

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Brno, 2017

Jakub Studený



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV RADIOELEKTRONIKY

DEPARTMENT OF RADIO ELECTRONICS

BEZDRÁTOVÝ PŘENOS ENERGIE POMOCÍ INDUKTIVNÍ VAZBY PRO BIOMEDICÍNSKÉ APLIKACE

WIRELESS POWER TRANSFER BY INDUCTIVE COUPLING FOR BIOMEDICAL APPLICATIONS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Jakub Studený

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Michal Mrnka

BRNO 2017

Bakalářská práce

bakalářský studijní obor **Elektronika a sdělovací technika**

Ústav radioelektroniky

Student: Jakub Studený

ID: 130503

Ročník: 3

Akademický rok: 2016/17

NÁZEV TÉMATU:

Bezdrátový přenos energie pomocí induktivní vazby pro biomedicínské aplikace

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Seznamte se s principem bezdrátového přenosu energie prostřednictvím induktivní vazby. Provedte návrh dvojice vázaných cívek, které budou demonstrovat přenos energie na vhodné frekvenci. Ve vhodném simulátoru pole (CST Microwave Studio) navrhnete a optimalizujete systém dvou cívek z hlediska maximalizace činitele vazby a také minimalizace velikosti přijímací cívk. Dále simulujte vlivy různých materiálů vložených mezi cívky (modely lidských tkání, voda atd.) na vzájemnou vazbu.

Zkoumejte vliv vzájemného natočení a posunu cívek na hodnotu přenosu. Provedte návrh přizpůsobovacích obvodů vysílací a přijímací cívk a celé zařízení vyrobte. Měření ověřte jeho správnou funkci a zkoumejte vlivy různých materiálů vložených mezi cívky na účinnost přenosu. Srovnajte výsledky simulací s naměřenými daty.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

[1] MUTASHAR, S., HANNAN, M.A., SAMAD, S.A., HUSSAIN, A. Analysis and optimization of spiral circular inductive coupling link for bio-implanted applications on air and within human tissue. Sensors, vol. 14, no. 7, pp. 11 522–11 541, 2014.

[2] COVIC, G., A., BOYS, J., T. Inductive Power Transfer, Proceedings of the IEEE, vol. 101, no. 6, pp. 1276-1289, June 2013.

Termín zadání: 6. 2. 2017

Termín odevzdání: 30.5.2017

Vedoucí práce: Ing. Michal Mrnka

Konzultant:



prof. Ing. Tomáš Kratochvíl, Ph.D.
předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích 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 částí druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

ABSTRAKT

Bakalářská práce se zabývá problematikou bezdrátového přenosu energie realizovaného pomocí dvou induktivně vázaných cívek. Popisuje postup při návrhu planárních cívek s využitím Wheelerovy metody. Dále uvádí postup při simulování navržených cívek a postup při simulaci bezdrátového přenosu v 3D simulátoru elektromagnetického pole. Závěr práce je věnován realizaci navržených cívek s přizpůsobovacími obvody, měření přenosu pomocí vektorového analyzátoru, zkoumání vlivu vzdálenosti cívek, vzájemného natočení cívek a vložených materiálů mezi cívkami.

KLÍČOVÁ SLOVA

bezdrátový přenos energie, planární cívky, induktivní vazba, vázané obvody, S-parametry, Z-parametry

ABSTRACT

The bachelor thesis deals with wireless power transfer implemented using a couple of inductively coupled planar coils. A procedure for designing planar coils using the Wheeler method is described as well as the process of simulating wireless transmission in a 3D electromagnetic field simulator. The conclusion of the thesis is devoted to the implementation of the designed coils with adaptive circuits, measurement of transmission by vector analyzer, investigation into the impact of coil distance, and mutual rotation of the coils and the materials interposed between coils.

KEYWORDS

WPT, wireless power transfer, wireless energy transmission, inductive coupling, planar coils, S-parameters, Z-parameters

STUDENÝ, Jakub. *Bezdrátový přenos energie pomocí induktivní vazby pro biomedicínské aplikace*. Brno, 2017, 80 s. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav radioelektroniky. Vedoucí práce: Ing. Michal Mrnka

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci na téma „Bezdrátový přenos energie pomocí induktivní vazby pro biomedicínské aplikace“ jsem vypracoval(a) 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(ka) uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této bakalářské práce jsem neporušil(a) autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl(a) nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a/nebo majetkových a jsem si plně vědom(a) následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon), ve znění pozdějších předpisů, včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

Brno

.....

podpis autora(-ky)

PODĚKOVÁNÍ

Rád bych poděkoval svým rodičům za podporu při studiu a vedoucímu bakalářské práce panu Ing. Michalu Mrnkovi za odborné vedení, konzultace, trpělivost a podnětné návrhy k práci.

Brno

.....

podpis autora(-ky)



Faculty of Electrical Engineering
and Communication
Brno University of Technology
Purkynova 118, CZ-61200 Brno
Czech Republic
<http://www.six.feec.vutbr.cz>

PODĚKOVÁNÍ

Výzkum popsany v této bakalářské práci byl realizován v laboratořích podpořených z projektu SIX; registrační číslo CZ.1.05/2.1.00/03.0072, operační program Výzkum a vývoj pro inovace.

Brno

.....
podpis autora(-ky)



EVROPSKÁ UNIE
EVROPSKÝ FOND PRO REGIONÁLNÍ ROZVOJ
INVESTICE DO VAŠÍ BUDOUCNOSTI



OBSAH

Úvod	13
1 Bezdrátový přenos energie	14
1.1 Druhy přenosu	14
1.2 Induktivní vazba	14
1.3 Parametry induktivní vazby	14
1.3.1 Druhy vazeb u vázaných rezonančních obvodů	15
2 Planární cívky	16
2.1 Wheelerova metoda	16
3 Návrh planárních cívek	18
3.1 Specifikace přenosu	18
3.2 Výpočet planárních cívek	19
4 Simulace pomocí 3D simulátoru elektromagnetického pole	21
4.1 Nastavení simulace	21
4.2 Výsledky simulací s popsáním postupem	22
4.2.1 Tvorba ekvivalentního obvodu	24
4.3 Výsledky simulací	28
4.4 Shrnutí	32
5 Realizace cívek	34
5.1 Doplnující informace k návrhu cívek	35
5.2 Přizpůsobovací obvody	35
6 Měření	36
6.1 Nastavení přístroje	36
7 Výsledky měření a simulací	37
7.1 Zkoumání vlivu vzdálenosti na hodnotu přenosu	37
7.2 Zkoumání vlivu posunu cívek na hodnotu přenosu	41
7.3 Zkoumání vlivu natočení cívek na hodnotu přenosu	46
7.4 Zkoumání vlivu různých materiálů vložených mezi cívky na hodnotu přenosu	50
7.5 Měření induktivní vazby s laditelným přizpůsobovacím obvodem	53
7.5.1 Příklad	55
8 Závěr	57

Literatura	59
Seznam symbolů, veličin a zkratk	61
Seznam příloh	62
A Přílohy	63
A.1 Schéma	63
A.2 Předlohy desek plošných spojů	64
A.3 Osazovací plány	72
A.4 Seznamy součástek	76
B Obsah přiloženého CD	80

SEZNAM OBRÁZKŮ

1.1	Druhy vazeb	15
2.1	Čtvercová spirálová cívka se zakótovanými rozměry [7]	16
3.1	Popis přenosu pomocí dvojbranu	18
4.1	Tetrahedronová síť planární cívky	21
4.2	Graf závislosti velikosti vlastní indukčnosti cívky L na frekvenci	23
4.3	Graf závislosti velikosti činitele jakosti Q na frekvenci	23
4.4	Graf závislosti velikosti parazitního odporu R_p na frekvenci	23
4.5	Zapojení ekvivalentního obvodu cívky	24
4.6	S-parametry před optimalizací	25
4.7	S-parametry po optimalizaci	25
4.8	Zjednodušené náhradní schéma cívky	26
4.9	Zapojení ekvivalentního obvodu cívky s přizpůsobovacími kapacitami C_s a C_p	27
4.10	Závislost rozptylových parametrů na frekvenci, vyjádřená v dB; bez přizpůsobení	27
4.11	Závislost rozptylových parametrů na frekvenci, vyjádřená v dB; s přizpůsobením	28
4.12	Závislost rozptylových parametrů na frekvenci, vyjádřená v dB; vazba bez překážky	28
4.13	Závislost velikosti napětí na frekvenci; vazba bez překážky	29
4.14	Závislost rozptylových parametrů na frekvenci, vyjádřená v dB; po přizpůsobení	29
4.15	Závislosti velikosti napětí na frekvenci; vazba bez překážky	30
4.16	Závislost rozptylových parametrů na frekvenci, vyjádřená v dB; pro přenos přes kost	30
4.17	Závislost velikosti přeneseného napětí na frekvenci, při přenosu přes kost	31
4.18	Závislost rozptylových parametrů na frekvenci, vyjádřená v dB; pro přenos přes kůži	31
4.19	Závislost velikosti přeneseného napětí na frekvenci; při přenosu přes kůži	31
4.20	Ukázka vyzařování elektrického pole E na frekvenci 13,56 MHz; přes vzorek kůže	32
4.21	Ukázka vyzařování magnetického pole H na frekvenci 13,56 MHz; přes vzorek kůže	32
7.1	Měření vlivu vzdálenosti na na napěťový útlum přenosu v dB	37

7.2	Závislost napěťového útlumu přenosu, vyjádřeného pomocí parametru $ S_{21} $, na vzdálenost mezi cívkami S_I a S_II.	38
7.3	Závislost napěťového útlumu přenosu, vyjádřeného pomocí parametru $ S_{21} $, na vzdálenost mezi cívkami B_I a B_II.	38
7.4	Závislost napěťového útlumu přenosu, vyjádřeného pomocí parametru $ S_{21} $, na vzdálenost mezi cívkami S_II a B_I.	39
7.5	Závislost ze změřených údajů na kmitočtu 13,56 MHz, napěťového útlumu přenosu, vyjádřeného pomocí parametru $ S_{21} $, na vzdálenost mezi cívkami, při různých konfiguracích.	39
7.6	Měření vlivu vychýlení středů cívek na napěťový útlum přenosu v dB	41
7.7	Závislost napěťového útlumu přenosu, vyjádřeného pomocí parametru $ S_{21} $, na vychylování středů cívek doleva (-) a doprava (+), konfigurace S_I - S_II.	41
7.8	Závislost napěťového útlumu přenosu, vyjádřeného pomocí parametru $ S_{21} $, na vychylování středů cívek doleva (-) a doprava (+), konfigurace B_I - B_II.	42
7.9	Závislost napěťového útlumu přenosu, vyjádřeného pomocí parametru $ S_{21} $, na vychylování středů cívek doleva (-) a doprava (+), konfigurace S_II - B_I.	42
7.10	Závislost ze změřených údajů na kmitočtu 13,56 MHz, napěťového útlumu přenosu, vyjádřeného pomocí parametru $ S_{21} $, na vychylování středů cívek doleva (-) a doprava (+), při různých konfiguracích.	43
7.11	Měření vlivu natočení cívek na napěťový útlum přenosu v dB	46
7.12	Závislost napěťového útlumu přenosu, vyjádřeného pomocí parametru $ S_{21} $, na úhlu natočení cívek, konfigurace S_I - S_II.	46
7.13	Závislost napěťového útlumu přenosu, vyjádřeného pomocí parametru $ S_{21} $, na úhlu natočení cívek, konfigurace B_I - B_II.	47
7.14	Závislost napěťového útlumu přenosu, vyjádřeného pomocí parametru $ S_{21} $, na úhlu natočení cívek, konfigurace S_II - B_I.	47
7.15	Závislost ze změřených údajů na kmitočtu 13,56 MHz, napěťového útlumu přenosu, vyjádřeného pomocí parametru $ S_{21} $, na úhlu natočení cívek, při různých konfiguracích.	48
7.16	Měření vlivu různých materiálů na napěťový útlum přenosu v dB, měřené vzorky	50
7.17	Dřevo	51
7.18	Dřevo model	51
7.19	Ruka	51
7.20	Ruka model	51
7.21	Cuprexit	51

7.22	Cuprextit model	51
7.23	Měření s laditelným přizpůsobovacím obvodem	53
7.24	Závislost rozptylových parametrů na frekvenci, vyjádřená v dB	54
7.25	Smithův diagram s činitely odrazu	54
7.26	Záznam rozptylového parametru S_{21} z měřicího přístroje po vyladění.	55
A.1	Schéma zapojení přizpůsobovacích obvodů planárních cívek	63
A.2	Deska plošného spoje cívky S_I, přední strana, M 1:1, rozměry desky 80x100 [mm]	64
A.3	Deska plošného spoje cívky S_I, zadní strana, M 1:1, rozměry desky 80x100 [mm]	65
A.4	Deska plošného spoje cívky S_II, přední strana, M 1:1, rozměry desky 80x100 [mm]	66
A.5	Deska plošného spoje cívky S_II, zadní strana, M 1:1, rozměry desky 80x100 [mm]	67
A.6	Deska plošného spoje cívky B_I, přední strana, M 1:1, rozměry desky 80x100 [mm]	68
A.7	Deska plošného spoje cívky B_I, zadní strana, M 1:1, rozměry desky 80x100 [mm]	69
A.8	Deska plošného spoje cívky B_II, přední strana, M 1:1, rozměry desky 80x100 [mm]	70
A.9	Deska plošného spoje cívky B_II, zadní strana, M 1:1, rozměry desky 80x100 [mm]	71
A.10	Osazovací plán cívky S_I	72
A.11	Osazovací plán cívky S_II	73
A.12	Osazovací plán cívky B_I	74
A.13	Osazovací plán cívky B_II	75

SEZNAM TABULEK

2.1	Koeficienty pro modifikovaný Wheelerův výraz	16
3.1	Tabulka jednotlivých parametrů cívky	19
4.1	Parametry cívky před a po optimalizaci	26
5.1	Tabulka jednotlivých parametrů cívek S_I a S_II	34
5.2	Tabulka jednotlivých parametrů cívky B_I a B_II	34
7.1	Vliv vzdálenosti na napěťový útlum bezdrátového přenosu, měřeno při frekvenci 13,56 MHz a 13,16 MHz a simulováno při frekvenci 13,56 MHz.	40
7.2	Vliv posunu jedné z cívek konfigurace od středu doprava na napěťový útlum bezdrátového přenosu, měřeno při frekvenci 13,56 MHz a 13,16 MHz, simulováno při frekvenci 13,56 MHz a vzdálenosti 2 cm.	44
7.3	Vliv posunu jedné z cívek konfigurace od středu doleva na napěťový útlum bezdrátového přenosu, měřeno při frekvenci 13,56 MHz a 13,16 MHz, simulováno při frekvenci 13,56MHz a vzdálenosti 2 cm.	45
7.4	Napěťový útlumu v závislosti na úhlu natočení cívek, měřeno při frekvenci 13,56 MHz a 13,16 MHz, simulováno při frekvenci 13,56MHz.	49
7.5	Vliv různých materiálů na napěťový útlum bezdrátového přenosu, měřeno při frekvenci 13,56 MHz, 13,16 MHz, simulováno při frekvenci 13,56 MHz a vzdálenosti 2 cm.	52
A.1	Seznam součástí cívky S_I při konfiguraci S_I-S_II, 1 : 1	77
A.2	Seznam součástí cívky B_I při konfiguraci B_I-B_II, 1 : 1	77
A.3	Seznam součástí cívky S_II při konfiguraci S_II-B_I, 3 : 2	78
A.4	Seznam součástí cívky B_I při konfiguraci S_II-B_I, 3 : 2	78
A.5	Seznam součástí cívky S_I při konfiguraci S_I-S_II, 1 : 1, laditelná verze	79

ÚVOD

Cílem bakalářské práce je seznámit se s principem bezdrátového přenosu energie pomocí induktivní vazby. Tento způsob přenosu energie je realizován pomocí dvou vázaných cívek na určitém kmitočtu. Efektivita přenosu se posuzuje podle činitele vazby k , s rostoucím činitelem se zvyšuje velikost přenesené energie. V dnešní době se zmíněného typu přenosu energie využívá například při nabíjení telefonů a automobilů. Své uplatnění, metoda bezdrátového přenosu, našla i ve zdravotnictví, kde se využívá například pro nabíjení baterií kardiostimulátorů.

Dalším cílem je navrhnout dvojici vázaných cívek, pomocí kterých bude možné zmíněný přenos, prostřednictvím induktivní vazby, realizovat a to na vhodné frekvenci. Řešením návrhu planárních cívek se zabývá kapitola 2, popisující návrh Wheelerovou metodou. V kapitole 3.2 je následně tato metoda využita pro návrh konkrétních planárních cívek použitých při simulacích.

Referenční hodnotou pracovního kmitočtu pro přenos bylo při návrhu zvoleno 13,56 MHz, jež spadá do pásma ISM [1].

Vhodným simulačním nástrojem pro návrh a optimalizaci systému dvou vázaných cívek byl zvolen 3D simulátor elektromagnetického pole CST Microwave Studio v kombinaci s programem CST Design Studiem.

Podrobnému popisu využití těchto dvou nástrojů, od nastavení návrhu simulace až po konkrétní výsledky, je věnována kapitola 4. Následující kapitoly jsou pak věnovány realizaci cívek 5, měření 6 a výsledkům měření a simulací 7.

1 BEZDRÁTOVÝ PŘENOS ENERGIE

1.1 Druhy přenosu

Bezdrátový přenos energie (WPT) od zdroje ke spotřebiči se dá realizovat vícero způsoby. Na základě vzdálenosti mezi zdrojem a spotřebičem, respektive na vzdálenosti přijímače od vysílače elektromagnetického pole, se tyto přenosy dělí na oblast blízkou¹, zde je přijímač ovlivňován chováním pole, a oblast vzdálenou², kde je přijímač ovlivněn vyzařováním tohoto pole [2]. Následující text se zabývá pouze přenosem v okolí blízkém prostřednictvím induktivní vazby. Další variantou přenosu na krátké vzdálenosti je vazba kapacitní.

1.2 Induktivní vazba

Jedním ze způsobů bezdrátového přenosu energie je elektromagnetická induktivní vazba. Pro zajištění zmíněné metody přenosu je nutné opatřit zdroj „vysílačem“ a vzdálený obvod vybavit „přijímačem“, jenž má být tímto zdrojem napájen. Vysílací obvod se skládá z oscilátoru, sloužícího k přeměně frekvence zdrojové energie, přizpůsobovacího obvodu a vysílacího prvku, kterým je v tomto případě cívka. Přijímací obvod začíná přijímacím prvkem, cívkou, a za ním následuje přizpůsobovací obvod a obvody sloužící k úpravě energie do tvaru, vhodného pro napájení vzdáleného spotřebiče [3].

Přenos energie realizovaný pomocí elektromagnetické induktivní vazby je použitelný pouze na krátké vzdálenosti, důvodem je jeho fyzikální podstata.

1.3 Parametry induktivní vazby

Induktivní vazba se dá lehce popsat pomocí tří základních parametrů vlastní indukčnosti cívky L , vzájemné indukčnosti M a činitele vazby k .

$$M = M_{12} = M_{21} \quad [\text{H}] \quad (1.1)$$

$$k = k_{12} = k_{21} \quad [-] \quad (1.2)$$

$$M = k\sqrt{L_1L_2} \quad [\text{H}] \quad (1.3)$$

¹v anglické literatuře označováno jako near field

²v anglické literatuře označováno jako far field

Odvozením uvedených rovnic 1.1 1.2 1.3 se zabývá literatura [4]. Kvalita indukční vazby se dá hodnotit pomocí činitele vazby k , který lze vypočítat na základě upraveného vztahu 1.3.

$$k = \frac{M}{\sqrt{L_1 L_2}} \quad [-] \quad (1.4)$$

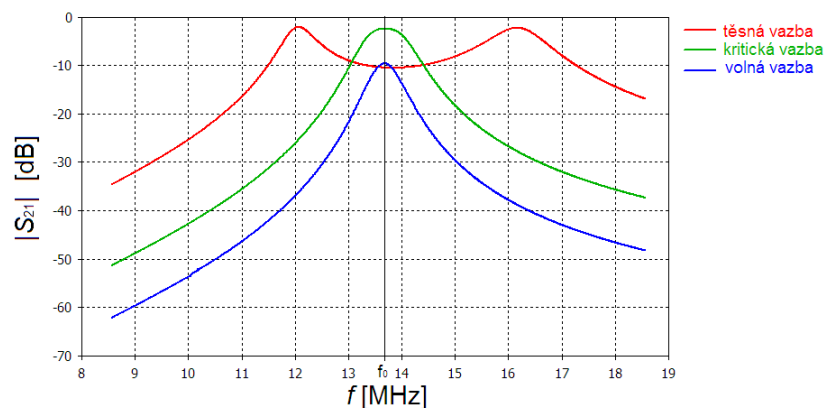
Rovnice 1.4 je potřebná pro nastavení simulace v programu CST DS a zároveň je důležitým faktorem při snaze o co nejsilnější vazbu. Příklad výpočtu pro získané parametry $L_{11} = 360,20$ nH, což je vlastní indukčnost cívky získaná simulací a protože je vysílací i přijímací cívka totožná stačí tuto hodnotu dosadit za L_1 i L_2 . Dalším získaným parametrem je vlastní indukčnost $L_{12} = 51,05$ nH.

$$k = \frac{M}{\sqrt{L_{11} L_{22}}} = \frac{51,05 \cdot 10^{-9}}{\sqrt{360,20 \cdot 10^{-9} \cdot 360,20 \cdot 10^{-9}}} = 0,14 \quad [-] \quad (1.5)$$

Činitel vazby může být u odstíněných cívek nulový, $k = 0$ (žádná vazba), až do případu nejvyšší možné vazby $k = 1$. Činitel vazby $k = 0,14$ uvedený v rovnici 1.5 nabývá hodnoty v rozmezí od 0,05 do 0,9 posuzovaném jako těsná vazba, v terminologii uvedené v použité literatuře [5].

