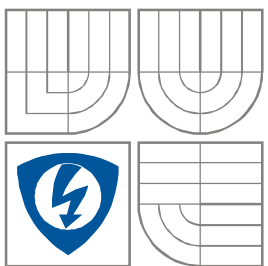


	VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY
	FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ ÚSTAV RADIOELEKTRONIKY FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION DEPARTMENT OF RADIO ELECTRONICS

SYMETRIZAČNÍ OBVODY

BALUNS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

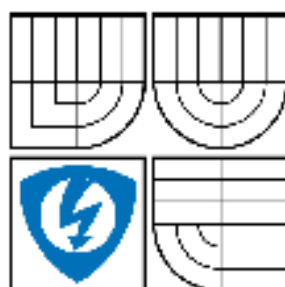
AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Vlastimil Beran

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

doc. Ing. Zdeněk Nováček, CSc.

BRNO, 2008



VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

Ústav radioelektroniky

Bakalářská práce

bakalářský studijní obor

Elektronika a sdělovací technika

Student: Beran Vlastimil

ID: 78572

Ročník: 3

Akademický rok: 2007/2008

NÁZEV TÉMATU:

Symetrizační obvody

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Seznamte se s principy činnosti symetrizačních obvodů složených z úseků vedení a s možnostmi analýzy jejich přenosových a impedančních vlastností. Sledujte šířku kmitočtového pásma z hlediska modulu i fáze přenosu a transformace impedance.

Analyzujte přenosové a impedanční vlastnosti zadaných typů symetrizačních obvodů složených z úseků vedení. Detailně prozkoumejte transformaci impedance obvodem v obou směrech. Získané výsledky využijte k formulaci doporučení pro konstrukci těchto symetrizačních obvodů pro jejich využití při měření impedancí antén.

Navrhnete konstrukční provedení vybraných typů symetrizačních obvodů a experimentálně ověřte jejich vlastnosti i využitelnost pro měření impedancí. Pro přepočty hodnot impedance mezi bránami obvodu sestavte vhodný počítačový program.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

- [1] MACOUN, J. Od antény k přijímači. Amatérské rádio B, 1986, č. 2, s. 42-76.
- [2] ČERNOHORSKÝ, D., TICHÝ, J. Anténní měření. Skriptum. Brno: VAAZ v Brně. 1970.
- [3] MEINKE, H., GUNDLACH, F.W. Radiotechničeskij spravocnik. TOM I. Moskva, 1960.

Termín zadání: 11.2.2008

Termín odevzdání: 6.6.2008

Vedoucí práce: doc. Ing. Zdeněk Nováček, CSc.

UPOZORNĚNÍ:

prof. Dr. Ing. Zbyněk Raida

Autor bakalářské práce nesmí při vytržení bakalářské práce z knihovny zasahovat neoprávněným způsobem do dílů autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení § 152 trestního zákona č. 140/1961 Sb.

LICENČNÍ SMLOUVA POSKYTOVANÁ K VÝKONU PRÁVA UŽÍT ŠKOLNÍ DÍLO

uzavřená mezi smluvními stranami:

1. Pan/paní

Jméno a příjmení: Vlastimil Beran
Bytem: Jana Zajíce 954, Pardubice, 530 12
Narozen/a (datum a místo): 31. července 1986 v Chrudimi

(dále jen „autor“)

a

2. Vysoké učení technické v Brně

Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií
se sídlem Údolní 53, Brno, 602 00
jejímž jménem jedná na základě písemného pověření děkanem fakulty:
prof. Dr. Ing. Zbyněk Raida, předseda rady oboru Elektronika a sdělovací technika
(dále jen „nabyvatel“)

Čl. 1

Specifikace školního díla

1. Předmětem této smlouvy je vysokoškolská kvalifikační práce (VŠKP):

- ☐ disertační práce
 - ☐ diplomová práce
 - ☒ bakalářská práce
 - ☐ jiná práce, jejíž druh je specifikován jako
- (dále jen VŠKP nebo dílo)

Název VŠKP: Symetrizační obvody
Vedoucí/ školitel VŠKP: doc. Ing. Zdeněk Nováček, CSc.
Ústav: Ústav radioelektroniky
Datum obhajoby VŠKP: _____

VŠKP odevzdal autor nabyvateli*:

- ☒ v tištěné formě – počet exemplářů: 2
- ☒ v elektronické formě – počet exemplářů: 2

2. Autor prohlašuje, že vytvořil samostatnou vlastní tvůrčí činností dílo shora popsané a specifikované. Autor dále prohlašuje, že při zpracovávání díla se sám nedostal do rozporu s autorským zákonem a předpisy souvisejícími a že je dílo dílem původním.
3. Dílo je chráněno jako dílo dle autorského zákona v platném znění.
4. Autor potvrzuje, že listinná a elektronická verze díla je identická.

* hodící se zaškrtněte

Článek 2

Udělení licenčního oprávnění

1. Autor touto smlouvou poskytuje nabyvateli oprávnění (licenci) k výkonu práva uvedené dílo nevýdělečně užít, archivovat a zpřístupnit ke studijním, výukovým a výzkumným účelům včetně pořizování výpisů, opisů a rozmnoženin.
2. Licence je poskytována celosvětově, pro celou dobu trvání autorských a majetkových práv k dílu.
3. Autor souhlasí se zveřejněním díla v databázi přístupné v mezinárodní síti
 - ☒ ihned po uzavření této smlouvy
 - ☐ 1 rok po uzavření této smlouvy
 - ☐ 3 roky po uzavření této smlouvy
 - ☐ 5 let po uzavření této smlouvy
 - ☐ 10 let po uzavření této smlouvy(z důvodu utajení v něm obsažených informací)
4. Nevýdělečné zveřejňování díla nabyvatelem v souladu s ustanovením § 47b zákona č. 111/ 1998 Sb., v platném znění, nevyžaduje licenci a nabyvatel je k němu povinen a oprávněn ze zákona.

Článek 3

Závěrečná ustanovení

1. Smlouva je sepsána ve třech vyhotoveních s platností originálu, přičemž po jednom vyhotovení obdrží autor a nabyvatel, další vyhotovení je vloženo do VŠKP.
2. Vztahy mezi smluvními stranami vzniklé a neupravené touto smlouvou se řídí autorským zákonem, občanským zákoníkem, vysokoškolským zákonem, zákonem o archivnictví, v platném znění a popř. dalšími právními předpisy.
3. Licenční smlouva byla uzavřena na základě svobodné a pravé vůle smluvních stran, s plným porozuměním jejímu textu i důsledkům, nikoliv v tísní a za nápadně nevýhodných podmínek.
4. Licenční smlouva nabývá platnosti a účinnosti dnem jejího podpisu oběma smluvními stranami.

V Brně dne: 6. června 2008

.....
Nabyvatel

.....
Autor

Abstrakt

Symetrizační obvody slouží k propojení symetrické zátěže (anténa, dipól) s nesymetrickým napáječem (koaxiální kabel). Bez zařazení symetrizačního obvodu je zátěž (anténa) špatně přizpůsobena k napáječi a projevuje se to špatnými vlastnostmi antény.

V tomto projektu je popsán nejprve princip činnosti a rozdělení symetrizačních obvodů, tvořených úseky vedení. Dále je detailně sledována šířka pásma vybraných typů symetrizačních obvodů a je uvedeno několik doporučení pro konstrukci těchto obvodů.

Na závěr je měřením ověřena činnost symetrizačního obvodu.

Abstrakt ENG

The baluns (balanced to unbalanced) circuits are used for connection of symmetrical load (antenna, dipole) to unsymmetrical line (coaxial cable).

The balun missing causes the load mismatching to antenna feeder and the antenna parameters degradation as result.

There are defined the baluns principle of operation and list of types in this work. The baluns created by short sections lines are the scope of project only. The detailed analysis baluns bandwidth and the type application are described in the second part of project. Several recommendation for baluns design is described as project conclusion including parameters optimalization.

The function of the balun was verified by measurement. The relevant results are mentioned in the report end.

Klíčová slova:

Symetrizační obvod

Šířka pásma

Charakteristická impedance (vlnový odpor) vedení

Kompenzační vedení

Klíčová slova ENG

Balun

Bandwidth

Characteristic impedance line (line wave resistance)

Compensated line

Bibliografická citace mé práce:

BERAN, V. *Symetrizační obvody*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2008. 37 s.

Vedoucí bakalářské práce doc. Ing. Zdeněk Nováček, CSc.

Prohlášení

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci na téma Symetrizační obvody jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této bakalářské práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení § 152 trestního zákona č. 140/1961 Sb.

V Brně dne 6. června 2008

.....
podpis autora

Poděkování

Děkuji vedoucímu bakalářské práce doc. Ing. Zdeňku Nováčkovi, CSc. za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé bakalářské práce.

V Brně dne 6. června 2008

.....
podpis autora

Obsah

1 Úvod.....	- 2 -
2 Symetrizace – princip.....	- 2 -
2.1 Symetrické a asymetrické napětí a proudy na vedení	- 2 -
2.2 Symetrizační obvody úvod.....	- 3 -
3 Typy symetrizačních obvodů:	- 4 -
3.1 Obvody, zabráňující vzniku asymetrického proudu.....	- 4 -
3.2 Obvody, omezující velikost asymetrického proudu	- 5 -
3.2.1 Symetrizace čtvrtvlnným vedením.....	- 5 -
3.2.2 Symetrizace rukávem	- 6 -
3.3 Obvody, které kompenzují asymetrický proud	- 6 -
3.3.1 Symetrizace pahýlem	- 6 -
3.3.2 Symetrizace pahýlem s vnitřním kompenzačním vedením.....	- 7 -
3.3.3 Symetrizace šterbinou	- 8 -
3.4 Fázové investory	- 9 -
3.4.1 Symetrizace fázovým investorem – půlvlnná smyčka	- 9 -
4 Sledování šířky kmitočtového pásma symetrizačních obvodů	- 10 -
4.1 Analýza pro reálnou, přizpůsobenou zátěž	- 10 -
4.1.1 Symetrizace pahýlem	- 10 -
4.1.2 Symetrizace pahýlem s vnitřním kompenzačním vedením.....	- 14 -
4.2 Analýza pro nepřizpůsobenou zátěž.....	- 19 -
5 Doporučení pro konstrukci symetrizačního obvodu s vnitřním kompenzačním vedením	- 23 -
5.1 Návrh symetrizačního obvodu a jeho vlastnosti	- 23 -
5.2 Optimalizace obvodu pro různé hodnoty zátěže	- 26 -
5.3 Vliv nestejně délky vedení na vlastnosti obvodu	- 27 -
5.4 Vliv kapacity konektorů na vlastnosti obvodu	- 28 -
6 Využití symetrizačního obvodu pro měření impedancí.....	- 29 -
7 Experimentální ověření vlastností symetrizačních obvodů.....	- 32 -
8 Závěr.....	- 35 -
9 Použitá literatura.....	- 36 -
10 Seznam symbolů	- 37 -

1 Úvod

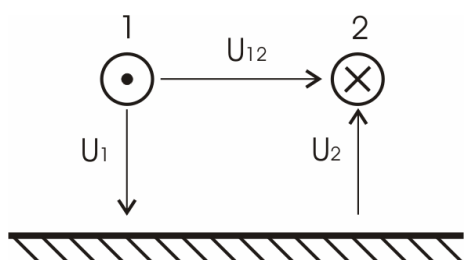
Tato práce se věnuje problematice symetrizačních obvodů. Symetrizační obvody slouží k propojení symetrické zátěže (anténa, dipól) s nesymetrickým napáječem (souosý, koaxiální kabel). Bez zařazení symetrizačního obvodu je zátěž špatně přizpůsobena k napáječi a projevuje se to špatnými vlastnostmi antény (deformace směrové charakteristiky atd.) Na nižších kmitočtech mohou být tvořeny pomocí cívek a kondenzátorů, na vysokých kmitočtech bývají tvořeny úseky vedení. V této práci jsou popisovány a analyzovány pouze symetrizační obvody, tvořené úseky vedení.

V úvodní části práce je vysvětlen princip činnosti a dělení základních typů symetrizačních obvodů. Detailně je analyzována šířka pásma vypraných typů těchto obvodů. Je proveden návrh vybraného symetrizačního obvodu a popsána jeho využitelnost pro měření impedancí antén. Na závěr je experimentálně ověřena činnost vybraného symetrizačního obvodu.

2 Symetrizace – princip

2.1 Symetrické a asymetrické napětí a proudy na vedení

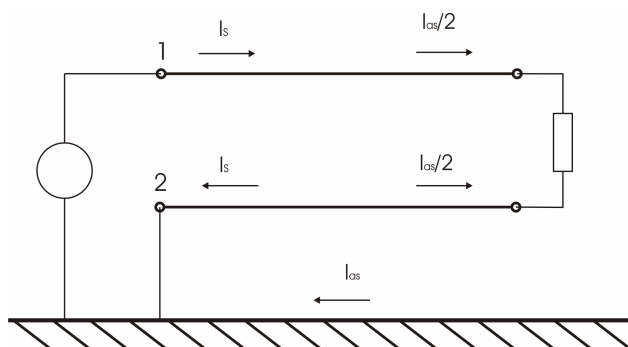
Napětí mezi dvěma místy se stejně velkými napětími proti zemi s opačnou fází nazýváme symetrické napětí. Napětí mezi určitým místem a místem s nulovým potenciálem (zemí) označujeme jako nesymetrické napětí.



Obr 2.1 Symetrické a asymetrické napětí na vedení

Z Obr 2.1 je patrné, že napětí U_1 z bodu 1 na zem je nesymetrické a napětí U_{12} mezi vodiči 1 a 2 je napětí symetrické. To platí pouze za předpokladu že obě nesymetrická napětí U_1 a U_2 jsou stejně velká a opačně orientovaná ($U_1 = -U_2$).

Podobně je tomu pro symetrické proudy na vedeních. Ty musejí být také stejně velké a opačně orientované ($I_1 = -I_2$). Asymetrický proud $I_{as}/2$ teče oběma vodiči stejným směrem a uzavírá se mimo uvažované vedení jako proud zemí.

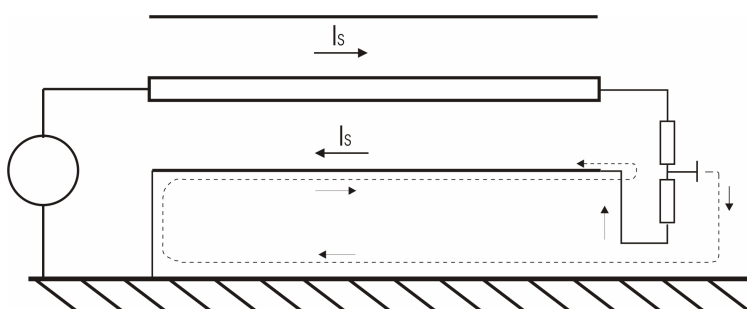


Obr 2.2 Symetrické a asymetrické proudy na vedení

Na Obr 2.2 je symetrické vedení, napájené nesymetricky, jeden vodič a jeden pól zdroje jsou uzemněné. Elektrické pole se bude uzavírat z vodiče „1“ z části na vodič „2“, ale i na zem. Také zpětný proud se bude ke zdroji vracet jak vodičem „2“, tak zemí.

Z hlediska symetrie lze hodnotit i obvodové prvky. Asymetrické prvky musí mít jednu svorku připojenou k nulovému potenciálu. Na symetrických prvcích nelze rozlišit svorky a je potřebné, aby na nich bylo symetrické napětí. Při nesplnění těchto podmínek se prvky obvykle nechovají správně.

V praxi se používají v zásadě 2 typy vedení: symetrická (dvoudrátové vedení, sym. dvoulinka) a nesymetrická (souosý koaxiální kabel). Pro správnou funkci vedení je nutné, aby byl charakter napájení i zátěže shodný s charakterem vedení (symetrické vedení musí mít symetrické napájení i symetrickou zátěž, stejně tak u nesymetrického vedení).



