

Impedanční přizpůsobení zařízení a jeho vliv na přenos informace

The Impedance Matching of Device and its Effect on the
Transmissions of Information

Vratislav Půr

Bakalářská práce
2013



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta aplikované informatiky

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: Vratislav PŮR
Osobní číslo: A09602
Studijní program: B3902 Inženýrská informatika
Studijní obor: Bezpečnostní technologie, systémy a management
Forma studia: prezenční

Téma práce: Impedanční přizpůsobení zařízení a jeho vliv na přenos informace

Zásady pro vypracování:

1. Prostudujte podrobně problematiku impedance.
2. Seznamte se s vlivem impedance na propojování zařízení mezi sebou.
3. Diskutujte nutnost impedančního přizpůsobení z hlediska kvality přenosu signálu.
4. Na vhodném příkladu demonstруйте vliv impedančního přizpůsobení.
5. V příkladu uveďte porovnání nevhodně zvoleného přizpůsobení s optimálním přizpůsobením.

Rozsah bakalářské práce:

Rozsah příloh:

Forma zpracování bakalářské práce: tištěná/elektronická

Seznam odborné literatury:


1. SEDLÁK, Bedřich. Elektřina a magnetismus. Vyd. 2., opr. a rozš. Praha: Academia, 2002, 632 s. ISBN 80-200-1004-1.
2. SEDLÁK, Bedřich. Elektrotechnická měření. 1. vyd. Praha: BEN – technická literatura, 2002, 255 s. ISBN 80-730-0022-9.
3. BLAHOVEC, Antonín. Elektrotechnika II. 4., nezměn. vyd. Praha: Informatorium, 2003, 154 s. ISBN 80-733-3013-X.
4. DOLEČEK, Jaroslav. Moderní učebnice elektroniky. 4., nezměn. vyd. Praha: BEN – technická literatura, 2005, 342 s. ISBN 80-730-0146-2.
5. CHUNG, B.K. Q-based design method for T network impedance matching: Microelectron. Microelectronics. 2006, roč. 37, č. 9, 1007-1011. ISSN 0026-2692.
6. SADÍLEK, Tomáš. Impedanční přizpůsobení. [Http://www.skvor.cz](http://www.skvor.cz) [online]. 2005 [cit. 2013-02-04]. Dostupné z: <http://www.skvor.cz/pdf/impmatch2.pdf>
7. VUT BRNO. Multimediální učebnice: Mikrovlnné obvody. [Http://www.urel.feec.vutbr.cz/](http://www.urel.feec.vutbr.cz/) [online]. 2010 [cit. 2013-02-04]. Dostupné z: <http://www.urel.feec.vutbr.cz/raida/multimedia/index.php?nav=9-1-Adf>

Vedoucí bakalářské práce: Ing. Lubomír Macků, Ph.D.
Ústav elektroniky a měření


Datum zadání bakalářské práce: 25. února 2013

Termín odevzdání bakalářské práce: 30. května 2013

Ve Zlíně dne 25. února 2013


prof. Ing. Vladimír Vašek, CSc.
děkan




doc. Mgr. Milan Adámek, Ph.D.
ředitel ústavu

ABSTRAKT

Tato bakalářská práce obsahuje definici impedance a její vliv na přenos signálu. Dále je v práci uvedena nutnost impedančního přizpůsobení. V praktické části jsou uvedeny výsledky měření koaxiálních kabelů jejich přenosové charakteristiky, fázové posuny a odrazy pro různé impedance, které mají vliv na kvalitu signálu.

Klíčová slova:

Impedance, cívka, kondenzátor, odpor, koaxiální kabel, Smithův diagram, signál, fázový posun, odraz vln.

ABSTRACT

This work includes the definition of impedance and its effect on signal transmission. The study also indicated the need for impedance matching. In the practical part contains the results of measurements of coaxial cable transmission characteristics, phase shifts and reflections for different impedance, which affect the signal quality.

Keywords:

Impedance, coil, capacitor, resistor, coaxial cable, Smith diagram, signal, phase shift, reflection waves.

„Žádné množství pokusů nikdy nemůže dokázat, že jsem měl pravdu. Jediný pokus však kdykoliv může dokázat, že jsem se mýlil.“

Albert Einstein

Na tomto místě bych rád poděkoval svému vedoucímu práce, panu Ing. Lubomíru Macků Ph.D., za ochotný a aktivní přístup při vedení a pomoc při získávání potřebných vědomostí. Dále bych chtěl poděkovat panu Ing. Stanislavu Goňovi Ph.D., který mi pomohl s měřením na spektrálním analyzátoru. Poděkování patří též Mgr. Vladislavě Szitaiové za korekturu textu. V neposlední řadě chci poděkovat své rodině a blízkým za podporu nejen při psaní bakalářské práce, ale i v průběhu celého studia.

Prohlašuji, že

- beru na vědomí, že odevzdáním bakalářské práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb. o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších právních předpisů, bez ohledu na výsledek obhajoby;
- beru na vědomí, že bakalářská práce bude uložena v elektronické podobě v univerzitním informačním systému dostupná k prezenčnímu nahlédnutí, že jeden výtisk bakalářské práce bude uložen v příruční knihovně Fakulty aplikované informatiky Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně a jeden výtisk bude uložen u vedoucího práce;
- byl/a jsem seznámen/a s tím, že na moji bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, zejm. § 35 odst. 3;
- beru na vědomí, že podle § 60 odst. 1 autorského zákona má UTB ve Zlíně právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona;
- beru na vědomí, že podle § 60 odst. 2 a 3 autorského zákona mohu užít své dílo – bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití jen s předchozím písemným souhlasem Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše);
- beru na vědomí, že pokud bylo k vypracování bakalářské práce využito softwaru poskytnutého Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně nebo jinými subjekty pouze ke studijním a výzkumným účelům (tedy pouze k nekomerčnímu využití), nelze výsledky bakalářské práce využít ke komerčním účelům;
- beru na vědomí, že pokud je výstupem bakalářské práce jakýkoliv softwarový produkt, považují se za součást práce rovněž i zdrojové kódy, popř. soubory, ze kterých se projekt skládá. Neodevzdání této součásti může být důvodem k neobhájení práce.

Prohlašuji,

- že jsem na bakalářské práci pracoval samostatně a použitou literaturu jsem citoval. V případě publikace výsledků budu uveden jako spoluautor.
- že odevzdaná verze bakalářské práce a verze elektronická nahraná do IS/STAG jsou totožné.

Ve Zlíně

.....
podpis diplomanta

OBSAH

ÚVOD	9
I TEORETICKÁ ČÁST	10
1 IMPEDANCE	11
1.1 AKUMULAČNÍ PRVKY	12
1.1.1 Ideální cívka	12
1.1.2 Reálná cívka	14
1.1.3 Indukce v obvodu střídavého proudu	14
1.1.4 Ideální kondenzátor	15
1.1.5 Reálný kondenzátor	16
1.1.6 Kondenzátor v obvodu střídavého proudu	16
1.1.7 Odpor ideální.....	16
1.1.8 Reálný odpor	17
1.2 IMPEDANCE PŘENOSOVÉ TRASY.....	17
1.3 MĚŘENÍ IMPEDANCÍ.....	18
2 ROZPTYL	19
2.1 S- PARAMETRY	19
2.2 DEFINICE	20
2.3 S-PARAMETRY U DVOJBRANU.....	21
2.4 VLASTNOSTI S-PARAMETRŮ DVOJBRANU	22
2.4.1 Komplexní lineární zesílení	23
2.4.2 Skalární lineární zesílení:	23
2.4.3 Skalární logaritmický zisk.....	23
2.4.4 Vložený útlum	23
2.4.5 Vstupní zpětný útlum	23
2.4.6 Výstupní zpětný útlum	24
2.4.7 Reverzní zisk a reverzní izolace.....	24
2.4.8 Koeficient napěťového odrazu	24
2.4.8.1 Smithův diagram.....	24
2.4.9 Poměr stojatých napěťových vln.....	26
3 IMPEDANČNÍ PŘÍZPŮSOBENÍ	27
3.1 DŮSLEDKY IMPEDANČNÍHO NEPŘÍZPŮSOBENÍ.....	27
3.1.1 Mezi hlavní důsledky impedančního nepřizpůsobení v hlavní řadě patří:	28
3.2 PŘÍZPŮBOVACÍ OBVODY SE SOUSTŘEDĚNÝMI PARAMETRY	29
II PRAKTICKÁ ČÁST	31
4 ZKRESLENÍ SIGNÁLU	32
4.1 ZKRESLENÍ OBDÉLNÍKOVÉHO SIGNÁLU	32
4.1.1 Postup měření.....	34
4.1.1.1 Nastavení osciloskopu	34
4.1.2 Výsledky měření	35
4.2 ZÁVĚR MĚŘENÍ	37
5 MĚŘENÍ NA SPEKTRÁLNÍM ANALYZÁTORU	38

5.1	MĚŘENÍ PŘENOSOVÉ CHARAKTERISTIKY KABELŮ	39
5.1.1	Postup měření.....	39
5.1.2	Výsledek měření.....	39
5.1.3	Závěr měření	44
5.2	MĚŘENÍ ODRAZU	45
5.2.1	Měření amplitudy odrazu	45
5.2.2	Měření fázového posuvu	46
5.2.3	Smithovy Diagramy	48
5.2.4	Závěr měření odrazu	50
ZÁVĚR		51
ZÁVĚR V ANGLIČTINĚ.....		52
SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY.....		53
SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK.....		54
SEZNAM OBRÁZKŮ		55

ÚVOD

V této bakalářské práci jsme se zaměřili na impedanční přizpůsobení. V dnešní moderní době se elektronika využívá téměř ve všech odvětvích lidské činnosti. Většina přístrojů mezi sebou musí nějakým způsobem „komunikovat“ a pokud se toto děje prostřednictvím metalických vodičů, měla by tato přenosová trasa být impedančně přizpůsobená.

Impedanční přizpůsobení má velký vliv u audiotechniky a videotechniky, také u vf techniky. Požadavky jsou především kladeny na kvalitní obraz, zvuk, nízký útlum a vysoké frekvenční spektrum přenášeného signálu. Vysoké kvality ale nedosáhneme po metalickém vedení, jež nebude impedančně přizpůsobeno.

Existuje velké množství propojovací kabeláže. V práci jsme se proto zaměřili na koaxiální kabely, které najdou uplatnění při mnoha způsobech propojení zařízení. Jejich velkou výhodou je stínění a poměrně dobré přenosové vlastnosti.

Tyto kabely se dříve používaly pro propojení počítačových sítí, nevýhodou bylo nepřizpůsobení takovéto sítě. Když se k poslednímu PC v síti nepřidala vyvažovací zátěž, docházelo k odrazům na vedení a posléze k zahlcení celé sítě. Běžně se stále používají u anténních rozvodů a audiotechniky.

V praktické části bakalářské práce jsou uvedeny pokusy, které jsme prováděli pro ověření teorie. Z těchto pokusů můžeme vycházet pro důležitost impedančního přizpůsobení pro kvalitní přenos signálu.

V práci jsme kladli důraz na jednoduchost a srozumitelnost co největšímu počtu případných čtenářů naší práce. Nechtěli jsme tento problém však zobecnit příliš a naše práce je tedy určena především lidem zainteresovaným do problematiky a ne pouhým laikům. Doufáme, že naše práce bude cenným přínosem v oblasti elektrotechniky a bude kvalitním studijním materiálem při objasňování impedančního přizpůsobení.

I. TEORETICKÁ ČÁST

1 IMPEDANCE

Impedance je komplexní veličina charakterizující obvod střídavého elektrického proudu, značí se Z , základní vzorec (1.1) nám vyjadřuje celkový odpor obvodu nebo jeho jednotlivých součástí při střídavém elektrickém proudu:

$$Z = \frac{U}{I} \quad [\Omega] \quad 1.1$$

Obdobným způsobem si můžeme představit vysílač – přijímač jako jeden obvod, kde jsou tyto části spojeny metalickým vedením. Jednotka impedance (1.2) je 1 Ohm (Ω). Rozdíl mezi odporem a impedancí je takový, že odpor má napětí a proud ve fázi, kdežto impedance má fázový posun a je složená ze dvou částí.

$$Z = R + jX = |Z| \cos \varphi + j |Z| \sin \varphi \quad [\Omega] \quad 1.2$$

První část impedance představuje reálný odpor součástky, jenž není frekvenčně závislý a při kreslení průběhu se vynáší na reálnou osu, označujeme jej R . Druhou částí je poté fázový posuv střídavého elektrického napětí proti střídavému elektrickému proudu při harmonickém průběhu dané frekvence.

Druhou část značíme jX (reaktanční složka), je závislá na úhlové rychlosti (1.3), jejíž jednotkou je 1 rads^{-1} . Skládá se z kondenzátorové (1.4) a indukční (1.5) části. Jedná se o imaginární složku impedance a při zakreslování průběhu se vynáší na imaginární osu.

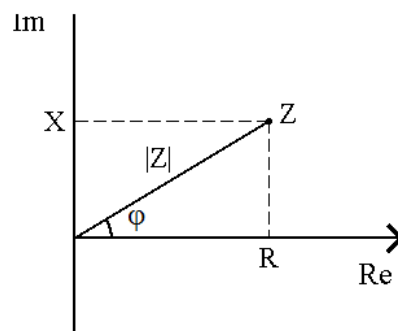
$$\omega = 2\pi f \quad [\text{rads}^{-1}] \quad 1.3$$

$$X_C = \frac{1}{j\omega C} \quad [\Omega] \quad 1.4$$

$$X_L = j\omega L \quad [\Omega] \quad 1.5$$

Z této definice vyplývá silná závislost impedance na frekvenci daného obvodu, popřípadě signálu. Úhel mezi imaginární a reálnou složkou je úhel fázového posuvu φ . Na obrázku (Obrázek 1-1 Impedance) ukazujeme vztah reálné a imaginární složky impedance, spolu s fázovým posuvem φ .

Obrázek 1-1 Impedance



1.1 Akumulační prvky

Jedná se o prvky obvodu, mající schopnost akumulovat (nahromadit) elektrickou energii, patří zde kapacita a indukce. V následující části vás seznámíme se základními vlastnostmi akumulčních prvků obvodu.

