

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

Katedra aplikované elektroniky a telekomunikací

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Použití stripline v elektromagnetické kompatibilitě

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
Fakulta elektrotechnická
Akademický rok: 2017/2018

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

Jméno a příjmení: **Jakub JÁRA**
Osobní číslo: **E14B0140P**
Studijní program: **B2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor: **Elektronika a telekomunikace**
Název tématu: **Použití stripline v elektromagnetické kompatibilitě**
Zadávající 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 princip stripline.
2. Popište jednotlivé typy stripline pro použití v EMK dle dostupných standardů.
3. Diskutujte možnosti připojení stripline ke generátorům se standardizovaným výstupem.
4. Navrhněte přízpůsobovací členy pro stripline, realizujte je a změřte jejich parametry.
5. Zhodnoťte naměřené parametry a diskutujte je.

Rozsah grafických prací: **podle doporučení vedoucího**

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

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

Seznam odborné literatury:

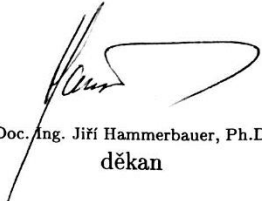
Student si vhodnou literaturu vyhledá v dostupných pramenech podle doporučení vedoucího práce.

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Zdeněk Kubík, Ph.D.**

Katedra aplikované elektroniky a telekomunikací

Datum zadání bakalářské práce: **10. října 2017**

Termín odevzdání bakalářské práce: **7. června 2018**


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




Doc. Dr. Ing. Vjačeslav Georgiev
vedoucí katedry

V Plzni dne 10. října 2017

Abstrakt

Bakalářská práce je zaměřena na stripline a jejich připojení ke standardizovaným zdrojům. Cílem je návrh a realizace přizpůsobovacích článků, které impedančně přizpůsobí stripline ke koaxiálnímu vedení. Po vypočtení charakteristické impedance stripline je navrženo několik možností impedančního přizpůsobení. Toho je dosaženo pomocí dvojbranu v podobě L-článku a napěťových balunů s transformačním převodem 4:1 s různým počtem závitů a s různými typy toroidních jader. Pomocí vektorového analyzátoru jsou poté změřeny frekvenční charakteristiky přizpůsobovacích obvodů v pásmu 300 kHz až 1 GHz.

Klíčová slova

Stripline, elektromagnetická kompatibilita, impedanční přizpůsobení, L-článek, balun, vektorový analyzátor

Abstract

The bachelor thesis is focused on stripline and their connection to standardized sources. The aim is to design and implement adapters that impedancelly adapt the stripline to coaxial lines. After calculating the characteristic stripline impedance, several impedance matching options are proposed. This is achieved by using a double-sided L-cell and a 4: 1 transformer shift balun with varying number of threads and different types of toroidal cores. The vector analyzer then measures the frequency characteristics of the matching circuits in the 300 kHz to 1 GHz band.

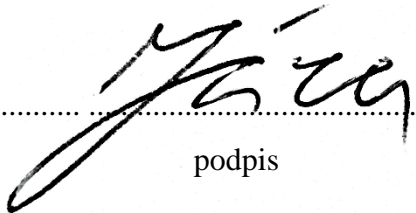
Key words

Stripline, electromagnetic compatibility, impedance matching, L-cell, balun, vector analyzer

Prohlášení

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

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



.....
podpis

V Plzni dne 6.6.2018

Jakub Jára

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu bakalářské práce Ing. Zdeňku Kubíkovi, Ph.D. za cenné profesionální rady, připomínky a metodické vedení práce.

Obsah

OBSAH	8
ÚVOD	9
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK	10
1 STRIPLINE V ELEKTROMAGNETICKÉ KOMPATIBILITĚ	11
1.1 ELEKTROMAGNETICKÁ KOMPATIBILITA	11
1.2 PRINCIP STRIPLINE.....	12
1.3 JEDNOTLIVÉ TYPY STRIPLINE PRO POUŽITÍ V EMC DLE DOSTUPNÝCH STANDARDŮ	13
1.3.1 <i>Druhy symetrických stripline pro měření elektromagnetické susceptibility</i>	13
1.3.2 <i>Asymetrické stripline (microstripline)</i>	15
1.4 MOŽNOSTI PŘIPOJENÍ STRIPLINE KE GENERÁTORŮM SE STANDARDIZOVANÝM VÝSTUPEM	15
1.4.1 <i>Impedanční přizpůsobení stripline pomocí dvojbranu</i>	16
1.4.2 <i>Impedanční přizpůsobení stripline pomocí balunu</i>	17
2 NÁVRH PŘIZPŮBOVACÍCH ČLENŮ PRO STRIPLINE	18
2.1 VÝPOČET IMPEDANCE STRIPLINE.....	18
2.2 NÁVRH L-ČLÁNKU ČLÁNKU	19
2.3 NÁVRH NAPĚŤOVÉHO BALUNU	20
3 MĚŘENÍ PARAMETRŮ PŘIZPŮBOVACÍCH OBVODŮ	23
3.1 POSTUP MĚŘENÍ.....	24
3.2 NAMĚŘENÉ PARAMETRY	25
ZÁVĚR	29
SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ	31

Úvod

Tato bakalářská práce je zaměřena na použití stripline v EMC a jejich připojení ke generátorům se standardizovaným výstupem.

Obsah práce je rozdělen do tří částí: první se zabývá teorií stripline, jejich druhy a impedančním přizpůsobení stripline k nesymetrickému vedení, druhá uvádí postup při výpočtu charakteristické impedance stripline, která se odvíjí od rozměrů a typu použitého dielektrika mezi souběžnými vodivými pásky. Poté je popsán návrh a následná realizace přizpůsobovacích obvodů v podobě L-článku a několika napěťových balunů, které jsou vytvořeny z různých toroidních jader s různým počtem závitů. Třetí část se zabývá měřením parametrů těchto přizpůsobovacích obvodů při propojení stripline s vektorovým analyzátozem ve frekvenčním rozsahu od 300 kHz do 1 GHz. Výsledky tohoto měření jsou graficky zpracovány a následně zhodnoceny v závěru.

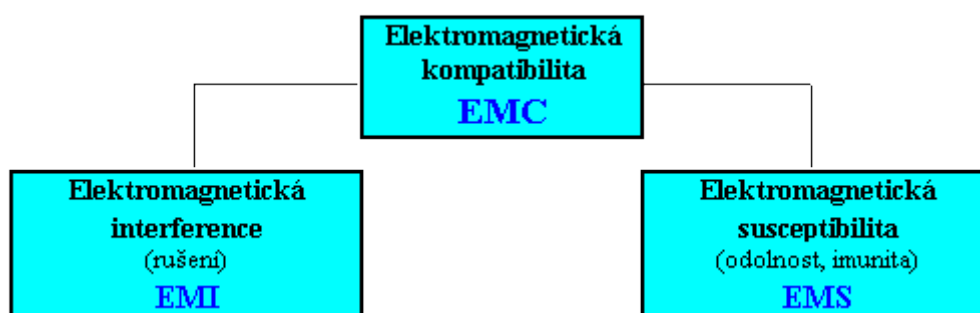
Seznam symbolů a zkratek

EMC	Elektromagnetická kompatibilita
EMI.....	Elektromagnetická interference
EMS	Elektromagnetická susceptibilita
TEM.....	Příčné elektromagnetické buňky
GTEM.....	Příčné elektromagnetické buňky pro GHz frekvence
U_1, U_2 [V]	Vstupní a výstupní napětí dvojbranu
I_1, I_2 [A]	Vstupní a výstupní proud dvojbranu
DC.....	Stejnoseměrné napětí
VF.....	Vysokofrekvenční signál
GND	Uzemnění
ϵ_r [F/m]	Relativní permitivita
$S_{11}, S_{12}, S_{21}, S_{22}$	Prvky vysokofrekvenční matice
SWR [-]	Poměr stojatého vlnění
R_1, R_2 [Ω].....	Odpory L-článku
Z_0 [Ω].....	Charakteristická impedance
Z_L [Ω]	Impedance zátěže
LPKF	Systémy pro prototypovou výrobu plošných spojů
DPS.....	Deska plošných spojů
SMD	Součástky určené pro povrchovou montáž
EAGLE.....	Program pro návrh plošných spojů

1 Stripline v elektromagnetické kompatibilitě

1.1 Elektromagnetická kompatibilita

Elektromagnetická kompatibilita (slučitelnost) EMC je definována jako schopnost zařízení, systému či přístroje vykazovat správnou činnost i v prostředí, v němž působí jiné zdroje elektromagnetických signálů (přírodní či umělé) a naopak svou vlastní "elektromagnetickou činností" nepřipustně neovlivňovat své okolí, tj. nevyzařovat signály, jež by byly rušivé pro jiná zařízení.



