

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

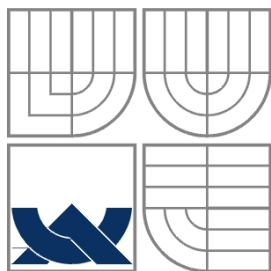
MINIATURNÍ ANTÉNA PRO MOBILNÍ APLIKACE

DIPLOMOVÁ PRÁCE
MASTER'S THESIS

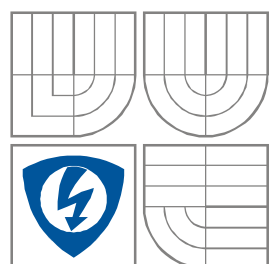
AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Bc. MAREK ŠMARDA

BRNO 2013



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

MINIATURNÍ ANTÉNA PRO MOBILNÍ APLIKACE

MINIATURE ANTENNA FOR MOBILE APPLICATIONS

DIPLOMOVÁ PRÁCE
MASTER'S THESIS

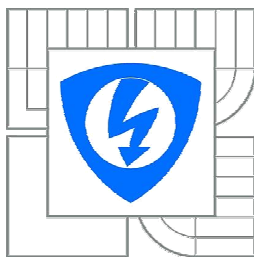
AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Bc. Marek Šmarda

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

Ing. Michal Pokorný, Ph.D.

BRNO 2013



VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

Ústav radioelektroniky

Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor
Elektronika a sdělovací technika

Student: Bc. Marek Šmarda

ID: 115132

Ročník: 2

Akademický rok: 2012/2013

NÁZEV TÉMATU:

Miniaturní anténa pro mobilní aplikace

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Seznamte se s principem metod zmenšování fyzických rozměrů planárních antén a vypracujte jejich přehled včetně kritického zhodnocení. Navrhněte a ve vhodném simulačním programu namodelujte miniaturní planární anténu pro vybrané kmitočtové pásmo. Konstrukci antény volte tak, aby dosahovala co největší šířky pásma při co nejmenších rozměrech. Návrh doplňte o přizpůsobovací obvod umožňující přeladování rezonančního kmitočtu antény o 15% a jeho funkčnost ověřte simulacemi. Anténu včetně přizpůsobovacího obvodu realizujte a experimentálně ověřte její vlastnosti.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

[1] BALANIS, A. C. Antenna Theory: Analysis and Design, 2/E. New York: J. Wiley & Sons, 1996.

[2] LEE, J. L. Quad-band PIFA for Mobile Phones. Syracuse: Syracuse University.
Online: <http://web.syr.edu/~sharidas>, 2004.

Termín zadání: 11.2.2013

Termín odevzdání: 24.5.2013

Vedoucí práce: Ing. Michal Pokorný, Ph.D.

Konzultanti diplomové práce:

prof. Dr. Ing. Zbyněk Raida
Předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

Autor diplomové práce nesmí při vytváření diplomové 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 části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

ABSTRAKT

Tato práce se zabývá nejznámějšími konstrukcemi planárních antén. Rozebírá vybrané metody připojení napájení planárních antén s možností impedančního přizpůsobení. Důležitou částí práce je popis technik pro zvětšení šířky pásma a naopak technik pro zmenšení rozměrů, které jsou důležité pro návrh planárních antén do mobilních zařízení. Za pomoci teoretických podkladů byly antény navrženy a v simulátoru elektromagnetického pole ověřeny jejich vlastnosti. Vybraný anténní model byl vyroben a experimentálně změřeny jeho parametry. K anténě byl navržen a vyroben přizpůsobovací obvod pro přeladění antény na jiný rezonanční kmitočet.

KLÍČOVÁ SLOVA

Flíčková anténa, šterbinová anténa, PIFA, fraktální anténa, čtvrtlnná rezonance, zkratovací stěna, zkratovací pin, permitivita, zatěžovací kapacita, parazitní rezonátor, přizpůsobovací obvod, přeladění kmitočtu, mikropáskové vedení, koplanární vedení, činitel odrazu, směrová charakteristika.

ABSTRACT

This work deals with the most famous constructions of planar antennas. The work analyses selected methods of connecting planar antennas' charging with the possibility of impedance adaptation. An important part of the work consists of description of techniques for increasing bandwidth and conversely techniques for reducing the dimensions which are important for the design of planar antennas for mobile devices. The antennas were designed by means of theoretical basis and their properties were examined in the electromagnetic field simulator. The selected antenna model was constructed and its parameters were measured experimentally. The matching circuit for the antenna to tune it to different resonant frequencies was designed and constructed.

KEYWORDS

Patch antenna, slot antenna, PIFA, fractal antenna, quarter wave resonance, shorting wall, shorting pin, permittivity, load capacitance, parasitic resonator, matching circuit, tuning frequency, microstrip line, coplanar waveguide, reflection coefficient, directional characteristic.

ŠMARDÁ, M. *Miniaturní anténa pro mobilní aplikace*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií. Ústav radioelektroniky, 2013. 74 s., 12 s. příloh. Diplomová práce. Vedoucí práce: Ing. Michal Pokorný, Ph.D

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že svoji diplomovou práci na téma Miniaturní anténa pro mobilní aplikace jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a jsou uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené diplomové práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této diplomové práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních nebo majetkových a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících 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.

V Brně dne 24. května 2013

.....

podpis autora

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji vedoucímu diplomové práce ing. Michalu Pokornému, Ph.D. za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování diplomové práce.

V Brně dne 24. května 2013

.....

podpis autora

OBSAH

OBSAH	1
SEZNAM OBRÁZKŮ	3
SEZNAM TABULEK	7
1. ÚVOD	8
2. PLANÁRNÍ ANTÉNY	9
2.1 Flíčková anténa	9
2.1.1. Napájení flíčkové antény mikropáskovým vedením	10
2.1.2 Napájení flíčkové antény koaxiální sondou.....	12
2.2 Štěrbinová anténa.....	13
2.3 PIFA.....	13
2.4 Fraktální antény.....	13
3. TECHNIKY PRO ZMENŠENÍ ROZMĚRŮ	15
3.1 Čtvrtvlnná rezonance.....	15
3.2 Změna rozměrů zkratovací stěny.....	15
3.3 Kapacitní zátěž	16
3.4 Použití materiálu s vysokou permitivitou.....	17
4. TECHNIKY PRO ZVĚTŠENÍ ŠÍŘKY PÁSMO	18
4.1 Vliv substrátu	18
4.2 Vliv rozměrů zemní plochy.....	19
4.3 Vliv poměru délky zkratovací stěny a šířky flíčku, poměry rozměrů flíčku	20
4.4 Použití přidavných parazitních rezonátorů.....	21
5. NÁVRH A SIMULACE MINIATURNÍ PLANÁRNÍ ANTÉNY	23
5.1 Miniaturní planární anténa se substrátem FR4.....	23
5.1.1 Obdélníková flíčková anténa.....	24
5.1.2 Použití zkratovací stěny	28
5.1.3 Použití zkratovacího pinu.....	30
5.1.4 Použití parazitního rezonátoru.....	33
5.2 Miniaturní planární anténa se substrátem IsoClad 933.....	36
5.2.1 PIFA s tvarem flíčku písmene C	38
5.2.2 PIFA s tvarem flíčku písmene U	40
5.2.3 PIFA s tvarem flíčku písmene H	43
5.2.4 PIFA s tvarem flíčku písmene HC.....	45
5.3 Shrnutí simulovaných antén	47

6. NÁVRH PŘIZPŮBOVACÍHO OBVODU	49
6.1 Přizpůsobovací obvod na mikropáskovém vedení.....	50
6.2 Přizpůsobovací obvod na koplanárním vedení	55
7. REALIZACE A MĚŘENÍ VYBRANÉ PLANÁRNÍ ANTÉNY	59
7.1 Realizace antény PIFA_H.....	59
7.2 Měření parametrů antény PIFA_H.....	60
7.3 Srovnání parametrů simulované a měřené antény PIFA_H.....	62
8. REALIZACE A MĚŘENÍ PŘIZPŮBOVACÍHO OBVODU	64
8.1 Realizace přizpůsobovacích obvodů	64
8.2 Měření přizpůsobovacích obvodů	65
9. ZÁVĚR	68
10. LITERATURA	71
11. SEZNAM SYMBOLŮ, VELIČIN A ZKRATEK	72
12. SEZNAM PŘÍLOH	75
13. OBSAH PŘILOŽENÉHO CD	86

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1 Obecná flíčková anténa : a) perspektivní pohled, b) boční pohled	9
Obr. 2 Základní nejjednodušší tvary flíčků [1]	9
Obr. 3 Mikropáskové napájení (pohled shora) [1]: a) s nezapuštěným vedením, b) se zapuštěným vedením, c) s kapacitní vazbou	10
Obr. 4 Vliv změny parametru y_0 u zapuštěného mikropáskového vedení na parametr $ s_{11} $ v dB	10
Obr. 5 Vliv změny parametru l_0 u zapuštěného mikropáskového vedení na parametr $ s_{11} $ v dB	11
Obr. 6 Vliv změny parametru g_0 u kapacitní vazby mikropáskového vedení na parametr $ s_{11} $ v dB	11
Obr. 7 Napájení flíčkové antény pomocí koaxiální sondy [1]: a) pohled shora, b) řez anténou.....	12
Obr. 8 Vliv změny parametru l_s u napájení koaxiální sondou v závislosti na parametru $ s_{11} $ v dB	12
Obr. 9 Štěrbinová anténa pohled shora: a) úzká štěrbinová [2], b) štěrbinová anténa s motýlkovým motivem [3].....	13
Obr. 10 Planární anténa typu obrácené F [4]: a) perspektivní pohled , b) řez anténou	14
Obr. 11 Iterační proces generování pomocí Von Kochových křivek [5].....	14
Obr. 12 Aplikace Von Kochovy křivky (iterace3) na obdélníkovou flíčkovou anténu [5]	14
Obr. 13 Rozložení elektrického pole mezi zemní plochou a flíčkem [6]	15
Obr. 14 Změna směru toku povrchových proudů v závislosti na poměrných rozměrech flíčku a zkratovací stěny [4]	16
Obr. 15 Konstrukce zatěžovací kapacity [4]: a) perspektivní pohled, b) pohled z boku.....	16
Obr. 16 Závislost přizpůsobení na frekvenci při změně zatěžovací kapacity [7]	17
Obr. 17 Vliv tloušťky h a permitivity materiálu ε_r na šířku pásma (pro $PSV < 2$) a účinnost antény [1]	19
Obr. 18 Závislost parametru $ s_{11} $ v dB na kmitočtu při změně permitivity materiálu flíčkové antény	19
Obr. 19 Závislost šířky pásma na změně rozměru zemní plochy [8]	20
Obr. 20 Závislost šířky pásma antény PIFA (pro $PSV < 1,5$) na jejich rozměrech a výšce substrátu h při $W_s/W_1 = 1$ [4].....	20
Obr. 21 Závislost šířky pásma antény PIFA (pro $PSV < 1,5$) na rozměrech zkratovací stěny a výšce substrátu h při $W_1/L_1 = 1$ [4]	21
Obr. 22 Konstrukce přídavných parazitních rezonátorů [4]: a) galvanicky vázaný rezonátor, b) kapacitně vázaný rezonátor, c) rezonátor tvaru „U“, d) rezonátor tvaru „L“	21

Obr. 23 Průběh permitivity substrátu FR4 v závislosti na kmitočtu [11].....	23
Obr. 24 Princip prodloužení délky obdélníkového flíčku [12]: a) řez anténou, b) pohled shora	24
Obr. 25 Obdélníková flíčková anténa (FA_P01) v simulátoru.....	25
Obr. 26 Průběh činitele odrazu pro obdélníkovou flíčkovou anténu na substrátu FR4 (FA_P01).....	26
Obr. 27 Vyzařovací charakteristika flíčkové antény FA_P01 na kmitočtu 2,45 GHz	26
Obr. 28 Rozložení elektrického pole flíčkové antény FA_P01 na kmitočtu 2,45 GHz.....	27
Obr. 29 Povrchové proudy antény FA_P01 na kmitočtu 2,45 GHz.....	27
Obr. 30 Obdélníková flíčková anténa se zkratovací stěnou (FA_P02)	28
Obr. 31 Průběh činitele odrazu pro anténu FA_P02.....	28
Obr. 32 Vyzařovací charakteristika antény FA_P02 na kmitočtu 2,45 GHz.....	29
Obr. 33 Rozložení elektrického pole antény FA_P02 na kmitočtu 2,45 GHz	29
Obr. 34 Povrchové proudy antény FA_P02 na kmitočtu 2,45 GHz	30
Obr. 35 Obdélníková flíčková anténa se zkratovacím pinem (FA_P03)	31
Obr. 36 Průběh činitele odrazu pro anténu FA_P03.....	31
Obr. 37 Vyzařovací charakteristika antény FA_P03 na kmitočtu 2,45 GHz.....	32
Obr. 38 Povrchové proudy antény FA_P03.....	32
Obr. 39 Obdélníková flíčková anténa se zkratovacím pinem a parazitním rezonátorem (FA_P04).....	33
Obr. 40 Průběh činitele odrazu pro anténu FA_P04.....	34
Obr. 41 Vyzařovací charakteristika antény FA_P04 na kmitočtu 2,45 GHz.....	34
Obr. 42 Povrchové proudy antény FA_P04 na kmitočtu 2,4245 GHz	35
Obr. 43 Povrchové proudy antény FA_P04 na kmitočtu 2,4847 GHz	35
Obr. 44 Průběh činitele odrazu pro anténu PIFA_P01	36
Obr. 45 Průběh činitele odrazu pro anténu PIFA_P02	37
Obr. 46 Povrchové proudy antény PIFA_P02 na kmitočtu 2,45 GHz.....	38
Obr. 47 Anténa PIFA s tvarem flíčku písmene C.....	38
Obr. 48 Průběh činitele odrazu pro anténu PIFA_C	39
Obr. 49 Vyzařovací charakteristika antény PIFA_C na kmitočtu 2,45 GHz.....	40
Obr. 50 Povrchové proudy antény PIFA_C na kmitočtu 2,45 GHz	40
Obr. 51 Anténa PIFA s tvarem flíčku písmene U.....	41
Obr. 52 Průběh činitele odrazu pro anténu PIFA_U	41
Obr. 53 Vyzařovací charakteristika antény PIFA_U na kmitočtu 2,45 GHz.....	42
Obr. 54 Povrchové proudy antény PIFA_U na kmitočtu 2,45 GHz	42

Obr. 55 Anténa PIFA s tvarem flíčku písmene H.....	43
Obr. 56 Průběh činitele odrazu pro anténu PIFA_H.....	44
Obr. 57 Vyzařovací charakteristika antény PIFA_H na kmitočtu 2,45 GHz.....	44
Obr. 58 Povrchové proudy antény PIFA_H na kmitočtu 2,45 GHz	45
Obr. 59 Anténa PIFA s tvarem flíčku písmene HC	45
Obr. 60 Průběh činitele odrazu pro anténu PIFA_HC	46
Obr. 61 Vyzařovací charakteristika antény PIFA_HC na kmitočtu 2,45 GHz	46
Obr. 62 Povrchové proudy antény PIFA_HC na kmitočtu 2,45 GHz	47
Obr. 63 Grafické znázornění šířky pásma B a zisku G na objemu antény V pro modely antén PIFA.....	48
Obr. 64 Blokové schéma zapojení přizpůsobovacího obvodu.....	49
Obr. 65 Ideální přeladění antény pomocí přizpůsobovacího obvodu o 15%	49
Obr. 66 Půlčlankové obvody pro přizpůsobení impedance [10]	50
Obr. 67 Transformace mikropáskového vedení na konformní zobrazení [14].....	50
Obr. 68 Smithův diagram pro simulovanou impedanci antény	52
Obr. 69 Kapacitní pahýl: a) realizace z mikropásku [14], b) idealizovaný náhradní obvod	52
Obr. 70 Meandrový induktor: a) realizace z mikropásku [14], b) idealizovaný náhradní obvod	53
Obr. 71 Návrh přizpůsobení pomocí Smithova diagramu.....	54
Obr. 72 Model přizpůsobovacího obvodu ve formě mikropáskového vedení a) pro nižší kmitočet f_d , b) pro vyšší kmitočet f_h	54
Obr. 73 Činitel odrazu přizpůsobovacího obvodu pro nižší kmitočet f_d	55
Obr. 74 Činitel odrazu přizpůsobovacího obvodu pro nižší kmitočet f_h	55
Obr. 75 Koplanární vedení: a) pohled shora, b) pohled zepředu.....	56
Obr. 76 Blokové schéma pro simulaci ideálních součástek půlčlanku	56
Obr. 77 Činitel odrazu přizpůsobovacího obvodu s ideálními součástkami pro nižší frekvenci f_d	57
Obr. 78 Činitel odrazu přizpůsobovacího obvodu s ideálními součástkami pro vyšší frekvenci f_h	57
Obr. 79 Model přizpůsobovacího obvodu v simulačním programu.....	58
Obr. 80 Činitel odrazu přizpůsobovacího obvodu s reálnými součástkami pro nižší a vyšší frekvenci	58
Obr. 81 Řez anténní strukturou PIFA_H.....	59
Obr. 82 Fotografie vyrobené antény PIFA_H	59
Obr. 83 Činitel odrazu realizované antény PIFA_H.....	60
Obr. 84 Směrové charakteristiky měřené antény PIFA_H v rovině E	61

Obr. 85 Směrové charakteristiky měřené antény PIFA_H v rovině H	61
Obr. 86 Srovnání činitele odrazu simulované a měřené antény PIFA_H.....	62
Obr. 87 Srovnání směrové charakteristiky měřené a simulované antény PIFA_H v rovině E	62
Obr. 88 Srovnání směrové charakteristiky měřené a simulované antény PIFA_H v rovině H	63
Obr. 89 Fotografie vyrobených mikropáskových přizpůsobovacích obvodů a) pro nižší kmitočet f_d , b) pro vyšší kmitočet f_h	64
Obr. 90 Fotografie vyrobených koplanárních přizpůsobovacích obvodů a) pro nižší kmitočet f_d , b) pro vyšší kmitočet f_h	64
Obr. 91 Činitel odrazu přizpůsobovacího obvodu na mikropáskovém vedení pro nižší kmitočet f_d připojený k anténě PIFA_H	65
Obr. 92 Činitel odrazu přizpůsobovacího obvodu na mikropáskovém vedení pro vyšší kmitočet f_h připojený k anténě PIFA_H.....	65
Obr. 93 Činitel odrazu přizpůsobovacího obvodu na koplanárním vedení pro nižší kmitočet f_d připojený k anténě PIFA_H.....	66
Obr. 94 Činitel odrazu přizpůsobovacího obvodu na koplanárním vedení pro vyšší kmitočet f_h připojený k anténě PIFA_H.....	66

SEZNAM TABULEK

Tab. 1 Rozměry obdélníkové flíčkové antény FA_P01	25
Tab. 2 Výsledné parametry pro flíčkovou anténu FA_P01	27
Tab. 3 Rozměry antény FA_P02	28
Tab. 4 Výsledné parametry pro flíčkovou anténu FA_P02	30
Tab. 5 Rozměry antény FA_P03	31
Tab. 6 Výsledné parametry pro flíčkovou anténu FA_P03	33
Tab. 7 Rozměry antény FA_P04	34
Tab. 8 Výsledné parametry pro flíčkovou anténu FA_P04	35
Tab. 9 Rozměry antény PIFA_P01	37
Tab. 10 Výsledné parametry pro anténu PIFA_P01	37
Tab. 11 Rozměry antény PIFA_P02	37
Tab. 12 Výsledné parametry pro anténu PIFA_P02	37
Tab. 13 Rozměry antény PIFA_C	39
Tab. 14 Výsledné parametry pro anténu PIFA_C	39
Tab. 15 Rozměry antény PIFA_U	41
Tab. 16 Výsledné parametry pro anténu PIFA_U	43
Tab. 17 Rozměry antény PIFA_H	43
Tab. 18 Výsledné parametry pro anténu PIFA_H	44
Tab. 19 Rozměry antény PIFA_HC	46
Tab. 20 Výsledné parametry pro anténu PIFA_HC	47
Tab. 21 Shrnutí simulovaných antén v přehledné tabulce	48
Tab. 22 Určení konstanty K_n ze znalosti n	53

1. ÚVOD

Už v roce 1865 americký fyzik James Clerk Maxwell položil teoretický základ pro bezdrátové přenosy, když matematicky odvodil existenci elektromagnetických vln, které se šíří rychlostí světla. V roce 1888 Heinrich Rudolf Hertz prakticky ověřil tvrzení Maxwellovy teorie. Guglielmo Marehese Marconi uskutečnil v roce 1901 přenos přes Atlantik. Nastal velký rozvoj převážně drátových antén.

Koncem roku 1947 objevila skupina vědců v Bellových laboratořích (USA) polovodičový tranzistor. Nastalo zmenšování zařízení, tím i zmenšování antén. Druhá vlna zmenšování antén byla způsobena přechodem na vyšší volná kmitočtová pásma. Těmto zmenšováním rozměrů, hlavně v zařízeních, vyhovovaly díky svému nízkému profilu planární antény. Jejich první vývoj byl ve vojenské technice, kde bylo potřeba, aby antény kopírovaly povrch letadel.

V dnešní době nalézají planární antény největší využití v bezdrátových komunikacích, zejména v mobilních zařízeních, kde je potřeba v závislosti na pracovních kmitočtech upravit jejich rozměr, resp. zmenšit do rozměrů pouzdra zařízení. Zmenšení se dosahuje různými technikami, které budou v této práci uvedeny. Další negativní vlastností planárních antén pro použití do mobilních zařízení je nižší šířka pásma na pracovním kmitočtu. I pro tuto negativní vlastnost se používají různé techniky pro zvětšení šířky pásma, které budou též v této práci zahrnuty.

Prvním cílem této práce bude navrhnout miniaturní planární anténu pro ISM pásmo. Navrhnutá anténa by měla mít co nejmenší rozměry a šířkou pásma pokrýt požadavky na ISM pásmo. Těchto parametrů by se mělo dosáhnout za pomoci teoretických poznatků uvedených v této práci. K simulacím bude použit komplexní program CST STUDIO SUITE. Za pomoci kompromisu mezi protichůdnými parametry, kterými jsou právě šířka pásma a rozměry struktury, bude vybrán jeden model simulovaných antén, který bude vyroben a experimentálně budou ověřeny jeho vlastnosti.

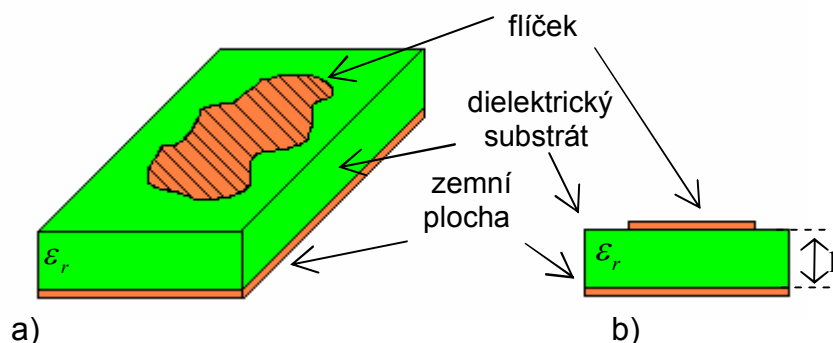
Druhým cílem bude k realizované anténě navrhnout přizpůsobovací obvod pro přeladění rezonančního kmitočtu antény na jiný požadovaný kmitočet. Poté navrhnuté obvody vyrobí a experimentálně ověřit jejich vlastnosti s připojenou realizovanou anténou.

2. PLANÁRNÍ ANTÉNY

Planární antény někdy nazývané jako mikropáskové antény (*microstrip antenna*) jsou velice rozšířené antény díky svým rozměrům a malé váze. Další výhodou je slučitelnost s technologií desek plošných spojů (DPS), možnost vytvoření různorodých motivů pro různé vlastnosti, vysoký činitel jakosti antény Q a nízké náklady na výrobu. Tyto antény mají i své nevýhody, mezi které patří nízká efektivita vyzařování, nízká výkonová zatížitelnost a parazitní (nežádoucí) vyzařování napájení. Jak bylo uvedeno, anténa má vysokou jakost, která však vede ke snížení šířky pásma (do 5%).

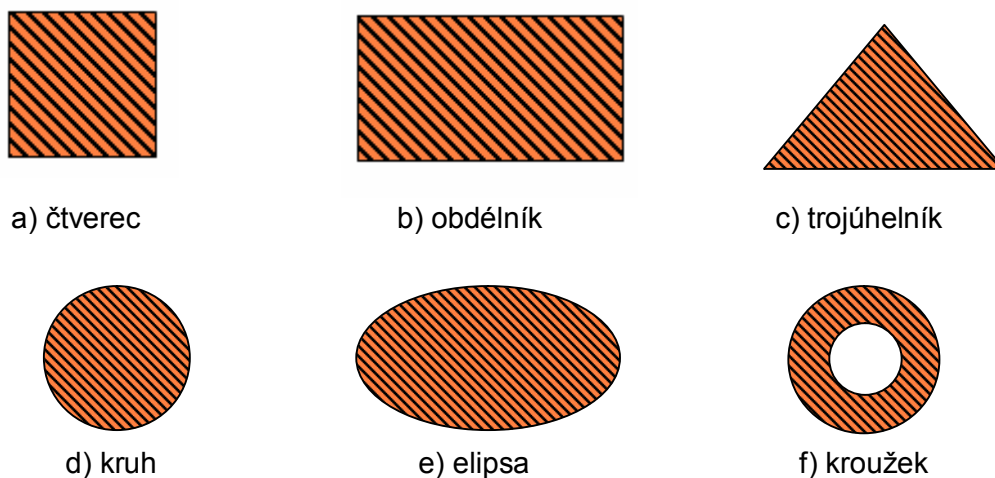
2.1 Flíčková anténa

Skládá se z kovového motivu naneseného na dielektrický substrát, který má relativní permitivitu ϵ_r . Na spodní straně dielektrického substrátu je kovová zemní deska viz obr. 1.



Obr. 1 Obecná flíčková anténa : a) perspektivní pohled, b) boční pohled

Tvary flíčků jsou různé, na obr. 1 je zobrazen obecný tvar. Na obr. 2 jsou zobrazeny nejjednodušší používané tvary flíčků. Jsou to jednoduché geometrické tvary. Některé tvary flíčků připomínají písmena abecedy, např. tvar písmene H, C, U, E, L.

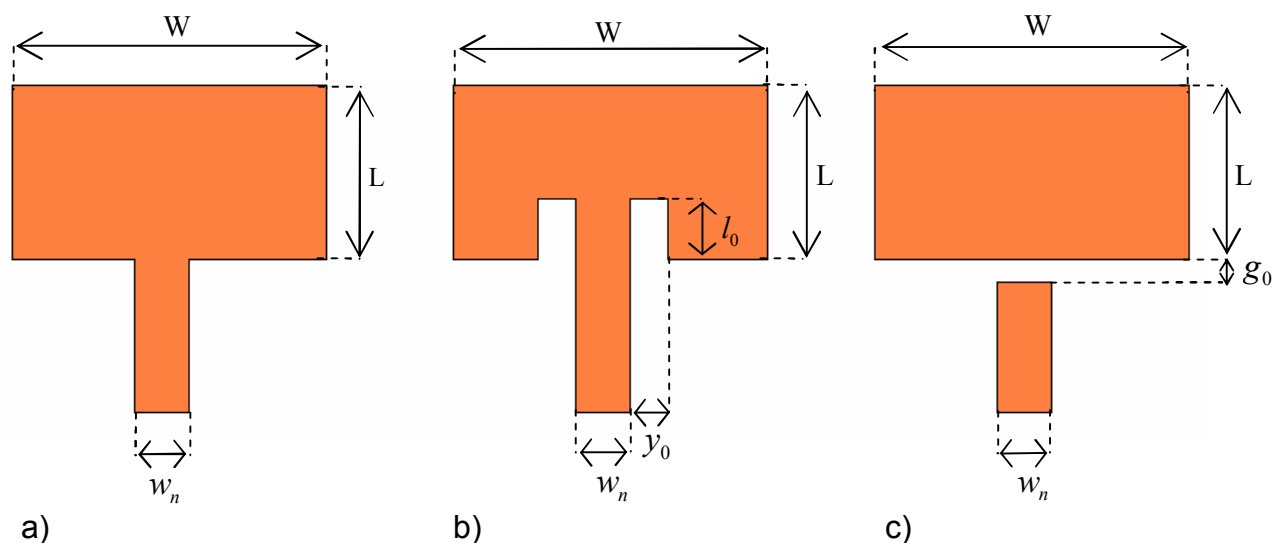


Obr. 2 Základní nejjednodušší tvary flíčků [1]

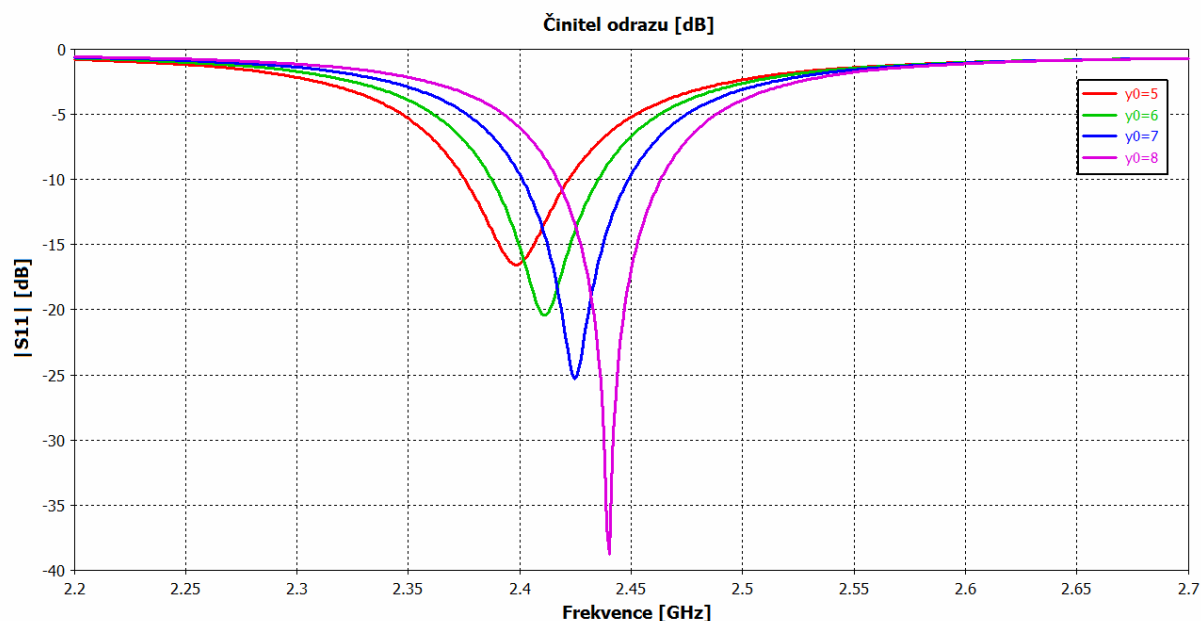
Flíčkové antény se nejčastěji napájejí pomocí mikropáskového vedení nebo koaxiální sondy. Obecně lze těmito způsoby napájet i další druhy planárních antén.

2.1.1. Napájení flíčkové antény mikropáskovým vedením

Základní provedení mikropáskového napájení je s nezapuštěným vedením, se zapuštěným vedením a s kapacitní vazbou (viz obr 3). Mikropáskové vedení má šířku w_n a „libovolnou délku“, protože nemá vliv na charakteristickou impedanci vedení Z_0 . U nezapuštěného vedení bývá problém s impedančním přizpůsobením, protože na okraji flíčku je větší impedance. Z toho důvodu se používá zapuštěné mikropáskové vedení, které má lepší impedanční přizpůsobení. Vedení je zapuštěno o délku l_0 do flíčku a mezi flíčkem a mikropáskovým vedením se vytvoří mezera o rozměru y_0 (viz obr. 3). Napájení flíčku mikropáskovým vedením s kapacitní vazbou vznikne vytvořením mezery mezi flíčkem a vedením o rozměru g_0 .



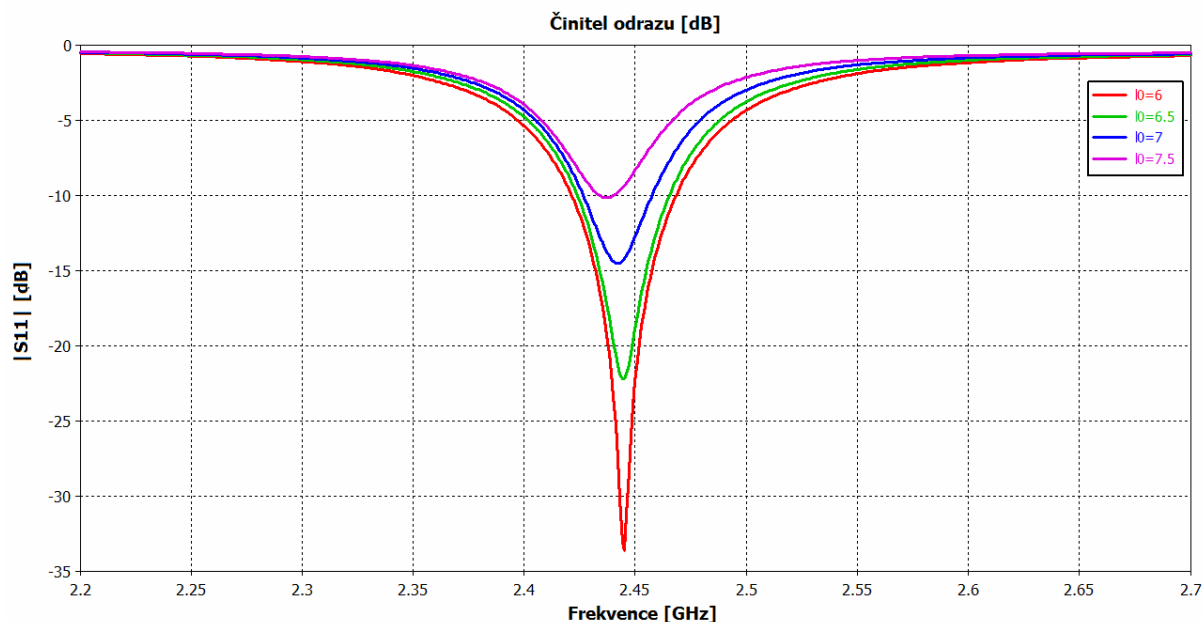
Obr. 3 Mikropáskové napájení (pohled shora) [1]: a) s nezapuštěným vedením, b) se zapuštěným vedením, c) s kapacitní vazbou



Obr. 4 Vliv změny parametru y_0 u zapuštěného mikropáskového vedení na parametr $|S_{11}|$ v dB

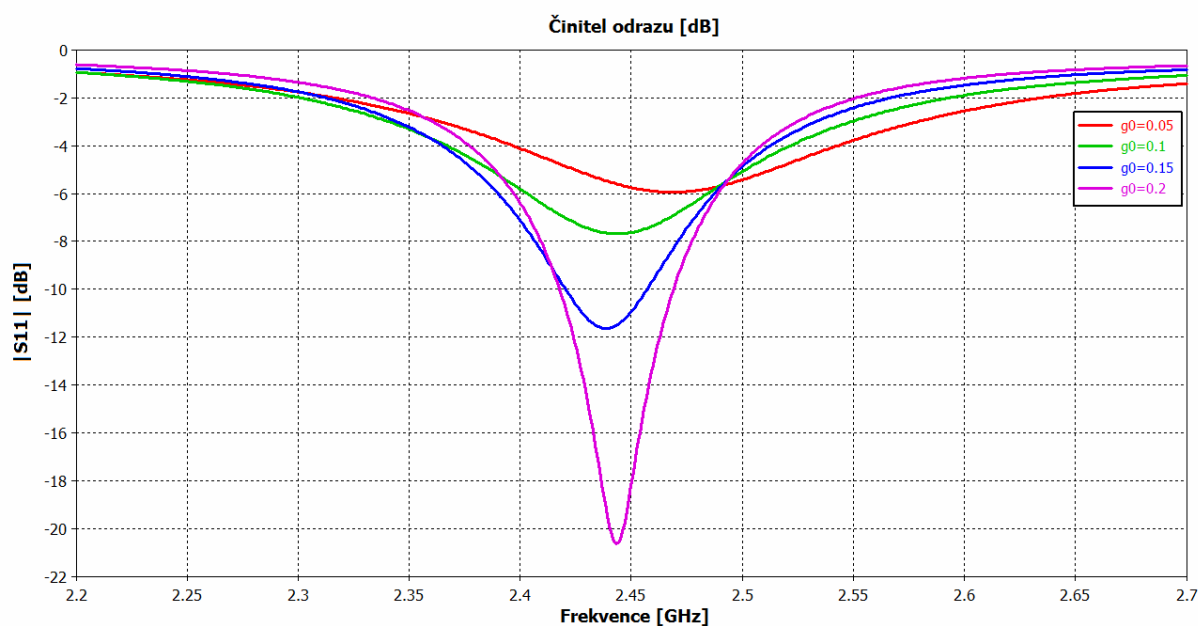
Flíček má rozměry $W = 38,32$ mm, $L = 29,5$ mm, a $t_p = 0,035$ mm. Dielektrikum má výšku $h = 1,58$ mm. Šířka napájecího vedení je $w_n = 3,2$ mm, vedení je do flíčku zapuštěno $l_0 = 6,11$ mm. Bude se rozmiňat parametr y_0 (viz obr. 4) a sledovat vliv na parametr $|s_{11}|$ v decibelové míře.

Rozměry antény zůstanou zachovány, parametr y_0 bude konstantní s hodnotou $y_0 = 8,33$ mm. Jediný rozmiňaný parametr bude l_0 (viz obr. 5).



Obr. 5 Vliv změny parametru l_0 u zapuštěného mikropáskového vedení na parametr $|s_{11}|$ v dB

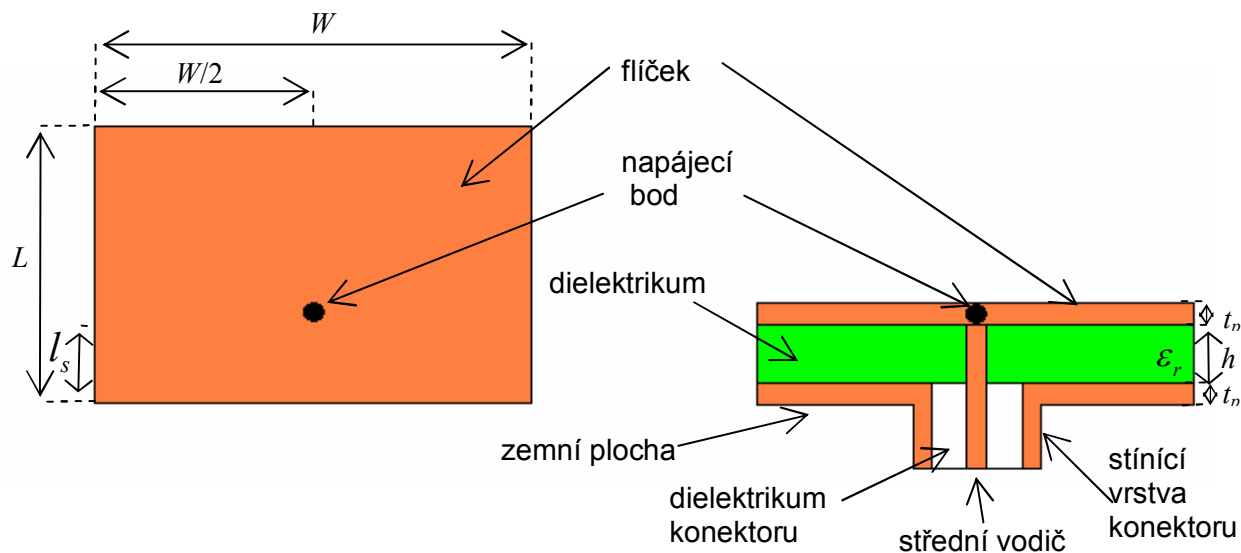
Rozměry flíčku jsou $W = 38,32$ mm, $L = 26,5$ mm, $w_n = 3,2$ mm. Použité je mikropáskové napájení s kapacitní vazbou (obr. 3.c). Rozmiňaný parametr je mezera mezi flíčkem a mikropáskovým vedením g_0 (viz obr. 6).