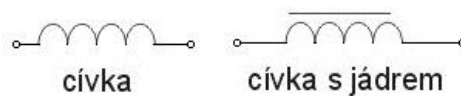
1.1.1 Ideální cívka

„Cívka je elektronická součástka, která má schopnost udržet v sobě v určitém okamžiku nahromaděnou elektrickou energii a v jiném okamžiku ji ze sebe vydat“ [4]

U cívky (Obrázek 1-2 schematické značky cívky) se využívá vlastností magnetického pole, jež „brzdí“ pohyb elektronů v metalickém vodiči. Podle Ampérova zákona o magnetickém poli ve vakuu můžeme odvodit teorii magnetického pole přímého vodiče nekonečně dlouhého *„vektor magnetické indukce B má vždy směr tečny ke koncentrickým kružnicím se středy na ose vodiče, ležícími v rovině kolmé na směr vodiče. Velikost vektoru magnetické indukce ve vzdálenosti a od osy vodiče by byla přímo úměrná velikosti proudu I protékajícího vodičem a nepřímo úměrná vzdálenosti a, bylo by možné ji vyjádřit vztahem $B = C \frac{I}{a}$ v němž C je konstanta související s volbou jednotky proudu.“ [1]*

Cívka má N závitů namotaných kolem jádra, jenž může být vzduchové, z magneticky měkkého nebo tvrdého materiálu, zvláštním případem jsou toroidní (kruhové) cívky.

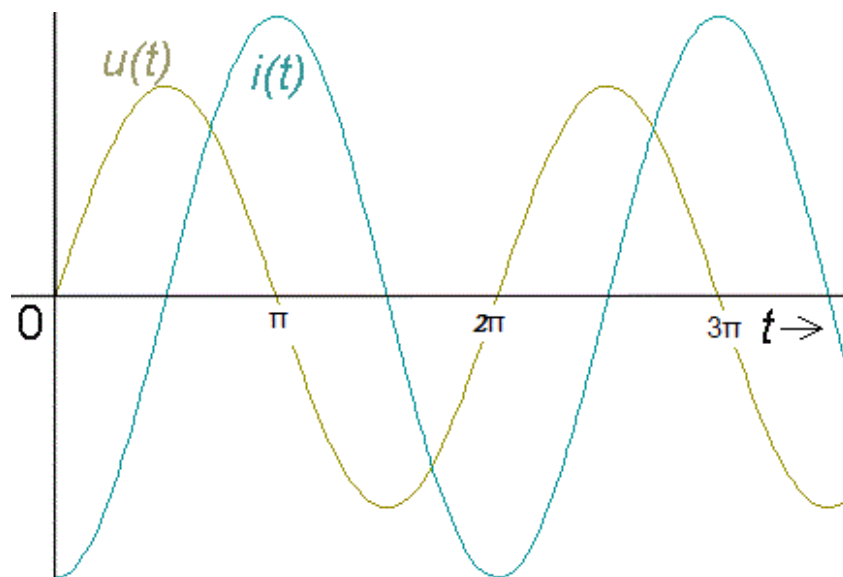
Obrázek 1-2 schematické značky cívky



Hlavním parametrem cívky je její indukčnost, která závisí na vlastnostech magnetického jádra cívky, na počtu závitů a na rozměru cívky. Indukčnost je schopnost vytvářet magnetické pole v okolí vodiče. U ideální cívky se napětí předbíhá proudem o 90° , jak je vidět z charakteristiky (Obrázek 1-3 průběh napětí a proudu na cívce). Vlastní indukčnost cívky (1.6) závisí na permeabilitě μ , počtu závitů N , délce vodiče l a jeho průřezu S .

$$L = \frac{\mu N^2}{l} S \quad [H] \quad 1.6$$

Obrázek 1-3 průběh napětí a proudu na cívce



Obecný vzorec pro výpočet vlastní indukce (1.7), kde Φ je magnetický indukční tok a I je proud protékající vodičem je:

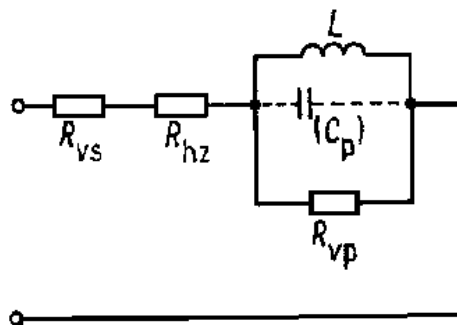
$$L = \frac{\Phi}{I} \quad [H] \quad 1.7$$

Jednotkou indukčnosti je $1H = V \cdot A^{-1} \cdot s$.

1.1.2 Reálná cívka

Musíme mít na paměti, že oproti ideálnímu prvku se nám reálný prvek skládá z mnoha dalších částí. Reálná cívka (Obrázek 1-4 náhradní schéma reálné cívky) je tvořena kovovým vodičem, jenž má svůj vlastní sériový odpor vynutí R_{VS} , odpor vynutí paralelní R_{VP} a odpor hystereze R_{HZ} . Mezi jednotlivými závity cívky vzniká paralelní parazitní kapacita C_P (cívka je většinou tvořena drátem, který je v závitech namotán buď na nějakém jádru či jiné konstrukci. Tyto dráty jsou převážně lakované, aby jejich povrch nebyl elektricky vodivý a nezpůsobil zkraty, tento lak nám vytváří dielektrikum).

Obrázek 1-4 náhradní schéma reálné cívky



1.1.3 Indukce v obvodu střídavého proudu

Pro ideální cívku platí: „Připojíme-li ke zdroji střídavého napětí u ideální cívku, bude obvodem procházet sinusový proud $i = I_{max} \sin \omega t$. Sinusový proud vybudí střídavý magnetický tok Φ , který je ve fázi s proudem i .“ [3]

U ideální cívky se předbíhá napětí před proudem o 90° , u reálné cívky je však tento posuv jiný a záleží na dalších faktorech, jako jsou např. odpor hystereze R_{hz} , odpor vynutí R_{vs} a parazitní kapacita C_P . S rostoucí frekvencí obvodu se zvětšuje induktivní reaktance X_L (1.9)

$$u = U_m * \cos(\omega t) = i * X_L = I_m * \cos\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right) * X_L = I_m * \sin(\omega t) * X_L \quad 1.8$$

Po vhodné úpravě dostáváme jednodušší vzorec (1.9), z kterého je patrné zvětšování induktivní reaktance se zvětšující se frekvencí:

$$X_L = 2\pi fL = \omega L \quad [\Omega] \quad 1.9$$

Teoreticky by nám měla induktivní reaktance s frekvencí růst až k nekonečnu, avšak záleží také na kvalitě indukce, vycházející z její konstrukce.

1.1.4 Ideální kondenzátor

„Kondenzátor je elektronická součástka, která má schopnost po určitý časový interval hromadit a udržet (akumulovat) elektrický náboj a v jiném časovém intervalu jej dodat zpět do obvodu“ [4]

Z výše uvedené definice kondenzátoru nám vyplývá, že se jedná o prvek akumulačních nebo setrvačných obvodů. Kondenzátor (Obrázek 1-5 schematická značka kondenzátoru) je složen ze dvou metalických elektrod o ploše S . Elektrody odděluje dielektrikum s tloušťkou l a permitivitou ε . Elektrický proud protékající kondenzátorem, nabíjí jeho elektrody nábojem Q , do doby než se kondenzátor zcela nabije, poté se kondenzátor začne vybíjet. Velikost náboje na elektrodách kondenzátoru je větší:

1. když je větší napětí U mezi elektrodami
2. elektrody mají větší plochu
3. je menší vzdálenost mezi elektrodami
4. je větší permitivita dielektrika

Obrázek 1-5 schematická značka kondenzátoru



Dokud na svorky ideálního kondenzátoru nepřiložíme zátěž, zůstává nabitý. Napětí na kondenzátoru vypočítáme ze vztahu:

$$U = \frac{Q}{S \cdot \varepsilon_0 \varepsilon_r} \cdot l = Q \cdot \frac{1}{C} \quad [V] \quad 1.10$$

Zde napětí mezi elektrodami U závisí na permitivitě ε prostředí mezi elektrodami, ploše elektrod S vzájemné vzdálenosti elektrod l a elektrickém náboji Q . Po úpravě dostaneme vzorec pro výpočet kapacity kondenzátoru:

$$C = \varepsilon_0 \varepsilon_r \frac{S}{l} \quad [F] \quad 1.11$$

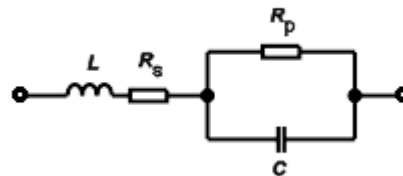
1.1.5 Reálný kondenzátor

Reálný kondenzátor (Obrázek 1-6 náhradní schéma reálného kondenzátoru) oproti ideálnímu nezůstane donekonečna nabitý, vybíjí se i bez přiložení zátěže. Tento jev je způsoben nedokonalostí výroby kondenzátoru. Reálný kondenzátor má ztráty způsobené časovým zpožděním polarizace dielektrika při změně elektrického pole. Není odolný vůči vnějším vlivům jako je teplota a vlhkost a díky jim stárne a mění své vlastnosti. Permittivita dielektrika není reálné číslo, ale komplexní číslo. Při vysoké frekvenci nám vzniká na přívodech k elektrodám indukce. U reálného kondenzátoru není fázový posun napětí vůči proudu stejný pro všechny frekvence, ale mění se. Pro správné fungování kondenzátoru je nutné, aby pracoval pod frekvencí f_0 (1.12), která udává rezonanční kmitočet kondenzátoru.

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad [Hz] \quad 1.12$$

Oproti tomu se s rostoucí frekvencí snižuje kapacitní reaktance X_c (1.4).

Obrázek 1-6 náhradní schéma reálného kondenzátoru



Z náhradního schématu lze vidět, z čeho se skládá reálný kondenzátor. Indukce L je indukce metalického vedení, R_s je sériový odpor vedení R_p je paralelní odpor vedení.

1.1.6 Kondenzátor v obvodu střídavého proudu

V případě ideálního kondenzátoru nám s rostoucí frekvencí klesá jeho odpor, až se nám jeví téměř jako zkrat při velmi vysoké frekvenci. Tento jev je dán rychlostí nabíjení a vybíjení kondenzátoru, kdy při velmi vysoké frekvenci se kondenzátor nestačí vybíjet a je téměř pořád nabitý. Reálný kondenzátor se však i při vysoké frekvenci vybíjí a nezůstává permanentně nabitý, a také se zcela nenabije.

1.1.7 Odpor ideální

Jedná se o jednobran, který není frekvenčně závislý, a tudíž nepatří mezi akumulační prvky, avšak je velmi důležitým prvkem každého obvodu. Například u impedance nám určuje reálný odpor obvodu. Chová se jako spotřebič (pasivní prvek

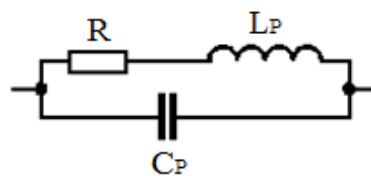
obvodu), elektrickou energii přeměňuje na teplo. Je vyjádřen vztahem (1.13), ideální odpor má ideální charakteristiky ať už lineární nebo nelineární. Ideální odpor má napětí a proud ve fázi.

$$R = \frac{U}{I} \quad [\Omega] \quad 1.13$$

1.1.8 Reálný odpor

Reálný odpor má jiné vlastnosti než ideální, způsobuje nám také bílý šum a je frekvenčně závislý. Reálný rezistor (Obrázek 1-7 náhradní schéma reálného rezistoru) obsahuje jak parazitní indukci L_P , tak parazitní kondenzátor C_P . Parazitní indukci nám na odporu vytváří vodič (odporový drát) namotaný na jádro rezistoru a mezera mezi elektrodami odporu nám tvoří parazitní kapacitu.

Obrázek 1-7 náhradní schéma reálného rezistoru



1.2 Impedance přenosové trasy

Musíme si uvědomit, že jakékoliv metalické vedení elektrického signálu je v podstatě složeno z imaginární a reálné složky impedance. Imaginární část impedance je zde tvořena z kapacity – izolace mezi vodiči je dielektrikum, které nám vytváří kondenzátor a indukce – vodičem protéká elektrický proud, jenž vytváří elektromagnetické pole.

Reálná část impedance tvoří měrný odpor materiálu většinou mědi $1,75 \mu\Omega\text{cm}$ nebo hliníku $2,828 \mu\Omega\text{cm}$ obě tyto hodnoty jsou pro teplotu 20°C . Z toho plyne, že každé metalické vedení signálu má svou vlastní impedanci.

Impedance má velký vliv na kvalitu přenášeného signálu, protože nám tento signál zkresluje svými reálnými a imaginárními složkami. Pokud spojíme dvě vedení s různou impedancí, dochází nám na tomto předělu k odrazům signálu. Impedance takového propojení závisí na poloměrech obou vodičů a na relativní permitivitě dielektrika mezi nimi. Signál může být zkreslený do té míry, že nám může přenášenou informaci poškodit (zkreslit) anebo zcela zničit. V nejhorším případě nám může tento signál poškodit elektroniku přijímače.

Impedance přenosové trasy Z_0 (1.14), kde R je odpor vodiče L jeho indukce C kapacita způsobená izolací (dielektrikem) a vodivostí G , jež vyjadřuje odpor kapacity C , ω nám značí úhlovou rychlost.

$$Z_0 = \sqrt{\frac{R + j\omega L}{G + j\omega C}} \quad [\Omega] \quad 1.14$$

Při přenosu signálu u akustických zesilovačů požadujeme, aby vstupní impedance byla v ideálním případě nekonečná a na výstupu u ideálního zesilovače nulová.