1.3.1 Druhy vazeb u vázaných rezonančních obvodů

Při sledování chování indukční vazby v závislosti na velikosti vzduchové mezery, respektive na vzdálenosti mezi cívkami je možné pozorovat změnu vazby. V případě kritické a volné vazby dochází k přenosu energie širším pásmem v okolí rezonančního kmitočtu, při volné vazbě dochází k zúžení přenosového pásma a k zvětšení útlumu přenosu. V případě těsné vazby dochází k rozdvojení vrcholů a s každým přiblížením cívek se oba tyto vrcholy posunují dál od rezonančního kmitočtu (viz Obr.1.1) [6].



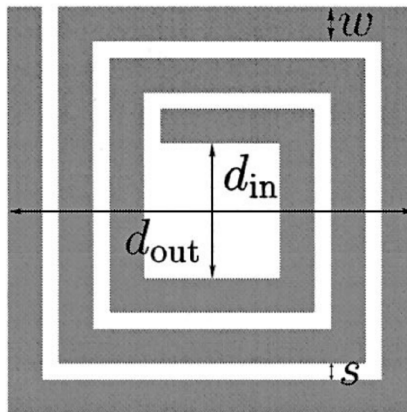
Obr. 1.1: Druhy vazeb

2 PLANÁRNÍ CÍVKY

Pro přenos bezdrátové energie jsou v této práci využity planární cívky, vhodné zejména z důvodu jejich malých rozměrů. Planární cívka se obvykle skládá z velmi tenké vrstvy vodivého materiálu (v řádu μm) a substrátu. Vrstva vodivého materiálu se upravuje, pomocí metod pro výrobu desek plošných spojů (DPS), do geometrického tvaru definujícího konkrétní parametry cívky. Substrát, naněmž je tento motiv připevněn, slouží jako opora vodivé vrstvy.

2.1 Wheelerova metoda

Pro návrh konkrétních parametrů planárních cívek existuje řada metod jednou z nich je i Wheelerova metoda. Na obrázku 2.1 je zobrazena spirála se závitů ve tvaru čtverce a popisem jednotlivých rozměrů ovlivňujících výslednou indukčnost cívky.



Obr. 2.1: Čtvercová spirálová cívka se zakátovanými rozměry [7]

Tab. 2.1: Koeficienty pro modifikovaný Wheelerův výraz

Tvar spirály	K_1	K_2
Čtyřhranná	2,34	2,75
Šestihranná	2,33	3,82
Osmihranná	2,25	3,55

Planární cívky se vyrábí a navrhují v různých rozměrech a tvarech. Pro jednotlivé tvary cívek jsou definovány výpočetní koeficienty. Níže je uvedena tabulka koeficientů pro návrh planárních cívek Wheelerovou metodou.

$$L_{\text{mw}} = K_1 \mu_0 \frac{N^2 d_{\text{avg}}}{1 + K_2 \rho} \quad [\text{H}] \quad (2.1)$$

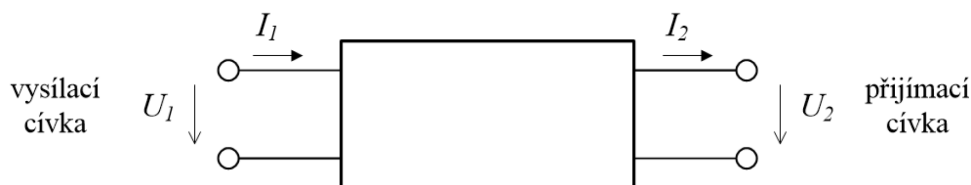
Pro výpočet L_{mw} , indukčnosti cívky pomocí Wheelerovy metody, slouží vztah 2.1 [7], kde:

- N je počet závitů,
- μ_0 je permeabilita vakua ($\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ [Hm}^{-1}\text{)]}$ [4],
- střední hodnota průměrů d_{avg} , určena z vnějšího průměru d_{out} a vnitřního průměru cívky d_{in} , je definována pomocí vztahu $d_{\text{avg}} = 0,5(d_{\text{out}} + d_{\text{in}})$,
- poměr výplně ρ je definován jako $\rho = \frac{d_{\text{out}} - d_{\text{in}}}{d_{\text{out}} + d_{\text{in}}}$,
- K_1, K_2 jsou tvarem určené koeficienty, uvedené v tabulce 2.1.

3 NÁVRH PLANÁRNÍCH CÍVEK

3.1 Specifikace přenosu

Bezdrátový přenos energie funguje na vyšších frekvencích, v tomto textu je snaha o realizaci přenosu energie na kmitočtu 13,56 MHz, která spadá do frekvenčního pásma ISM, určeného krom jiného pro nekomunikační využití pro průmyslové, vědecké a lékařské účely [1], a konkrétně frekvence 13,56 MHz je dnes často využívána pro RFID ¹. Bezdrátový přenos energie se dá analyzovat pomocí dvojbranu, vstupní brána je tvořena vysílací cívku a výstupní brána cívku přijímací.



Obr. 3.1: Popis přenosu pomocí dvojbranu

Existuje několik metod pro charakteristiku obvodů a jejich principem jsou vhodné buď pro řešení obvodů pracujících na nízkých kmitočtech, zde je vhodnou metodou například popis pomocí Z-parametrů, pro vyšší kmitočty se využívá popisů S-parametrů. Metodou sledování S-parametrů se provádí analýza obvodů navrhovaných v 3D simulátoru elektromagnetických polí CST, ale zároveň se této metody dá využít i při měření obvodů klasickou metodou. Princip zkoumání obvodů pomocí S-parametrů je založen na souvislostech mezi zdrojovou vlnou, vybuzenou na vstupu, odraženou vlnou, vlnou která se vrátí zpět ke zdroji, a postupnou vlnou, která projde do druhé brány.

Pro zkoumání obvodu při nízkých frekvencích se využívá Z-parametrů. Existuje vztah který umožňuje převod mezi S-parametry a Z-parametry. Při používání 3D simulátoru elektromagnetického pole jsou výsledky a výpočty prováděny pomocí Sparametrů. CST MWS umožňuje v rámci zpracování výsledků převést převedení S-parametrů na Z-parametry a na základě nich dopočítá hodnoty obvodových prvků mezi vybranými porty. Při využití tohoto nástroje je nutné vědět, kde se která veličina nachází. V následujícím textu bude hlavně sledována vlastní indukčnost cívek, tu je možné poznat dle shodného číselného indexu a vzájemná indukčnost, která má indexy odlišné.

¹RFID-identifikace na rádiové frekvenci [8]

Vztahy využívané pro převod S-parametrů na Z-parametry jsou uvedeny soustavou rovnic 3.1, podrobnosti jsou uvedeny v [9].

$$\begin{aligned}
 z_{11} &= Z_0 \frac{(1+s_{11})(1-s_{22})+s_{12}s_{21}}{(1-s_{11})(1-s_{22})-s_{12}s_{21}} \\
 z_{12} &= Z_0 \frac{2s_{12}}{(1-s_{11})(1-s_{22})-s_{12}s_{21}} \\
 z_{21} &= Z_0 \frac{2s_{21}}{(1-s_{11})(1-s_{22})-s_{12}s_{21}} \\
 z_{22} &= Z_0 \frac{(1-s_{11})(1+s_{22})+s_{12}s_{21}}{(1-s_{11})(1-s_{22})-s_{12}s_{21}}
 \end{aligned} \tag{3.1}$$

3.2 Výpočet planárních cívek

Návrh planárních cívek je založen na zmíněné Wheelerově metodě. Při volbě rozměrů geometrických parametrů cívek je nutné hledat kompromis mezi reálnými možnostmi výroby a maximální možnou minimalizací cívky. Na základě splnění tohoto kritéria na vyrobitelnost byly zvoleny parametry cívky uvedené v tabulce 3.1 Uvedené rozměry splňují požadavky dílny uvedené v dokumentu [10].

Tab. 3.1: Tabulka jednotlivých parametrů cívky

parametr	rozměr	jednotka
d_{out}	22,00	mm
d_{in}	16,00	mm
w	0,60	mm
s	0,60	mm
h_w	15,00	μm
h_{sub}	1,49	mm
N	3	počet závitů

V tabulce 3.1 jsou uvedeny parametry navrhnuté cívky, potřebné k výpočtu její indukčnosti pomocí Wheelerovy metody. Stejná cívka bude následně realizována pomocí 3D simulace elektromagnetického pole, z tohoto důvodu je zde i uvedena hodnota h_w popisující výšku vodivého materiálu a parametr h_{sub} , udávající výšku použitého substrátu. Tyto údaje jsou zvoleny na základě mikrometrem změřených hodnot použitého materiálu vybraného pro konečnou realizaci.

Pomocí rovnice 3.2 byla stanovena střední hodnota průměru cívky d_{avg} . Hodnota výplňového poměru ρ je vyjádřena rovnicí 3.3.

$$d_{\text{avg}} = 0,5(d_{\text{out}} + d_{\text{in}}) = 0,5(22 \cdot 10^{-3} + 16 \cdot 10^{-3}) = 19 \text{ mm} \quad (3.2)$$

$$\rho = \frac{d_{\text{out}} - d_{\text{in}}}{d_{\text{out}} + d_{\text{in}}} = \frac{22 \cdot 10^{-3} - 16 \cdot 10^{-3}}{22 \cdot 10^{-3} + 16 \cdot 10^{-3}} \approx 0,1579 \quad [-] \quad (3.3)$$

Navrhovaná cívka má čtyřhranný tvar závitů, tato informace je důležitá pro správné stanovení koeficientů $K_1=2,34$ a $K_2=2,75$ uvedených v tabulce 2.1. Nyní jsou známy všechny potřebné informace pro využití Wheelerovy metody pro stanovení indukčnosti navrhované cívky.

$$L_{\text{mw}} = K_1 \mu_0 \frac{N^2 d_{\text{avg}}}{1 + K_2 \rho} = 2,34 \cdot 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \frac{3^2 \cdot 19 \cdot 10^{-3}}{1 + 2,75 \cdot 0,1579} \approx 350,60 \text{ nH} \quad (3.4)$$

Výsledná hodnota indukčnosti cívky, zjištěná pomocí Wheelerovy metody je přibližně $L_{\text{mw}} \approx 350,60 \text{ nH}$.

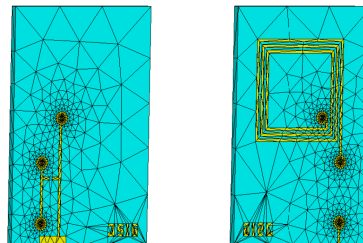
4 SIMULACE POMOCÍ 3D SIMULÁTORU ELEKTROMAGNETICKÉHO POLE

Elektromagnetická pole se dají popsat pomocí složitých matematických a fyzikálních rovnic, na základě nich vznikla celá řada výpočetních algoritmů, které dnes ulehčují a zrychlují práci při návrhu řešení zadaných problémů. Následující text se zabývá modelovou realizací bezdrátového přenosu energie pomocí simulačních programů CST DS (CST Design Studio) a CST MWS (CST Microwave Studio) od společnosti CST¹.

4.1 Nastavení simulace

Správné nastavení simulace zpřesňuje výsledky a může i výrazně zkrátit dobu výpočtů. Před návrhem je nutné si uvědomit v jakém frekvenčním pásmu se budou sledované hodnoty vyskytovat. V případě, že je navrhován přenos bezdrátové energie na frekvenci 13,56 MHz je vhodné pozorovat co se děje na kmitočtech blízkých této frekvenci. Pro tento konkrétní návrh bylo sledované frekvenční pásmo zvoleno v rozsahu od 7 MHz do 21 MHz.

Dalším důležitým bodem nastavení simulace je typ prostředí, v tomto případě vzduch, a rozměr sledovaného okolí, které se váže na velikost zkoumaného objektu a jeho schopnosti ovlivňování okolního prostředí. Zkoumaným objektem interakce mezi přijímací a vysílací cívkou. Z teoretického úvodu je známo, že vzniklá induktivní vazba se bude projevovat v blízkém okolí. Rozměr zkoumaného prostředí exponenciálně prodlužuje délku trvání matematických výpočtů, ale zároveň ovlivňuje simulované výsledky, proto je potřeba najít vhodný kompromis jehož výsledkem bude co nejkratší potřebná doba pro výpočet a s minimální odchylkou výsledků od skutečné situace.



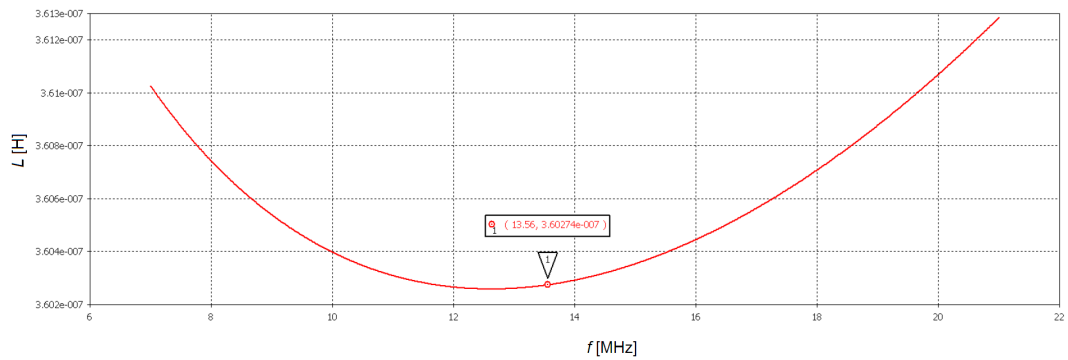
Obr. 4.1: Tetrahedronová síť planární cívky

¹CST-Computer Simulation technology

Délka trvání a přesnost výpočtů se dá taky ovlivnit nastavením výpočetní sítě modelu. Zde byla na model aplikovaná tetrahedrální síť 4.1. Tento druh sítě rozdělí nejprve povrch objektu na jednotlivé buňky a ty následně zjednoduší na systém několika spojnic. V místech, kde se tvary mění je spojnic potřebných pro popis více, pro neměně plochy jejich potřeba méně. Tyto spojnice jsou nazývány tetrahedrony a jejich počet se mění v závislosti na počtu buněk a počtu tetrahedronových spojnic v jedné buňce. Počet buněk byl v tomto případě nastaven automaticky a počet spojnicových bodů, spojovaných tetrahedrony, v jedné buňce pro byl nastaven na 10. Celkový model simulace byl následně popsán pomocí 39474 tetrahedronů. Toto nastavení umožnilo provádět simulace v rychlejším čase, dále se pomocí tohoto nastavení dá dosáhnout přesnějších výsledků, ale to v závislosti na čase. Ještě než se pustí výpočetní algoritmus je nutné ošetřit přijímací a vysílací cívku porty. V reálném světě bude vysílací i přijímací cívka zakončena SMA konektorem o impedanci 50Ω . Porty jsou umístěny na vstupech cívek a je nutné aby byla spojnice diskretního portu rovná a neprocházela vodivými materiály. Polarizace portu je řešena směrem ven z vazby a impedance portu je nastavena na 50Ω . CST MWS nabízí několik možností řešení. Nejvhodnějším nástrojem pro zkoumání induktivní vazby je "Frequency Domain Solver", jež nabízí řešení ve frekvenční oblasti. Tento nástroj je vhodný pro zkoumání silných rezonančních vazeb, vyznačují se dlouhým nastavovacím časem při řešení v časové oblasti. Každý frekvenční vzorek znamená sestavení a vyřešení jedné rovnice, zde je vidět určitá časová lineárně rostoucí závislost na počtu vzorků a pro zrychlení výpočtu jsou aplikovány další speciální metody řešící výpočty následujících frekvencí. Další výhodou frekvenčního módu je možnost dodatečného výpočtu sledovaných elektrických a magnetických polí při jiných frekvencích, bez nutnosti kompletního přepočtu celé struktury modelu. Výpočetní algoritmy zvoleného 3D simulátoru elektromagnetických polí jsou založeny na počítání S-parametrů a umožňují jejich převod Z-parametrů z nichž se dají určit konkrétní hodnoty obvodových prvků případně některých parazitních vlastností, pro tyto účely je vhodné využít nástroje CST DS.

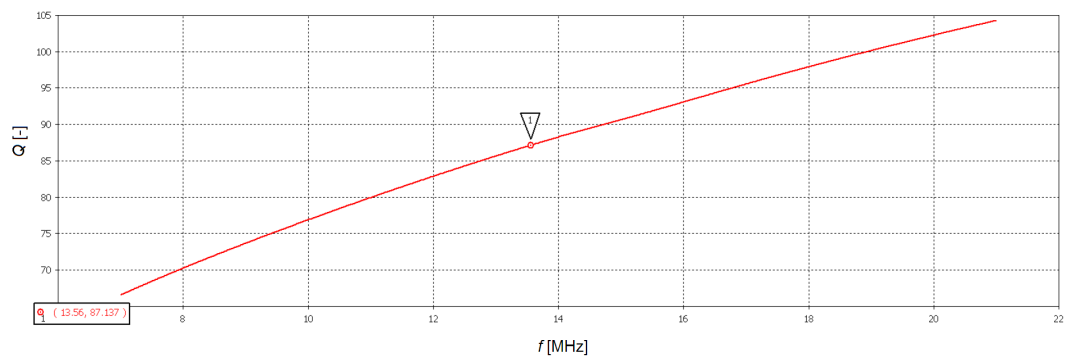
4.2 Výsledky simulací s popsáním postupem

V programu CST MWS byly vytvořeny dvě shodné planární cívky s parametry uvedenými v tabulce 3.1. Na obrázku 4.2 je vykreslen průběh vlastní indukčnosti cívky v závislosti na frekvenci, vypočítané na základě S-parametrů speciálním algoritmem pro analýzu cívek. Velikost vlastní indukčnosti L se v uvedeném pásmu od 7 do 21 MHz pohybuje v rozmezí od cca 360,02 nH do cca 361,30 nH, konkrétně na kmitočtu 13,56 MHz má tato indukčnost hodnotu 360,27 nH. Pro srovnání vypočítaná hodnota vlastní indukčnosti cívky Wheelerovou metodou byla přibližně 350,60 nH.

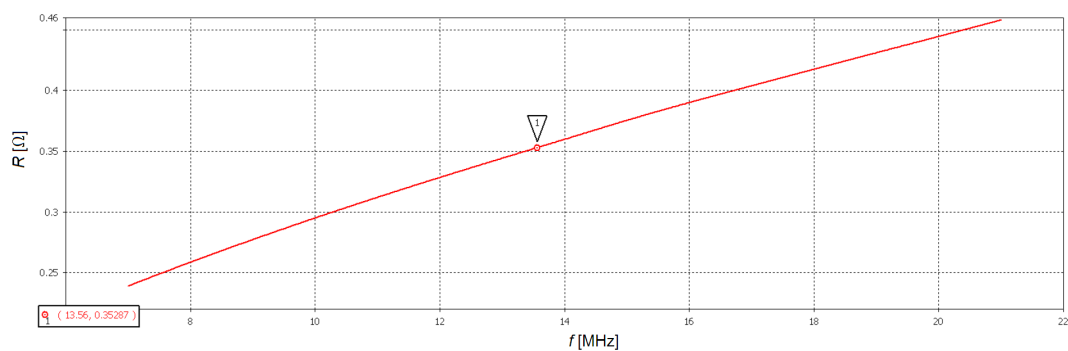


Obr. 4.2: Graf závislosti velikosti vlastní indukčnosti cívky L na frekvenci

Dále se touto metodou dá vypočítat činitel jakosti cívky Q (viz Obr. 4.3) a parazitní odpor cívky R_p (viz Obr. 4.4).



