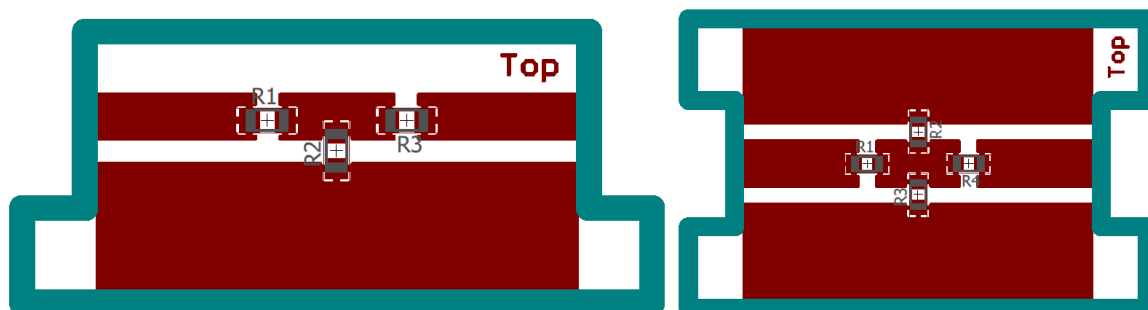
Praktická část se zabývá návrhem a výrobou plošných spojů, výrobou plechové krabičky a následným měřením hotového výrobku.

3.1 Návrh desek plošných spojů

Návrh plošných spojů probíhal v programu Eagle. Jeho základem bylo zvolení velikosti rezistorů a rozměrů výsledné desky. Rezistory byly zvoleny SMD řady 1206, které mají dostatečné rozměry i pro ruční pájení. Rozměry desky plošného spoje byly navrhovány rozměrově vzhledem ke konektorům. Použitý konektor je zobrazen na obr. 19. Bylo nutné udělat výřez pro čelo tohoto konektoru a vyhradit na desce prostor pro připájení jeho výstupku, který slouží pro napájení útlumového článku. Zbytek plochy je využit pro zemnicí plochu, která je následně spojena s kostrou krabičky. Symetrické články mají zemnicí plochy dvě. Výsledné návrhy plošných spojů jsou zobrazeny pro π články na obr. 20 a pro T články na obr. 21.



Obr. 19 Koaxiální konektor N-50 [5]

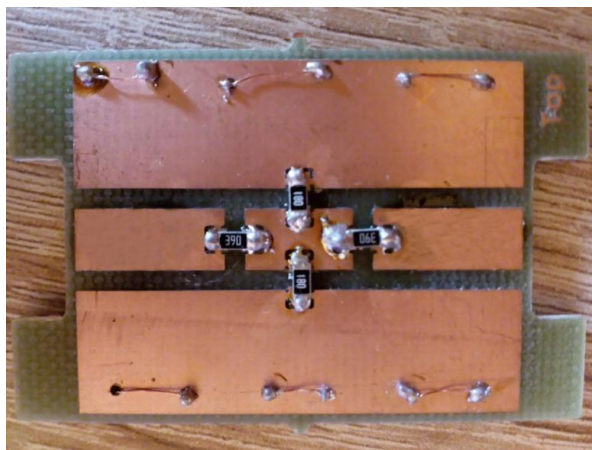
Obr. 20 Plošné spoje π článku: klasický (vlevo) a symetrický (vpravo)

Obr. 21 Plošné spoje T článku: klasický (vlevo) a symetrický (vpravo)

3.2 Výroba desek plošných spojů

Výroba plošných spojů probíhala na frézce LPKF. Tomu se musel přizpůsobit již samotný návrh desek. Frézka je schopna odebrat minimální šířku čáry spoje a izolační mezery 0,2 mm. Jako podklady je třeba vygenerovat gerbery jednotlivých vodivých vrstev. Pro správné oddělení desky z materiálu je nutné nakreslit ořezovou čáru 2 mm. Ke každému článku byly vyrobeny čtyři varianty desek plošných spojů. Jednalo se o klasickou variantu, symetrickou variantu a navíc obě varianty se zemnicí plochou na druhé straně desky. Po výrobě bylo třeba srazit hrany desek smirkovým papírem a zapájet rezistory.

Posledním krokem bylo prokovení oboustranných desek. Byla zvolena varianta provlečení měděného drátku vyvrtanými dírami a následným zapájením. Obr. 22 ukazuje oboustranný symetrický T člunek s prokovením.