1.3 Měření impedancí

„K měření impedancí, kapacity či indukčnosti se používá jednak metody výchylkové a jednak metody nulové (můstky). Při Měření impedance napájíme obvod vždy střídavým sinusovým proudem, při napájení stejnosměrným proudem bychom změřili pouze činnou složku impedance, tedy ohmický odpor.“ [2]

Pro měření impedance je důležitá frekvence použitá pro měření. Často hledáme rezonanční kmitočet, tj. frekvence kdy nám obvod nejvíce přenáší elektrickou energii. Je dán vzorcem (1.12). Pro většinu kmitočtově závislých obvodů je tento kmitočet jedním z hlavních parametrů a také nám určuje frekvenční rozsah signálu, který můžeme přenášet v obvodu s co nejnižšími ztrátami.

U měření si musíme uvědomit rozdíl mezi ideálními a reálnými prvky obvodu. Pro přesnější výpočty použijeme reálné vlastnosti prvků. Pomocí ideálních prvků si můžeme orientačně zjistit základní parametry obvodu, jako jsou kapacita, indukce, odpor a případně impedance. Tyto pomocné výpočty nám poslouží pro orientaci a nastavení přístrojů pro měření.

2 ROZPTYL

Rozptyl je fyzikální proces, kdy jsou některé formy záření, jako je světlo, zvuk, nebo pohybující se částice, nuceny odchýlit se od přímé dráhy, jednou nebo více lokalizovanými drobnými poruchami prostředí, jímž jsou přenášeny. Obvykle se jedná o odchylku odraženého záření, která vychází ze zákona odrazu (úhel odrazu je roven úhlu dopadu). Tyto odrazy, které se rozptýlí, jsou často nazývány difúzní odrazy a odrazy nerozptýlené se nazývají zrcadlové.

Rozptyl signálu může vznikat z různých nedokonalostí vodiče, vycházející z technologií výroby (použitý materiál), anebo z nedokonalého spojení dvou a více vodičů. Zde hraje velkou roli impedance každého vodiče Z_0 (1.14), jež je závislá na průřezu metalického vodiče, jeho délce a dielektrika, jenž vodič obsahuje.

Z hlediska ztráty energie máme dva rozptyly. První je pružný - u tohoto rozptylu nedochází ke ztrátám energie, druhý je nepružný rozptyl - zde nám dochází ke ztrátám energie. Tato pojmenování vycházejí ze studií srážek těles, které se využívají k modelování rozptylu.

2.1 S- parametry

S-parametry, nebo-li Rozptylové parametry (prvky a rozptylové matice nebo S-matice) popisují elektrické chování lineárních elektrických sítí. Tyto parametry jsou vhodné pro elektrotechniku, elektroniku inženýrství, a návrh komunikačních systémů, a to zejména pro mikrovlnné techniky. S-parametry používají pro charakterizaci lineární elektrické sítě přizpůsobené zatížení.

Mnoho vlastností elektrické sítě může být vyjádřeno pomocí S- parametrů, jako je zisk, stojaté vlny, ztrátový výkon, koeficient odrazu, apod. Pokud rovinná elektromagnetická vlna dopadá na překážku nebo přechází přes odlišné dielektrické médium, vzniká nám rozptyl. V souvislosti s S-parametry, se rozptyl odkazuje na způsob, jakým jsou ovlivněny proudy a napětí, když se setkají s necelistvým vedením signálu.

S-parametry se používají hlavně pro sítě působící na rádiové frekvenci (RF) a mikrovlnných frekvencích, mění se frekvenčně, a proto musí být frekvence specifikovány pro všechny S-parametry měření. Jelikož S-parametry splňují pravidla maticové algebry, lze je zapisovat v maticovém tvaru.

Pokud si představíme elektrický obvod jako nějakou „krabičku“ nebo dvojbran, v němž jsou součástky jako kapacita, indukce, odpor různě navzájem propojeny, tak takovýto obvod můžeme charakterizovat pomocí S-matice, jíž můžeme vypočítat charakteristiku signálu obvodu, který má tato „krabička“ na svorkách.

Elektrická síť, jež je popsána pomocí S-parametrů, může mít jakýkoli počet vstupů a výstupů (dále jen porty). Tento popis elektrické sítě se používá tam, kde jsou porty často koaxiální nebo vlnovodná spojení. Matice pro výpočet S-parametrů může mít N-portů, zde matici obvodu převedeme na čtverec o rozměrech N a bude obsahovat N^2 prvků. Na zkušebním kmitočtu je každý prvek nebo S-parametr reprezentován komplexním číslem, které představuje velikost amplitudy a úhel fáze.

Komplexní číslo může být buď vyjádřeno v pravoúhlé formě, nebo obvykleji v polární formě. Velikost S-parametru může být vyjádřen v lineární formě nebo logaritmické formě. Pokud je vyjádřen v logaritmické formě, velikost má „bezrozměrné jednotky“ decibelů.

S-parametry úhlů jsou nejčastěji vyjádřeny ve stupních, ale občas v radiánech. Každý S-parametr může být znázorněn graficky na polárním diagramu tečkou (u jedné frekvence) nebo celou křivkou pro celý rozsah frekvence. Pokud se týká graf jen jednoho portu (je ve tvaru S_{nn}), může být zobrazen pomocí Shmitova diagramu, který umožňuje snadnou konverzi mezi S_{nn} parametrem, odpovídajícím napětí odrazu a impedanci, které jsou na tomto výstupu.

Pro S-parametry musí být definovány následující informace a to:

frekvence, charakteristická impedance (často 50Ω), očíslované porty a popřípadě podmínky, které mohou mít vliv na síť - například teplota, řídicí napětí, a klidový proud.
[8]

2.2 Definice

Pro víceportovou síť, je každému z portů přiděleno číslo n v rozmezí od 1 do n , kde n je celkový počet portů. Port n , s S-parametrem který určuje odrazení „energie vln“, a_n a b_n .

Dopadající energie vln pro každý port je definována jako:

$$a = \frac{1}{2}k(V + Z_p I) \quad 2.1$$

a odražené vlny pro každý proud jsou definovány jako:

$$b = \frac{1}{2}k(V + Z_p^* I) \quad 2.2$$

kde Z_p , je diagonální matice komplexní referenční impedance pro každý port. Z_p^* je elementární konjugace Z_p . Proměnná V značí napěťový sloupec matice, a I je proudový sloupec matice. Pro všechny porty, které mohou být vlnami odražené energie definovaných v podmínkách matice S-parametrů a dopadajících vln ze zdroje výkonu platí následující rovnice matice:

$$b = Sa \quad 2.3$$

kde S značí $N \times N$ matice prvků, které mohou být indexovány pomocí konvenční matice zápisu. U bezztrátové sítě nedochází ke ztrátám energie anebo pro ně platí:

$$\sum |a_n|^2 = \sum |b_n|^2 \quad 2.4$$

což znamená, že součet energie dopadající a součet všech ztrát způsobených odrazem v obvodu je roven, pak je S- matice jednotná, u ztrátového obvodu neplatí rovnost dopadu a odrazu:

$$\sum |a_n|^2 \neq \sum |b_n|^2 \quad 2.5$$

2.3 S-parametry u dvojbranu

S-parametrová matice pro dvojbranovou síť se používá nejčastěji a vychází se z ní pro generování matic vyšších řádů. Pro dvojbran vypadá matice následovně:

$$\begin{pmatrix} b_1 \\ b_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} S_{11} & S_{12} \\ S_{21} & S_{22} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} a_1 \\ a_2 \end{pmatrix} \quad 2.6$$

Vhodnou úpravou matice dostaneme rovnice

$$b_1 = S_{11}a_1 + S_{12}a_2 \quad 2.7$$

$$b_2 = S_{21}a_1 + S_{22}a_2 \quad 2.8$$

Každá rovnice dává vztah mezi odrazovým a dopadajícím výkonem vlny v každém ze síťových portů 1 a 2. Podle definice S-parametrů: je-li port ukončen zatížením shodným se systémem impedance (Z_0), pak budou odražená vlna b_1 a dopadající vlna a_1 , rovné nule. Z tohoto nám plyne, že pokud chceme mít přenos signálu beze ztrát, musíme mít stejnou impedanci jak u dopadové vlny, tak u odražené vlny. Pokud jsou impedance na prvním portu totožné, dostaneme rovnice:

$$S_{12} = \frac{b_1}{a_2} = \frac{V_1^-}{V_2^+} \quad 2.9$$

$$S_{22} = \frac{b_2}{a_2} = \frac{V_2^-}{V_2^+} \quad 2.10$$

a stejně tak, pokud jsou na druhém portu totožné, dostaneme rovnice:

$$S_{11} = \frac{b_1}{a_1} = \frac{V_1^-}{V_1^+} \quad 2.11$$

$$S_{21} = \frac{b_2}{a_1} = \frac{V_2^-}{V_1^+} \quad 2.12$$

Každý dvojbran má následující S- parametry:

S_{11} - odrazový koeficient vstupního napětí

S_{12} - zisk závěrného napětí

S_{21} - zisk napětí v propustném směru

S_{22} - odrazový koeficient výstupního napětí

2.4 Vlastnosti S-parametrů dvojbranu

Zesilovač, který působí v rámci lineárních podmínek je dobrým příkladem nerekiproční sítě, párové zeslabení je příkladem reciproční (vzájemné) sítě. Jmenovitá impedance systému, frekvence a jiné faktory, které mohou ovlivnit zařízení, jako je teplota, musí být rovněž uvedeny. [8]

2.4.1 Komplexní lineární zesílení

Komplexní lineární zesílení G je dáno vztahem:

$$G = S_{21} \quad 2.13$$

Jedná se o jednoduchý napěťový zisk, jenž je dán lineárním poměrem výstupního napětí k vstupnímu napětí, všechny hodnoty se vyjadřují v komplexním tvaru.

2.4.2 Skalární lineární zesílení:

Skalární lineární zisk (nebo velikost lineárního zesílení) je dána vztahem:

$$|G| = |S_{21}| \quad 2.14$$

Skalární napěťový zisk je lineární poměr výstupního napětí a vstupního napětí. Protože se jedná o skalární veličinu, fáze se v tomto případě neuvažuje.

2.4.3 Skalární logaritmický zisk

Skalární logaritmický zisk g je uveden v dB a je dán vztahem:

$$g = 20 \log_{10} |S_{21}| \quad [dB] \quad 2.15$$

Skalární logaritmický zisk se používá běžněji než skalární lineární zesílení. Kladné hodnoty jsou obvykle chápány jako zisk, záporné hodnoty zesílení nám vyjadřují ztráty v dB.

2.4.4 Vložený útlum

V případě, že dva měřené výstupy používají stejnou referenční impedanci, vložený útlum (VU) je vyjádřen v dB a závisí na zisku napětí v propustném směru S_{21}

$$VU = -20 \log_{10} |S_{21}| \quad [dB] \quad 2.16$$

2.4.5 Vstupní zpětný útlum

Vstupní útlum (VU_{in}) je skalární veličina. Udává nám jak blízko skutečné vstupní impedance sítě je nominální hodnota impedance systému, je dán vztahem:

$$VU_{in} = |20 \log_{10} |S_{11}| \quad [dB] \quad 2.17$$

Lineární část, je ekvivalentní k odražené amplitudě napětí vzhledem k velikosti dopadajícího napětí.

2.4.6 Výstupní zpětný útlum

Výstupní útlum odrazu má podobnou definici jako vstupní útlum, avšak vztahuje se k výstupnímu portu (port 2) místo vstupního portu, je dán vztahem:

$$VU_{out} = |20\log_{10}|S_{22}|| \quad [dB] \quad 2.18$$

2.4.7 Reverzní zisk a reverzní izolace

Skalární logaritmické vyjádření pro zpětný zisk je:

$$G_{rev} = |20\log_{10}|S_{12}|| \quad [dB] \quad 2.19$$

Často je vyjádřený jako reverzní izolace, jež je dána vztahem:

$$I_{rev} = |G_{rev}| = |20\log_{10}|S_{12}|| \quad [dB] \quad 2.20$$

2.4.8 Koeficient napěťového odrazu

Napěťový koeficient odrazu na vstupním portu (ρ_{in}), nebo na výstupním portu (ρ_{out}), je ekvivalentní k S_{11} a S_{22} v uvedeném pořadí, aby platilo:

$$\rho_{in} = S_{11} \quad a \quad \rho_{out} = S_{22} \quad 2.21$$

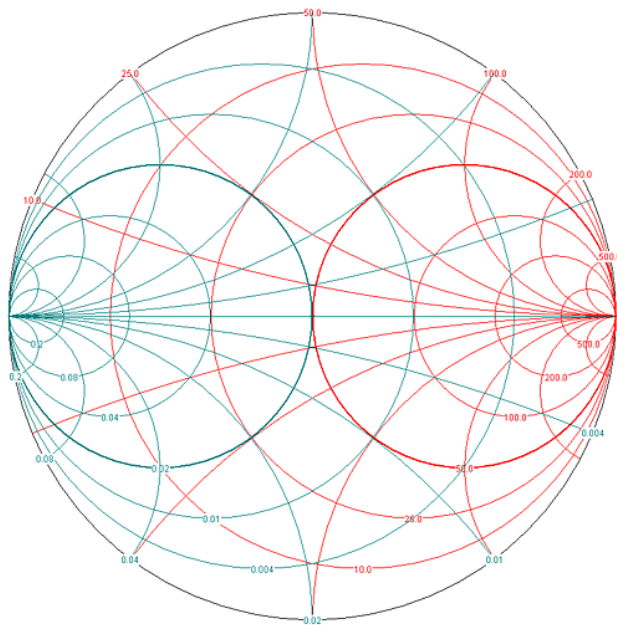
Jelikož jsou S_{11} a S_{22} komplexní veličiny, pak jsou i ρ_{in} a ρ_{out} také komplexními veličinami. Koeficienty napěťového odrazu jsou komplexní veličiny a mohou být graficky znázorněny na polárních diagramech anebo Smithově diagramu (Obrázek 2-1 Smithův diagram). [9]