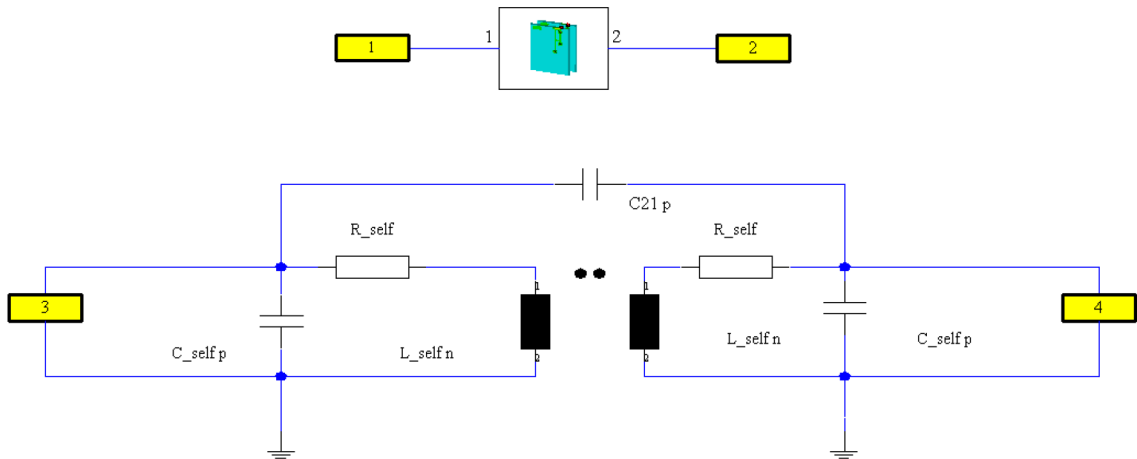
Obr. 4.3: Graf závislosti velikosti činitele jakosti Q na frekvenci



Obr. 4.4: Graf závislosti velikosti parazitního odporu R_p na frekvenci

4.2.1 Tvorba ekvivalentního obvodu

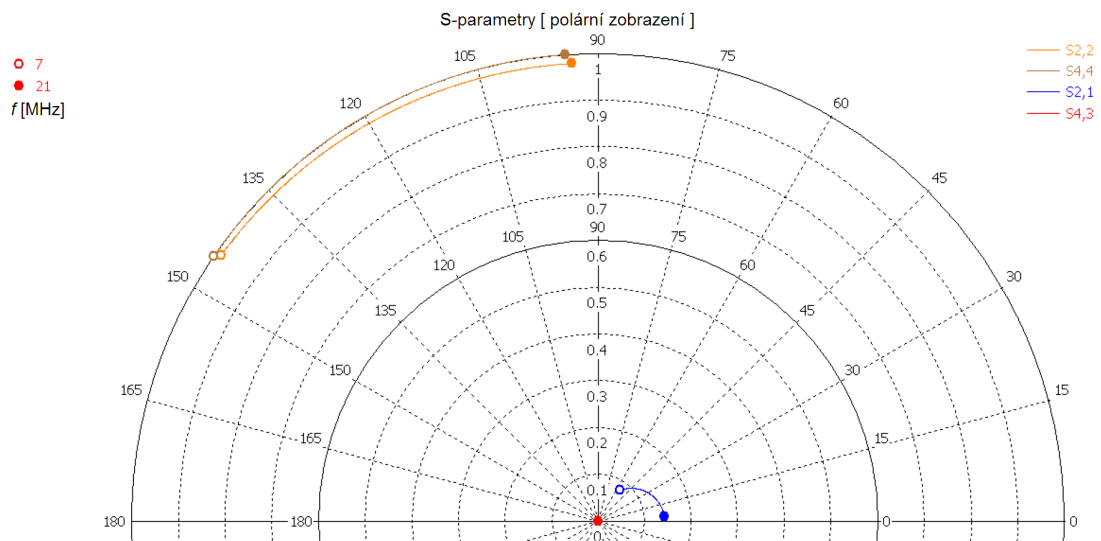
V programu CST DS se dá navrhnout ekvivalentní obvod realizovaný v programu CST MWS a provádět na něm výpočty na základě údajů zjištěných 3D simulací. Touto metodou se dají například dopočítat teoretické parazitní vlastnosti cívky i parazitní kapacitu induktivní vazby, či rychleji dopočítat změnu parametrů v závislosti na přidání nových komponent do obvodu. Níže uvedené hodnoty indukčností, jak vlastní tak vzájemné, jsou získány na základě vypočítaných S-parametrů převedených do Z-parametrů pomocí programu CST MWS. Uvedená vlastní indukčnost L v následující tabulce 4.1 se z tohoto důvodu i nepatrně liší od hodnoty uvedené v grafu na obrázku 4.2, kde je použitý jiný algoritmus, určený přímo pro analýzu cívek.



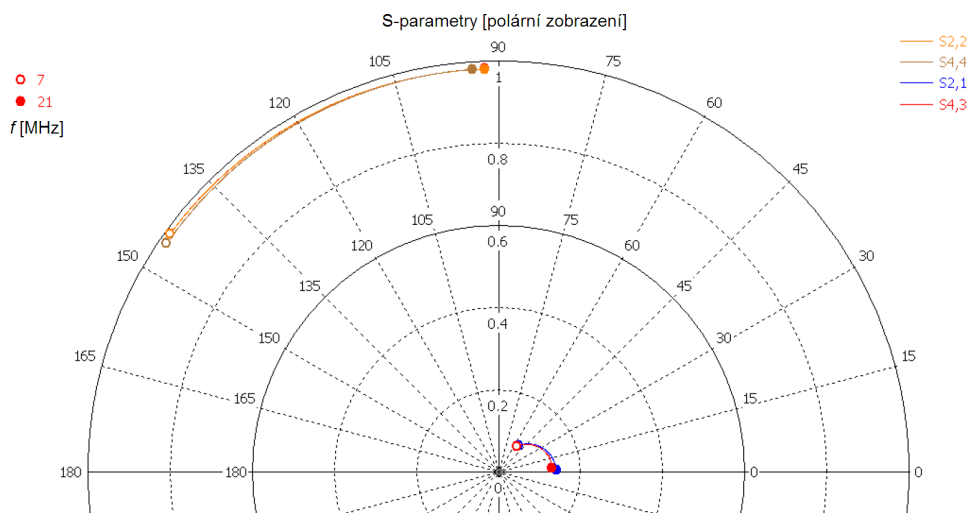
Obr. 4.5: Zapojení ekvivalentního obvodu cívky

Na obrázku 4.5 jsou zobrazeny dva obvody. Vrchní obvod s porty 1 a 2 je postaven na základě informací z 3D simulace. Spodní schéma označené porty 3 a 4 je ekvivalentním obvodem pro 3D simulaci. Na obrázku 4.6 jsou polárně zobrazeny S-parametry obvodu z 3D simulace a ekvivalentního obvodu, kde je známa pouze vlastní indukčnost cívky L_{self} a vzájemná indukčnost M , uvedené hodnoty byly odečteny pro kmitočet 13,56 MHz z informací získaných 3D simulací. Poslední informací pro ekvivalentní obvod je dopočítaný činitel vazby k , pomocí vztahu 1.5, kde se v tomto případě $L_1 = L_2 = L_{self}$. Hodnoty parametrů L_{self} , M , k slouží jako inicializační podmínky pro následnou optimalizaci.

Cílem optimalizace je překrýt křivky S-parametrů S_{22} a S_{21} , křivkami S-parametrů S_{44} a S_{43} . Ostatní S-parametry nejsou v obrázku uvedeny, jelikož jsou shodné s uvedenými. Na obrázku 4.7 je uveden konečný stav po optimalizaci.



Obr. 4.6: S-parametry před optimalizací



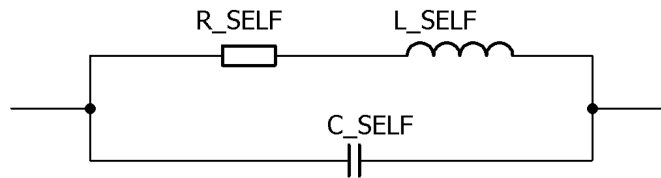
Obr. 4.7: S-parametry po optimalizaci

Tabulka 4.1 obsahuje kompletní údaje před a po optimalizaci. Pro získání přesnějších výsledků je dobré optimalizaci povolit změnu parametrů L_{self} , M a k .

Tab. 4.1: Parametry cívky před a po optimalizaci

veličina	bez optimalizace	po optimalizaci	jednotka
M	50,991	48,537	nH
L_{self}	360,297	351,354	nH
k	0,142	0,138	–
R_{self}	0	0,437	Ω
C_p	0	0,867	pF
C_{21}	0	1,567	pF

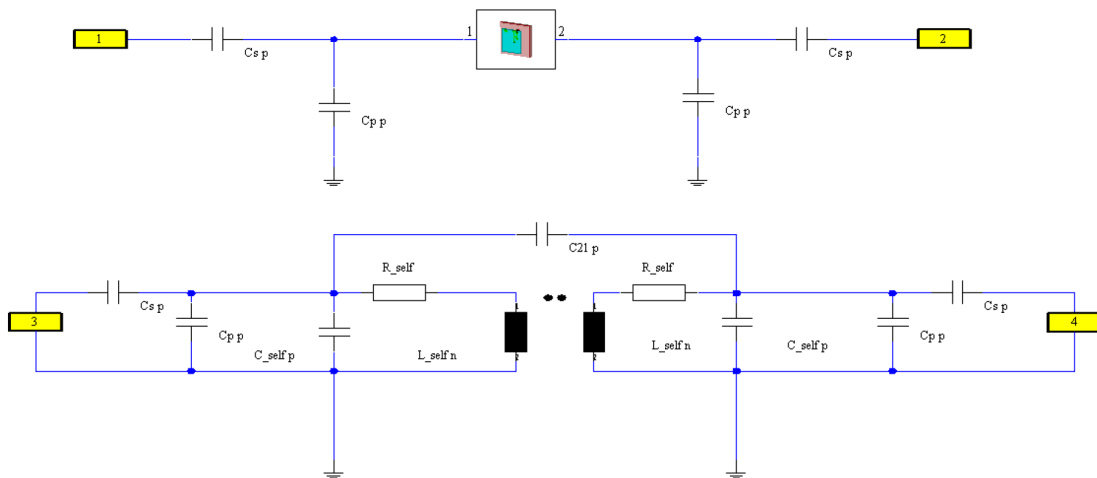
Z tabulky 4.1 se dá doplnit popis zjednodušeného náhradního obvodu cívky uvedeného na obrázku 4.8.



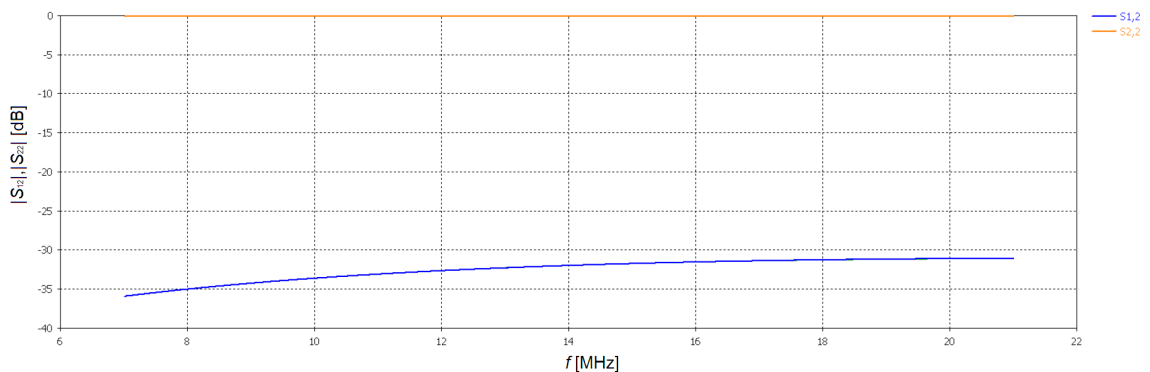
Obr. 4.8: Zjednodušené náhradní schéma cívky

S přesností výsledků dosažených optimalizací při návrhu ekvivalentního obvodu, nejlépe když se S-parametry portů 1 a 2 rovnají S-parametrům portů 3 a 4, roste i přesnost dalších výsledků, počítaných pomocí tohoto obvodu. Dalším krokem je přizpůsobení obvodu pomocí dvou kondenzátorů a C_p . Velikost těchto kondenzátorů se zjistí pomocí optimalizace, kde se postupně nastavují přísnější kritéria pro získání co největšího útlumu vstupního parametru S_{11} a co nejmenšího útlumu přenosového parametru S_{21} , charakterizujícího přenos ze vstupu na výstup. Výstup je charakterizován S-parametrem S_{22} . Zmiňovaná minima a maxima se pomocí optimalizací (hledáním nejvhodnější kombinace velikostí C_s a C_p) maximalizovat na konkrétním kmitočtu, v tomto případě 13.56 MHz. Zde je důležité zmínit, že se změnou vzdálenosti cívek, případně vložením materiálu mezi cívky, se posune i pracovní frekvence, a proto je nutné při takové změně, případně provést novou optimalizaci, to jest nalézt znovu nejvhodnější velikosti kapacit C_s a C_p . Na obrázku 4.9 jsou realizována zapojení s přizpůsobovacími kapacitami v programu CST DS. Jelikož provedená optimalizace pro nalezení ekvivalentního obvodu měla při zde prezentovaném složitějším modelu drobné odchylky, které se pak projevovaly v dalších výpočtech, byly

finální výpočty pro větší přesnost prováděny přímo na základě modelu. Zapojení přidaných kondenzátorů C_s a C_p k modelu je zobrazeno na výše zmíněném obrázku 4.9.



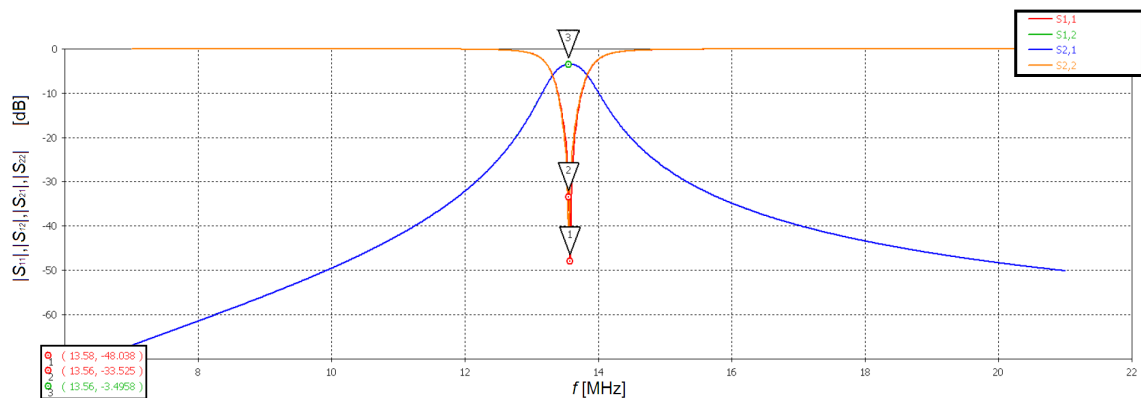
Obr. 4.9: Zapojení ekvivalentního obvodu cívky s přizpůsobovacími kapacitami C_s a C_p



Obr. 4.10: Závislost rozptylových parametrů na frekvenci, vyjádřená v dB; bez přizpůsobení

Nyní je možné provést porovnání mezi obvodem bez přizpůsobení viz Obr.4.10, kdy není realizována silná přenosová vazba, a obvodem s přizpůsobením Obr. 4.11, kde je silná přenosová vazba na kmitočtu 13,56 MHz o něco silnější vazba je pak viditelná na kmitočtu 13,58 MHz. Posunout sílu vazby na frekvenci 13,56 MHz by se dalo zpřísněním kritérií optimalizace. Tato drobná odchylka je zanedbatelná ve srovnání

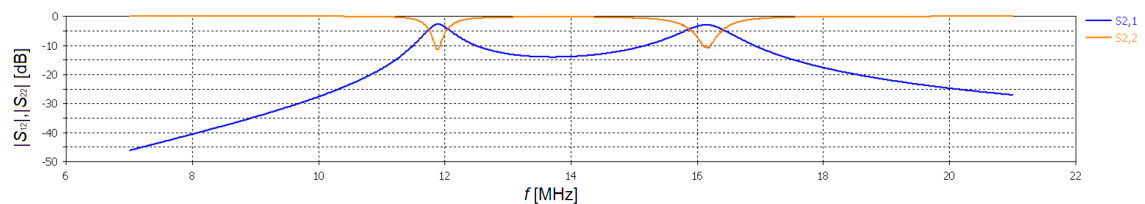
s reálnou možnou odchylkou způsobenou tolerancí použitých součástek. Jemné dolazení kmitočtu může být závislé na změně hodnot použitých kapacit v řádu menších 0,1 pF.



Obr. 4.11: Závislost rozptylových parametrů na frekvenci, vyjádřená v dB; s přizpůsobením

4.3 Výsledky simulací

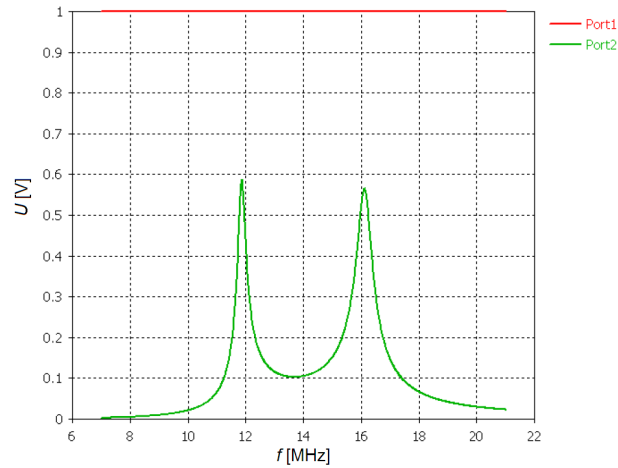
Následující podkapitola je věnována prezentaci dosažených výsledků simulací, na detailním modelu vázaných cívek, jejichž návrh byl popsán v kapitole 3.2. Pro všechny uvedené záznamy simulací byla nastavená hodnota přizpůsobovacích kapacit $C_s = 53,43$ pF, $C_p = 330,39$ pF, navržených pro přenos energie na vzdálenost 25 mm. Velikost amplitudy buzeného napětí na portu 1 je jeden volt v celém sledovaném frekvenčním rozsahu a na portu 2 jsou hodnoty přeneseného napětí z portu 1.



Obr. 4.12: Závislost rozptylových parametrů na frekvenci, vyjádřená v dB; vazba bez překážky

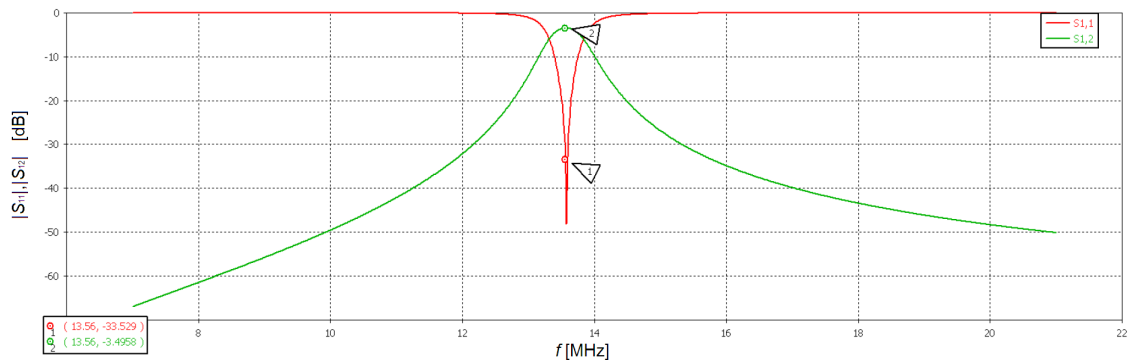
Na obrázku 4.12 jsou zaznamenány rozptylové parametry při přenosu na vzdálenost 5 mm. Při pohledu na průběh zmíněných S-parametry se dá usoudit že se jedná o

vazbu těsnou způsobenou malou vzdáleností mezi cívkami. Dále je možné pozorovat velkou odchylku přenosových frekvencí od jedné referenční frekvence 13,56 MHz na na dvě frekvence, první přibližně 12 MHz a druhá okolo 16 MHz. Obr. 4.13 následně demonstruje velikost přeneseného napětí v závislosti na frekvenci. Hodnota tohoto napětí se pohybuje pod hranicí 0,6 V, pro připomenutí amplituda budícího napětí je 1 V. Také je zde dobře vidět souvislost projevů vazby S-parametrů a velikostí přeneseného napětí. Uvedené výsledky jsou při volném přenosovém prostoru.



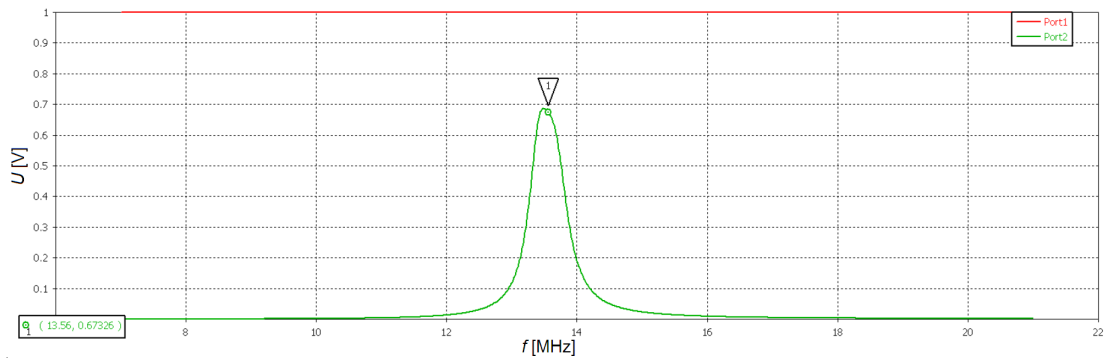
Obr. 4.13: Závislost velikosti napětí na frekvenci; vazba bez překážky

Následující uvedené údaje sledují induktivní vazbu na větší vzdálenost, konkrétně na 26 mm. Na obrázku 4.14 je provedená simulace při stejných podmínkách avšak vzdálenost se zvětšila o 20 mm. Přenos energie je teď realizován na kmitočtu 13,56 MHz a jeho blízkého okolí.