Obr. 6 Vliv změny parametru g_0 u kapacitní vazby mikropáskového vedení na parametru $|s_{11}|$ v dB

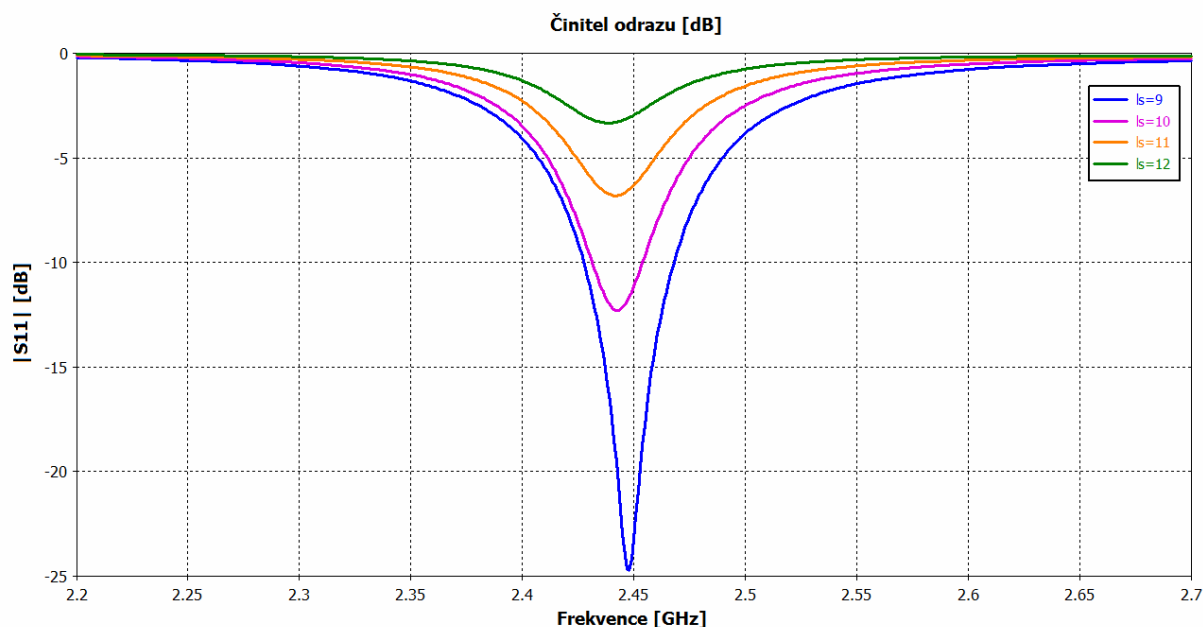
2.1.2 Napájení flíčkové antény koaxiální sondou

Střední vodič použitého konektoru je připojen k flíčku v bodě, který je dán $W/2$ a l_s přesně podle obr. 7. Stínicí vrstva konektoru je vodivě spojena se zemní plochou. Velká výhoda oproti mikropáskovému napájení je, že výrazně potlačuje parazitní vyzařování napájecího vedení. Impedanční přizpůsobení se provede změnou parametru l_s . Nevýhodou oproti mikropáskovému vedení je o něco složitější výroba.



Obr. 7 Napájení flíčkové antény pomocí koaxiální sondy [1]: a) pohled shora, b) řez anténou

Máme flíček s rozměry $W = 38,31$ mm a $L = 28,72$ mm. Výše bylo zmíněno, že impedančně lze anténu přizpůsobit změnou parametru l_s (obr. 8).

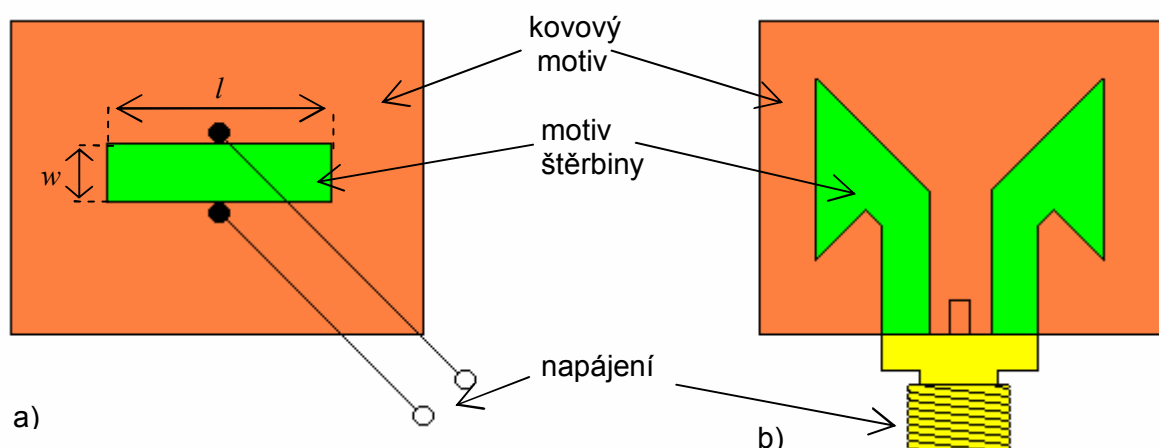


Obr. 8 Vliv změny parametru l_s u napájení koaxiální sondou v závislosti na parametru $|S_{11}|$ v dB

2.2 Štěrbínová anténa

Jak vyplývá z názvu, hlavním anténním prvkem je štěrbina. Nejjednodušší štěrbínová anténa vznikne vyleptáním úzké kovové vrstvy o šířce w a délce l (viz obr. 9.a). Štěrbina se napájí dvoudrátovým vedením, koaxiálním konektorem nebo vlnovodem. Délka štěrbiny bývá $l = \lambda/2$ a šířka štěrbiny $w \ll \lambda$.

Při použití složitějšího tvaru štěrbiny lze dosáhnout větší šířky pásma. Jako příklad je uveden motýlkový motiv štěrbínové antény (obráz. 9.b), kde jako napájení může být použit koaxiální konektor (SMA, N).



Obr. 9 Štěrbínová anténa pohled shora: a) úzká štěrbina [2], b) štěrbínová anténa s motýlkovým motivem [3]

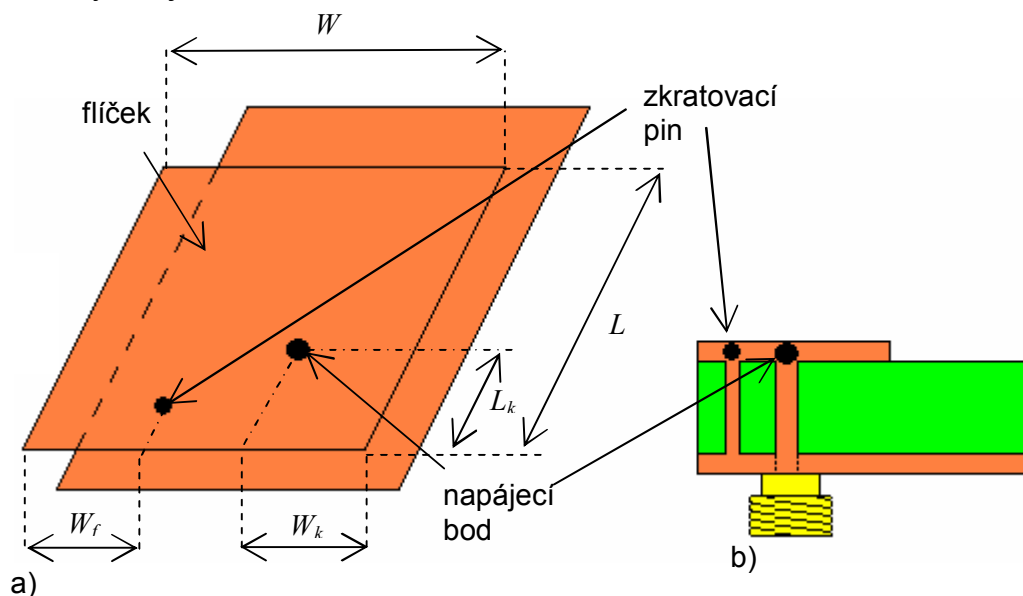
2.3 PIFA

Jedná se o planární anténu typu obrácené F, kde PIFA je zkratka z anglických slov "*Planar Inverted F Antenna*". Tato anténa se skládá z flíčku, zemní plochy, zkratovacího pinu (resp. zkratované stěny), koaxiální sondy a dielektrika (viz obr. 10). Jako dielektrikum se využívá vzduch. Z obr. 10.b je vidět, proč se anténa nazývá obrácené F. Anténa má díky své konstrukci malé rozměry a většinou bývá využívána v mobilních zařízeních.

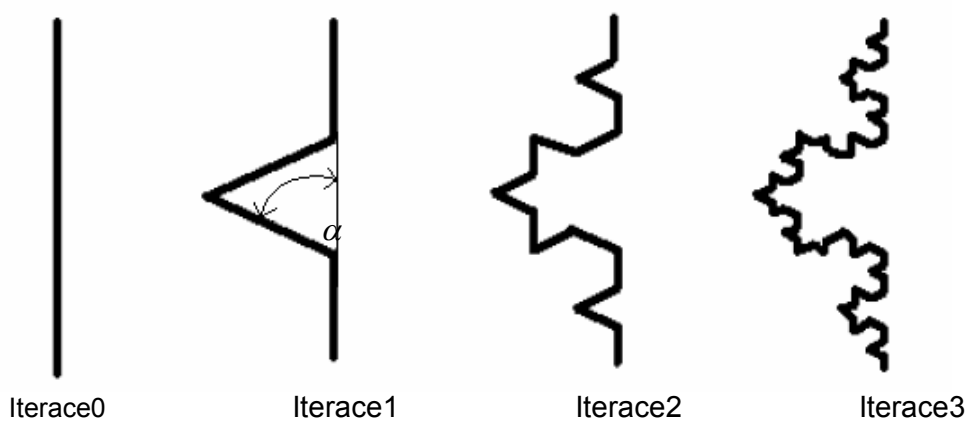
2.4 Fraktální antény

Jedná se o aplikaci fraktálu při návrhu planárních antén. Pojem „fraktál“ znamená lomený nebo zlomkový tvar. Konstrukce zlomkové struktury probíhá iteračním procesem (obráz. 11), kde počáteční struktura, kterou nazýváme generátor, je zmnohonásobena v různých měřítkách, polohách a směrech v závislosti na počtu iteračních kroků. Na obr. 11 je iterační proces generování pomocí Von Kochových křivek. Nulová iterace značí křivku bez použití generace. Nulová iterace se rozdělí na tři části, v prostřední části se vytvoří „zoubek“ pod určitým úhlem α a vznikne první iterace. V dalších iteračních krocích se křivka v různých polohách rozdělí na tři části a v prostřední se vytvoří „zoubek“ (čím vyšší krok iterace, tím menší měřítko zoubku). Iterace se v třetím kroku zastavila a vytvořená křivka se aplikovala na obdélníkovou

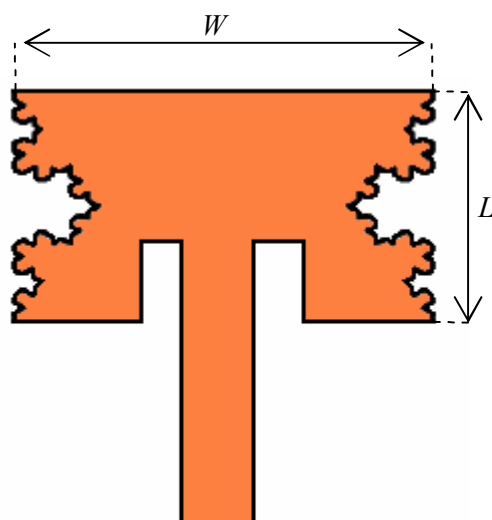
flíčkovou anténu (viz obr. 12). Aplikace byla provedena na délku flíčku L , poněvadž se jedná o vyzařující hranu.



Obr. 10 Planární anténa typu obrácené F [4]: a) perspektivní pohled , b) řez anténou



Obr. 11 Iterační proces generování pomocí Von Kochových křivek [5]



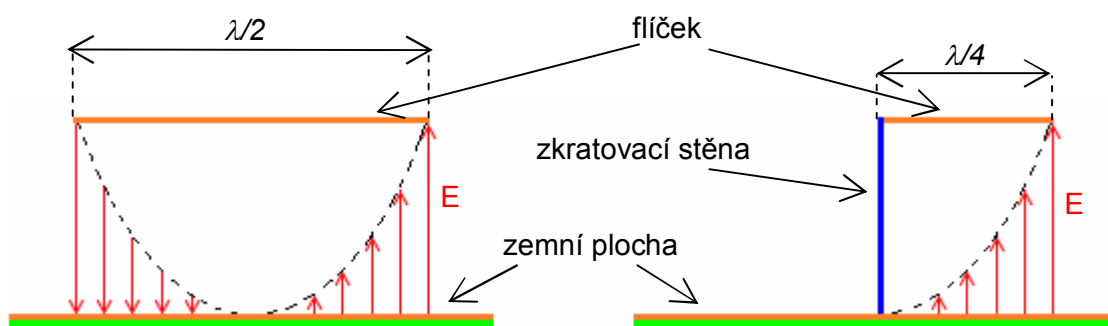
Obr. 12 Aplikace Von Kochovy křivky (iterace3) na obdélníkovou flíčkovou anténu [5]

3. TECHNIKY PRO ZMENŠENÍ ROZMĚRŮ

Při návrhu antén jsou velké nároky kladeny na rozměry. Většina běžně používaných antén pracuje v půlvlnné rezonanci. Za předpokladu, že mobilní zařízení pracuje v primárním systému GSM, kde se pracovní kmitočty nacházejí v okolí 900 MHz, budou se rozměry antény v půlvlnné rezonanci pohybovat okolo 16 cm. Tato kapitola se zabývá technikami, které se používají pro zmenšení rozměrů antén.

3.1 Čtvrtvlnná rezonance

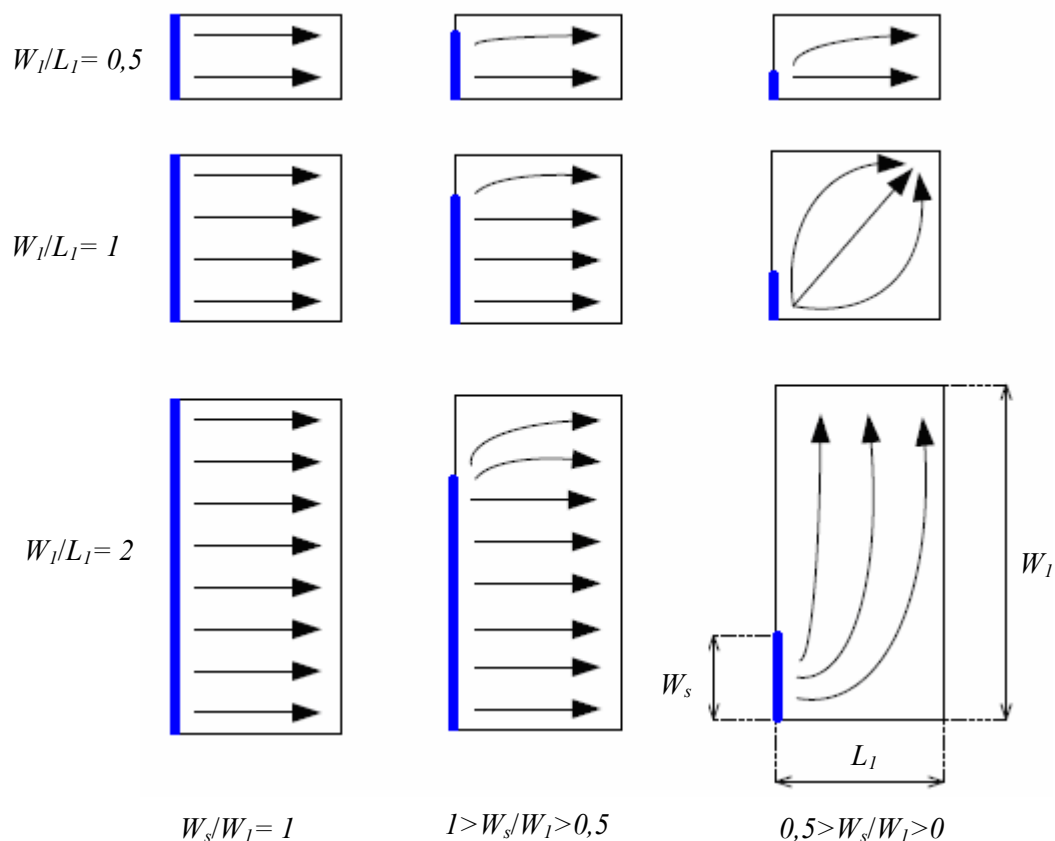
Velkého zmenšení rozměrů se dosáhne přechodem z půlvlnné rezonance na rezonanci čtvrtvlnnou. K tomuto přechodu je potřeba znát rozložení elektrického pole v dielektriku mezi flíčkem a zemní plochou. Toto rozložení pole je na obr. 13. Průběh je tvořený funkcí cosinus, která dosahuje svého maxima na obou stranách hran flíčku. Z obr. 13 je vidět, že podle orientace šipek jsou maxima vzájemně otočená o 180° . Naopak minimum neboli nulovou hodnotu dosahuje přesně uprostřed struktury. Zde je vhodné místo pro vložení zkratovací stěny. Tímto zásahem neovlivníme rozložení elektrického pole ani rezonanční kmitočet. Vznikne nám čtvrtvlnná struktura.



Obr. 13 Rozložení elektrického pole mezi zemní plochou a flíčkem [6]

3.2 Změna rozměrů zkratovací stěny

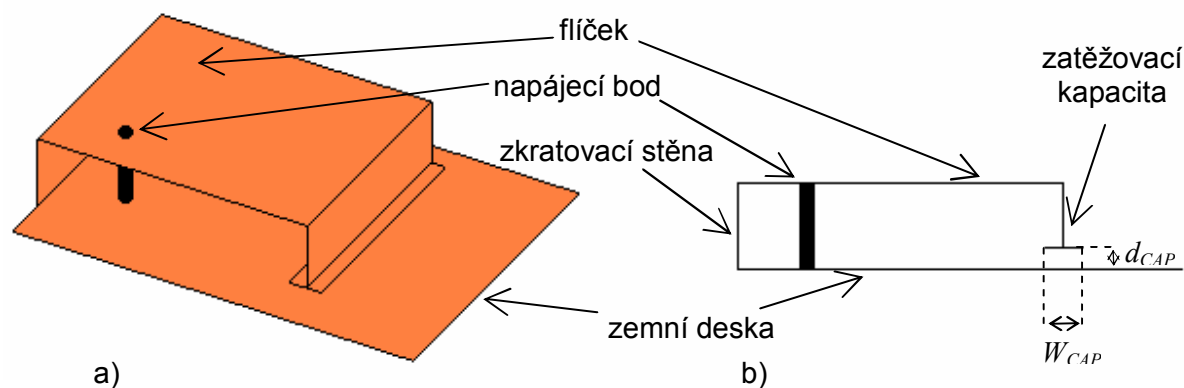
V kapitole 3.1 se ke zmenšení rozměrů použila zkratovací stěna, která se umístila přesně podle obr. 13. Vhodnou volbou rozměrů zkratovací stěny lze redukovat rozměry antény. Bude zavedena proměnná W_s , což je délka zkratovací stěny a poměr mezi touto proměnnou a rozměrem hrany flíčku W_s/W_l . Pokud je hodnota poměru rovna jedné, zkratovací stěna je přes celou hranu flíčku. Ke zmenšení rozměrů dojde, jestliže je poměr menší jak jedna, kdy dojde k elektrickému prodloužení antény. Takže při stejném rezonančním kmitočtu se zmenší rozměry antény [4]. Na obr. 14 je zobrazeno rozložení proudů v závislosti na poměrech W_s/W_l a W_l/L_l , kde modrou barvou je vyznačena zkratovací stěna a uvnitř flíčku jsou vyznačeny šipkami směry toku povrchových proudů. Největší zmenšení rozměru je při poměrech $0,5 > W_s/W_l > 0$ a $W_l/L_l = 2$.



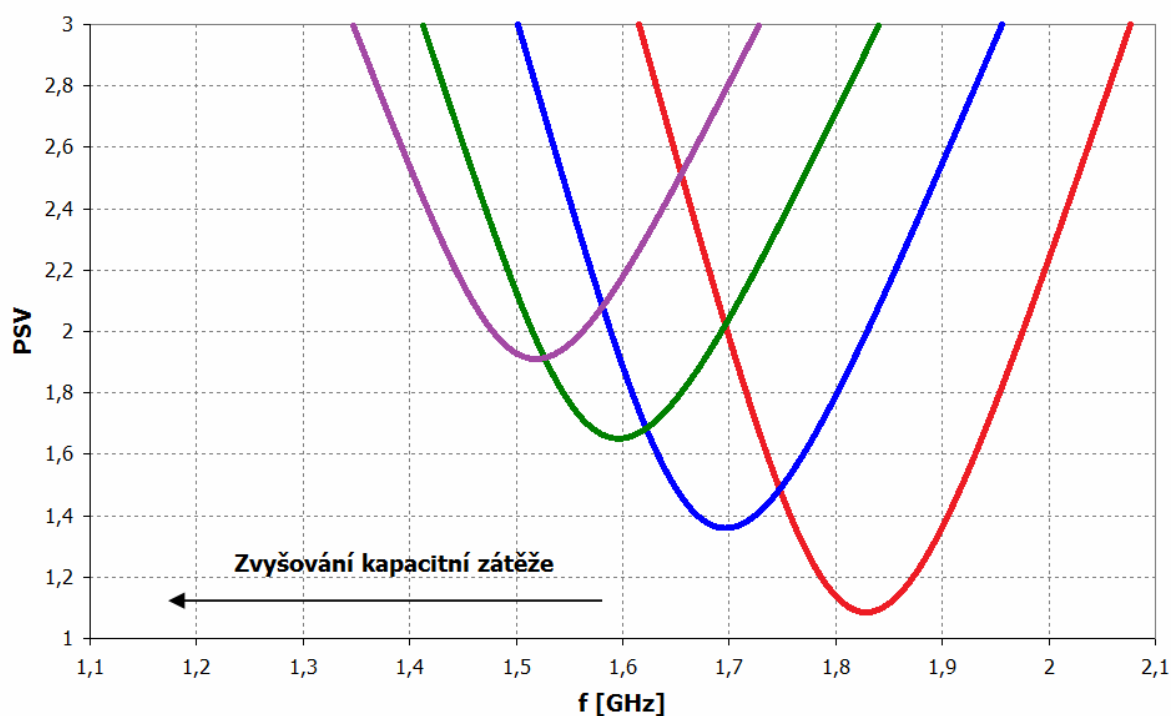
Obr. 14 Změna směru toku povrchových proudů v závislosti na poměrných rozměrech flíčku a zkratovací stěny [4]

3.3 Kapacitní zátěž

Další technika, jak snížit fyzické rozměry antény elektrickým prodloužením struktury, je přidání kapacitní zátěže. Naproti zkratované stěně se hrana flíčku přeloží kolmo na zemní desku a zakončí se vodivou destičkou, která je rovnoběžná se zemní plochou. Tato konstrukce je na obr. 15. Hodnotu kapacity zátěže, resp. rezonanční kmitočet nově vytvořené struktury můžeme měnit změnou rozměrů W_{CAP} a d_{CAP} . Je zde analogie s klasickými kapacitami, kdy změnou plochy destiček a vzdáleností mezi nimi se mění kapacita. Při zachování stejných rozměrů antény a zvyšování kapacity zátěže anténa snižuje svůj rezonanční kmitočet viz obr. 16.



Obr. 15 Konstrukce zatěžovací kapacity [4]: a) perspektivní pohled, b) pohled z boku



Obr. 16 Závislost přizpůsobení na frekvenci při změně zatěžovací kapacity [7]

3.4 Použití materiálu s vysokou permitivitou

Tato technika vychází ze znalosti vlivu relativní permitivity materiálu ϵ_r na délku vlny v tomto materiálu. Blíže to objasní následující vztah [2]:

$$\lambda_{diel} = \frac{c}{f_r \sqrt{\epsilon_r}} \quad [m] \quad (1.1)$$

Ze vztahu (1.1) je patrná nepřímá úměra mezi délkou vlny v dielektrickém materiálu λ_{diel} a odmocninou z relativní permitivity použitého dielektrika ϵ_r . Při použití dielektrického materiálu s vysokou permitivitou ϵ_r zkrátíme vlnovou délku v dielektriku oproti délce vlny ve vakuu ($\epsilon_r = 1$). Dojde ke zkrácení fyzických rozměrů antény. Tato technika se používá velice málo, protože má negativní vliv na důležité parametry antény (bude uvedeno v další kapitole).

4. TECHNIKY PRO ZVĚTŠENÍ ŠÍŘKY PÁSMÁ

Planární antény mají velmi malou relativní šířku pásma, která je typicky menší než 5%. Běžně používané antény (dipól, šroubovicová, logaritmicko-periodická nebo trychtýřová anténa) mají relativní šířku pásma od 15% do 50%. Aby bylo možné použít planární antény v mobilních zařízeních, vznikly různé techniky pro zvětšení šířky pásma, kterými se bude tato kapitola zabývat. Uvedeny budou jen nejpoužívanější techniky [9].

4.1 Vliv substrátu

Na začátku kapitoly 2 bylo uvedeno, že planární antény mají vysoký činitel jakosti Q . Vztah mezi činitelem jakosti Q a šířkou pásma antén [2]:

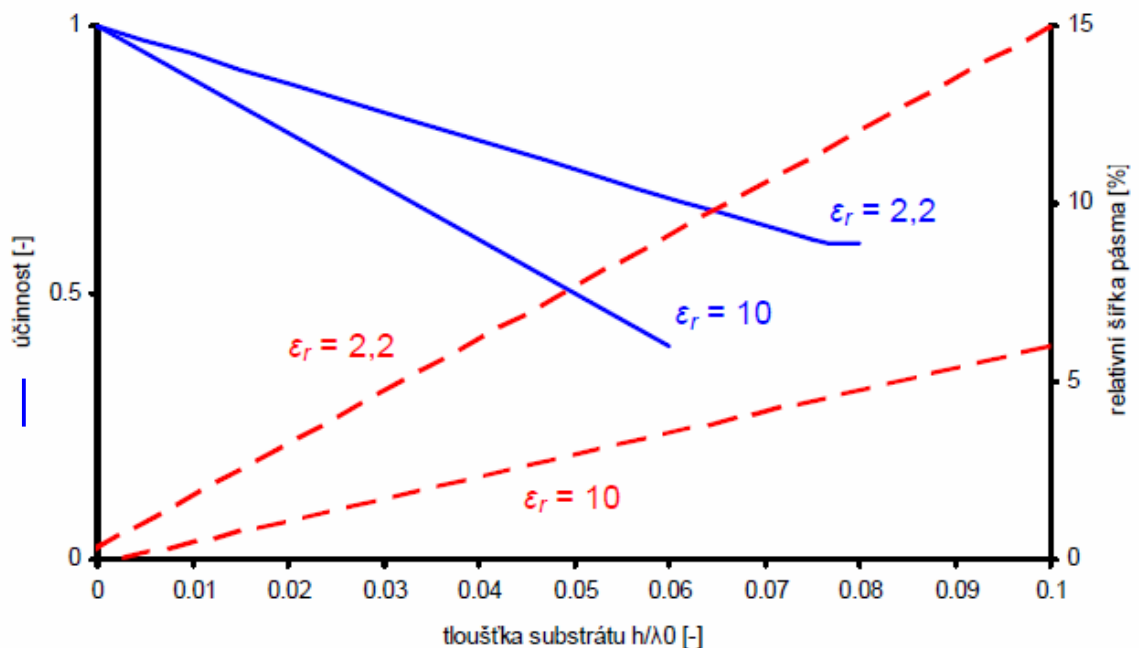
$$Q = \frac{f_r}{B} [-] \quad (1.2)$$

Podle vztahu (1.2) je mezi činitelem jakosti antény a její šířkou pásma nepřímá úměra. Materiály s vysokou dielektrickou konstantou mají tendenci spíše energii uchovat, než ji z materiálu vyzářit. Na planární anténu s vysokou relativní permitivitou ϵ_r můžeme nahlížet jako na ztrátový kondenzátor s vysokou ϵ_r , který má za následek vysoké Q . Činitel jakosti Q je také definován jako poměr energie uchované $E_{uch.}$ a energetické ztráty E_{ztr} [8]:

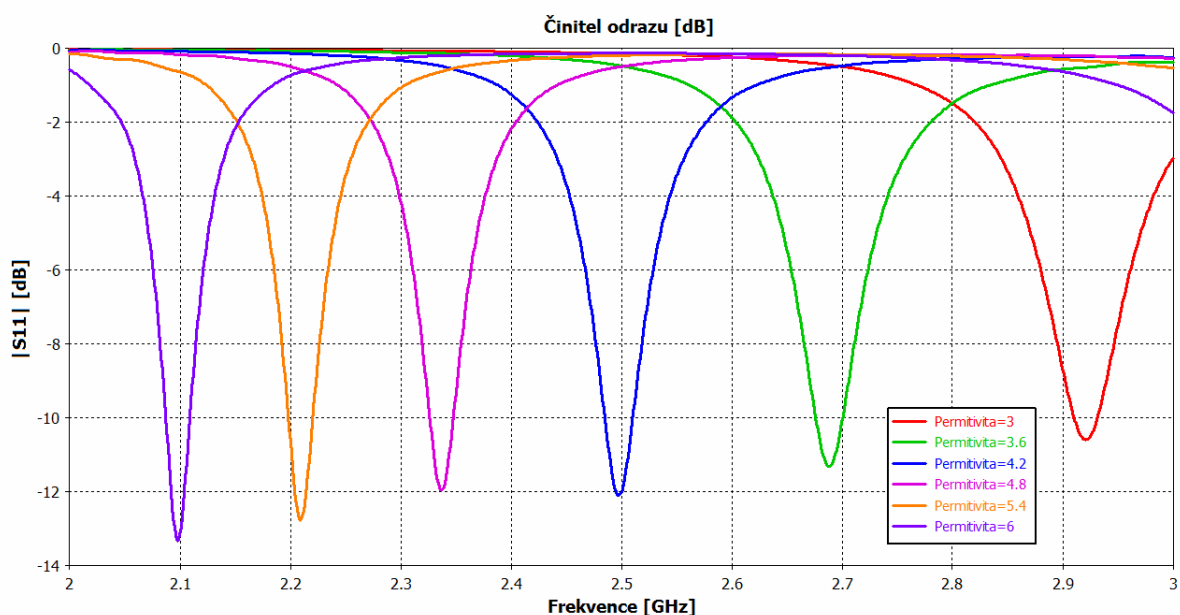
$$Q = \frac{E_{uch.}}{E_{ztr}} [-] \quad (1.3)$$

U vztahu (1.3) je vidět přímá úměra mezi činitelem jakosti Q a uchovanou energií $E_{uch.}$. Při oddalování destiček kondenzátoru od sebe klesá jeho kapacita, tedy sníží se uchovávaná energie. U planární antény se dosáhne stejného efektu při zvětšení výšky substrátu h . Podle vztahu (1.3) dojde tímto krokem ke snížení činitele jakosti Q a tím pádem ke zvýšení šířky pásma B . Tohle tvrzení potvrzuje obr. 17, který zobrazuje vliv výšky dielektrika h a permitivity substrátu ϵ_r na šířku pásma a účinnost antény. Účinnost antény klesá při zvyšování permitivity substrátu ϵ_r nebo také při zvětšení výšky substrátu h . Aby se zachovala velká účinnost a zároveň velká šířka pásma antény, volí se kompromis ve formě vzduchu jako substrátu ($\epsilon_r = 1$) spolu se zvýšením tloušťky h . Tato technika se využívá hlavně u antén PIFA.

Máme flíček s rozměry $W = 38,32$ mm a $L = 27,7$ mm napájený koaxiální sondou s umístěním $l_s = 9,3$ mm. Výše bylo zmíněno, že šířka pásma je závislá na relativní permitivitě ϵ_r substrátu. obr.18 ukazuje závislost $|S_{11}|$ v dB na kmitočtu při různých hodnotách relativní permitivity materiálu. Při zvyšování permitivity ϵ_r , klesá pracovní kmitočet, snižuje se šířka pásma, ale zvyšuje se impedanční přizpůsobení na rezonančních kmitočtech.



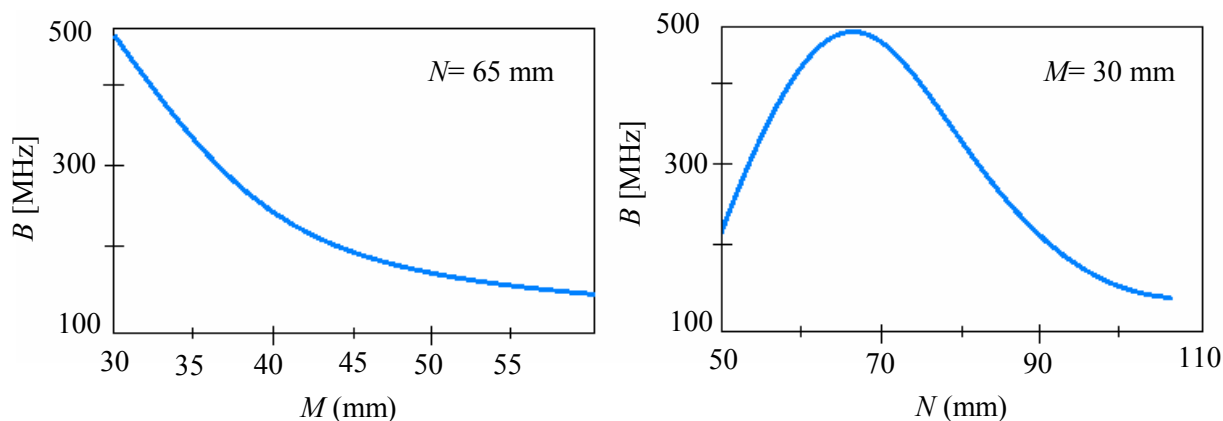
Obr. 17 Vliv tloušťky h a permitivity materiálu ε_r na šířku pásma (pro $PSI < 2$) a účinnost antény [1]



Obr. 18 Závislost parametru $|s_{11}|$ v dB na kmitočtu při změně permitivity materiálu flíčkové antény

4.2 Vliv rozměrů zemní plochy

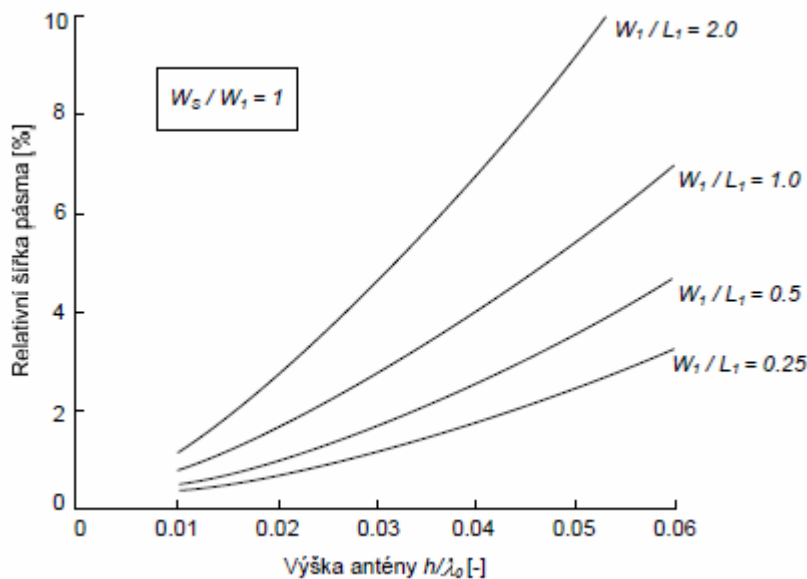
Vliv na šířku pásma má i vhodná volba šířky M a délky N zemní plochy. V ideálním případě by měla být zemní plocha nekonečná. Při návrhu antén pro mobilní zařízení je zemní plocha ovlivněna konečnými rozměry zařízení. Na obr. 19 jsou uvedeny průběhy antény PIFA, kdy jeden z rozměrů zemní plochy (N nebo M) je konstantní a druhý rozměr se mění (M nebo N) a přitom se sleduje vliv na šířku pásma [8].



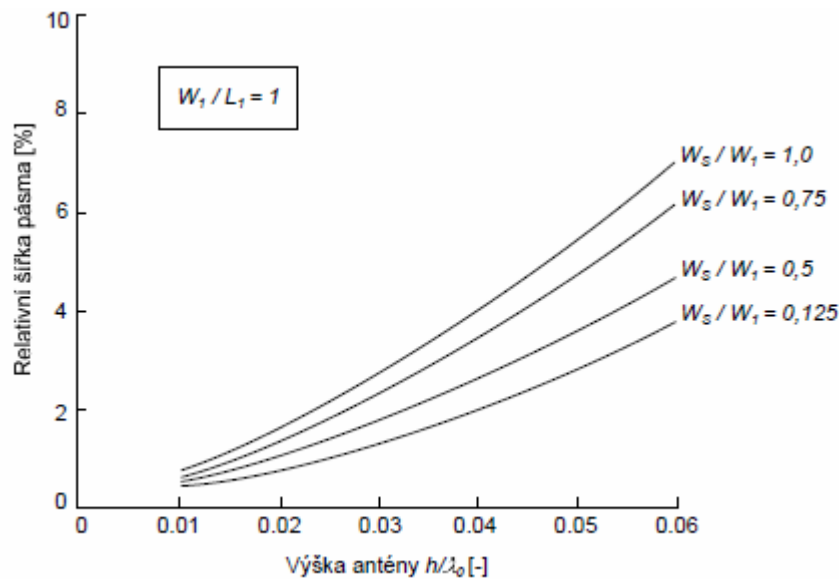
Obr. 19 Závislost šířky pásma na změně rozměru zemní plochy [8]

4.3 Vliv poměru délky zkratovací stěny a šířky flíčku, poměry rozměrů flíčku

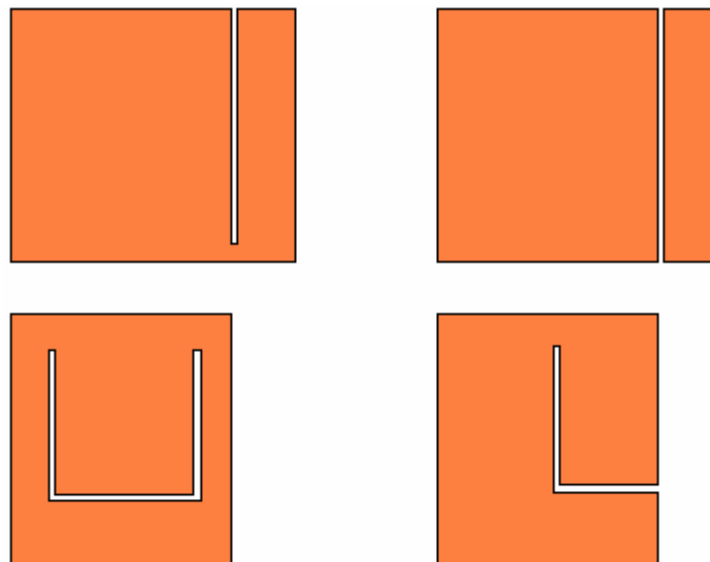
Význam poměrů W_s/W_l a W_l/L_l je vysvětlen v kapitole 3.2. V této podkapitole bude tato technika popsána pro konstrukci antén PIFA. Experimentálně byl vypořizován vliv těchto dvou poměrů na šířku pásma [6]. Popsány budou dvě situace. První situace je na obr. 20. Délka zkratovací stěny W_s je stejná jako šířka flíčku W_l ($W_s/W_l = 1$) a sledovaným parametrem je šířka pásma B v závislosti na různých poměrech šířky W_l a délky L_l flíčku při různých výškách substrátu h . Druhá situace je na obr. 21, sledované parametry jsou stejné s tím rozdílem, že šířka W_l a délka L_l flíčku jsou stejné ($W_l/L_l = 1$) a konstantní, mění se jen délka zkratovací stěny W_s . Největší relativní šířky pásma dosahuje konstrukce s poměry $W_s/W_l = 1$ a $W_l/L_l = 2$ s maximální výškou substrátu h . Nejmenších hodnot relativní šířky pásma dosahuje při malých hodnotách výšky substrátu h . Zmenšováním délky zkratovací hrany klesá relativní šířka pásma. Naopak zvyšováním poměru $W_l/L_l > 1$ roste relativní šířka pásma.



Obr. 20 Závislost šířky pásma antény PIFA (pro $PSV < 1,5$) na jejich rozměrech a výšce substrátu h při $W_s/W_l = 1$ [4]



Obr. 21 Závislost šířky pásma antény PIFA (pro $PSV < 1,5$) na rozměrech zkratovací stěny a výšky substrátu h při $W_t/L_t = 1$ [4]



Obr. 22 Konstrukce přidavných parazitních rezonátorů [4]: a) galvanicky vázaný rezonátor, b) kapacitně vázaný rezonátor, c) rezonátor tvaru „U“, d) rezonátor tvaru „L“.

4.4 Použití přidavných parazitních rezonátorů

Technika je založena na záměrném vložení parazitních rezonátorů do motivu flíčku. Parazitní rezonátor rezonuje v blízkosti původního rezonančního kmitočtu a dojde ke zvětšení šířky pásma. Tato technika se také používá při návrhu více pásmových planárních antén, kde se přidavné parazitní rezonátory navrhnu tak, aby rezonovaly na požadovaných pracovních kmitočtech. Nejzákladnějším parazitním rezonátorem je rezonátor s galvanickou vazbou obr. 22.a a s kapacitní vazbou obr. 22.b. U galvanické vazby je přidavný parazitní rezonátor spojen s flíčkem tenkým vodivým páskem, který se zároveň stává napáječem pro tento rezonátor. Při kapacitní vazbě není rezonátor spojen s hranou flíčku, naopak je mezi nimi mezera. Přidavný rezonátor je napájen elektrickým polem flíčku.