Obr. 22 Ukázka prokovené desky plošného spoje

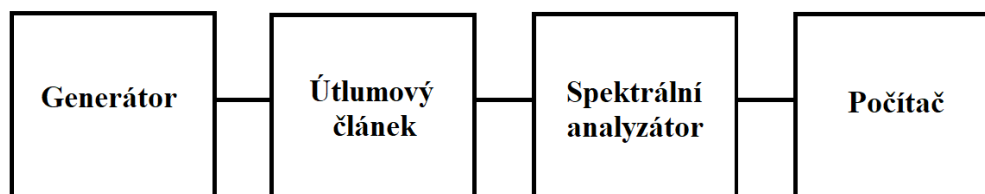
3.3 Výroba krabičky pro plošné spoje

Krabička slouží v jednom případě jako pevnostní prvek celého zařízení, v druhém jako stínění. Byla vyrobena z pocínovaného plechu a jsou k ní přišroubovány konektory. Rozměry jsou o větší, než bylo třeba, kvůli potřebě měnit různé varianty desek. Víka spodní a horní strany jsou odnímatelné, čímž se usnadní manipulace s deskou uvnitř. Ta se jednoduše připájí ke konektorům. Uzemnění desky je docíleno měděným páskem připájeným na vnitřní straně krabičky a jeho následným připájením k desce. U symetrických článků jsou nutné pásky dva. Krabička je zobrazena na obr. 23.



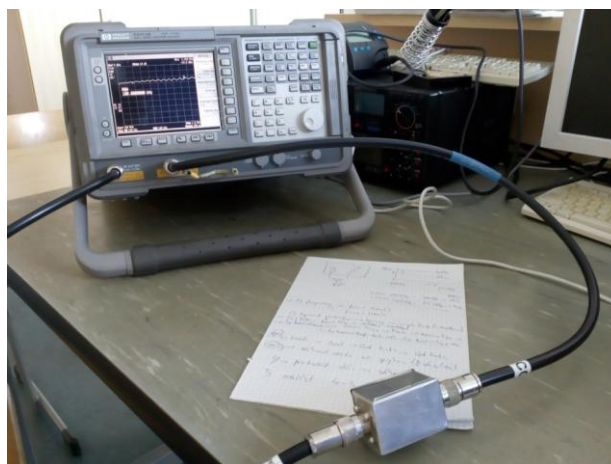
Obr. 23 Krabička pro plošné spoje

3.4 Měření frekvenčních charakteristik



Obr. 24 Blokové schéma pro měření útlumových článků

Při měření bylo zapotřebí změřit frekvenční charakteristiky všech osmi variant útlumových článků. K tomu byl použit spektrální analyzátor HP E4411B, který má frekvenční rozsah 9 kHz až 1,5 GHz. Měření bylo rozděleno do dvou pásem, kde první mělo rozsah 150 kHz – 30 MHz a druhé 30 MHz – 1,5 GHz. První pásmo mělo nastavené rozlišení šířky pásma 10 kHz, druhé 100 kHz. Spektrální analyzátor obsahuje vestavěný generátor, na kterém byla nastavena hodnota amplitudy -10 dBm. Poté se přístroj připojil k počítači přes GPIB rozhraní, aby se mohly všechny naměřené hodnoty stiskem tlačítka exportovat do tabulky v Excelu. Nejdříve byl změřen útlum samotného zapojení bez útlumového článku pomocí spojky v obou měřených pásmech. Ta se zapojila mezi výstup generátoru a měřicí vstup přístroje. Útlum spojky byl zanedbán. Následně jsem místo spojky zapojil krabičku a měnil v ní jednotlivé varianty útlumových článků. Postupně byla zaznamenávána do počítače všechny měření. Poté stačilo odečíst naměřenou hodnotu útlumu článku od útlumu při měření se spojkou a vytvořit graf její závislosti na frekvenci. Měření útlumového článku je zachyceno na obr. 24.



Obr. 25 Měření útlumového článku

3.5 Naměřené frekvenční charakteristiky

Výsledné grafy naměřených amplitudových frekvenčních charakteristik pasivních útlumových článků jsou rozděleny do dvou částí. První část je zobrazena na obr. 27. Jsou zde porovnány charakteristiky všech variant útlumových článků v prvním kmitočtovém pásmu 150 kHz – 30 MHz. Na obr. 28 jsou vidět výsledky druhého kmitočtového pásma 30MHz – 1,5 GHz.