Obr 2.3 Proudů na nesymetrickém (koaxiálním) vedení, při připojení symetrické zátěži

Na Obr. 2.3 je zobrazen příklad nesprávného připojení symetrické zátěže s uzemněným středem na nesymetrické (koaxiální) vedení. Proud, tekoucí vnitřním vodičem se v uzlu uprostřed symetrické zátěže dělí na dvě části. Jedna část teče spodní polovinou zátěže $Z/2$ a vtéká na vnitřní povrch pláště vedení. Protože konec pláště kabelu nemá nulové napětí, musí téct po jeho vnějším povrchu vyrovnávací proud, který se uzavírá po zemnicí ploše. Proud, tekoucí po povrchu vedení je nežádoucí, protože vyzařuje a zátěž není buzena přesně symetricky.

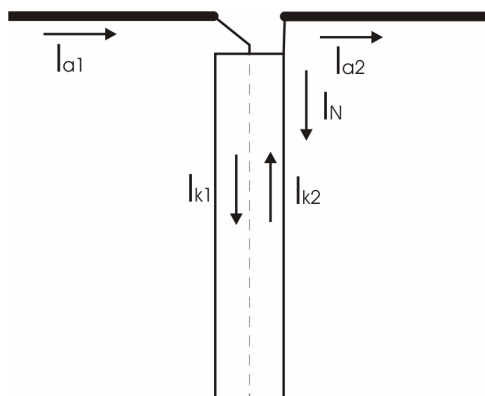
U mnoha zapojení je nutné připojit symetrickou zátěž na nesymetrický napáječ (připojení symetrické antény na nesymetrický koaxiální kabel). V tomto případě je nutno zabránit, nebo omezit vznik asymetrického proudu. K tomuto účelu slouží symetrizační obvody.

2.2 Symetrizační obvody úvod

Jak již bylo uvedeno existují napáječe symetrické a nesymetrické. Podobně je to i s anténními vstupy a výstupy. Při rozhodování jakou soustavu volit, zda symetrickou, nebo nesymetrickou, je nutné zvážit klady i zápory obou soustav. Většina běžných antén pro VKV a TV mají symetrický vstup. Zdálo by se tedy výhodné volit takový napáječ, jaký je vstup antény. Ovšem zvláště na vyšších kmitočtech (nad 30 MHz) způsobují výrobní nesymetrie i elektrickou nesymetrii. Symetrické napáječe pak pracují jako nesymetrické, působí jako části antény a pozměňují tak vyzařovací vlastnosti vlastní antény. Také přítomnost okolních vodivých předmětů a ohyb vedení působí rušivě na symetrickou funkci napáječů. Z těchto důvodů je výhodnější používat nesymetrické (souosé, koaxiální) napáječe. Přechod ze souosého (koaxiálního) kabelu na symetrický vstup antény je nutno vyřešit tak, aby výhody souosého napájení nebyly znehodnoceny. Tento přechod se zajišťuje symetrizačním členem, balunem, což je ustálený všeobecný název pro symetrizační obvod, odvozený z anglického *balance / unbalance*. Na nižších kmitočtech tato symetrizace nezpůsobuje žádné obtíže,

protože může být realizována pomocí cívek a kondenzátorů. Na vyšších kmitočtech se musí používat úseky vedení.

Na Obr 2.4 je zobrazeno, co by se stalo, kdybychom připojili nesymetrický napáječ (např. koaxiální kabel) přímo k symetrické anténě – dipólu. Situace je obdobná jako u obr 2.3 Proud, procházející po vnitřní straně vnějšího vodiče I_{k2} se nedostane celý do pravého ramene dipólu, ale jeho část I_N prochází po vnějším povrchu pláště kabelu. Proud I_N , vytváří své vyzařovací pole, které je symetrické kolem tohoto proudu a projeví se především zdeformováním směrové charakteristiky dipólu. Kromě toho proud I_N , který prochází kolmo k proudu I_a , vytváří kolmo polarizované pole, což může v některých aplikacích vadit.



Obr 2.4 Uspořádání proudů při spojení symetrického dipólu s nesymetrickým napáječem.

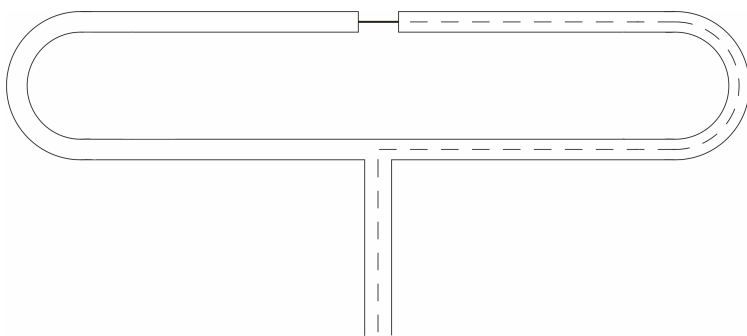
3 Typy symetrizačních obvodů:

V této práci jsou popsány pouze symetrizační obvody, tvořené úseky vedení. Těchto obvodů je velmi mnoho. Dají se dělit podle několika kritérií: podle šířky kmitočtového pásma obvodu na širokopásmové a úzkopásmové, podle toho, zda obvody transformují impedanci, či nikoli, podle principu činnosti apod. Podle principu činnosti se symetrizační obvody dělí na obvody, které zabraňují vzniku asymetrického proudu, omezují velikost asymetrického proudu, kompenzují asymetrický proud stejně velkým protisměrným proudem a tzv. fázové investory.

3.1 Obvody, zabráňující vzniku asymetrického proudu

Do některých symetricky buzených zářivých prvků lze zavést koaxiální vedení v místech jejich minima napětí, tedy symetrizační člen zdánlivě vynechat.

U skládaného dipólu je do symetricky buzeného zářivého prvku zavedeno koaxiální vedení, uprostřed jeho nenapájeného ramene – viz. obr. 3.1 Při tom není podmínkou, aby koaxiální vedení bylo uloženo v rameni dipólu, ale stačí, aby jeho vnější povrch byl vodivě připojen k místu s nulovým potenciálem.

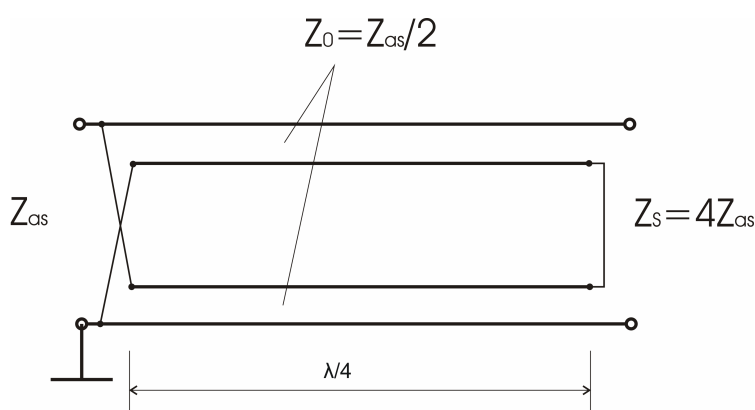


Obr. 3.1: Symetrizace ve skládaném dipólu

3.2 Obvody, omezující velikost asymetrického proudu

3.2.1 Symetrizace čtvrtvlnným vedením

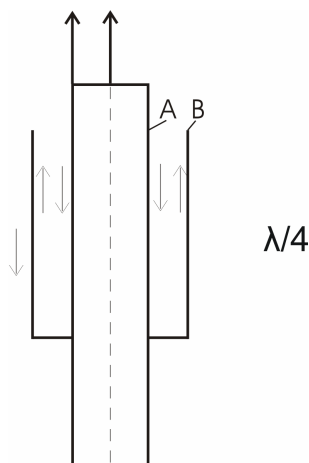
Obvod je vytvořen ze dvou dvojlinek, které jsou na jedné straně spojeny paralelně, na druhé straně sériově. Tím dochází k impedanční transformaci. Přitom vedení o délce $\lambda/4$ transformuje zkrat na jedné straně jako nekonečný odpor na opačnou stranu. To umožňuje, aby uzemnění jednoho konce symetrizačního členu nezatěžovalo opačnou stranu. Má-li každé symetrické vedení charakteristickou impedanci Z_0 , pak na straně sériového spojení bude optimální impedance $Z_S = 2Z_0$, na druhé straně $Z_{as} = Z_0/2$, [1]. Jak je patrné obvod transformuje impedanci 1 : 4. Na paralelní straně je možné jednu větev uzemnit, čímž vzniká symetrizační obvod. Pro správnou funkci obvodu bývají dvojlinky bifilárně navinuty na vhodné feritové jádro.



Obr 3.2 Symetrizační obvod čtvrtvlnným vedením.

3.2.2 Symetrizace rukávem

Přes plášť napájecího kabelu je převlečena trubka většího průměru – rukáv. Trubka je dole spojena s pláštěm napájecího kabelu. Vnitřní povrch rukávu s vnějším povrchem pláště tvoří koaxiální vedení, které je dole nakrátko. Vedení má délku $\lambda/4$, tudíž je v paralelní rezonanci a mezi body A B má velikou impedanci. Žádný vysokofrekvenční proud nemůže kvůli povrchovému jevu téct napříč materiálem a proto asymetrický proud z levé svorky na vnější povrch pláště musí téci jen po povrchu rukávu. Velká impedance mezi body A B ho omezí na minimum.



Obr 3.3 Symetrizace rukávem

3.3 Obvody, které kompenzují asymetrický proud

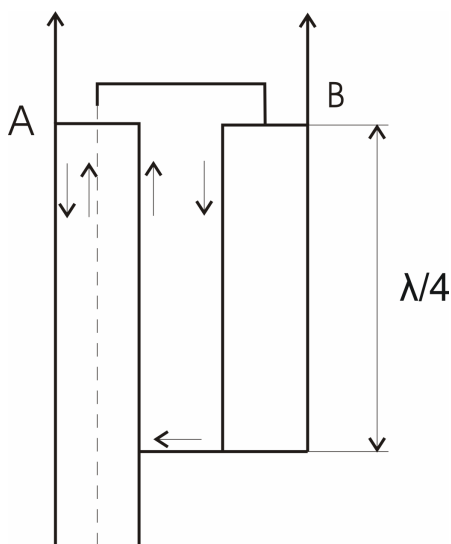
Tyto obvody kompenzují asymetrický proud stejně velkým, opačně orientovaným proudem. Asymetrický proud se tedy vyruší.

3.3.1 Symetrizace pahýlem

Na anténní konec napáječe je v místě A galvanicky připojeno symetrické vedení, vytvořené vnějším povrchem stínění napáječe a pomocnou tyčí (pahýl). Dole je pomocná tyč připojena k vnějšímu povrchu stínění napáječe a tím se vytvořené symetrické vedení zkratuje. Paralelně k symetrizačnímu obvodu je mezi body A B připojena symetrická zátěž. Pro správnou funkci obvodu je nutné, aby byla charakteristická impedance pahýlu shodná s charakteristickou impedancí pláště koaxiálního kabelu (pahýl musí mít stejný průměr jako koaxiální kabel).

Funkce obvodu: Stejně velké a protifázové proudy přejdou na dvě symetrické impedance – vedení a anténu, stanou se z nich tedy proudy symetrické. Symetrie obvodu je určena výhradně těmito dvěma impedancemi. Obvod tedy bude symetrizovat v ideálním případě nezávisle na kmitočtu. Malá nesymetrie (2 - 5%) je způsobena tím, že druhé rameno je napájeno proudem o větším fázovém posuvu než 180° . Tato nesymetrie je způsobena spojkou mezi vnitřním vodičem kabelu a bodem B, [1].

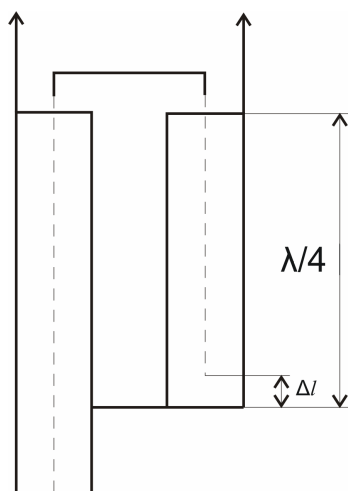
Kmitočtové pásmo tohoto obvodu je způsobeno především jeho impedančními vlastnostmi. Reaktance pahýlu se přičítá k impedanci antény paralelně. Maximální přenos energie nastane, bude-li se paralelní součet impedancí rovnat charakteristické impedanci napáječe. Na rezonanci (délka pahýlu přesně $\lambda/4$) je reaktance nekonečně velká, tudíž výsledná impedance paralelního spojení impedancí je rovna zatěžovací impedanci.



Obr 3.4 Symetrizace pahýlem

3.3.2 Symetrizace pahýlem s vnitřním kompenzačním vedením

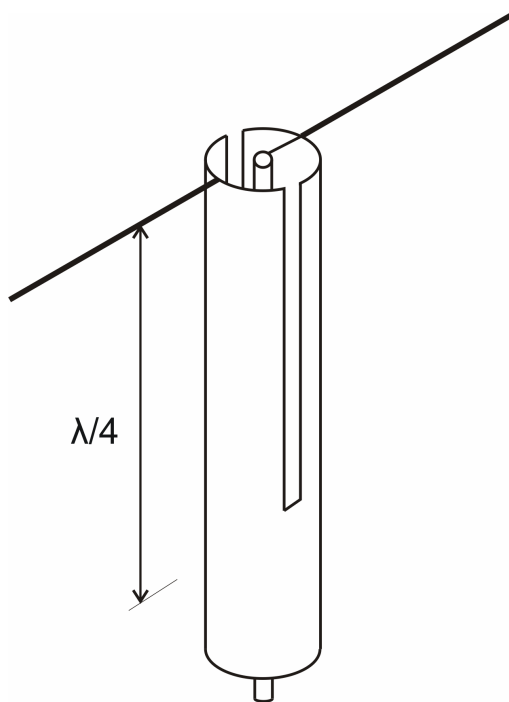
Toto zapojení je podobné jako předchozí symetrizace pahýlem. V tomto uspořádání se využívá toho, že rychleji rostoucí reaktance symetrizačního vedení je kompenzována sériově zapojeným úsekem čtvrtvlnného vedení na konci naprázdno. V důsledku toho dochází k značnému rozšíření kmitočtového pásma obvodu. Aby sériové vedení pracovalo jako otevřené, nesmí být zakončeno příliš velkou kapacitou mezi středním vodičem a pláštěm. Proto se délka Δl volí větší, než je vnější průměr koaxiálního vedení.



Obr 3.5 Symetrizace pahýlem s vnitřním kompenzačním vedením.

3.3.3 Symetrizace štěrbinou

Čtvrtvlnné symetrizační vedení může být vytvořeno i rozříznutím vnější trubky koaxiálního vedení, jak je naznačeno na obr. 3.6 V rozříznutém úseku vedení plní vnější trubka koaxiálního vedení dvojí funkci. Její vnitřní stěny jsou pokračováním koaxiálního vedení a současně s vnějšími stěnami tvoří i čtvrtvlnné zkratované symetrické vedení. Vhodnou volbou charakteristické impedance rozříznutého vnějšího vodiče lze dosáhnout různých transformačních a impedančních vlastností. Charakteristická impedance tohoto vedení je však poměrně nízká, tudíž je symetrizace poměrně úzkopásmová, [11].