2.4.8.1 Smithův diagram

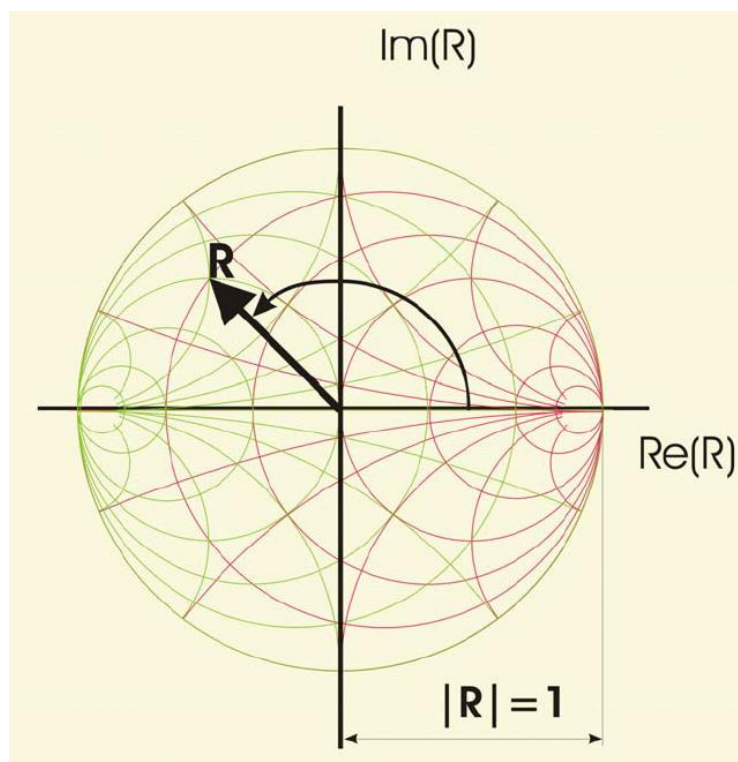
Ve středu Smithova diagramu se nachází bod, pro který obsahuje pouze reálnou část impedance, imaginární složky jsou zde nulové. Horní polovina znázorňuje kladnou reaktanci a spodní zápornou reaktanci. Červené kružnice jsou impedanční a zelené admitanční - jak lze vidět na obrázku (Obrázek 2-1 Smithův diagram). Na diagramu jsou

také znázorněny reálné a imaginární složky impedance (Obrázek 2-2 Smithův diagram s označením os)

Obrázek 2-1 Smithův diagram



Obrázek 2-2 Smithův diagram s označením os



2.4.9 Poměr stojatých napět'ových vln

Poměr stojatých napět'ových vln (PSV), je podobný jako zpětný útlum, ale jedná se o skalární lineární množství, poměr maximální napět'ové stojaté vlny vzhledem k minimální napět'ové stojaté vlně. Jedná se zde o velikost napětí odrazu a také velikost napětí na vstupním (S11) a výstupním (S22) portu. PSV máme jak na vstupu, tak na výstupu a jsou dány vztahy:

pro vstupní PSV:

$$PSV_{in} = \frac{1+|S_{11}|}{1-|S_{11}|} \quad 2.22$$

pro výstupní PSV

$$PSV_{out} = \frac{1+|S_{22}|}{1-|S_{22}|} \quad 2.23$$

Tyto vzorce se dají použít pouze v případě, že je reflexní koeficient menší jedné. Při odrazu s velikostí koeficientu větší jak jedna, nám vyjde negativní hodnota, avšak PSV má vždy kladnou hodnotu. Pro n portové případy se používá vzorec:

$$PSV_n = \frac{1+|S_{nn}|}{1-|S_{nn}|} \quad 2.24$$

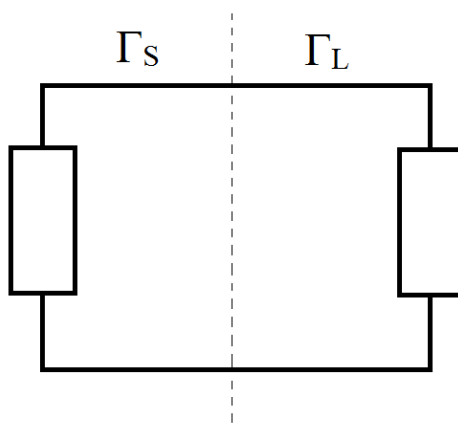
3 IMPEDANČNÍ PŘIZPŮBENÍ

„Impedančním přizpůsobením rozumíme situaci, při níž činitelé odrazu zátěže Γ_L a zdroje (generátoru) Γ_S jsou komplexně sdružené. Za této situace nedochází ke vzniku stojatého vlnění.“ [6]

Pokud chceme mít obvod (Obrázek 3-1 Zjednodušený obvod) impedančně přizpůsobený, musí mít imaginární části koeficienty stejné velikosti, avšak s rozdílnými znaménky. Vycházíme zde z kapitoly: Rozptyl, kde je problematika dopadu a odrazu vysvětlena. Tento obvod proto musí být v rezonanci, aby byly velikosti dopadajících a odražených vln stejné.

Jelikož musí být obvod v rezonanci, jsme tímto omezeni pouze na určité kmitočty. Obvod je pro dané součástky přizpůsobený. Tímto sice dosáhneme vysoké jakosti obvodu, co se týká impedančního přizpůsobení, avšak pro jiné frekvence je obvod impedančně nepřizpůsobený. Máme také přizpůsobovací obvody, ve kterých máme pro více frekvencí obvod dostatečně nikoliv zcela impedančně přizpůsoben.

Obrázek 3-1 Zjednodušený obvod



3.1 Důsledky impedančního nepřizpůsobení

Maximální přenos energie od zdroje po zátěž se objeví až když se rovná zatěžovací impedance komplexně sdružené impedanci zdroje. Impedanční přizpůsobení přenosu signálu pomocí pasivní sítě se obvykle provádí za účelem požadované impedance pro optimální tok energie. Se stále se zvyšující rychlostí integrovaných obvodů a

počítačových systémů, musí být s digitálním signálem zacházeno stejně jako s analogovým signálem, aby bylo možné zajistit integritu signálu. Impedanční přizpůsobení je významným problémem při návrhu vysokofrekvenčních elektronických obvodů, aby se zabránilo elektromagnetickému rušení. Nejčastěji používané odpovídající pasivní sítě jsou řešeny pomocí L článků (půl článků), Pí článků a Té článků. Pasivní sítě se používají pro svou jednoduchost při výrobě, proveditelnosti a snadnosti ladění. [5]

3.1.1 Mezi hlavní důsledky impedančního nepřizpůsobení v hlavní řadě patří:

- 1) Vznik stojatého vlnění, kterým se zvyšuje namáhání některých částí obvodu:
stojaté vlnění nám může poškodit koncové stupně v zesilovačů, tranzistory jsou náchylné na poškození velkými napěťovými impulzy a mohou nám shořet.
- 2) Útlum signálu:
Pro nepřizpůsobené vedení jsme omezeni délkou vedení, na velké vzdálenosti by byl útlum příliš vysoký. Z tohoto důvodu lze většinu propojení, které nejsou impedančně přizpůsobeny řešit jen na určitou vzdálenost, při které není útlum na takové úrovni, aby nám znemožnil přenos signálu.
- 3) Vniknutí imaginární složky impedance do laděných obvodů:
imaginární složka impedance se nám dostává do laděných obvodů a způsobuje jejich nepřesnost.
- 4) Odrážení signálu:
Signál se nám může na konci vedení odrazit zpátky směrem od vysílače k přijímači, nejčastěji se jedná o tzv. „duchy“ v televizním obrazu. Nebezpečné je zde zahlcení přenosového pásma odraženými signály.
- 5) Rezonance dlouhého nepřizpůsobeného vedení:
Na vedení může signál rezonovat na více frekvencích, vzniká zde velké zkreslení signálu, které může odfiltrovat některé složky signálu.

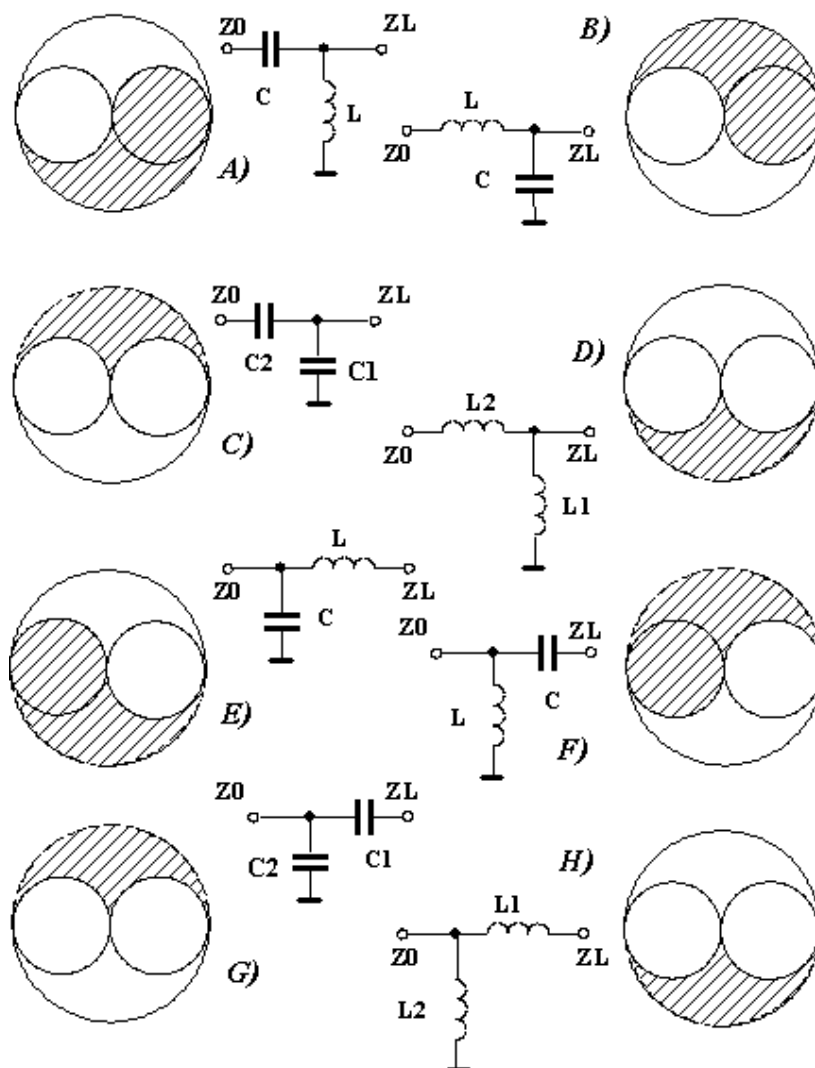
3.2 Přizpůsobovací obvody se soustředěnými parametry

„Libovolnou zátěž lze (na jedné frekvenci) impedančně přizpůsobit pomocí dvou součástí se soustředěnými parametry (reaktanci).“ [7]

Jedná se o L neboli půl články, Pí články a T články, které obsahují akumulční prvky kapacitu a indukci. L články mají tvar písmene L, odtud plyne jejich název a obsahují dva akumulční prvky. Pí články mají tvar řeckého písmene Pí a obsahují tři akumulční prvky. T články mají tvar písmene T a obsahují rovněž 3 akumulční prvky. Používají se pro impedanční přizpůsobení obvodů. Podle způsobu zapojení (Obrázek 3-2 Typy přizpůsobovacích půl článků) se využívají pro dané impedance anebo admitance. Počet kombinací takovýchto článků, kde kondenzátory a cívky mohou mít jakékoliv hodnoty je nekonečný. Pro určitá vlnová pásma se řeší články zvlášť. Nevýhodou tohoto řešení je, že nám nepokryje celé frekvenční pásmo ale jen jeho určitou šířku, kterou ovlivníme vhodnými velikostmi kondenzátoru a cívky. Tato nevýhoda se dá částečně vyřešit použitím cívek a kondenzátorů, u nichž se dají měnit hodnoty.

„Obvody A, C, F a H poskytují stejnosměrné oddělení zátěže; obvod D stejnosměrně spojuje signálový vodič se zemí z obou stran; obvody A a F mají charakter horní propusti; obvody B a E mají charakter dolní propusti.“ [7]

Obrázek 3-2 Typy přizpůsobovacích půl článků



II. PRAKTICKÁ ČÁST

4 ZKRESLENÍ SIGNÁLU

Po prostudování teorie impedančního přizpůsobení vyvstala otázka, jak moc nám impedanční nepřizpůsobení ovlivní kvalitu signálu. V této části bakalářské práce se budeme zabývat zkreslením signálu. Jako nejlepší demonstraci nutnosti impedančního přizpůsobení jsme zvolili pokusy, na nich jsme zkoušeli kabely s různými dielektriky, stíněnými a impedancemi s různými zátěžemi. Pro pokusy jsme použili koaxiální kabely o délkách cca 100cm, na které jsme přidali koncovky CINCH, kterými jsme propojili kabely mezi sebou. Do takto propojených koaxiálních kabelů jsme přivedly obdélníkový signál a pomocí zátěží jsme pozorovaly, jak moc se měnil signál v závislosti na zátěži kabelů. Cílem tohoto měření bylo simulovat přenos signálu po přizpůsobeném a nepřizpůsobeném vedení.