Nejdříve zhodnocení prvního pásma, kde průběhy všech osmi variant útlumových článků mají téměř stejný tvar. Hodnota útlumu se zvyšující frekvencí exponenciálně roste až k frekvenci 20 MHz, poté začne klesat. Dále je možné posoudit reálný útlum jednotlivých článků. Vlastní útlum pasivních útlumových článků bude brán jako útlum při nejnižší měřené frekvenci 150 kHz. Porovnání hodnoty vypočteného, simulovaného a změřeného útlumu lze vidět v Tab. 3. Při pohledu na změřené útlumy jednostranných plošných spojů a oboustranný se zemnicí plochou na druhé straně desky je zřejmé, že se od sebe příliš neliší. Při porovnání simulovaných hodnot útlumu se změřenými lze posoudit větší odlišnost u π článků. Hodnoty útlumů u T článků se liší jen minimálně.

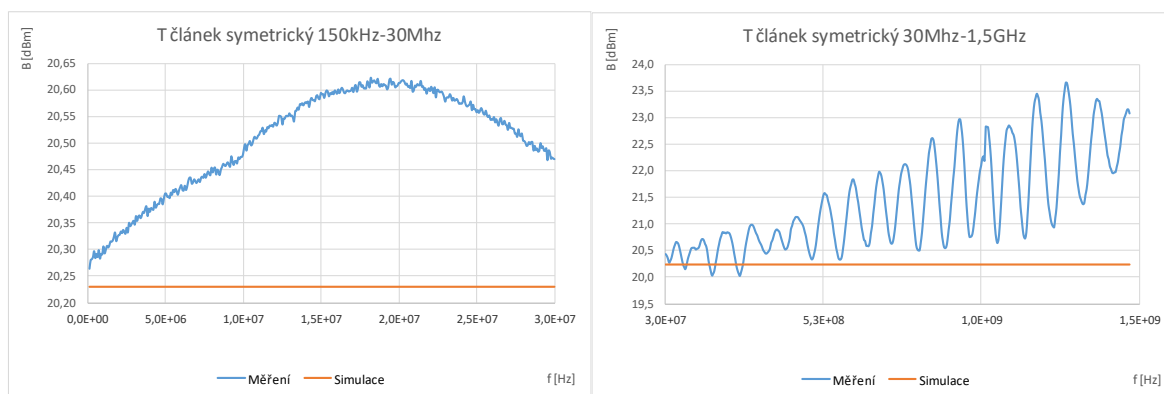
Tab. 3 Srovnání útlumů všech variant útlumových článků

Útlum B [dB]	Vypočtený	Odsimulovaný	Změřený
Π klasický	20,3	20,3	19,55
Π klasický prokovený	20,3	20,3	19,62
Π symetrický	20	20	18,94
Π symetrický prokovený	20	20	18,94
T klasický	19,7	19,55	19,49
T klasický prokovený	19,7	19,55	19,51
T symetrický	20,45	20,23	20,26
T symetrický prokovený	20,45	20,23	20,28

Ve druhém pásmu jsou charakteristiky hodně zvláště a chovají se různě podle varianty útlumového článku. U klasického π a T článku bez prokovení dojde v pásmu k téměř lineárnímu (pominuto zvláště) poklesu útlumu z 20 dB na 10 dB. Tyto články v prokovené variantě mají větší pokles, a to až na 5 dB. Symetrické články mají odlišné chování od všech ostatních. Útlum se zvyšuje u π článku z 19,25 dB na 22,5 dB, poté

začne klesat, u T článku z 20,43 dB na 23,35 dB. Články v symetrické variantě a zároveň prokovené mají podobné chování jako klasické prokovené. Útlum klesá z 20 dB na 5 dB, ale vykazuje strmější pokles kolem frekvence 0,5 GHz.

Na obr. 26 je zobrazeno srovnání amplitudové frekvenční charakteristiky dosažené simulací a získané měřením. Jedná se o charakteristiku symetrického T článku. Je vidět, že počítačová simulace nepočítá s neideálním chováním zapojení při vysokých kmitočtech.