Obr 3.6 Symetrizace štěrbinou

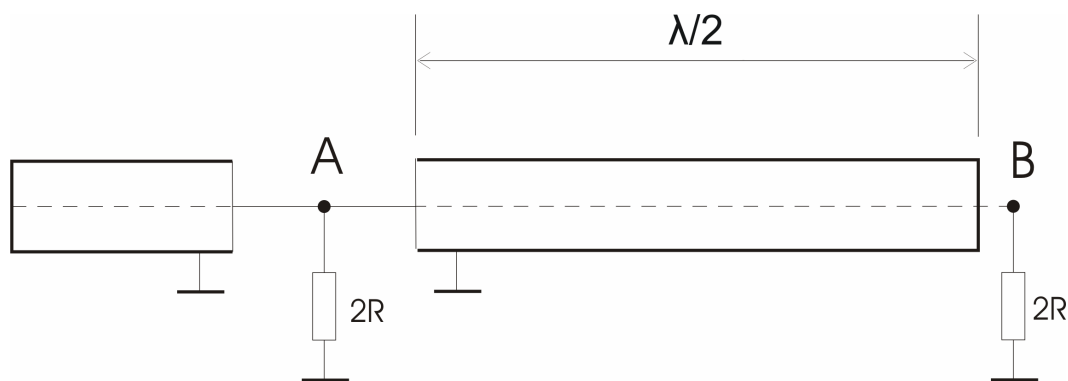
3.4 Fázové invertory

3.4.1 Symetrizace fázovým invertorem – půlvlnná smyčka

Obvod je zapojen podle obr 3.7 Činnost obvodu je založena na vlastnostech vedení o délce $\lambda/2$, které transformuje impedanci v poměru 1:1 a obrací fázi vř. napětí o 180° . Na vstupní bod A je přiveden vnitřní vodič napáječe a symetrizačního vedení, které je druhým koncem připojeno na svorku B. Proud I se dělí na dva stejně velké proudy. Jeden prochází do prvního ramene (první zátěž $2R$) a druhý přes půlvlnnou smyčku do druhého ramene. Půlvlnná smyčka otáčí jeho fázi o 180° , takže do druhého ramene přichází proud stejně velký jako do prvního, ale o 180° otočený. Tím je zaručena symetrizační funkce obvodu.

Napětí mezi symetrickými svorkami U_{AB} je dvojnásobkem napětí na nesymetrickém vstupu.

Při sledování impedance je patrné, že impedance $2R$ na svorce B (proti zemi) je smyčkou transformována na stejně velkou impedanci na vstupu smyčky (svorka A) a ta je paralelně spojena s další impedancí $2R$ mezi svorkou A a zemí. Impedance na nesymetrickém vstupu je pak čtyřikrát menší než celková impedance zátěže $4R$ mezi symetrickými svorkami obvodu.



Obr 3.7 Symetrizace fázovým invertorem - půlvlnná smyčka

4 Sledování šířky kmitočtového pásma symetrizačních obvodů

4.1 Analýza pro reálnou, přizpůsobenou zátěž

V této části je provedena analýza symetrizačních obvodů, zatížených reálnou přizpůsobenou zátěží, tj. zátěží, která je rovna charakteristické impedanci použitého vedení. Podrobně je analyzován symetrizační obvod s pahýlem a jeho modifikace: symetrizační obvod s pahýlem s vnitřním kompenzačním vedením.

Jak již bylo uvedeno v popisu těchto symetrizačních obvodů, obvody symetrizují nezávisle na kmitočtu. Šířka jejich kmitočtového pásma je tedy určena výhradně impedančními vlastnostmi těchto obvodů. V analýze tedy sledujeme hlavně průběh impedance na vstupu symetrizačních obvodů a tím i jejich přizpůsobení k napájecí.

4.1.1 Symetrizace pahýlem

Budeme sledovat průběh impedance na vstupu obvodu v závislosti na kmitočtu. Impedance obvodu Z_{SO} je určena paralelní kombinací symetrické anténní impedance R a reaktancí X_P viz. Obr 4.2. Reaktance X_P je reaktance dvou vodičového vedení o charakteristické impedanci Z_{0P} , tvořeného pomocným vedením (pahýlem) a vnějším povrchem stínění napáječe až k místu zkratu. Reaktance X_P je tedy vytvářena symetrickým vedením délky l_P , na konci zkratovaným, lze ji tedy vyjádřit známým vztahem, [3]:

$$X_P = Z_{0P} \cdot \tan(\alpha l_P) \quad (4.1)$$

kde α je tzv. měrná fáze vyjádřená vztahem:

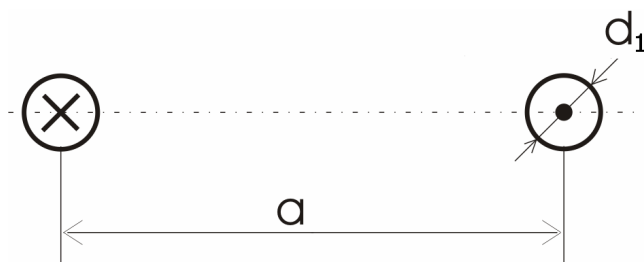
$$\alpha = \frac{2\pi}{\lambda}. \quad (4.2)$$

V okolí kmitočtů, kdy délka pahýlu $l_P = (2n-1) \cdot \lambda/4$, se zkratované vedení chová podobně jako paralelní rezonanční obvod ($X_P \rightarrow \infty$). Při zvětšování délky vedení (nebo kmitočtu) přechází tato reaktance z induktivní (kladné) do kapacitní (záporné).

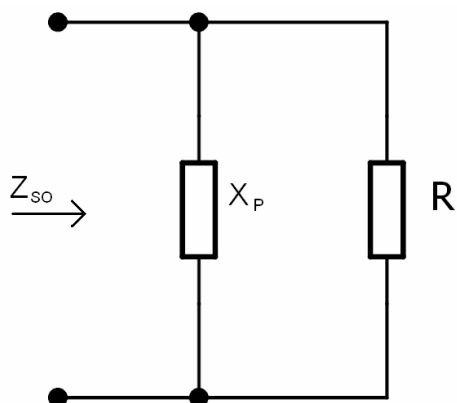
Mimo paralelní rezonanci bude X_P tím větší, čím větší bude Z_{0P} . Výraz pro charakteristickou impedanci Z_{0P} při rozměrech podle obr. 4.1 je:

$$Z_{0P} = 276 \cdot \log \frac{2 \cdot a}{d_1} \quad (4.3)$$

Z výrazu je zřejmé, že Z_{0P} a tedy i širokopásmovost se zvětšuje se vzrůstem $2a/d_1$



Obr. 4.1: Charakteristická impedance symetrického dvou vodičového vedení



Obr. 4.2: Náhradní obvod symetrizačního obvodu s pahýlem

Vstupní impedance symetrizačního obvodu je odvozena z náhradního schématu na obr. 4.2:

$$Z_{SO} = \frac{j \cdot X_P \cdot R}{j \cdot X_P + R} \quad (4.4)$$

do rovnice (4.4) dosadíme vztah (4.1):

$$Z_{SO} = \frac{j \cdot R \cdot Z_{0P} \cdot \tan(\alpha l)}{R + j \cdot Z_{0P} \cdot \tan(\alpha l)} \quad (4.5)$$

za α dosadíme vztah pro měrnou fázi (4.2):

$$Z_{SO} = \frac{j \cdot R \cdot Z_{0P} \cdot \tan\left(\frac{2\pi}{\lambda} \cdot l\right)}{R + j \cdot Z_{0P} \cdot \tan\left(\frac{2\pi}{\lambda} \cdot l\right)} \quad (4.6)$$

kde λ je vlnová délka na daném kmítu:

$$\lambda = \frac{c}{f} = \frac{3 \cdot 10^8}{f} \quad (4.7)$$

po dosazení do (4.6) dostaneme výsledný vzorec pro vstupní impedanci obvodu:

$$Z_{SO} = \frac{j \cdot R \cdot Z_{0P} \cdot \tan\left(\frac{2\pi \cdot f}{c} \cdot l\right)}{R + j \cdot Z_{0P} \cdot \tan\left(\frac{2\pi \cdot f}{c} \cdot l\right)} \quad (4.8)$$

Zlomek usměrníme a oddělíme reálnou a imaginární složku.

Reálná složka výsledku je rovna rezistanci obvodu:

$$R_{SO} = \operatorname{Re}(Z_{SO}) = \frac{R \cdot Z_{0P}^2 \cdot \left[\tan\left(\frac{2\pi \cdot f}{c} \cdot l\right) \right]^2}{R^2 + Z_{0P}^2 \cdot \left[\tan\left(\frac{2\pi \cdot f}{c} \cdot l\right) \right]^2} \quad (4.9)$$

Imaginární složka je pak rovna reaktanci obvodu:

$$X_{SO} = \operatorname{Im}(Z_{SO}) = \frac{R^2 \cdot Z_{0P} \cdot \tan\left(\frac{2\pi \cdot f}{c} \cdot l\right)}{R^2 + Z_{0P}^2 \cdot \left[\tan\left(\frac{2\pi \cdot f}{c} \cdot l\right) \right]^2} \quad (4.10)$$

Pro lepší názornost výsledků je vhodné vypočítat také hodnotu poměru stojatých vln (PSV) na vstupu obvodu. Pro výpočet PSV je nutné nejprve vypočítat hodnotu činitele odrazu:

$$\rho = \frac{Z_{SO} - Z_{0V}}{Z_{SO} + Z_{0V}} \quad (4.11)$$

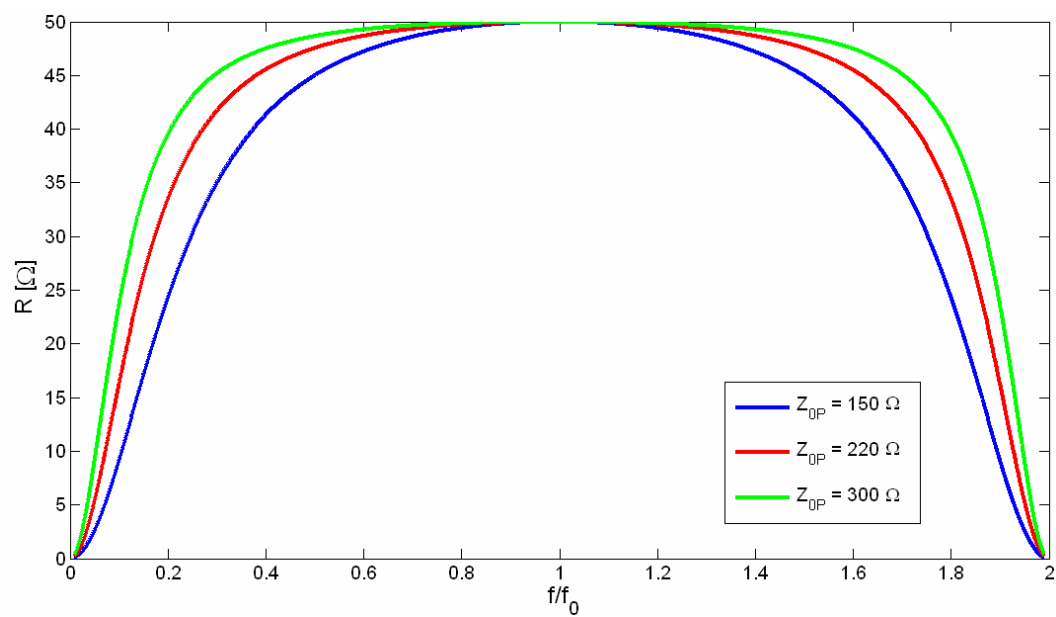
kde Z_{SO} je vypočtená impedance symetrizačního obvodu, která zatěžuje napáječ o charakteristické impedanci Z_{0V} .

Z absolutní hodnoty činitele odrazu lze vypočítat hodnotu poměru stojatých vln:

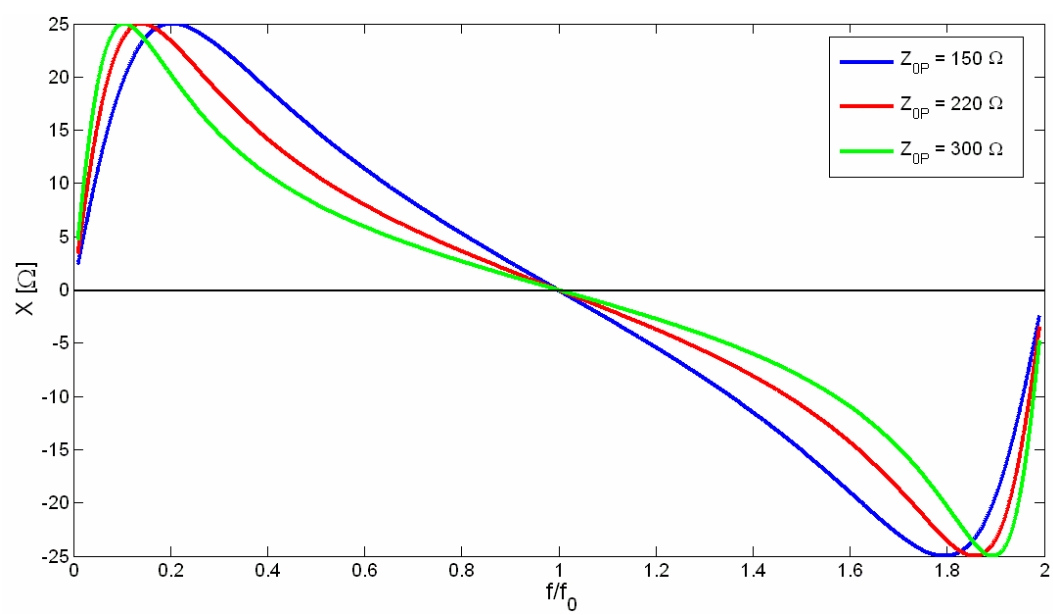
$$PSV = \frac{1 + |\rho|}{1 - |\rho|} \quad (4.12)$$

Výpočet je proveden v programu MATLAB, kam jako vstupní hodnoty dosadíme velikost charakteristické impedance pahýlu, délku pahýlu a rozsah kmitočtů, pro které chceme obvod analyzovat. Na grafech viz. Obr. 4.3 – 4.5 jsou uvedeny průběhy rezistance, reaktance a poměru stojatých vln na vstupu symetrizačního obvodu. Pro srovnání jsou zobrazeny 3 křivky pro různé hodnoty charakteristických impedancí Z_{0P} .

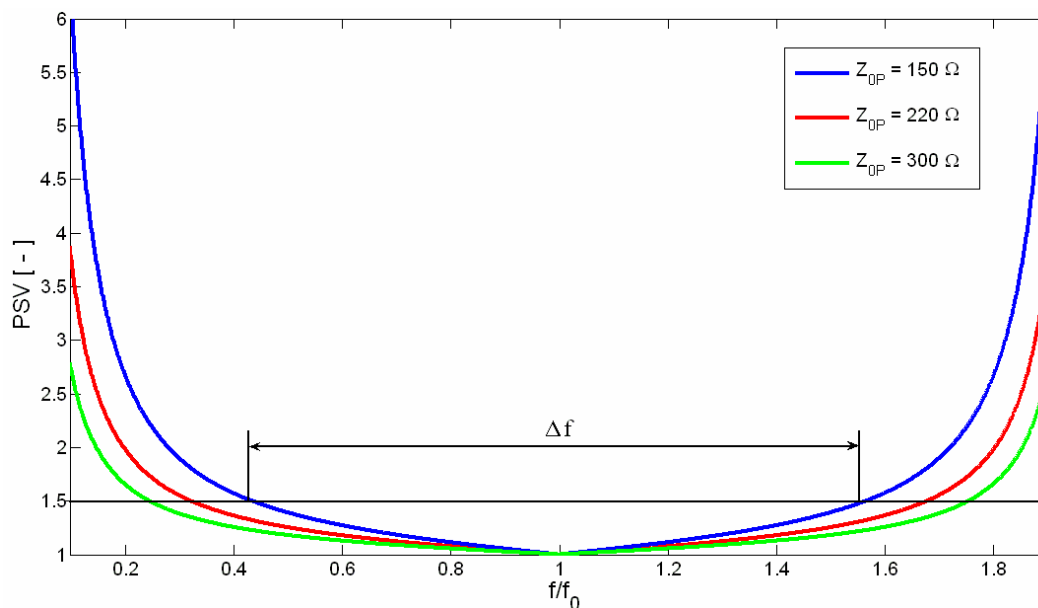
Velikost zatěžovacího odporu je $R = 50 \, \Omega$. Položíme-li si podmínku, že poměr stojatých vln nepřesáhne hodnotu 1,5, pak pro $Z_{0P} = 150 \, \Omega$ ($2a/d_1 = 3,5$) může obvod pracovat v pásmu $\Delta f = \pm 52 \, \%$. Pro $Z_{0P} = 220 \, \Omega$ ($2a/d_1 = 6$) je pásmo použitelnosti $\Delta f = \pm 65 \, \%$, pro $Z_{0P} = 300 \, \Omega$ ($2a/d_1 = 12$) je $\Delta f = \pm 75 \, \%$. Z grafů je patrné, že při rezonančním kmitočtu je impedance obvodu Z_{SO} shodná se zatěžovací impedancí R , tj. $Z_{SO} = (50 + 0j) \, \Omega$. Při $R = Z_{0V}$ je na rezonančním kmitočtu napáječ zatížen charakteristickou impedancí, a tudíž na něm nevzniká žádné stojaté vlnění ($PSV = 1$).