Obr. 1 Základní členění problematiky EMC

- ***Elektromagnetická interference***

Elektromagnetická interference (EMI) (angl. Electromagnetic Interference) neboli elektromagnetické rušení je proces, při kterém se signál, generovaný zdrojem rušení přenáší prostřednictvím elektromagnetické vazby do rušených systémů. EMI se tedy zabývá především identifikací zdrojů rušení, popisem a měřením rušivých signálů a identifikací parazitních přenosových cest. Kompatibilitu celého systému se dosahuje technickými opatřeními především na straně zdrojů rušení a jejich přenosových cest. EMI se tak týká hlavně příčin rušení a jejich odstraňování.

- ***Elektromagnetická susceptibilita***

Elektromagnetická susceptibilita či imunita (EMS) (angl. Electromagnetic Susceptibility či Electromagnetic Immunity) neboli elektromagnetická citlivost či elektromagnetická odolnost vyjadřuje schopnost zařízení pracovat bez poruch nebo s přesně definovaným přípustným vlivem v prostředí, v němž se vyskytuje elektromagnetické rušení.

EMS se tedy zabývá především technickými opatřeními, které zvyšují u objektu (přijímače rušení) jeho elektromagnetickou imunitu, tedy jeho odolnost proti vlivu rušivých signálů. EMS se tak týká spíše odstraňování důsledků rušení, bez odstraňování jejich příčin. [1]

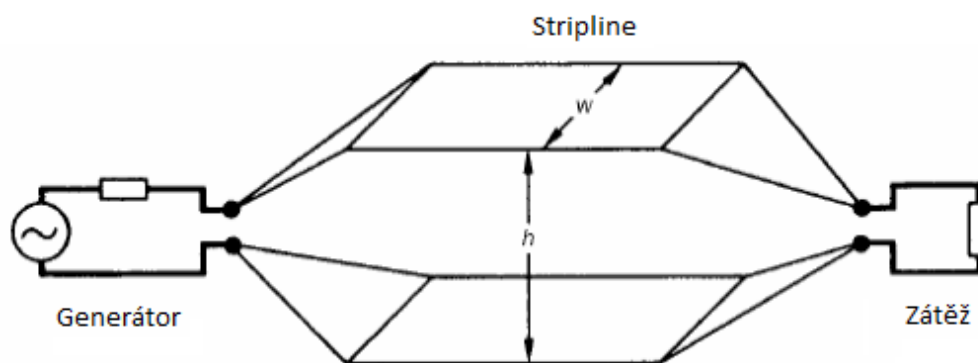
1.2 Princip stripline

Stripline je svou strukturou vyzařující přenosová linka. Funguje tak, že elektromagnetické vlny, které jsou vysílány přes přenosovou linku, vytvářejí silné elektrické pole. Toto pole se nachází mezi dvěma různými rovinami, které jsou tvořeny paralelními vodivými deskami. Hlavní pozornost je zaměřena na konstrukční parametry (charakteristická impedance, rozměry, rovnoměrnost pole atd.).

Vzhledem k tomu, že stripline je příčnou elektromagnetickou přenosovou linkou, magnetické a elektrické pole jsou ortogonální ve fázi a rozdíl amplitudy je 120π . Takže pokud je známa síla elektrického pole, je také definováno magnetické pole. Horní rovinou stripline je zářič, odkud je elektrické pole vyzařováno do spodní roviny, což je rovina země.

Toto elektrické pole lze použít k otestování schopnosti elektronických zařízení odolat silným elektrickým polím. Tato elektrická pole jsou vyzařována všemi druhy vysílačů, např. rozhlasovými stanicemi, radarovými systémy nebo mobilními telefony.

Většina energie, která je odesílána do stripline z generátoru, skutečně skrze ni prochází a pak se přivádí do zátěže, která absorbuje přenášený výkon.



Obr. 2 Schéma zapojení stripline

1.3 Jednotlivé typy stripline pro použití v EMC dle dostupných standardů

Stripline se obecně dělí podle konstrukce na symetrické a asymetrické. Mezi symetrické stripline patří klasické stripline pro měření elektromagnetické susceptibility jako je např. TEM buňka. Mezi asymetrické stripline spadají tzv. microstripline, které slouží jako přenosové linky.

1.3.1 Druhy symetrických stripline pro měření elektromagnetické susceptibility

Mezi stripline pro měření elektromagnetické susceptibility spadá TEM buňka, která je relativně malá ve srovnání s anechoickými komorami a obvykle se využívá k testování menších elektronických zařízení.



Obr. 3 TEM buňka

Používají se pro měření odolnosti vůči rušení pro kmitočty až do několik set MHz nebo až do jednotek GHz v případě buňky GTEM.



Obr. 4 GTEM buňka

Buňka GTEM vypadá podobně jako buňka TEM, ale ve skutečnosti je pouze první polovinou buňky TEM s jednou stěnou vyloženou absorbérem, aby se zabránilo rezonanci dutin při velmi vysokých frekvencích.

- **Výhody TEM buněk**

TEM buňka má relativně širokopásmové připojení ve frekvenčním rozsahu přibližně od DC až do GHz a u buňky GTEM ještě více. V případě uzavřené buňky TEM zůstává veškeré elektromagnetické záření v buňce tak, aby nebyla potřebná anechoická komora.

- **Nevýhody TEM buněk**

Efektivní výška buňky TEM je snižovaná výškou septa v buňce. Amplituda elektrického pole v buňce TEM se může měnit v širokém rozmezí frekvencí pozitivním a negativním způsobem se značnými odchylkami.

Další typem stripline je tzv. tri-plates stripline, která je svou konstrukcí velice podobná klasické TEM buňce. Hlavním rozdílem je, že tri-plates stripline má otevřené boční strany.



Obr. 5 Tri-plates stripline

Existují také tzv. two-plates stripline, které jsou tvořeny dvěma paralelními deskami, kde horní deska tvoří septový vodič (zářič) a spodní deska tvoří rovinu země. Tento typ stripline také spadá do kategorie TEM buněk.



Obr. 6 Two-plates stripline

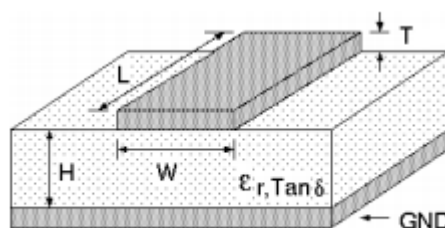
1.3.2 Asymetrické stripline (microstripline)

Mikrostripline přenosové linky jsou relativně starý a dobře známý typ přenosových vedení.