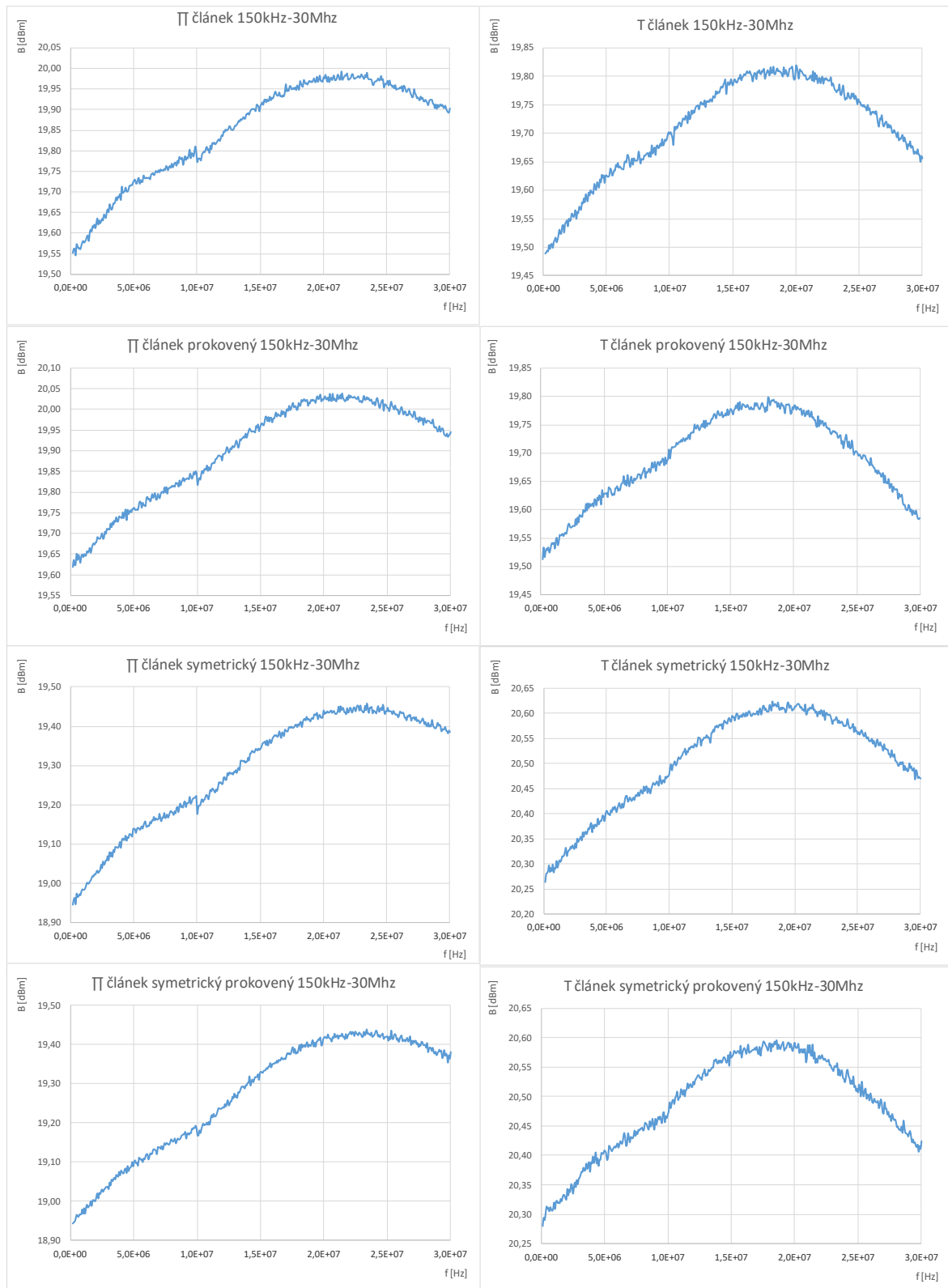


Obr. 26 Porovnání odsimulované a naměřené charakteristiky symetrického T článku

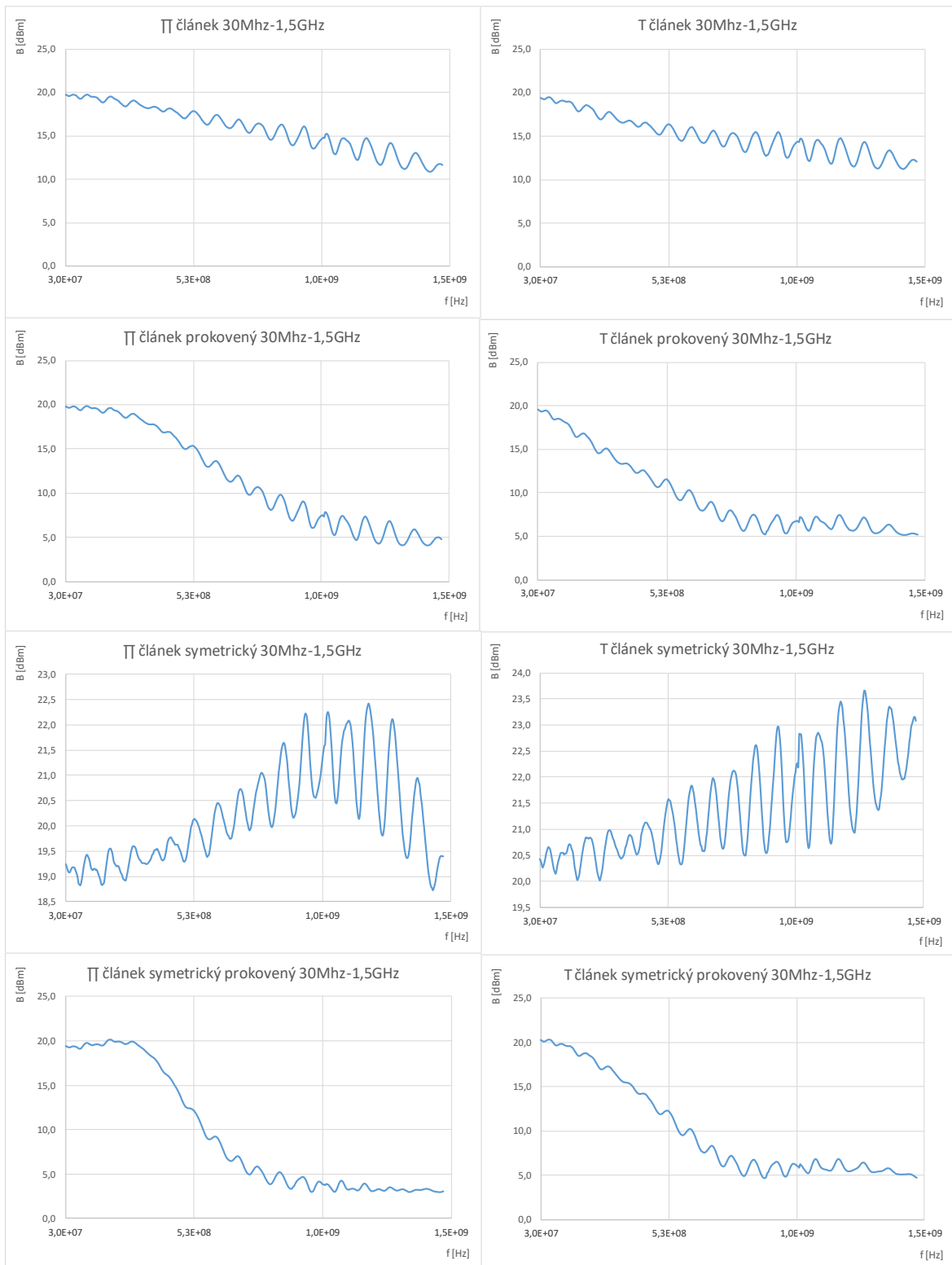
V níže zobrazené Tab. 4 jsou určeny šířky pásma jednotlivých článků. Určení probíhalo v bodě, kde útlum překročil $\pm 0,5$ dB pro jednu šířku a $\pm 1,5$ dB pro druhou šířku pásma. Dolní mez je brána od nulového kmitočtu. Díky velkým překmitům frekvenční charakteristiky se však šířky pásem velmi liší.

Tab. 4 Šířka pásma jednotlivých útlumových článků

	B[dB]	Šířka pásma ($\pm 0,5$ dB)	Šířka pásma ($\pm 1,5$ dB)
II klasický	19,49	100 MHz	173 MHz
II klasický prokovený	19,51	74 MHz	140 MHz
II symetrický	20,26	210 MHz	629 MHz
II symetrický prokovený	20,28	85 MHz	170 MHz
T klasický	19,55	166 MHz	398 MHz
T klasický prokovený	19,62	173 MHz	3,35 MHz
T symetrický	18,94	20 MHz	618 MHz
T symetrický prokovený	18,94	23,4 MHz	390 MHz



Obr. 27 Frekvenční charakteristiky jednotlivých článků v pásmu 150 kHz – 30 MHz



Obr. 28 Frekvenční charakteristiky jednotlivých článků v pásmu 30 MHz – 1,5 GHz

Závěr

Cílem bakalářské práce byl návrh pasivního útlumového článku s útlumem 20 dB. Toho bylo docíleno využitím dvou významných topologií, a to π a T. Po výpočtu hodnot rezistorů pomocí útlumu se došlo k závěru, že by bylo vhodné vyrobit i symetrické varianty článků. Rezistory jsou zde řazeny paralelně, čímž je možné dojít v některých případech přesněji k vypočtené hodnotě. S tím souvisí i skutečnost, že vyráběné hodnoty rezistorů se většinou liší od těch vypočtených.