Obr 4.3: Kmitočtová závislost rezistance symetrizačního obvodu s pahýlem.



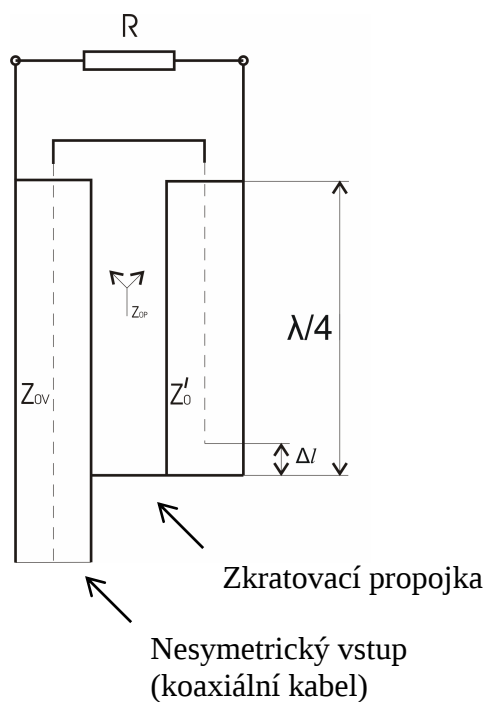
Obr 4.4: Kmitočtová závislost reaktance symetrizačního obvodu s pahýlem.



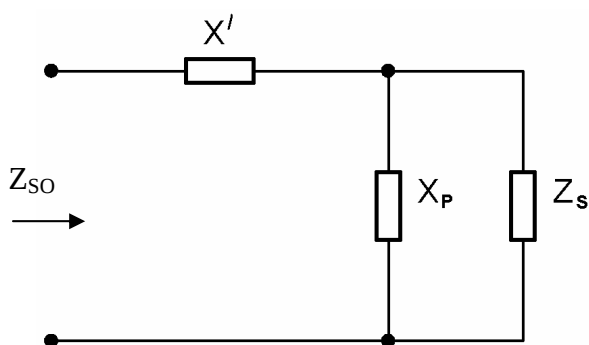
Obr 4.5: Kmitočtová závislost poměru stojatých vln symetrizačního obvodu s pahýlem

4.1.2 Symetrizace pahýlem s vnitřním kompenzačním vedením

Tento obvod stejně jako předchozí symetrizuje nezávisle na kmitočtu. Šířka jeho kmitočtového pásma je tedy určena pouze jeho impedančními vlastnostmi. U tohoto obvodu, stejně jako u předchozího sledujeme průběh vstupní impedance obvodu v závislosti na kmitočtu. Na obr. 4.6 je zobrazen náčrt symetrizačního obvodu a na obr. 4.7 jeho náhradní schéma.



Obr. 4.6: Symetrizace pahýlem s vnitřním kompenzačním vedením.



Obr. 4.7: Náhradní schéma symetrizačního obvodu s vnitřním kompenzačním vedením

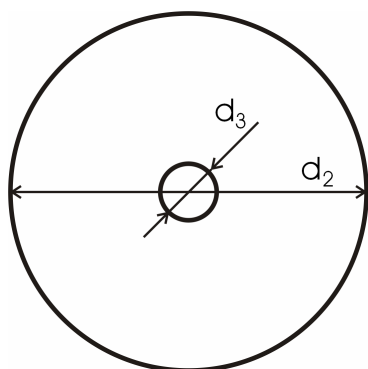
Náhradní schéma, je podobné, jako v případě jednoduché symetrizace pahýlem, ale v sérii s paralelním spojením reaktance pahýlu a symetrické zatěžovací impedance je připojena reaktance vnitřního kompenzačního vedení, zapojeného naprázdno. Toto kompenzační vedení má docílit jisté zvětšení šířky pásma obvodu. Reaktance pahýlu je dána jako v předchozím případě vztahem pro vedení na konci nakrátko viz. (4.1).

Reaktance vnitřního kompenzačního vedení je dána známým vztahem pro reaktanci vedení na konci naprázdno:

$$X' = -Z_0' \cdot \cot g(\alpha \cdot l) \quad (4.13)$$

kde Z_0' je charakteristická impedance kompenzačního vedení naprázdno, tu lze vyjádřit vztahem (4.14), [2] při rozměrech podle Obr. 4.8:

$$Z_0' = \frac{138}{\sqrt{\epsilon_r}} \log \frac{d_2}{d_3} \quad (4.14)$$



Obr. 4.8: Charakteristická impedance vedení naprázdno

Délka pahýlu i kompenzačního vedení je $\lambda/4$. Kompenzační vedení se v okolí této délky chová jako sériový rezonanční obvod. Při přechodu přes délku $\lambda/4$ se reaktance mění z kapacitního charakteru na induktivní. Na středním kmitočtu je tedy reaktance vnitřního kompenzačního vedení nulová a naopak reaktance pahýlu nekonečná. Na tomto kmitočtu je tedy impedance na nesymetrickém vstupu obvodu shodná se zatěžovacím odporem: $Z_{SO} = R + j0$. Mimo střed pásma se reaktance pahýlu X_p zmenšuje a paralelní spojení této

reaktance se zatěžovacím odporem snižuje celkovou impedanci symetrizačního obvodu a tím dochází k horšímu přizpůsobení.

Analýza impedančních vlastností symetrizačního obvodu:

Vstupní impedance symetrizačního obvodu je odvozena z náhradního schématu na obr. 4.7 :

$$Z_{SO} = j \cdot X' + \frac{j \cdot X_P \cdot R}{j \cdot X_P + R} \quad (4.15)$$

Do rovnice (4.15) dosadíme vztahy (4.1) a (4.13):

$$Z_{SO} = -j \cdot Z'_0 \cdot \cot g(\alpha \cdot l) + \frac{j \cdot R \cdot Z_{0P} \cdot \tan(\alpha l)}{R + j \cdot Z_{0P} \cdot \tan(\alpha l)} \quad (4.16)$$

Za α dosadíme vztah pro měrnou fázi (4.2):

$$Z_{SO} = -j \cdot Z'_0 \cdot \cot g\left(\frac{2\pi}{\lambda} \cdot l\right) + \frac{j \cdot R \cdot Z_{0P} \cdot \tan\left(\frac{2\pi}{\lambda} \cdot l\right)}{R + j \cdot Z_{0P} \cdot \tan\left(\frac{2\pi}{\lambda} \cdot l\right)} \quad (4.17)$$

kde λ je vlnová délka na daném kmitočtu:

$$\lambda = \frac{c}{f} = \frac{3 \cdot 10^8}{f} \quad (4.18)$$

Po dosazení do (4.17) dostaneme výsledný vzorec pro vstupní impedanci obvodu:

$$Z_{SO} = -j \cdot Z'_0 \cdot \cot g\left(\frac{2\pi \cdot f}{c} \cdot l\right) + \frac{j \cdot R \cdot Z_{0P} \cdot \tan\left(\frac{2\pi \cdot f}{c} \cdot l\right)}{R + j \cdot Z_{0P} \cdot \tan\left(\frac{2\pi \cdot f}{c} \cdot l\right)} \quad (4.19)$$

Zlomek usměrníme a oddělíme reálnou a imaginární složku.

Reálná složka výsledku je rovna rezistanci obvodu:

$$R_{SO} = \operatorname{Re}(Z_{SO}) = \frac{R \cdot Z_{0P}^2 \cdot \left[\tan\left(\frac{2\pi \cdot f}{c} \cdot l\right) \right]^2}{R^2 + Z_{0P}^2 \cdot \left[\tan\left(\frac{2\pi \cdot f}{c} \cdot l\right) \right]^2} \quad (4.20)$$

Imaginární složka je pak rovna reaktanci obvodu:

$$X_{SO} = \text{Im}(Z_{SO}) = \frac{R^2 \cdot Z_{0P} \cdot \tan\left(\frac{2\pi \cdot f}{c} \cdot l\right)}{R^2 + Z_{0P}^2 \cdot \left[\tan\left(\frac{2\pi \cdot f}{c} \cdot l\right)\right]^2} - Z_0' \cdot \cot g\left(\frac{2\pi \cdot f}{c} \cdot l\right) \quad (4.21)$$

Výpočet činitele odrazu a poměru stojatých vln je stejný jako v předchozím případě obvodu bez kompenzace.

Nyní již můžeme provést analýzu tohoto obvodu a zobrazit kmitočtové závislosti reálné a imaginární složky vstupní impedance. Na grafu viz. obr. 4.9 je zobrazena kmitočtová závislost vstupní reaktance obvodu pro 3 různé kombinace velikostí Z_{0P} , Z_0' a R :

1. $Z_{0P} \cdot Z_0' = R^2$, skutečné hodnoty parametrů: $R = 50 \Omega$, $Z_{0P} = 150 \Omega$, $Z_0' = 16,67 \Omega$
2. $Z_{0P} \cdot Z_0' < R^2$, skutečné hodnoty parametrů: $R = 50 \Omega$, $Z_{0P} = 150 \Omega$, $Z_0' = 12 \Omega$
3. $Z_{0P} \cdot Z_0' > R^2$, skutečné hodnoty parametrů: $R = 50 \Omega$, $Z_{0P} = 150 \Omega$, $Z_0' = 35 \Omega$

Na Obr. 4.10 je zobrazena rezistance symetrizačního obvodu v závislosti na kmitočtu pro 3 různé velikosti Z_{0P} a R :

1. $Z_{0P} = R$, skutečné hodnoty parametrů: $R = 100 \Omega$, $Z_{0P} = 100 \Omega$
2. $Z_{0P} > R$, skutečné hodnoty parametrů: $R = 100 \Omega$, $Z_{0P} = 400 \Omega$
3. $Z_{0P} < R$, skutečné hodnoty parametrů: $R = 100 \Omega$, $Z_{0P} = 50 \Omega$

Z průběhu reaktance obvodu lze vypočítat, že kompenzační vedení X' může redukovat reaktanci symetrizačního obvodu v okolí jeho středního kmitočtu, nebo změnit její znaménko v závislosti na velikosti Z_{0P} , Z_0' a R . Kompenzační vedení v podstatě poskytuje regulování reaktance v okolí středního kmitočtu. Pro srovnání je v grafu uveden i průběh reaktance obvodu bez kompenzačního vedení. Z průběhu rezistance je zřejmé, že pro největší šířku pásma je tedy vhodné volit Z_{0P} co největší.

Zvětšení šířky pásma, symetrizačního obvodu s kompenzačním vedením oproti stavu bez kompenzace je způsobena především reaktanční složkou impedance obvodu. Za ideální považujeme stav, kdy je reaktance obvodu co nejméně odchýlená od nuly v co největším kmitočtovém rozsahu viz. obr. 4.9.

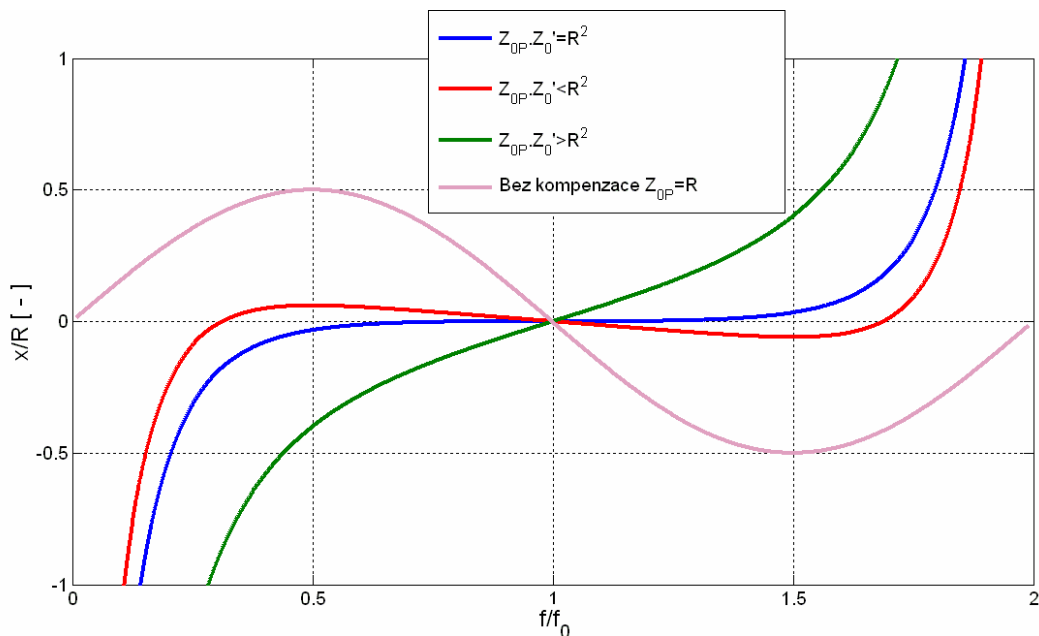
Pro zvolení vlnového odporu kompenzačního vedení je definováno tzv. optimalizační kritérium, [10]:

$$R^2 = Z_{0P} \cdot Z_0' \quad (4.22)$$

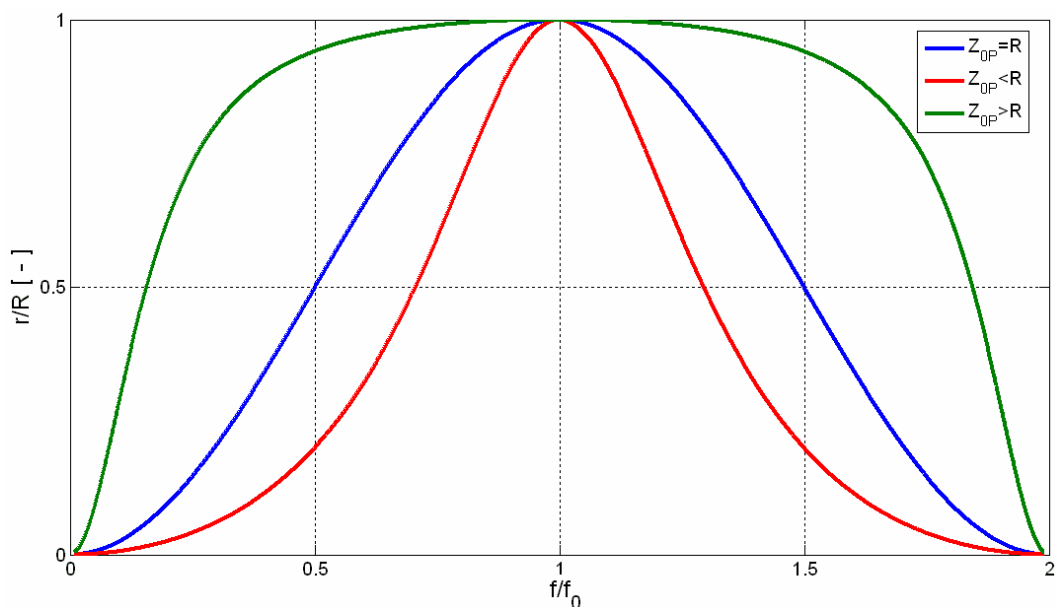
Dodržení tohoto kritéria způsobí nulový sklon reaktance na středním kmitočtu. Jestliže je $R^2 > Z_{0P} \cdot Z_0'$ sklon reaktance je negativní a jestliže $R^2 < Z_{0P} \cdot Z_0'$ sklon je pozitivní. Lze definovat parametr $\beta = \frac{Z_{0P} \cdot Z_0'}{R^2}$ jako koeficient reaktančního sklonu.