Co se týče teorie, jsou tyto přenosové linky velmi podobné klasickým stripline, které se používají pro testy elektromagnetické susceptibility neboli odolnosti vůči rušení.

Microstripline přenosové linky se obecně používají k vedení VF signálů pro velmi vysoké frekvence v pásmu GHz, kde mají nižší ztráty než koaxiální kabel.

Skládají se z měděné stopy oddělené od základní roviny izolačním podkladem. Tato konfigurace je znázorněna na následujícím obrázku.



Obr. 7 Microstripline

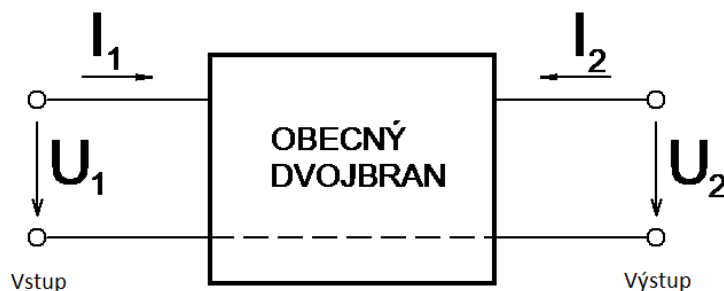
1.4 Možnosti připojení stripline ke generátorům se standardizovaným výstupem

Pro správné impedanční přizpůsobení stripline ke generátorům se standardizovaným výstupem je nejprve nutné vypočítat charakteristickou impedanci zařízení, která závisí jak na rozměrech a vzdálenosti mezi pásky, tak na dielektriku a jeho permitivitě prostředí, které se mezi souběžnými pásky nachází.

Dále je zapotřebí správně navrhnout přizpůsobovací člen, který charakteristickou impedanci stripline přizpůsobí k impedanci vedení. Pro přizpůsobení byly použity dvě metody. Přizpůsobení pomocí dvojbranu složeného z odporů a vytvoření napěťových balunů.

1.4.1 Impedanční přizpůsobení stripline pomocí dvojbranu

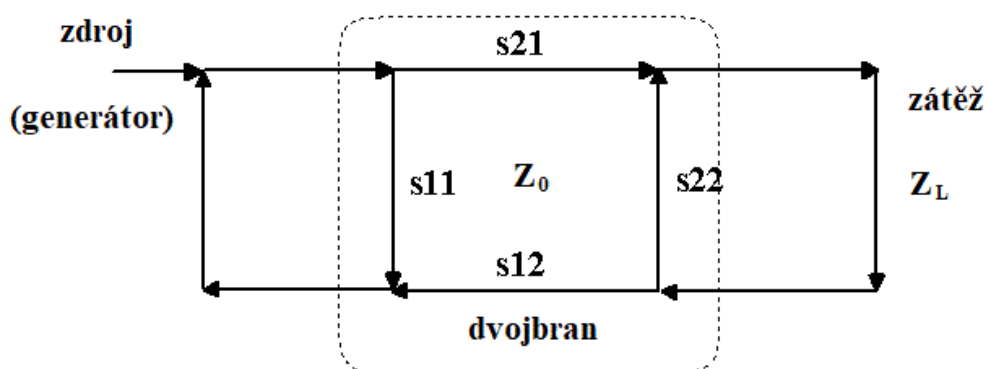
Dvojbran je libovolný obvod, který má po dvou dvojicích svorek na každé straně (vstupní a výstupní). Jeho chování stačí popsat pouze vztahy mezi napětími a proudy na vstupu a výstupu. Napětí a proudy uvnitř dvojbranu jsou z vnějšího pohledu nepodstatné. Struktura uvnitř dvojbranu může být jakákoliv. Dvojbran lze použít pro impedanční přizpůsobení mezi zdrojem a zátěží.



Obr. 8 Obecné schéma dvojbranu

U vř či mikrovlnných obvodů je vhodné přejít od napětí a proudů na svorkách prvků k modelu uvažujícímu vlny, které vstupují a vystupují jednotlivými branami dvojbranu.

Vlna, která je dodávána zdrojem se může na vstupu dvojbranu odrazit zpět ke generátoru nebo vstoupit do dvojbranu a následně po zesílení činitelem přenosu s_{21} pokračovat k zátěži. Pokud je dvojbran k zátěži přizpůsoben, dojde k přenosu do zátěže.



Obr. 9 S-parametry

U připojení stripline ke generátorům se standardizovaným výstupem je tedy důležitý parametr s_{11} , který je nazýván koeficient odrazu při výstupu zakončeném přizpůsobenou zátěží ($Z_L = Z_0$).

1.4.2 Impedanční přizpůsobení stripline pomocí balunu

Pojem balun je zkratkou BALanced-UNbalanced, tedy transformace mezi vyváženou (dipól, dvojlinka) a nevyváženou stranou (koaxiální kabel). Stejně tak pojem unun je zkratkou od UNbalanced-UNbalanced, tedy transformace mající na obou stranách nevyvážený zdroj (koaxiální kabel). Baluny se dále dělí na proudové a napěťové.

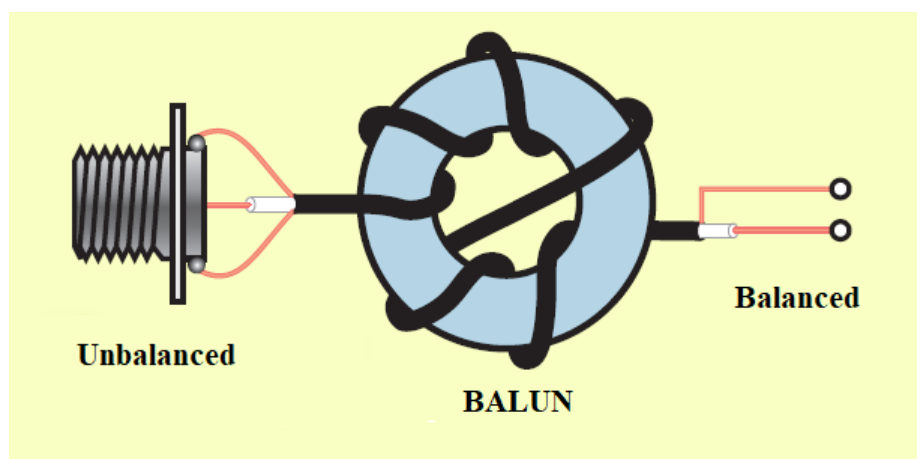
- **Proudový balun**

Tento balun se používá na zastavení šíření plášťových proudů, které se šíří pláštěm (tedy stíněním) koaxiálního kabelu a vyzařují VF pole do svého okolí.

- **Napěťový balun**

Nejčastěji se tyto baluny používají pro transformaci impedance. Obecně lze říci, že nutnost transformovat impedanci vzniká při použití antény s rozdílnou impedancí oproti napájecímu zařízení.

Transformační poměr balunu je dán způsobem zapojení jeho vinutí. Mezi časté transformační poměry patří např. poměry 1:4, 1:6, 1:9 nebo 1:16.