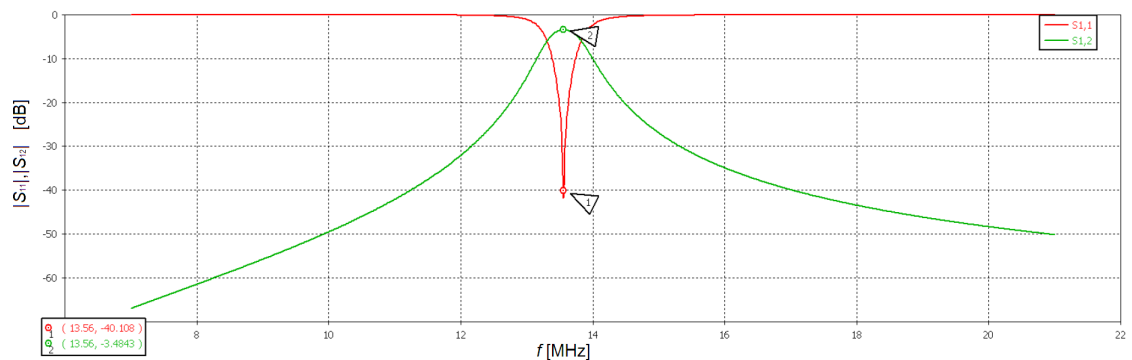
Obr. 4.14: Závislost rozptylových parametrů na frekvenci, vyjádřená v dB; po přizpůsobení

Na Obr.4.15 je znázorněna velikost přeneseného napětí, která v porovnání s předchozím záznamem vzrostla na hodnotu 673,3 mV na kmitočtu 13,56 MHz.



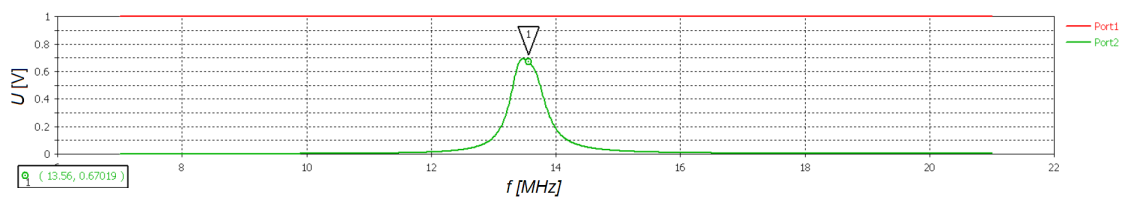
Obr. 4.15: Závislosti velikosti napětí na frekvenci; vazba bez překážky

Další simulace jsou věnovány zkoumání vlivu vložených předmětů na vazbu cívek. Pro tyto účely byl do vzdálenosti 10,5 mm vložen vymodelovaný kvádr s tloušťkou 4 mm a s větším rozměrem než je plocha cívky (viz Obr. 4.20). V prvním případě byly vlastnosti tohoto materiálu shodné s vlastnostmi kostí. V grafické závislosti S-parametrů na frekvenci Obr.4.16 stojí za povšimnutí zvýšení útlumu S_{11} z hodnoty -33,53 dB na hodnotu -40,11 dB (při frekvenci 13,56 MHz). Velikost přenesené energie, je ale závislá i na parametru S_{12} . Proto je výsledná hodnota přeneseného napětí (viz Obr.4.16), o hodnotě 670,2 mV, menší než při přenosu volným prostředím.

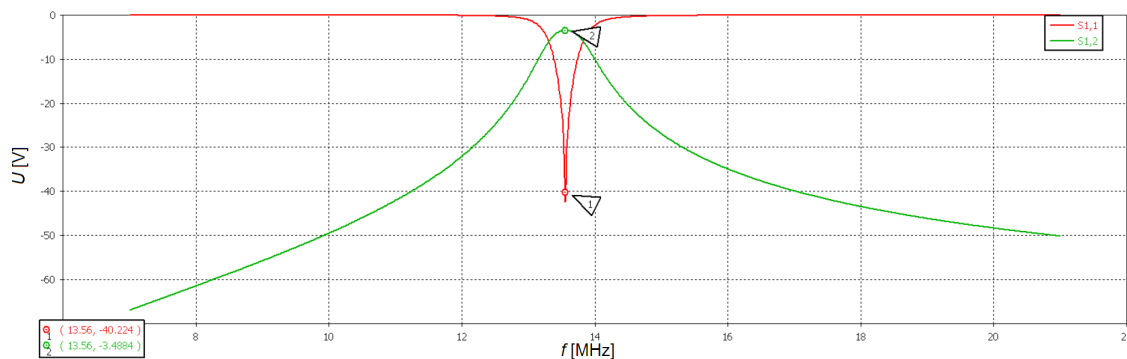


Obr. 4.16: Závislost rozptylových parametrů na frekvenci, vyjádřená v dB; pro přenos přes kost

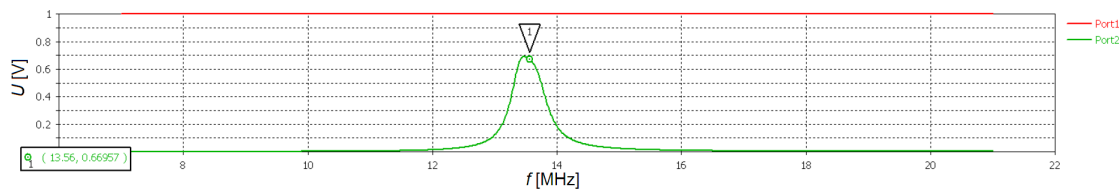
Další výsledky jsou při stejných podmínkách pouze byla provedena změna materiálu překážky z kosti na kůži. Výsledky jsou dost podobné hodnotám uvedených pro



Obr. 4.17: Závislost velikosti přeneseného napětí na frekvenci, při přenosu přes kost



Obr. 4.18: Závislost rozptylových parametrů na frekvenci, vyjádřená v dB; pro přenos přes kůži

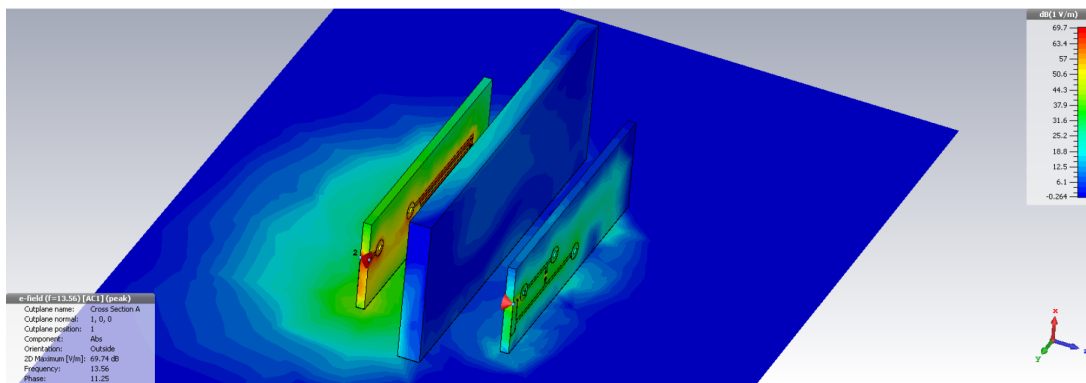


Obr. 4.19: Závislost velikosti přeneseného napětí na frekvenci; při přenosu přes kůži

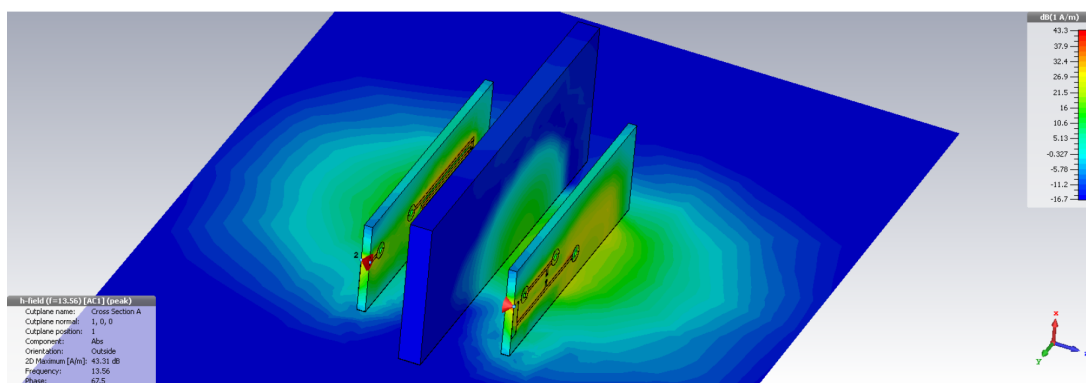
materiál simulující kost. Hodnota přeneseného napětí 4.19 na frekvenci 13,56 MHz je 669,6 mV, což je nižší hodnota než u kosti.

V rámci této kapitoly byla zmínka o podmínce nastavení výpočetního prostoru na obrázcích 4.20 a 4.21 je dobře vidět nejen interakce dvou cívek, ale i vyzářování jednotlivých polí do okolí². Pokud je zvoleno okolí simulace příliš malé, začne docházet k odrazům a ty pak zkreslují výsledky. Tyto obrázky demonstrují vhodně zvolenou velikost okolí.

²Modrá pomocná plocha ukazuje velikost nastaveného výpočetního prostoru který má tvar krychle nebo kvádru v závislosti na nastavení



Obr. 4.20: Ukázka vyzařování elektrického pole E na frekvenci 13,56 MHz; přes vzorek kůže



Obr. 4.21: Ukázka vyzařování magnetického pole H na frekvenci 13,56 MHz; přes vzorek kůže

4.4 Shrnutí

Na základě teoretických poznatků byla vytvořena dvojice vázaných planárních cívek, prostřednictvím nichž se dá přenášet energie. Návrh těchto planárních cívek byl proveden pomocí Wheelerovy metody. Hlavní požadavky byly kladeny na minimální rozměry cívek a jejich vyrobitelnost. Následně byly porovnány výsledky vlastní indukčnosti cívky vypočítané Wheelerovou metodou $L_{mw}=350,6$ nH a cívky, stejných geometrických parametrů, vymodelované v CST MWS simulátoru 3D elektromagnetických polí. Výsledky simulací umožňují vidět i závislost vlastní indukčnosti této cívky na kmitočtu. Ve zvoleném frekvenčním rozsahu 7 až 21 MHz byla výsledná vlastní indukčnost v rozmezí od 361,3 nH do 360,2 nH. Na základě těchto výsledků se dá říci, že Wheelerova metoda je dostačující v případě hledání přibližné hodnoty vlastní indukčnosti. Kombinací programů CST MWS a CST DS byl vytvořen systém dvou vázaných cívek demonstrujících bezdrátový přenos induktivní vazbou. V

průběhu řešení byla provedena řada návrhů a simulací, v této práci jsou demonstrovány výsledky ze tří simulací, kde je proveden detailní návrh cívek odpovídající realitě. Za použití výše uvedených programů bylo navrženo přizpůsobení těchto modelů planárních cívek, kapacitory $C_s = 53$ pF, $C_p = 330$ pF optimalizovanými pro přenos na frekvenci 13,56 MHz. Pomocí přizpůsobených cívek byl simulací demonstrován bezdrátový přenos induktivní vazbou, bez překážky a s překážkou. Výsledky těchto simulací jsou důkazem, funkčně navrženého systému dvou planárních cívek umožňující bezdrátový přenos energie. Přenos energie byl demonstrován na závislosti rozptylových parametrů na frekvenci a napětovým přenosem ze vstupního portu 1, buzeného 1 V, na výstupní port 2. Velikost přeneseného napětí na portu 2 volnou vazbou byla 673,3 mV. Při vložení překážky do středu vzniklé induktivní vazby se hodnota velikosti přeneseného napětí výrazně nezměnila. Velikost přeneseného napětí přes kost byla 670,2 mV, přes kůži 669,6 mV. Všechny zmíněné přenosové pokusy byly simulovány na vzdálenost 25 mm. Podrobnému popisu simulace je věnována kapitola 4.3, kde jsou výše zmíněné výsledky komentovány. Při vývoji byla referenční hodnota frekvence přenosu zvolena 13,56 MHz, protože spadá do frekvenčního pásma ISM, určeného krom jiného pro nekomunikační využití pro průmyslové, vědecké a lékařské účely [1].

5 REALIZACE CÍVEK

V předchozích kapitolách byl uveden postup pro návrh planárních cívek a jejich přizpůsobovacích obvodů. Na základě tohoto postupu bylo vytvořeno 6 planárních cívek. Pro přehlednost byly 4 z planárních cívek pojmenovány S_I, S_II, B_I a B_II. Nepojmenované cívky jsou prvními prototypy a od cívek S_I a S_II se liší pouze velikostí substrátu a výškou měděné vrstvy viz tabulka 3.1. Jednotlivé parametry cívek S_I, S_II a cívek cívek B_I a B_II jsou uvedeny v následujících tabulkách 5.1 a 5.2. Cívky S_I a S_II respektive B_I a B_II jsou stejné jen zrcadlově převráceny. Kompletní dokumentace k výrobě, i se seznamem součástek potřebných k přizpůsobovacím obvodům jednotlivých konfigurací, je dostupná v příloze A.

Tab. 5.1: Tabulka jednotlivých parametrů cívek S_I a S_II

parametr	rozměr	jednotka
d_{out}	22	mm
d_{in}	16	mm
w	0,60	mm
s	0,60	mm
h_w	15,00	μm
h_{sub}	1,49	mm
N	3	počet závitů

Tab. 5.2: Tabulka jednotlivých parametrů cívky B_I a B_II

parametr	rozměr	jednotka
d_{out}	35,00	mm
d_{in}	32,00	mm
w	0,50	mm
s	0,50	mm
h_w	15,00	μm
h_{sub}	1,49	mm
N	2,00	počet závitů

5.1 Doplnující informace k návrhu cívek

Doplňující informace k návrhu cívek B_I a B_II. Planární cívky s průměrem vnitřního závitu 32 mm, byly navrženy na základě podobnosti indukčnosti, kdy změnou velikosti průměru vnitřního závitu, šířky mezer mezi závity a šířkou vodivé cesty, bylo dosaženo stejné indukčnosti jako při menším vnitřním průměru závitu. Velikost cívky byla volena, tak aby bylo splněno zadání a zároveň aby nebylo spotřebováno moc materiálu. Wheelerovou metodou, postupem uvedeným v kapitole 3.2, byla výsledná indukčnost cívek B_I a B_II vypočítána $L_{mw} \approx 350,83\text{nH}$. V simulaci byla pak indukčnost těchto cívek, na kmitočtu 13,56 MHz, $L \approx 416\text{nH}$.

5.2 Přizpůsobovací obvody

Na základě simulací byly stanoveny hodnoty C_s a C_p , viz Obr.4.9. Tyto kapacity byly následně složeny z kapacit reálných kondenzátorů. Je nutné si uvědomit, že kondenzátory realizující kapacitu C_p , jsou cívkou zkratovány a jejich vliv se projeví až při vyšších frekvencích. Určit indukčnost reálné planární cívky na určitém kmitočtu měřením, v tomto případě 13,56 MHz, je náročné. Běžné induktoměry měří cívky pomocí dvou až tří pevných kmitočtů. Pro zachování stejných podmínek byly přizpůsobovací obvody realizovány s kondenzátory vždy z jedné sady. Tolerance použitých kondenzátorů je 10%. Kritéria pro optimalizační algoritmy simulace byly voleny, tak aby se dosáhlo co nejmenšího útlumu přenosu na požadovaném kmitočtu 13,56 MHz. Při simulacích a hledání optimálních kapacit se výsledky lišily i při změnách kapacit C_p C_s v řádu desetin pikofaradů, což znesnadňuje realizaci. Výsledné reálné útlumy byly bohužel mnohem větší viz kapitola 7.

6 MĚŘENÍ

Jak už bylo zmíněno v kapitole 3.1, bezdrátový přenos energie se dá analyzovat pomocí dvojbranu, vstupní brána je tvořena vysílací cívkou a výstupní brána cívkou přijímací. Princip zkoumání obvodů pomocí S-parametrů je založen na souvislostech mezi zdrojovou vlnou, vybuzenou navstupu, odraženou vlnou, vlnou která se vrátí zpět ke zdroji, a postupnou vlnou, která projde do druhé brány. Pro měření je potřeba mít vhodný vysílač napěťových vln, který dokáže vybudit měřený prvek a přijímač napěťových vln, jež je schopen zaznamenat odezvu na budící signál [12]. Měřicí přístroj splňující tato kritéria se nazývá síťový analyzátor. Dle výstupních informací dělíme přístroj na skalární a vektorový. Vektorový síťový analyzátor umožňuje rozdělit od skalárního měřit komplexní parametry.

Měření bylo realizováno pomocí síťového analyzátoru „R&S@ZVL Vector Network Analyzers“ s frekvenčním rozsahem 9 kHz - 3 GHz. Měřené cívky jsou osazeny SMA konektory¹ s impedancí 50 Ω a jsou vybaveny přizpůsobovacími obvody navrženými v programu CST DS.

6.1 Nastavení přístroje

Před začátkem měření je lepší nechat přístroj cca 30 min zahřát. Pro nastavení přístroje bylo využito funkce „S-Param Wizard“, jež byla objevena při čtení manuálu² k síťovému analyzátoru a slouží k nastavení přístroje pro měření S-parametrů. Tímto způsobem byla zajištěna jednotnost měření. Budící výkon byl nastaven -10 dBm pro pasivní zátěž. Frekvenční rozmítání signálu bylo nastaveno od 8,56 MHz do 18,56 MHz se středovou frekvencí 13,56 MHz. Při měření byla prováděna pravidelná kalibrace, aby se zbránilo nežádoucím zkreslení měřených údajů vlivem použitých propojovacích kabelů. Kalibrace byla prováděna pomocí kalibrační sondy „ZV-Z132 3.5mm“. Po provedení nastavení a kalibraci byly k přístroji připojeny cívky k jednotlivým portům.

¹Katalogový list s rozměry a parametry použitého SMA konektoru je uveden v literatuře [13]

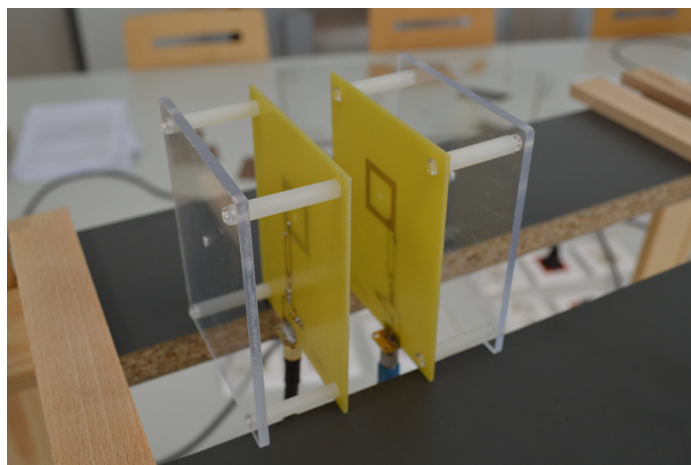
²Odkaz na zmíněný manuál je uveden v použité literatuře[14]

7 VÝSLEDKY MĚŘENÍ A SIMULACÍ

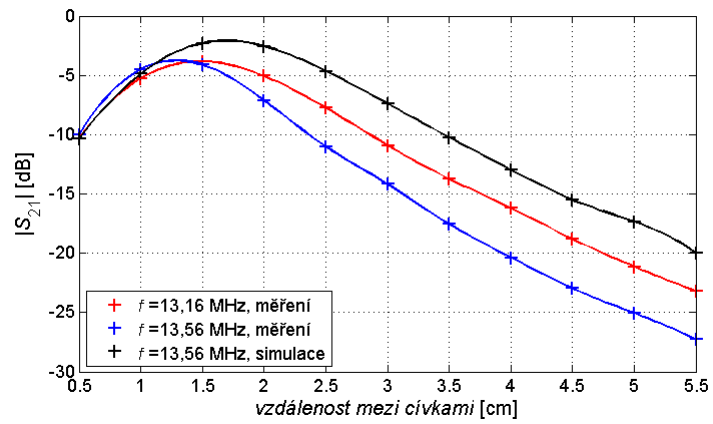
Následující kapitola je věnována zpracování dat z měření a simulací jednotlivých bodů zadání, kterými byly: zkoumání vlivu vzdálenosti na hodnotu přenosu, vlivu posunů cívek vůči sobě, vlivu různých úhlů natočení cívek na hodnotu přenosu a vliv vložených materiálů. Výsledky jsou vyneseny do grafů a změřené hodnoty jsou uvedeny v tabulkách. Uváděný napěťový útlum přenosu vazby je hodnota S-parametru $|S_{21}|$ v dB. Hodnoty v tabulce vyznačené červeně jsou hodnoty změřené v sedle křivky těsné vazby. V těchto případech docházelo k hlavnímu přenosu na dvou vzdálených kmitočtech od sledovaného kmitočtu 13,56 MHz. Zbylé hodnoty zaznamenávají napěťové útlumy přenosu při vazbě kritické a volné. Při simulacích byla snaha o nejmenší útlum napěťového přenosu na kmitočtu 13,56 MHz. Při reálném měření s neladitelnými prvky se ukázalo, že nejmenší útlum není na frekvenci 13,56 MHz, ale na kmitočtu 13,16 MHz, pro srovnání byla tato hodnota zaznamenávána taky.