Při reálném použití obvodu je někdy vhodnější stav, kdy reaktance obvodu mírně „překmitne“ do kladných hodnot. Viz. obr. 4.9 křivka $Z_{0P} \cdot Z_0' < R^2$. Samotná odchylka v kladných hodnotách je mírná, tudíž nezpůsobí velké zhoršení přizpůsobení. Tato mírná odchylka je ve větším kmitočtovém rozsahu, oproti výše uvedenému ideálnímu stavu, což způsobí jisté zvětšení šířky pásma obvodu. Abychom dosáhli tohoto stavu, volíme vlnový

odpor vnitřního kompenzačního vedení menší než je optimální stav, vypočtený pomocí optimalizačního kritéria (4.22). Vlnový odpor kompenzačního vedení je vhodné volit maximálně o 25% menší než optimum. Při volení ještě nižší hodnoty vlnového odporu se již začne projevovat velikost překmitu a přizpůsobení se tím zhorší.



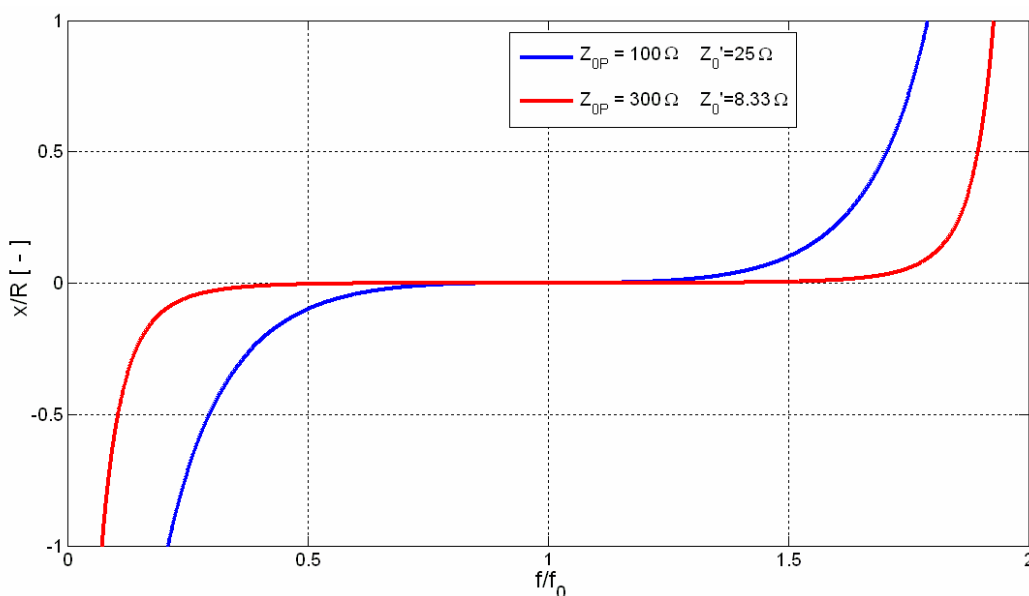
Obr. 4.9: Průběh reaktance symetrizačního obvodu při změně parametrů Z_{0P} , Z_0' , R



Obr. 4.10: Průběh rezistance symetrizačního obvodu při změně parametrů Z_{0P} , R

Z grafu na Obr. 4.10 je vidět, že pásmo ve kterém je vstupní rezistance r téměř konstantní závisí jen na volbě velikosti Z_{0P} a R . Větší charakteristická impedance Z_{0P} znamená větší pásmo, přes které je vstupní rezistance konstantní.

Obdobná situace je i pro vstupní reaktanci symetrizačního obvodu. Na grafu obr. 4.11 jsou zobrazeny kmitočtové závislosti reaktance obvodu pro 2 hodnoty charakteristické impedance pahýlu $Z_{0P} = 100 \Omega$ a $Z_{0P} = 300 \Omega$. Vlnový odpor kompenzačního vedení je volen tak, aby bylo splněno optimalizační kritérium při zátěži $R = 50 \Omega$, tj. pro $Z_{0P} = 100 \Omega$ je $Z_0' = 25 \Omega$ a pro $Z_{0P} = 300 \Omega$ je $Z_0' = 8,33 \Omega$. Z průběhů je patrné, že při větší hodnotě Z_{0P} je o mnoho širší pásmo, ve kterém je vstupní reaktance konstantní (malá odchylka reaktance od 0 po co největší šířku pásma).



Obr. 4.11: Vliv Z_{0P} na reaktanci symetrizačního obvodu

4.2 Analýza pro nepřizpůsobenou zátěž

Zátěž, připojovaná k symetrizačnímu obvodu (obvykle dipólová anténa) nemá pouze reálný charakter. Zátěžovací impedance obsahuje také reaktanční složky. Je tedy nutné analyzovat chování obvodu při zatížení komplexní zátěží. Průběh vstupní impedance obvodu budeme sledovat ve Smithově diagramu.

Zátěžovací impedanci budeme volit tak, aby ve Smithově diagramu ležela na kružnici která odpovídá velikosti modulu činitele odrazu $|\rho| = 0,2$ (zátěž sama o sobě způsobí zhoršení poměru stojatých vln na hodnotu 1,5). Zátěž zvolíme ve čtyřech bodech na této kružnici viz. obr. 4.12. Budeme sledovat průběh vstupní impedance obvodu a změnu šířky pásma oproti stavu s přizpůsobenou zátěží.

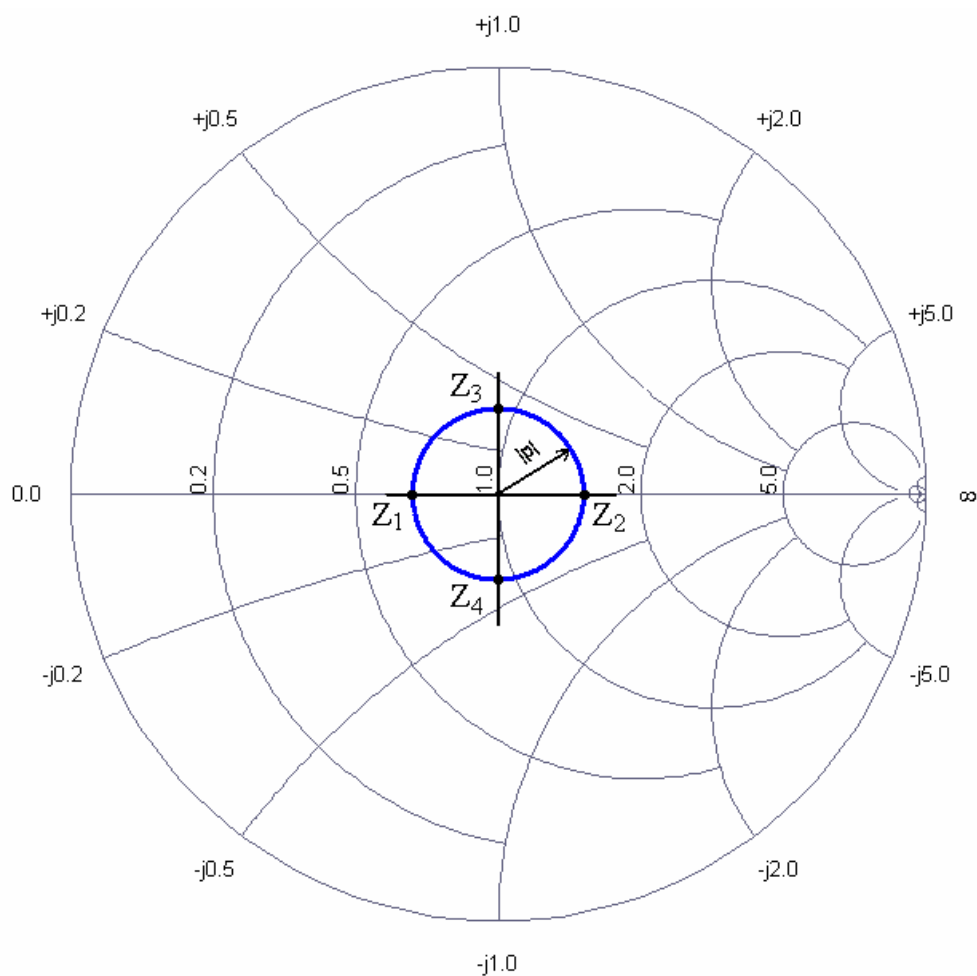
Mějme symetrizační obvod, přizpůsobený pro zátěž 50Ω . Pak výše uvedené impedance budou odpovídat těmto hodnotám:

$$Z_1 = 33,33 \Omega$$

$$Z_2 = 75 \Omega$$

$$Z_3 = (46,15 - 19,23j) \Omega$$

$$Z_4 = (46,15 + 19,23j) \Omega$$

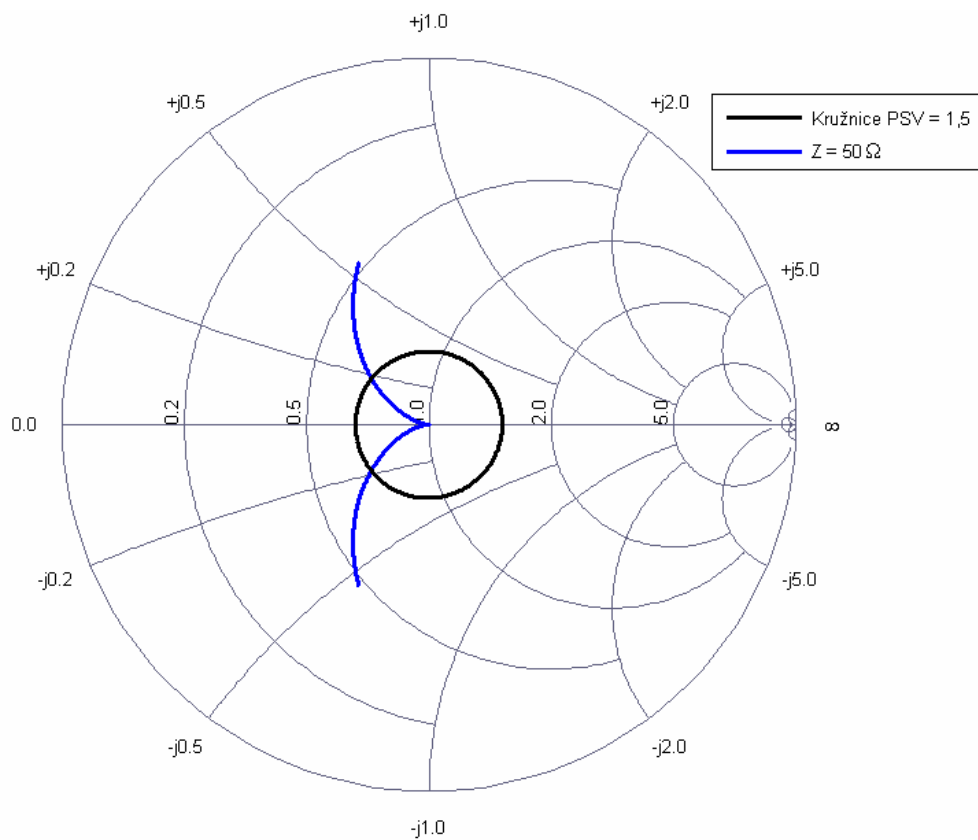


Obr. 4.12: Znázornění zatěžovacích impedancí ve Smithově diagramu.

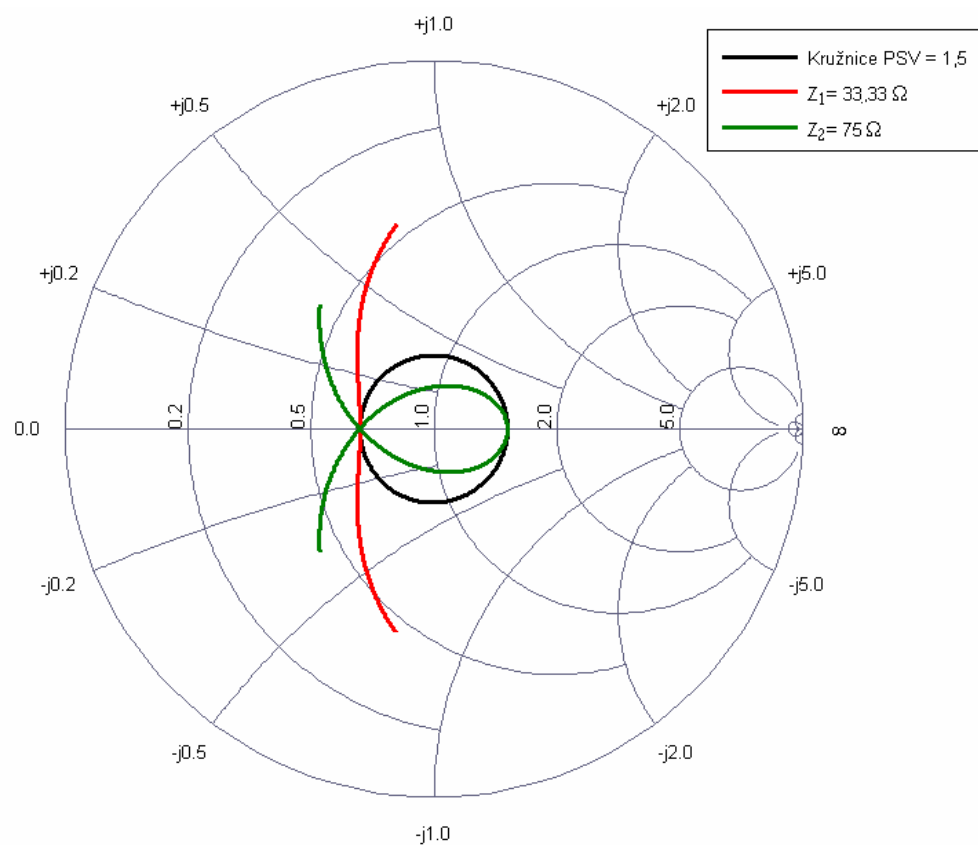
Nyní můžeme provést vlastní analýzu obvodu. Budeme analyzovat obvod s vnitřním kompenzačním vedením o parametrech: Charakteristická impedance pahýlu $Z_{0P} = 250$, charakteristická impedance vnitřního kompenzačního vedení je přizpůsobena podle optimalizačního kritéria (4.22), tedy $Z_0' = 10 \Omega$. Symetrizační obvod má rezonanční kmitočet 500 MHz.

Pro přizpůsobenou zátěž ($Z = 50 \Omega$) vypadá průběh vstupní impedance podle obr. 4.13. Za podmínky že PSV nepřesáhne hodnotu 1,5 je šířka pásma od cca. 96,5 MHz do 903,5 MHz. Tedy $\Delta f = \pm 80 \%$.

Při připojení reálné zátěže Z_1 a Z_2 vypadají průběhy vstupní impedance podle obr. 4.14. Je patrné, že při připojení zátěže $Z_1 = 33,33 \Omega$ bude mít obvod $PSV = 1,5$ jen na rezonančním kmitočtu. Mimo rezonanční kmitočet PSV stoupá. V pásmu $\Delta f = \pm 80 \%$ dojde ke zhoršení PSV na hodnotu 2,1. Při zátěži $Z_2 = 75 \Omega$ vykazuje obvod dokonce větší šířku pásma, než při přizpůsobené zátěži $\Delta f = \pm 83 \%$.