Obr. 10 Příklad zapojení balunu

2 Návrh přizpůsobovacích členů pro stripline

2.1 Výpočet impedance stripline

Efektivní dielektrická konstanta stripline je dána přibližně hodnotou

$$\epsilon_e = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \cdot \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{12d}{W}}} \left[\frac{F}{m} \right]. \quad (1)$$

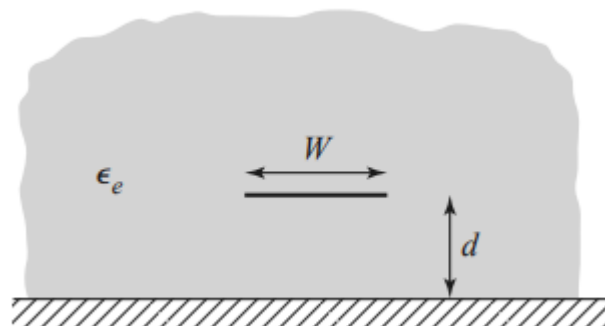
Po dosazení do vzorce, kde počítáme s hodnotou konstanty rovné permitivitě vzduchu $\epsilon_r = 1$, nám efektivní dielektrická konstanta vychází

$$\epsilon_e = \frac{1 + 1}{2} + \frac{1 - 1}{2} \cdot \frac{1}{\sqrt{1 + 12 \cdot \left(\frac{0,4}{0,3}\right)}} = 1 \frac{F}{m} \quad (2)$$

Vzhledem k rozměrům stripline lze charakteristickou impedanci vypočítat jako

$$Z_0 = \begin{cases} \frac{60}{\sqrt{\epsilon_e}} \cdot \ln \left(\frac{8d}{W} + \frac{W}{4d} \right) [\Omega] & \text{pro } \frac{W}{d} \leq 1 \\ \frac{120\pi}{\sqrt{\epsilon_e} \cdot \left[\frac{W}{d} + 1,393 + 0,667 \cdot \ln \left(\frac{W}{d} + 1,444 \right) \right]} [\Omega] & \text{pro } \frac{W}{d} \geq 1. \end{cases} \quad (3)$$

Pro změřené rozměry naší stripline, kde šířka $W = 0,3$ m a výška $d = 0,4$ m, platí



Obr. 21 Parametry stripline

$$\frac{W}{d} = \frac{0,3}{0,4} = 0,75 < 1, \quad (4)$$

proto použijeme vztah

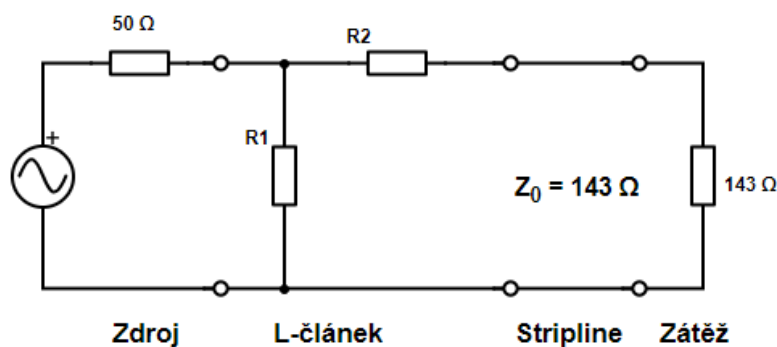
$$Z_0 = \frac{60}{\sqrt{\epsilon_e}} \cdot \ln\left(\frac{8d}{W} + \frac{W}{4d}\right) [\Omega]. \quad (5)$$

Po dosazení našich hodnot nám charakteristická impedance stripline vychází

$$Z_0 = \frac{60}{\sqrt{1}} \cdot \ln\left(\frac{8 \cdot 0,4}{0,3} + \frac{0,3}{4 \cdot 0,4}\right) = 143,073 \Omega \quad (6)$$

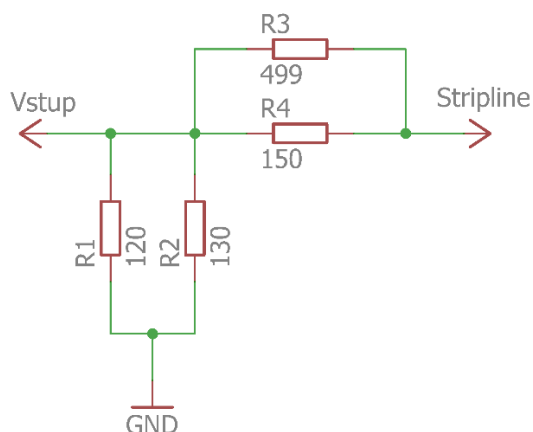
2.2 Návrh L-článku článku

Pro přizpůsobení stripline k vedení, jehož charakteristická impedance je 50Ω byl zvolen L-článek, který se v dané situaci jevil jako nejlepší varianta z důvodu rozměrů desky a typům rezistorů, které byly k dispozici.



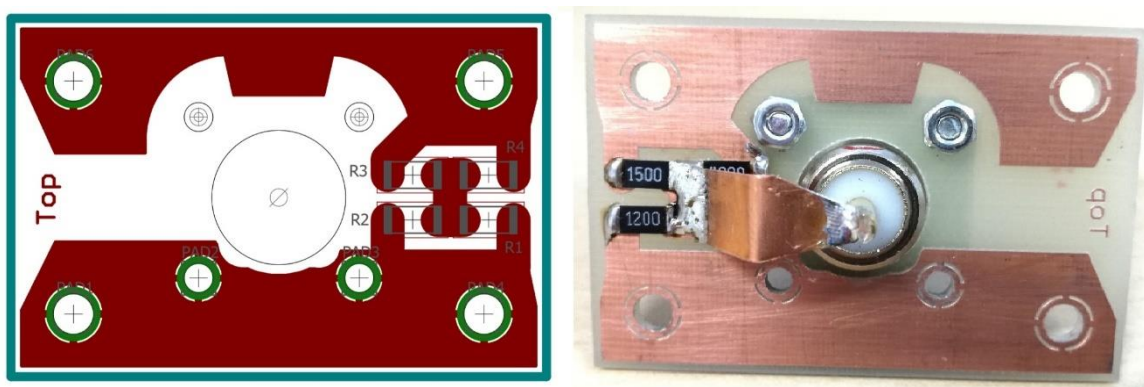
Obr. 12 Schéma zapojení

Z daných možností byly nakonec vybrány SMD rezistory řady R2512 a následně bylo vytvořeno schéma v programu EAGLE. Rezistory R_1 a R_2 z obr. 12 jsou nahrazeny paralelní kombinací odporů, pro dosažení správného impedančního přizpůsobení k charakteristické impedanci stripline.



Obr. 13 Elektrické schéma L-článku

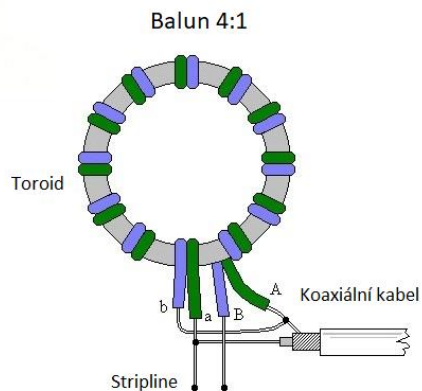
Z tohoto schématu byla navržena deska plošného spoje v programu EAGLE a následně byla provedena její realizace na frézce LPKF. Tloušťka kompozitu byla zvolena 2 mm z důvodu odolnosti proti ohybům DPS.



Obr. 14 Návrh a realizace desky plošného spoje

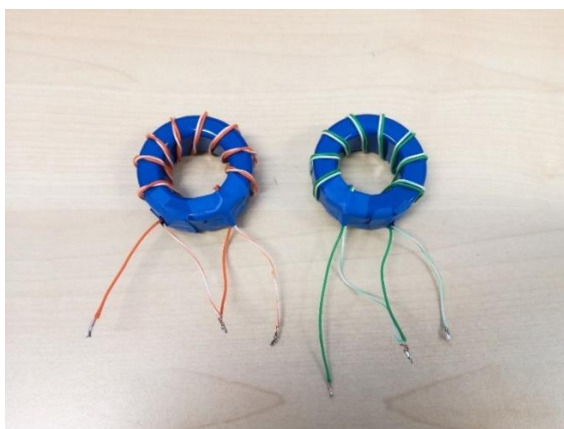
2.3 Návrh napěťového balunu

Pro impedanční přizpůsobení stripline ke koaxiálnímu vedení byl zvolen napěťový balun s transformačním poměrem 4:1 v zapojení dle obr. 15. Následně bylo navinuto několik těchto balunů na různá toroidní jádra s různým počtem závitů, aby bylo možno porovnat jejich vliv na celkové impedanční přizpůsobení a útlum v širším frekvenčním rozsahu.