Následná počítačová simulace v programu LTspice ověřila, jestli zapojení bude vyhovovat požadovanému útlumu. V případě klasického i symetrického π článku vyšel výsledný útlum velmi podobně jako vypočítaný. U T článku se simulovaný útlum mírně lišil. Poté již nic nebránilo tomu přejít k návrhu a výrobě plošných spojů.

Návrh plošných spojů byl proveden v programu Eagle a jejich výroba na frézce LPKF. S ohledem na možnost porovnání chování článků byla vyrobena pro zajímavost i prokovená varianta každého článku. Jednalo se o oboustranný plošný spoj se zemnicí plochou na druhé straně. Prokovení bylo provedeno propletením měděného drátu vyvrtanými dírami. Celkově tedy byly vyrobeny čtyři varianty od každého π a T článku: klasický, klasický prokovený, symetrický a symetrický prokovený. Dále byla vyrobena plechová krabička pro možnost uchycení článků a hlavně jejich stínění.

Měření proběhlo pomocí spektrálního analyzátoru, připojením útlumového článku mezi jeho generátor a měřící vstup. Frekvenční amplitudové charakteristiky byly změřeny ve dvou pásmech (150 kHz – 30 MHz, 30 MHz – 1,5 GHz). V prvním pásmu vypadají charakteristiky jednotlivých článků velice podobně. Útlum se zvyšující se frekvencí exponenciálně stoupá až do 20 MHz, poté začne klesat. V druhém pásmu útlum klesá s velkým zvlněním. U klasických článků klesne útlum při nejvyšší frekvenci na polovinu, u klasických i symetrických v prokovené variantě dokonce na čtvrtinu. Odlišné chování vykazují symetrické články, kde se útlum dokonce zvýší o zhruba 3 dB.

Práce byla pojata spíše experimentálně s cílem zkoumat reálné chování jednotlivých variant útlumových článků. Z naměřených průběhů je zřejmé, že se klasické SMD rezistory nechovají ideálně při vyšších frekvencích. Na to bude mít pravděpodobně nejvyšší vliv skin efekt. Existují také speciální vysokofrekvenční rezistory, které lze snadno zapájet, nicméně jejich hodnoty jsou pouze 50, 100 a 200 Ω .

Seznam literatury a informačních zdrojů

- [1] Wayne Storr. Passive Attenuator Tutorial. In: electronics-tutorials.ws [online]. 15. 1. 2016 [cit. 11. 5. 2017]. Dostupné z: <http://www.electronics-tutorials.ws/attenuators/attenuator.html>
- [2] prof. Ing. Zdeňka Benešová, CSc. Dvojbrany. In: home.zcu.cz [online]. 14. 11. 2006 [cit. 11. 5. 2017]. Dostupné z: http://home.zcu.cz/~bene/YTE1/DVOJBRANY/Dvojbrany1_sit.pdf
- [3] Přenos (elektrotechnika). In: home.zcu.cz [online]. 19. 2. 2015 [cit. 12. 5. 2017]. Dostupné z: [https://cs.wikipedia.org/wiki/P%C5%99enos_\(elektrotechnika\)](https://cs.wikipedia.org/wiki/P%C5%99enos_(elektrotechnika))
- [4] Ing. Tomáš Procházka a Ing. Zdeněk Bartoň. S-parametry. In: elektrorevue.cz [online]. 13. 6. 2002 [cit. 15. 5. 2017]. Dostupné z: <http://www.elektrorevue.cz/clanky/02029/index.html>
- [5] TME. UNICON 312-061-007 (N-50/2-0/G1.07). In: tme.eu [online]. [cit. 3. 6. 2017]. Dostupné z: <http://www.tme.eu/cz/details/n5020g17/konektory-n/unicon/312-061-007-n-502-0g107/>