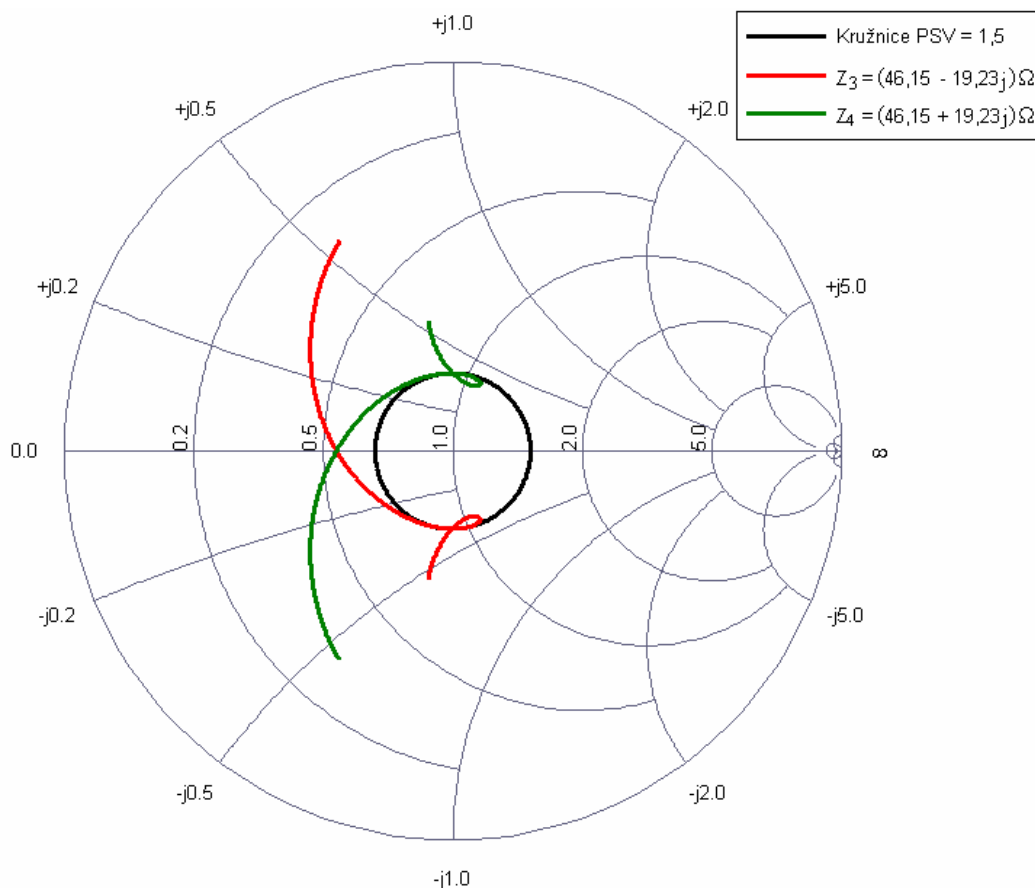


Obr. 4.13: Průběh vstupní impedance pro přizpůsobenou zátěž $Z = 50 \Omega$



Obr. 4.14: Průběh vstupní impedance pro zátěž Z_1 a Z_2

Při připojení komplexní zátěže Z_3 a Z_4 se obvod chová poněkud odlišně. Při reálné zátěži byl průběh impedance vždy symetrický podle rezonančního kmitočtu. U komplexní zátěže tomu tak není. Na jednu stranu od rezonančního kmitočtu je šířka pásma větší než na druhou. Průběhy, při zatížení těmito komplexními zátěžemi jsou znázorněny na Obr. 4.15. Při zátěži $Z_3 = (46,15 - 19,23j) \Omega$ je šířka pásma větší pod rezonančním kmitočtem. Pro stejnou podmínku jako v předchozím případě ($PSV \leq 1,5$) je Δf od cca. 81 MHz do 650 MHz což je $\Delta f = -84\%$ a $+30\%$. Pro zátěž $Z_4 = (46,15 + 19,23j) \Omega$ je situace opačná, šířka pásma je větší nad rezonančním kmitočtem, $\Delta f = -30\%$ a $+84\%$.



Obr. 4.15: Průběh vstupní impedance pro zátěž Z_3 a Z_4

5 Doporučení pro konstrukci symetrizačního obvodu s vnitřním kompenzačním vedením

5.1 Návrh symetrizačního obvodu a jeho vlastnosti

Nejprve je nutné zvolit charakteristickou impedanci napáječe. Volíme $Z_{0V} = 50\Omega$, což je obvyklá hodnota. Symetrizační obvod tvoří 2 rovnoběžné trubky stejného průměru, z nichž jedna tvoří nesymetrické vedení o $Z_{0V} = 50\Omega$ a druhá tvoří pahýl, v němž je umístěno vnitřní kompenzační vedení viz. Obr. 4.6. Vnější průměr trubky zvolíme $d_1 = 10\text{ mm}$ což je běžně dostupný rozměr. Podle vzorce (5.1) lze dopočítat průměr vnitřního vodiče napáječe. Nákres vodiče je uveden na Obr. 4.8.

$$Z_{0V} = \frac{138}{\sqrt{\epsilon_r}} \log \frac{d_2}{d_3} \quad (5.1)$$

kde $Z_{0V} = 50\Omega$, $\epsilon_r = 1$, protože jde o vzduchový vodič a d_2 je vnitřní průměr trubky. Trubka je tvořena z materiálu o tloušťce 0,5 mm, tudíž vnitřní průměr trubky je $d_2 = d_1 - 2 \times 0,5 = 10 - 2 \times 0,5 = 9\text{ mm}$.

Vzorec upravíme a vyjádříme z něj průměr vnitřního vodiče d_3 :

$$d_3 = \frac{d_2}{10^{\frac{Z_{0V}}{138}}} = \frac{0,009}{10^{\frac{50}{138}}} = 3,9\text{ mm} \quad (5.2)$$

Nyní je zapotřebí zvolit charakteristickou impedanci dvouvodičového, na konci zkratovaného vedení, které je tvořeno vnějším vodičem napáječe a pomocnou trubkou stejného průměru (pahýlem). Jak bylo uvedeno v předchozí kapitole, pro velkou šířku pásma je nutné volit tuto charakteristickou impedanci co největší. Charakteristickou impedanci tohoto vedení lze vypočítat podle vztahu (5.3), nákres vedení je uveden na Obr. 4.1.

$$Z_{0P} = 276 \cdot \log \frac{2 \cdot a}{d_1} \quad (5.3)$$

Pro výpočet této charakteristické impedance lze využít i přesnějšího vztahu:

$$Z_{0P} = 120 \cdot \arg \cosh \left(\frac{a}{d_1} \right) \quad (5.4)$$

Kde d_1 je průměr vnějšího vodiče napáječe ($d_1 = 10\text{ mm}$), a je vzdálenost mezi vodiči.

Vzorec upravíme a vyjádříme z něj vzdálenost mezi vodiči a :

$$a = d_1 \cdot \cosh \left(\frac{Z_{0P}}{120} \right) \quad (5.5)$$

Charakteristickou impedanci musíme volit tak, aby bylo vedení dobře realizovatelné z trubek o průměru 10 mm. Je vhodné zvolit $Z_{0P} = 250\Omega$, protože pro tuto hodnotu vyjde vzdálenost mezi vodiči cca 40 mm, což je celkem dobře technicky realizovatelné. Pro $Z_{0P} = 300\Omega$ je vzdálenost mezi vodiči cca 61 mm, což je poměrně velká vzdálenost a vedení by se obtížně realizovalo. Volíme tedy $Z_{0P} = 250\Omega$:

$$a = d_1 \cdot \cosh \left(\frac{Z_{0P}}{120} \right) = 0,1 \cdot \cosh \left(\frac{250}{120} \right) = 40,8\text{ mm} \quad (5.6)$$

Nyní je potřeba zvolit charakteristickou impedanci vnitřního kompenzačního vedení, umístěného uvnitř pomocné trubky (pahýlu). Tu zvolíme jednoduše podle optimalizačního kritéria (4.22) $R^2 = Z_{0P} \cdot Z_0'$, kde R je odpor symetrické zátěže (je vhodné aby byl stejný jako charakteristická impedance napáječe, aby nevznikaly odrazy na vedení) a Z_0' je charakteristická impedance kompenzačního vedení. Vzorec upravíme pro výpočet Z_0' :

$$Z_0' = \frac{R^2}{Z_{0P}} = \frac{50^2}{250} = 10\Omega \quad (5.7)$$

Z charakteristické impedance vnitřního kompenzačního vedení lze podle vztahu (5.1) vypočítat průměr tohoto vedení.

Kde $Z_0' = 10\Omega$ je charakteristická impedance kompenzačního vedení, $d_2 = 9\text{ mm}$ je vnitřní průměr trubky (pahýlu), d_3 je průměr vnitřního vodiče, viz. obr. 4.8. Vzorec upravíme pro výpočet d_3 :

$$d_3 = \frac{d_2}{\sqrt{\frac{Z_0'}{Z_{0P}}}} = \frac{0,009}{\sqrt{\frac{10}{250}}} = 7,62\text{ mm} \quad (5.8)$$

Pro $Z_0' = 10\Omega$ vyšel průměr vnitřního kompenzačního vedení $a = 7,62\text{ mm}$. Když uvážíme, že vnitřní průměr trubky je 9 mm, bude velmi obtížné, takřka nemožné umístit do této trubky kompenzační vedení o průměru 7,6 mm (mezera mezi vnitřním vodičem a trubkou vyjde cca 0,7 mm což je příliš málo). Proto jsme nuceni za cenu jistého zmenšení šířky pásma použitelnosti obvodu zvětšit charakteristickou impedanci kompenzačního vedení. Při zvětšení charakteristické impedance kompenzačního vedení na $Z_0' = 15\Omega$ vyjde průměr tohoto vedení na $a = 7\text{ mm}$, což již je technicky realizovatelné.

Délka pahýlu i kompenzačního vedení je jak již bylo popsáno $\lambda/4$. V praxi je nevhodné volit délku pahýlu i kompenzačního vedení příliš velkou. Špatně by se udržovala konstantní vzdálenost mezi pomocným vodičem a napáječem a příliš dlouhý symetrizační obvod je nepraktický pro využití. Je tudíž nevhodné volit délku pahýlu větší než cca 300 mm. To odpovídá kmitočtům větším než 250 MHz.

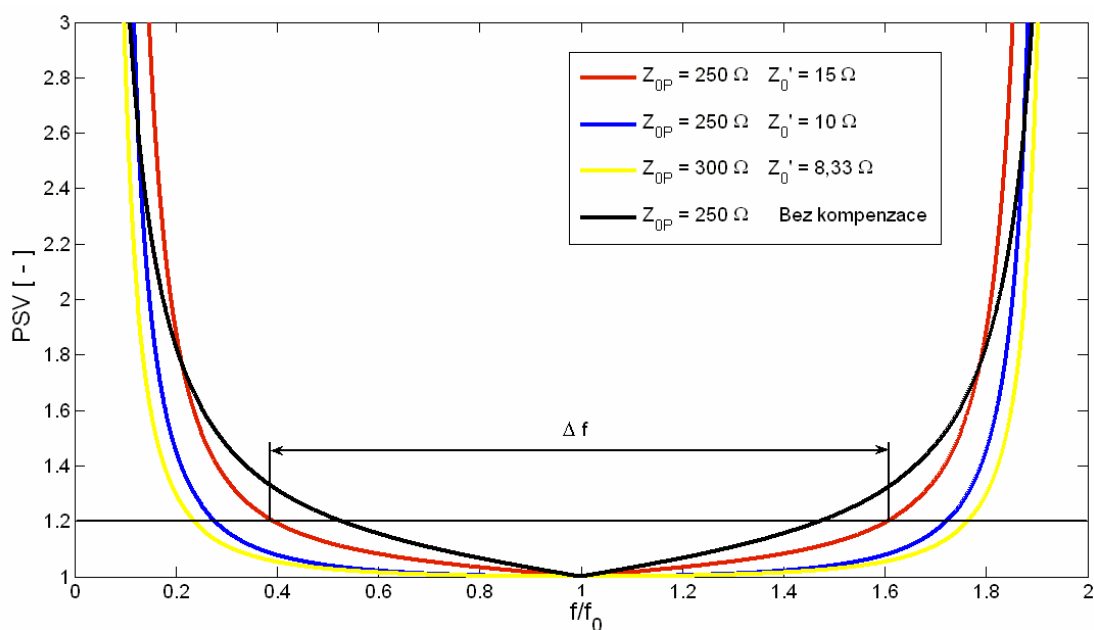
Na grafech viz. Obr. 5.1 – 5.3 jsou uvedeny průběhy rezistance, reaktance a poměru stojatých vln na vstupu navrženého symetrizačního obvodu. Pro srovnání jsou zobrazeny 4 křivky a to pro tyto hodnoty charakteristických impedancí:

1. $Z_{0P} = 250\Omega$, $Z_0' = 15\Omega$ – výše navržený symetrizační obvod
2. $Z_{0P} = 250\Omega$, $Z_0' = 10\Omega$ – navržený symetrizační obvod, Z_0' odpovídá hodnotě, vypočtené podle optimalizačního kritéria
3. $Z_{0P} = 300\Omega$, $Z_0' = 8,33\Omega$ - Z_{0P} zvýšeno na 300 Ω , Z_0' vypočteno podle optimalizačního kritéria
4. $Z_{0P} = 250\Omega$, obvod bez vnitřního kompenzačního vedení

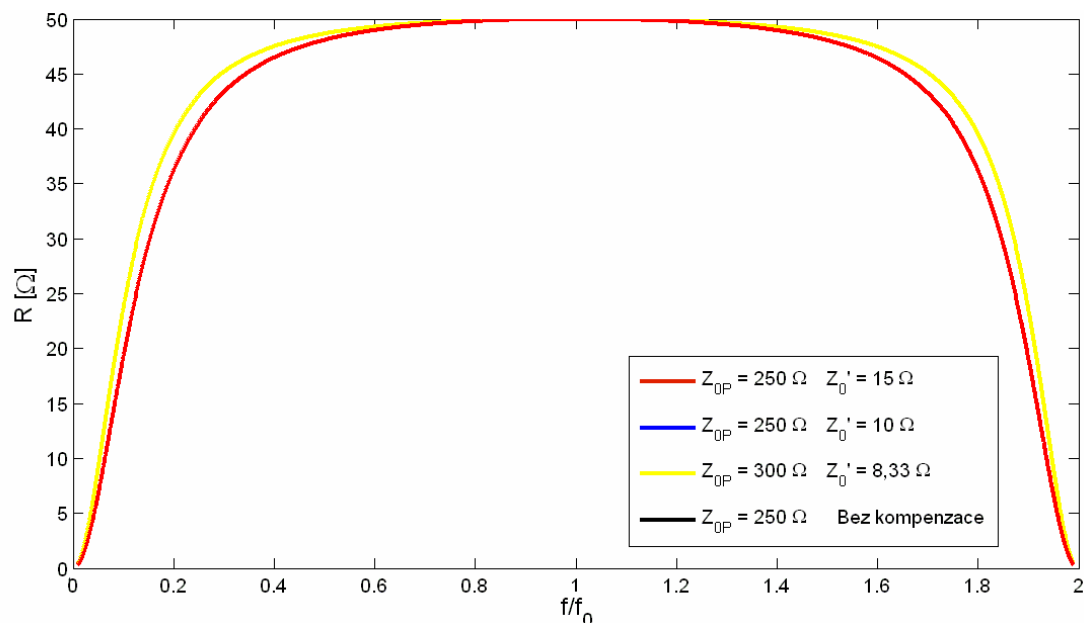
Šířku pásma obvodů budeme sledovat pro podmínku, že PSV nepřesáhne hodnotu 1,2 pro přizpůsobenou zátěž ($R = 50 \Omega$). Výsledné šířky pásma simulovaných obvodů jsou uvedeny níže. Z průběhů vyplývá, že největší šířku pásma použitelnosti má obvod s parametry $Z_{0P} = 300 \Omega$, $Z_0' = 8,33 \Omega$, který je ovšem technicky téměř nerealizovatelný. Zvýšení charakteristické impedance vnitřního kompenzačního vedení z 10Ω na 15Ω (při $Z_{0P} = 250 \Omega$) se projevilo jistým snížením šířky pásma. V grafu na obr. 5.2 se překrývají průběhy rezistance pro obvody se stejným Z_{0P} , což odpovídá uvedenému předpokladu, že změna charakteristické impedance vnitřního kompenzačního vedení nemá vliv na průběh rezistance obvodu.