Obr. 15 Zapojení napěťového balunu s transformačním poměrem 4:1

Vytvořeny byly i dva baluny se stejným počtem závitů na stejném jádře, ovšem jeden s kroucenými vodiči a druhý s nekroucenými, pro porovnání vlivu druhu vinutí na impedanční přizpůsobení napěťového balunu.



Obr. 16 Vytvořené napěťového baluny, každý s jiným druhem vinutí


Následující tabulka udává jednotlivé typy vytvořených balunů, počet závitů a způsob vinutí.

Tab. 1 Baluny


jádro	počet závitů	kroucené vinutí
MS-157026	8	NE
MS-157026	8	ANO
MS-184075-2	6	ANO
MS-184075-2	8	ANO
T157-2	5	ANO
T157-2	8	ANO
RT-406-274-150	4	ANO
RT-406-274-150	8	ANO
Neznámé jádro	4	ANO
Neznámé jádro	6	ANO

Další tabulky popisují parametry jednotlivých toroidních jader.


Tab. 2 MS-157026

	Délka	Vnitřní průměr	Vnější průměr	Materiál jádra	Koef. indukčnosti Al
	15 mm	24 mm	40 mm	Sendust	35 nH


Tab. 3 MS-184075-2

	Délka	Vnitřní průměr	Vnější průměr	Materiál jádra	Koef. indukčnosti Al
	19,9 mm	23,3 mm	47,6 mm	Sendust	169 nH

Tab. 4 T157-2

	Délka	Vnitřní průměr	Vnější průměr	Materiál jádra	Koef. indukčnosti Al
	14,5 mm	24,1 mm	39,9 mm	Iron powder	14 nH

Tab. 5 RT-406-274-150

	Délka	Vnitřní průměr	Vnější průměr	Materiál jádra	Koef. indukčnosti Al
	15 mm	27,4 mm	40,6 mm	K5B	-

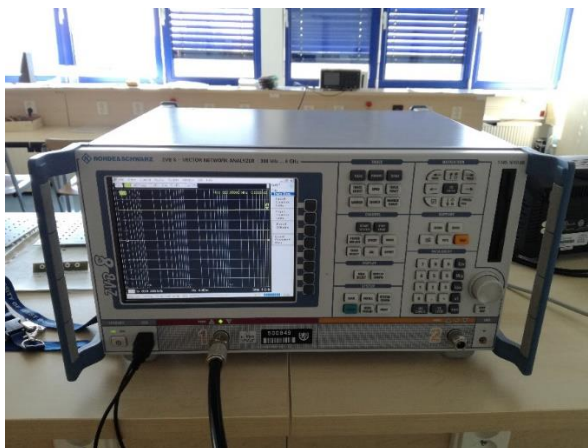
Toroidní jádra, která se vyrábí z materiálů s vysokou permeabilitou se používají tam, kde se vyžaduje vysoká citlivost indukovaného napětí v sekundárním vinutí na změny magnetizačního proudu, a kde je požadováno minimální zkreslení přeneseného signálu. Často se také využívá velmi malých ztrát při magnetování střídavým proudem.

Iron powder neboli železoprachové jádro je nejlevějším materiálem pro výrobu jader. Má větší ztráty než pokročilejší slitiny, to ale může být kompenzováno rozměry jádra v případech, kdy je důležitější cena než hmotnost a rozměry. Saturační tok se pohybuje v rozmezí 1 až 1,5 T. Relativně vysoká hysterezní ztráta omezuje provoz spíše na nižší frekvence řádově stovky kHz.

Sendust je magnetický kovový prášek, který se využívá v aplikacích pro telefonní sítě. Kompozice materiálu je obvykle v poměru 85 % železa, 9 % křemíku a 6 % hliníku. Prášek je slinutý do jader k výrobě induktorů. Sendust jádra mají malé ztráty, nízkou koercitivitu (5 A/m), dobrou stabilitu teploty a hustotu saturačního toku až 1 T.

3 Měření parametrů přizpůsobovacích obvodů

Měření bylo provedeno na vektorovém síťovém analyzátoru ZVB8 od firmy Rohde & Schwarz. Vektorový síťový analyzátor lze v prvním přiblížení charakterizovat jako zařízení zjišťující čtyři přenosové parametry libovolné obvodové struktury. Jedná se o známé s-parametry, které je ZVB8 schopen měřit ve frekvenčním rozsahu 300 kHz až 8 GHz.



Obr. 17 Vektorový síťový analyzátor ZVB8 Rohde & Schwarz.

Pro kalibraci vektorového síťového analyzátoru byla použita kalibrační sada ZV-Z121. Jako propojovací kabel mezi analyzátozem a stripline byl použit koaxiální kabel ECOFLEX 10 se standardními N konektory.

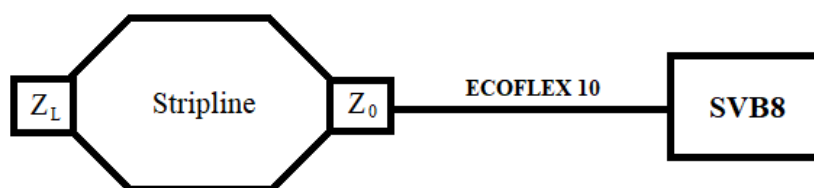
Přizpůsobovací články, které byly navrženy a realizovány jsou určeny pro stripline s charakteristickou impedancí $Z_0 = 143 \Omega$, relativní permitivitou vzduchu, výškou 40 cm a šířkou 30 cm.



Obr. 18 Stripline

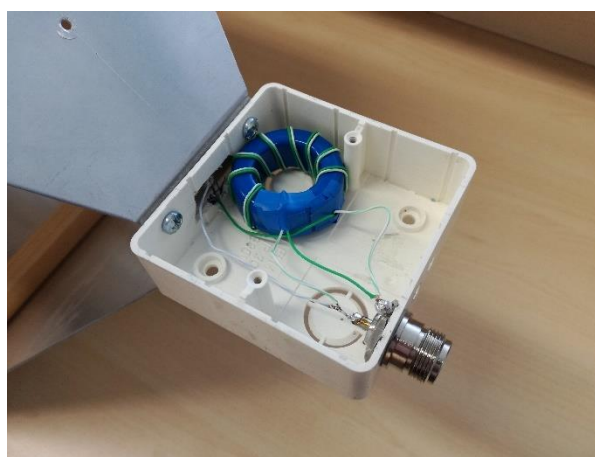
3.1 Postup měření

Přizpůsobovací články byly postupně připojovány na vstup stripline v podobě Z_0 . Na výstup stripline byla připojena zátěž Z_L o hodnotě charakteristické impedance stripline. Frekvenční rozsah analyzátoru byl nastaven na pásmo 300 kHz až 1 GHz. Propojení stripline a SVB8 bylo realizováno pomocí koaxiálního kabelu ECOFLEX 10 se standardními N konektory. Zapojení jednotlivých prvků bylo dle následujícího blokového schématu.