Nevýhodou je zvětšení rozměrů antény, což je při návrhu antén pro mobilní zařízení nežádoucí. Z tohoto důvodu se jako dílčí přídatné rezonátory používají štěrby v podobě písmene U (obr. 22.c) nebo L (obr. 22.d).

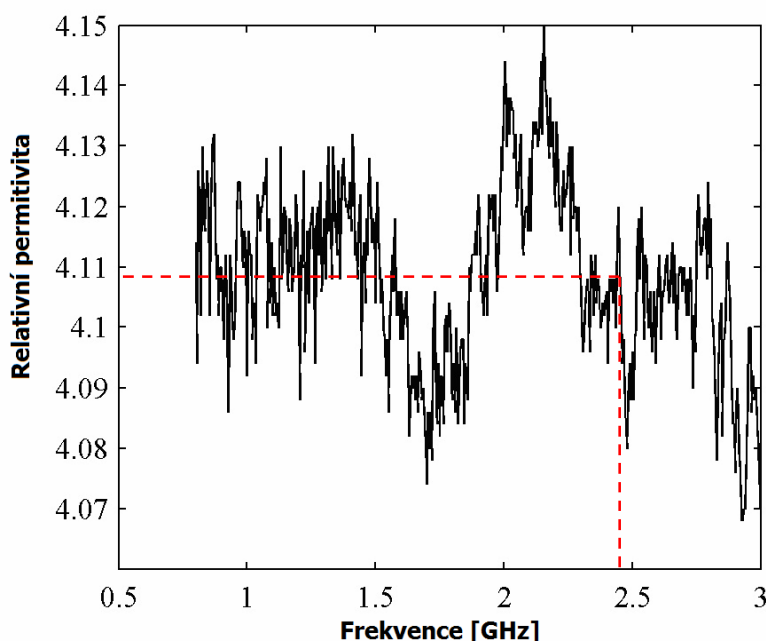
5. NÁVRH A SIMULACE MINIATURNÍ PLANÁRNÍ ANTÉNY

Simulace budou prováděny v programu *CST MICROWAVE STUDIO*. Jako výpočetní zařízení programu se bude využívat řešitel v časové oblasti (*Transient Domain Solver*), který vypočítá odezvu portu metodou konečných integrací [9] a pomocí rychlé Fourierovy transformace FFT (*Fast Fourier Transformation*) transformuje vzorky z časové oblasti do frekvenční oblasti. Z frekvenčního spektra program vypočítá s-parametry. Pro silně rezonanční struktury se použije řešitel ve frekvenční oblasti, který je pro tyto struktury efektivnější a přesnější. Pro výpočet používá metodu konečných prvků FEM (*Finite Element Method*) [10].

Kmitočtové pásmo pro návrh bylo vybráno ISM (*Industrial, Scientific and Medical*). Jedná se o bezlicenční kmitočtové pásmo využívané v průmyslu, vědě a zdravotnictví. V Evropě a USA je kmitočtový rozsah od 2400 MHz do 2483,5 MHz. Ale návrh antény bude prováděn pro rozsah kmitočtů od 2400 MHz do 2500 MHz se středním kmitočtem $f_c = 2450$ MHz. Cílem je za pomoci kapitoly 3 a 4 navrhnout planární anténu s malými rozměry a šířkou pásma blížíící se 100 MHz. Sledované parametry antény jsou zisk, objem, účinnost vyzařování, pracovní šířka pásma a přizpůsobení na kmitočtu f_c .

5.1 Miniaturní planární anténa se substrátem FR4

Substrát FR4 je levný a běžně dostupný v obchodech s elektronickými součástkami a používá se k tvorbě desky plošných spojů. Velkou nevýhodou je kmitočtová nestálost relativní permitivity materiálu (obr. 23). Relativní permitivita pro kmitočet $f_c = 2,4$ GHz je $\varepsilon_r = 4,109$. Výška substrátu je $h_{FR4} = 1,58$ mm a tloušťka pokovení $t_p = 0,035$ mm.



Obr. 23 Průběh permitivity substrátu FR4 v závislosti na kmitočtu [11]

5.1.1 Obdélníková flíčková anténa

Prvním krokem je vytvoření jednoduché obdélníkové flíčkové antény s napájením koaxiální sondou. Použitý je substrát FR4 s naneseným pokovením z obou stran.

Šířku flíčku obdélníkové flíčkové antény zjistíme ze vztahu [12]:

$$W = \frac{1}{2 \cdot f_c \sqrt{\mu_0 \cdot \varepsilon_0}} \cdot \sqrt{\frac{2}{\varepsilon_r + 1}} = \frac{c}{2f_c} \cdot \sqrt{\frac{2}{\varepsilon_r + 1}}, \quad (1.4)$$

kde c je rychlost světla, f_c je pracovní kmitočet navrhované antény a ε_r relativní permitivita použitého substrátu.

Pro platnost dalších vztahů musí být splněna následující podmínka [12]:

$$1 < \frac{W}{h} \quad (1.5)$$

Flíček je na rozhraní vzduchu a substrátu, proto je zavedena efektivní permitivita [12]:

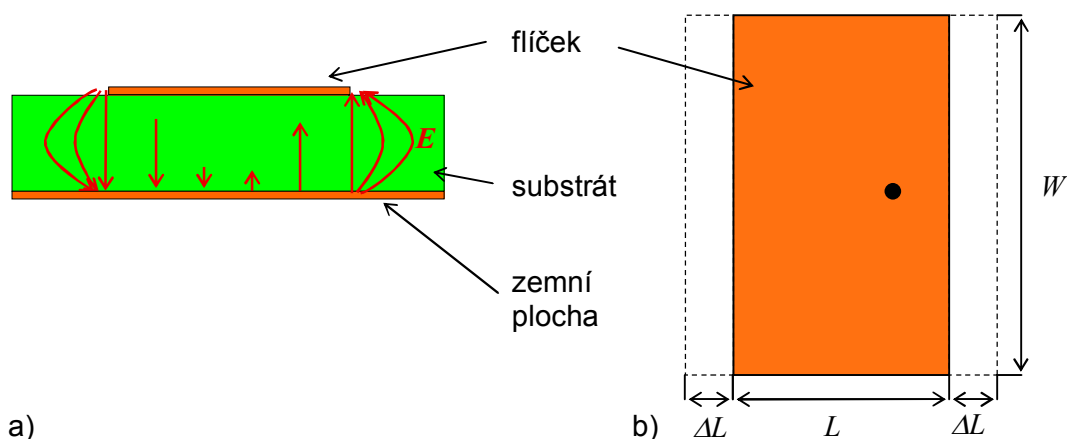
$$\varepsilon_{\text{reff}} = \frac{\varepsilon_r + 1}{2} + \frac{\varepsilon_r - 1}{2} \left[1 + 12 \frac{h}{W} \right]^{-\frac{1}{2}} \quad (1.6)$$

Na hraně flíčku s rozměrem W nastává rozptyl pole podle obr. 24.a a dochází k elektrickému prodloužení délky flíčku L (obr. 24.b), vztah pro toto prodloužení [12]:

$$\Delta L = 0,412 \frac{(\varepsilon_{\text{reff}} + 0,3) \cdot \left(\frac{W}{h} + 0,264 \right)}{(\varepsilon_{\text{reff}} - 0,258) \cdot \left(\frac{W}{h} + 0,8 \right)} \cdot h \quad (1.7)$$

Z obr. 24.b plyne vztah pro stanovení délky flíčku [12]:

$$L = \frac{c}{2 \cdot f_c \cdot \sqrt{\varepsilon_{\text{reff}}}} - 2 \cdot \Delta L \quad (1.8)$$



Obr. 24 Princip prodloužení délky obdélníkového flíčku [12]: a) řez anténou, b) pohled shora

Dosazení do vztahů (1.4) až (1.8):

$$W = \frac{c}{2f_c} \cdot \sqrt{\frac{2}{\varepsilon_r + 1}} = \frac{3 \cdot 10^8}{2 \cdot 2,45 \cdot 10^9} \cdot \sqrt{\frac{2}{4,109 + 1}} = 38,31 \text{ mm}$$

$$1 < \frac{W}{h_{FR4}} = \frac{38,31}{1,58}$$

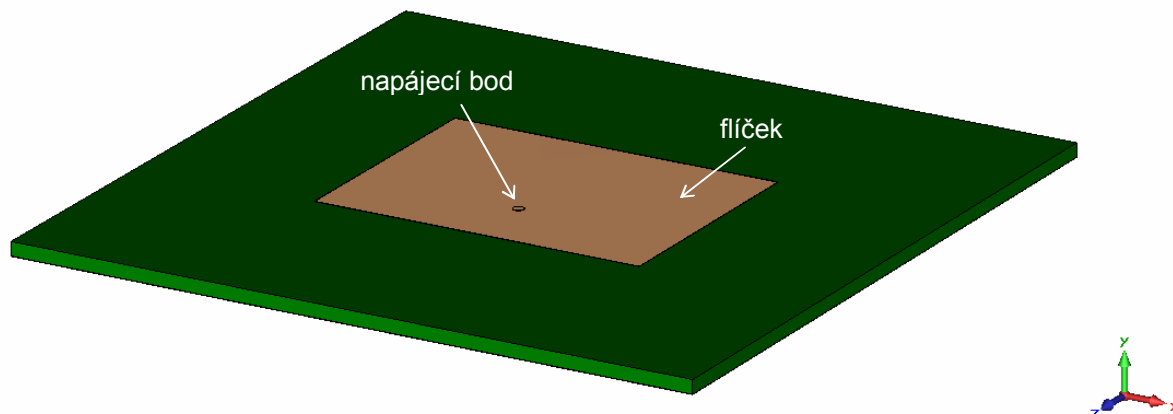
$$\varepsilon_{\text{reff}} = \frac{\varepsilon_r + 1}{2} + \frac{\varepsilon_r - 1}{2} \left[1 + 12 \frac{h_{FR4}}{W} \right]^{-\frac{1}{2}} = \frac{4,109 + 1}{2} + \frac{4,109 - 1}{2} \left[1 + 12 \frac{1,58}{38,31} \right]^{-\frac{1}{2}} = 3,826$$

$$\Delta L = 0,412 \frac{(\varepsilon_{\text{reff}} + 0,3) \cdot \left(\frac{W}{h} + 0,264 \right)}{(\varepsilon_{\text{reff}} - 0,258) \cdot \left(\frac{W}{h} + 0,8 \right)} \cdot h =$$

$$= 0,412 \frac{(3,826 + 0,3) \cdot \left(\frac{38,31}{1,58} + 0,264 \right)}{(3,826 - 0,258) \cdot \left(\frac{38,31}{1,58} + 0,8 \right)} \cdot 1,58 = 0,7367 \text{ mm}$$

$$L = \frac{c}{2 \cdot f_c \cdot \sqrt{\varepsilon_{\text{reff}}}} - 2 \cdot \Delta L = \frac{3 \cdot 10^8}{2 \cdot 2,45 \cdot 10^9 \cdot \sqrt{3,826}} - 2 \cdot 0,7367 \cdot 10^{-3} = 29,83 \text{ mm}$$

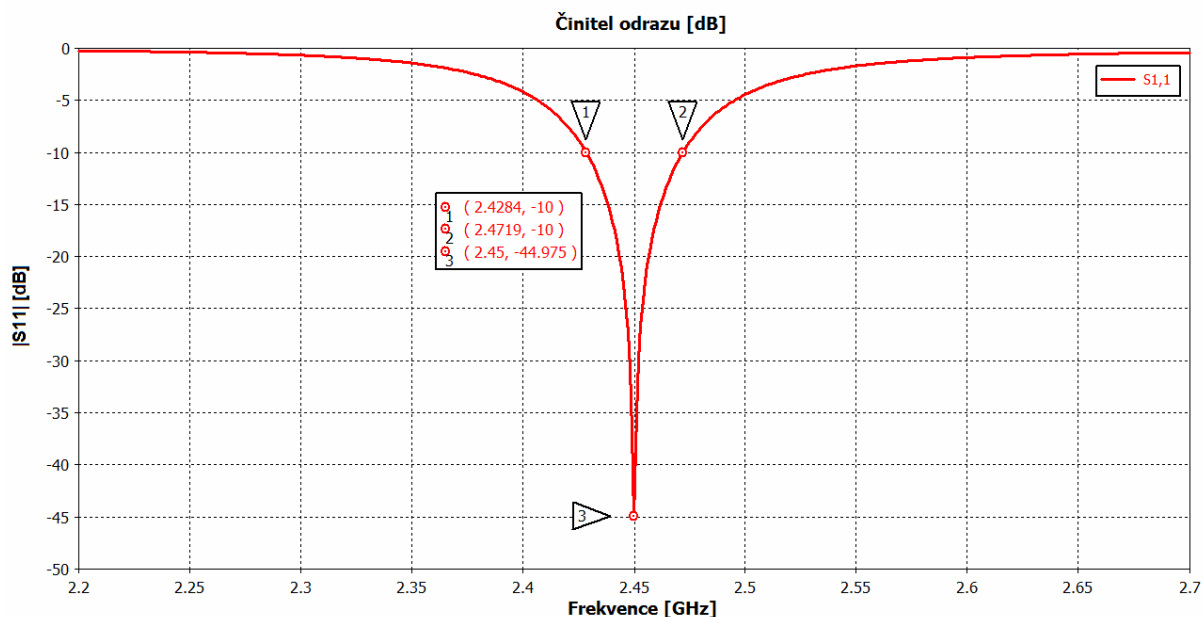
Vypočítané hodnoty se nastavily do simulátoru a pomocí rozmítání parametru W a L se flíčková anténa doladila na rezonanční kmitočet $f_c = 2,45$ GHz. Ukázku struktury v simulátoru je na obr. 25, pracovní název antény je FA_P01. Napájecí bod byl umístěn intuitivně a doladěn v simulátoru rozmítáním parametru l_s (viz obr. 7). V tab. 1 jsou shrnuty rozměry flíčkové antény FA_P01 ze simulátoru.



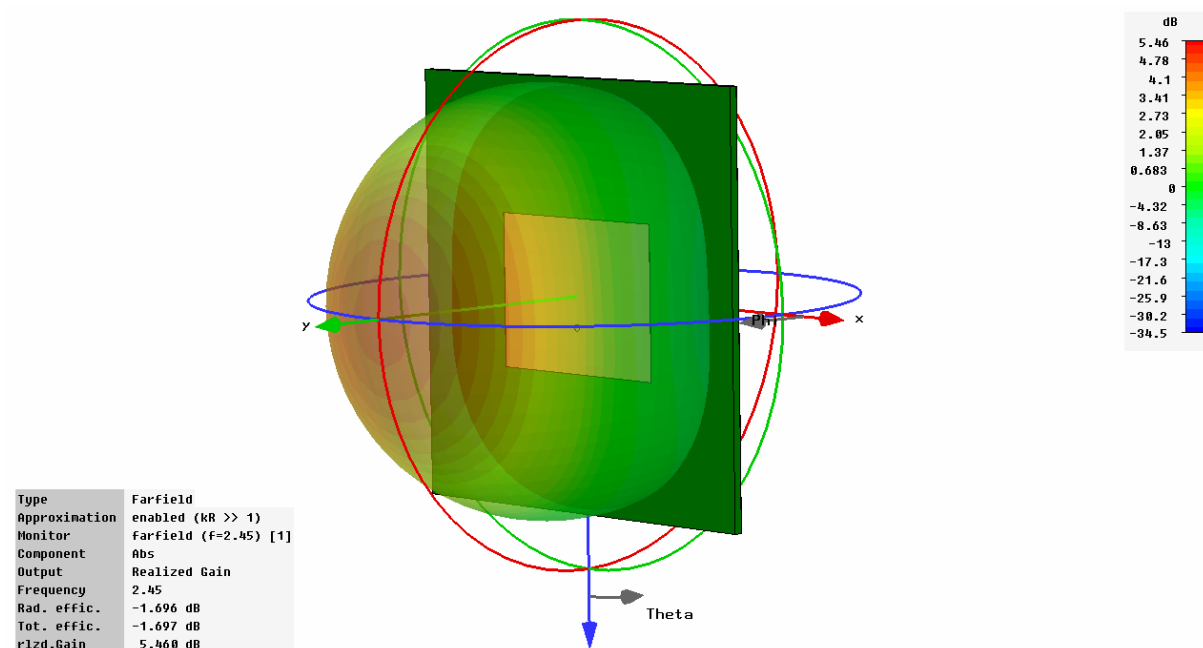
Obr. 25 Obdélníková flíčková anténa (FA_P01) v simulátoru

Tab. 1 Rozměry obdélníkové flíčkové antény FA_P01

Parametr	Hodnota	Popis
M	80 mm	Šířka zemní plochy
N	80 mm	Délka zemní plochy
W	38,31 mm	Šířka flíčku
L	28,7 mm	Délka flíčku
h	1,58 mm	Výška substrátu
t_p	0,035 mm	Tloušťka pokovení



Obr. 26 Průběh činitele odrazu pro obdélníkovou flíčkovou anténu na substrátu FR4 (FA_P01)

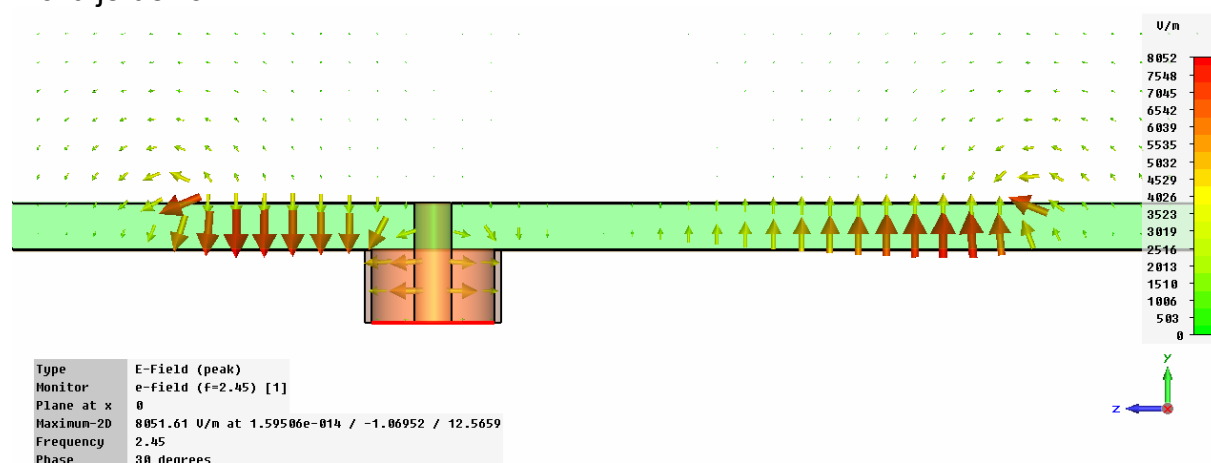


Obr. 27 Vyzařovací charakteristika flíčkové antény FA_P01 na kmitočtu 2,45 GHz

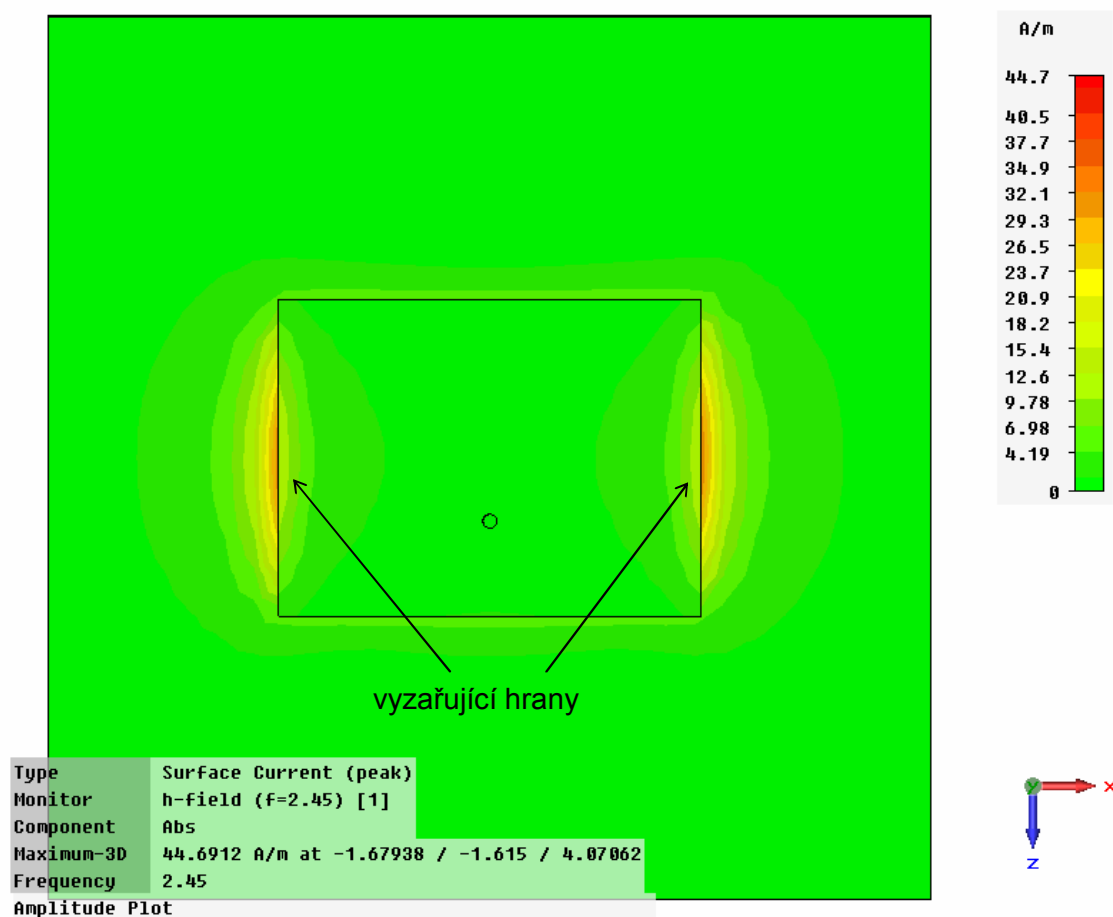
Obr. 26 zobrazuje činitele odrazu antény FA_P01, kde mezi značkami 1 a 2 je pracovní pásmo $B = 43,15$ MHz pro $|S_{11}| \leq -10$ dB. Značka 3 znázorňuje kmitočet s největším přizpůsobením $|S_{11}| = -44,975$ dB, resp. rezonanční kmitočet antény.

Vyzařovací charakteristika na kmitočtu 2,45 GHz v 3D zobrazení je na obr. 27, kde byl použit mód realizovaného zisku. Účinnost vyzařování antény je $\eta = -1,696$ dB a zisk antény je $G = 5,46$ dB. Rozložení elektrického pole antény FA_P01 (obr. 28) je podle teoretických předpokladů z obr. 13 (vlevo). Na hraně flíčku W je intenzita maximální a nastává na hraně rozptyl stejně jako na obr. 24. Nejmenší intenzita elektrického pole je v prostředku šířky flíčku L . V tab. 2 jsou shrnuty sledované

parametry antény FA_P01. Obr. 29 ukazuje povrchové proudy, kde vyzařující hrana flíčku je délka L .



Obr. 28 Rozložení elektrického pole flíčkové antény FA_P01 na kmitočtu 2,45 GHz



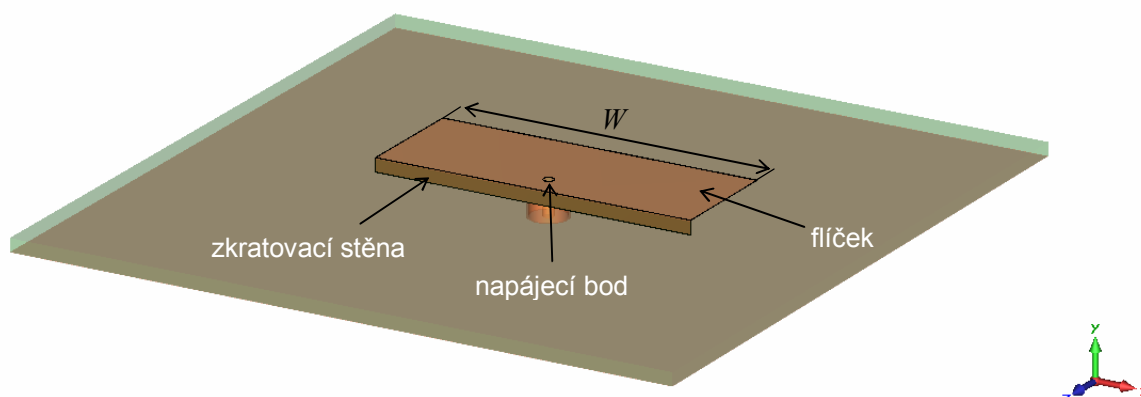
Obr. 29 Povrchové proudy antény FA_P01 na kmitočtu 2,45 GHz

Tab. 2 Výsledné parametry pro flíčkovou anténu FA_P01

Parametr	Hodnota	Popis
G	5,46 dB	Zisk antény
V	1814 mm ³	Objem antény
B	43,5 MHz	Šířka pracovního pásma
η	-1,696 dB	Účinnost vyzařování antény
$ S_{11} $	-44,975 dB	Přizpůsobení na rezonančním kmitočtu

5.1.2 Použití zkratovací stěny

Za pomoci kapitoly 3.1 zmenšíme délku flíčku L . Přibližně do poloviny délky flíčku L umístíme zkratovací stěnu po celé šířce flíčku W (viz obr.29). Anténa má pracovní název FA_P02.

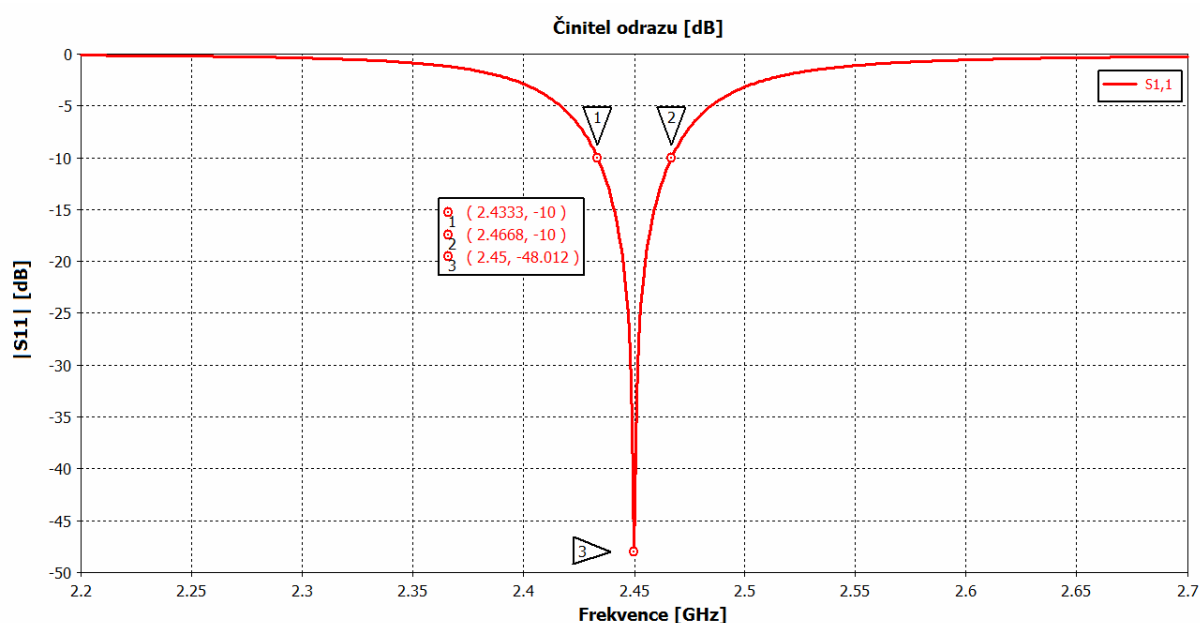


Obr. 30 Obdélníková flíčková anténa se zkratovací stěnou (FA_P02)

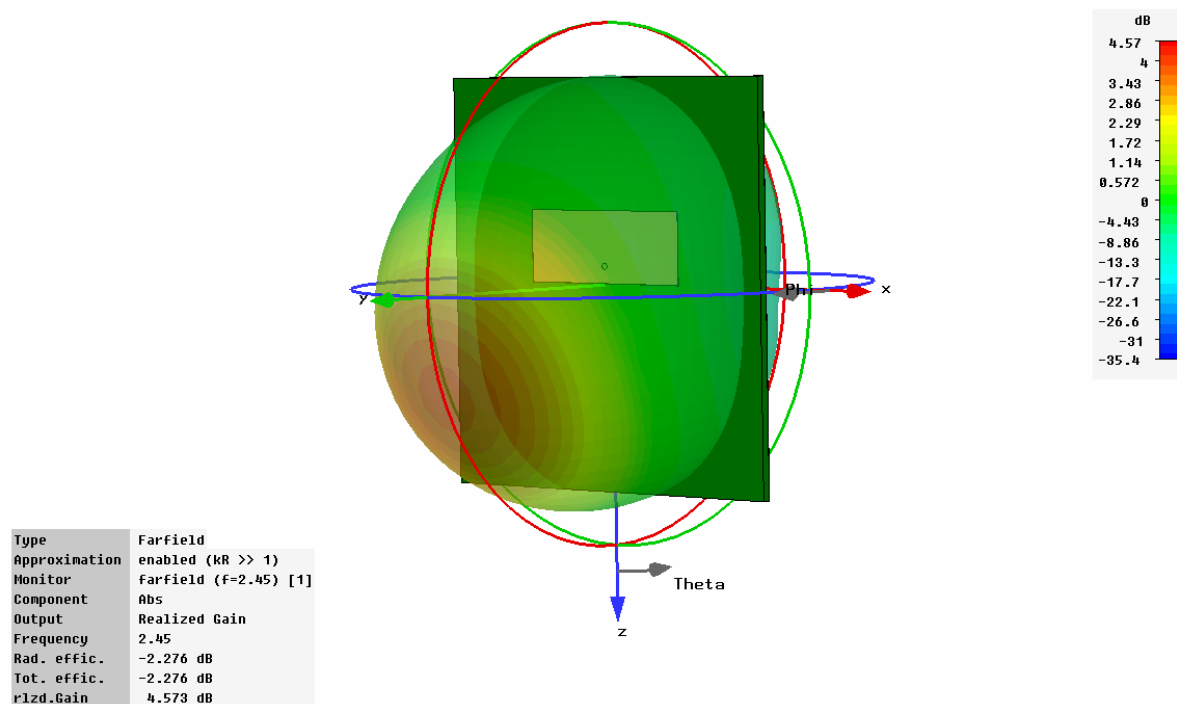
Do tab. 3 byly zapsány hodnoty rozměrů flíčkové antény FA_P02 ze simulátoru. Obr. 31 zobrazuje činitel odrazu antény FA_P02, kde mezi značkami 1 a 2 je pracovní pásmo $B = 33,5$ MHz pro $|S_{11}| \leq -10$ dB. Značka 3 znázorňuje přizpůsobení na rezonančním kmitočtu $|S_{11}| = -48,012$ dB.

Tab. 3 Rozměry antény FA_P02

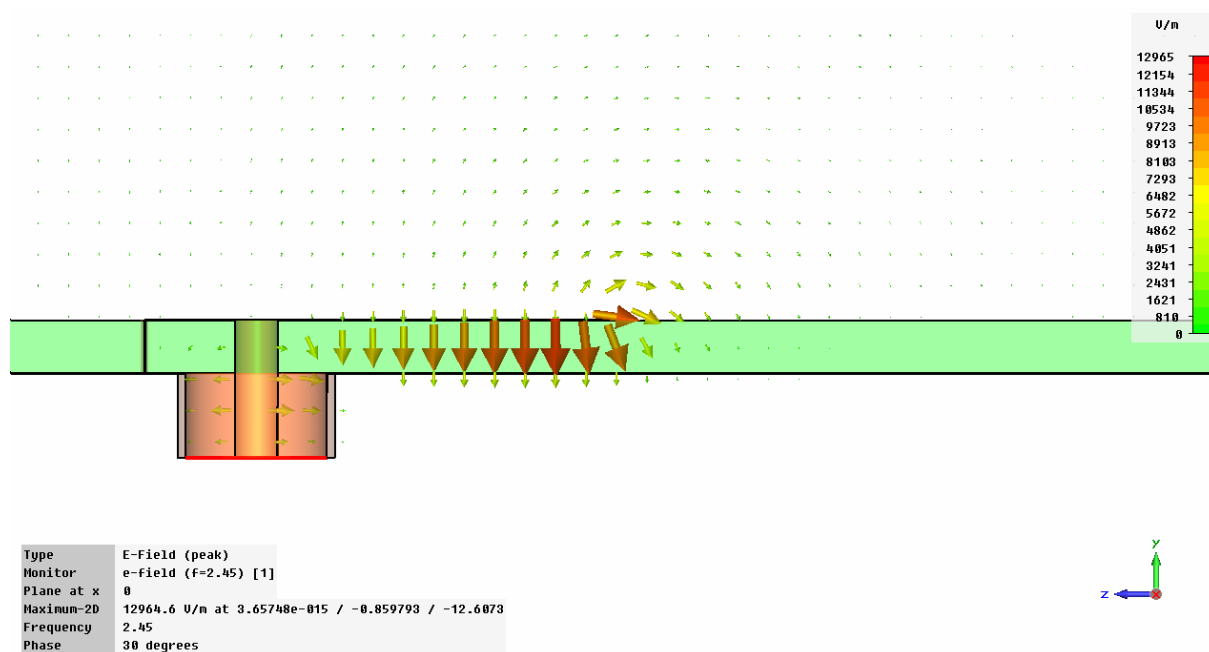
Parametr	Hodnota	Popis
M	80 mm	Šířka zemní plochy
N	80 mm	Délka zemní plochy
W	38,31 mm	Šířka flíčku
L	14,115 mm	Délka flíčku
h	1,58 mm	Výška substrátu
t_p	0,035 mm	Tloušťka pokovení



Obr. 31 Průběh činitele odrazu pro anténu FA_P02



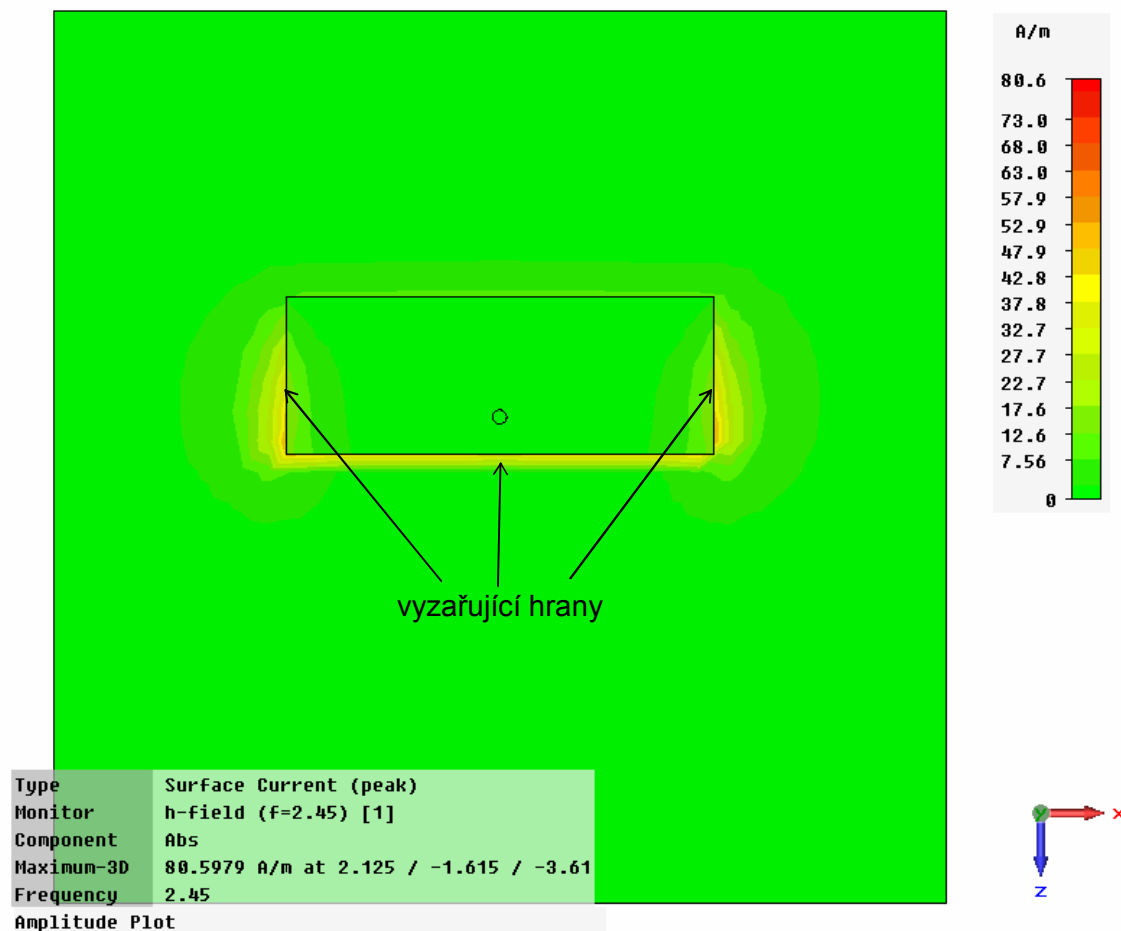
Obr. 32 Vyzařovací charakteristika antény FA_P02 na kmitočtu 2,45 GHz



Obr. 33 Rozložení elektrického pole antény FA_P02 na kmitočtu 2,45 GHz

Vyzařovací charakteristika na kmitočtu 2,45 GHz je na obr. 32, kde byl použit mód realizovaného zisku. Použití zkratovací stěny má velký vliv na směrovost antény, došlo k odklonění hlavního laloku od nulové osy o 23°. Účinnost vyzařování antény je $\eta = -2,276$ dB a zisk antény je $G = 4,573$ dB. Rozložení elektrického pole antény FA_P02 (obr. 33) je podle teoretických předpokladů z obr. 13 (vpravo). Na hraně flíčku W je intenzita maximální. Nejmenší intenzita elektrického pole je v místě zkratovací stěny. Anténa FA_P02 pracuje ve čtvrtvlnné rezonanci narozdíl od antény FA_P01, která pracuje v půlvlnné rezonanci.

Po vložení zkratovací stěny nevyzařuje jen délka flíčku L , ale i zkratovaná stěna na obr. 34. V tab. 4 jsou shrnuty sledované parametry antény FA_P02.



Obr. 34 Povrchové proudy antény FA_P02 na kmitočtu 2,45 GHz

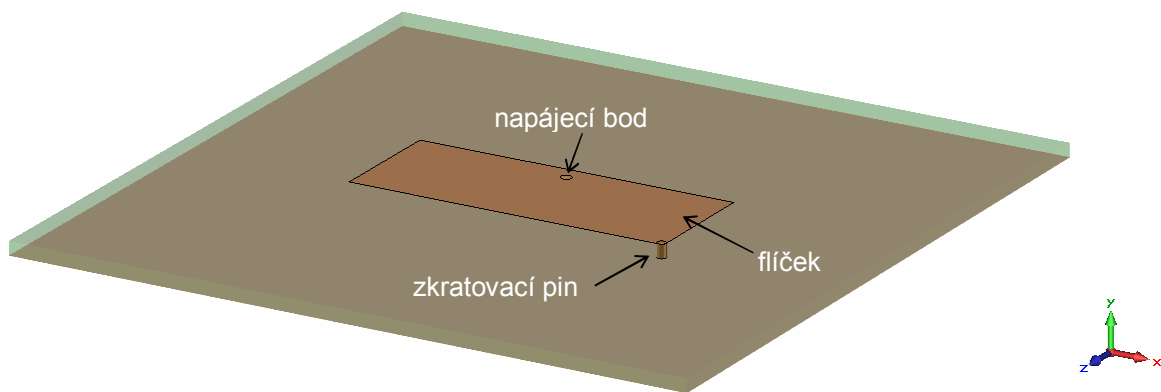
Tab. 4 Výsledné parametry pro flíčkovou anténu FA_P02

Parametr	Hodnota	Popis
G	4,573 dB	Zisk antény
V	892,2 mm ³	Objem antény
B	33,5 MHz	Šířka pracovního pásma
η	-2,276 dB	Účinnost vyzařování antény
$ S_{11} $	-48,012 dB	Přizpůsobení na rezonančním kmitočtu

5.1.3 Použití zkratovacího pinu

V předchozí podkapitole byla použita zkratovací stěna, která se postupně zkracovala z levé strany, až byl rozměr tak malý, že bylo možné stěnu nahradit zkratovacím pinem o průměru 1 mm (obr. 35). Anténa má pracovní název FA_P03.

S řešitelem v časové oblasti jsou simulační časy velmi dlouhé. S použitím adaptivního zjemňování sítě se časy pohybují v jednotkách hodin v závislosti na použité přesnosti. Z tohoto důvodu byl v dalších simulacích použit řešitel ve frekvenční oblasti.