Šířky pásma obvodů:

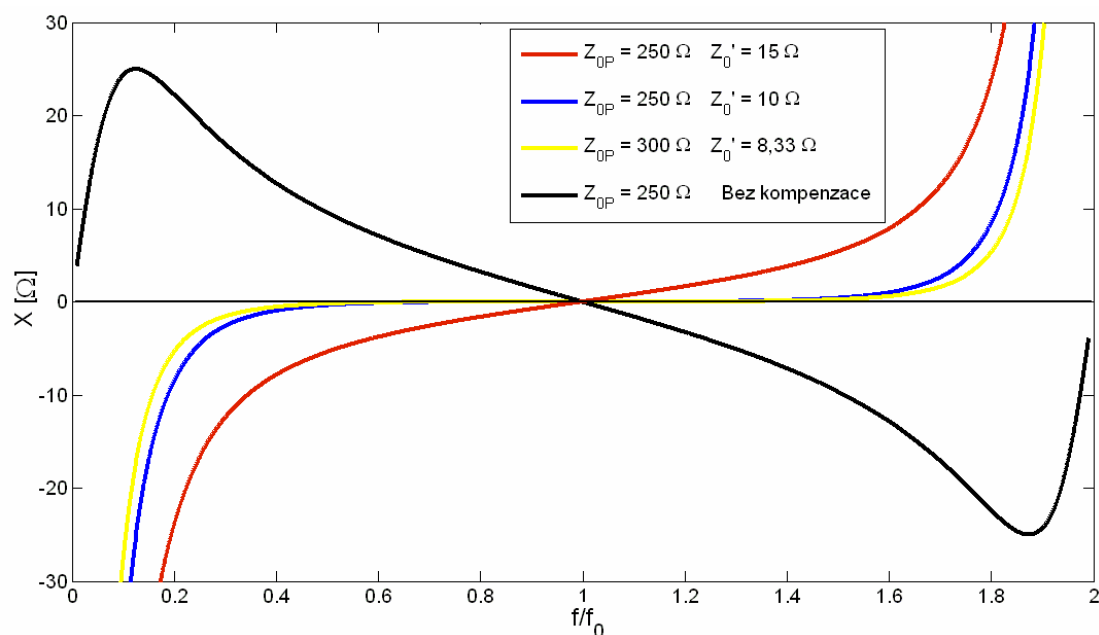
1. $Z_{0P} = 250 \Omega$, $Z_0' = 15 \Omega$ – $\Delta f = \pm 60\%$
2. $Z_{0P} = 250 \Omega$, $Z_0' = 10 \Omega$ – $\Delta f = \pm 72\%$
3. $Z_{0P} = 300 \Omega$, $Z_0' = 8,33 \Omega$ – $\Delta f = \pm 78\%$
4. $Z_{0P} = 250 \Omega$, obvod bez vnitřního kompenzačního vedení – $\Delta f = \pm 48\%$



Obr. 5.1: Průběh poměru stojatých vln navrženého symetrizačního obvodu.



Obr. 5.2: Průběh rezistance navrženého symetrizačního obvodu.



Obr. 5.3: Průběh reaktance navrženého symetrizačního obvodu.

5.2 Optimalizace obvodu pro různé hodnoty zátěže

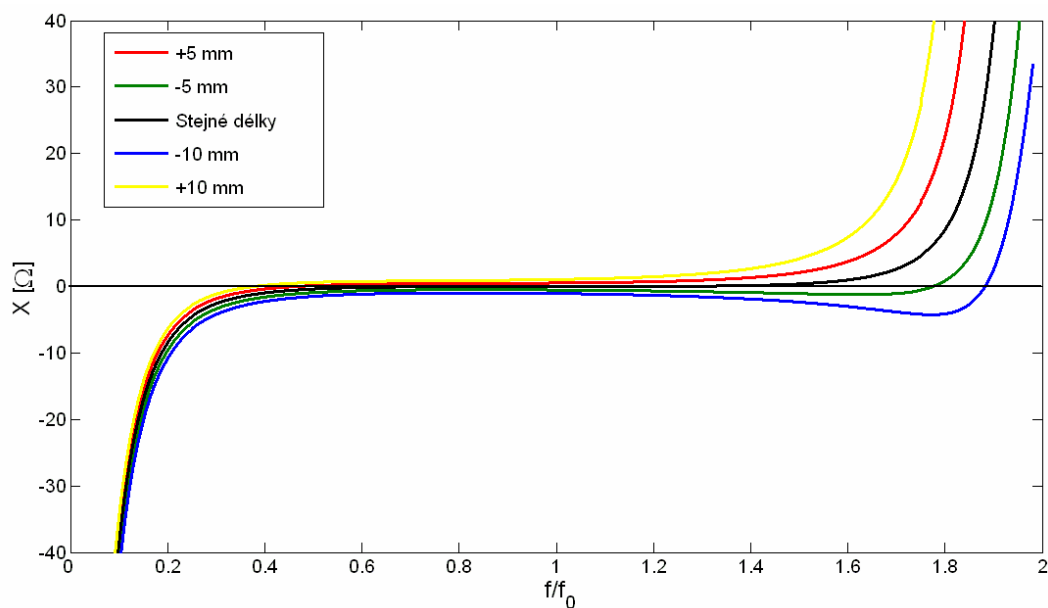
Symetrizační obvod se dá použít i pro jiné velikosti symetrické zátěže. Aby bylo dosaženo co největší šířky pásma je nutné pro různé hodnoty symetrické zátěže změnit charakteristickou impedanci vnitřního kompenzačního vedení. Ta se dopočítá jednoduše podle optimalizačního kritéria (4.22) V tabulce viz. tab. 5.1 jsou uvedeny optimální hodnoty charakteristické impedance vnitřního kompenzačního vedení při různých hodnotách zátěže ($R = 50 \div 200 \, \Omega$) pro výše navržený symetrizační obvod ($Z_{0P} = 250 \, \Omega$). V tabulce je rovněž vypočten průměr vnitřního vodiče, odpovídající vypočtené charakteristické impedanci. Z tabulky je patrné, že realizace je možná do hodnot zátěže cca $200 \, \Omega$, pro větší hodnoty vychází průměr vnitřního vodiče příliš malý.

R [Ω]	Zo' [Ω]	Průměr vnitřního vedení [mm]
50	10	7,62
60	14,4	7,08
70	19,6	6,49
80	25,6	5,87
90	32,4	5,24
100	40	4,62
110	48,4	4,01
120	57,6	3,44
130	67,6	2,91
140	78,4	2,43
150	90	2,00
160	102,4	1,63
170	115,6	1,31
180	129,6	1,04
190	144,4	0,81
200	160	0,62

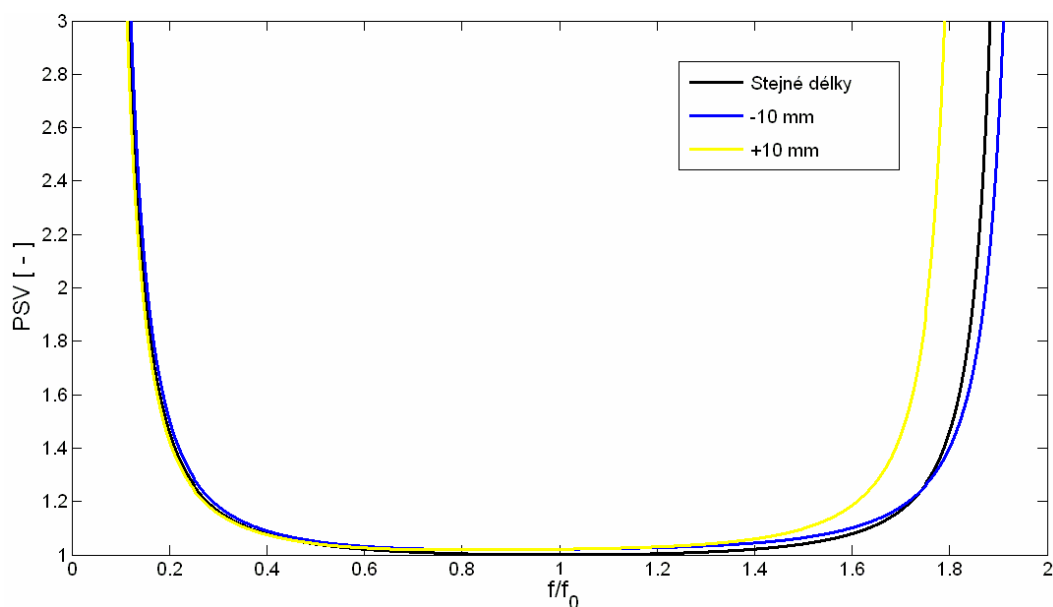
Tab. 5.1: Optimální hodnoty Zo' a průměru vnitřního vedení pro různé hodnoty symetrické zátěže

5.3 Vliv nestejné délky vedení na vlastnosti obvodu

Při konstrukci symetrizačního obvodu se může stát, že vnitřní kompenzační vedení nebude přesně stejně dlouhé jako zkratované symetrické vedení. To způsobí, že obě vedení nebudou mít přesně stejný rezonanční kmitočet. Tím dojde ke zhoršení šířky pásma obvodu. Vliv nestejných délek vedení se projeví pouze ve změně reaktance. V grafu viz. obr. 5.4 je zobrazen průběh reaktance symetrizačního obvodu pro čtyři různé stavy, kdy je vnitřní kompenzační vedení kratší resp. delší o 5 mm a 10 mm. Nestejné délky se projeví především na vyšších kmitočtech nad rezonancí. Z průběhu poměru stojatých vln viz. obr. 5.5 vidíme, že nejhorší vliv na přizpůsobení obvodu má stav, kdy je vnitřní kompenzační vedení delší než symetrické vedení. Když je kompenzační vedení kratší, lze v některých případech dokonce docílit lepšího přizpůsobení. Pro přehlednost jsou v grafu zobrazeny jen křivky, odpovídající změnám délky o 10 mm.



Obr. 5.4: Vliv nestejné délky vedení na reaktanci obvodu

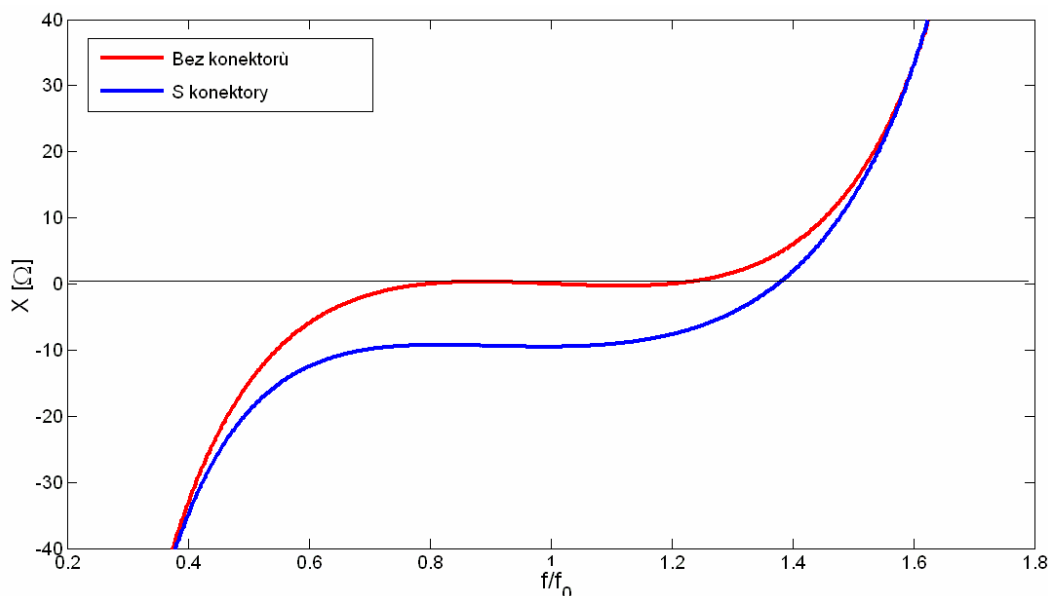


Obr. 5.5: Vliv nestejné délky vedení na přizpůsobení obvodu

5.4 Vliv kapacity konektorů na vlastnosti obvodu

Pro snadné připojení měřené impedance je vhodné na výstup obvodu připojit konektor, resp. dvojici konektorů. Konektory však vykazují určitou kapacitu, která se na vysokých kmitočtech nepříjemně projeví na vlastnosti obvodu. Běžná hodnota kapacity konektoru je cca. 2 pF. Na výstupu obvodu bývají zapojeny 2 konektory v sérii, tudíž uvažujeme, že je k symetrické zátěži paralelně připojena kapacita 1 pF. Vliv kapacity konektorů se projeví opět především na reaktanci symetrizačního obvodu. Reaktance kapacity klesá s rostoucím kmitočtem, vliv kapacity konektorů je tedy větší s rostoucím kmitočtem. Kapacita konektorů se také uplatní více, při větší hodnotě symetrické zátěže. Na obr. 5.6 je zobrazen průběh

reaktance obvodu při uvažování kapacity konektorů. Simulace je provedena pro obvod zatížený odporem $R = 100 \, \Omega$. Rezonanční kmitočet obvodu je 500 MHz. Kapacita konektorů se projeví posunutím reaktance do záporných hodnot (obvod má více kapacitní charakter).



Obr. 5.6: Vliv parazitní kapacity konektorů na průběh reaktance obvodu

6 Využití symetrizačního obvodu pro měření impedancí

Symetrizační obvod s pahýlem s vnitřním kompenzačním vedením je velice vhodný pro měření symetrických impedancí, protože je velice širokopásmový. Na rezonančním kmitočtu je impedance naměřená na vstupu symetrizačního obvodu přímo rovna měřené impedanci. Mimo rezonanci lze hodnotu měřené impedance snadno dopočítat. Vycházíme z náhradního schématu viz. obr. 4.7. Pokud známe rozměry symetrizačního obvodu, lze dopočítat hodnoty reaktancí pahýlu a vnitřního vedení. Ze známého vzorce pro impedanci obvodu pak vyjádříme velikost zatěžovací impedance.

Vycházíme ze vzorce pro vstupní impedanci obvodu (6.1):

$$Z_{SO} = j \cdot X' + \frac{j \cdot X_p \cdot R}{j \cdot X_p + R} \quad (6.1)$$

Jednoduchou úpravou vyjádříme hodnotu zatěžovací impedance R . V tomto případě jde o obecnou komplexní hodnotu zatěžovací impedance, proto je vhodnější označovat zatěžovací impedanci Z .

$$Z = \frac{j \cdot X_P \cdot (Z_{SO} - j \cdot X')}{j \cdot X' + j \cdot X_P - Z_{SO}} \quad (6.2)$$

Do vzorce dosadíme vztahy pro výpočet reaktance pahýlu a vnitřního vedení (4.1), (4.13):

$$Z = \frac{j \cdot Z_{0P} \cdot \tan(\alpha \cdot l) \cdot [Z_{SO} + j \cdot Z'_0 \cdot \cot g(\alpha \cdot l)]}{-j \cdot Z'_0 \cdot \cot g(\alpha \cdot l) + j \cdot Z_{0P} \cdot \tan(\alpha \cdot l) - Z_{SO}} \quad (6.3)$$

Za α dosadíme ze vzorce (4.2):

$$Z = \frac{j \cdot Z_{0P} \cdot \tan\left(\frac{2\pi \cdot f}{c} \cdot l\right) \cdot \left[Z_{SO} + j \cdot Z'_0 \cdot \cot g\left(\frac{2\pi \cdot f}{c} \cdot l\right)\right]}{-j \cdot Z'_0 \cdot \cot g\left(\frac{2\pi \cdot f}{c} \cdot l\right) + j \cdot Z_{0P} \cdot \tan\left(\frac{2\pi \cdot f}{c} \cdot l\right) - Z_{SO}} \quad (6.4)$$

Do tohoto vzorce již můžeme dosadit impedanci, změřenou na vstupu obvodu a získáme impedanci zátěže. Hodnoty charakteristických impedancí Z_{0P} a Z'_0 dopočítáme podle vzorců (5.4), (4.14).

Pro výpočet zatěžovací impedance, při známých rozměrech a známé impedance na vstupu symetrizačního obvodu je připraven jednoduchý počítačový program. Program je vytvořen v prostředí MATLAB. Pro jeho spuštění stačí zadat příkaz `impedance` do okna Matlabu. Pro úspěšné spuštění programu musí být správně nastaven kořenový adresář se soubory `impedance.m` a `impedance.fig`.