Obr. 19 Blokové schéma zapojení

Nejprve byl měřen L-článek a jeho parametr s_{11} v daném kmitočtovém rozsahu. Poté následovalo měření napěťových balunů a jejich parametru s_{11} v tomtéž kmitočtovém rozsahu. Pro jejich propojení se stripline byla použita speciálně upravená stavební propojovací krabice, ke které byla připojena deska plošného spoje pro spojení se stripline.

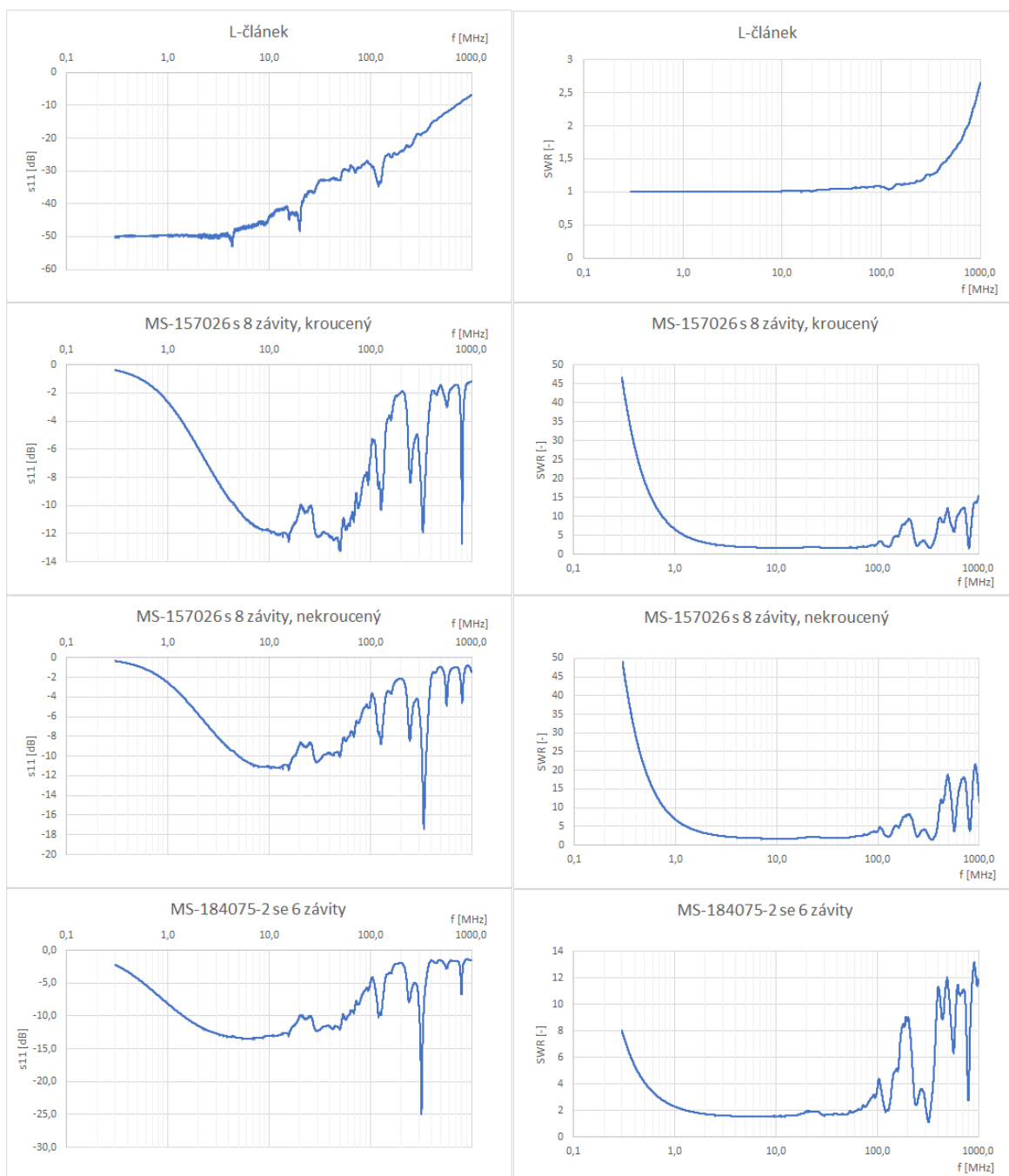


Obr. 30 Propojení balunu se stripline

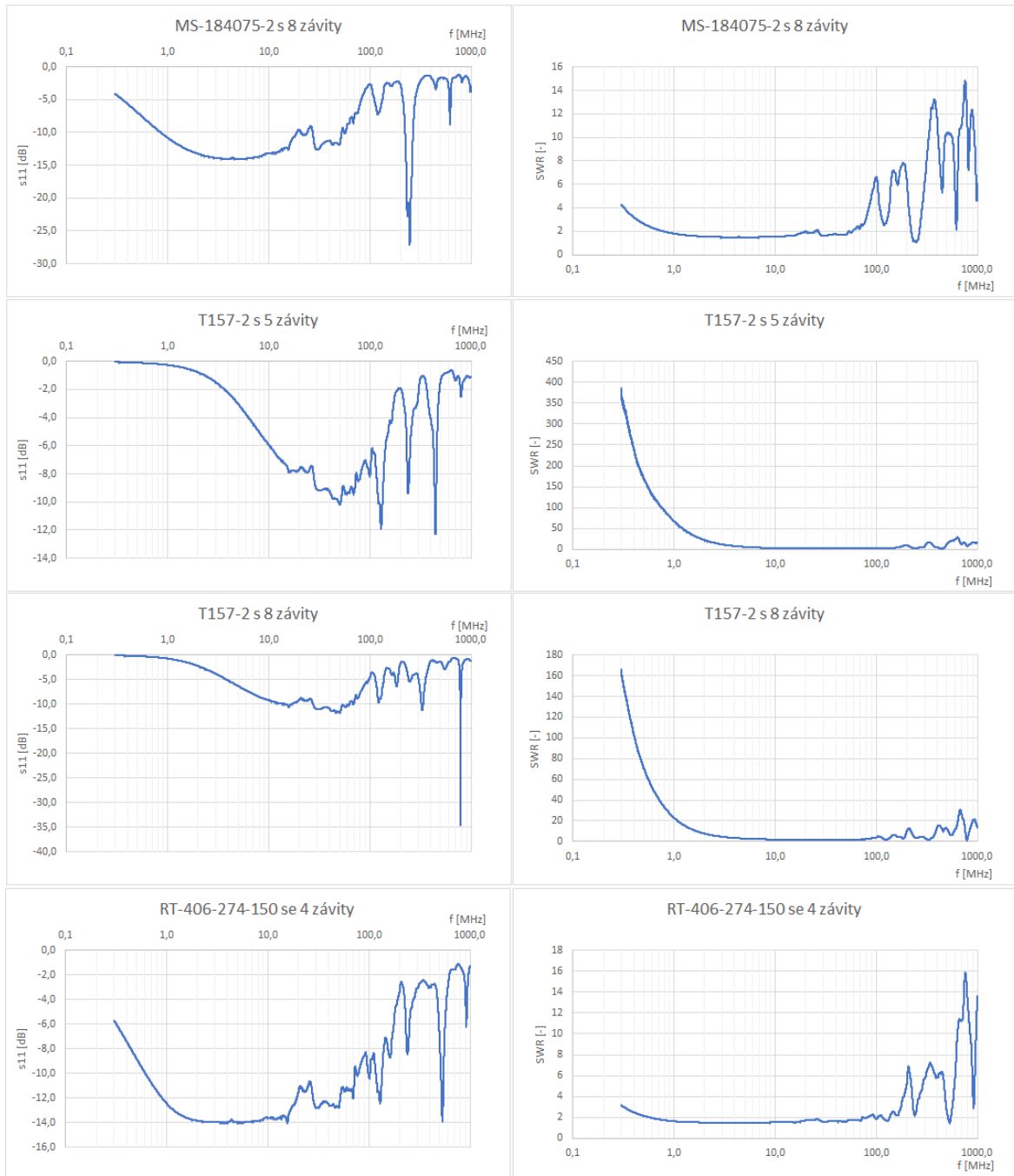
Naměřené s-parametry pro jednotlivé prvky byly pomocí SVB8 uloženy pro další zpracování na flash disk. Z výsledků měření byly parametry s_{11} přepočteny na poměr stojatého vlnění SWR a z obou výsledků byly pro jednotlivé prvky zkonstruovány grafy.