7.1 Zkoumání vlivu vzdálenosti na hodnotu přenosu

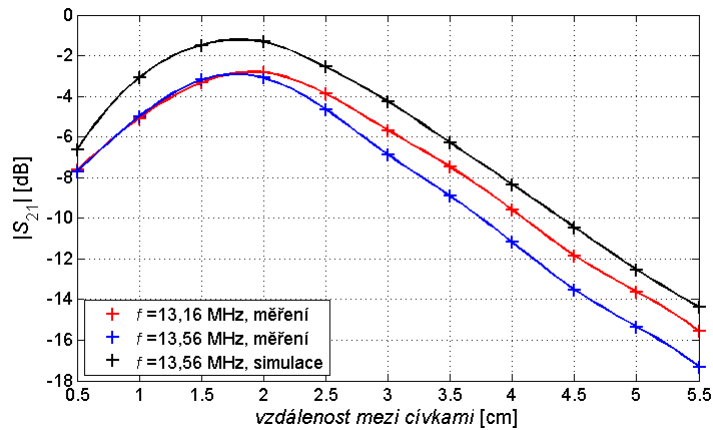
Měření vlivu vzdálenosti bylo provedeno od 0,5 cm do 5 cm s krokem 0,5 cm. Obrázek 7.1 zaznamenává průběh měření. V blízkém okolí cívek se při měření nevyskytovaly žádné materiály ovlivňující měření. Pro větší přesnost byly cívky shora zatíženy knihou, z důvodu tuhosti měřících kabelů. Výsledky měření byly vyneseny do grafů a v tabulce 7.1 jsou uvedeny jednotlivé změřené hodnoty. Hodnoty které jsou označeny červeně jsou zaznamenávány při těsné vazbě vysvětlení viz kapitola 1.3.1.



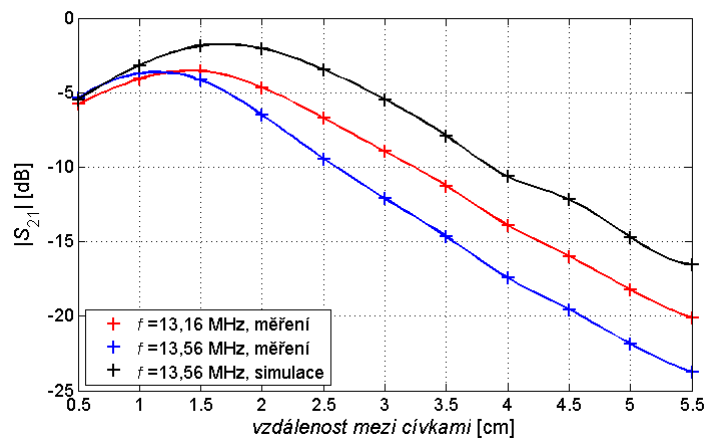
Obr. 7.1: Měření vlivu vzdálenosti na na napěťový útlum přenosu v dB



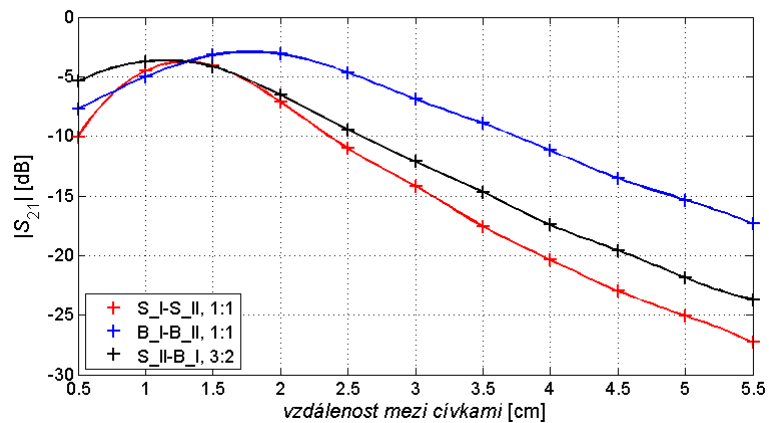
Obr. 7.2: Závislost napětového útlumu přenosu, vyjádřeného pomocí parametru $|S_{21}|$, na vzdálenost mezi cívkami S_I a S_II.



Obr. 7.3: Závislost napětového útlumu přenosu, vyjádřeného pomocí parametru $|S_{21}|$, na vzdálenost mezi cívkami B_I a B_II.



Obr. 7.4: Závislost napětového útlumu přenosu, vyjádřeného pomocí parametru $|S_{21}|$, na vzdálenost mezi cívkami S_II a B_I.



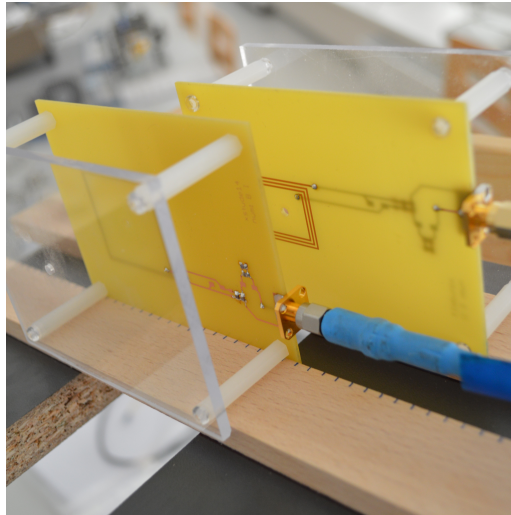
Obr. 7.5: Závislost ze změřených údajů na kmitočtu 13,56 MHz, napětového útlumu přenosu, vyjádřeného pomocí parametru $|S_{21}|$, na vzdálenost mezi cívkami, při různých konfiguracích.

Tab. 7.1: Vliv vzdálenosti na napěťový útlum bezdrátového přenosu, měřeno při frekvenci 13,56 MHz a 13,16 MHz a simulováno při frekvenci 13,56 MHz.

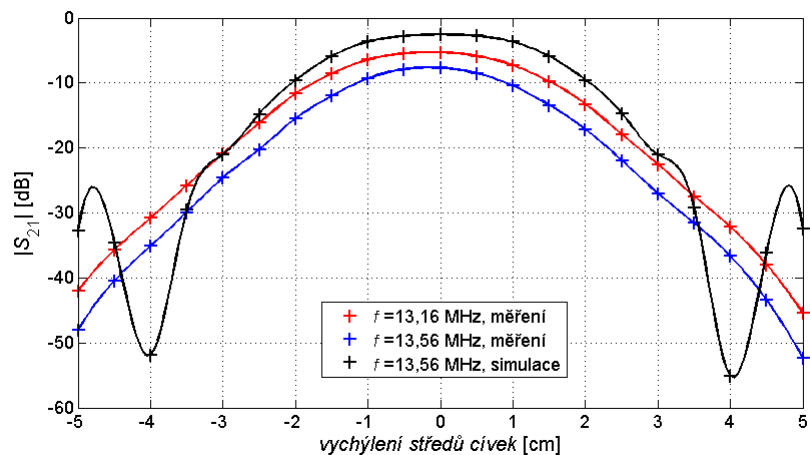
vzdálenost mezi cívkami [cm]	f [MHz]	Pozn:	Napěťový útlum [dB]										
			0,50	1,00	1,50	2,00	2,50	3,00	3,50	4,00	4,50	5,00	5,50
S_I - S_II,1:1	13,16	měření	-10,37	-5,28	-3,82	-5,07	-7,76	-10,91	-13,74	-16,21	-18,82	-21,13	-23,23
S_I - S_II,1:1	13,56	měření	-10,03	-4,51	-4,11	-7,13	-11,03	-14,19	-17,56	-20,37	-22,97	-25,05	-27,27
S_I - S_II,1:1	13,56	simulace	-10,35	-4,89	-2,29	-2,54	-4,65	-7,39	-10,24	-12,98	-15,51	-17,34	-20,02
B_I - B_II,1:1	13,16	měření	-7,64	-5,09	-3,34	-2,83	-3,88	-5,68	-7,48	-9,60	-11,84	-13,62	-15,56
B_I - B_II,1:1	13,56	měření	-7,71	-5,01	-3,20	-3,10	-4,66	-6,88	-8,92	-11,19	-13,52	-15,34	-17,32
B_I - B_II,1:1	13,56	simulace	-6,65	-3,09	-1,48	-1,33	-2,56	-4,27	-6,29	-8,34	-10,46	-12,53	-14,37
S_II - B_I,3:2	13,16	měření	-5,76	-4,08	-3,55	-4,66	-6,72	-8,96	-11,27	-13,90	-15,99	-18,23	-20,09
S_II - B_I,3:2	13,56	měření	-5,37	-3,72	-4,17	-6,53	-9,44	-12,12	-14,67	-17,44	-19,56	-21,86	-23,72
S_II - B_I,3:2	13,56	simulace	-5,47	-3,17	-1,86	-2,04	-3,45	-5,47	-7,92	-10,63	-12,17	-14,72	-16,54

7.2 Zkoumání vlivu posunu cívek na hodnotu přenosu

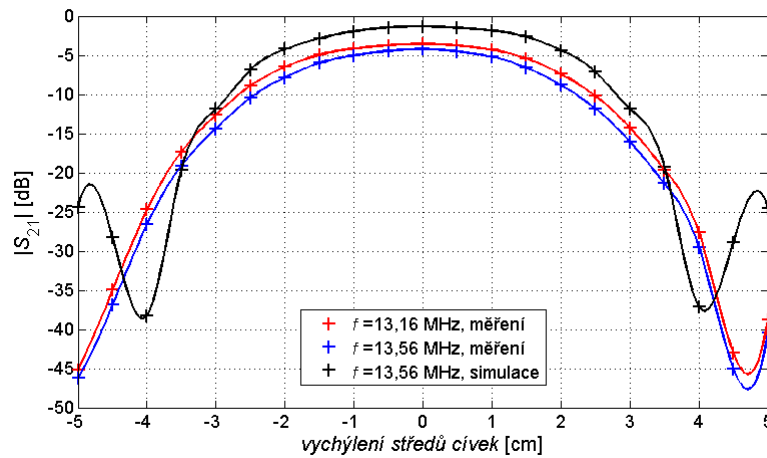
Měření vlivu vychýlení středů cívek bylo realizováno na vzdálenost 2 cm, kde bylo jisté, že už nebude projev těsné vazby. Na obrázku 7.6 je ukázán průběh měření. Chyby měření občas vznikaly drobným odstáváním cívek vzdálenost cívek se tak občas mohla změnit až o 2 mm.



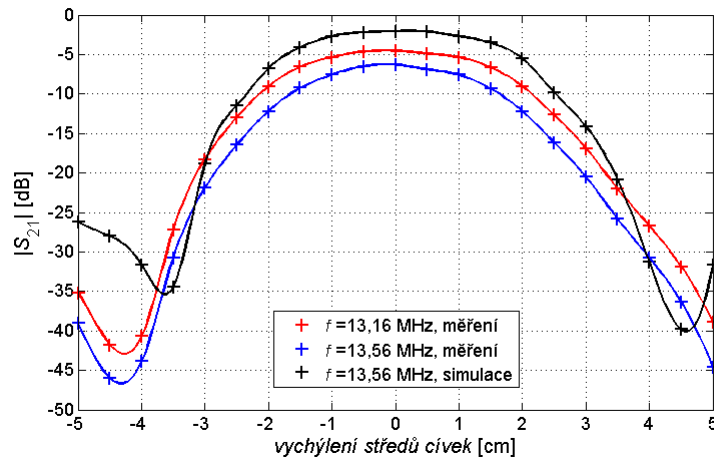
Obr. 7.6: Měření vlivu vychýlení středů cívek na napěťový útlum přenosu v dB



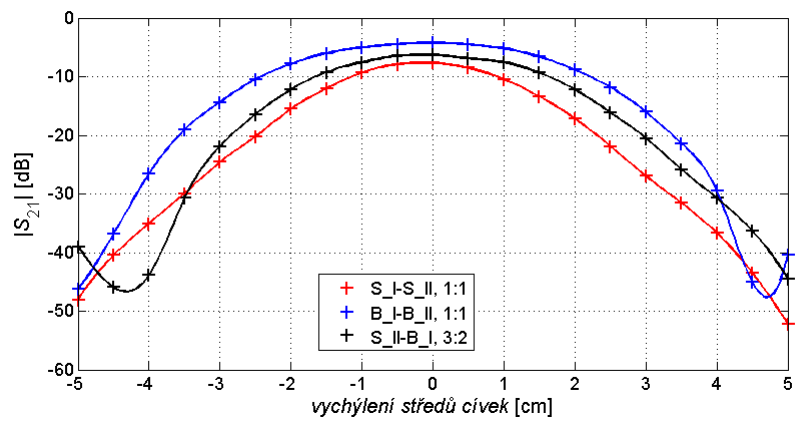
Obr. 7.7: Závislost napěťového útlumu přenosu, vyjádřeného pomocí parametru $|S_{21}|$, na vychylování středů cívek doleva (-) a doprava (+), konfigurace S_I - S_II.



Obr. 7.8: Závislost napětového útlumu přenosu, vyjádřeného pomocí parametru $|S_{21}|$, na vychylování středů cívek doleva (-) a doprava (+), konfigurace B_I - B_II.



Obr. 7.9: Závislost napětového útlumu přenosu, vyjádřeného pomocí parametru $|S_{21}|$, na vychylování středů cívek doleva (-) a doprava (+), konfigurace S_II - B_I.



Obr. 7.10: Závislost ze změřených údajů na kmitočtu 13,56 MHz, napětového útlumu přenosu, vyjádřeného pomocí parametru $|S_{21}|$, na vychylování středů cívek doleva (-) a doprava (+), při různých konfiguracích.

Tab. 7.2: Vliv posunu jedné z cívek konfigurace od středu doprava na napěťový útlum bezdrátového přenosu, měřeno při frekvenci 13,56 MHz a 13,16 MHz, simulováno při frekvenci 13,56 MHz a vzdálenosti 2 cm.

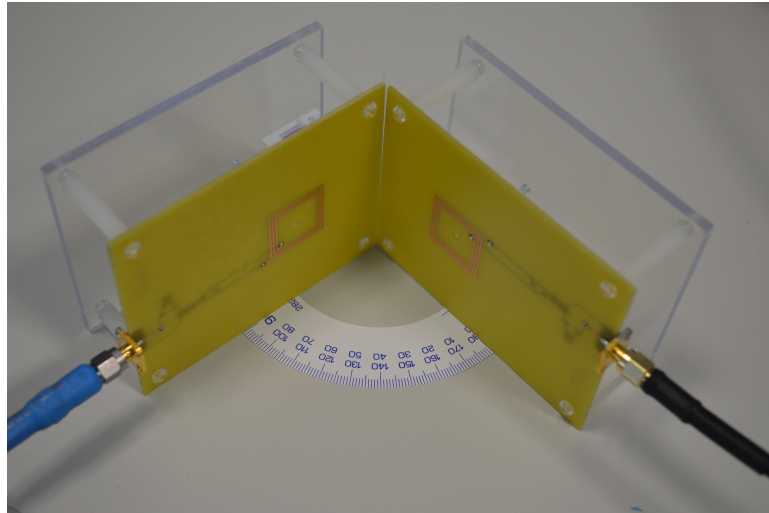
vychýlení středů cívek [cm]		0,00	0,50	1,00	1,50	2,00	2,50	3,00	3,50	4,00	4,50	5,00	
konfigurace		f [MHz]	Napěťový útlum [dB]										
		Pozn:											
S_I - S_II,1:1	13,16	měření	-5,27	-5,87	-7,29	-9,80	-13,28	-17,91	-22,54	-27,50	-32,20	-38,04	-45,40
S_I - S_II,1:1	13,56	měření	-7,68	-8,52	-10,44	-13,42	-17,19	-21,93	-27,00	-31,60	-36,70	-43,49	-52,30
S_I - S_II,1:1	13,56	simulace	-2,54	-2,77	-3,69	-5,92	-9,57	-14,69	-21,06	-29,20	-55,12	-36,22	-32,46
B_I - B_II,1:1	13,16	měření	-3,56	-3,78	-4,31	-5,45	-7,41	-10,25	-14,30	-19,62	-27,68	-43,06	-38,82
B_I - B_II,1:1	13,56	měření	-4,21	-4,53	-5,22	-6,61	-8,84	-11,87	-16,06	-21,41	-29,52	-45,05	-40,51
B_I - B_II,1:1	13,56	simulace	-1,32	-1,51	-1,86	-2,67	-4,36	-7,16	-11,89	-19,30	-37,16	-28,86	-24,52
S_II - B_I,3:2	13,16	měření	-4,53	-4,89	-5,35	-6,65	-9,04	-12,69	-16,88	-22,05	-26,74	-31,88	-38,87
S_II - B_I,3:2	13,56	měření	-6,30	-6,88	-7,58	-9,35	-12,22	-16,17	-20,53	-25,85	-30,76	-36,35	-44,60
S_II - B_I,3:2	13,56	simulace	-2,04	-2,11	-2,69	-3,51	-5,56	-9,82	-14,14	-20,85	-31,29	-39,83	-31,65

Tab. 7.3: Vliv posunu jedné z cívek konfigurace od středu doleva na napěťový útlum bezdrátového přenosu, měřeno při frekvenci 13,56 MHz a 13,16 MHz, simulováno při frekvenci 13,56MHz a vzdálenosti 2 cm.

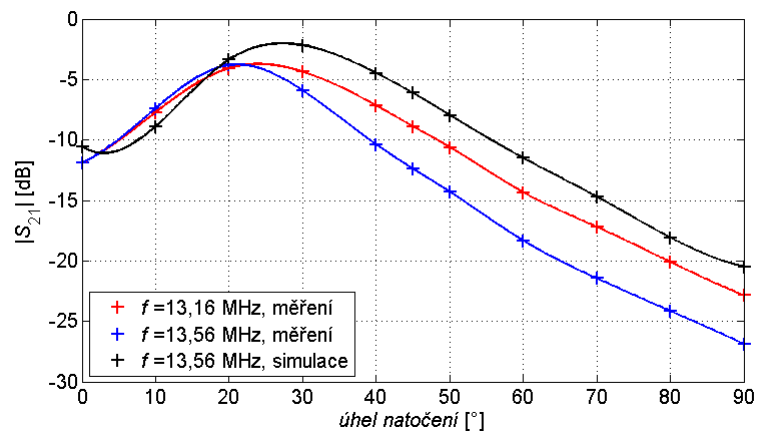
vychýlení středů cívek [cm]	f [MHz]	Pozn:	Napěťový útlum [dB]										
			0,00	0,50	1,00	1,50	2,00	2,50	3,00	3,50	4,00	4,50	5,00
S_I - S_II,1:1	13,16	měření	-5,27	-5,45	-6,42	-8,59	-11,72	-16,16	-20,90	-25,80	-30,80	-35,76	-42,06
S_I - S_II,1:1	13,56	měření	-7,68	-7,89	-9,32	-12,00	-15,54	-20,24	-24,61	-29,94	-35,12	-40,50	-48,06
S_I - S_II,1:1	13,56	simulace	-2,54	-2,78	-3,66	-5,90	-9,62	-14,81	-21,01	-29,52	-51,88	-34,64	-32,84
B_I - B_II,1:1	13,16	měření	-3,56	-3,74	-4,16	-4,95	-6,51	-8,92	-12,65	-17,33	-24,74	-34,95	-45,16
B_I - B_II,1:1	13,56	měření	-4,21	-4,47	-5,03	-6,02	-7,83	-10,48	-14,37	-19,12	-26,59	-36,85	-46,28
B_I - B_II,1:1	13,56	simulace	-1,32	-1,46	-1,94	-2,88	-4,23	-6,88	-11,92	-19,62	-38,25	-28,30	-24,48
S_II - B_I,3:2	13,16	měření	-4,53	-4,65	-5,33	-6,57	-9,05	-12,98	-18,28	-27,19	-40,72	-41,76	-35,16
S_II - B_I,3:2	13,56	měření	-6,30	-6,49	-7,55	-9,25	-12,22	-16,47	-21,89	-30,76	-43,90	-45,98	-39,02
S_II - B_I,3:2	13,56	simulace	-2,04	-2,19	-2,68	-4,08	-6,77	-11,48	-18,82	-34,48	-31,65	-27,98	-26,20

7.3 Zkoumání vlivu natočení cívek na hodnotu přenosu

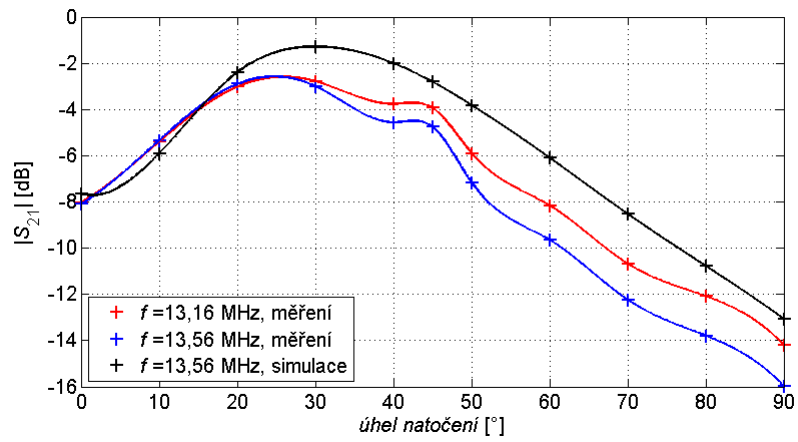
Měření vlivu natočení cívek bylo realizováno při různých sklonech úhlu od 0° do 90° . Hodnota 0° byla z konstrukčních důvodů (výška hlaviček plastových šroubů) měřena při vzdálenosti 0,4 mm. Výsledky měření byly vyneseny do grafů a v tabulce 7.4 jsou uvedeny jednotlivé změřené hodnoty. Hodnoty které jsou označeny červeně jsou zaznamenávány při těsné vazbě vysvětlení viz kapitola 1.3.1.