Po spuštění se otevře okno programu. V levé části okna programu se zadá impedance na vstupu obvodu ve tvaru $Re(Z_{SO}) + j \times Im(Z_{SO})$. Dále se zadá kmitočet a rozměry symetrizačního obvodu podle nákresu v pravé části okna. Stiskem tlačítka se provede výpočet. Vypočteny jsou hodnoty charakteristických impedancí pahýlu, vnitřního vedení a hodnota impedance zátěže. Ta je zobrazena jako reálná + imaginární složka impedance a rovněž jako absolutní hodnota a fáze impedance. Okno programu je zobrazeno na obr. 6.1.

impedance

Výpočet impedance na výstupu symetrizačního obvodu

Impedance na vstupu obvodu:
 $Re + j.Im$

Re [ohm] ZOP [ohm]

Kmitočet [MHz] ZO' [ohm]

I [m] $Re(Z)$ [ohm]

a [mm] $Im(Z)$ [ohm]

$d1$ [mm] $|Z|$ [ohm]

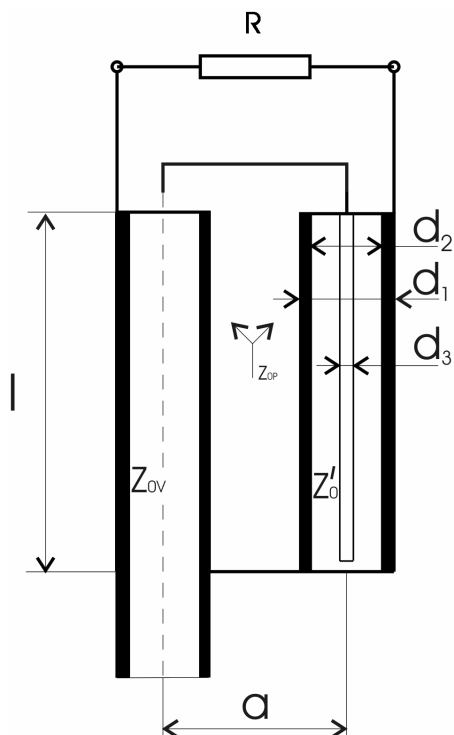
$d2$ [mm] $arg(Z)$ [°]

$d3$ [mm]

Obr. 6.1: Okno programu impedance

7 Experimentální ověření vlastností symetrizačních obvodů

Měření proběhlo na přípravku symetrizačního obvodu s pahýlem s vnitřním kompenzačním vedením. Nákres přípravku s vyznačenými rozměry je uveden na obr. 7.1.



Obr. 7.1: Nákres přípravku symetrizačního obvodu s pahýlem s vnitřním kompenzačním vedením

Rozměry přípravku podle obr. 7.1:

$$a = 23 \text{ mm}$$

$$d_1 = 12 \text{ mm}$$

$$d_2 = 9,5 \text{ mm}$$

$$d_3 = 3 \text{ mm}$$

Zkrat na konci symetrického vedení je pohyblivý, takže se může nastavovat délka vedení. Měření probíhalo při délce cca. 125 mm, což odpovídá rezonančnímu kmitočtu $f_{REZ} = 600 \text{ MHz}$. Přípravek umožňuje také odpojení vnitřního vedení, lze jej tedy použít jako obvod s kompenzací i bez kompenzace.

Ze vztahu (7.1) lze vypočítat charakteristickou impedanci symetrického, zkratovaného vedení Z_{0P} přípravku:

$$Z_{0P} = 120 \cdot \arg \cosh \left(\frac{a}{d_1} \right) = 120 \cdot \arg \cosh \left(\frac{23}{12} \right) = 152,1 \Omega \quad (7.1)$$

Přípravek je zakončen dvěma konektory, ty je možné zakončit libovolnou dostupnou zátěží. K dispozici byly bezindukční zátěže o impedanci 50Ω . Zatěžovací odpory jsou zapojeny v sérii, výsledný zatěžovací odpor je tedy: $R = 2 \times 50 \Omega = 100 \Omega$. Pro tuto impedanci je nutné dopočítat podle optimalizačního kritéria (4.22) charakteristickou impedanci vnitřního kompenzačního vedení.

$$R^2 = Z_{0P} \cdot Z_0' \Rightarrow Z_0' = \frac{R^2}{Z_{0P}} = \frac{100^2}{152,1} = 65,7 \Omega \quad (7.2)$$

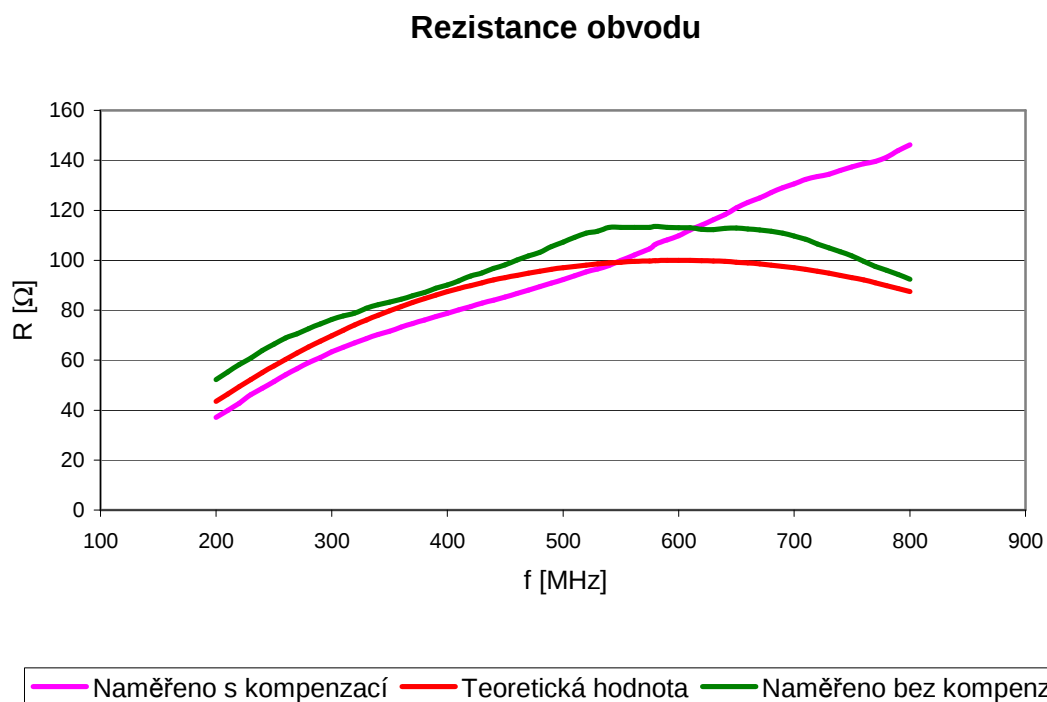
Ze známé hodnoty Z_0' dopočítáme podle vztahu (4.14) průměr vnitřního vodiče:

$$Z_0' = 138 \log \frac{d_2}{d_3} \Rightarrow d_3 = \frac{d_2}{\frac{Z_0'}{10^{138}}} = \frac{0,0095}{\frac{65,7}{10^{138}}} = 3,17 \text{ mm} \quad (7.3)$$

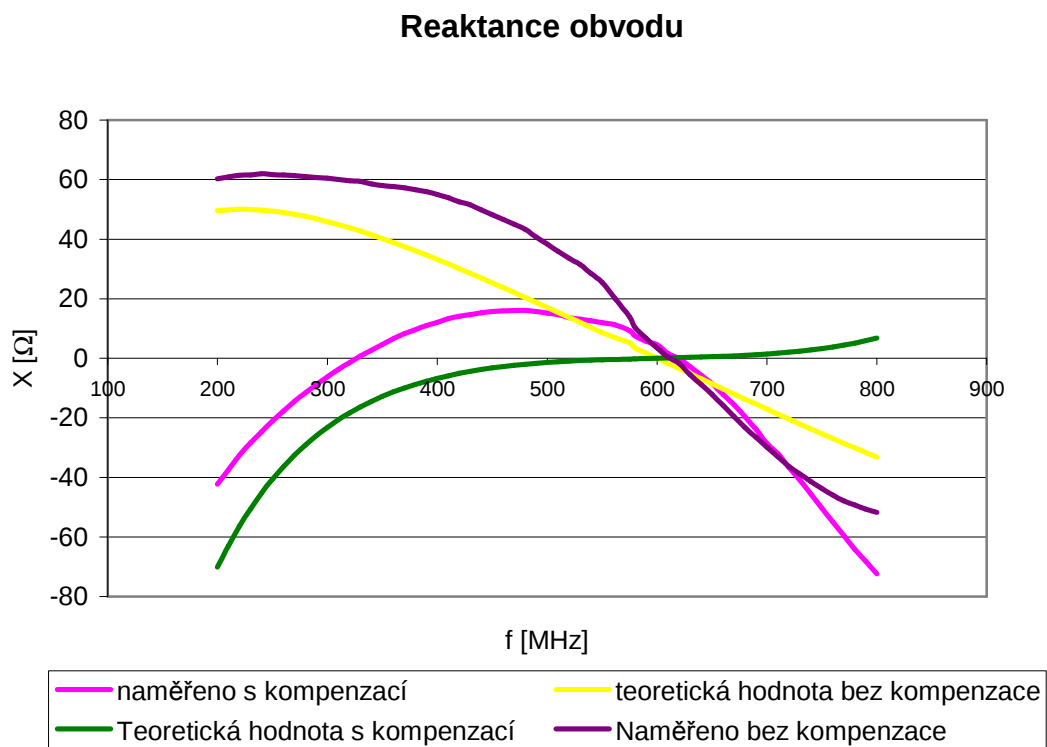
V přípravku je použit vnitřní vodič o průměru 3 mm, což odpovídá hodnotě $Z_0' = 69,1 \Omega$. To je hodnota velmi blízká optimální hodnotě, obvod by se tedy měl chovat téměř stejně jako v optimálním stavu. V následujících grafech jsou zaznamenány průběhy rezistance a reaktance měřeného symetrizačního obvodu a to pro stav s kompenzací a bez kompenzace. Pro srovnání jsou rovněž uvedeny teoretické průběhy rezistance a reaktance. Teoretické průběhy byli spočítány postupem, uvedeným v kapitole 4.

Na průběhu rezistance obvodu je vidět, že při stavu bez kompenzace se naměřená hodnota téměř shoduje s teoretickou (odchylka max. 15Ω). Při stavu s kompenzací se naměřený průběh blíží teoretickému jen na kmitočtech, nižších než je rezonanční. Nad rezonančním kmitočtem rezistance obvodu stoupá až k hodnotě 140Ω . Přičemž teoreticky by měli být průběhy rezistance bez kompenzace a s kompenzací shodné. Nad rezonančním kmitočtem je již kmitočet měření příliš vysoký a projevují se parazitní kapacity a jiné parazitní jevy v obvodu. Tím je pravděpodobně způsobena odchylka od teoretických hodnot při stavu s kompenzací.

Naměřený průběh reaktance obvodu bez kompenzace je tvarově téměř shodný s teoretickým průběhem. Reaktance se liší maximálně o 20Ω . Reaktance obvodu, ve stavu s kompenzací by se měla blížit k nulové hodnotě a být v určitém pásmu konstantní, viz. obr. 7.2 - teoretický průběh. Naměřený průběh však na kmitočtech pod rezonancí mírně překmitne do kladných hodnot. Překmitnutí není větší než 20Ω , což by se nemělo na šířce pásma příliš projevit. Na kmitočtech nad rezonancí, oproti teoretickému průběhu, reaktance klesá do záporných hodnot. Tyto neshody s teoretickým průběhem mohou být způsobeny např. nestejnou délkou vnitřního vedení oproti symetrickému vedení, nebo kapacitou konektorů, použitých na výstupu. Nepříznivě se také může projevit fakt, že kompenzační vedení nepracuje úplně jako otevřené, ale je zatíženo kapacitou mezi středním vodičem a pláštěm. Stejně jako na rezistanci mají i na reaktanci špatný vliv parazitní kapacity a jiné jevy, projevující se zejména na vysokých kmitočtech nad rezonancí.



Obr. 7.1: Kmitočtová závislost rezistance měřeného symetrizačního obvodu, pro stavy bez kompenzace a s kompenzací



Obr. 7.2: Kmitočtová závislost reaktance měřeného symetrizačního obvodu, pro stavy bez kompenzace a s kompenzací

8 Závěr

Bakalářská práce se věnuje symetrizačním obvodům, jejich vlastnostem a využitelnosti při měření impedancí antén.

V úvodní části práce je vysvětlen princip symetrizace a důvod používání symetrizačních obvodů. Je popsán důsledek špatného připojení symetrické zátěže na nesymetrický napáječ. Dále je v práci popsáno provedení a vlastnosti několika typů symetrizačních obvodů a jejich rozdělení podle principu činnosti.

Další část práce je věnována analýze vlastností vybraných symetrizačních obvodů. Práce je zaměřena především na dva typy obvodů: Symetrizační obvod s pahýlem a symetrizační obvod s pahýlem s vnitřním kompenzačním vedením. U těchto obvodů je detailně analyzována šířka kmitočtového pásma. Šířka pásma těchto obvodů je určena pouze impedančními vlastnostmi, tudíž je provedena kmitočtová analýza vstupní impedance v závislosti na parametrech obvodů (hodnoty charakteristických impedancí pomocných vedení, velikost zátěže apod.).

V závěrečné části je proveden kompletní návrh symetrizačního obvodu s pahýlem s vnitřním kompenzačním vedením a jsou uvedeny doporučení pro konstrukci tohoto obvodu. Z výsledků analýzy plyne, že tento obvod je velice širokopásmový, tudíž velice vhodný pro měření impedancí symetrických antén. Na rezonančním kmitočtu obvod nijak netransformuje impedanci, tudíž hodnota změřená na vstupu obvodu je přímo rovna měřené zatěžovací impedanci. Mimo rezonanci je pro přepočítání impedance mezi vstupem a výstupem obvodu sestaven počítačový program. Vlastnosti popisovaných symetrizačních obvodů jsou ověřeny měřením impedančních vlastností na funkčním vzorku obvodu.

9 Použitá literatura

- [1] J.PROKOP – J.VOKURKA - Šíření elektromagnetických vln a antény, SNTL, Praha 1982
- [2] B. ŠIMÍČEK – Antény pro televizní a rozhlasové vysílání na VKV, NADAS, Praha 1989
- [3] Z. NOVÁČEK – Elektromagnetické vlny, antény a vedení. Brno: FEKT VUT v Brně
- [4] J. MACOUN – Od antény k přijímači. Amatérské rádio B, 1986, č.2, str. 42 – 76.
- [5] Z. KRUPKA – Televizní antény. Amatérské rádio B, 1981, č.6, str. 202 – 240
- [6] M. PROCHÁZKA – VKV, UKV a cm vlny v nomogramech a grafech. Amatérské rádio B, 1995, č.4, str. 122 – 159
- [7] M. PROCHÁZKA – Antény Encyklopedická příručka, BEN Praha 2005
- [8] V. CACHA, M. PROCHÁZKA – Antény, SNTL, Praha 1956
- [9] A. KRISCHKE – Rothammels ANTENNEN BUCH
- [10] OLTMAN, G.: The Compensated Balun. Trans. IEEE MTT – 14, March 1966, s. 112 – 119
- [11] BECKER, R.: Die Wirkungsweise des Schlitzübertragers als Symmetriereinrichtung, AEÜ, Bd. 20, H 12, Dezember 1966, Str. 647 - 656

10 Seznam symbolů

a	vzdálenost symetrických vodičů
c	rychlost světla
d_1	vnější průměr vodiče
d_2	vnitřní průměr vodiče
d_3	průměr vnitřního kompenzačního vodiče
f	kmitočet
I_{as}	asymetrický proud
I_S	symetrický proud
l_P	délka pahýlu
PSV	poměr stojatých vln
R	odpor zátěže
R_{SO}	rezistance symetrizačního obvodu
X'	reaktance kompenzačního vedení naprázdno
X_P	reaktance pahýlu (symetrického vedení nakrátko)
X_{SO}	reaktance symetrizačního obvodu
Z_0	charakteristická impedance vedení
Z_0'	charakteristická impedance kompenzačního vedení naprázdno
Z_{0P}	charakteristická impedance pahýlu
Z_{SO}	impedance na vstupu symetrizačního obvodu
α	měrná fáze
β	koeficient reaktančního sklonu
Δf	kmitočtová šířka pásma
ε_r	relativní permitivita
λ	vlnová délka
ρ	činitel odrazu