3.2 Naměřené parametry

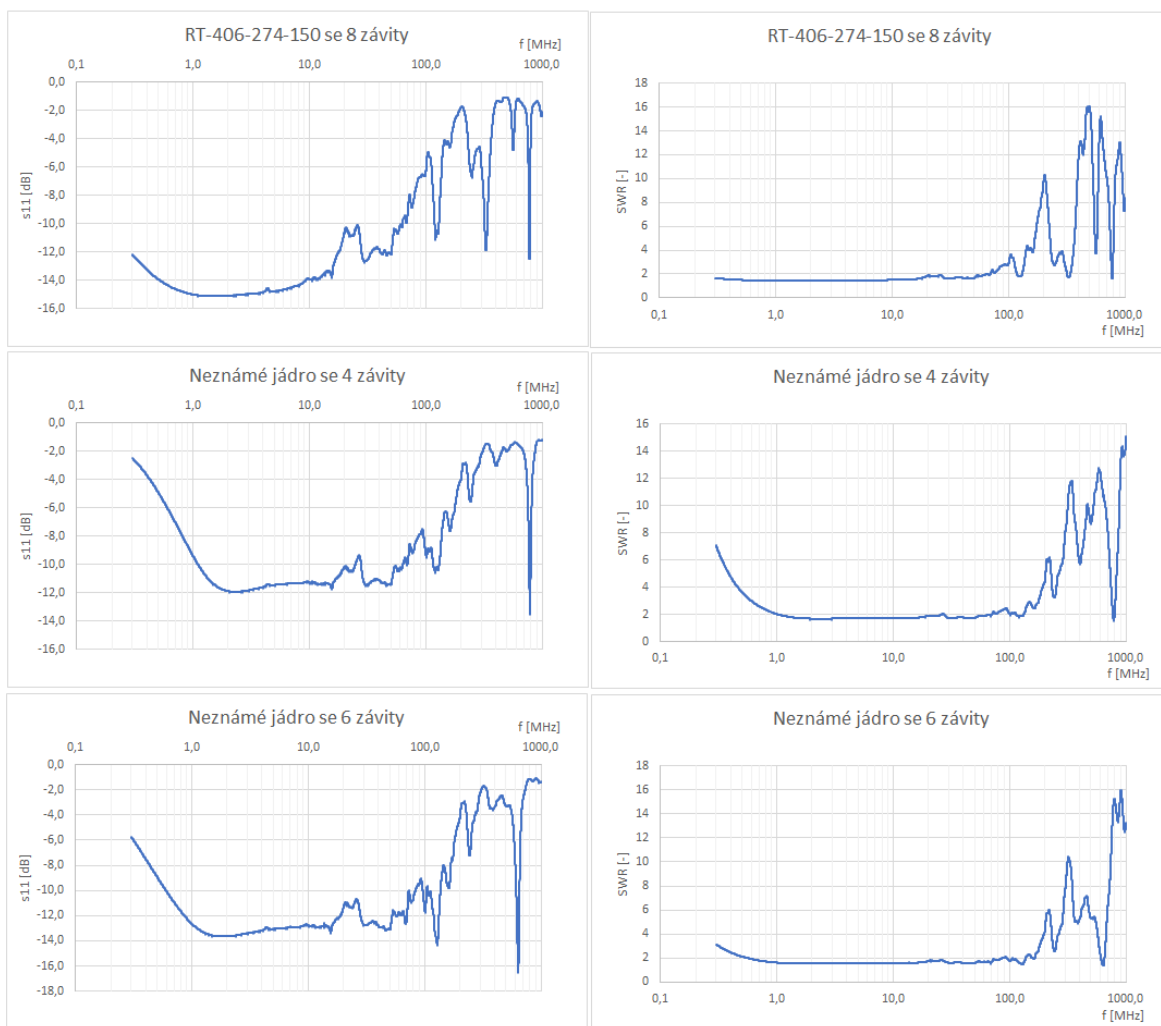
Změřené a přepočtené hodnoty parametrů jednotlivých prvků byly zpracovány jednotlivě do grafů, kde horizontální osa je rovna frekvenci a rozsahu 10001 bodů. Proto byla pro větší přehlednost použita logaritmická stupnice. Na vertikální ose jsou poté vyneseny jednotlivé parametry s_{11} [dB] a SWR [-].



Obr. 31 Naměřené frekvenční charakteristiky



Obr. 32 Naměřené frekvenční charakteristiky



Obr. 33 Naměřené frekvenční charakteristiky

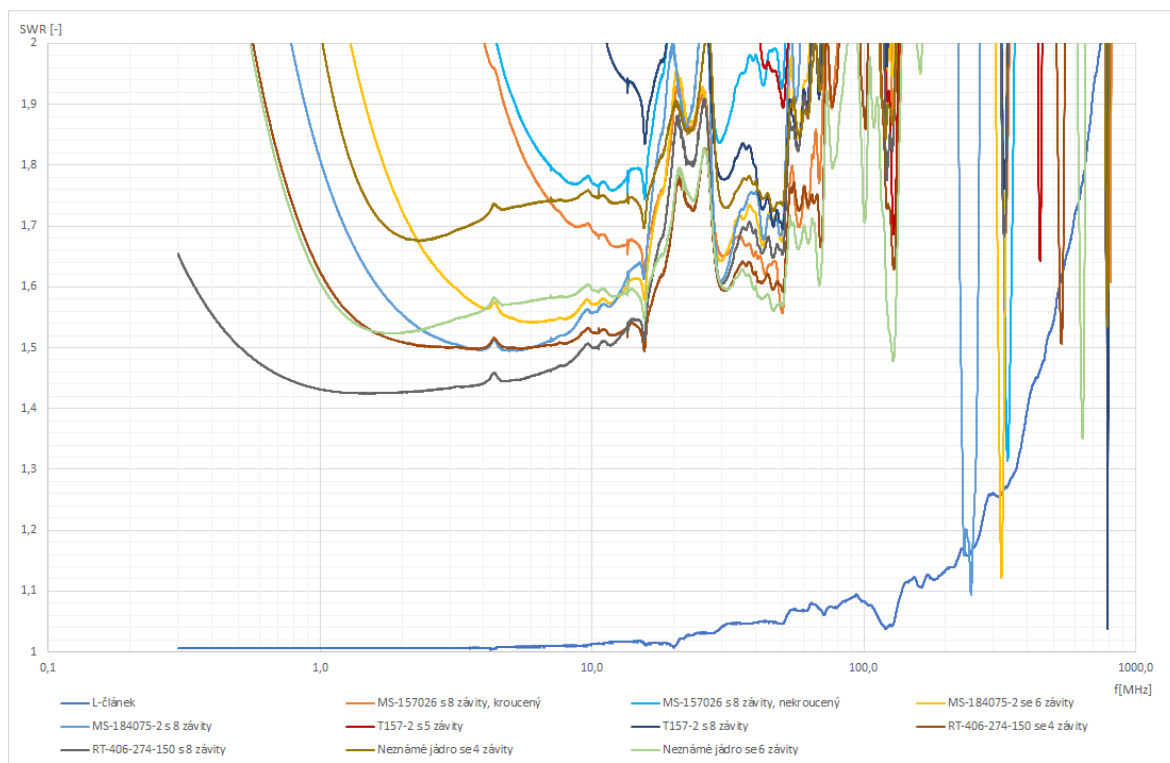
Získané hodnoty z měření parametru s_{11} byly převedeny na poměr stojatého vlnění SWR dle vztahu

$$SWR = \frac{1 + |\Gamma|}{1 - |\Gamma|} [-] \quad \text{kde } \Gamma = s_{11}. \quad (7)$$