4.1 Zkreslení obdélníkového signálu

Pro měření jsme použili následující přístroje a součástky:

Osciloskop Voltcraft 632FG

Koaxiální kabel KOAX RG58U-LICNA s parametry : 50Ω , 5.0/3.0mm, 17x0.19/112x0.12 - černý, vzduch. diel., 14.2dB/100m/100MHz, 47.2dB/860MHz (Obrázek 4-1 Koaxiální kabel RG58-U)

Koaxiální kabel KOAX RG174/U s parametry: 50Ω , 2.8/1.6mm, 7x0.16/64x0.12 - černý, pevné diel., 9dB/10MHz/100m, 25.5dB/100MHz, 52dB/450MHz (Obrázek 4-2 Koaxiální kabel RG174/U)

Koaxiální kabel KOAX 3C2V s parametry: 75Ω , 5.0/3.0mm, pevné diel., 1x0.5/48x0.12, vnitřní - bílý, 13.5dB/100m/100MHz, 43.5dB/860MHz (Obrázek 4-3 Koaxiální kabel 3C2V)

Koncovky na kabely typu CIN01 V K (CINCH) (Obrázek 4-4 Konektory CINCH)

Digitální multimetr F-Tech M3900

Zkratovaná koncovka (Obrázek 4-5 Zkratovaná koncovka)

Koncovka se zátěží 50Ω (Obrázek 4-6 Zátěž 50Ω)

Koncovka se zátěží 75Ω (Obrázek 4-7 Zátěž 75Ω)

Obrázek 4-1 Koaxiální kabel RG58-U



Obrázek 4-2 Koaxiální kabel RG174/U



Obrázek 4-3 Koaxiální kabel 3C2V



Obrázek 4-4 Konektory CINCH



Obrázek 4-5 Zkratovaná koncovka



Obrázek 4-6 Zátěž 50 Ω



Obrázek 4-7 Zátěž 75 Ω

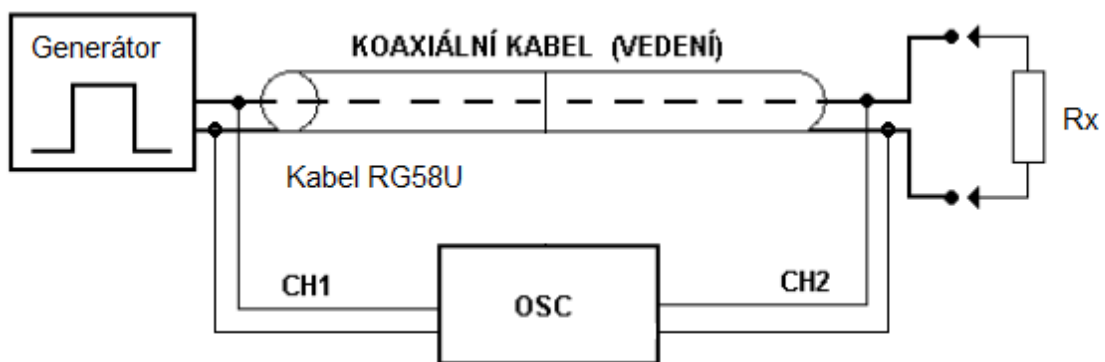


Odpory, které jsme použili jako na zátěže, měli toleranci 1%, pro zátěž 50Ω, jež není v odporové řadě, jsme museli použít 2 odpory a to 47Ω a 3Ω oba opět s tolerancí 1%.

4.1.1 Postup měření

Připravili jsme si Osciloskop a kabely podle schématu (Obrázek 4-8 Měření na osciloskopu). Generátor na osciloskopu jsme použili jako zdroj obdélníkového signálu. Na výstup generátoru jsme připojili kabel RG58U (50 Ω) a svorky prvního kanálu osciloskopu. Na konci kabelu se nachází koncovka CINCH, na kterou jsme připojovali následně další koaxiální kabely a to RG58U (50 Ω), RG174 (50 Ω) a 3C2V (75 Ω). U kabelů bylo důležité proměřit jejich odpor a zjistit tak, jestli není někde kabel přerušen. Proměření odporu a vodivosti kabelů bylo provedeno digitálním multimetrem F-Tech M3900. Nejprve se pomocí zvukové signalizace (pípání) „prozvonil kabel“, poté se změřil odpor pájených spojů u konektorů CINCH, ten byl u všech konektorů v rozmezí 0,2-0,3 Ω

Obrázek 4-8 Měření na osciloskopu



Jako první jsme připojili stejný kabel RG58U a měnili zátěž (R_x) na 50 Ω , 75 Ω a na 1k Ω . Druhé měření bylo s připojením kabelu RG174, tento kabel je impedančně totožný s kabelem, připojeným na generátoru a to RG58U, avšak liší se ve stínění (má ocelová lanka). Jeho jádro je tvořeno jedním vodičem a dále má rozdílné dielektrikum, zátěže jsme opakovali jako v prvním případě. V posledním měření jsme připojili na RG58U kabel 3C2V, který má jinou impedanci a to 75 Ω .

4.1.1.1 Nastavení osciloskopu

Jedná se o analogový osciloskop a nastavené hodnoty jsou přibližné. Lze je vyčíst z fotografie (Obrázek 4-9 Nastavení osciloskopu) pro jednoduchost jsou hlavní nastavené parametry:

Časová základna: 2ms

Rozsahy kanálu 1 a 2: 1V

Frekvence generátoru cca 1kHz

Signál: obdélníkový

Obrázek 4-9 Nastavení osciloskopu



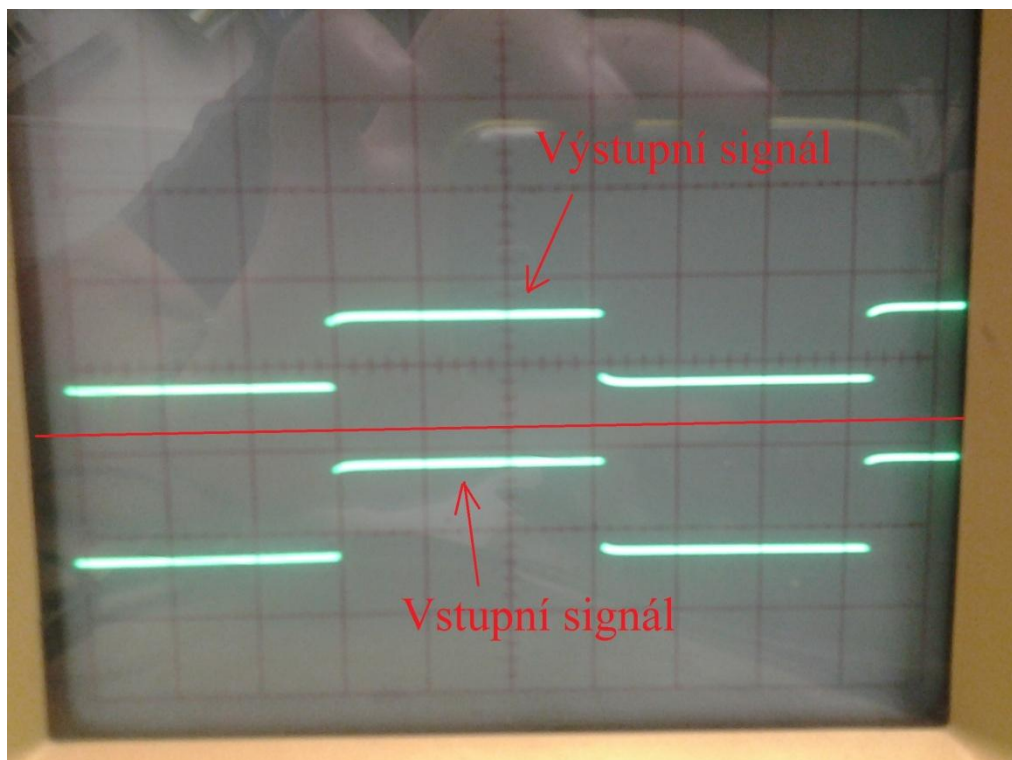
4.1.2 Výsledky měření

Měření na osciloskopu bylo pouze orientační, neboť se nedali nastavit přesné hodnoty. Měřením jsme zjistili, že se signál změní, když přidáme jiný kabel (jiné stínění a dielektrikum nebo odpor). Když jsme použili dva stejné kabely RG58U a zátěž byla 50Ω projevila se impedance na výstupu signálu jen nepatrně, protože byla přizpůsobená, avšak vodič nebyl ideální, takže k menšímu zkreslení signálu přeci jen došlo (Obrázek 4-10 Porovnání vstupního na výstupního signálu přizpůsobená impedance).

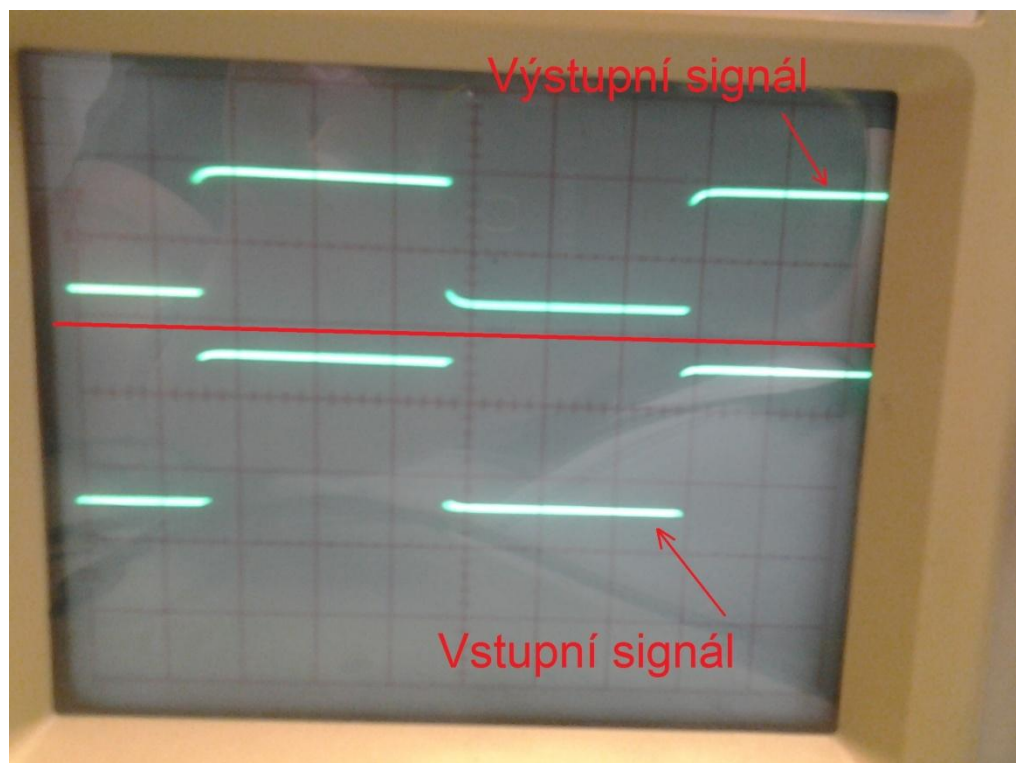
Se změnou zátěže na 75Ω , jsme pozorovali, jak se nám mění náběžná hrana impulsu signálu (Obrázek 4-11 Porovnání vstupního a výstupního signálu).

U výstupního signálu nám pomalu nabíhá nástupní hrana. Při připojení větší zátěže $1k\Omega$, jsme zjistili zvětšení amplitudy signálu a museli jsme na kanálech jedna a dvě nastavit 2V, abychom mohli dále pozorovat zkreslení signálu.

Obrázek 4-10 Porovnání vstupního na výstupního signálu přizpůsobená impedance



Obrázek 4-11 Porovnání vstupního a výstupního signálu nepřizpůsobeno



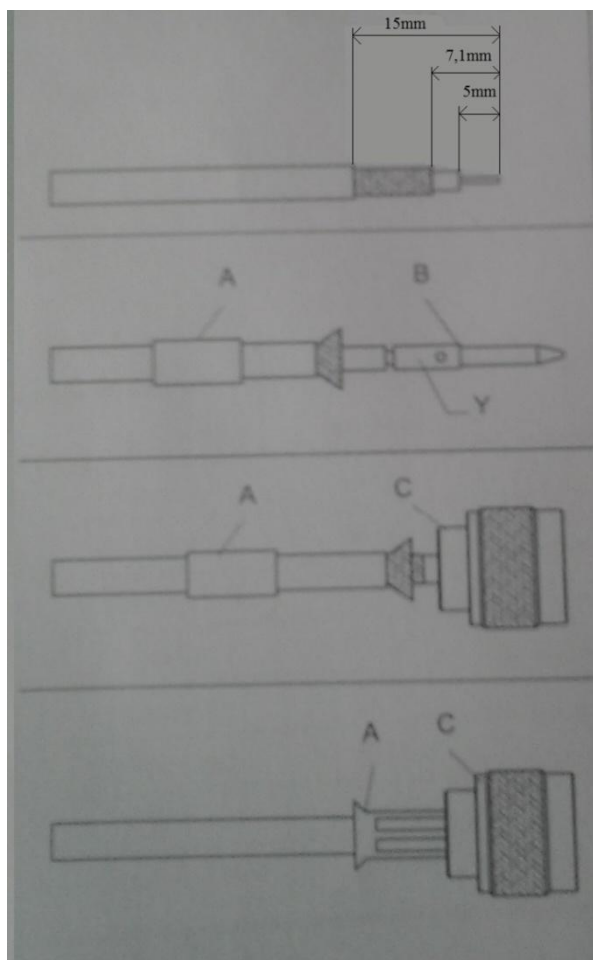
4.2 Závěr měření

Při tomto orientačním měření jsme zjistili, jak se signál zkresluje při rozdílných impedancích a zátěžích. Náběžná hrana pulsu výstupního signálu nabíhala pomaleji. Toto by mohlo mít vliv na zařízení, která se spínají s náběžnou hranou impulsů, i když by se jednalo o prodlevu v řádech μs a méně. U vysokofrekvenční techniky by se jednalo o příliš velkou chybu. Zvětšení amplitudy při vysoké zátěži ($1\text{k}\Omega$) by mohlo mít daleko horší následky pro přístroje než rozdílné dielektrikum nebo impedance kabelu.

5 MĚŘENÍ NA SPEKTRÁLNÍM ANALYZÁTORU

Pro toto měření jsme použili spektrální analyzátor FSH3 od firmy Rhode and Schwarz. Napřed jsme měřili přenosové charakteristiky koaxiálních kabelů. Před měřením bylo důležité připravit kabely RG58U, RG174 a 3C2V. Proměřili jsme jejich vodivost, zda nevznikl nějaký zkrat a také odpory koncovek CINCH, tento odpor byl opět v rozmezí 0,2-0,3 Ω . Dále jsme si připravili dva kratší kousky kabelu RG58U o délkách 17cm, na něž jsme přidali koncovky pro zapojení spektrálního analyzátoru (Obrázek 5-1 Pokyny pro pájení koncovek na FSH), zde bylo nutné dodržet rozměry odizolování kabelu podle výrobce. Na opačné konce kabelů jsme napájeli CINCH koncovky - pro jeden kabel samici a pro druhý kabel samce.