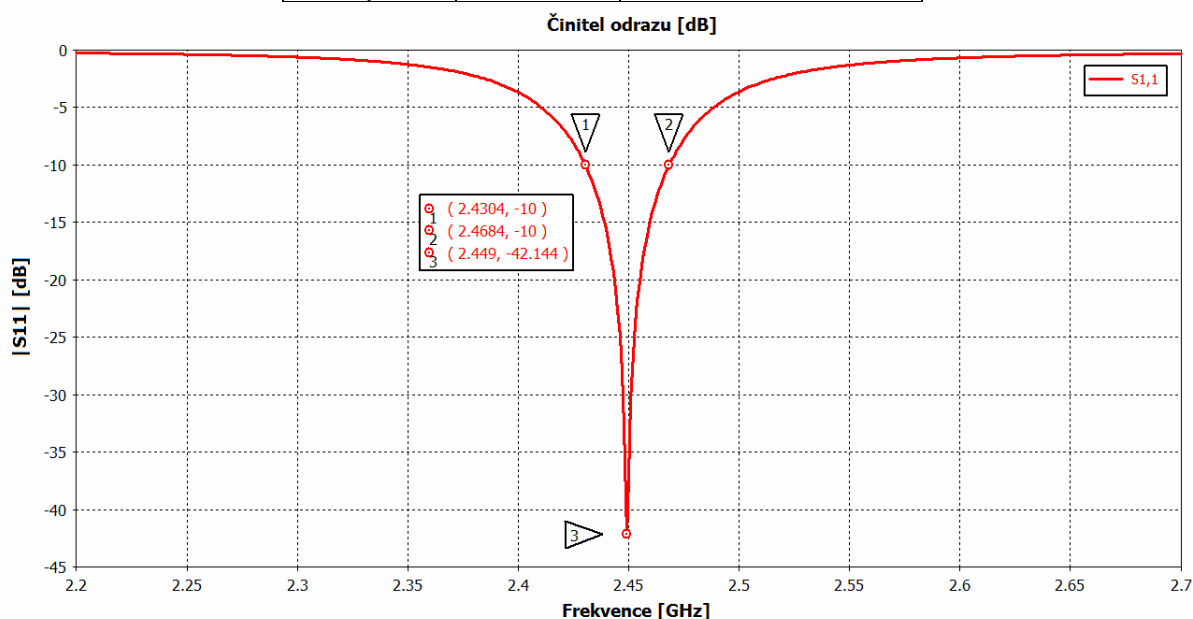


Obr. 35 Obdélníková flíčková anténa se zkratovacím pinem (FA_P03)

Ze simulátoru byly odečteny rozměry antény FA_P03 a zapsány do tab. 5. Z obr. 36 byla odečtena šířka pásma $B = 38$ MHz mezi značkami 1 a 2. Značka 3 znázorňuje přizpůsobení na rezonančním kmitočtu $|S_{11}| = -42,144$ dB.

Tab. 5 Rozměry antény FA_P03

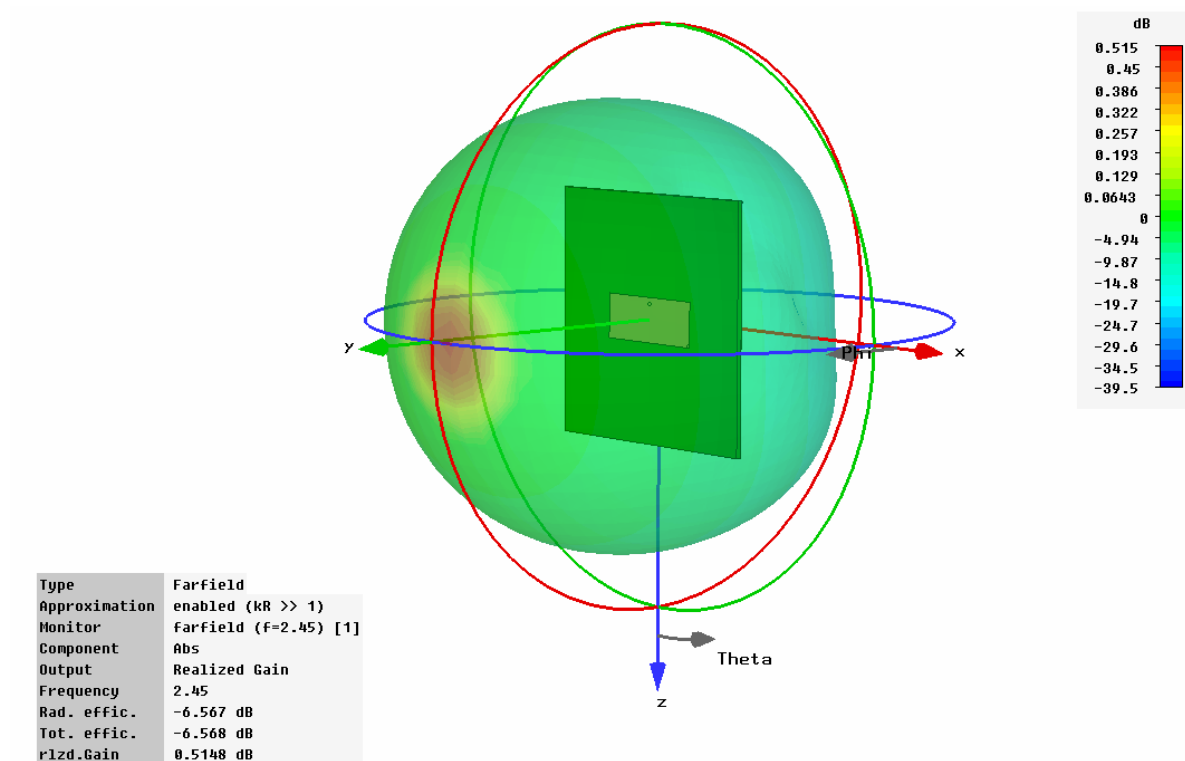
Parametr	Hodnota	Popis
M	80 mm	Šířka zemní plochy
N	80 mm	Délka zemní plochy
W	37,3 mm	Šířka flíčku
L	14,52 mm	Délka flíčku
h	1,58 mm	Výška substrátu
t_p	0,035 mm	Tloušťka pokovení



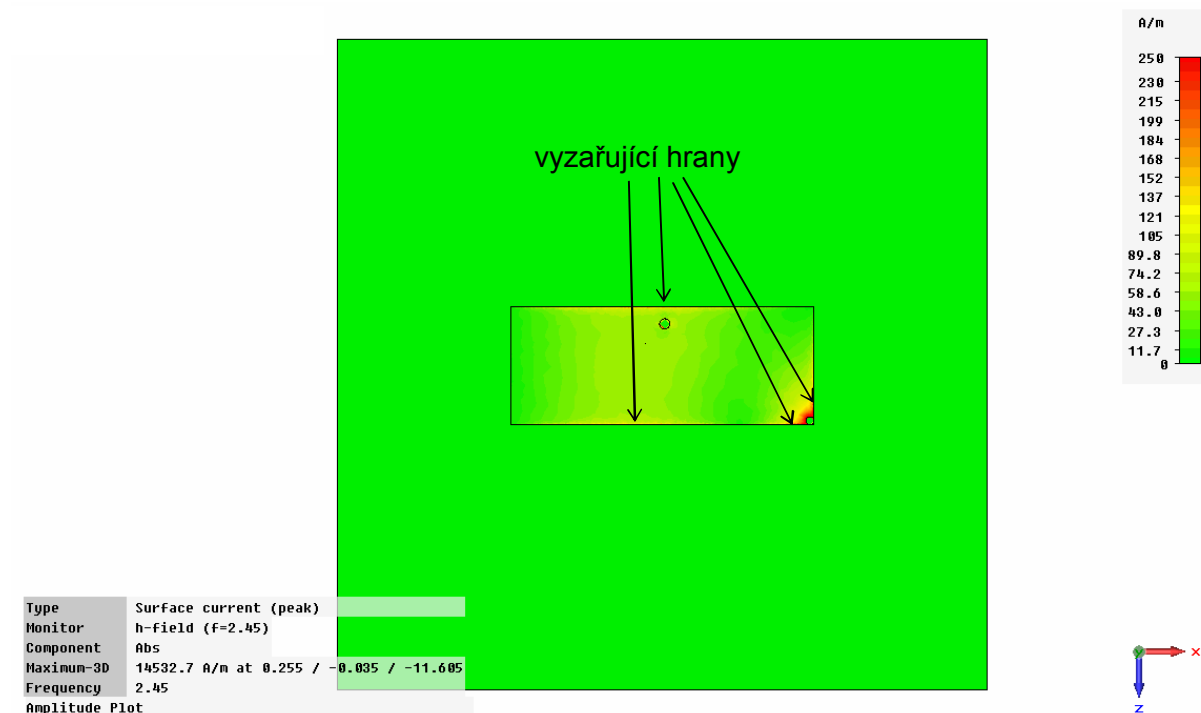
Obr. 36 Průběh činitele odrazu pro anténu FA_P03

Pro vyzářovací charakteristiku byl použitý mód realizovaného zisku (obr. 37). Zmenšení rozměrů se dosáhlo využitím zkratovacího pinu umístěného v pravém dolním rohu antény, ale tato realizace má velký vliv na snížení zisku antény $G = 0,515$ dB, resp. je nízká účinnost vyzářování $\eta = -6,567$ dB. Oproti modelu antény FA_P02 je odchýlení hlavního laloku směrové charakteristiky minimální.

Zajímavé je zobrazení povrchových proudů na obr. 38, kde nejvíce k vyzařování přispívá okolí zkratovacího pinu. Hrany flíčku W také přispívají k vyzařování, ale menší měrou než okolí zkratu. Sledované parametry pro anténu FA_P03 jsou uvedeny v tab. 6.



Obr. 37 Vyzařovací charakteristika antény FA_P03 na kmitočtu 2,45 GHz



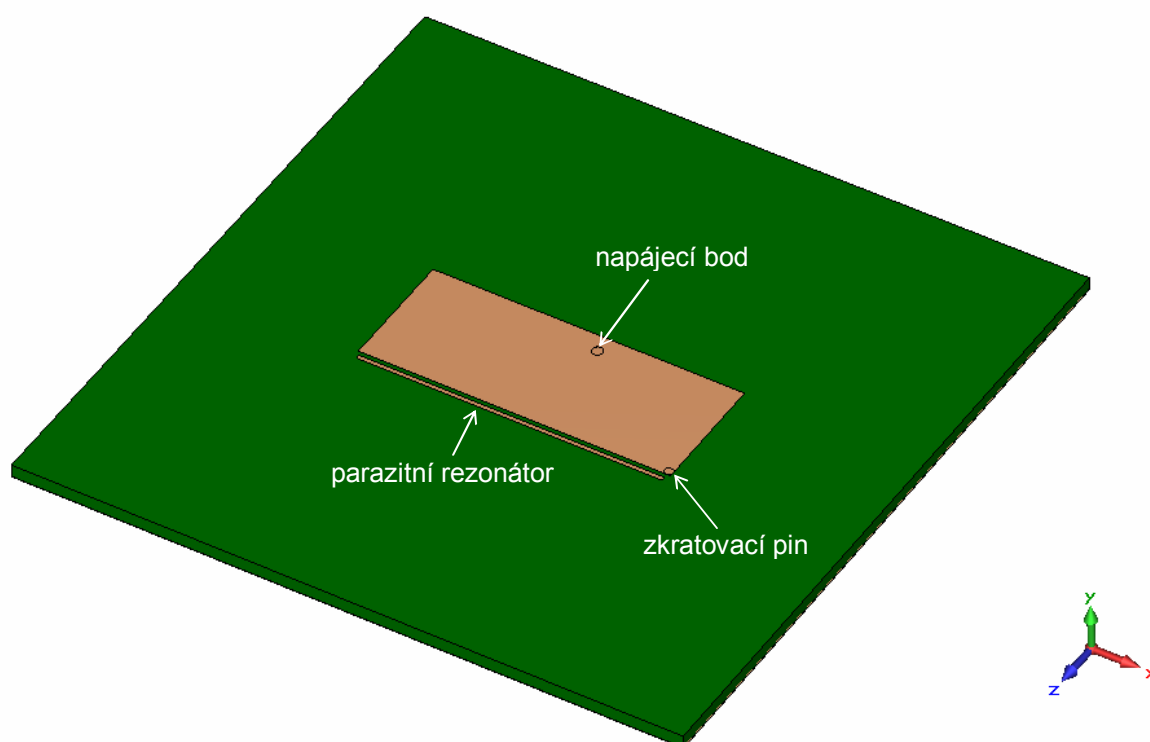
Obr. 38 Povrchové proudy antény FA_P03

Tab. 6 Výsledné parametry pro flíčkovou anténu FA_P03

Parametr	Hodnota	Popis
G	0,515 dB	Zisk antény
V	893,6 mm ³	Objem antény
B	38 MHz	Šířka pracovního pásma
η	-6,567 dB	Účinnost vyzařování antény
$ s_{11} $	-42,144 dB	Přizpůsobení na rezonančním kmitočtu

5.1.4 Použití parazitního rezonátoru

Flíčková anténa FA_P03 má menší rozměry než původní anténa FA_P01, ale má nevyhovující šířku pásma 38 MHz, protože požadavek je šířka pásma blížící se 100 MHz. Zvětšení šířky pásma se dosáhne za pomoci techniky z kapitoly 4.4. Použije se parazitní rezonátor napájený kapacitní vazbou (viz obr. 22.b). Anténa má pracovní název FA_P04.



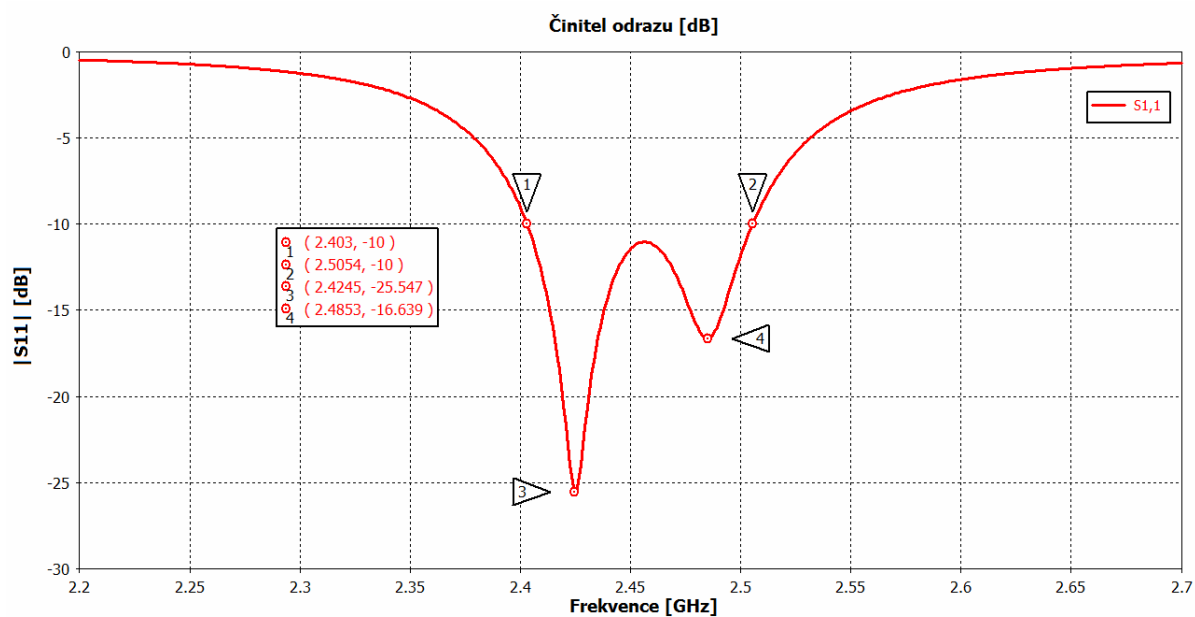
Obr. 39 Obdélníková flíčková anténa se zkratovacím pinem a parazitním rezonátorem (FA_P04)

Ze simulátoru byly odečteny rozměry antény FA_P04 a zapsány do tab. 7. Na obr. 40 je zobrazen činitel odrazu, kde mezi značkami 1 a 2 je kmitočtová šířka pásma $B = 102,4$ MHz antény FA_P04 pro činitel odrazu $|s_{11}| \leq -10$ dB. Značka č. 3 znázorňuje první rezonanční kmitočet antény $f_{c1} = 2,4245$ GHz s hodnotou činitele odrazu $|s_{11}| = -25,547$ dB a značka č. 4 znázorňuje druhý rezonanční kmitočet antény $f_{c2} = 2,4853$ GHz s činitelem odrazu $|s_{11}| = -16,639$ dB.

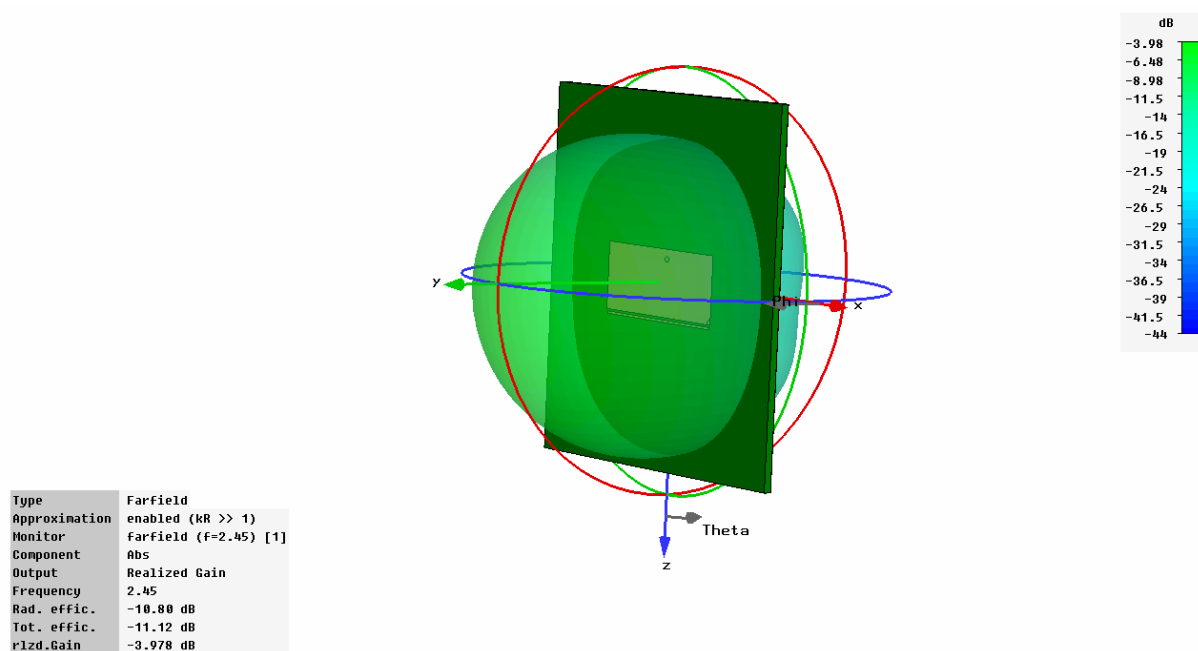
Na obr. 41 je zobrazena směrová charakteristika antény FA_P04 v módu realizovaného zisku. Přidání rezonátoru vedlo k dalšímu snížení zisku $G = -3,98$ dB, resp. ke snížení účinnosti vyzařování $\eta = -10,8$ dB oproti anténě FA_P03

Tab. 7 Rozměry antény FA_P04

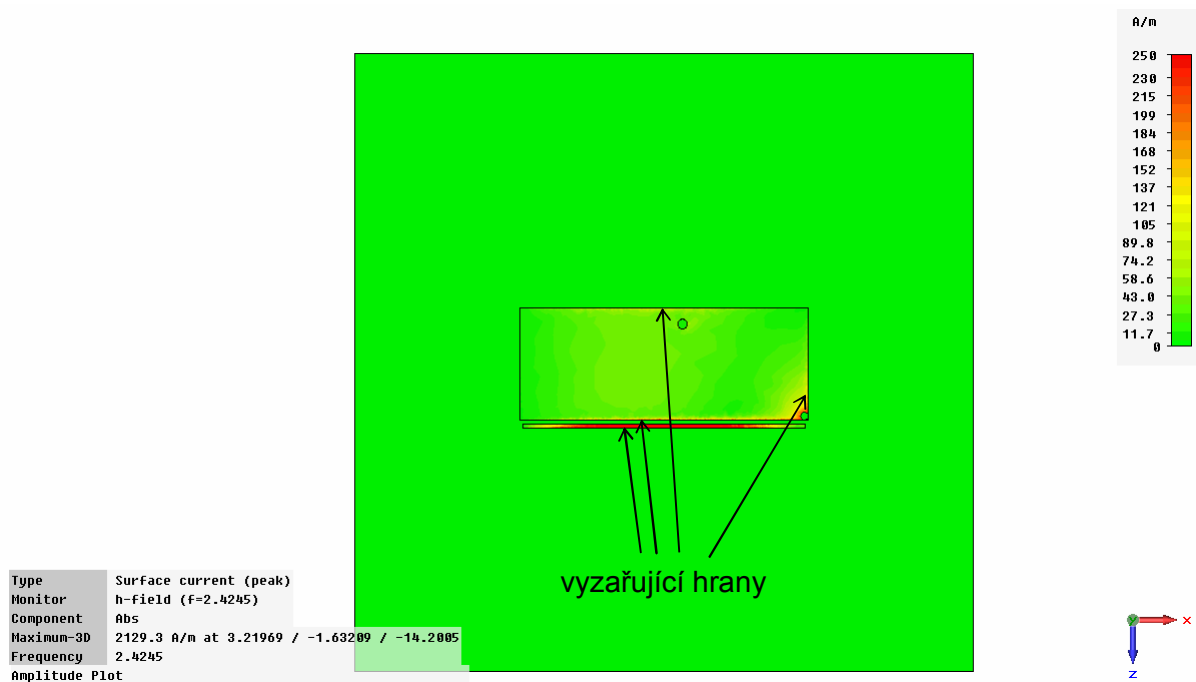
Parametr	Hodnota	Popis
M	80 mm	Šířka zemní plochy
N	80 mm	Délka zemní plochy
W	37,35 mm	Šířka flíčku
L	14,52 mm	Délka flíčku
h	1,58 mm	Výška substrátu
t_p	0,035 mm	Tloušťka pokovení
w_{rez}	36,55 mm	Šířka rezonátoru
l_{rez}	0,5 mm	Délka rezonátoru



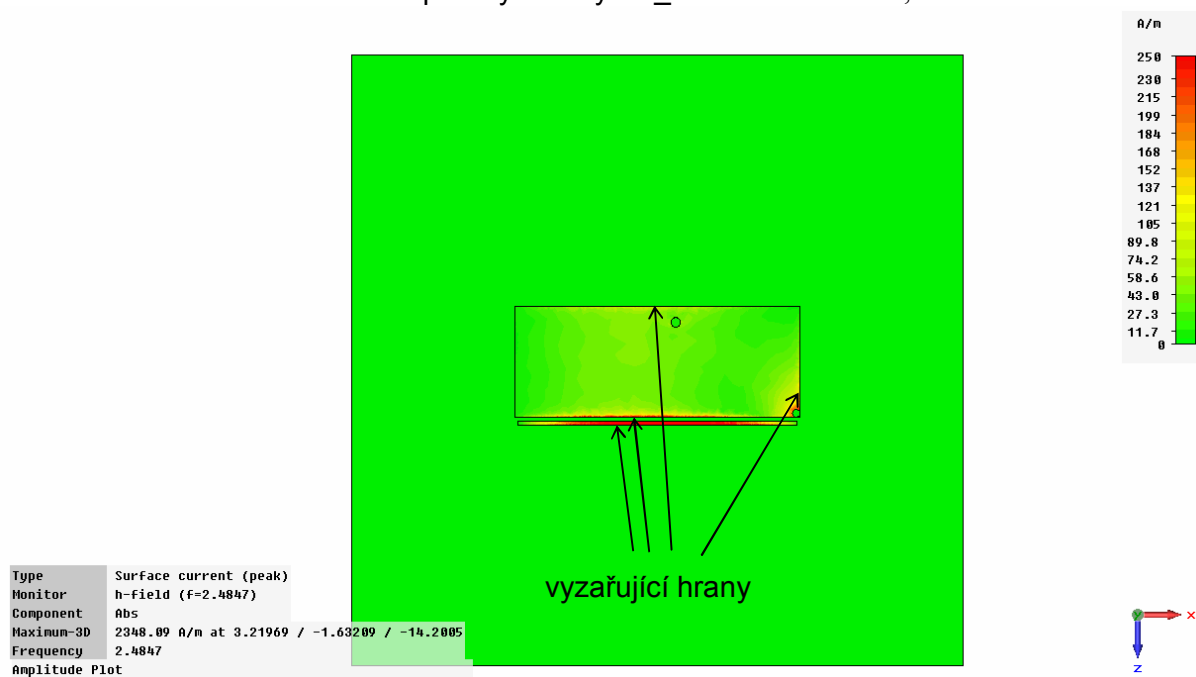
Obr. 40 Průběh činitele odrazu pro anténu FA_P04



Obr. 41 Vyzařovací charakteristika antény FA_P04 na kmitočtu 2,45 GHz



Obr. 42 Povrchové proudy antény FA_P04 na kmitočtu 2,4245 GHZ



Obr. 43 Povrchové proudy antény FA_P04 na kmitočtu 2,4847 GHZ

Tab. 8 Výsledné parametry pro flíčkovou anténu FA_P04

Parametr	Hodnota	Popis
G	-3,978 dB	Zisk antény
V	892,4 mm ³	Objem antény
B	102,4 MHz	Šířka pracovního pásma
η	-10,80 dB	Účinnost vyzařování antény
$ S_{11} $	-25,547 dB	Přizpůsobení na rezonančním kmitočtu

Povrchové proudy pro kmitočty 2,4245 GHz jsou zobrazeny na obr. 42 a pro kmitočty 2,4847 GHz jsou zobrazeny na obr. 43. Hlavní hranou, která vyzařuje, je přídatný rezonátor. Stejně jako u antény FA_P03 vyzařují obě hrany flíčku W a okolí

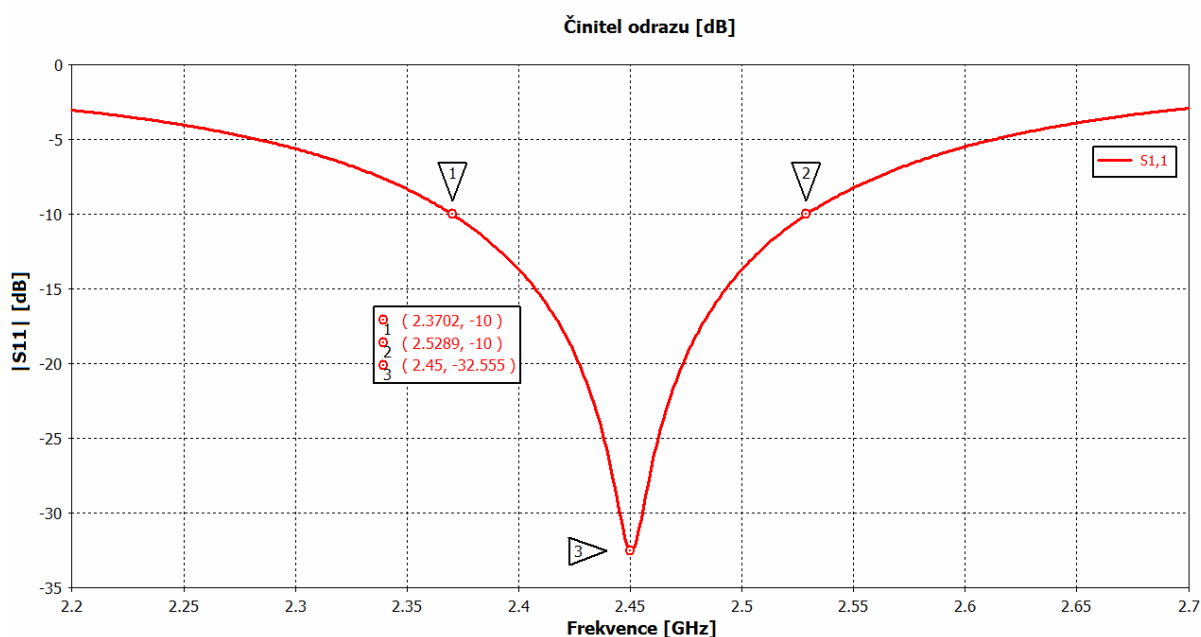
zkratovacího pinu, ale jejich příspěvek je malý ve srovnání s rezonátorem. Rozdíl povrchových proudů mezi rezonančními kmitočty není na první pohled vidět. Při rezonančním kmitočtu 2,4847 GHz spodní hrana flíčku W (vzdálenější hrana od napájecího bodu) přispívá k vyzařování více, než je tomu u rezonančního kmitočtu 2,4245 GHz. Sledované parametry jsou zapsány do tab. 8.

5.2 Miniaturní planární anténa se substrátem IsoClad 933

Pro další návrh miniaturní antény bude použit substrát s nízkou permitivitou a kmitočtovou stálostí tohoto parametru. Tato kritéria splňují substráty, které se používají ve vysokofrekvenční technice. Jako vhodná volba je substrát FoamClad s permitivitou $\varepsilon_r = 1,2$ a výškou $h = 1,880$ mm. Flíček se substrátem bude nad zemní plochou vyvýšen a mezi substrátem a zemní deskou vznikne vzduchové dielektrikum. Ale substrát FoamClad je pěnový, tudíž má nižší mechanickou pevnost a pro použití jako PIFA není vhodný. Proto z dostupných substrátů byl zvolen IsoClad933 s permitivitou $\varepsilon_r = 2,33$ a výškou $h = 1,524$ mm. Má sice větší permitivitu, ale zajišťuje mechanickou pevnost při použití jako PIFA.

Postup bude stejný jako v předchozí kapitole 5.1. Jako první se vytvoří obdélníková flíčková anténa s vyvýšeným flíčkem nad zemní plochou. Do vzorců (1.4) až (1.8) dosadíme relativní permitivitu vzduchu $\varepsilon_r = 1$ a výšku vzduchového dielektrika $h = 6$ mm. Vypočítané rozměry flíčku L a W se doladí pomocí simulátoru na rezonanční kmitočty. Pracovní název antény je PIFA_P01 a rozměry antény jsou v tab. 9. Parametry získané ze simulátoru jsou v tab. 10 a průběh činitele odrazu je na Obr. 44.

V druhém kroku nebude použita zkratovací stěna, ale rovnou zkratovací pin. Umístění pinu bude stejné jako v případě antény FA_P03. Pracovní název antény je PIFA_P02. Rozměry antény jsou v tab. 11, parametry získané ze simulátoru jsou v tab. 12, průběh činitele odrazu je na obr. 45.



Obr. 44 Průběh činitele odrazu pro anténu PIFA_P01

Tab. 9 Rozměry antény PIFA_P01

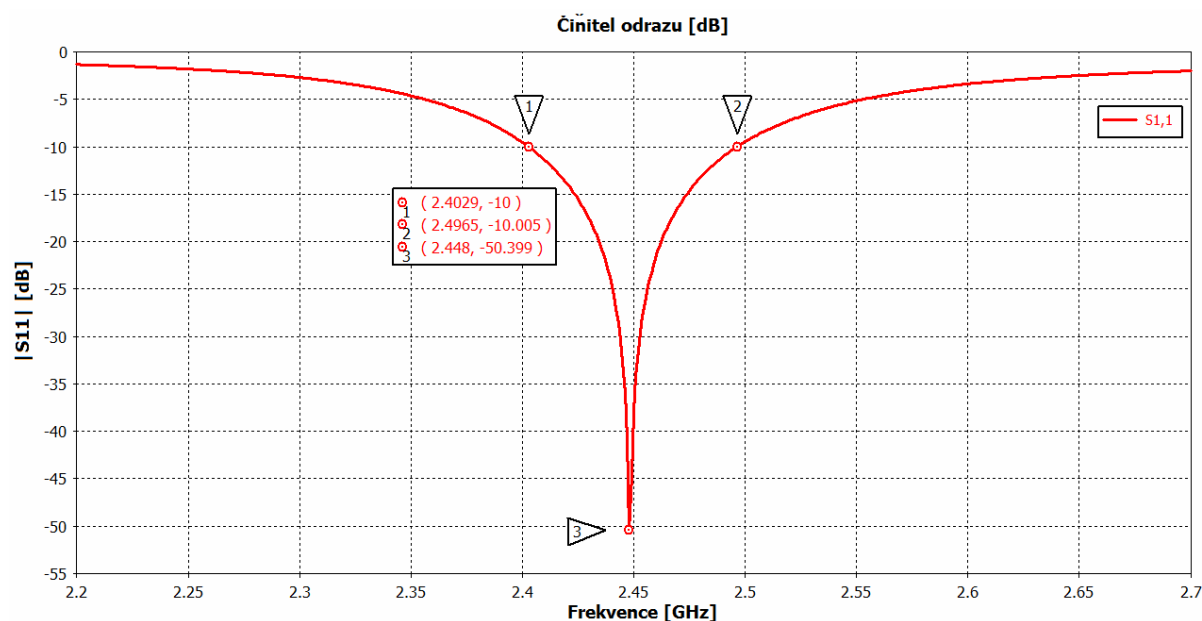
Parametr	Hodnota	Popis
M	80 mm	Šířka zemní plochy
N	80 mm	Délka zemní plochy
W	63 mm	Šířka flíčku
L	51 mm	Délka flíčku
h	7,524 mm	Výška substrátu a vzduchové mezery
t_p	0,035 mm	Tloušťka pokovení

Tab. 10 Výsledné parametry pro anténu PIFA_P01

Parametr	Hodnota	Popis
G	9,05 dB	Zisk antény
V	24399,5 mm ³	Objem antény
B	158,7 MHz	Šířka pracovního pásma
η	0,02235 dB	Účinnost vyzařování antény
$ S_{11} $	-32,555 dB	Přízpusobení na rezonančním kmitočtu

Tab. 11 Rozměry antény PIFA_P02

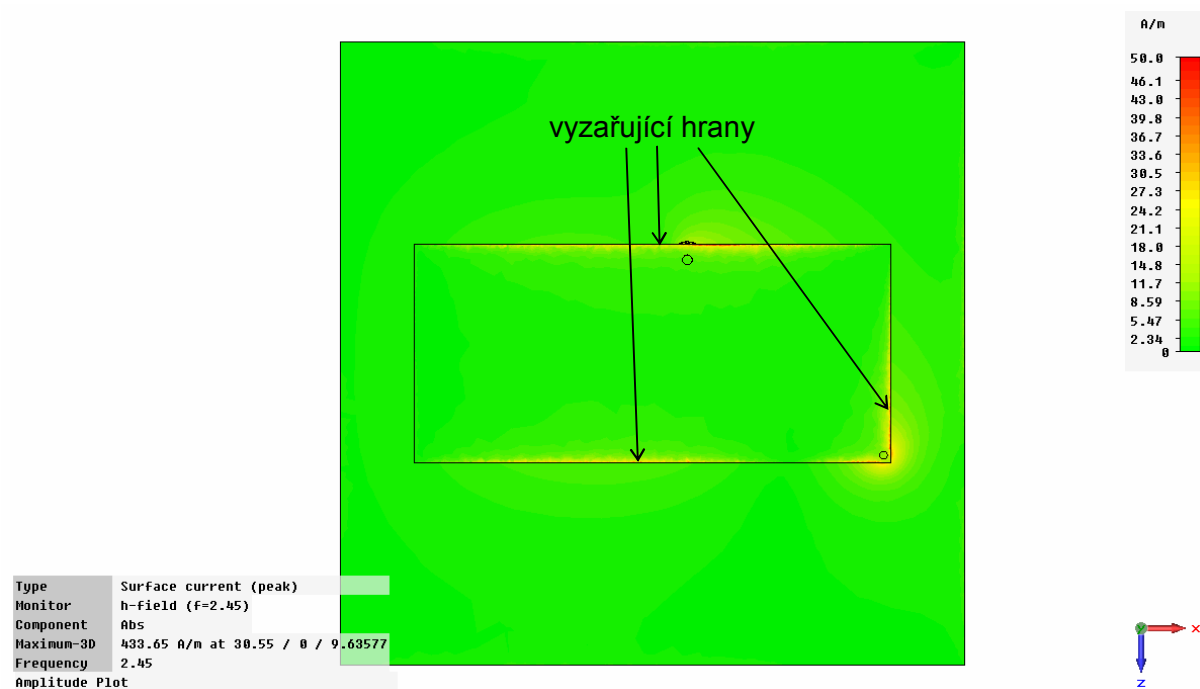
Parametr	Hodnota	Popis
M	80 mm	Šířka zemní plochy
N	80 mm	Délka zemní plochy
W	61,1 mm	Šířka flíčku
L	28 mm	Délka flíčku
h	7,524 mm	Výška substrátu a vzduchové mezery
t_p	0,035 mm	Tloušťka pokovení



Obr. 45 Průběh činitele odrazu pro anténu PIFA_P02

Tab. 12 Výsledné parametry pro anténu PIFA_P02

Parametr	Hodnota	Popis
G	6,89 dB	Zisk antény
V	12,991,8 mm ³	Objem antény
B	93,6 MHz	Šířka pracovního pásma
η	0,02529 dB	Účinnost vyzařování antény
$ S_{11} $	-50,399 dB	Přízpusobení na rezonančním kmitočtu

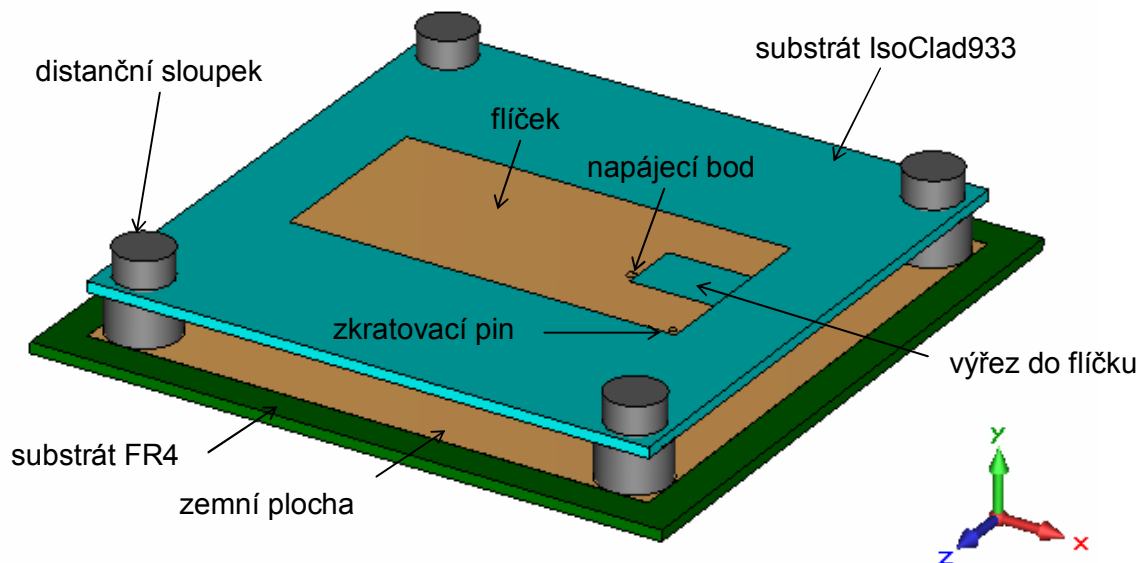


Obr. 46 Povrchové proudy antény PIFA_P02 na kmitočtu 2,45 GHZ

Rozměry flíčku antény PIFA_P02 jsou stále velké. Na obr. 46 jsou vyznačeny vyzařující hrany flíčku. Do vyzařujících hran vytvoříme záměrně výřez odleptáním pokovení. Povrchové proudy budou výřez obtékat a dojde k elektrickému prodloužení hrany a posunutí rezonačního kmitočtu k vyšším hodnotám. Rezonanční kmitočet posuneme zpět zmenšením rozměrů flíčku W a L . Pro zajištění přesné vzduchové mezery budou použity pastové distanční sloupky, které mají hodnotu relativní permitivity $\epsilon_r = 3,1$.

5.2.1 PIFA s tvarem flíčku písmene C

Obdélníkový výřez do flíčku se vytvoří do hrany L u zkratovacího pinu. Vznikne tvar flíčku, který připomíná písmeno C, proto má anténa pracovní název PIFA_C. Na obr. 47 je anténa PIFA_C s i popisem důležitých částí.