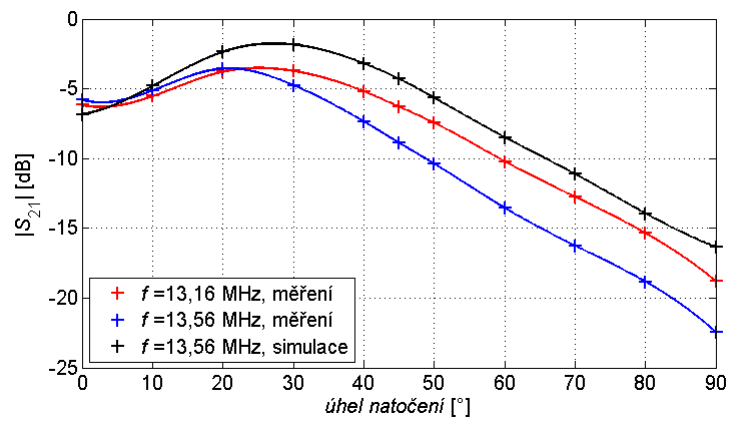
Obr. 7.11: Měření vlivu natočení cívek na napěťový útlum přenosu v dB



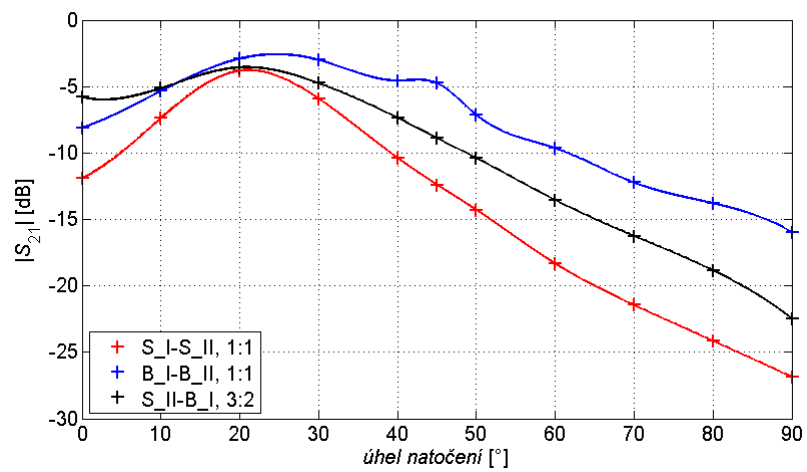
Obr. 7.12: Závislost napěťového útlumu přenosu, vyjádřeného pomocí parametru $|S_{21}|$, na úhlu natočení cívek, konfigurace S_I - S_II.



Obr. 7.13: Závislost napětového útlumu přenosu, vyjádřeného pomocí parametru $|S_{21}|$, na úhlu natočení cívek, konfigurace B_I - B_II.



Obr. 7.14: Závislost napětového útlumu přenosu, vyjádřeného pomocí parametru $|S_{21}|$, na úhlu natočení cívek, konfigurace S_II - B_I.



Obr. 7.15: Závislost ze změřených údajů na kmitočtu 13,56 MHz, napětového útlumu přenosu, vyjádřeného pomocí parametru $|S_{21}|$, na úhlu natočení cívek, při různých konfiguracích.

Tab. 7.4: Napěťový útlumu v závislosti na úhlu natočení cívek, měřeno při frekvenci 13,56 MHz a 13,16 MHz, simulováno při frekvenci 13,56MHz.

Úhel natočení [°]		0	10	20	30	40	45	50	60	70	80	90	
konfigurace	f [MHz]	Napěťový útlum [dB]											
		Pozn:											
S_I - S_II,1:1	13,16	měření	-11,90	-7,72	-4,07	-4,36	-7,17	-8,89	-10,61	-14,34	-17,2	-20,10	-22,86
S_I - S_II,1:1	13,56	měření	-11,87	-7,39	-3,81	-5,93	-10,39	-12,40	-14,30	-18,34	-21,45	-24,15	-26,87
S_I - S_II,1:1	13,56	simulace	-10,57	-8,88	-3,35	-2,17	-4,48	-6,13	-7,96	-11,50	-14,70	-18,08	-20,47
B_I - B_II,1:1	13,16	měření	-8,05	-5,40	-3,02	-2,78	-3,76	-3,94	-5,90	-8,16	-10,68	-12,08	-14,21
B_I - B_II,1:1	13,56	měření	-8,10	-5,34	-2,90	-3,00	-4,56	-4,76	-7,16	-9,65	-12,24	-13,79	-15,97
B_I - B_II,1:1	13,56	simulace	-7,65	-5,91	-2,40	-1,28	-2,00	-2,81	-3,82	-6,10	-8,53	-10,78	-13,07
S_II - B_I,3:2	13,16	měření	-6,17	-5,53	-3,78	-3,73	-5,19	-6,29	-7,45	-10,21	-12,75	-15,36	-18,80
S_II - B_I,3:2	13,56	měření	-5,80	-5,12	-3,56	-4,75	-7,36	-8,89	-10,39	-13,55	-16,25	-18,84	-22,47
S_II - B_I,3:2	13,56	simulace	-6,84	-4,80	-2,35	-1,84	-3,18	-4,29	-5,66	-8,48	-11,12	-13,94	-16,34

7.4 Zkoumání vlivu různých materiálů vložených mezi cívky na hodnotu přenosu

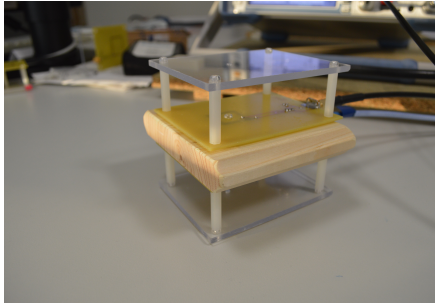
Při tomto měření byla nejprve změřena hodnota vazby bez materiálu a následně bylo provedeno měření s dřevem, cuprextitem a lidskou rukou izolovanou polyethylenovou rukavicí viz 7.16. Při simulaci byly modely realizovány s využitím materiálové knihovny programu CST MWS. Výsledky měření jsou uvedeny v tabulce 7.5. Z měření se dá usoudit, že zdravé lidské tělo, induktivní vazbu ovlivňuje minimálním způsobem, stejně tak i dřevo.

Zajímavé jsou nepatrné poklesy útlumů u dřeva v simulacích konfigurací B_I-B_II a S_II-B_I, s největší pravděpodobností však půjde o simulační chybu.

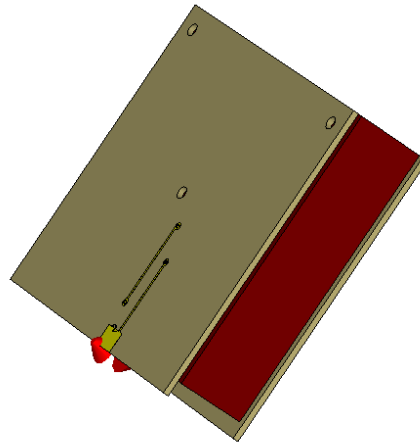
Očekávaný velký útlum napětového přenosu po vložení cuprexitového vzorku mezi cívky, byl potvrzen měřením i simulacemi. Výsledky měření se vzorkem dřeva, mohly být drobně ovlivněny kontaktem měřeného vzorku s kovovými pilinami při jeho přípravě dílně.



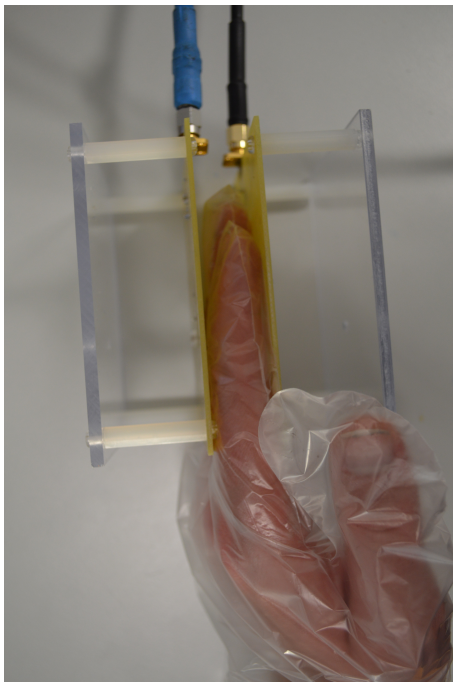
Obr. 7.16: Měření vlivu různých materiálů na napětový útlum přenosu v dB, měřené vzorky



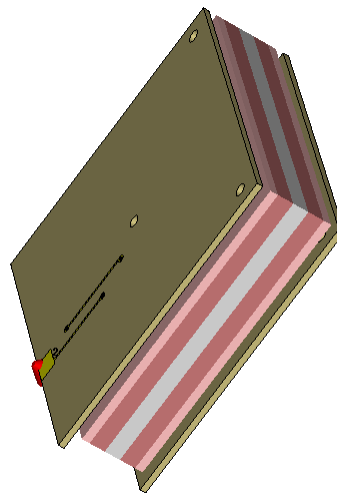
Obr. 7.17: Dřevo



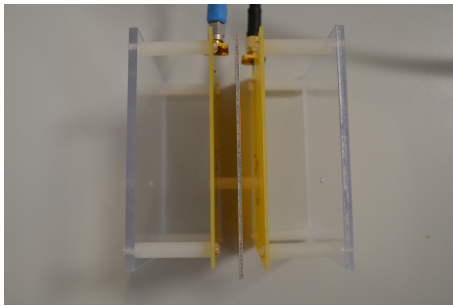
Obr. 7.18: Dřevo model



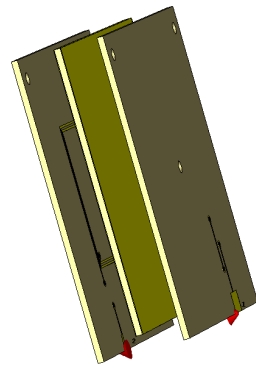
Obr. 7.19: Ruka



Obr. 7.20: Ruka model



Obr. 7.21: Cuprexit



Obr. 7.22: Cuprexit model

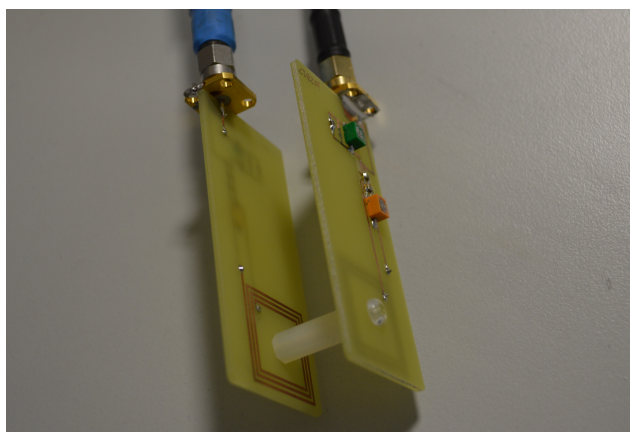
Tab. 7.5: Vliv různých materiálů na napěťový útlum bezdrátového přenosu, měřeno při frekvenci 13,56 MHz, 13,16 MHz, simulováno při frekvenci 13,56 MHz a vzdálenosti 2 cm.

materiály		f [MHz]	Pozn:	napěťový útlum [dB]		
konfigurace	bez vzorku			dřevo	cuprextit	ruka
S_I - S_II,1:1	13,16	měření	-4,96	-5,46	-47,49	-5,07
S_I - S_II,1:1	13,56	měření	-7,09	-8,02	-42,80	-7,30
S_I - S_II,1:1	13,56	simulace	-2,54	-2,59	-48,15	-2,43
B_I - B_II,1:1	13,16	měření	-3,18	-3,51	-42,87	-3,34
B_I - B_II,1:1	13,56	měření	-3,67	-4,13	-38,59	-3,86
B_I - B_II,1:1	13,56	simulace	-1,43	-1,37	-45,78	-1,45
S_II - B_I,1:1	13,16	měření	-4,43	-4,78	-45,30	-4,74
S_II - B_I,1:1	13,56	měření	-6,12	-6,77	-40,92	-6,64
S_II - B_I,1:1	13,56	simulace	-2,04	-1,99	-45,89	-2,05

7.5 Měření indukční vazby s laditelným přizpůsobovacím obvodem

Měření, která byla prezentována výše byla provedena při stejných podmínkách a s kondenzátory. Následující měření je realizováno s nahrazením některých kondenzátorů kapacitními trimry. Ladění má 4 stupně volnosti, každá cívka má dva trimry jeden pro úpravu hodnoty kapacity C_p a druhý pro úpravu hodnoty kapacity C_s . Cílem bylo naladit indukční vazbu na kmitočet 13,56 MHz a dosáhnout při této frekvenci co nejmenšího útlumu přenosu.

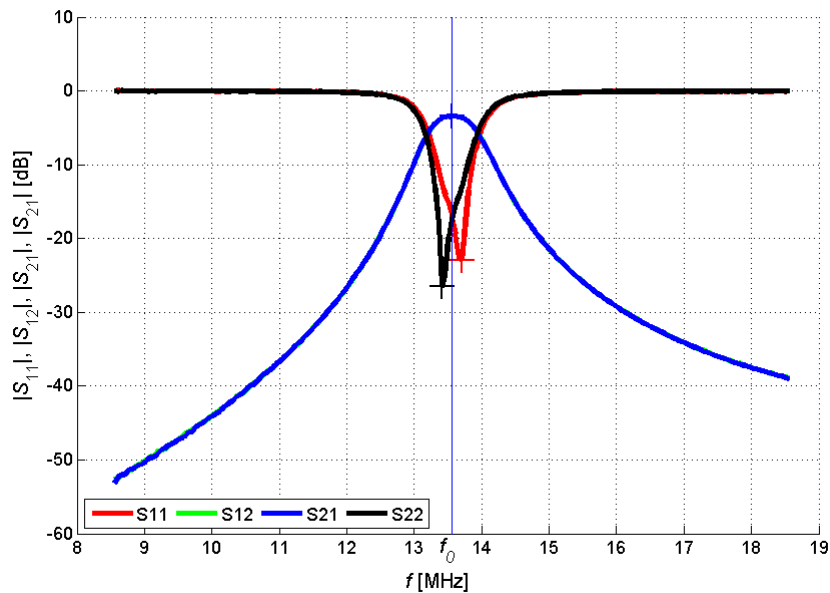
Při tomto měření byl přizpůsobovací obvody cívek osázeny dle seznamu uvedeného v A.5. Plastový distanční sloupek umístěný ve středu cívky zajišťoval vzdálenost 2 cm mezi cívkami, kapacitní trimry jsou umístěny vně vazby viz Obr.7.23. Ladění bylo provedeno kovovým šroubovákem a proto bylo nutné, vždy po nastavení oddělat šroubovák aby nedocházelo ke zkreslení měřených hodnot.



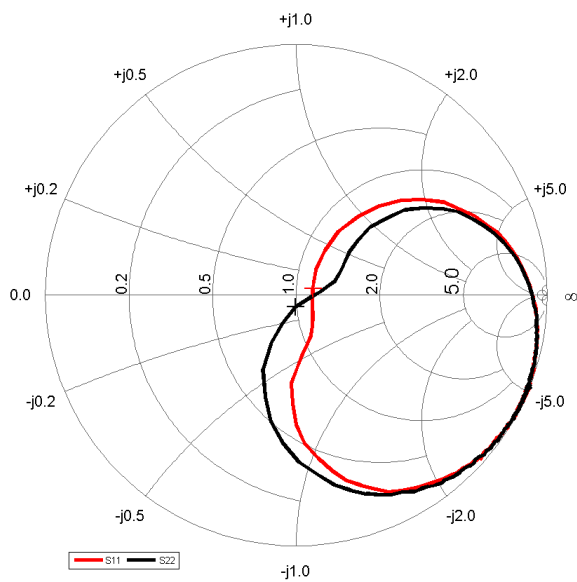
Obr. 7.23: Měření s laditelným přizpůsobovacím obvodem

Grafická závislost uvedená na Obr.7.24 je zkonstruována na základě změřených dat po vyladění přizpůsobovacích obvodů cívky při měření na vzdálenost 2 cm a konfigurací S_I-S_II. Modrá přímka protíná místo s nejmenším napětovým útlumem a to na kmitočtu $f_0 = 13,56$ MHz. Odečtená hodnota napětového útlumu je -3,426 dB (viz Obr.7.26 na němž je uveden záznam z měřícího přístroje). Dále je na Obr.7.24 vidět, že k největšímu přenosu respektive nejmenšímu útlumu přenosu dochází v místě, kde se protínají činitele odrazu S_{11} a S_{22} . Při návrhu byla snaha aby útlum těchto rozptylových parametrů byl co největší na kmitočtu 13,56 MHz, na Obr.7.24 je patrné že tyto minima jsou od daného kmitočtu odchyleny. Na Obr.7.25 jsou zmiňované činitele odrazu uvedeny ve Smithově diagramu. V tomto zobrazení

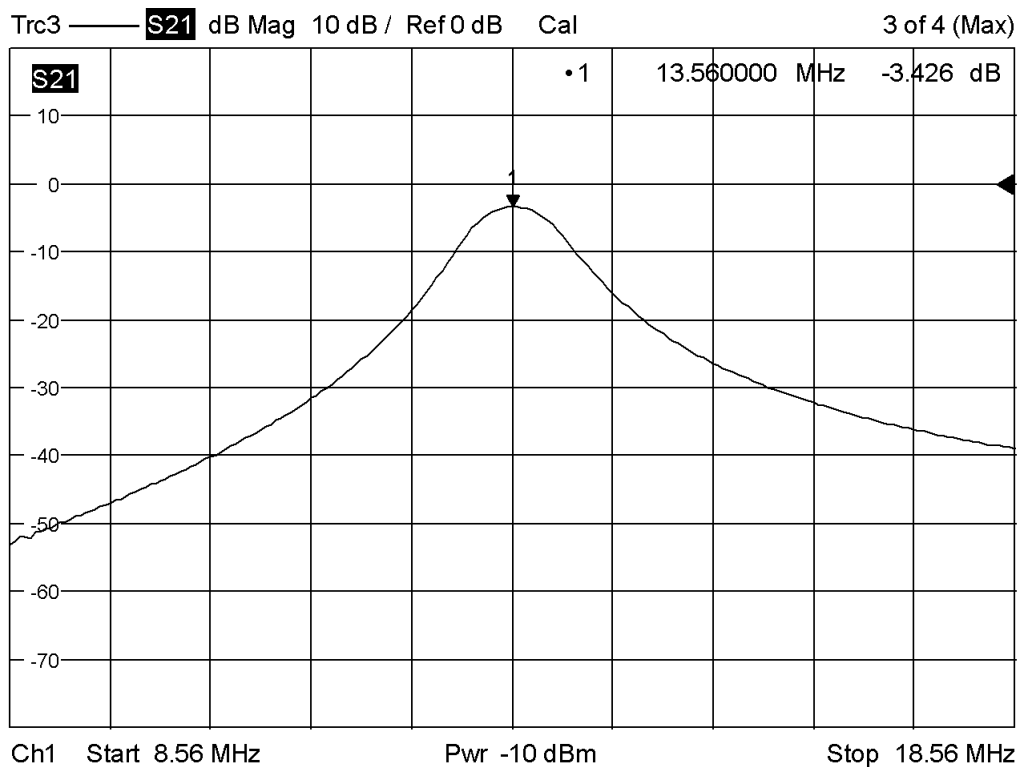
je možné pozorovat nedokonalost přizpůsobení, křížové kurzory zobrazující kmitočet 13,56 MHz by v případě dokonalého přizpůsobení ležely ve středu Smithova diagramu, kde je v tomto případě čistě reálná impedance 50 Ω .



Obr. 7.24: Závislost rozptylových parametrů na frekvenci, vyjádřená v dB



Obr. 7.25: Smithův diagram s činiteli odrazu



Obr. 7.26: Záznam rozptylového parametru S_{21} z měřícího přístroje po vyladění.