Obrázek 5-1 Pokyny pro pájení koncovek na FSH



Základní parametry spektrálního analyzátoru FSH3

Rozsah frekvence	100kHz až 3GHz
Šířka pásma videosignálu	10Hz až 1Mhz
Zobrazená průměrná úroveň šumu	-114 dBm (1 kHz)
TOI	13 dBm
Fázový šum	<-100 dB (1 Hz) při 100 kHz
Detektory	vzorek, max. / min vrchol, auto vrchol, RMS
Úroveň chyby měření	<1,5 dB, typ. 0,5 dB
Referenční úroveň	-80 dB až +20 dB
Rozměry	170 mm × 120 mm × 270 mm
Váha	2,5kg

5.1 Měření přenosové charakteristiky kabelů

Měření přenosové charakteristiky kabelů jsme prováděli jako důkaz frekvenční a impedanční závislosti kabelů na přenos signálu.

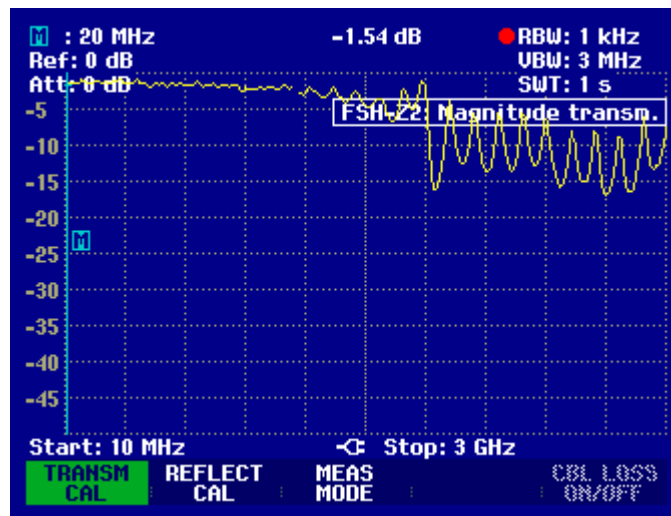
5.1.1 Postup měření

Před měřením bylo zapotřebí kalibrovat spektrální analyzátor. Kalibrace se prováděla pomocí kalibračního odporu 50Ω a prováděla se pro rozsah frekvence od 10MHz do 3GHz. Měřili jsme přenosové charakteristiky kabelů RG58U (50Ω), RG174 (50Ω) a 3C2V(75Ω). Poté jsme měřili přenosové charakteristiky propojených kabelů a to RG58U s RG174 a RG58U s 3C2V. Dále jsme měřili fázový posuv na těchto kabelech.

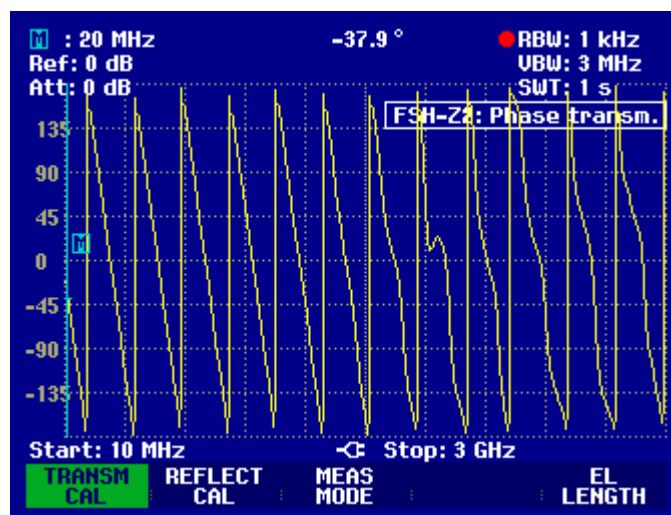
5.1.2 Výsledek měření

U přenosové charakteristiky kabelu RG58U (Obrázek 5-2 Přenosová charakteristika kabelu RG58U) jde vidět nestálost přenosu signálu po kabelu pro vyšší kmitočty. Pro kmitočet 20MHz byl útlum kabelu -1,54dB a fázový posun $-37,9^\circ$ (Obrázek 5-3 Fázový posuv na kabelu RG58U). Kabel má nízký útlum i pro nízké frekvence.

Obrázek 5-2 Přenosová charakteristika kabelu RG58U

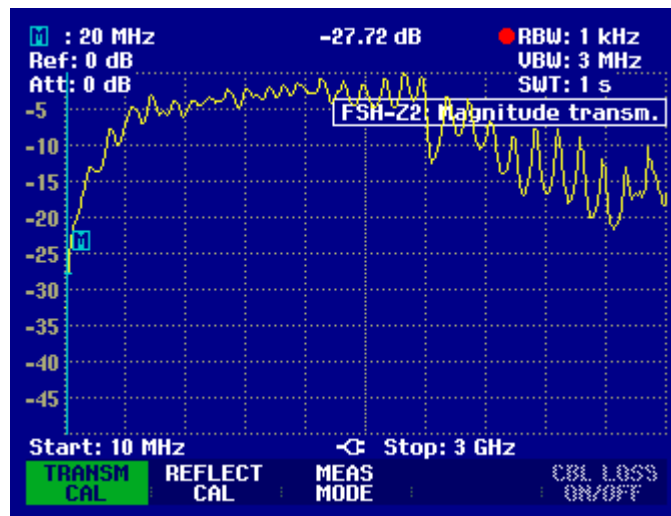


Obrázek 5-3 Fázový posuv na kabelu RG58U

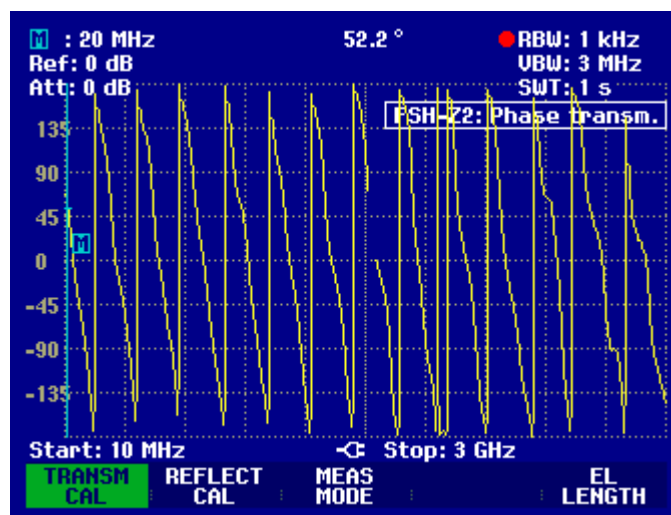


Přenosová charakteristika kabelu RG174 (Obrázek 5-4 Přenosová charakteristika kabelu RG174), vykazuje větší útlum pro nižší kmitočty, konkrétně pro kmitočet 20MHz byl útlum -27,72dB a fázový posuv $52,7^\circ$ (Obrázek 5-5 Fázový posuv kabelu RG174). Pro vyšší kmitočty kabel opět rezonuje. V pásmu do 1,5GHz kabel nemá stálejší charakteristiku přenosu jako kabel RG58U.

Obrázek 5-4 Přenosová charakteristika kabelu RG174

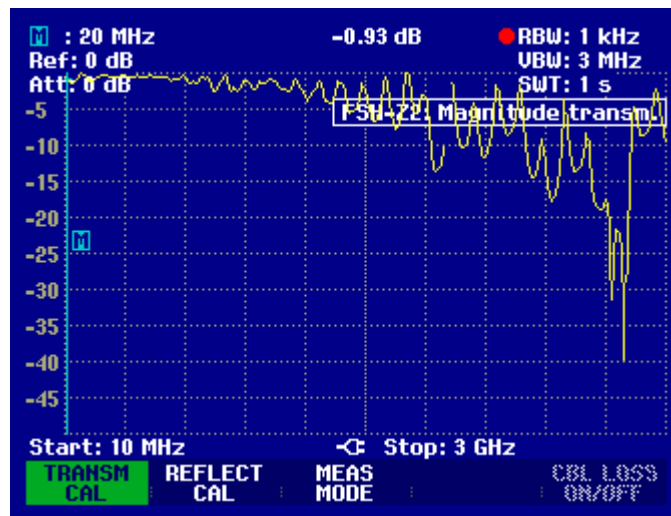


Obrázek 5-5 Fázový posuv kabelu RG174

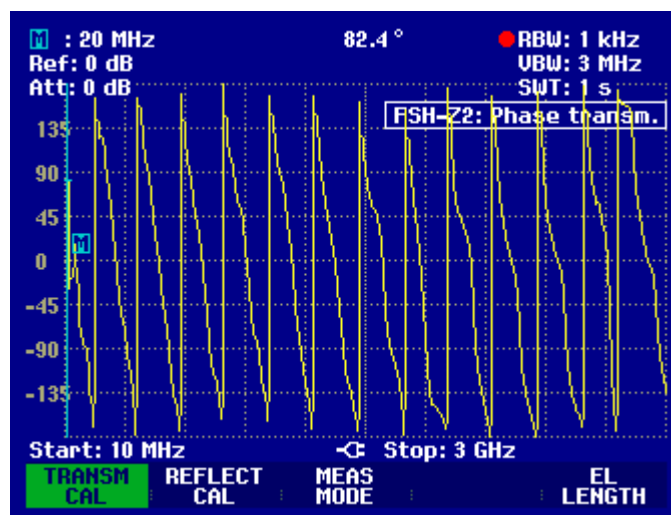


Přenosová charakteristika kabelu 3C2V (Obrázek 5-6 Přenosová charakteristika kabelu 3C2V) je podobná charakteristice kabelu RG58U, avšak ke konci charakteristiky máme zobrazený velký útlum signálu. Kabel má na menších kmitočtech stálejší charakteristiku a s přibývajícím frekvencí začíná jeho charakteristika výrazněji kolísat. Pro 20MHz byl útlum $-0,93\text{dB}$ a fázový posuv $82,4^\circ$ (Obrázek 5-7 Fázový posuv kabel 3C2V).

Obrázek 5-6 Přenosová charakteristika kabelu 3C2V

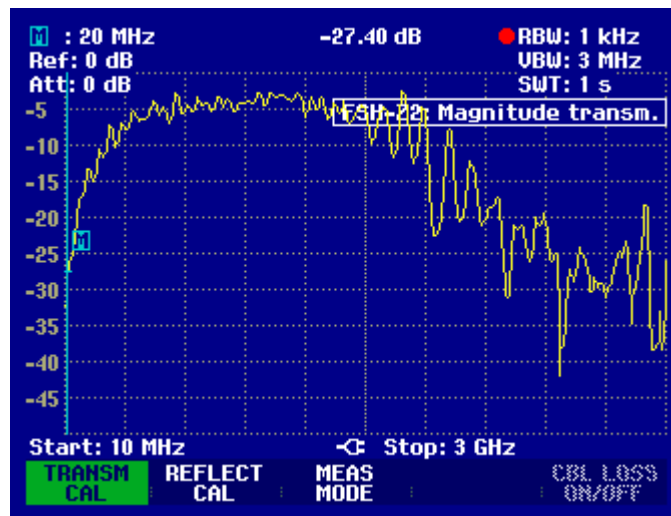


Obrázek 5-7 Fázový posuv kabel 3C2V

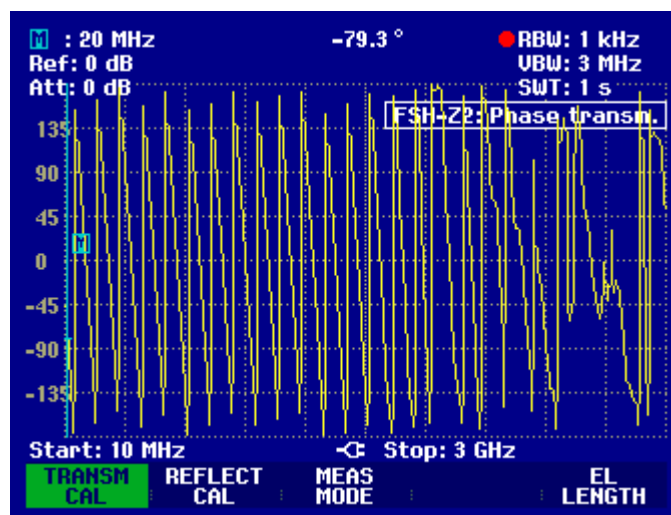


Přenosová charakteristika kabelu RG58U spojeného s kabelem RG174. Pro 20Mhz byl útlum -27,4dB (Obrázek 5-8 Přenosová charakteristika kabelu RG58U spojeného s RG174) a fázový posuv $-79,3^\circ$ (Obrázek 5-9 Fázový posuv kabelu RG54U spojeného s RG174). Jak lze vidět z charakteristiky pro nízké kmitočty je útlum vysoký, zde se projevila charakteristika kabelu RG174, rovněž lze vidět velký útlum pro vysoké kmitočty.

Obrázek 5-8 Přenosová charakteristika kabelu RG58U spojeného s RG174

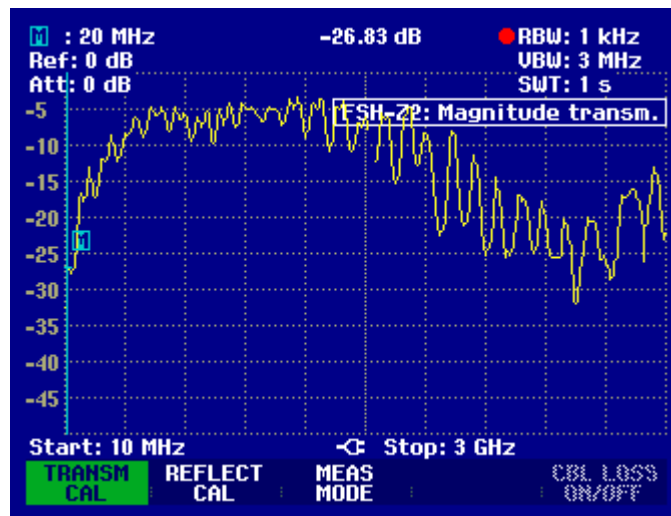


Obrázek 5-9 Fázový posuv kabelu RG54U spojeného s RG174

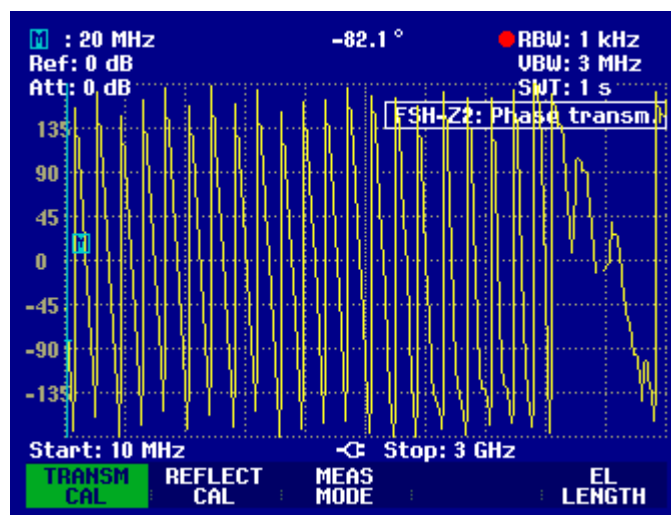


Přenosová charakteristika kabelu RG58U spojeného s kabelem 3C2V. Pro 20MHz byl útlum -26,83dB (Obrázek 5-10 Přenosová charakteristika kabelu RG58U spojeného s 3C2V) a fázový posuv $-82,1^\circ$ (Obrázek 5-11 Fázový posuv kabelu RG58U spojeného s 3C2V). Jak lze vidět z charakteristiky pro nižší kmitočty, je zde větší útlum. U vyšších kmitočtů opět dochází k většímu útlumu.