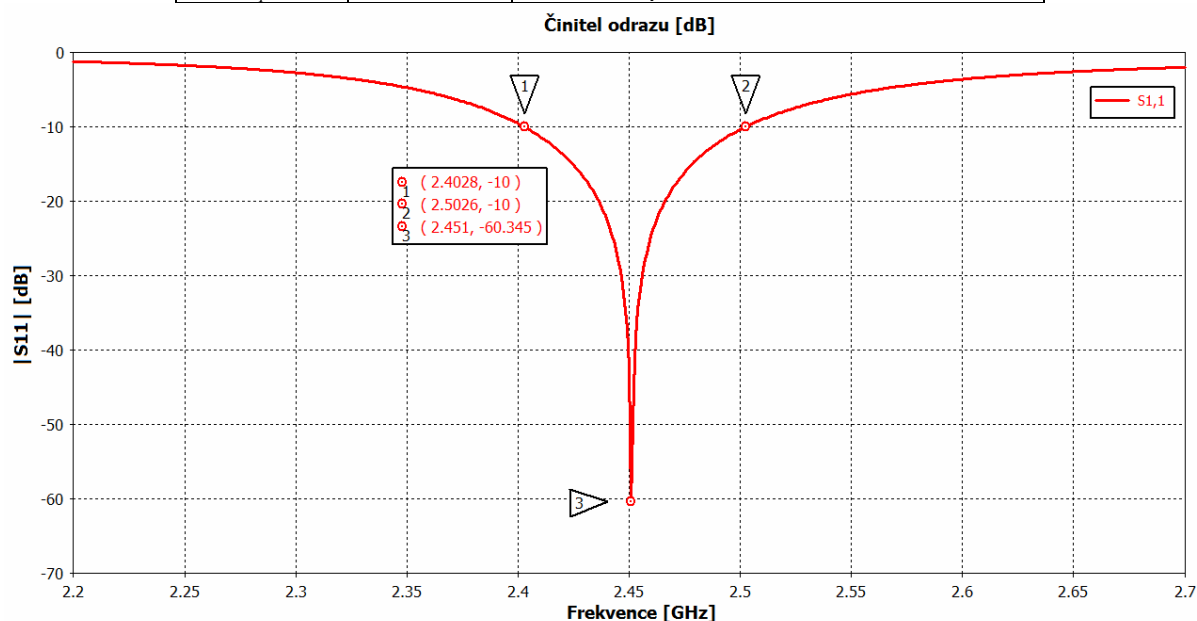


Obr. 47 Anténa PIFA s tvarem flíčku písmene C

Rozměry antény PIFA_C byly odečteny ze simulátoru a zapsány do tab. 13. Na obr. 49 je zobrazen činitel odrazu s vyznačenými značkami. Mezi první a druhou značkou je šířka pásma antény PIFA_C $B = 99,8$ MHz pro $|S_{11}| \leq -10$ dB. Značka 3 znázorňuje rezonační kmitočet s činitelem odrazu $|S_{11}| = -60,345$ dB.

Tab. 13 Rozměry antény PIFA_C

Parametr	Hodnota	Popis
M	80 mm	Šířka zemní plochy
N	80 mm	Délka zemní plochy
W	55,22 mm	Šířka flíčku
L	27 mm	Délka flíčku
h	7,524 mm	Výška substrátu a vzduchové mezery
t_p	0,035 mm	Tloušťka pokovení



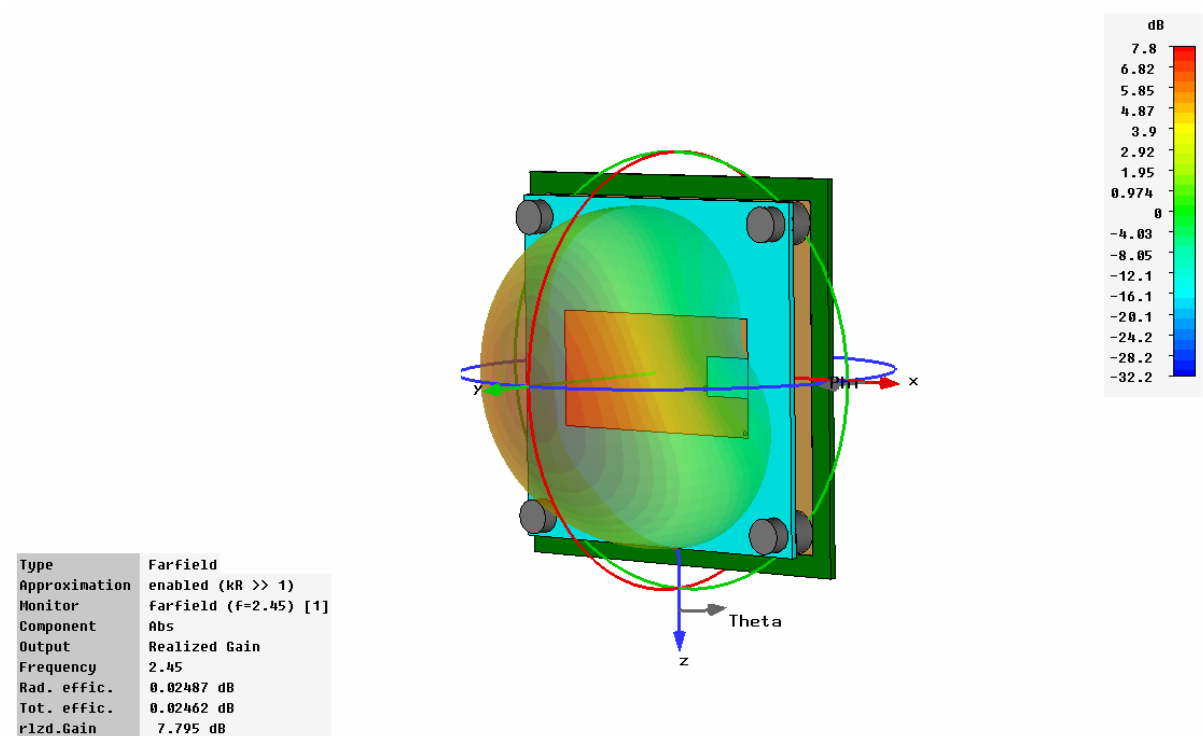
Obr. 48 Průběh činitele odrazu pro anténu PIFA_C

Vyzařovací charakteristika antény PIFA_C na kmitočtu 2,45 GHz je na obr. 49, kde byl použit mód realizovaného zisku. Hlavní lalok je mírně odkloněn od nulové osy (maximálně o 3°). Anténa PIFA_C má oproti anténám na substrátu FR4 dobrý zisk $G = 7,795$ dB. Účinnost vyzařování antény je $\eta = 0,02487$ dB.

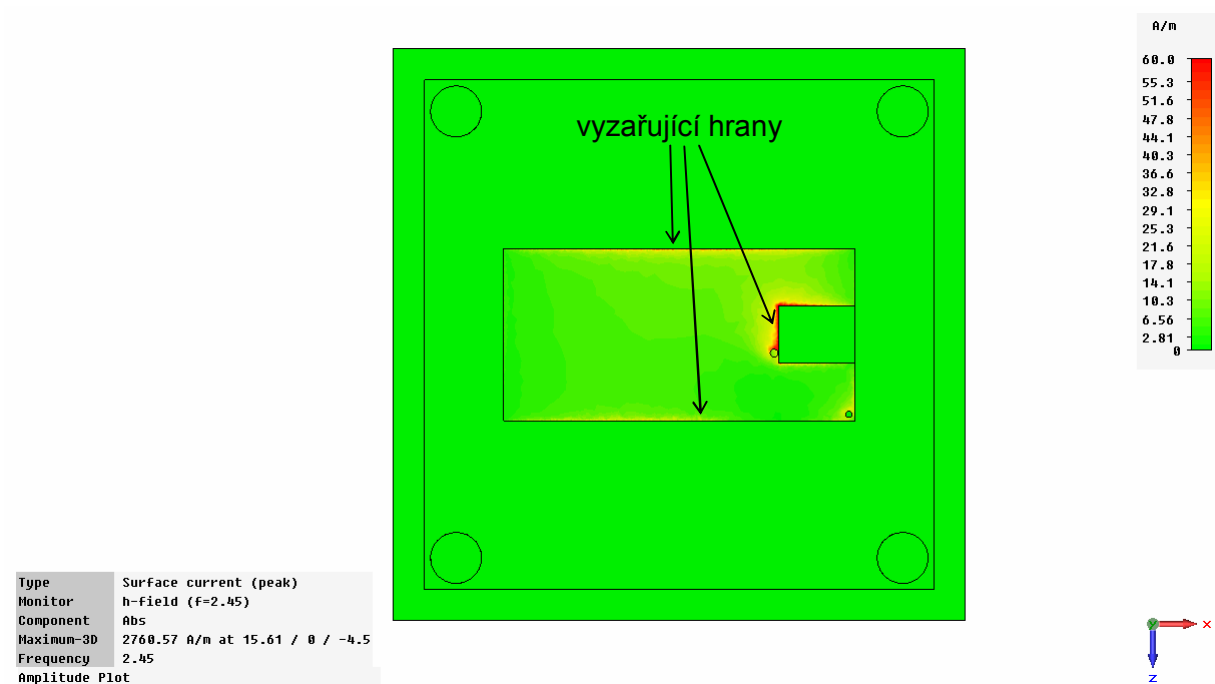
Povrchové proudy na obr. 50 jsou podle předpokladů. Nejvíce k vyzařování přispívají hrany vytvořené výřezem do flíčku. Méně vyzařují hrany flíčku W a okolí zkratu. Sledované parametry jsou zapsané v tab 14.

Tab. 14 Výsledné parametry pro anténu PIFA_C

Parametr	Hodnota	Popis
G	7,795 dB	Zisk antény
V	11270 mm ³	Objem antény
B	99,8 MHz	Šířka pracovního pásma
η	0,02487 dB	Účinnost vyzařování antény
$ S_{11} $	-60,345 dB	Přizpůsobení na rezonančním kmitočtu



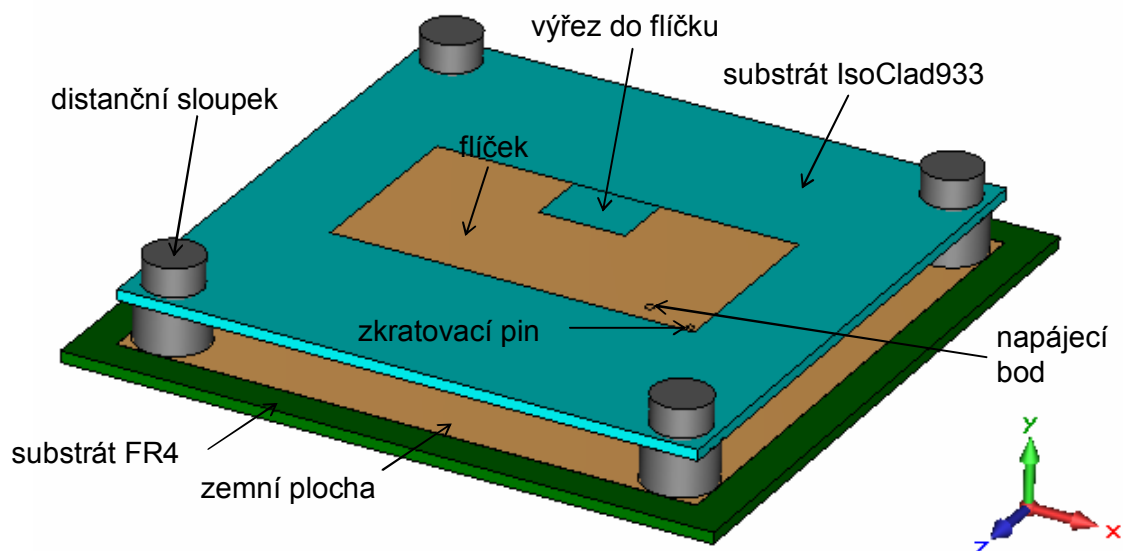
Obr. 49 Vyžarovací charakteristika antény PIFA_C na kmitočtu 2,45 GHz



Obr. 50 Povrchové proudy antény PIFA_C na kmitočtu 2,45 GHz

5.2.2 PIFA s tvarem flíčku písmene U

Obdélníkový výřez do flíčku se vytvoří do hrany W u zkratovacího pinu. Vznikne tvar flíčku, který připomíná písmeno U, proto má anténa pracovní název PIFA_U. Na obr. 51 je anténa PIFA_U s i popisem důležitých částí.

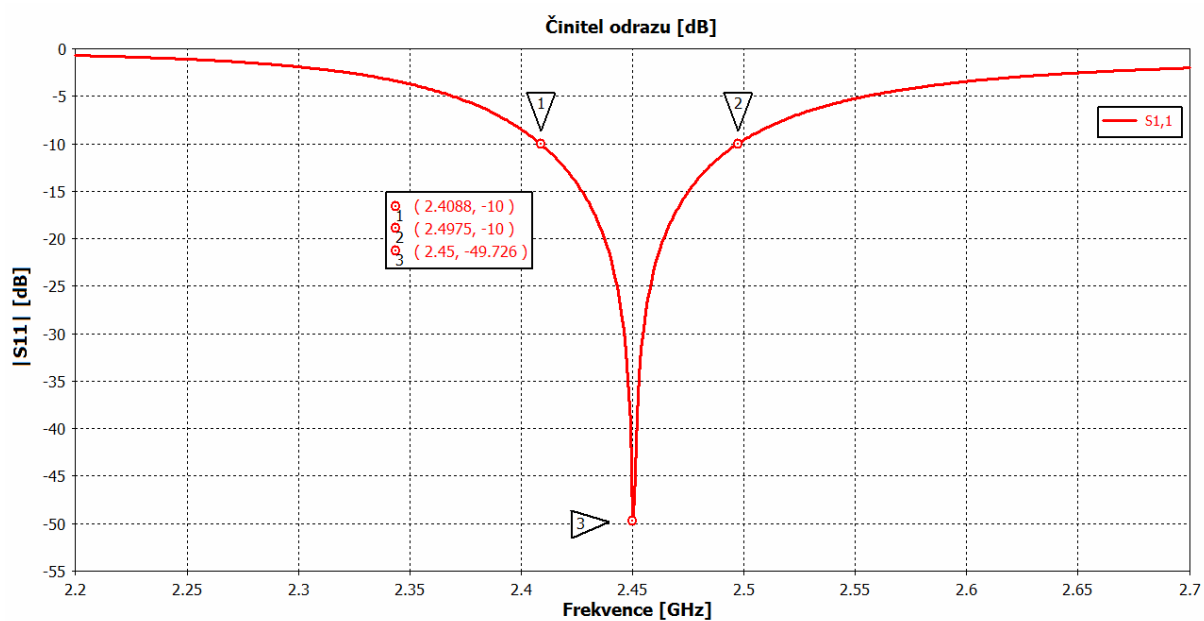


Obr. 51 Anténa PIFA s tvarem flíčku písmene U

Ze simulátoru byly odečteny rozměry antény a zapsány do tab. 15. Oproti anténě PIFA_C se snížila velikost hrany W o 4,87 mm. Na obr. 52 je zobrazen činitel odrazu, kde mezi značkami 1 a 2 je kmitočtová šířka pásma $B = 88,7$ MHz antény PIFA_U pro činitel odrazu $|S_{11}| \leq -10$ dB. Značka č. 3 znázorňuje hodnotu činitel odrazu $|S_{11}| = -49,726$ dB na rezonančním kmitočtu.

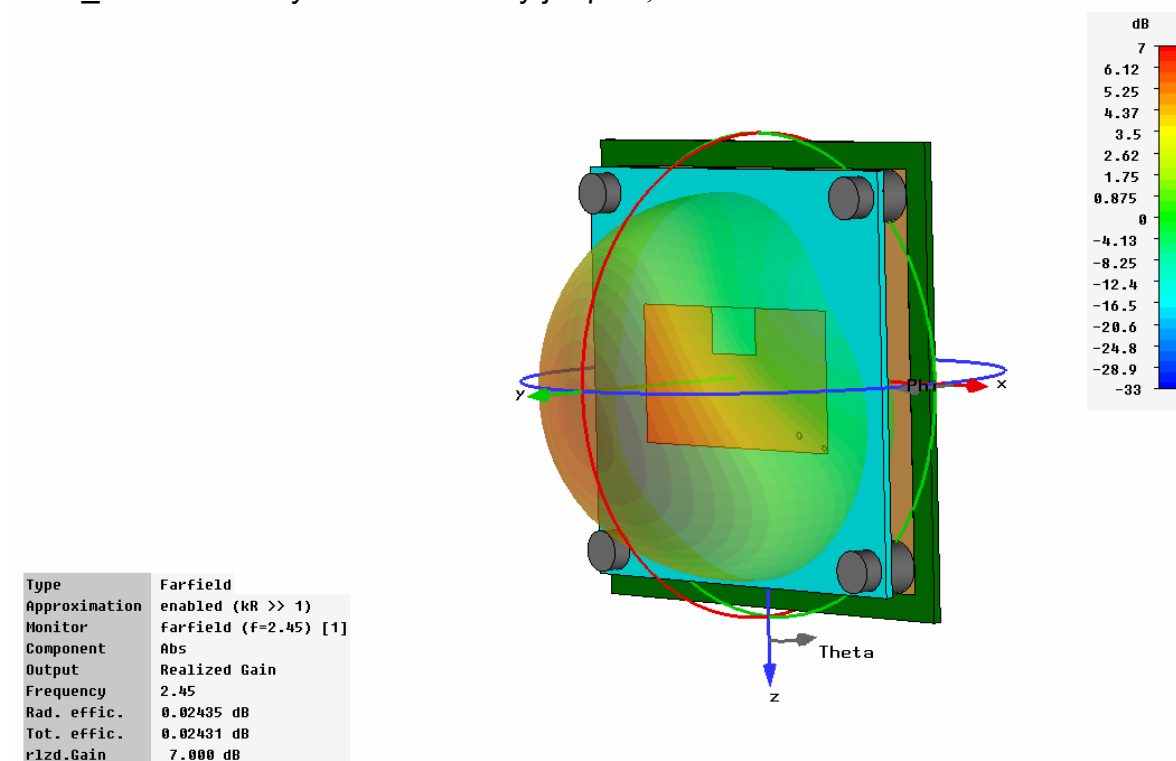
Tab. 15 Rozměry antény PIFA_U

Parametr	Hodnota	Popis
M	80 mm	Šířka zemní plochy
N	80 mm	Délka zemní plochy
W	50,35 mm	Šířka flíčku
L	27 mm	Délka flíčku
h	7,524 mm	Výška substrátu a vzduchové mezery
t_p	0,035 mm	Tloušťka pokovení

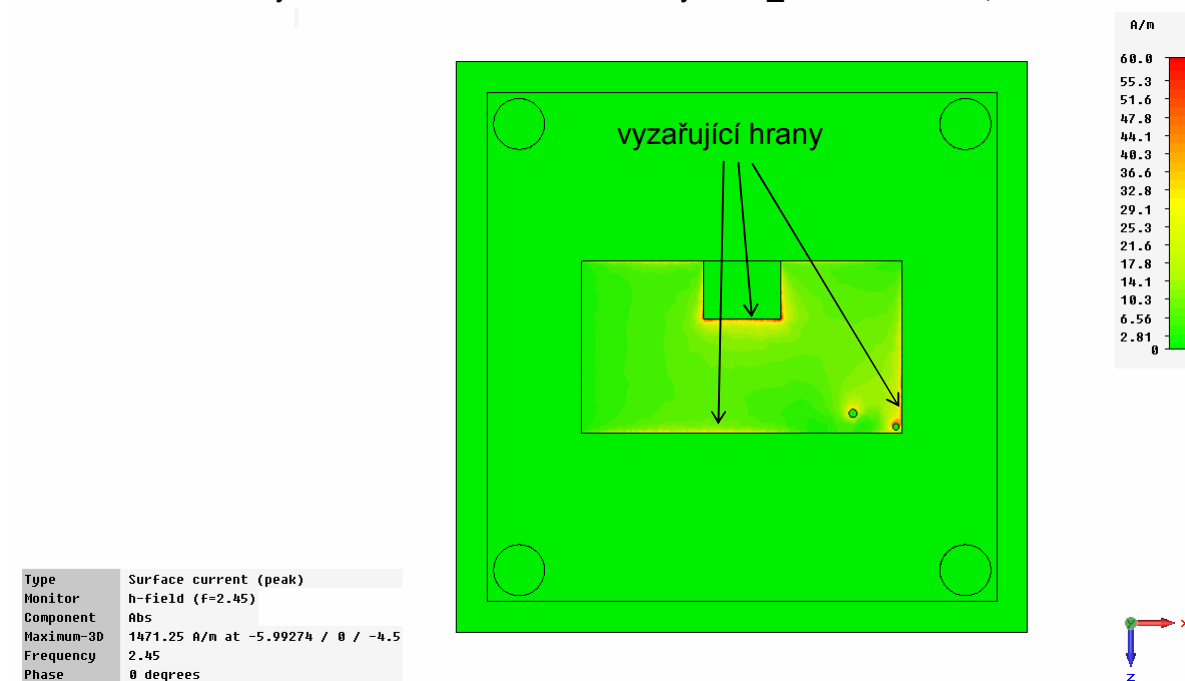


Obr. 52 Průběh činitele odrazu pro anténu PIFA_U

Pro směrovou charakteristiku antény PIFA_U byl také použit mód realizovaného zisku (obr 53). Směrová charakteristika je podobná s anténou PIFA_U, ale s větším odchýlením hlavního laloku od nulové osy (maximálně o 9°). Přemístění výřezu na hranu W má za následek snížení zisku $G = 7$ dB oproti anténě PIFA_C. Účinnost vyzařování antény je $\eta = 0,02435$ dB.



Obr. 53 Vyzařovací charakteristika antény PIFA_U na kmitočtu 2,45 GHz



Obr. 54 Povrchové proudy antény PIFA_U na kmitočtu 2,45 GHz

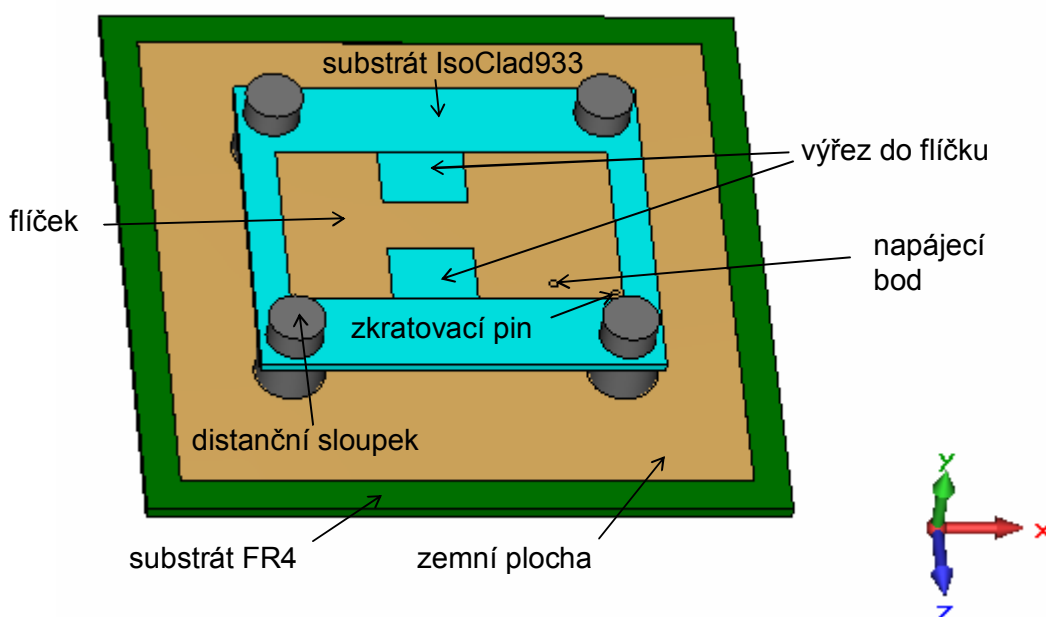
Povrchové proudy pro anténu PIFA_U jsou na obr. 54. Nejvíce k vyzařování přispívají hrany vytvořeného výřezu v hraně W a okolí zkratu. Méně přispívá hrana W , ve které není vytvořený výřez. V tab. 16 jsou shrnuty sledované parametry.

Tab. 16 Výsledné parametry pro anténu PIFA_U

Parametr	Hodnota	Popis
G	7 dB	Zisk antény
V	11322,2 mm ³	Objem antény
B	88,7 MHz	Šířka pracovního pásma
η	0,02435 dB	Účinnost vyzařování antény
$ S_{11} $	-49,726 dB	Přízpůsobení na rezonančním kmitočtu

5.2.3 PIFA s tvarem flíčku písmene H

U antény PIFA_U se výřez do flíčku zrcadlí podle středu antény na druhou hranu W a vznikne anténa s tvarem flíčku písmene H, proto bude mít název PIFA_H. Na Obr. 55 je anténa PIFA_H s i popisem důležitých částí. Rozměry anténní struktury byly odečteny ze simulátoru a zapsány do tab. 17.



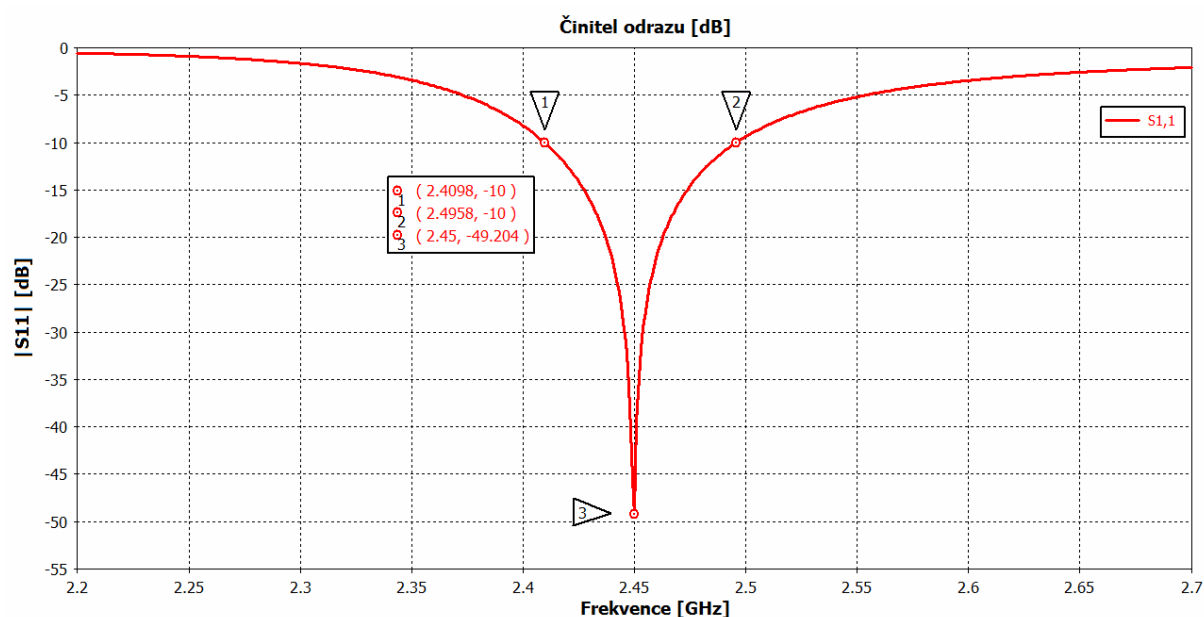
Obr. 55 Anténa PIFA s tvarem flíčku písmene H

Tab. 17 Rozměry antény PIFA_H

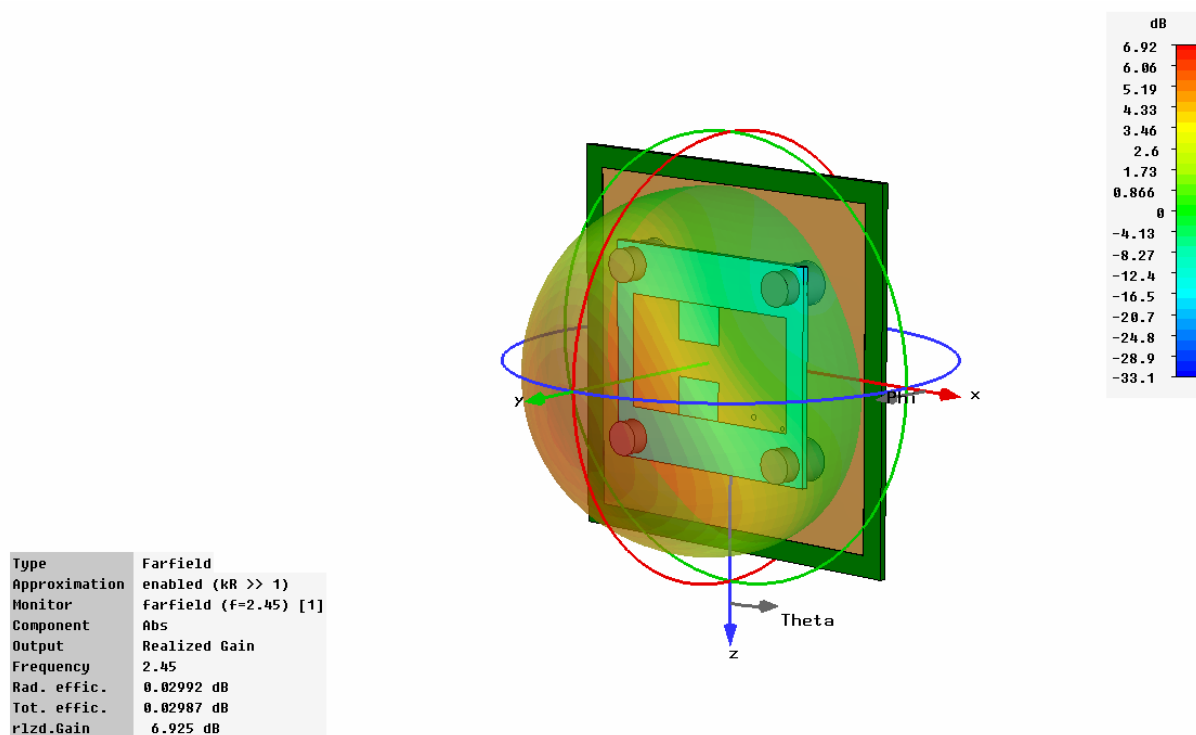
Parametr	Hodnota	Popis
M	80 mm	Šířka zemní plochy
N	80 mm	Délka zemní plochy
W	46,6 mm	Šířka flíčku
L	26,5 mm	Délka flíčku
h	7,524 mm	Výška substrátu a vzduchové mezery
t_p	0,035 mm	Tloušťka pokovení

Obr. 56 zobrazuje činitele odrazu antény PIFA_H, kde mezi značkami 1 a 2 je pracovní pásmo $B = 86$ MHz pro $|S_{11}| \leq -10$ dB. Značka 3 činitel odrazu na rezonančním kmitočtu $|S_{11}| = -49,204$ dB.

Na obr. 57 je zobrazena směrová charakteristika antény PIFA_H v módu realizovaného zisku. Odklonění hlavního laloku od nulové osy je o 1° větší než u antény PIFA_U. Nepatrně se snížil zisk $G = 9,925$ dB, ale zvýšila se efektivita vyzařování $\eta = 0,02992$ dB v porovnání s PIFA_U.



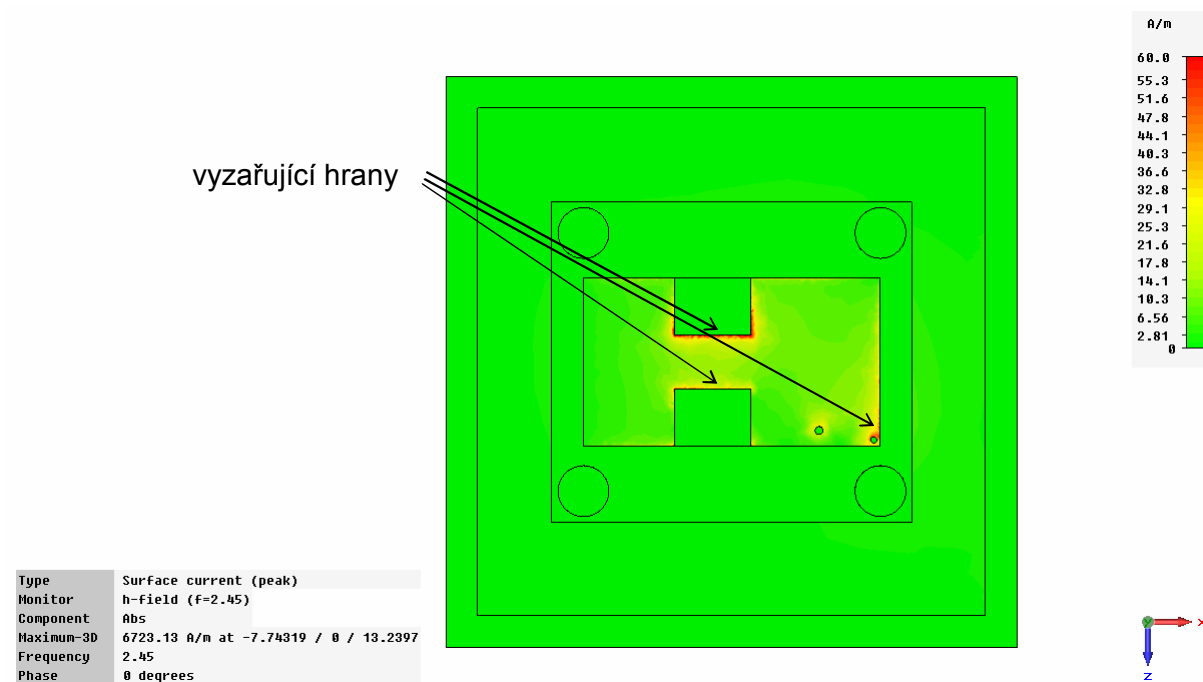
Obr. 56 Průběh činitele odrazu pro anténu PIFA_H



Obr. 57 Vyzařovací charakteristika antény PIFA_H na kmitočtu 2,45 GHz

Tab. 18 Výsledné parametry pro anténu PIFA_H

Parametr	Hodnota	Popis
G	6,925 dB	Zisk antény
V	9377,8 mm ³	Objem antény
B	86 MHz	Šířka pracovního pásma
η	0,02992 dB	Účinnost vyzařování antény
$ S_{11} $	-49,204 dB	Přizpůsobení na rezonančním kmitočtu

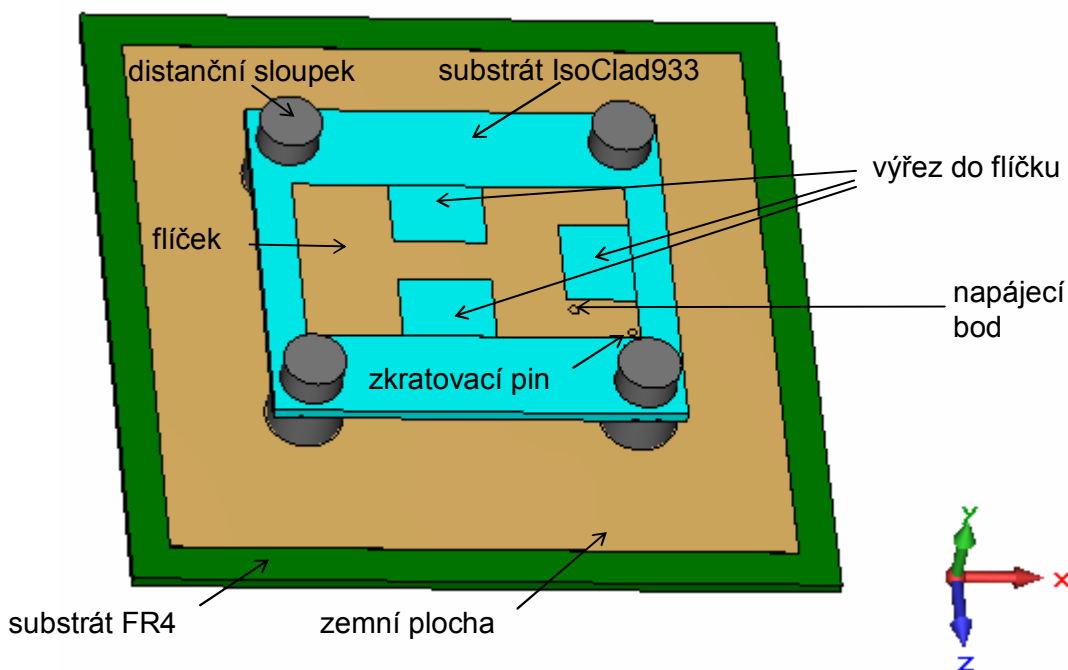


Obr. 58 Povrchové proudy antény PIFA_H na kmitočtu 2,45 GHz

U povrchových proudů (obr. 58) nejvíce přispívají hrany výřezu, který byl použit, i antény PIFA_U a okolí flíčku. Méně přispívají nově vytvořené hrany výřezu. Do tab. 18 byly zapsány sledované parametry antény.