7.5.1 Příklad

Na základě tohoto změřeného údaje je možné demonstrovat jaká je účinnost realizovaného bezdrátového přenosu energie pomocí induktivní vazby. Pro zjednodušení řekněme, že vstupní výkon $P_{in} = 0$ dBm, změřený útlum realizovaného přenosu respektive zisk je $G = -3,426$ dB a vstupní i výstupní zátěž je 50Ω . Pro počítání s decibely platí vztah 7.1, kde G je zisk v dB (záporný zisk = útlum), P_{in} je vstupní výkon v dBm, P_{out} je výstupní výkon v dBm[6]. Úpravou vztahu vznikne vztah 7.2 a po dosazení, je zjištěno že výstupní výkon při vstupním výkonu $P_{in} = 0$ dBm je $P_{out} = -3,426$ dBm.

$$G = P_{out} - P_{in} \quad [\text{dB}] \quad (7.1)$$

$$P_{out} = G + P_{in} = -3,426 + 0 = -3,426 \quad \text{dBm} \quad (7.2)$$

Pro přepočítání výkonu z logaritmických jednotek na lineární slouží vztah 7.3, kde P je výkon v lineárních jednotkách, P_{dB} je úroveň výkonu v logaritmických jednotkách a P_0 je referenční hodnota [6]. Dosazením vypočítaných hodnot do vztahu 7.3, dostaneme výsledky uvedené ve vztahu 7.4 a 7.5, tj. $P_{out} = 0,454\text{mW}$ a $P_{in} = 1\text{mW}$.

$$P = 10^{\frac{P_{dB}}{10}} \cdot P_0 \quad [\text{W}] \quad (7.3)$$

$$P_{out} = 10^{\frac{P_{dB}}{10}} \cdot P_0 = 10^{\frac{-3,426}{10}} \cdot 0,001 \approx 0,454 \quad \text{mW} \quad (7.4)$$

$$P_{in} = 10^{\frac{P_{dB}}{10}} \cdot P_0 = 10^{\frac{0}{10}} \cdot 0,001 = 1 \quad \text{mW} \quad (7.5)$$

Výsledná účinnost je dána poměrem výstupního výkonu ku vstupnímu a je uvedena v procentech viz 7.6 [5].

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} \cdot 100 = \frac{0,454 \cdot 10^{-3}}{1 \cdot 10^{-3}} \cdot 100 = 45,4 \quad \% \quad (7.6)$$

Účinnost vyladěného bezdrátového přenosu energie pomocí induktivní vazby na vzdálenost 2 cm při konfiguraci S_I-S_II, je 45,4%, což je méně než jedna polovina. V kapitole 7.1 v tabulce 7.1 se při měření konfigurace B_I-B_II podařilo na vzdálenost 2 cm při kmitočtu 13,16 MHz uskutečnit přenos s účinností 52,1% (účinnost byla vypočítána dle uvedeného postupu v této kapitole).

8 ZÁVĚR

Cílem bakalářské práce bylo seznámit se s principem bezdrátového přenosu energie pomocí induktivní vazby. Tento způsob přenosu energie byl realizován pomocí dvou vázaných cívek na kmitočtu 13,56 MHz, což je kmitočet z volného pásma ISM. Návrh těchto planárních cívek byl proveden pomocí Wheelerovy metody. Hlavním důraz při návrhu byly kladen na minimální rozměry cívek a jejich vyrobiteľnost, výsledné parametry cívek byly uvedeny v tabulkách v kapitole 5 a 3.2. Navrhnuté cívky byly následně vymodelovány v simulátoru 3D elektromagnetického pole CST MWS. Maximalizace činitele vazby byla zajištěna, použitím dvou identických cívek. V dalším kroku vývoje byla navržena cívka s odlišnými rozměry i počtem závitů, ale stejnou vlastní indukčností $L_{mw} \approx 350$ nH.

Po vymodelování cívek v programu CST MWS, byl vytvořen náhradní model obvodu v programu CST DS. Na základě dat z modelu CST MWS bylo možné pomocí CST DS navrhnout přizpůsobovací obvody k cívkám. Podrobný postup simulací i s dílčími výsledky je uveden v kapitole 4. Optimalizované hodnoty kapacit přizpůsobovacích obvodů, C_p a C_s , se lišily pro jednotlivé konfigurace cívek, pro konfiguraci S_I-S_II bylo $C_p = 304$ pF a $C_s = 64$ pF, pro konfiguraci B_I-B_II bylo $C_p = 248$ pF a $C_s = 83$ pF, a pro konfiguraci S_II-B_I bylo $C_p = 297$ pF a $C_s = 69$ pF pro cívku S_II a $C_p = 259$ pF a $C_s = 69$ pF pro cívku B_I. Po návrhu a optimalizaci přizpůsobovacích obvodů bylo vyrobeno 6 cívek s přizpůsobovacím obvodem. Náhrada simulovaných kapacit kondenzátory s reálnými kapacitami byla s kompletní dokumentací uvedena v příloze A.

Dalším cílem bakalářské práce bylo měření vlivu různých vložených materiálů mezi cívky na vzájemnou vazbu. Zvolenými materiály byl cuprextit, ruha a dřevo. Měření bylo porovnáno se simulací, kde byly použity modely těchto vzorků. Na výsledcích měření bylo vidět jak diamagnetické vlastnosti mědi, způsobují útlum přenosu.

Ostatní měřené materiály měly na vzájemnou vazbu cívek minimální dopad. Dále byl zkoumán vliv natočení cívek v rozmezí sevřeného úhlu od 0° do 90° , kde bylo patrné, že s rostoucím úhlem natočení se zvětšuje útlum přenosu. Při zkoumání vlivů vychýlení středů cívek bylo vidět, že drobné vychýlení mělo jen nepatrný vliv na útlum, ale s rostoucí výchylnou se útlum rychle zvětšoval.

Posledním zkoumaným vlivem byla velikost vzduchové mezery respektive vzdálenost cívek na útlum přenosu. Nejmenších útlumů zde bylo dosaženo na vzdálenosti mezi 1,5-2 cm na konkrétním kmitočtu 13,56 MHz respektive 13,16 MHz. V případě těsné vazby docházelo také k malému útlumu, ale zároveň byl přenos na dvou vzdálených kmitočtech od kmitočtu 13,56 MHz respektive 13,16 MHz.

Na závěr byl realizován bezdrátový přenos energie pomocí cívek s laditelnými

přizpůsobovacími obvody, kde se podařilo minimální útlum respektive maximální přenos realizovat na kmitočtu 13,56 MHz. Výsledná velikost napětového útlumu v dB byla -3,426 dB na vzdálenost 2 cm. Účinnost tohoto přenosu byla $\eta = 45,4 \%$.

Výsledky simulací korespondovali s naměřenými daty a však velikosti útlumů v nich byly výrazně menší. Zmíněné výsledky s grafy a dalšími informacemi byly uvedeny v kapitole 7.

LITERATURA

- [1] *Pásmo 13 410 – 13 570 kHz – Detail kmitočtového pásma* [online]. [cit. 2016-12-06]. Dostupné z: <<http://spektrum.ctu.cz/kmitocty/13410-13570khz/>>.
- [2] *Near and far field - Wikipedia*. In: Wikipedia: the free encyclopedia [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2016-12-11]. Dostupné z: <https://en.wikipedia.org/wiki/Near_and_far_field/>.
- [3] KRACEK, J., MAZANEK, M. *Power balance of inductive wireless power transmission*, Proceedings of the 5th European Conference on Antennas and Propagation (EUCAP), Rome, 2011, pp. 3974-3978. [online] Dostupné z: <<http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=5782444&isnumber=5780481/>>.
- [4] PATOČKA, M. *Magnetické jevy a obvody ve výkonové elektronice, měřicí technice a silnoproudé elektrotechnice*. V Brně: VUTIUM, 2011. ISBN 978-80- 214-4003-6.
- [5] NEČÁSEK, S. *Radiotechnika do kapsy* V Praze: SNTL, 1972.
- [6] VÁGNER, P. *Vysokofrekvenční technika*. Skripta FEKT VUT, 2013.
- [7] MOHAN, S.S., M. DEL MAR HERSHENSON, S.P. BOYD a T.H. LEE. *Simple accurate expressions for planar spiral inductances*. *IEEE Journal of Solid-State Circuits* [online]. 34(10), 1419-1424 [cit. 2016-12-07]. DOI: 10.1109/4.792620. ISSN 00189200. Dostupné z: <<http://ieeexplore.ieee.org/document/792620/>>.
- [8] *RFID – Wikipedie*. In: Wikipedia: the free encyclopedia [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2016-12-11]. Dostupné z: <<https://cs.wikipedia.org/wiki/RFID/>>.
- [9] POZAR, David M. *Microwave engineering. 2nd ed.* New York: Wiley, 1998. ISBN 0471170968.
- [10] VANŽURA, A., VORÁČ, J. *Výroba plošných spojů*. Dostupného z: <http://www.urel.feec.vutbr.cz/web_documents/dilna/PlosneSpoje2010.pdf/>.
- [11] SHINOHARA, N. *Wireless power transmission via radiowaves*. Hoboken, New Jersey: John Wiley, 2014. Waves series. ISBN 978-1-118-86295-7.
- [12] PROCHÁZKA, T., BARTOŇ, Z. *S-parametry* [online]. In: . [cit. 2016-12-11]. Dostupné z: <<http://www.elektrorevue.cz/clanky/02029/index.html/>>.

- [13] *Rosenberg. katalogový list* [online] [cit. 2016-12-11]. Dostupné z: <<http://rosenberger.de/ok/images/documents/db/32K441-500L5.pdf>>.
- [14] *Manuals for Product ZVL - Rohde & Schwarz United States* [online] [cit. 2017-2-10]. Dostupné z: <https://cdn.rohde-schwarz.com/pws/dl_downloads/dl_common_library/dl_manuals/gb_1/z/zvl_1/ZVL_Operating_en_09.pdf>.

SEZNAM SYMBOLŮ, VELIČIN A ZKRATEK

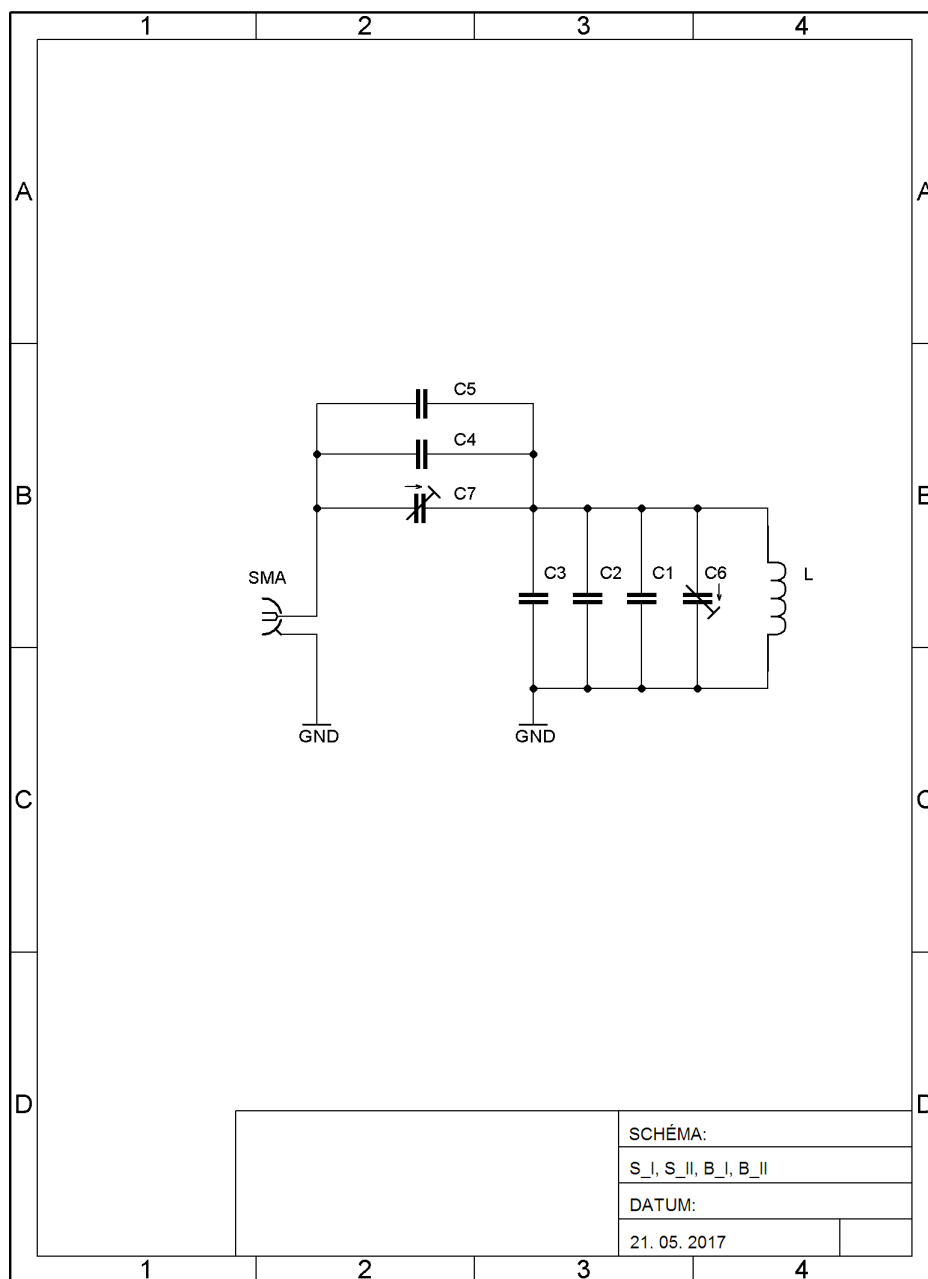
K_1	koeficient Wheelerovi metody
K_2	koeficient Wheelerovi metody
d_{in}	vnitřní průměr cívky
d_{out}	vnější průměr cívky
N	počet závitů cívky
M	vzájemná indukčnost
k	činitel vazby
ρ	výplňový poměr
h_w	výška vodivé cesty
w	šířka vodivé cesty
s	šířka mezeri mezi vodivými cestami
h_{sub}	výška substrátu
C_p	filtrovací kapacita potlačující vyšší frekvence
C_s	filtrovací kapacita potlačující nižší frekvence
L_{mw}	indukčnost menší cívky vypočítána Wheelerovou metodou
μ_0	magnetická permeabilita vakua
d_{avg}	aritmetický průměr průměrů d_{in} a d_{out}
f	frekvence
Q	činitel jakosti
R_p	parazitní odpor
C_p	parazitní kapacita cívky
R_{self}	parazitní odpor cívky
C_{21}	parazitní kapacita mezi cívkami
L	vlastní indukčnost
L_{self}	vlastní indukčnost cívky
WPT	wireless power transfer, bezdrátový přenos energie

SEZNAM PŘÍLOH

A Přílohy	63
A.1 Schéma	63
A.2 Předlohy desek plošných spojů	64
A.3 Osazovací plány	72
A.4 Seznamy součástek	76
B Obsah přiloženého CD	80

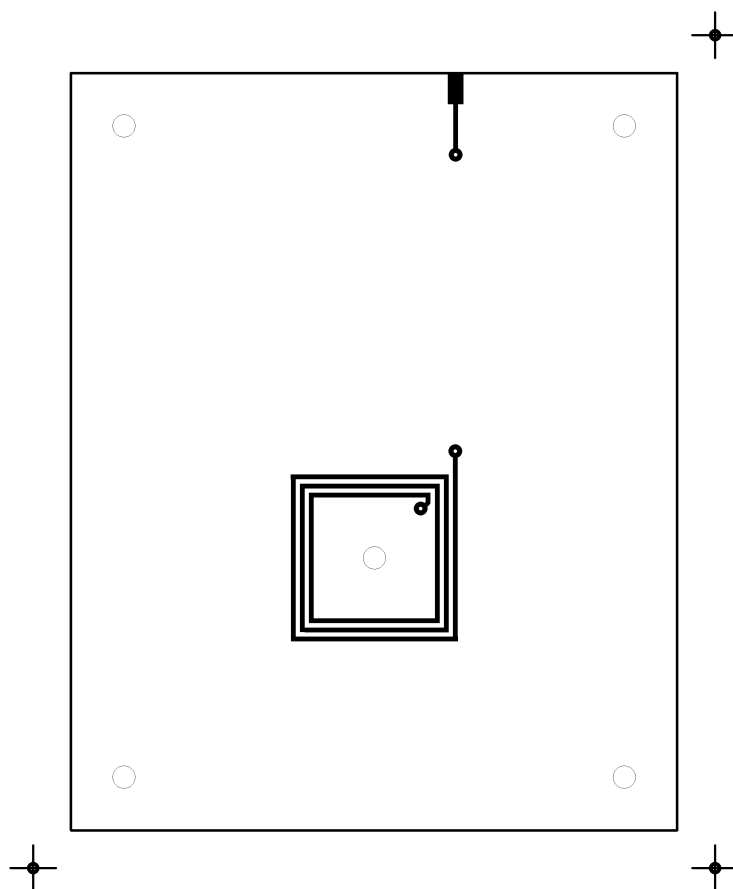
A PŘÍLOHY

A.1 Schéma

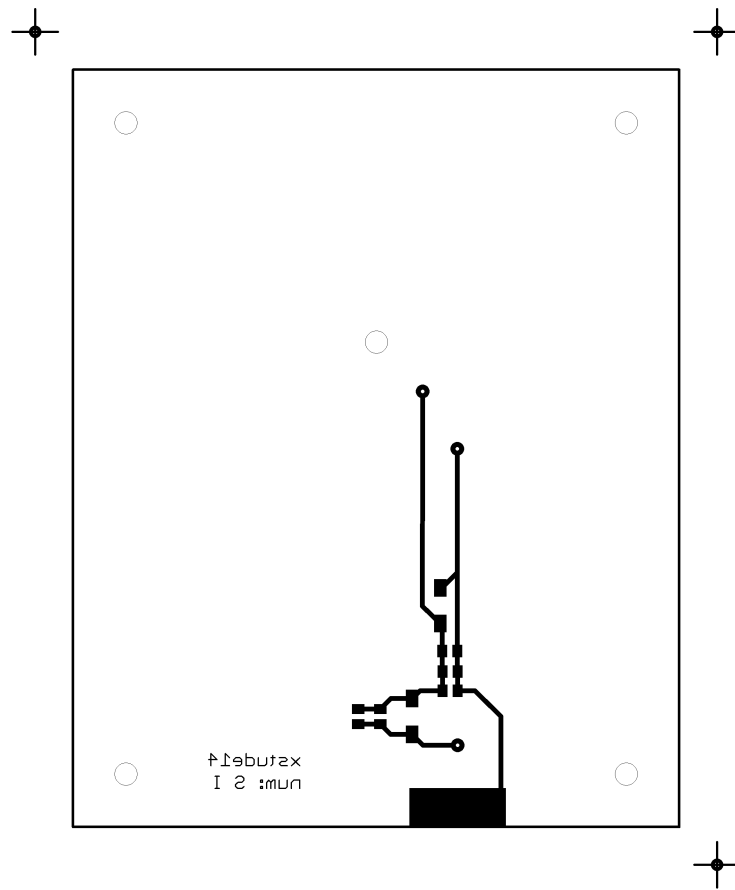


Obr. A.1: Schéma zapojení přizpůsobovacích obvodů planárních cívek

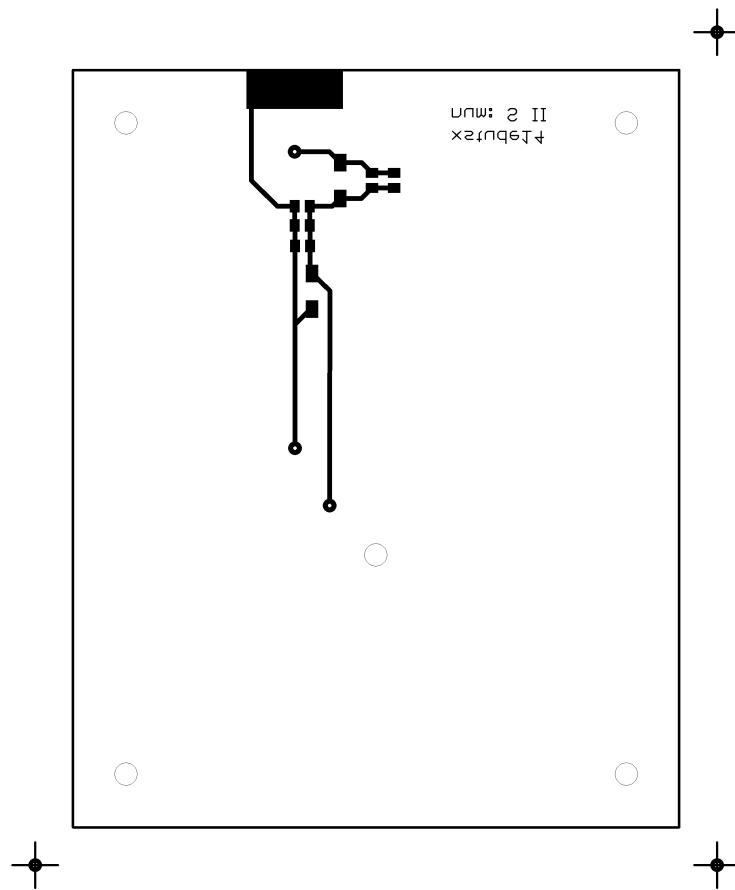
A.2 Předlohy desek plošných spojů



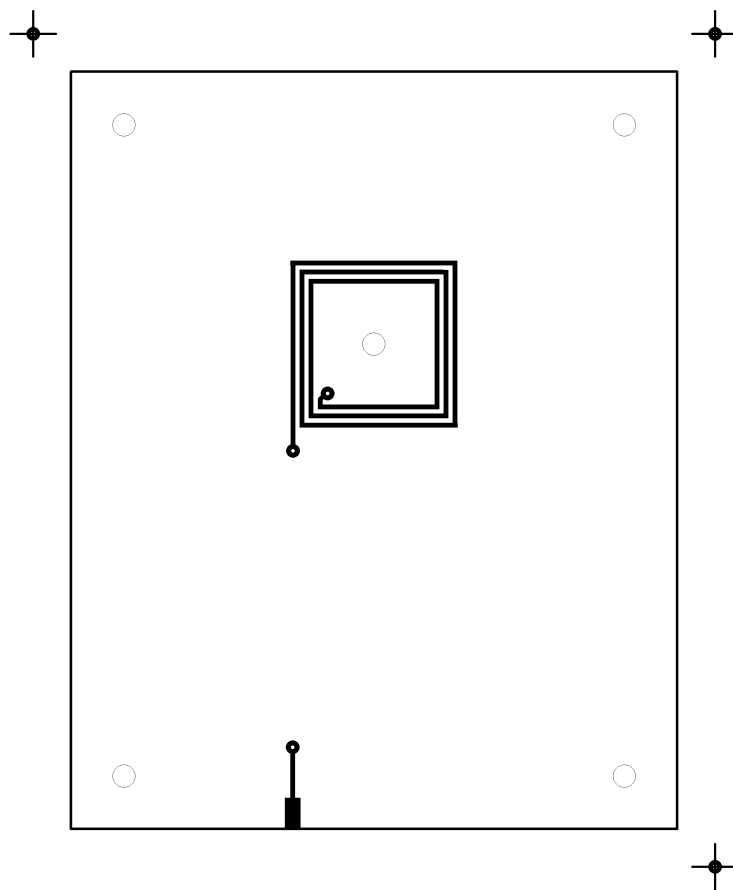
Obr. A.2: Deska plošného spoje cívky S_I, přední strana, M 1:1, rozměry desky 80x100 [mm]