Po dosazení hodnoty do vzorce pro L-článek při $f = 160$ MHz:

$$SWR = \frac{1 + |0,0508|}{1 - |0,0508|} = 1,107 \quad (8)$$

Na následujícím obrázku je zobrazen graf, na kterém lze porovnávat výsledky jednotlivých přizpůsobovacích prvků v celkovém frekvenčním rozsahu pro SWR a jeho hodnotu do $SWR = 2$, která je maximální použitelnou hodnotou pro vhodné impedanční přizpůsobení. Jednotlivé přizpůsobovací obvody jsou vykresleny v grafu rozdílnými barvami, pro lepší přehlednost.



Obr. 34 Porovnání přizpůsobovacích obvodů

Tab. 6 Šířka pásma pro $SWR < 2$

prvky	od	do	$B_{SWR < 2}$
L-článek	300 kHz	750 MHz	749,7 MHz
MS-157026 s 8 závitů, kroucený	4 MHz	70 MHz	66 MHz
MS-157026 s 8 závitů, nekroucený	4,5 MHz	18 MHz	13,5 MHz
MS-184075-2 se 6 závitů	1,5 MHz	65 MHz	63,5 MHz
MS-184075-2 s 8 závitů	800 kHz	27 MHz	26,2 MHz
T157-2 s 5 závitů	30 MHz	40 MHz	10 MHz
T157-2 s 8 závitů	11 MHz	20 MHz	9 MHz
RT-406-274-150 se 4 závitů	600 kHz	80 MHz	79,4 MHz
RT-406-274-150 s 8 závitů	300 kHz	65 MHz	64,7 MHz
Neznámé jádro se 4 závitů	1 MHz	70 MHz	69 MHz
Neznámé jádro se 6 závitů	550 kHz	90 MHz	89,45 MHz

Závěr

Cílem této bakalářské práce bylo navržení obvodů pro impedanční přizpůsobení stripline ke zdrojům se standardizovaným výstupem a impedancí o velikosti 50Ω . Pro správné impedanční přizpůsobení stripline k tomuto výstupu bylo nutné vypočítat podle parametrů naší stripline její charakteristickou impedanci a následně zvolit správné přizpůsobovací řešení. Toho bylo dosaženo navržením přizpůsobovacího obvodu v podobě L-článku pro SMD technologii. Jako další možnost impedančního přizpůsobení byla zvolena varianta s použitím napěťového balunu s transformačním poměrem impedance 1:4. Bylo vyrobeno několik variant těchto balunů s různým počtem závitů a porovnání krouceného vinutí s nekrouceným.

Návrh L-článku byl proveden pomocí programu EAGLE, kde bylo nejprve vytvořeno elektrické schéma obvodu a z něj následně navržena deska plošného spoje, která byla realizována na frézce LPKF. Pro připojení balunů ke stripline byla použita speciálně upravená stavební propojovací krabice, ke které byl přidělán N konektor a deska plošného spoje.

Měření jednotlivých prvků bylo provedeno na vektorovém síťovém analyzátoru SVB8 od firmy Rohde & Schwarz. Měřen byl zejména vstupní koeficient odrazu při výstupu zakončeném přizpůsobenou zátěží ($Z_L = Z_0$) v podobě parametru s_{11} . Frekvenční rozsah měření byl zvolen na pásmo od 300 kHz až do 1 GHz.

Naměřené hodnoty byly zpracovány formou grafu závislosti parametru s_{11} na frekvenci. Dále byl parametr s_{11} převeden na poměr stojatého vlnění SWR a také zpracován do grafu, pro porovnání jednotlivých prvků. Pro přehlednější porovnání byl vytvořen sloučený graf, kde SWR je omezeno do hodnoty $SWR = 2$, která je maximální použitelnou hodnotou pro impedanční přizpůsobení.

Celkově nejlepším řešením pro impedančním přizpůsobení na měřeném frekvenčním rozsahu je dle výsledků použití L-článku. Ten má zcela s převahou nejvhodnější výsledky, kdy nepřekračuje hodnotu $SWR = 1,1$ až do frekvence 100 MHz, a i při vyšších kmitočtech má lepší výsledky než většina měřených balunů.

Při porovnání vlivu druhu vinutí na impedanční přizpůsobení, kde byly vytvořeny dva baluny ze stejných jader MS-157026 se stejným počtem závitů, kdy jedno vinutí bylo kroucené a druhé nekroucené vyplývá, že i když průběh grafů je velice podobný, tak pro širší frekvenční rozsah se jeví jako lepší kroucené vinutí a také se častěji pohybuje na nižším SWR při stejných frekvencích, jako nekroucené vinutí.

Mezi vytvořenými baluny nelze vybrat jednoznačného vítěze. Jako nejuniverzálnější varianta na měřeném kmitočtovém rozsahu se jeví balun z jádra s neznámými parametry a se 6 závity, který se nejčastěji vyskytuje pod úrovní $SWR = 2$ v měřeném pásmu. Pro kmitočty do 10 MHz je pak nejvhodnějším balun s jádrem RT-406-274-150 a s 8 závity, který má pro tyto frekvence nejnižší SWR. Na vysokých kmitočtech má poté v úzkém pásmu od 780 MHz až do 800 MHz nejnižší SWR balun s jádrem T157-2 s 8 závity, a to pod úrovní $SWR = 1,6$ a ve špičce dokonce pod $SWR = 1,1$.

Práce byla pojata spíše experimentálně s cílem zkoumat reálné chování jednotlivých prvků. Z naměřených hodnot je patrné, že SMD rezistory se nechovají ideálně na vysokých frekvencích, a to pravděpodobně z důvodu vlivu skin efektu. Existují i speciální vysokofrekvenční rezistory, ty ovšem mají nevyhovující hodnoty. Neideální chování balunů mohlo být způsobeno materiály jader, které nejsou úplně vhodné pro takto velký frekvenční rozsah. Svou roli hraje také ne úplně přesný transformační poměr balunu 1:4 ku charakteristické impedanci stripline.

Seznam literatury a informačních zdrojů

- [1] Prof. Ing. Jiří Svačina, CSc. *Základy elektromagnetické kompatibility Část 1 - Základní pojmy a členění oboru EMC*. In: *elektrorevue.cz* [online]. 16. 9. 2000 [cit. 6. 5. 2018]. Dostupné z: <http://www.elektrorevue.cz/clanky/00025/index.html>
- [2] Franciscus Jozua van Dam. *A stripline antenna for radiated immunity testing*. Ewi telecommunication engineering, University of Twente 27. 10. 2011
- [3] Ing. Tomáš Procházka. *S-parametry*. In: *elektrorevue.cz* [online]. 13. 6. 2002. Dostupné z: <http://www.elektrorevue.cz/clanky/02029/index.html>
- [4] Sezgin Hilavin. *DESIGN AND CALIBRATION OF A TEM STRIPLINE FOR ELECTROMAGNETIC COMPATIBILITY TESTING*. Izmir Institute of Technology 20. 12. 2011