5.2.4 PIFA s tvarem flíčku písmene HC

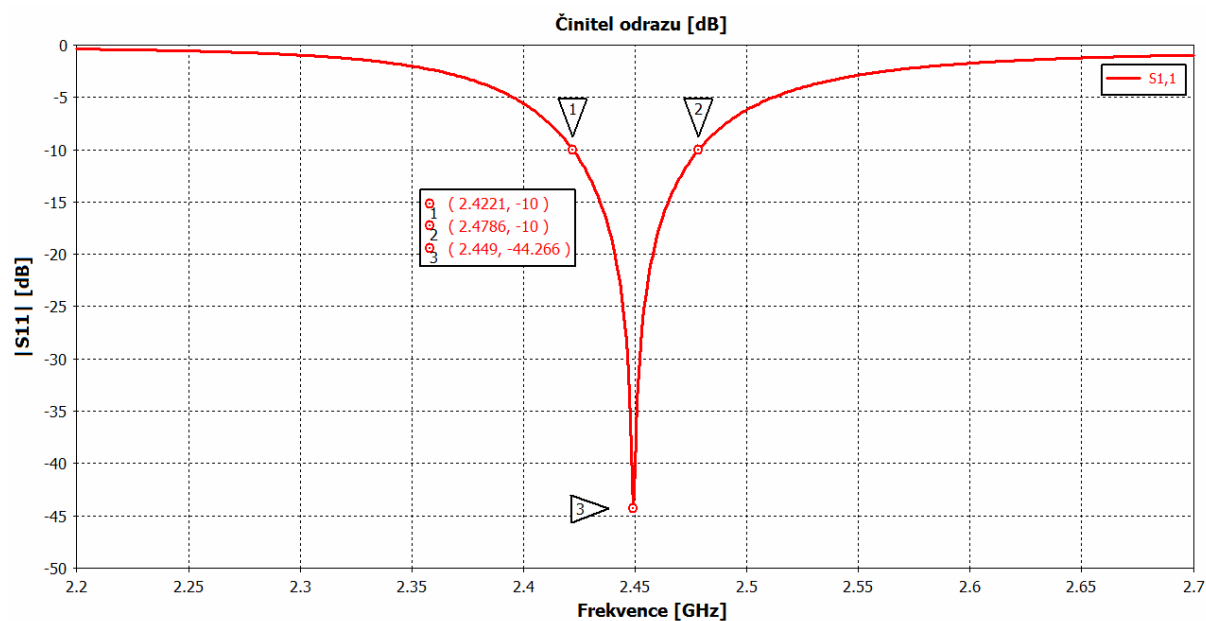
Kombinací výřezů antény PIFA_H a výřezu PIFA_C vznikne flíček s tvarem písmen HC, která se bude nazývat PIFA_HC. Obr. 55 ukazuje anténu PIFA_HC s i popisem důležitých částí. Rozměry anténní struktury byly odečteny ze simulátoru a zapsány do tab. 19



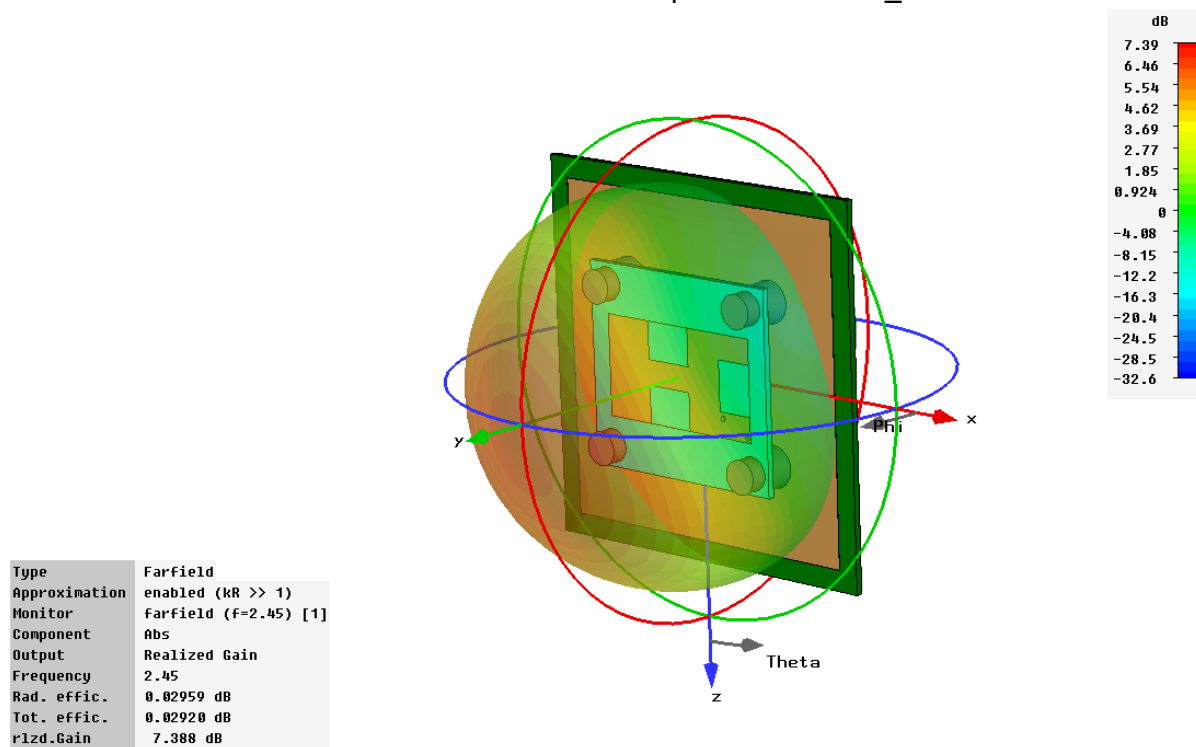
Obr. 59 Anténa PIFA s tvarem flíčku písmene HC

Tab. 19 Rozměry antény PIFA_HC

Parametr	Hodnota	Popis
M	80 mm	Šířka zemní plochy
N	80 mm	Délka zemní plochy
W	42,64 mm	Šířka flíčku
L	24 mm	Délka flíčku
h	7,524 mm	Výška substrátu a vzduchové mezery
t_p	0,035 mm	Tloušťka pokovení



Obr. 60 Průběh činitele odrazu pro anténu PIFA_HC

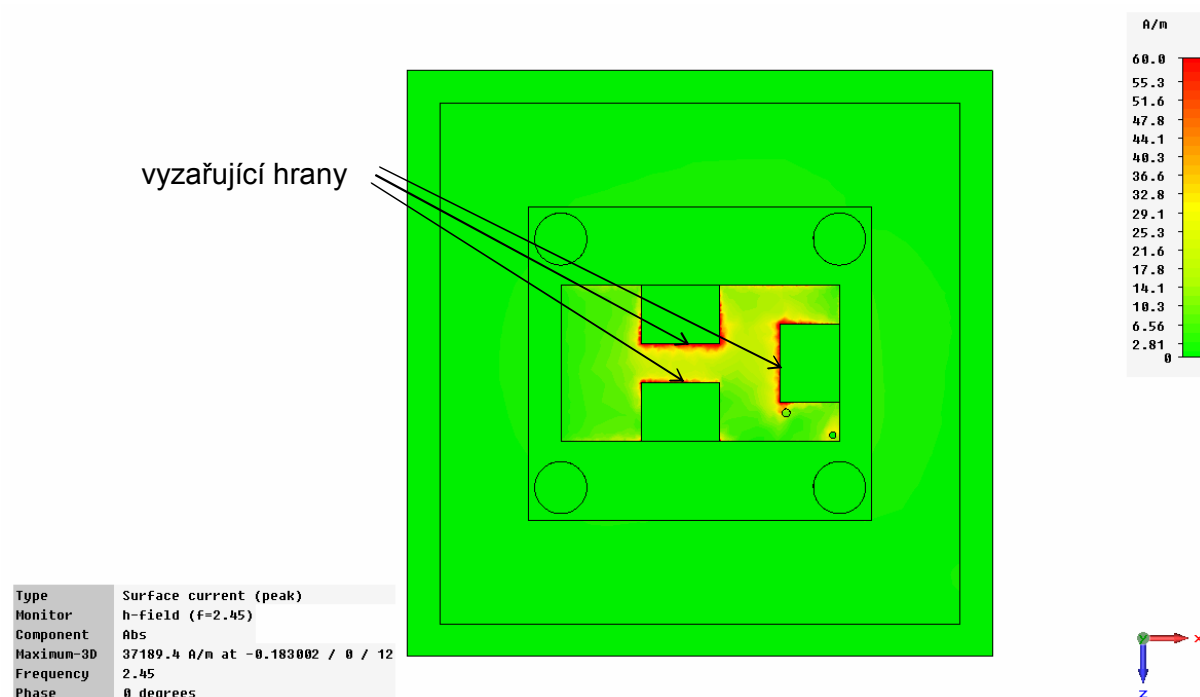


Obr. 61 Vyzařovací charakteristika antény PIFA_HC na kmitočtu 2,45 GHz

Na obr. 60 je zobrazen činitel odrazu s vyznačenými značkami. Mezi první a druhou značkou je šířka pásma antény PIFA_HC $B = 56,5$ MHz pro $|S_{11}| \leq -10$ dB. Značka 3 znázorňuje rezonanční kmitočet s činitelem odrazu $|S_{11}| = -44,266$ dB.

Vyzařovací charakteristika antény PIFA_HC na kmitočtu 2,45 GHz je na obr. 61, kde byl použit mód realizovaného zisku. Hlavní lalok je odkloněn od nulové osy méně než u antény PIFA_H. Odklon hlavního laloku od nulové osy je 6° . Anténa PIFA_HC má zisk $G = 7,388$ dB. Účinnost vyzařování antény je $\eta = 0,02959$ dB.

Obr. 62 zobrazuje povrchové proudy, kde nejvíce přispívají hrany výřezu. Menší příspěvek je od okolí zkratu. Do tab. 20 byly zapsány sledované parametry antény.



Obr. 62 Povrchové proudy antény PIFA_HC na kmitočtu 2,45 GHz

Tab. 20 Výsledné parametry pro anténu PIFA_HC

Parametr	Hodnota	Popis
G	7,388 dB	Zisk antény
V	7771,4 mm ³	Objem antény
B	56,5 MHz	Šířka pracovního pásma
η	0,02959 dB	Účinnost vyzařování antény
$ S_{11} $	-44,266 dB	Přízpůsobení na rezonančním kmitočtu

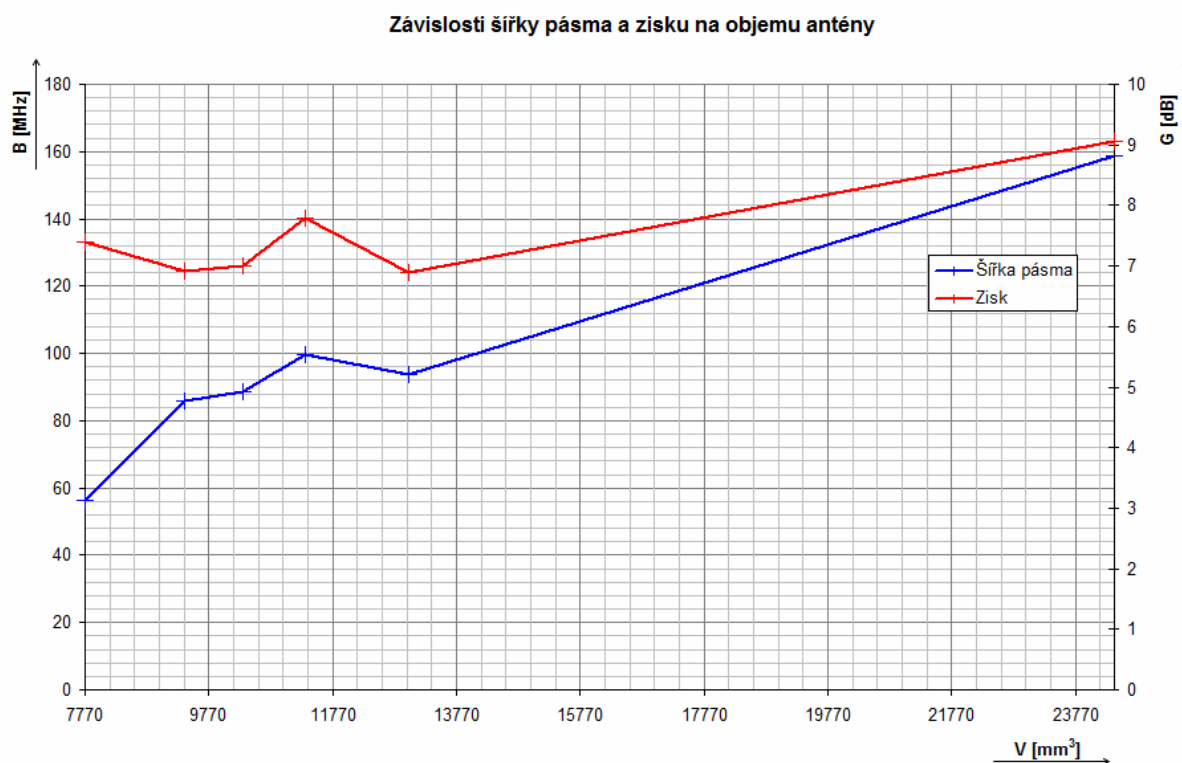
5.3 Shrnutí simulovaných antén

Byla vytvořena tab. 21, kde jsou porovnány rozměry a sledované parametry simulovaných antén. Parametr H je celková výška antény. Pro flíčkovou anténu se substrátem FR4 je celková výška součtem výšky substrátu h s tloušťkou pokovení t_p zemní plochy a flíčku. Parametr H pro anténu PIFA se substrátem IsoClad933 je

součtem tloušťky pokovení t_p zemní plochy a flíčku s výškou substrátu a výškou vzduchové mezery.

Tab. 21 Shrnutí simulovaných antén v přehledné tabulce

Název antény	W [mm]	L [mm]	H [mm]	V [mm ³]	G [dB]	η [dB]	B [MHz]	$ S_{11} $ [dB]
FA_P01	38,31	28,7	1,65	1814,2	5,46	-1,696	43,5	-44,975
FA_P02	38,31	14,115	1,65	892,2	4,573	-2,276	33,5	-48,012
FA_P03	37,3	14,52	1,65	893,6	0,515	-6,567	38	-42,144
FA_P04	37,25	14,52	1,65	892,4	-3,978	-10,8	102,4	-25,547
PIFA_P01	63	51	7,594	24399,5	9,05	0,02235	158,7	-32,555
PIFA_P02	61,1	28	7,594	12991,8	6,89	0,02529	93,6	-50,399
PIFA_C	55,22	27	7,594	11322,2	7,795	0,02487	99,8	-60,345
PIFA_U	50,35	27	7,594	10323,7	7	0,02435	88,7	-49,726
PIFA_H	46,6	26,5	7,594	9377,8	6,925	0,02992	86	-49,204
PIFA_HC	42,64	24	7,594	7771,4	7,388	0,02959	56,5	-44,266

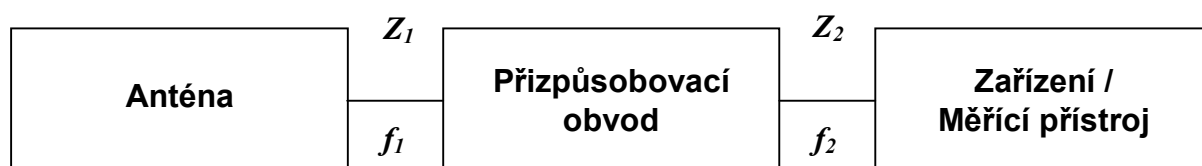


Obr. 63 Grafické znázornění šířky pásma B a zisku G na objemu antény V pro modely antén PIFA

Byla vytvořena závislost šířky pásma B a účinnosti η na objemu antény V pro modely antén PIFA z kapitoly 5.2 (obr. 63). Snižování rozměrů, resp. objemu anténní struktury vede ke snížení šířky pásma.

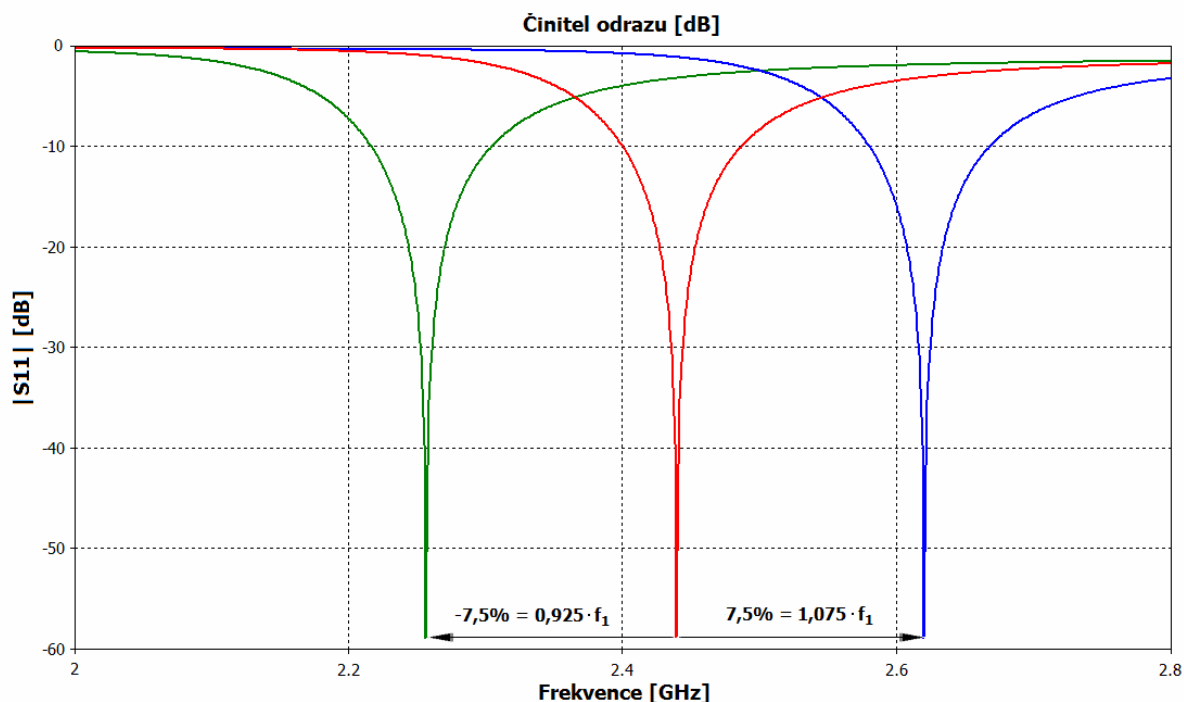
6. NÁVRH PŘÍZPŮSOBOVACÍHO OBVODU

Přizpůsobovací obvod transformuje reálnou složku impedance na požadovanou hodnotu, většinou $50\ \Omega$. Zároveň kompenzuje jalovou složku tím, že obvod tvoří opačnou hodnotu reaktance než kompenzovaná anténa. Další použití přizpůsobovacího obvodu je k přeladění rezonančního kmitočtu antény na jiný požadovaný kmitočet. Oba nejběžnější případy použití jsou naznačeny v blokovém schématu na obr. 64, kde Z_1 je impedance antény, Z_2 je impedance za přizpůsobovacím obvodem, f_1 je rezonanční kmitočet antény pro použité pásmo a f_2 je požadovaný kmitočet, na kterém má být anténa v daném pásmu přizpůsobena.



Obr. 64 Blokové schéma zapojení přizpůsobovacího obvodu

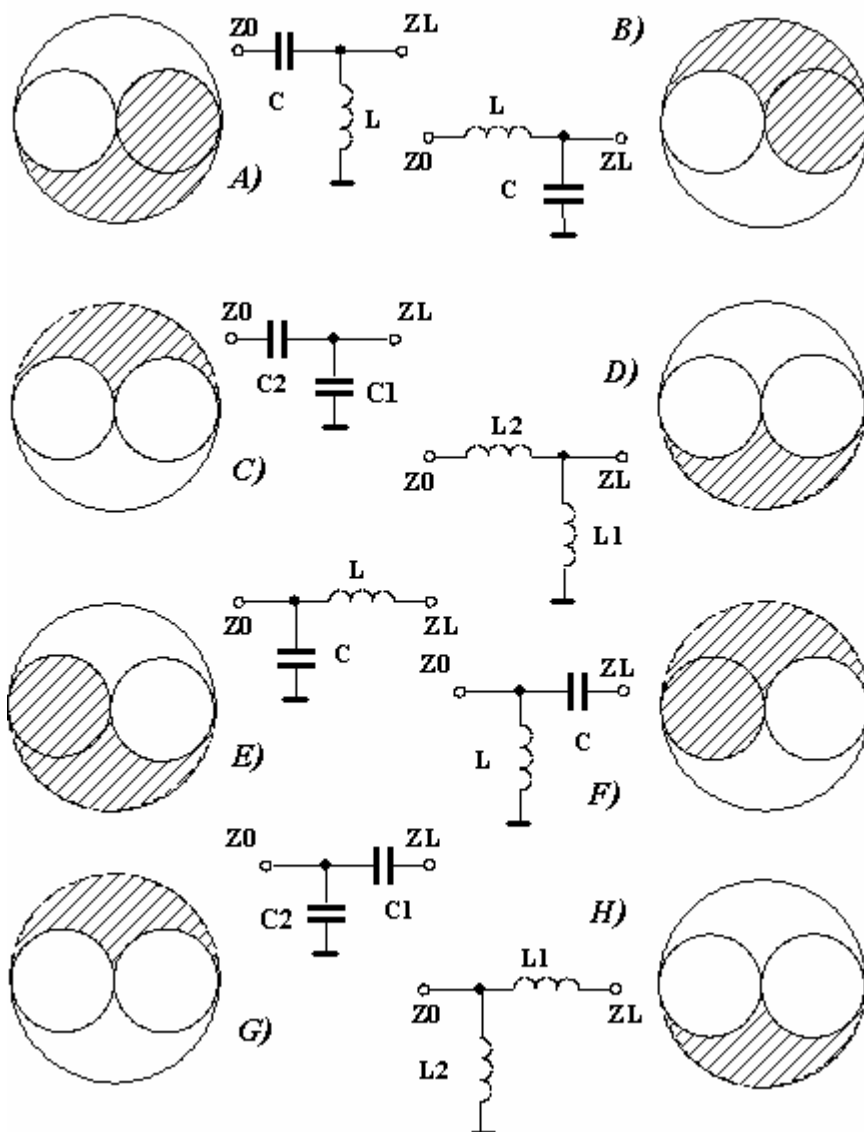
Požadavkem je, aby přizpůsobovací obvod anténu přeladil o 15 % od rezonančního kmitočtu f_1 a zároveň výstupní impedance Z_2 byla $50\ \Omega$. Přizpůsobovací obvod anténu přeladí o 7,5 % k nižšímu kmitočtu a také o 7,5 % k vyššímu kmitočtu. Ideální případ požadovaného přeladění je naznačen na obr. 65. Červená křivka je činitel odrazu antény, modré a zelené křivce odpovídá činitel odrazu za přizpůsobovacím obvodem.



Obr. 65 Ideální přeladění antény pomocí přizpůsobovacího obvodu o 15%

Přizpůsobovací obvod se bude skládat z kombinací prvků ve formě induktoru a kapacitoru v konfiguraci půlčlánku. Za pomoci obr. 66 ze znalosti hodnoty impedance, resp. umístění impedance ve Smithově diagramu se rozhodne, jaký z

půlčlanků se použije. Pokud je impedance antény ve vyšrafované oblasti, tak pomocí uvedeného půlčlanku se provede přizpůsobení antény na daném kmitočtu.



Obr. 66 Půlčlankové obvody pro přizpůsobení impedance [10]

6.1 Přizpůsobovací obvod na mikropáskovém vedení

Nesymetrické mikropáskové vedení má stejnou strukturu jako flíčková anténa. Skládá se z mikropásku naneseném na dielektrickém materiálu s permitivitou ϵ_r . Ze spodní strany substrátu je nanesena zemní plocha. Pro výpočty se provádí transformace na konformní zobrazení (obr. 67). Určené parametry konformního zobrazení bez rozptylového pole se přepočítají zpět na parametry původní struktury.



Obr. 67 Transformace mikropáskového vedení na konformní zobrazení [14]

Vztahy pro výpočet parametrů mikropáskového vedení jsou čerpány ze skript [14]. Vztah pro korekci šířky mikropásku s nenulovou tloušťkou pokovení:

$$w_{ef} = w_s + \Delta w \quad (1.9)$$

$$\Delta w = 1,25 \cdot \frac{t}{\pi} \left(1 + \ln \frac{2h}{t} \right) \quad \text{pro } w/h > \frac{1}{2\pi} \quad (1.10)$$

$$\Delta w = 1,25 \cdot \frac{t}{\pi} \left(1 + \ln \frac{4\pi \cdot w}{t} \right) \quad \text{pro } w/h \leq \frac{1}{2\pi} \quad (1.11)$$

Transformace na konformní zobrazení:

$$w_f = \frac{2\pi \cdot h}{\ln \left(\frac{8h}{w_{ef}} + \frac{w_{ef}}{4h} \right)} \quad \text{pro } w/h \leq 1 \quad (1.12)$$

$$w_f = w_{ef} + \frac{2h}{\pi} \ln \left[17,08 \cdot \left(\frac{w_{ef}}{2h} + 0,85 \right) \right] \quad \text{pro } w/h > 1 \quad (1.13)$$

Permitivita konformního zobrazení:

$$\frac{\varepsilon_r + 1}{2} \leq \varepsilon_{ef} \leq \varepsilon_r \quad (1.14)$$

$$\varepsilon_{ef} = \frac{\varepsilon_r + 1}{2} + \frac{0,9}{\pi} \cdot \frac{\varepsilon_r - 1}{\ln \frac{8h}{w_{ef}}} \quad \text{pro } w/h \leq 1 \quad (1.15)$$

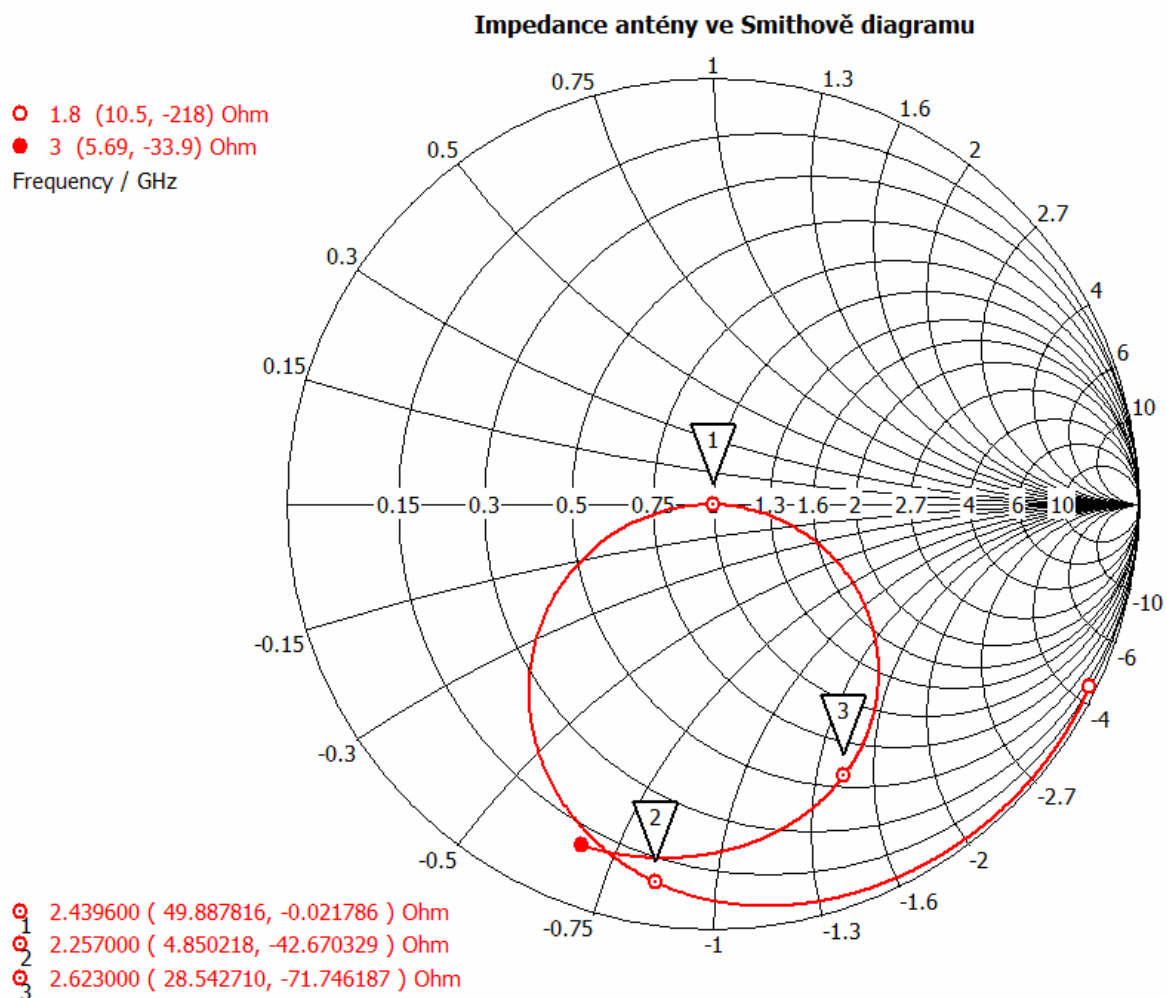
$$\varepsilon_{ef} = \varepsilon_r - \frac{\varepsilon_r - 1}{2} \cdot \frac{\ln \left[6,28 \left(\frac{w_{ef}}{2h} + 0,85 \right) \right]}{\frac{w_{ef}}{h} + \frac{2}{\pi} \ln \left[17,08 \left(\frac{w}{2h} + 0,85 \right) \right]} \quad \text{pro } w/h > 1 \quad (1.16)$$

Vlnový odpor:

$$Z_v = \frac{120\pi}{\sqrt{\varepsilon_{ef}}} \cdot \frac{h}{w_f} \quad (1.17)$$

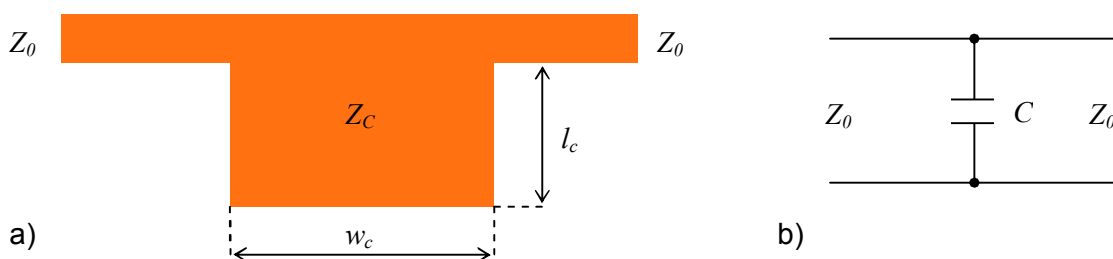
Pro mikropáskové vedení bude použit stejný substrát jako pro anténu PIFA v kapitole 5.2. Substrát IcoClad 933 má výšku substrátu $h = 1,524$ mm, permitivitu $\varepsilon_r = 2,33$ a tloušťku pokovení $t = 0,035 \mu\text{m}$. Pro výpočet šířky nesymetrického mikropáskového vedení je vytvořen skript, který je uveden v příloze pod názvem "sirka_mikropásku.m". Parametry substrátu IsoClad 933 byly zadány do uvedeného skriptu a vypočítaná hodnota šířky mikropásku je $w_s = 4,46$ mm pro impedanci 50Ω .

Na obr. 68 je Smithův diagram pro impedanci antény, kde značka č.1 je rezonanční kmitočet antény, značka č.2 je impedance antény na kmitočtu o 7,5 % níže (f_d) než rezonanční a naopak značka č.3 o 7,5 % výše (f_h). Impedance na obou kmitočtech se nachází ve spodní části Smithova diagramu, a proto je z obr. 66 vybrána varianta za E) ze sériovým induktorem a paralelním kapacitorem.



Obr. 68 Smithův diagram pro simulovanou impedanci antény

Jako paralelní kapacitor z mikropaskového vedení byl zvolen kapacitní pahýl. Jeho základní parametry jsou zobrazeny na obr. 69. Pro parametr w_c se vypočítá konformní zobrazení w_f a efektivní permitivita ϵ_{ef} ze vztahů 1.9 až 1.16. Vlnový odpor Z_C kapacitního pahýlu se vypočítá ze vztahu 1.17.

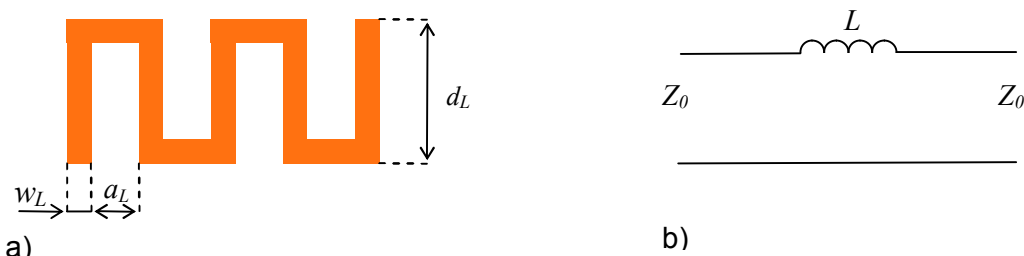


Obr. 69 Kapacitní pahýl: a) realizace z mikropásku [14], b) idealizovaný náhradní obvod

U kapacitního pahýlu z obr. 69 se hodnota kapacity C určí ze vztahu [14]:

$$C = \frac{l_c \cdot \sqrt{\epsilon_{ef}}}{c \cdot Z_C} \quad (1.18)$$

Sériový induktor na mikropaskovém vedení bude vytvořen pomocí meandrového induktoru. Jednotlivé parametry jsou vyznačeny na obr. 70.



Obr. 70 Meandrový induktor: a) realizace z mikropásku [14], b) idealizovaný náhradní obvod

U meandrového induktoru z obr. 70 se hodnota kapacity L určí ze vztahu [14], kde se hodnoty dosazují v mm a vypočítaná hodnota indukčnosti je v nH::

$$L = 0,1 \cdot d \cdot \left[4 \cdot n \cdot \ln \frac{2(a+w)}{w} - K_n \right] \quad (1.19)$$

Ve vztahu 1.19 je n počet úseků délek d . Konstanta K_n se určí z tab. 22 podle n .

Tab. 22 Určení konstanty K_n ze znalosti n

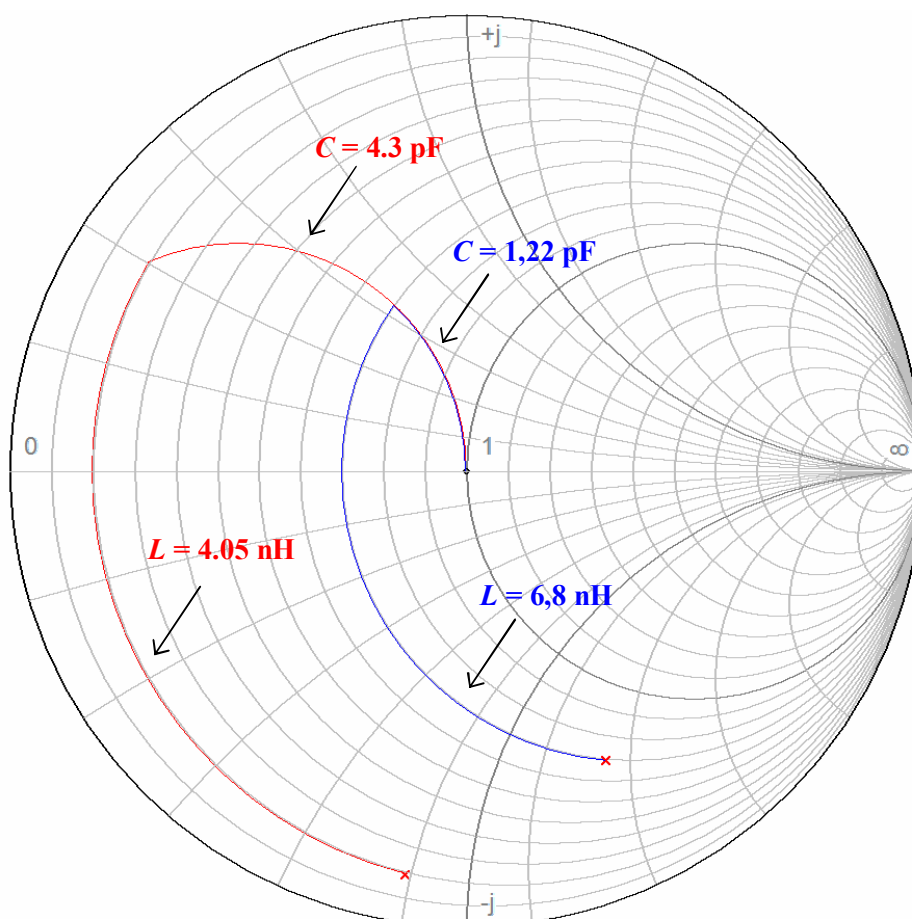
n	2	3	4	5	6	7	8	9	10
K_n	2,76	3,92	6,22	7,60	9,70	10,92	13,38	14,92	16,86

Pomocí vztahů 1.9 až 1.19 byl napsán skript v programu matlab pro výpočet rozměrů kapacitního pahýlu (obr. 69) a meandrového induktoru (obr. 70), který je uveden v příloze. K tomu je potřeba znát hodnotu indukčnosti a kapacity pro přizpůsobení. Bod č. 2 z obr. 68 se vynese do Smithova diagramu a za pomoci induktoru o hodnotě $L = 4,05$ nH se impedance přesune na pomyslnou jednotkovou kružnici admitance. Poté za pomoci kapacitoru o hodnotě $C = 4,3$ pF se přesune po pomyslné kružnici admitance do hodnoty 1, která odpovídá odnormované impedanci 50Ω . Stejný postup bude i pro bod č. 3 z obr. 68, jen s jinou hodnotou induktoru $L = 6,8$ nH a kapacitoru $C = 1,22$ pF. Výsledný Smithův diagram je na obr. 71.

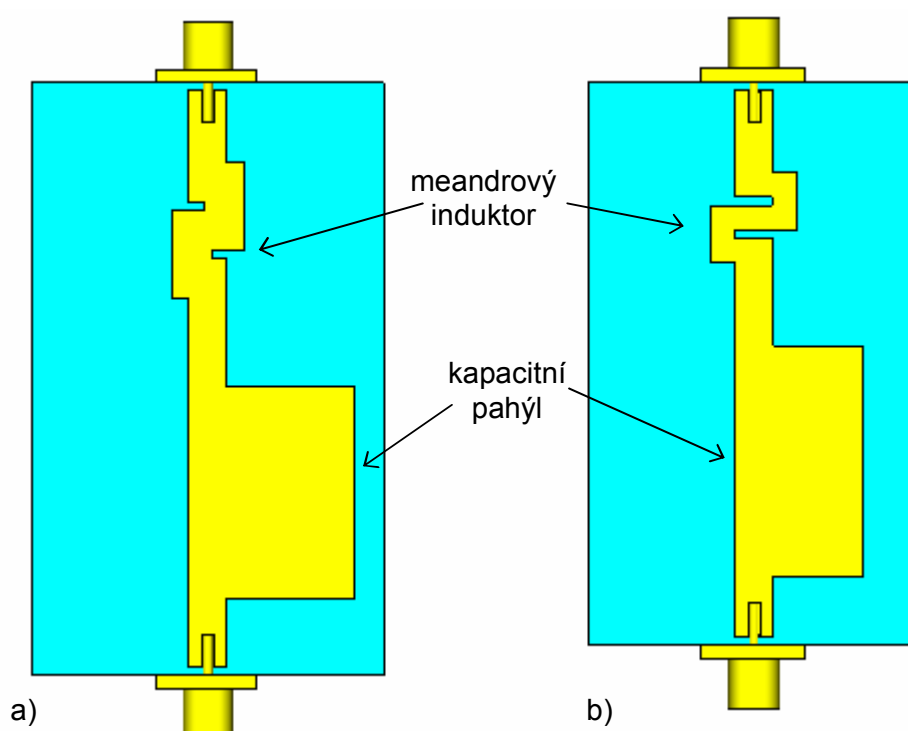
Rozměry kapacitního pahýlu a meandrového induktoru vypočítané za pomoci skriptu v programu matlab, byly zadány do simulátoru a vytvořily se dva modely přizpůsobovacích obvodů (obr. 72). Oba přizpůsobovací obvody bylo potřeba doladit na požadované kmitočty za pomoci rozmítání parametrů w_C , l_C , w_L , a_L , d_L .

Výsledný průběh činitele odrazu pro přizpůsobovací obvod z obr. 72.a) je na obr. 73, kde modrou barvou je průběh pro simulovanou anténu a červenou barvou je průběh činitele odrazu přizpůsobovacího obvodu připojeného k anténě. Nastalo přesunutí přizpůsobení z rezonančního kmitočtu antény $f_r = 2,4396$ GHz na kmitočet $f_d = 2,2596$ GHz.

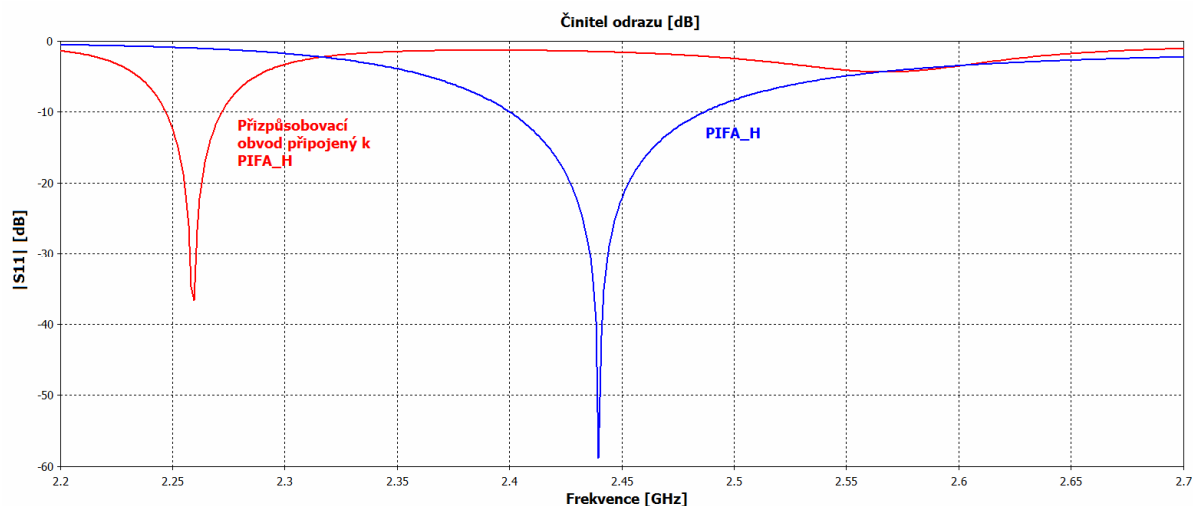
Přizpůsobovací obvod z obr. 72.b) má výsledný průběh činitele odrazu na obr. 74. Modrou barvou je znovu průběh simulované antény a zelenou barvou je průběh činitele odrazu přizpůsobovacího obvodu (pro přizpůsobení vyššího kmitočtu) připojeného k anténě. Rezonanční kmitočet antény se po připojení přizpůsobovacího obvodu přesunul na kmitočet $f_h = 2,2596$ GHz. Zároveň přizpůsobovací obvod vytvořil druhý kmitočet $f_{d2} = 2,3292$ GHz, na kterém je anténa pomocí obvodu přizpůsobena.