Obrázek 5-10 Přenosová charakteristika kabelu RG58U spojeného s 3C2V



Obrázek 5-11 Fázový posuv kabelu RG58U spojeného s 3C2V



5.1.3 Závěr měření

Z charakteristik přenosu kabelů je patrné chování kabelů pro různé kmitočty signálu. U kabelu RG174 stojí za zvýšeným útlumem pro nižší frekvence nejspíše rozdíl ve stínění (ocelová lanka) oproti kabelům RG58U a 3C2V. Propojení kabelů RG58U a RG174 má klidnější charakteristiku útlumu, oproti spojení kabelu RG54U a 3C2V. Celková charakteristika přenosu takto volených kabelů o impedanci 50Ω a 75Ω není moc stabilní a na celém kmitočtovém pásmu se nacházejí větší skoky útlumů než u propojení kabelu RG58U a RG174.

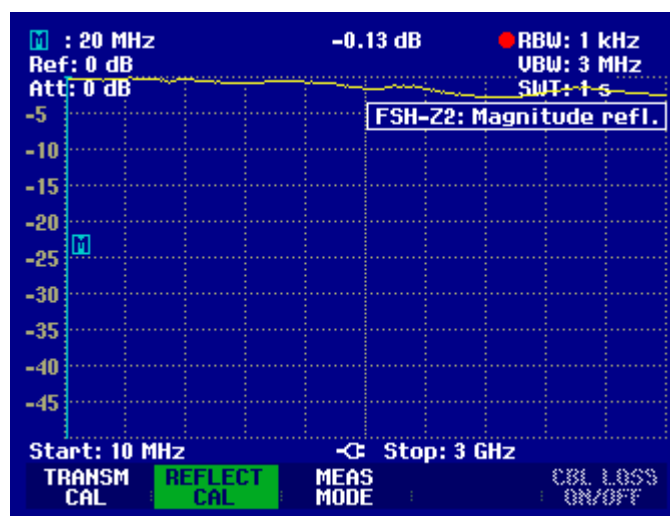
5.2 Měření odrazu

Měření jsme prováděli na spektrálním analyzátoru, zde bylo nutné připojit měřicí můstek k analyzátoru a provést kalibraci měření pro frekvenci 10MHz až 3GHz. Kalibrace zde probíhala trochu jinak než v předchozím měření. Nejprve jsme museli kalibrovat otevřený konec kabelu, poté jsme použili zkratovací normál a jako poslední zátěžový normál o hodnotě 50Ω . Měření jsme prováděli na kabelu RG58U o délce 17cm. Jako zátěže jsme volili 50Ω 75Ω a zkrat známé již z měření na osciloskopu.

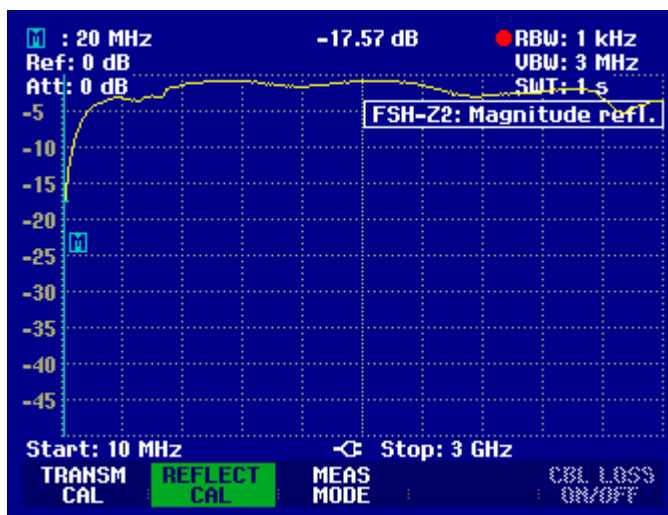
5.2.1 Měření amplitudy odrazu

Měřili jsme tři stavy zátěží kabelu. První zátěž byla zkratovaná koncovka (Obrázek 5-12 Amplituda odrazu kabel RG58 zkrat), druhá zátěž byla 50Ω (Obrázek 5-13 Amplituda odrazu kabel RG58 50Ω zátěž) a poslední zátěž byla 75Ω (Obrázek 5-14 Amplituda odrazu kabel RG58 75Ω zátěž). U zkratovaného zapojení pro 20 MHz měl kabel nejmenší odrazy $-0,13\text{dB}$. U zátěže 50Ω pro 20MHz byl odraz $-17,57\text{dB}$ a u zátěže 75Ω byl odraz $-13,57\text{dB}$ pro 20MHz. Z charakteristik je patrné, že pro zátěž 75Ω máme odrazy na větším rozsahu nižších kmitočtů než při zátěži 50Ω .

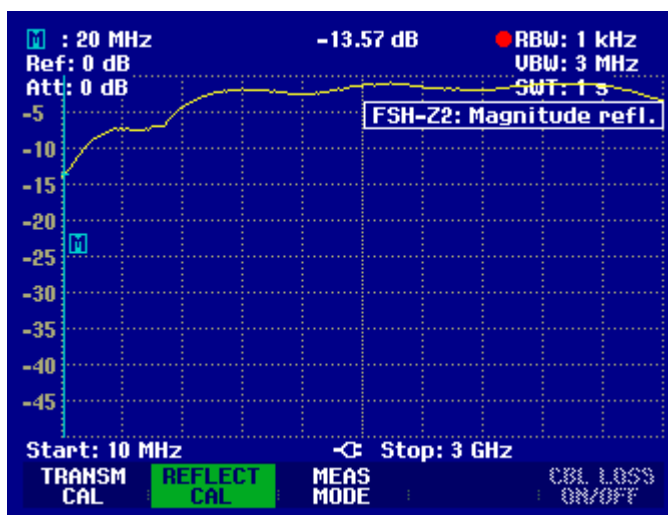
Obrázek 5-12 Amplituda odrazu kabel RG58 zkrat



Obrázek 5-13 Amplituda odrazu kabel RG58 50Ω zátěž



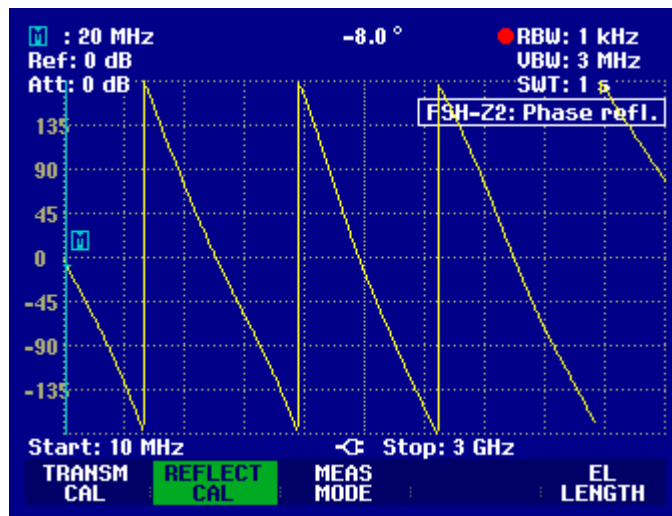
Obrázek 5-14 Amplituda odrazu kabel RG58 75Ω zátěž



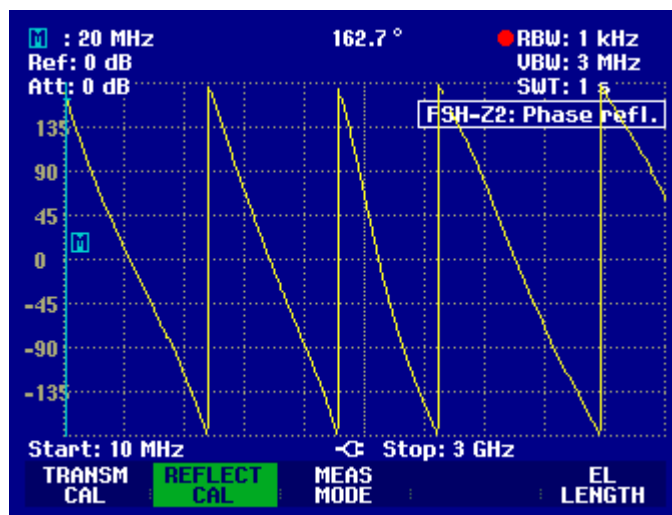
5.2.2 Měření fázového posuvu

Fázový posuv u odrazů jsme měřili pro čtyři stavy kabelu. První otevřený konec (Obrázek 5-15 Fáze odrazu otevřený konec), druhý zkratovaný konec (Obrázek 5-16 Fáze odrazu zkratovaný konec), třetí zátěž 50Ω (Obrázek 5-17 Fáze odrazu 50Ω zátěž) a poslední zátěž 75Ω (Obrázek 5-18 Fáze odrazu 75Ω zátěž). Pro kmitočet 20 MHz jsme měli fázový posuv u otevřeného konce -8° u zkratovaného $-162,7^\circ$ u 50Ω zátěže $70,6^\circ$ a u 75Ω zátěže $3,3^\circ$.

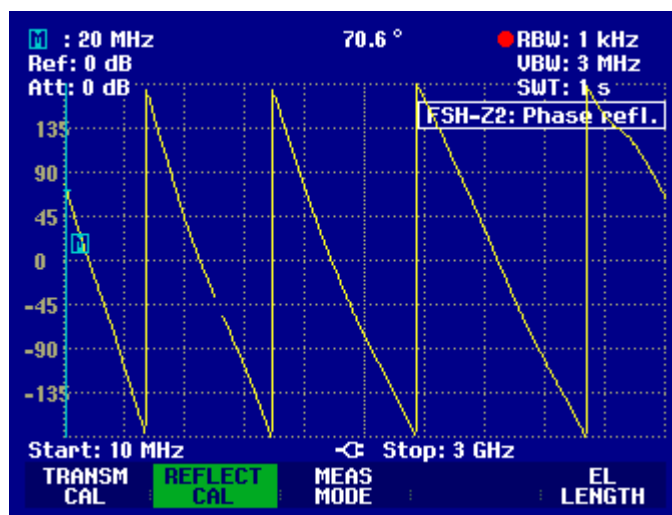
Obrázek 5-15 Fáze odrazu otevřený konec



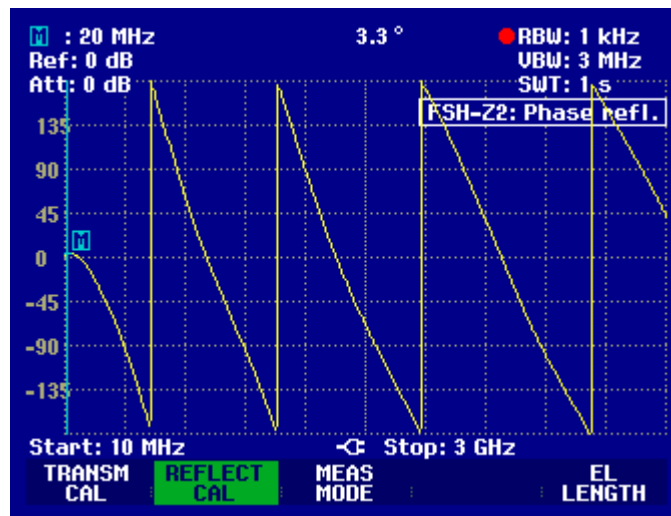
Obrázek 5-16 Fáze odrazu zkratovaný konec



Obrázek 5-17 Fáze odrazu 50Ω zátěž



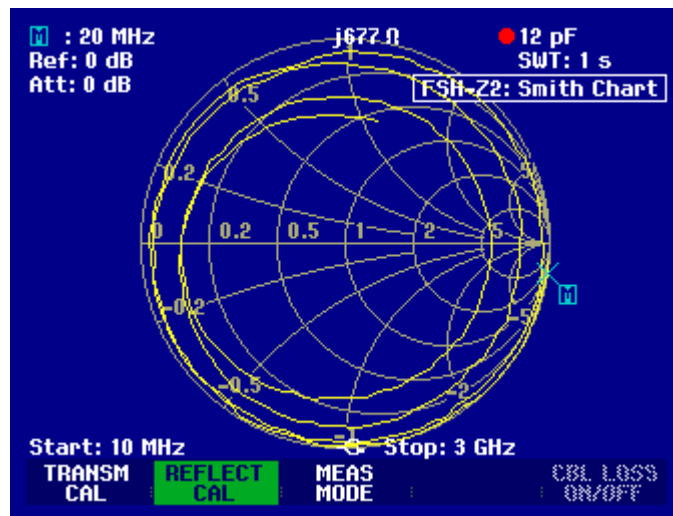
Obrázek 5-18 Fáze odrazu 75Ω zátěž



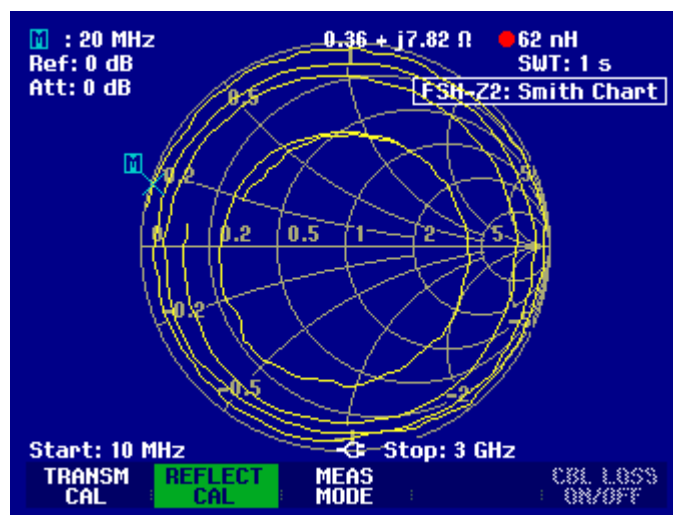
5.2.3 Smithovy Diagramy

Smithovy diagramy jsme měřili také pro čtyři druhy zátěží, první zátěží byl volný konec (Obrázek 5-19 Smithův diagram volný konec), druhou zátěží byl zkrat (Obrázek 5-20 Smithův diagram zkrat), třetí zátěž byla 50Ω (Obrázek 5-21 Smithův diagram 50Ω zátěž) a poslední zátěž byla 75Ω (Obrázek 5-22 Smithův diagram 75Ω zátěž). Při měření volného konce se měří kapacita vodiče, když zapojíme zkrat jako zátěž tak měříme indukci vodiče. U volného konce byla impedance $Z = j677\Omega$ a kapacita 12pF. U zkratovaného konce byla impedance $Z = 0,36 + j7,82\Omega$ a indukce byla 62nH. Pro zátěž 50Ω jsme naměřili impedanci $Z = 53 + j13,2\Omega$ a indukci $1,1e^{-0,2nH}$. Pro zátěž 75Ω jsme naměřili impedanci $Z = 76,4 + j2,33\Omega$ a indukci 19nH.