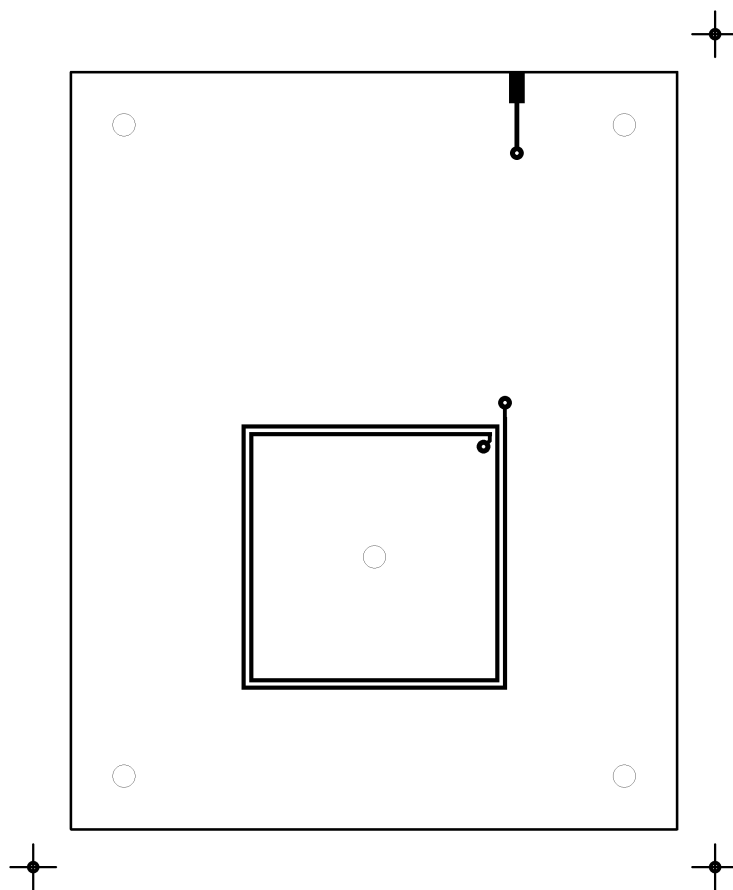
Obr. A.3: Deska plošného spoje cívky S_I, zadní strana, M 1:1, rozměry desky 80x100 [mm]



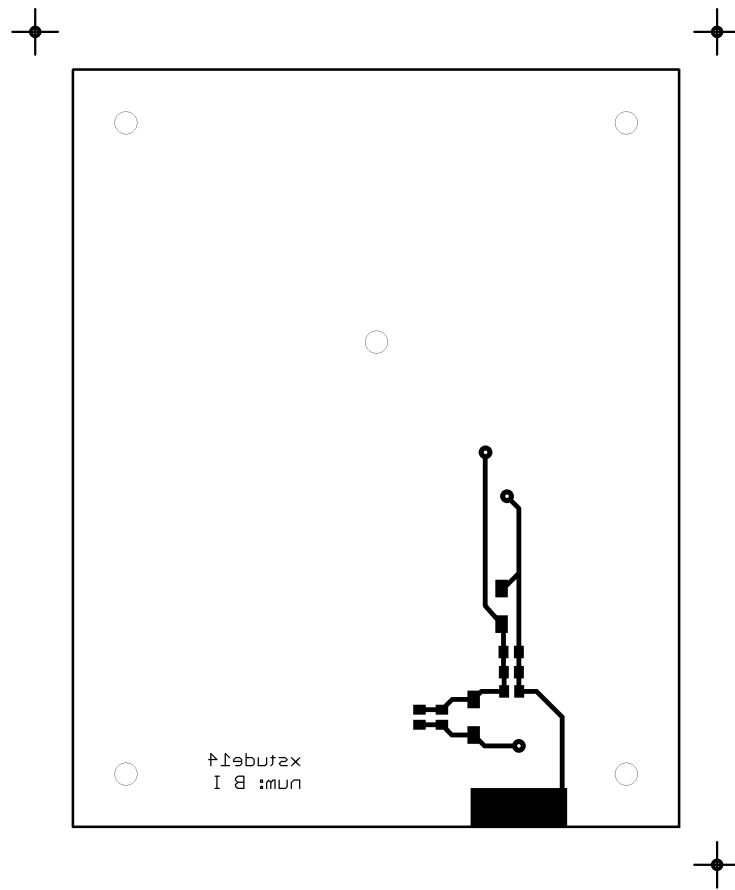
Obr. A.4: Deska plošného spoje cívky S_II, přední strana, M 1:1, rozměry desky 80x100 [mm]



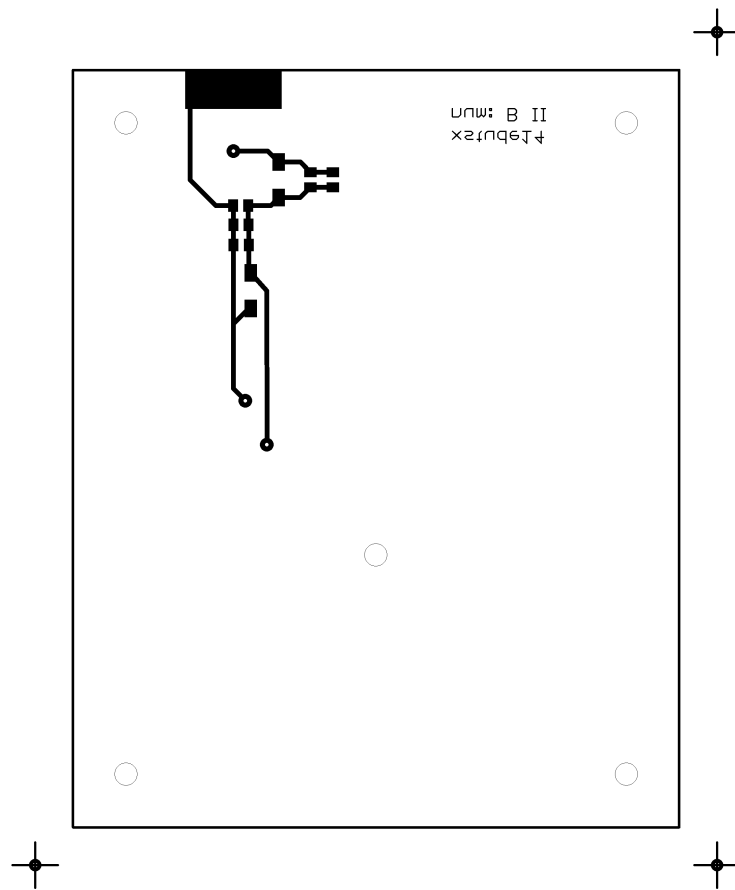
Obr. A.5: Deska plošného spoje cívky S_{II}, zadní strana, M 1:1, rozměry desky 80x100 [mm]



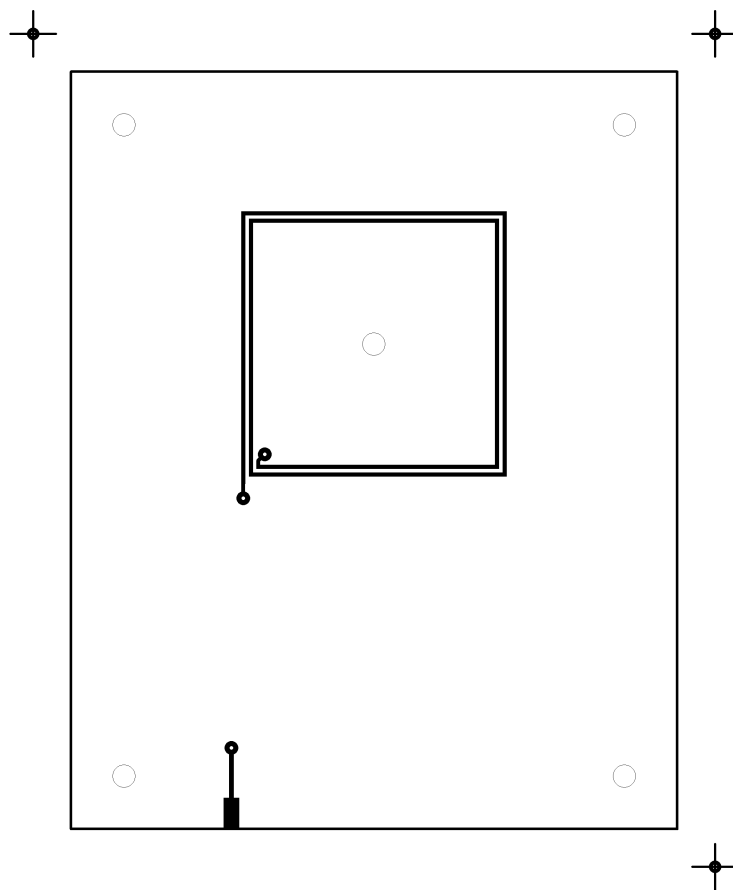
Obr. A.6: Deska plošného spoje cívky B_I, přední strana, M 1:1, rozměry desky 80x100 [mm]



Obr. A.7: Deska plošného spoje cívky B_I, zadní strana, M 1:1, rozměry desky 80x100 [mm]

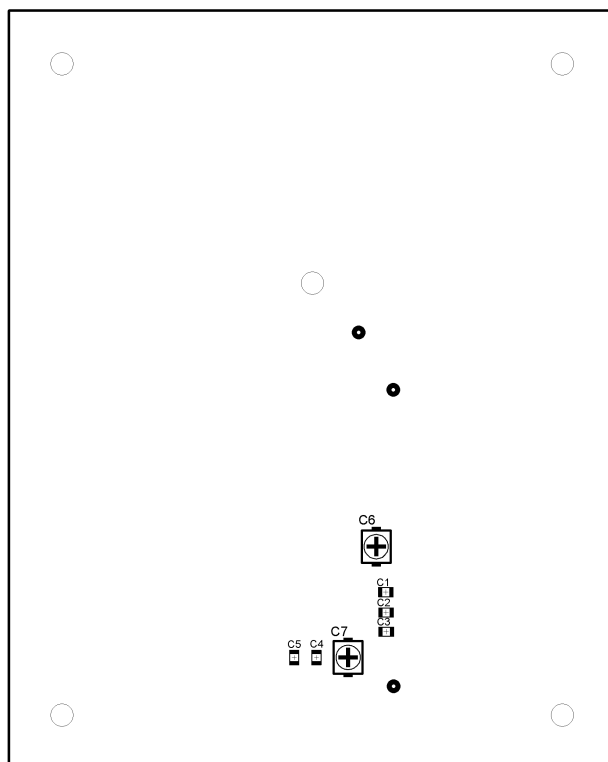


Obr. A.8: Deska plošného spoje cívky B_II, přední strana, M 1:1, rozměry desky 80x100 [mm]

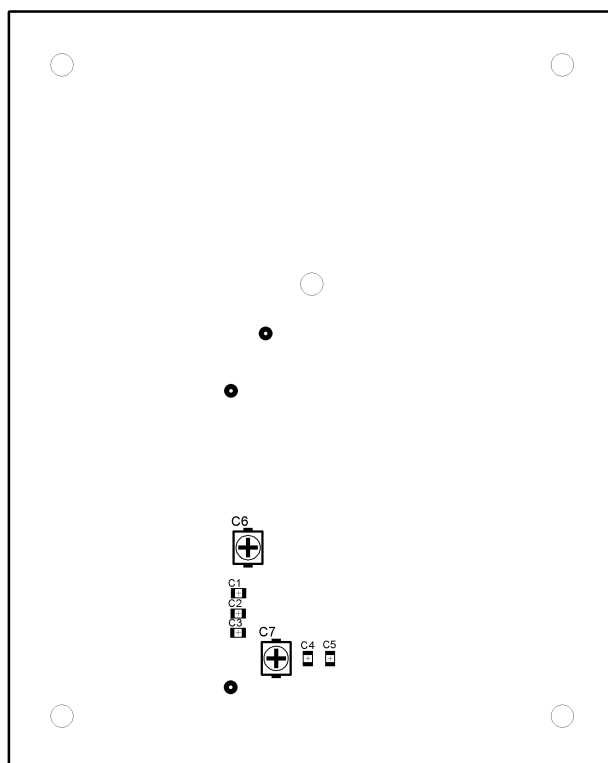


Obr. A.9: Deska plošného spoje cívky B_II, zadní strana, M 1:1, rozměry desky 80x100 [mm]

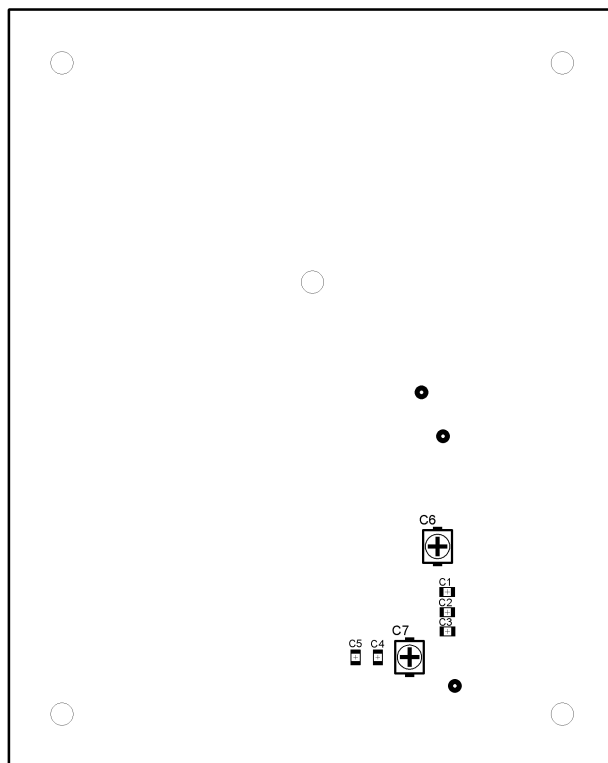
A.3 Osazovací plány



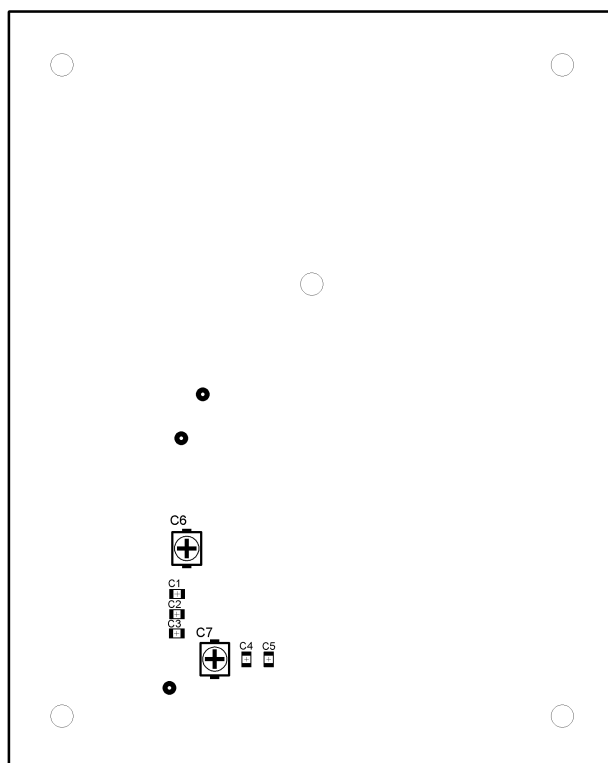
Obr. A.10: Osazovací plán cívky S_I



Obr. A.11: Osazovací plán cívky S_II



Obr. A.12: Osazovací plán cívky B_I



Obr. A.13: Osazovací plán cívky B_II

A.4 Seznamy součástí

Tab. A.1: Seznam součástek cívky S_I při konfiguraci S_I-S_II, 1 : 1

Označení	Hodnota	Pouzdro	Popis	Poznámka
C1	2x 68pF/50V	C0805	Keramický kondenzátor	Dva kondenzátory na jedné pozici
C2	68pF/50V	C0805	Keramický kondenzátor	
C3	100pF/50V	C0805	Keramický kondenzátor	
C4	2x 27pF/50V	C0805	Keramický kondenzátor	Dva kondenzátory na jedné pozici
C5	10pF/50V	C0805	Keramický kondenzátor	
C6	-	-	-	Neosazen
C7	-	-	-	Neosazen
SMA	Z=50Ω	32K441-500L5	SMA(f) konektor	Připájen na okraj desky

Tab. A.2: Seznam součástek cívky B_I při konfiguraci B_I-B_II, 1 : 1

Označení	Hodnota	Pouzdro	Popis	Poznámka
C1	-	-	-	Neosazen
C2	180pF/50V	C0805	Keramický kondenzátor	
C3	68pF/50V	C0805	Keramický kondenzátor	
C4	82pF/50V	C0805	Keramický kondenzátor	
C5	1pF/50V	C0805	Keramický kondenzátor	
C6	-	-	-	Neosazen
C7	-	-	-	Neosazen
SMA	Z=50 Ω	32K441-500L5	SMA(f) konektor	Připájen na okraj desky

Tab. A.3: Seznam součástek cívky S_II při konfiguraci S_II-B_I, 3 : 2

Označení	Hodnota	Pouzdro	Popis	Poznámka
C1	-	-	-	Neosazen
C2	27pF/50V	C0805	Keramický kondenzátor	
C3	270pF/50V	C0805	Keramický kondenzátor	
C4	68pF/50V	C0805	Keramický kondenzátor	
C5	1pF/50V	C0805	keramický kondenzátor	
C6	-	-	-	Neosazen
C7	-	-	-	Neosazen
SMA	Z=50Ω	32K441-500L5	SMA(f) konektor	Připájen na okraj desky

Tab. A.4: Seznam součástek cívky B_I při konfiguraci S_II-B_I, 3 : 2

Označení	Hodnota	Pouzdro	Popis	Poznámka
C1	-	-	-	Neosazen
C2	39pF/50V	C0805	Keramický kondenzátor	
C3	220pF/50V	C0805	Keramický kondenzátor	
C4	68pF/50V	C0805	Keramický kondenzátor	
C5	1pF/50V	C0805	keramický kondenzátor	
C6	-	-	-	Neosazen
C7	-	-	-	Neosazen
SMA	Z=50Ω	32K441-500L5	SMA(f) konektor	Připájen na okraj desky

Tab. A.5: Seznam součástek cívky S_I při konfiguraci S_I-S_II, 1 : 1, laditelná verze

Označení	Hodnota	Pouzdro	Popis	Poznámka
C1	270pF/50V	C0805	Keramický kondenzátor	
C2	20pF/50V	C0805	Keramický kondenzátor	
C3	-	-	-	Neosazen
C4	-	-	-	Neosazen
C5	39pF/50V	C0805	Keramický kondenzátor	
C6	8,5pF ÷ 40pF100V	R00	Kapacitní trimr	Neosazen
C7	6,5pF ÷ 30pF100V	R00	Kapacitní trimr	Neosazen
SMA	Z=50 Ω	32K441-500L5	SMA (f) konektor	Připájen na okraj desky

B OBSAH PŘILOŽENÉHO CD

- xstude14_bakalarskaprace.pdf