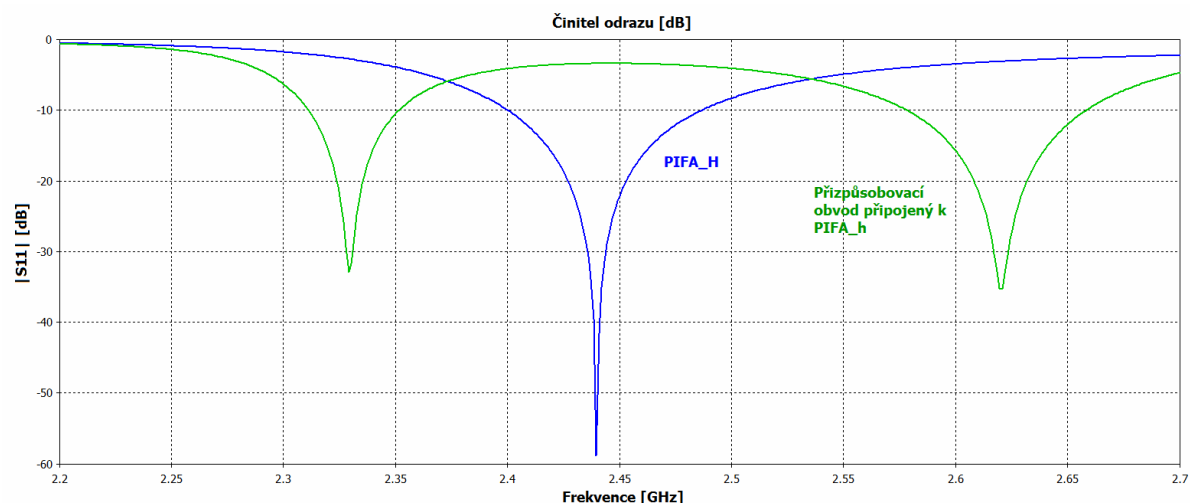
Obr. 71 Návrh přizpůsobení pomocí Smithova diagramu



Obr. 72 Model přizpůsobovacího obvodu ve formě mikropáskového vedení a) pro nižší kmitočet f_d , b) pro vyšší kmitočet f_h



Obr. 73 Činitel odrazu přizpůsobovacího obvodu pro nižší kmitočet f_d

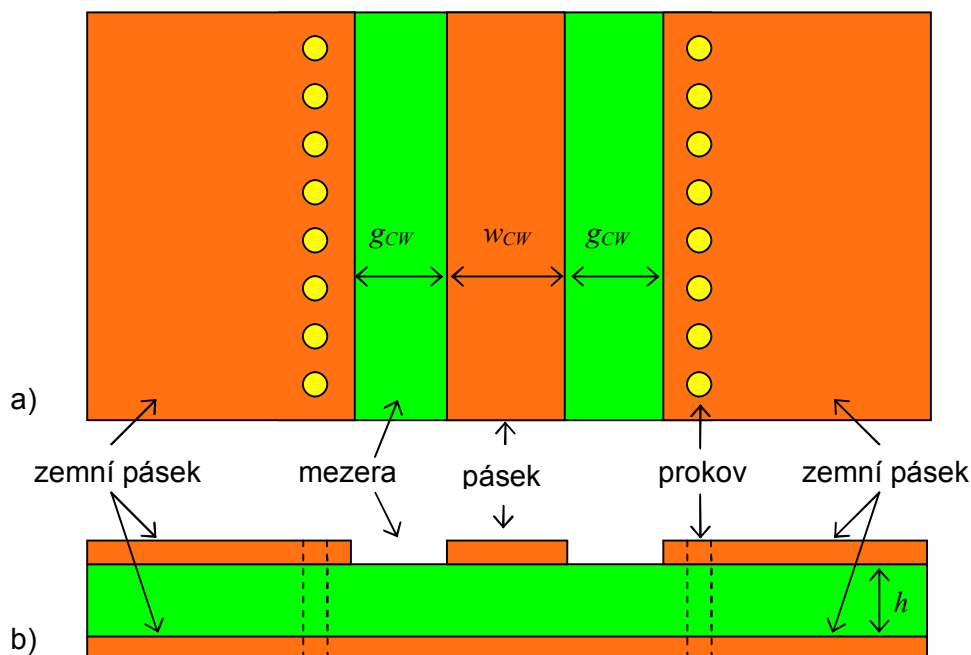


Obr. 74 Činitel odrazu přizpůsobovacího obvodu pro nižší kmitočet f_h

6.2 Přizpůsobovací obvod na koplanárním vedení

Druhá varianta přizpůsobovacího obvodu bude ve formě koplanárního vedení se součástkami pro povrchovou montáž (SMD). Navrhované koplanární vedení obr. 75 je třívodičové s pokovenou spodní stranou substrátu. Uprostřed je pásek se šířkou w_{CW} , ke kterému se v případě použití koaxiální sondy připojuje střední vodič. Mezi páskem uprostřed a postranními pásy je mezera se šířkou g_{WC} vytvořená odebráním pokoveného materiálu, resp. odleptáním. Postranní pásy jsou propojeny se spodním pokovením substrátu prokovy (žlutou barvou na obr. 75). Většinou se mezi prokovy volí stejná vzdálenost.

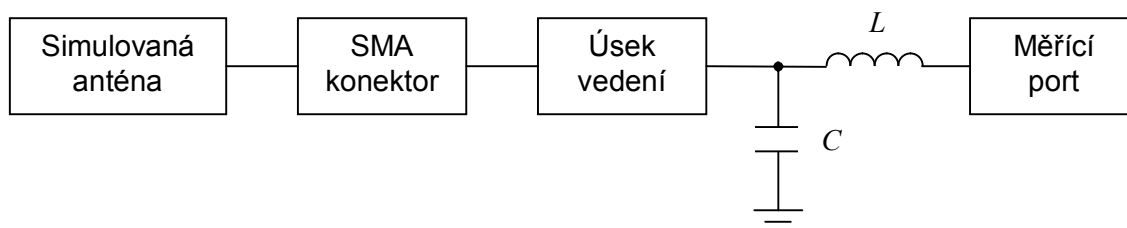
Při použití substrátu IsoClad 933 ($\epsilon_r = 2,33$ a výškou $h = 1,524$ mm) je potřeba mikropásek v místě připojení s konektorem zkrátit (viz obr. 72) oproti zemní ploše na spodní straně substrátu, aby nedošlo ke zkratování středního vodiče a opláštění konektoru. Snížení šířky pásku w_{CW} se dosáhne zvětšením permitivity použitého substrátu nebo také snížením výšky substrátu h . Z uvedených důvodů se zvolí substrát Arlon N25, který má menší výšku substrátu $h = 0,762$ mm a zároveň větší relativní permitivitu substrátu $\epsilon_r = 3,38$.



Obr. 75 Koplanární vedení: a) pohled shora, b) pohled zepředu

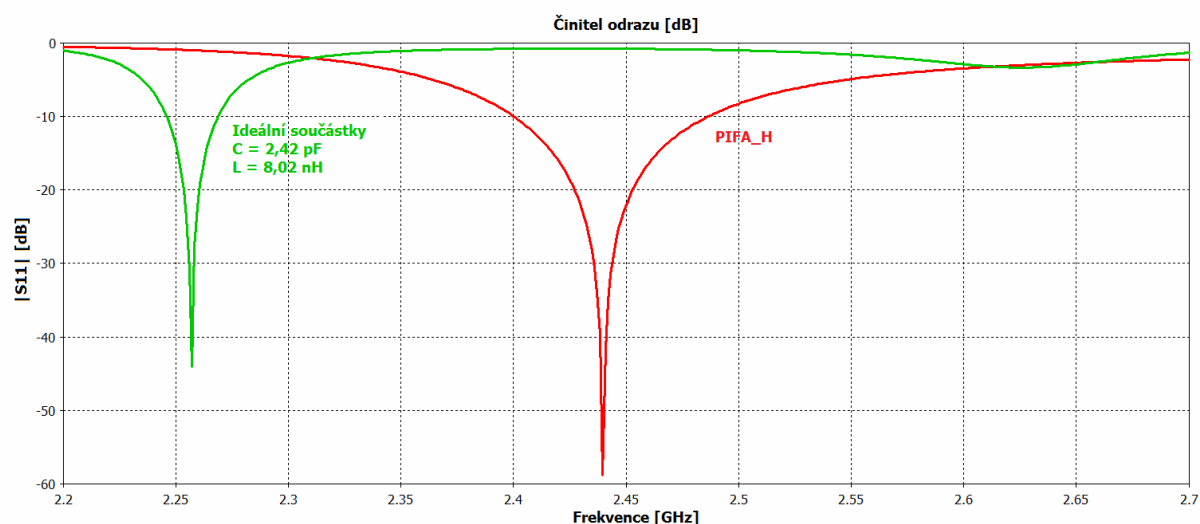
Výpočet šířky w_{CW} bude proveden za pomoci výpočetní techniky, konkrétně programem AppCAD od f. Agilent Technologies. Šířka mezery g_{CW} bude záviset na použité SMD součástce. Jako půlčlánek bude použit buď obr. 66 B) nebo obr. 66 E). V obou případech je paralelně připojen kapacitor, proto bude šířka mezery g_{CW} záviset právě na kapacitoru. Použity budou kapacitory od f. AVX, řada Accu-P, pouzdro 0603, kde výrobce doporučuje mezi pájecími ploškami mezeru 0,6 mm. Proto při návrhu bude šířka mezery $g_{CW} = 0,6$ mm. Po zadání parametrů do programu AppCAD byla vypočítána šířka pásku $w_{CW} = 1,57$ mm.

Pro analýzu se použije program CST DESING STUDIO, cílem bude zjištění ideálních obvodových součástek L a C . V programu se vytvoří blok simulující anténu, SMA konektor a úsek vedení k součástkám. K úseku vedení bude připojen paralelně kapacitor, pak sériově induktor viz. obr. 76.

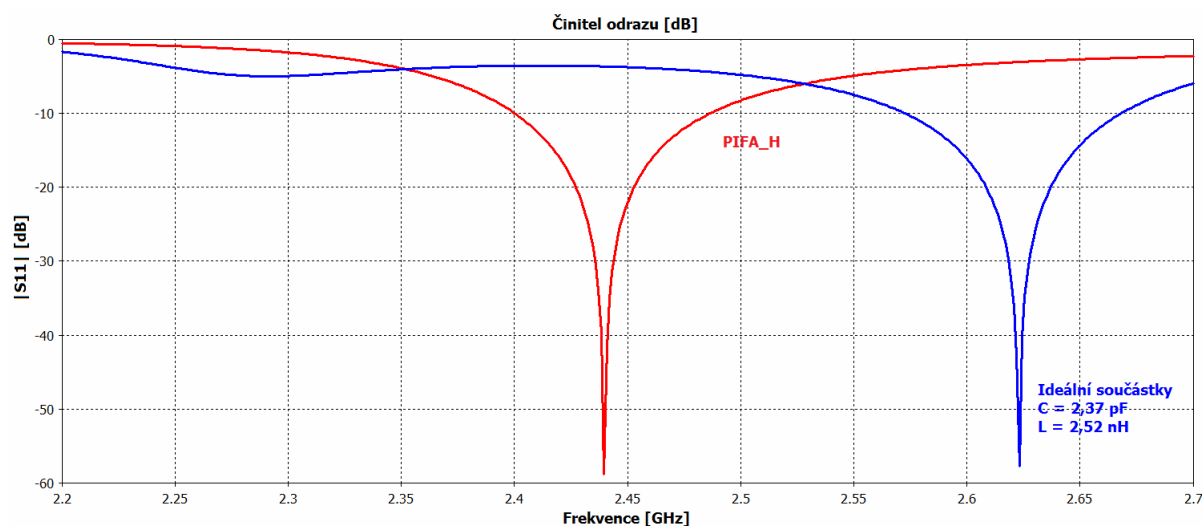


Obr. 76 Blokové schéma pro simulaci ideálních součástek půlčlánu

Z činitele odrazu na konci úseku vedení bylo stejným postupem jako na obr. 71 zjištěny hodnoty ideálních součástek. Pro přizpůsobení nižšího kmitočtu je použit induktor $L = 8,02$ nH a kapacitor $C = 2,42$ pF. První obvod anténu přizpůsobí na kmitočet $f_d = 2,2572$ GHz s hodnotou činitele odrazu $|s_{11}| = -44,09$ dB (obr. 77). Druhý obvod anténu přizpůsobí naopak na kmitočet $f_h = 2,6232$ GHz s hodnotou činitele odrazu $|s_{11}| = -57,74$ dB (obr. 78).



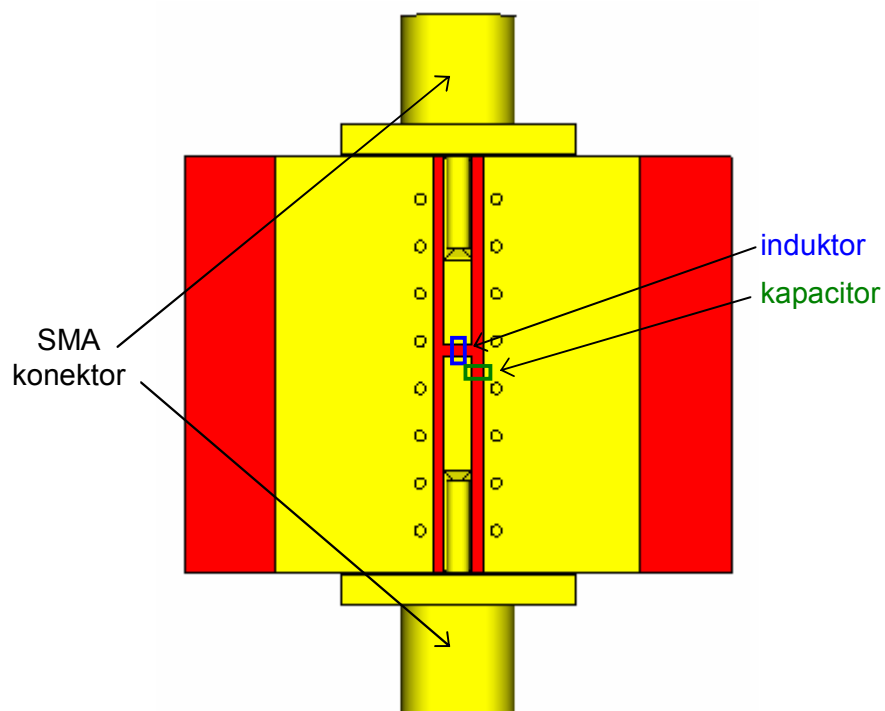
Obr. 77 Činitel odrazu přizpůsobovacího obvodu s ideálními součástkami pro nižší frekvenci f_d



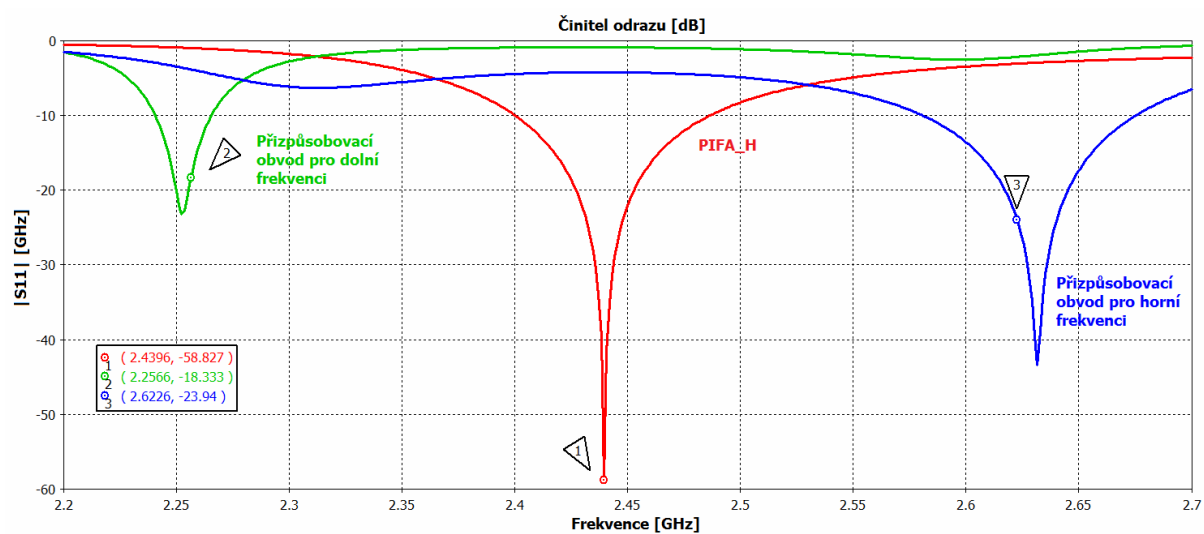
Obr. 78 Činitel odrazu přizpůsobovacího obvodu s ideálními součástkami pro vyšší frekvenci f_h

V programu CST MICROWAVE STUDIO se vytvoří model koplanárního vedení z obr. 75. Pro připojení induktoru je potřeba přerušit středový pásek a vytvořit mezeru g_L . Jako vhodné induktory se zvolí od f. Coilcraft model s vysokým činitelem jakosti a pouzdrem 0603. Výrobce při měření s-parametrů těchto součástek používá mezeru 0,026 inch, proto bude mezera mít velikost $g_L = 0,66$ mm. Na obr. 79 je uveden model ze simulačního programu, kde je vyznačeno i umístění induktoru (modrá barva) a kapacitoru (zelená barva).

Pro přizpůsobení na nižší frekvenci se použijí modely reálných součástek importovaných do programu CST STUDIO s hodnotou induktoru 5,1 nH (model součástky 06HP5N1) a kapacitoru 1,9 pF (model součástky 603cap1r9). Výsledkem je zelený průběh na obr.80. Hodnota činitele odrazu je $|s_{11}| = -18,33$ dB na frekvenci $f_d = 2,2566$ GHz. U přizpůsobení na vyšší frekvenci je použit model reálné součástky induktoru 1,8 nH (model součástky 06HP1N8) a kapacitoru 1,6 pF (model součástky 603cap1r6). Výsledek je modrý průběh na obr. 80, který má na frekvenci $f_d = 2,6226$ GHz hodnotu činitele odrazu je $|s_{11}| = -23,94$ dB.



Obr. 79 Model přizpůsobovacího obvodu v simulačním programu



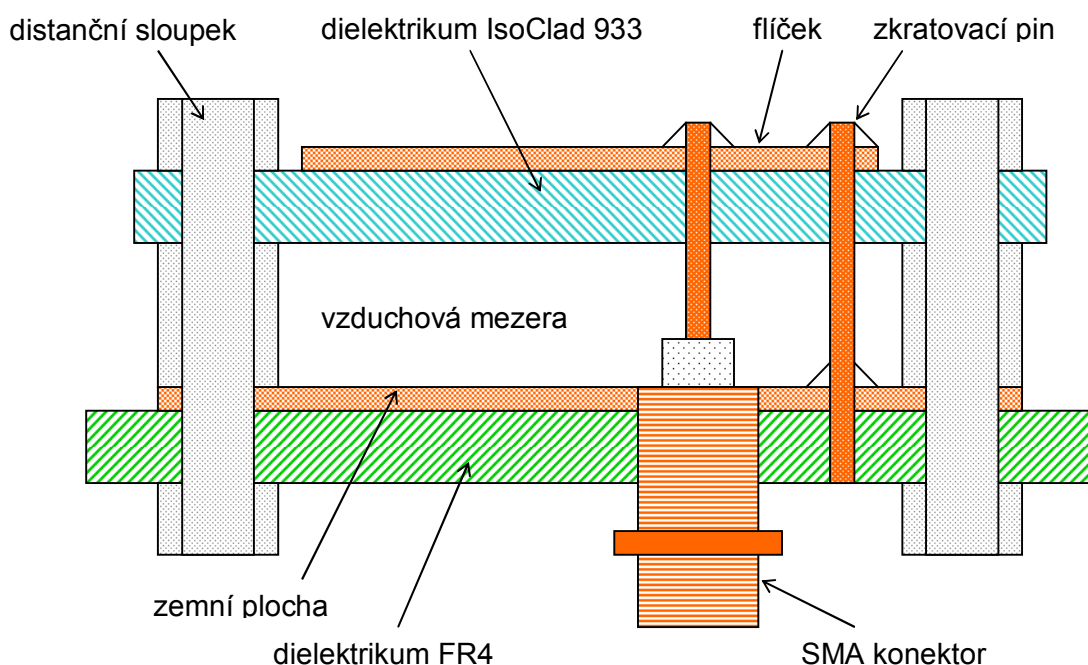
Obr. 80 Činitel odrazu přizpůsobovacího obvod s reálnými součástkami pro nižší a vyšší frekvenci

7. REALIZACE A MĚŘENÍ VYBRANÉ PLANÁRNÍ ANTÉNY

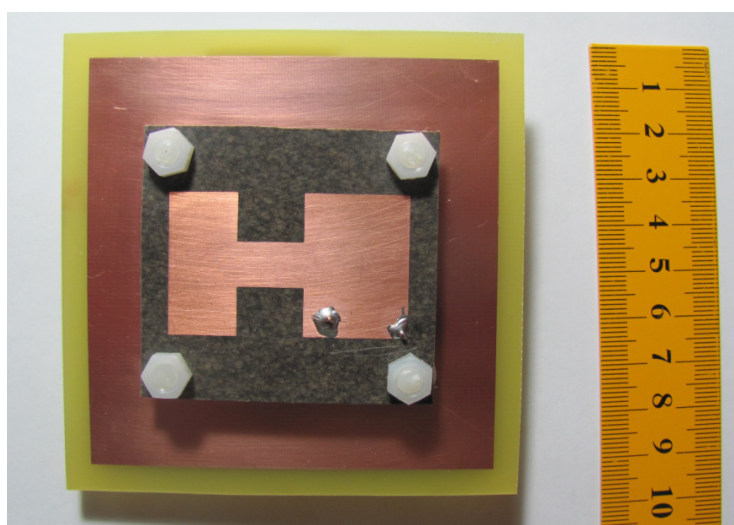
Z kapitoly č. 5 byla k realizaci zvolena anténa PIFA_H, jako kompromis mezi malými rozměry a přitom dostatečnou šířkou pásma.

7.1 Realizace antény PIFA_H

Jak bylo uvedeno na začátku kapitoly 5, antény byly navrženy na rezonanční kmitočet 2,45 GHz. Aby anténa pracovala v celém ISM pásmu (od 2400 MHz do 2483,5 MHz), musí se rezonanční kmitočet posunout tak, aby šířka pracovního pásma antény pokryla ISM pásmo. Do simulačního modelu byla doplněná přesná podoba napájecího konektoru, aby se model podobal skutečnému provedení antény.



Obr. 81 Řez anténní strukturou PIFA_H

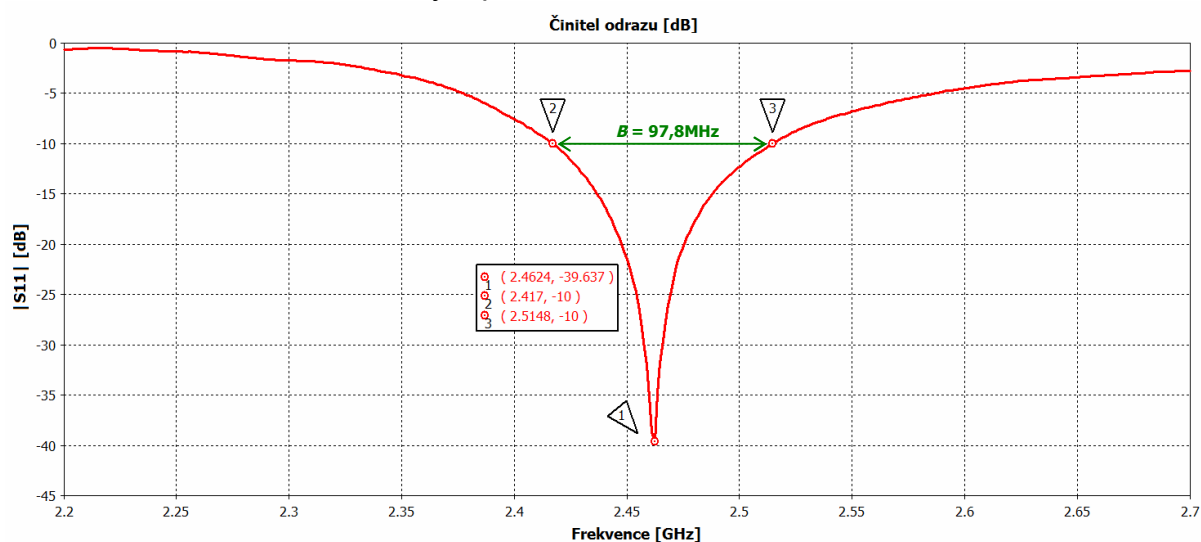


Obr. 82 Fotografie vyrobené antény PIFA_H

Na obr. 81 je řez strukturou antény PIFA_H, která bude realizována. Opletení SMA konektoru bude zapájeno do roviny zemní plochy. Do vzduchové mezery bude zasahovat výstupek dielektrika SMA konektoru, ale to nevadí, protože to bylo zahrnuto v simulačním modelu. Střední vodič SMA konektoru přesahuje rovinu flíčku a je připájen k flíčku, stejně tak je připájen i zkratovací pin. Zkratovací pin je na druhém konci protažen až ke spodní rovině dielektrika FR4 a připájen k zemní ploše. Dielektrikum FR4 plní pouze funkci mechanickou, tzn. nese zemní plochu. Vyrobená anténa je na obr. 82.

7.2 Měření parametrů antény PIFA_H

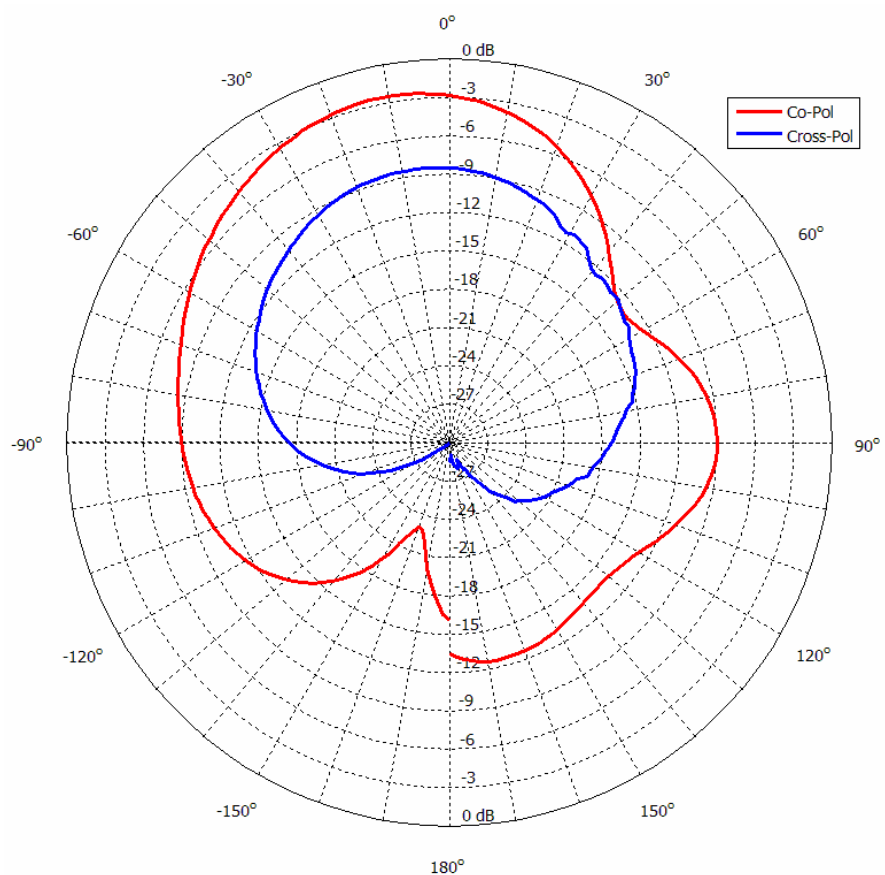
Hlavním měřeným parametrem bude činitel odrazu, ze kterého se určí šířka pásma realizované antény a přizpůsobení na rezonančním kmitočtu. Dále bude měřena i směrová charakteristika. Pro měření činitele odrazu byl použit vektorový obvodový analyzátor f. ROHDE&SCHWARZ ZLV s rozsahem měřeným kmitočtů od 9 kHz do 3 GHz. Ke kalibraci byla použita sada ZV-Z132.



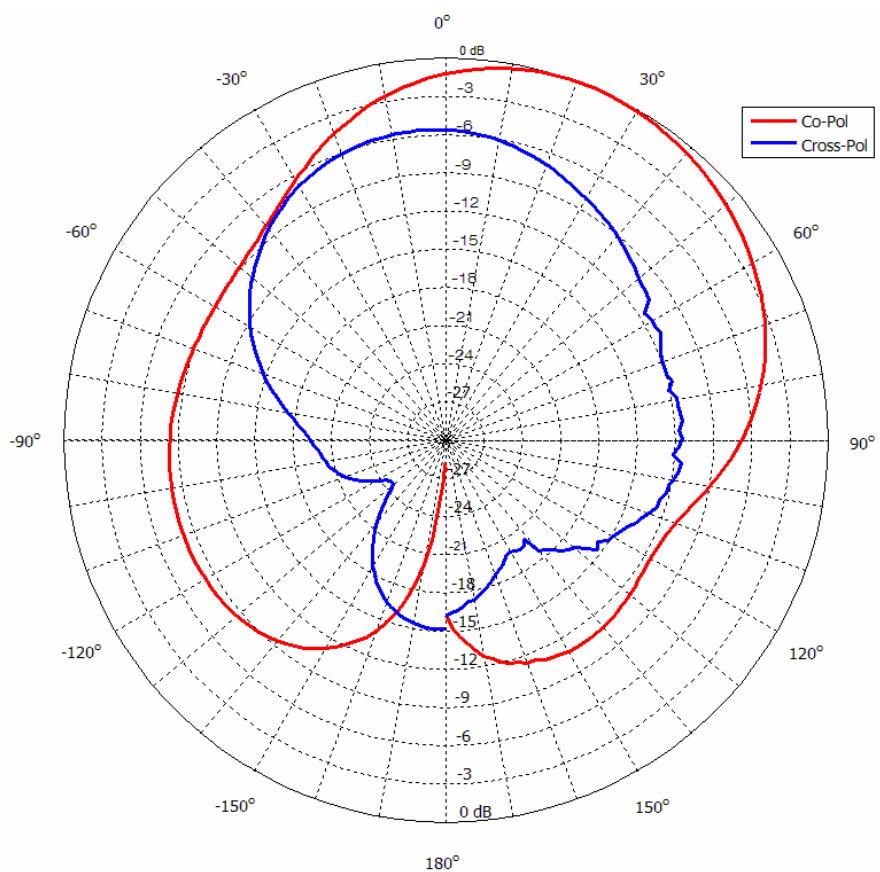
Obr. 83 Činitel odrazu realizované antény PIFA_H

Realizovaná anténa má rezonanční kmitočet $f_r = 2,4624 \text{ GHz}$ s hodnotou činitele odrazu $|S_{11}| = -39,637 \text{ dB}$. Šířka pásma je na obr. 83 vyznačena zeleně, její hodnota je $B = 97,8 \text{ MHz}$. Šířka pásma pro ISM je $B_{ISM} = 83,5 \text{ MHz}$, proto je dosažená šířka pásma realizované antény dostačující. Šířka pásma realizované antény se nachází mimo začátek ISM pásma. Na kmitočtu $2,4 \text{ GHz}$ (začátek ISM pásma) má anténa hodnotu činitele odrazu $|S_{11}| = -7,63 \text{ dB}$.

V naměřených směrových charakteristikách byla vyhledána jedna maximální hodnota pro všechny průběhy, která byla použita jako referenční hodnota. Tato hodnota byla odečtena od všech naměřených hodnot směrových charakteristik. Na obr. 84 je směrová charakteristika realizované antény v rovině E , kde červeně je směrovost hlavní polarizace (E) a modře k ní křížová polarizace. Hlavní vyzařovací lalok červené křivky je vychýlen o -11° z osy záření. Směrová charakteristika realizované antény pro rovinu H je na obr. 85. Červenou barvou je opět hlavní polarizace (H) a k ní křížová polarizace je modrou barvou. Červená křivka na obr. 85 je vychýlena z hlavního směru záření o 21° a modrá o -3° . Měření směrových charakteristik probíhalo na kmitočtu $2,462 \text{ GHz}$.



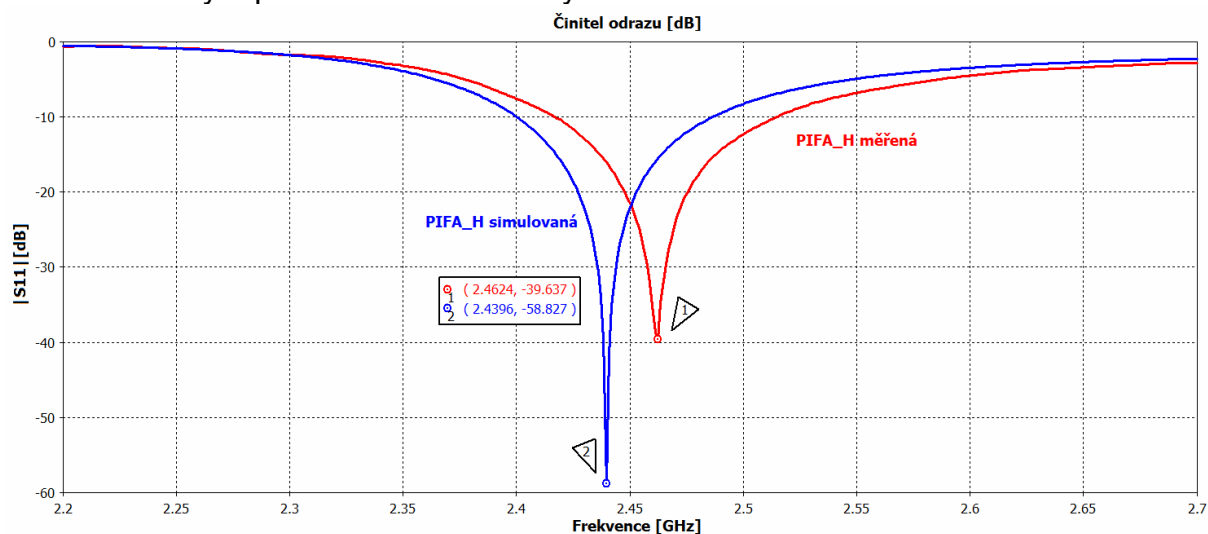
Obr. 84 Směrové charakteristiky měřené antény PIFA_H v rovině *E*



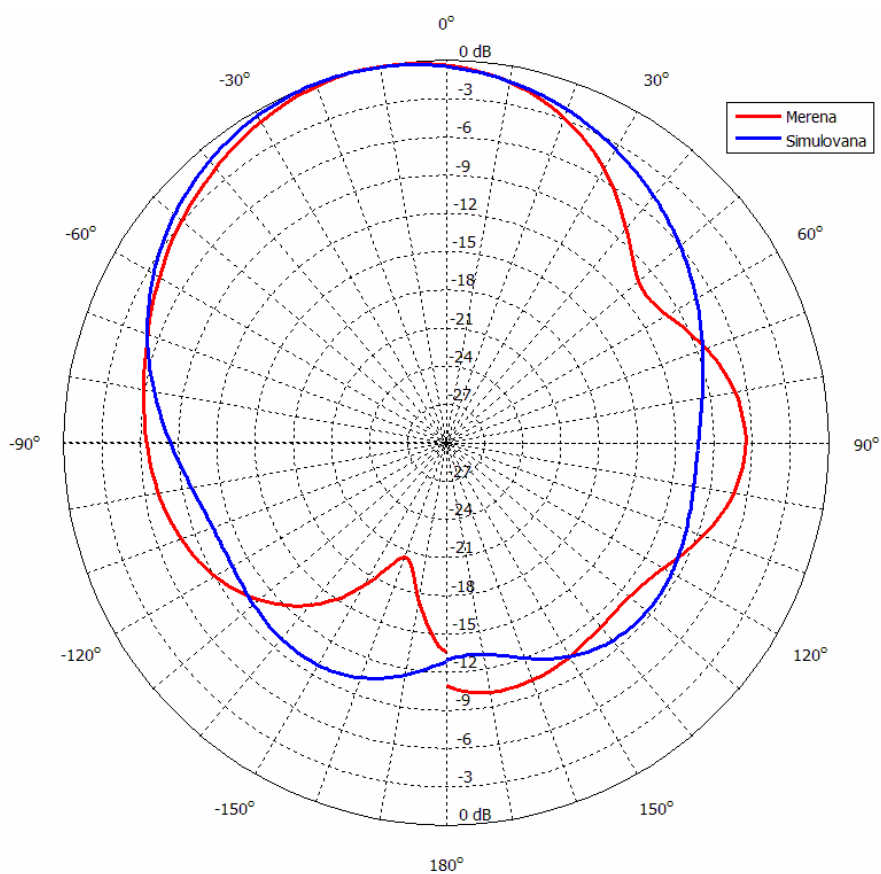
Obr. 85 Směrové charakteristiky měřené antény PIFA_H v rovině *H*

7.3 Srovnání parametrů simulované a měřené antény PIFA_H

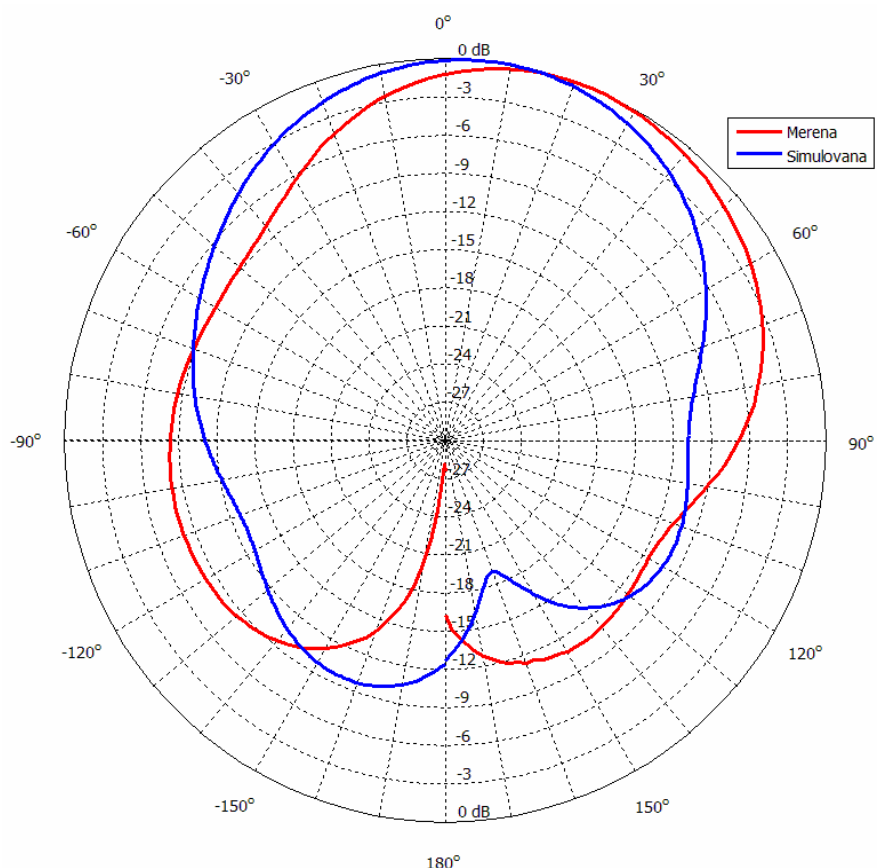
V této podkapitole bude nejprve srovnán průběh činitele odrazu simulované a měřené antény a poté srovnání směrových charakteristik.



Obr. 86 Srovnání činitele odrazu simulované a měřené antény PIFA_H



Obr. 87 Srovnání směrové charakteristiky měřené a simulované antény PIFA_H v rovině E



Obr. 88 Srovnání směrové charakteristiky měřené a simulované antény PIFA_H v rovině H

Činitel odrazu simulované a měřené antény je na obr. 86. Průběhy jsou si tvarově podobné. Šířka pásma simulované antény je 86,3 MHz. Vyrobená anténa má o 11,5 MHz větší šířku pásma. U realizované antény došlo k posunutí rezonančního kmitočtu o 22,8 MHz směrem výše. Předpokladem je, že flíček je vyrobený přesně, potom je chyba ve zkratovacím pinu. Jak již bylo uvedeno v kapitole o zmenšení rozměrů, anténa pracuje ve čtvrtvlnné rezonanci. Pokud bude uvažovaná délka vlny na zkratovacím pinu rovna délce vlny ve vakuu, potom na kmitočtu 2,4624 GHz je $\lambda/4 = 30,46$ mm a na kmitočtu 2,4396 GHz je $\lambda/4 = 30,74$ mm. Takže je důležité osazovat s přesností na desetiny mm, což je v domácích podmínkách obtížné.

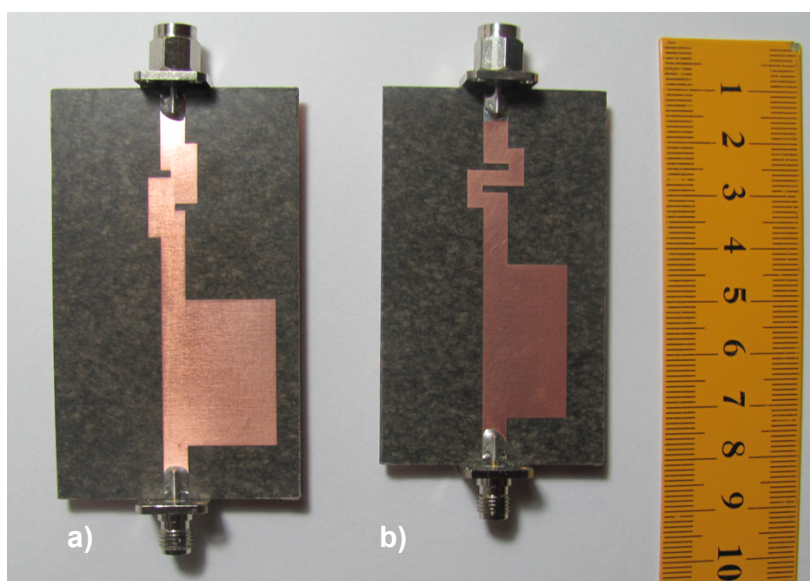
Při srovnání směrových charakteristik se u každého průběhu zvlášť našlo jeho maximum. Tato hodnota se pak odečítala od příslušných hodnot průběhu směrové charakteristiky, aby bylo možné jednotlivé charakteristiky srovnávat. Obr. 87 jsou směrové charakteristiky pro rovinu E . Tvarově jsou oba průběhy mírně odlišné, hlavně v zadních lalocích. Maximum simulované směrové charakteristiky je odkloněno o -14° od nulové, což je o 3° více než v případě realizované antény.