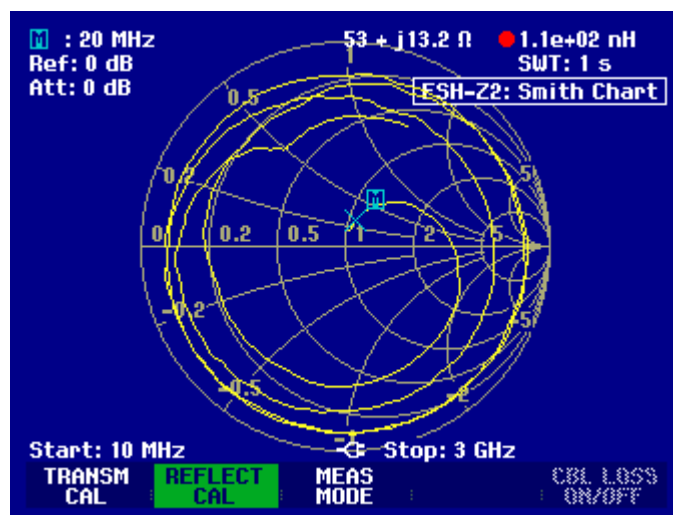
Obrázek 5-19 Smithův diagram volný konec



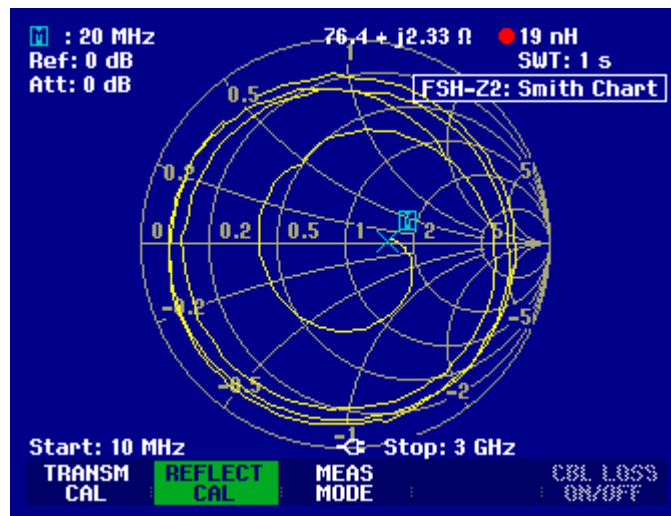
Obrázek 5-20 Smithův diagram zkrat



Obrázek 5-21 Smithův diagram 50Ω zátěž



Obrázek 5-22 Smithův diagram 75Ω zátěž



5.2.4 Závěr měření odrazu

Při měření jsme zjistili, jak se chová kabel RG58U při různých zátěžích. Nejlepší charakteristiku Odrazů měl pro zkratovanou zátěž, ta je však pouze k měření Indukce kabelu. Při zátěži 50Ω měl kabel při nižších frekvencích větší odraz než u středních a vyšších frekvencích. Při zátěži 75Ω byly odrazy pro nižší kmitočty na větším frekvenčním rozsahu než u zátěže 50Ω . Při měření fáze jsme zjistili, jakým způsobem se mění fáze pro různé zátěže. Pro zátěž 75Ω u nízkých frekvencí nemá fázový posuv lineární charakteristiku. Ze Smithových diagramů jsme zjistili, jak se nám se změnou zátěží přidává k signálu složka kapacity a indukce a s nimi spojené imaginární (jalové) složky impedance.

ZÁVĚR

Cílem bakalářské práce bylo vysvětlit pojem impedance. V práci jsme vysvětlili základní prvky elektronických obvodů, jež mají vliv na impedanci. Uvedeny byly typy zapojení jednotlivých prvků v přizpůsobovacích obvodech, jež mohou ovlivnit impedanci.

Nutnost impedančního přizpůsobení mezi zařízeními je zjevná z praktické části bakalářské práce. Impedanční nepřizpůsobení mělo vliv na průběh obdélníkového signálu, přesněji na náběžné hrany impulsů signálu. Útlum kabelů, jenž je spojen s impedancí, hraje další významnou roli na propojení zařízení mezi sebou.

Při měření jsme zjistili, že nezáleží jen na impedanci vodiče, ale také na jeho konstrukci (stínění, dielektrikum, jádro vodiče). Při vhodně zvoleném impedančním přizpůsobení se nám jak signál na osciloskopu, tak přenosová charakteristika moc nezměnili. Se zátěží 75Ω jsme již začali mít problémy s kvalitou obdélníkového signálu, který se začal zkreslovat. Při zátěži, která byla $1k\Omega$ se nám zvětšila amplituda signálu. Tento jev má velké následky pro elektroniku a bývá jednou z příčin „vyhoření“ elektroniky (např. koncové stupně vř zesilovačů). Většina elektroniky není odolná vůči vysokonapěťovým impulsům.

Při propojení kabelů se stejnou impedancí jsme naměřili vcelku uspokojivé útlumové vlastnosti přenosové trasy. Při propojení kabelů s různou impedancí jsme dosáhli útlumu po větším kmitočtovém rozsahu u nižších frekvencí. Naše předpoklady ohledně impedančního přizpůsobení signálu na vedení se potvrdili.

Kvalitní impedanční přizpůsobení přenosové trasy signálu je klíčové pro kvalitní signál a pro přenos na větší vzdálenosti. Stejně tak nám kvalitní impedanční přizpůsobení může ochránit laděné obvody před zanesením imaginární složky impedance a také obvody před stojatými vlnami, jež by mohly zničit citlivou elektroniku.

ZÁVĚR V ANGLIČTINĚ

The aim of this thesis was to explain the concept of impedance. In this work we explain the basic components of electronic circuits that affect the impedance. Given the types of involvement of elements in a matching circuit, which can affect the impedance.

The need impedance matching between devices is evident from the practical part of the thesis. The impedance mismatch influenced the square wave, more precisely on the leading edge of the pulse signal. Cable loss, which is connected to impedance plays a more important role to connect devices to each other.

When measuring, we found that not just on the impedance of the wire, but also on its construction (shielding, dielectric core wires). When properly selected impedance adaptation we as a signal to the oscilloscope and the transfer characteristics have not changed much. With a 75Ω load we have started to have problems with the quality of a square wave, which began to distort. When the load, which was 1k we increased signal amplitude. This phenomenon has major consequences for electronics and is one of the causes of "burnout" electronics (eg, end-stage RF amplifiers). Most of the electronics is not resistant to high voltage pulses.

When connecting cables to the same impedance are measured on the whole satisfactory damping characteristics of the transmission path. When connecting cables with different impedances we have achieved greater attenuation of the frequency range at lower frequencies. Our assumptions about impedance matching signal on the line to confirm.

Good impedance matching transmission line signal is crucial for high-quality signal and to transmit over greater distances. Equally us good impedance matching can protect tuned circuits before taking the imaginary part of impedance and circuits from standing waves that could destroy sensitive electronics.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] SEDLÁK, Bedřich. *Elektrina a magnetismus*. Vyd. 2., opr. a rozš. Praha: Academia, 2002, 632 s. ISBN 80-200-1004-1.
- [2] SEDLÁK, Bedřich. *Elektrotechnická měření*. 1. vyd. Praha: BEN - technická literatura, 2002, 255 s. ISBN 80-730-0022-9.
- [3] BLAHOVEC, Antonín. *Elektrotechnika II*. 4., nezměn. vyd. Praha: Informatorium, 2003, 154 s. ISBN 80-733-3013-X.
- [4] DOLEČEK, Jaroslav. *Moderní učebnice elektroniky*. 4., nezměn. vyd. Praha: BEN - technická literatura, 2005, 342 s. ISBN 80-730-0146-2.
- [5] CHUNG, B.K. Q-based design method for T network impedance matching: *Microelectron. Microelectronics*. 2006, roč. 37, č. 9, 1007–1011. ISSN 0026-2692.
- [6] SADÍLEK, Tomáš. Impedanční přizpůsobení. [Http://www.skvor.cz](http://www.skvor.cz) [online]. 2005 [cit. 2013-02-04]. Dostupné z: <http://www.skvor.cz/pdf/impmatch2.pdf>
- [7] VUT BRNO. Multimediální učebnice: Mikrovlnné obvody. <Http://www.urel.feec.vutbr.cz/> [online]. 2010 [cit. 2013-02-04]. Dostupné z: <http://www.urel.feec.vutbr.cz/~raida/multimedia/index.php?nav=9-1-Adf>
- [8] POZAR, David M. *Microwave engineering*. 3rd ed. Hoboken: John Wiley, 2005, xvii, 700 s. ISBN 978-0-471-44878-5.
- [9] GONZALEZ, Guillermo. *Microwave transistor amplifiers: analysis and design*. 2nd ed. Upper Saddle River, N.J.: Prentice Hall, c1997, x, 506 p. Advanced series on circuits and systems, v. 2. ISBN 01-325-4335-4.

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

FSH Spektrální analyzátor

PC Osobní počítač

PSV Poměr stojatých vln

VF Vysokofrekvenční

VU Vložený útlum

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1-1 Impedance	12
Obrázek 1-2 schematické značky cívky.....	13
Obrázek 1-3 průběh napětí a proudu na cívce	13
Obrázek 1-4 náhradní schéma reálné cívky	14
Obrázek 1-5 schematická značka kondenzátoru	15
Obrázek 1-6 náhradní schéma reálného kondenzátoru	16
Obrázek 1-7 náhradní schéma reálného rezistoru.....	17
Obrázek 2-1 Smithův diagram	25
Obrázek 2-2 Smithův diagram s označením os	25
Obrázek 3-1 Zjednodušený obvod.....	27
Obrázek 3-2 Typy přizpůsobovacích půl článků	30
Obrázek 4-1 Koaxiální kabel RG58-U	33
Obrázek 4-2 Koaxiální kabel RG174/U.....	33
Obrázek 4-3 Koaxiální kabel 3C2V.....	33
Obrázek 4-4 Konektory CINCH	33
Obrázek 4-5 Zkratovaná koncovka.....	33
Obrázek 4-6 Zátěž 50 Ω	33
Obrázek 4-7 Zátěž 75 Ω	33
Obrázek 4-8 Měření na osciloskopu	34
Obrázek 4-9 Nastavení osciloskopu	35
Obrázek 4-10 Porovnání vstupního na výstupního signálu přizpůsobená impedance.....	36
Obrázek 4-11 Porovnání vstupního a výstupního signálu nepřizpůsobeno.....	36
Obrázek 5-1 Pokyny pro pájení koncovek na FSH.....	38
Obrázek 5-2 Přenosová charakteristika kabelu RG58U	40
Obrázek 5-3 Fázový posuv na kabelu RG58U	40
Obrázek 5-4 Přenosová charakteristika kabelu RG174	41
Obrázek 5-5 Fázový posuv kabelu RG174	41
Obrázek 5-6 Přenosová charakteristika kabelu 3C2V	42
Obrázek 5-7 Fázový posuv kabel 3C2V	42
Obrázek 5-8 Přenosová charakteristika kabelu RG58U spojeného s RG174.....	43
Obrázek 5-9 Fázový posuv kabelu RG54U spojeného s RG174.....	43
Obrázek 5-10 Přenosová charakteristika kabelu RG58U spojeného s 3C2V.....	44

Obrázek 5-11 Fázový posuv kabelu RG58U spojeného s 3C2V	44
Obrázek 5-12 Amplituda odrazu kabel RG58 zkrat	45
Obrázek 5-13 Amplituda odrazu kabel RG58 50Ω zátěž	46
Obrázek 5-14 Amplituda odrazu kabel RG58 75Ω zátěž	46
Obrázek 5-15 Fáze odrazu otevřený konec.....	47
Obrázek 5-16 Fáze odrazu zkratovaný konec	47
Obrázek 5-17 Fáze odrazu 50Ω zátěž	47
Obrázek 5-18 Fáze odrazu 75Ω zátěž	48
Obrázek 5-19 Smithův diagram volný konec	49
Obrázek 5-20 Smithův diagram zkrat	49
Obrázek 5-21 Smithův diagram 50Ω zátěž.....	49
Obrázek 5-22 Smithův diagram 75Ω zátěž.....	50