Směrové charakteristiky pro rovinu H (obr. 88) jsou si tvarově dosti podobné (liší se jen v zadním směru), ale vzájemně o 14° pootočené. Simulovaná anténa má v rovině H hlavní lalok vychýlen ze směru záření o 7° . Při měření roviny H mohla nastat chyba v měření, kdy mechanické uchycení antény k točce nebylo ideální. Z obr. 84 a obr. 85 je patrné, že odstup mezi hlavní a křížovou polarizací je 6 dB.

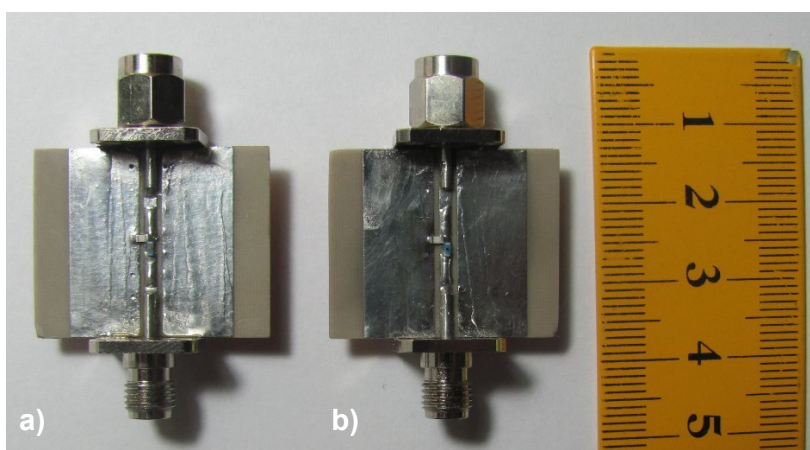
8. REALIZACE A MĚŘENÍ PŘIZPŮSOBOVACÍHO OBVODU

Realizovat se budou oba přizpůsobovací obvody na mikropáskovém vedení uvedené na obr. 72. Poté se bude realizovat přizpůsobovací obvod z koplanárního vedení z obr. 75 ve dvou provedeních, které se budou lišit jen hodnotami SMD součástek. Kritériem přizpůsobení obvodu bude činitel odrazu lepší nebo rovný hodnotě -10 dB.

8.1 Realizace přizpůsobovacích obvodů



Obr. 89 Fotografie vyrobených mikropáskových přizpůsobovacích obvodů a) pro nižší kmitočet f_d , b) pro vyšší kmitočet f_h



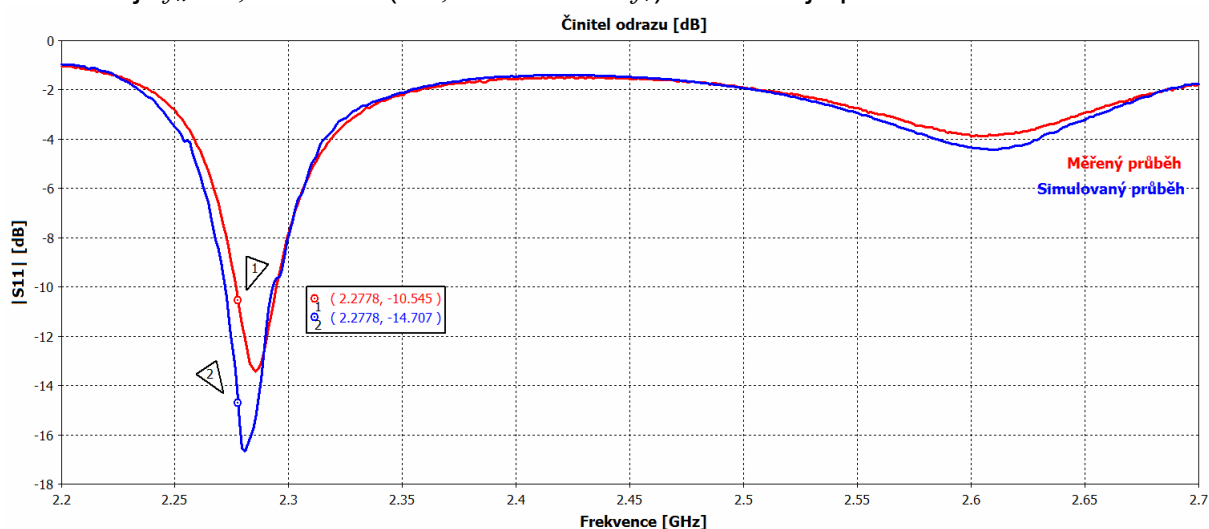
Obr. 90 Fotografie vyrobených koplanárních přizpůsobovacích obvodů a) pro nižší kmitočet f_d , b) pro vyšší kmitočet f_h

Při realizaci budou použity panelové SMA konektory se čtyřmi montážními otvory, které nebudou k montáži využity. Střední vodič SMA konektoru se připojuje přímo k mikropáskovému vodiči. Pro zlepšení kontaktu mezi zemní plochou a

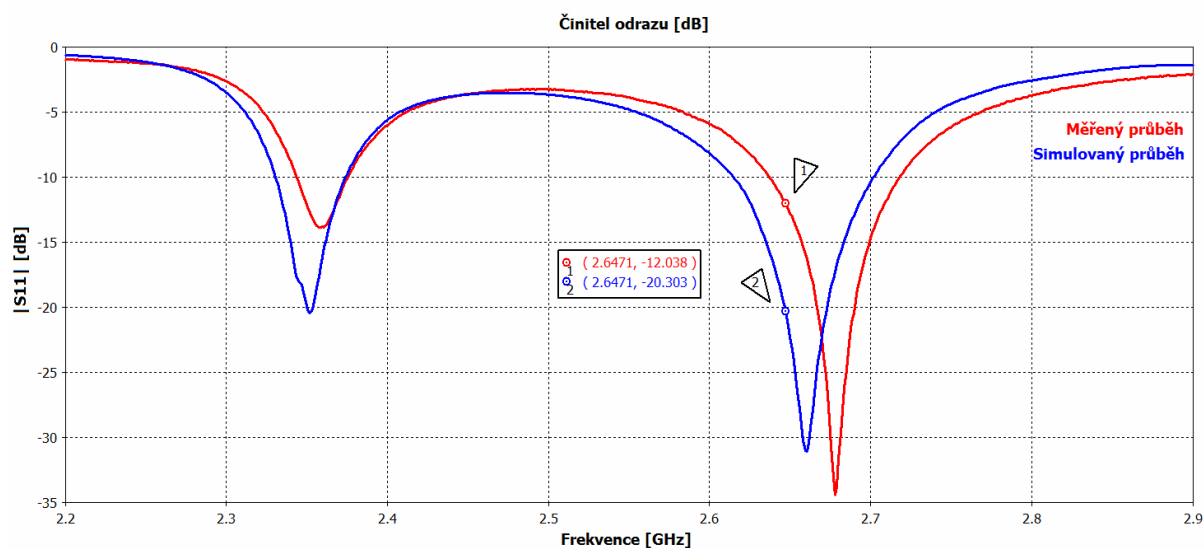
opláštěním konektoru se ze spodu přizpůsobovacího obvodu k zemní ploše připájí opláštění konektoru. Tato úprava vede i ke zlepšení mechanické pevnosti SMA konektoru. Pro připojení přizpůsobovacího obvodu směrem k anténě se použije SMA konektor s vidlicí, který je právě opačný ke konektoru antény. Pro připojení obvodu směrem k měřicímu přístroji se použije SMA konektor se zdírkou. Fotografie realizovaných obvodů jsou na obr. 89 a obr. 90. Pro snadnější pájení a případné přepájení SMD součástek jsou desky s koplanárním vedením pocínované.

8.2 Měření přizpůsobovacích obvodů

Měření činitele odrazu bude probíhat stejným přístrojem jako v kapitole 7.2. Jednotlivé přizpůsobovací obvody se našroubují k anténě PIFA_H a na druhý konektor přizpůsobovacího obvodu se připojí zkalibrovaný měřicí přístroj. Z obr. 83 je rezonanční kmitočet $f_r = 2,4624$ GHz realizované antény. Dolní kmitočet, na který je potřeba anténu přeladit, je $f_d = 2,2778$ GHz (o 7,5 % méně než f_r) a naopak horní kmitočet je $f_h = 2,6471$ GHz (o 7,5 % více než f_r). Celkově je přeladění kmitočtů o 15 %.



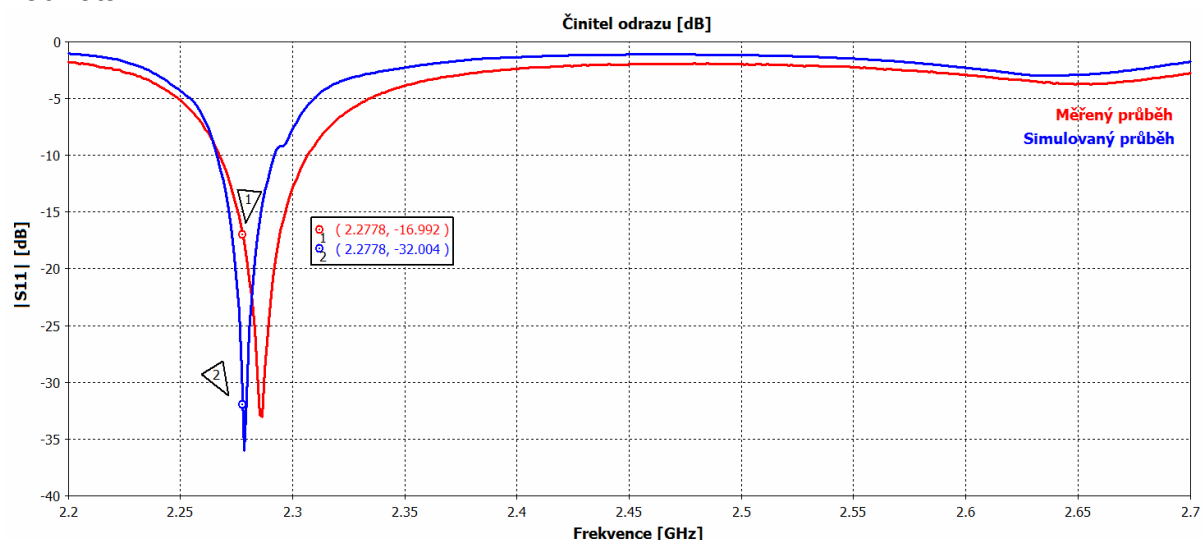
Obr. 91 Činitel odrazu přizpůsobovacího obvodu na mikropáskovém vedení pro nižší kmitočet f_d připojený k anténě PIFA_H



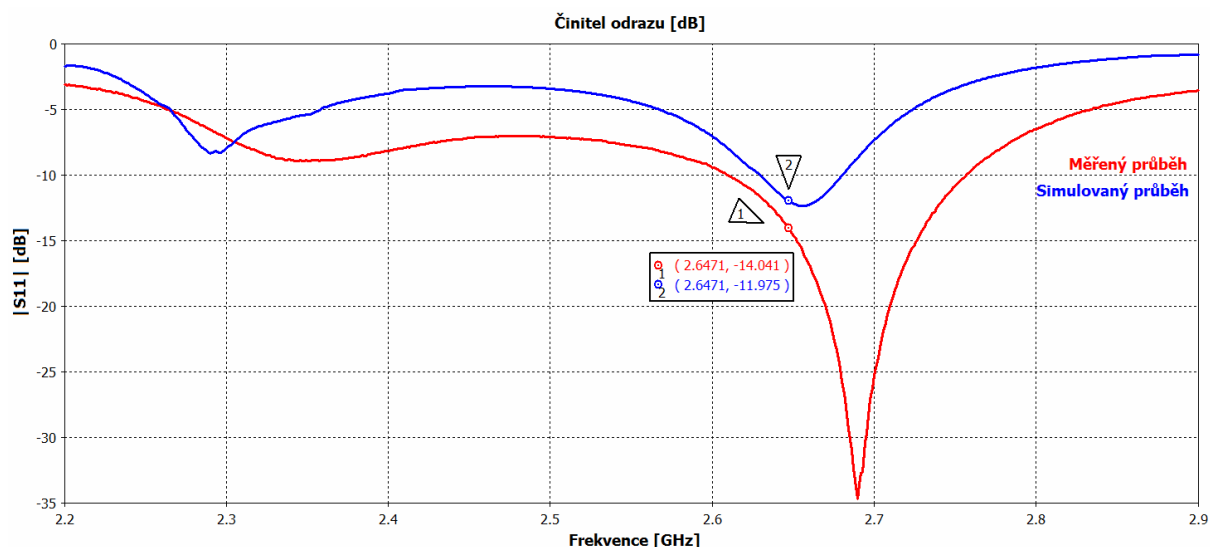
Obr. 92 Činitel odrazu přizpůsobovacího obvodu na mikropáskovém vedení pro vyšší kmitočet f_h připojený k anténě PIFA_H

Obr. 91 a obr. 92 náležejí přizpůsobovacím obvodům na mikropáskovém vedení. Červenou barvou je vždy křivka pro měřený přizpůsobovací obvod a modrou barvou simulovaný průběh. Na obr. 91 je vyznačený bod č.1 pro dolní kmitočet f_d měřeného přizpůsobovacího obvodu a vyznačený bod č.2 je také pro dolní kmitočet f_d , ale tentokrát pro simulovaný přizpůsobovací obvod. Měřený přizpůsobovací obvod má na tomto kmitočtu činitel odrazu $|S_{11}| = -10,545$ dB, který splňuje kritérium stanovené na začátku kapitoly č.7. Měřený a simulovaný průběh jsou prakticky stejné až na malou odchylku.

Vyznačený bod č.1 na obr. 92 je pro horní kmitočet f_h měřeného přizpůsobovacího obvodu a vyznačený bod č.2 je také pro horní kmitočet f_h , ale patří simulovanému přizpůsobovacímu obvodu. I tento měřený přizpůsobovací obvod splňuje stanovené kritérium přizpůsobení na požadovaném kmitočtu, protože činitel odrazu má hodnotu $|S_{11}| = -12,038$ dB. Simulované a měřené průběhy jsou si tvarově podobné, ale realizovaný obvod má posunutý rezonanční kmitočet směrem k vyšším hodnotám.



Obr. 93 Činitel odrazu přizpůsobovacího obvodu na koplanárním vedení pro nižší kmitočet f_d připojený k anténě PIFA_H



Obr. 94 Činitel odrazu přizpůsobovacího obvodu na koplanárním vedení pro vyšší kmitočet f_h připojený k anténě PIFA_H

Obr. 93 a obr. 94 jsou pro přizpůsobovací obvody s koplanárním vedením. I pro tyto průběhy platí, že červenou barvou je vždy křivka pro měřený přizpůsobovací obvod a modrou barvou pro simulovaný obvod. Vyznačený bod č.1 v obr. 93 je pro f_d měřeného přizpůsobovacího obvodu a vyznačený bod č.2 je pro simulovaný přizpůsobovací obvod. Měřený přizpůsobovací obvod má na dolním kmitočtu činitel odrazu $|s_{11}| = -16,992$ dB (kritérium splněno). Opět jsou si průběhy tvarově podobné s malým posunutím rezonančního kmitočtu. Použitý byl kapacitor 2,0 pF a induktor 4,3 nH.

U obr. 94 si průběhy simulovaného a měřeného obvodu nejsou podobné. Realizovaný přizpůsobovací obvod má výborné přizpůsobení na kmitočtu 2,6896 GHz a ve srovnání se simulovaným průběhem i dostatečnou šířku pásma. Vyznačený bod č.1 je pro horní kmitočet f_h měřeného přizpůsobovacího obvodu a vyznačený bod č.2 je pro simulovaný přizpůsobovací obvod. Činitel odrazu měřeného obvodu na kmitočtu f_h je $|s_{11}| = -14,041$ dB. Použitý byl kapacitor 1,8 pF a induktor 1,8 nH.

9. ZÁVĚR

U konstrukce flíčkových antén byly uvedeny nejpoužívanější způsoby napájení, které lze využít i u ostatních planárních antén. V simulátoru elektromagnetického pole CST studia byly ověřeny možnosti impedančního přizpůsobení flíčkových antén pomocí napájecích technik. V práci jsou uvedeny konstrukce nejpoužívanějších planárních antén s popisovanými obrázky.

Hlavního zmenšení rozměrů planárních antén se dosáhne přechodem z půlvlnné rezonance na čtvrtvlnnou rezonanci. Použitím zkratovací stěny a vhodnou volbou rozměrů této stěny lze přispět ke zmenšení rozměrů planárních antén. Další používanou technikou je přidání kapacitní zátěže. Změnou rozměrů konstrukčních prvků kapacitní zátěže, při zachování stejných rozměrů, se posouvá pracovní kmitočet antény.

Základní technikou pro optimalizaci šířky kmitočtového pásma je vhodná volba dielektrického materiálu mezi motivem flíčku a zemní plochou. Nejvíce se jako dielektrický materiál používá vzduchová mezera. Na šířku pásma mají vliv i rozměry zemní plochy. Tato technika se nevyužívá, protože jsou rozměry většinou předem dány velikostí mobilního zařízení. Změnou rozměrů zkratovací stěny nebo volbou poměru mezi stranami flíčku lze měnit šířku pásma. Poslední technikou pro zvětšení šířky pásma je přidání parazitního rezonátoru do motivu flíčku.

První substrát pro návrh miniaturní planární antény byl zvolen FR4, který je levný a běžně dostupný v obchodě s elektronickými součástkami. Velkou nevýhodou substrátu FR4 je kmitočtová nestálost relativní permitivity materiálu. Pro zmenšení rozměrů byla aplikována zkratovací stěna nebo zkratovací pin. Pro zvětšení kmitočtové šířky pásma byl použit parazitní rezonátor napájený kapacitní vazbou. U jednotlivých simulovaných modelů je uveden popis struktury, činitel odrazu, vyzařovací charakteristika a povrchové proudy, resp. vyzařující hrany flíčku. Konečná simulovaná anténní struktura na substrátu FR4 obsahovala zkratovací pin a parazitní rezonátor napájený kapacitní vazbou. Tato struktura disponuje nejmenšími rozměry a zároveň velkou šířkou pásma 102,4 MHz. Nepříjemná je hodnota účinnosti záření - 10,8 dB, protože se všechna energie spálí v dielektrickém substrátu. Dielektrikum FR4 má o řád větší ztrátový činitel $tg\delta$ než substráty používané ve vysokofrekvenční technice.

Pro další návrh miniaturní planární antény byl zvolen substrát IsoClad933, který se používá ve vysokofrekvenční technice. Motiv flíčku společně se substrátem je vyvýšen nad zemní plochou. Anténa má velkou šířku pásma, ale také velké rozměry, proto byl použit zkratovací pin. Dalšího zmenšení rozměrů se dosáhlo vložením výřezu do flíčku, kde povrchové proudy tento výřez obtékají a dochází k elektrickému prodloužení antény. Motivy flíčku s výřezy připomínají svými tvary písmena abecedy, podle toho jsou pojmenovány. V závěru kapitoly se simulovanými anténami jsou v tabulce shrnuty jednotlivé simulační modely s rozměry, ziskem, účinností vyzařování, šířkou pásma a činitelem odrazu na rezonančním kmitočtu. Ze simulačních modelů byl zvolen jako kompromis mezi malými rozměry a šířkou pásma model antény PIFA s tvarem flíčku písmene H.

Prizpůsobovací obvod byl navržen ve formě jednoduchého půlčlanku s paralelním kapacitorem a sériovým induktorem. Navrhovány byly dvě základní koncepce. První z koncepcí byl obvod na nesymetrickém mikropáskovém vedení, kde jednotlivé obvodové prvky byly vytvořeny přímo z vedení. Jako induktor byl navržen meandrový induktor a kapacitor byl navržen formou kapacitního pahýlu. Druhou koncepcí byl obvod třívodičového koplanárního vedení s prokovy spojující zemní plochu s postranními pásy. Jako obvodové prvky byly zvoleny SMD součástky pro vysokofrekvenční aplikace. Právě podle vybrané součástky byla zvolena mezera mezi vodivými pásy $g_{CW} = 0,6$ mm (doporučení výrobce). Pro každý simulovaný obvod je uveden průběh činitele odrazu se simulovanou anténou. U koplanárního vedení jsou hodnoty ideálních součástek vyznačeny přímo v průběhu činitele odrazu. Při simulaci koplanárního vedení se součástkami od výrobce jsou hodnoty SMD součástek uvedeny v textu s názvy modelů v závorkách.

Vyrobena byla vybraná anténa s tvarem flíčku písmena H (pracovní název PIFA_H). V kapitole 7 je uveden řez anténní strukturou s popisem části a fotka realizované antény. Činitel odrazu byl změřen vektorovým obvodovým analyzátozem. Šířka pásma realizované antény má hodnotu $B = 97,8$ MHz, což je o 11,5 MHz více než v případě simulované antény. Šířka pásma je dostačující, protože pro ISM pásmo postačí $B_{ISM} = 83,5$ MHz. Rezonanční kmitočet vyrobené antény se o 22,8 MHz posunul směrem k vyšším kmitočtům na hodnotu $f_r = 2,4624$ GHz. Předpoklad je, že rozměry flíčku jsou vyrobeny přesně. Potom chyba mohla nastat v délce zkratovacího pinu, kde je potřeba pracovat s přesností na jednotky desetin milimetru. V rámci možností domácích podmínek nebylo možné přesnost dodržet.

Směrové charakteristiky realizované antény byly měřeny v bezodrazové komoře ústavu radioelektroniky. Měření bylo provedeno na kmitočtu 2,462 GHz. Byla změřena jak hlavní polarizace, tak i k ní křížová a to v obou rovinách (E i H). Mezi hlavní a křížovou polarizací je rozdíl 6 dB. Hlavní vyzařovací laloky jsou skoro vždy vychýleny od osy záření, příčinou je použití zkratovacího pinu. Měřená anténa má v rovině H hlavní lalok směrové charakteristiky vychýlen o 21° od nulové osy. Při tomto měření mohla nastat chyba vychýlení neideálním uchycením měřené antény k otočné točce. Směrové charakteristiky měřené a simulované antény jsou si tvarově podobné, jen v zadních lalocích se dosti liší a také ve vychýlení hlavního laloku od nulové osy.

V poslední kapitole jsou realizovány prizpůsobovací obvody. Na začátku jsou fotografie všech vyrobených obvodů. Pro snadnější pájení a případné přepájení SMD součástek jsou desky s koplanárním vedením pocínované. Kritériem prizpůsobení obvodu byl stanoven činitel odrazu lepší nebo rovný hodnotě -10 dB na požadovaném kmitočtu. Tohle kritérium splnily všechny realizované prizpůsobovací obvody. Průběhy činitele odrazu měřeného a simulovaného obvodu jsou tvarově podobné jen s posunutými rezonančními kmitočty. Výjimkou je prizpůsobovací obvod z koplanárního vedení pro horní kmitočet f_h , kde se průběhy dosti liší. Odlišnost průběhů mohla být způsobena buď tolerancí hodnot použitých SMD součástek nebo odchylkou v umístění součástek při pájení. V simulačním programu byly součástky umístěny na tisíce milimetru, takovou přesnost v domácích podmínkách není možné dodržet. V tomto případě odchylka (umístění a tolerance) přispěla ke zlepšení činitele odrazu na požadovaném kmitočtu oproti simulovanému průběhu. U koplanárního vedení pro dolní kmitočet byl použit kapacitor 2,0 pF a induktor 4,3 nH a

pro horní kmitočet kapacitor $1,8 \text{ pF}$ a induktor $1,8 \text{ nH}$. Výhody realizovaného přizpůsobovacího obvodu z koplanárního vedení jsou malé rozměry, jednodušší návrh, menší nároky na simulační čas. Nejhlavnější výhodou je možnost přeladění nebo změny průběhu v závislosti na použitých hodnotách SMD součástek. Nevýhoda těchto obvodů je vliv přesnosti umístění součástek na činitele odrazu a zároveň neurčitost hodnoty těchto součástek, kde výrobce uvádí toleranci.

10. LITERATURA

- [1] GARG, R., BHARTIA, P., BAHL, I., ITTIPIBOON, A. *Microstrip antenna design handbook*. Artech house, Inc., Boston, London 2001, ISBN 0-89006-513-6.
- [2] PROCHÁZKA, M. *Antény : Encyklopedická příručka*. 3. aktualizované vydání. Praha : BEN, 2005.; ISBN 80-7300-166-7
- [3] ABDELNASSER A. ELDEK, ATEF Z. ELSHERBENI, CHARLES E. SMITH AND KAI-FONG LEE, "*Wideband planar slot antennas*", The University of Mississippi, MS 38677
- [4] POKORNÝ, M. *Vícepásmové planární antény*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2006.
- [5] MARTINEK, P. *Modeling of a quasi-fractal antenna*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2007.
- [6] CHON WEE KHOO, "*Multi-band Antenna for Handheld Transceivers*", Bachelor of Electrical Engineering Thesis, 2002
- [7] ROWELL, C.R., MURCH, R.D. , *A capacitively loaded PIFA for compact mobile telephone handsets*. Hong Kong: The Hong Kong university of science and technology, Department of electrical and electronic engineering, 1996
- [8] LEE, J. L. Quad-band PIFA for Mobile Phones. Syracuse: Syracuse University. Online: <http://web.syr.edu/~sharidas>, 2004.
- [9] MARKLEIN, R. *The finite integration technique as a general tool to compute acoustic, electromagnetic, elastodynamic, and coupled wave fields*. Dostupné na: <http://www.unikassel.de/fb16/tet/marklein/publikationen.html>
- [10] RAIDA, Z. a KOL., *Elektromagnetické vlny a mikrovlnná technika*. Multimediální učebnice, dostupné na url: <http://www.urel.feec.vutbr.cz/~raida/multimedia/>
- [11] Relativní permitivita substrátu FR4, předmět Antény a jejich aplikace (MASV), dostupné z url: <http://www.urel.feec.vutbr.cz/MASV/downloads/FR4er.jpg>
- [12] BALANIS, A. C. *Antenna Theory: Analysis and Design*, 2/E. New York: J. Wiley & Sons, 1996.
- [13] HANSEN, R. C.; *Fundamental Limitations in Antennas*, Proceedings of the IEEE, Vol.66, Feb. 1981
- [14] HOFFMANN, K. *Planární mikrovlnné obvody*. Praha : FEL ČVUT, 2010.; ISBN 978-80-01-03705-8

11. SEZNAM SYMBOLŮ, VELIČIN A ZKRATEK

DPS	deska plošných spojů
Q	činitel jakost antény
ε_r	relativní permitivita
W_n	šířka napájecího mikropáskového vedení
Z_0	charakteristická impedance
l_0	délka zapuštění mikropáskového vedení do motivu flíčku
y_0	velikost mezery mezi zapuštěným mikropáskovým vedením a motivem flíčku
g_0	velikost mezery mezi mikropáskovým vedením a motivem flíčku pro vytvoření kapacitní vazby
s_{11}	činitel odrazu na vstupu antény
W	šířka motivu flíčku
L	délka motivu flíčku
l_s	umístění koaxiální sondy na straně flíčku L
w	šířka štěrby
l	délka štěrby
λ	vlnová délka
SMA	konektor používaný u napájení koaxiální sondou
N	konektor používaný u napájení koaxiální sondou
$PIFA$	planární anténa typu obráceného F
W_f	umístění zkratovacího pinu na straně motivu W u antény typu PIFA
W_k	umístění koaxiální sondy na straně flíčku W u antény typu PIFA
L_k	umístění koaxiální sondy na straně flíčku L u antény typu PIFA
W_S	délka zkratovací stěny
W_{CAP}	velikost kapacitní desky flíčku

d_{cap}	vzdálenost mezi zemní plochou a kapacitní deskou flíčku
c	rychlost světla
f_r	pracovní frekvence
λ_{die}	délka vlny v dielektriku
B	šířka kmitočtového pásma antény
h	tloušťka dielektrika
$E_{uch.}$	uchovávaná energie
E_{Ztr}	energetické ztráty
FFT	rychlá Fourierova transformace
FEM	metoda konečných prvků
ϵ_{reff}	efektivní permitivita
ΔL	prodloužení délky flíčku
BW	Normovaná šířka pásma
Q_{min}	minimální činitel jakosti antény
ISM	bez licenční kmitočtové pásmo využívané v průmyslu, vědě a zdravotnictví
w_f	konformní zobrazení mikropáskového vedení
f_d	dolní kmitočet přizpůsobovacího obvodu
f_h	horní kmitočet přizpůsobovacího obvodu
Z_v	vlnový odpor
w_C	šířka kapacitního pahýlu
l_C	délka kapacitního pahýlu
w_L	šířka meandrového induktoru
a_L	mezera meandrového induktoru
d_L	délka meandrového induktoru
w_{CW}	šířka středního vodiče koplanárního vedení

g_{CW}	mezera mezi vodiči koplanárního vedení
$tg\delta$	ztrátový činitel dielektrického materiálu

12. SEZNAM PŘÍLOH

Příloha 1 Skript pro výpočet šířky mikropásku	76
Příloha 2 Skript pro výpočet rozměru kapacitního pahýlu	77
Příloha 3 Skript pro výpočet rozměru meandrového induktoru	79
Příloha 4 Výkres rozměrů flíčku PIFA_H.....	82
Příloha 5 Výkres rozměrů zemní plochy PIFA_H.....	82
Příloha 6 Výkres rozměrů koplanárního vedení	83
Příloha 7 Výkres rozměrů mikropáskového vedení pro dolní kmitočet f_d	84
Příloha 8 Výkres rozměrů mikropáskového vedení pro dolní kmitočet f_h	85

Příloha 1 Skript pro výpočet šířky mikropásku

```
% VÝPOČET ŠÍŘKY MIKROPÁSKOVÉHO VEDENÍ
%*****
% Syntéza mikropáskového vedení [Přednášky BVMT]
%*****

% PŘIPRAVA PROSTŘEDÍ MATLABU
%*****
clc
clear all
close all
%*****

% NAČTENÍ PARAMETRŮ
%*****
disp('-----')
')
e_r = input('Zadejte relativní permitivitu substrátu [-] er = ');
h = input('Zadejte výšku substrátu [mm] h = ');
Z_0 = input('Zadejte charakteristickou impedanci požadovaného vedení [Ohm] Z0 = ');
t = input('Zadejte tloušťku pokovení vedení [mm] t = ');
h = h*(1e-3);
t = t*(1e-3);
disp('-----')
')
disp(' ')
%*****

% VÝPOČTY
%*****
% Výpočet 1)
H = (sqrt((e_r+1)/2)*(Z_0/60))+((0.9/pi())*((e_r-1)/(e_r+1)));
h_w = (1/4)*((exp(H)/2)-exp(-H));

% Výpočet 2)
a = ((120*pi())/ (Z_0*sqrt(e_r)))-(2/pi());
b = ((120*pi()^2)/(Z_0*sqrt(e_r)))-1+(1.84*((e_r-1)/e_r));
w_h = a-((2/pi())-((e_r-1)/(3.7*e_r))*log(b);
disp('-----')
')

% Podmínky
if (1/h_w)<= 1
    w_e = (1/h_w)*h;
    if (1/h_w)<= (1/(2*pi()))
        delta_w = 1.25*(t/pi())*(log((4*pi()*w_e)/t)+1);
    else
        delta_w = 1.25*(t/pi())*(log((2*h)/t)+1);
    end
    disp(' Jedná se o úzké mikropáskové vedení, kde poměr je w/h<=1')
else
    w_e = w_h*h;
    if (1/h_w)<= (1/(2*pi()))
        delta_w = 1.25*(t/pi())*(log((4*pi()*w_e)/t)+1);
    else
```

```

        delta_w = 1.25*(t/pi())*(log((2*h)/t)+1);
    end
    disp(' Jedná se o široké mikropáskové vedení, kde poměr je w/h>1')
end
w = w_e - delta_w;
%*****

% VYTIŠTĚNÍ VÝSLEDKU
%*****
fprintf(' Nekorigovaná šířka mikropáskového vedení je [mm]= %g\n',w_e*1e3);
fprintf(' Korigovaná (zohlednění tloušťky pokovení) šířka mikropáskového vedení je [mm]= %g\n',w*1e3);
disp('-----')
')
%*****

```

Příloha 2 Skript pro výpočet rozměru kapacitního pahýlu

```

% VÝPOČET ŠÍŘKY w A DÉLKY l KAPACITNÍHO PAHÝLU
%*****

% PŘIPRAVA PROSTŘEDÍ MATLABU
clc
clear all
close all
%*****

% VYTIŠTĚNÍ NA DISPLAY TO CO SE BUDE POCÍTAT
disp('-----')
')
disp('VÝPOČET ŠÍŘKY w A DÉLKY l KAPACITNÍHO PAHÝLU')
disp('VEDENÍ')
disp(' ')
disp(' ')
disp('          Zc ')
disp(' ----- ')
disp('Z0          Z0 ')
disp(' ----- ')
disp('          |          |          1| ')
disp('          -----          ~ ')
disp('          <__w__> ')
disp(' ')
disp('Náhradní obvod je paralelní kondenzátor')
disp('-----')
')
disp(' Pokračujte libovolnou klávesou ')
pause
%*****

% NAČTENÍ PARAMETRŮ
disp('-----')
')
e_r = input('Zadejte relativní permitivitu substrátu [-] er = ');
h = input('Zadejte výšku substrátu [mm] h = ');
C = input('Zadejte požadovanou kapacitu [pF] C = ');

```

```

f_r = input('Zadejte rezonační kmitočet filtru [GHz] fr = ');
t = input('Zadejte tloušťku pokovení vedení [mm] t = ');
w_pah = input('Zadejte minimální tloušťku pásu pro pahýl [mm] w_pah = ');
l = input('Zvolte délku kapacitoru [mm] l = ');
C = C*(1e-12); % pF
f_r = f_r*(1e9); % GHz
h = h*(1e-3); % mm
t = t*(1e-3); % mm
w_pah = w_pah*(1e-3); % mm
l = l*1e-3; % mm
c = 3e8; % m/s

disp('-----')
disp(' ')
%*****

%*****
% HLAVNÍ SKRIPT
N = 20e-2 ; % Maximální šířka kapacitoru (20cm)
C_solver = 0; % Vynulování kapacity
n = 0; % Počet běhů FOR

for w_ef = w_pah:0.000001:N % Cyklus for od w_pah po kroku 0,000001 do N
    n = n+1; % Inkrementace počtu běhů
    if (round(C_solver*1e15) ~= (round(C*1e15))) % Podmínka je splněna při
nerovnosti
        if (w_ef/h)<=1 % Podmínka pro platnost aproximačních vztahů
            w_f = (2*pi()*h)/(log(((8*h)/w_ef)+(w_ef/(4*h))));
            e_ef = (((e_r+1)/2)+((0.9/pi())*((e_r-1)/(log((8*h)/w_ef))));
            Z_v = ((120*pi())/sqrt(e_ef))*(h/w_f);
            C_solver = (l*sqrt(e_ef))/(c*Z_v);
mikropásku matice_vysledku (n,1) = w_ef; % první sloupec je šířka
kapacita matice_vysledku (n,2) = C_solver; % druhý sloupec je vypočítaná
algoritmu matice_vysledku (n,3) = n; % třetí sloupec je počet kroků
        else % Pokračování podmínky pro platnost aproximačních vztahů
            w_f = (w_ef+(((2*h)/pi())*(log(17.08*((w_ef/(2*h))+0.85)))));
            pomocne_a = log(6.28*((w_ef/(2*h))+0.85));
            pomocne_b =
(w_ef/h)+((2/pi())*(log(17.08*((w_ef/(2*h))+0.85))));
            e_ef = e_r-(((e_r-1)/2)*(pomocne_a/pomocne_b));
            Z_v = ((120*pi())/sqrt(e_ef))*(h/w_f);
            C_solver = (l*sqrt(e_ef))/(c*Z_v);
mikropásku matice_vysledku (n,1) = w_ef; % první sloupec je šířka
kapacita matice_vysledku (n,2) = C_solver; % druhý sloupec je vypočítaná
algoritmu matice_vysledku (n,3) = n; % třetí sloupec je počet kroků
        end
    else % Rovnost vypočítané a zvolené kapacity
        fprintf('K dosažení výsledku bylo zapotřebí kroků = %d\n', n)
        break % Zastavení cyklu for
    end
end

% Ověření soustřednosti parametru
lambda_g = (c/(f_r*sqrt(e_ef))); % Výpočet vlnové délky substrátu

```

```

if l > (lambda_g/7) % Podmínka pro soustředné parametry
    disp ('Špatně zvolená délka nesplňuje podmínku l < (lambda_g/7)')
else % Jedná se o kapacitor se soustřednými parametry
    if (round(C_solver*1e15) < (round(C*1e15))) % Pokud algoritmus
nekonverguje k řešení
        disp('Se zadanými parametry nemá algoritmus řešení pokuste se
změnit délku l')
    else % Řešení konverguje
        if (w_ef/h)<=(1/(2*pi())) % Rozdělení výpočetních vztahů podle w
            syms w
            delta_w = solve ((t/pi())*(1+log((4*pi()*w)/t)));
            delta_w_double = double(delta_w);
            w_s = (w_ef - delta_w_double)*1e3; % mm
        else
            delta_w = (t/pi())*(log((2*h)/t)+1) ;
            w_s = (w_ef - delta_w)*1e3; % mm
        end
        fprintf ('Rozměr "w" kapacitoru je [mm] = %d\n', w_s)
        fprintf ('Rozměr "l" kapacitoru je [mm] = %d\n', l*1e3)
    end
end

% Maximální kmitočet součástky vycházející ze soustřednosti parametrů
f_max = c/(7*1*sqrt(e_ef)); % Výpočet maximálního kmitočtu
if f_max > f_r % Podmínka pro použitelnost součástky
    fprintf ('Kapacitní pahýl lze použít do kmitočtu fmax [GHz] = %d\n',
f_max/1e9)
else % Nelze použít pro zvolený kmitočet
    disp ('Špatně zvolená délka l, nelze použít pro zadaný kmitočet')
end
%*****

```

Příloha 3 Skript pro výpočet rozměru meandrového induktoru

```

% VÝPOČET ŠÍŘKY w, DÉLKY MEANDRU d A MEZERY a MEANDROVÉHO INDUKTORU

%*****
% PŘIPRAVA PROSTŘEDÍ MATLABU
clc
clear all
close all
%*****

%*****
% VYTIŠTĚNÍ NA DISPLAY TO CO SE BUDE POCITAT
disp('-----')
disp('')
disp('VÝPOČET ŠÍŘKY w, DÉLKY MEANDRU d A MEZERY a MEANDROVÉHO INDUKTORU')
disp('-----')
disp('')
disp(' Pokračujte libovolnou klávesou ')
pause
%*****

%*****
% NAČTENÍ PARAMETRŮ
disp('-----')
disp('')
disp('ZADÁNÍ VSTUPNÍCH PARAMETRŮ')

```

```

e_r = input('Zadejte relativní permitivitu substrátu [-] er = ');
h = input('Zadejte výšku substrátu [mm] h = ');
L = input('Zadejte požadovanou indukčnost [nH] L = ');
f_r = input('Zadejte rezonační kmitočet filtru [GHz] fr = ');
t = input('Zadejte tloušťku pokovení vedení [mm] t = ');
d_meander = input ('Zadejte délku meandru [mm] d =');
n_meander = input ('Počet useků délky d [mm] n =');
a_meander = input (' Zadejte velikost mezery [mm] a=');
L = L*(1e-9); % nH
f_r = f_r*(1e9); % GHz
h = h*(1e-3); % mm
t = t*(1e-3); % mm
d_meander = d_meander*1e-3; % mm
a_meander = a_meander*1e-3; % mm
c = 3e8; % m/s
disp('-----')
disp(' ')
%*****
%*****
% HLAVNÍ SKRIPT
switch n_meander
    case {2}
        K_n = 2.76;
    case {3}
        K_n = 3.92;
    case {4}
        K_n = 6.22;
    case {5}
        K_n = 7.60;
    case {6}
        K_n = 9.7;
    case {7}
        K_n = 10.92;
    case {8}
        K_n = 13.38;
    case {9}
        K_n = 14.92;
    case {10}
        K_n = 16.86;
    otherwise
        error('Chyba - špatně zadaný počet úseků délky d, zadávejte celá
čísla v rozsahu n =2 ... 10')
end

N = 0.5e-4 ; % Minimální šířka (0,5mm)
M = 15e-3; % Maximální šířka (15cm)
L_solver = 0; % Vynulování kapacity
n = 0; % Počet běhů FOR

for w_ef = N:0.00000005:M % Cyklus for po kroku 0,000001
    n = n+1; % Inkrementace počtu běhů
    if (round(L_solver*1e12) ~= (round(L*1e12))) % Podmínka je splněna při
nerovnosti
        if (w_ef/h)<=1 % Podmínka pro platnost aproximačních vztahů
            w_f = (2*pi()*h)/(log(((8*h)/w_ef)+(w_ef/(4*h))));
            e_ef = (((e_r+1)/2)+((0.9/pi())*((e_r-1)/(log((8*h)/w_ef)))));
            Z_v = ((120*pi())/ (sqrt(e_ef)))*(h/w_f);

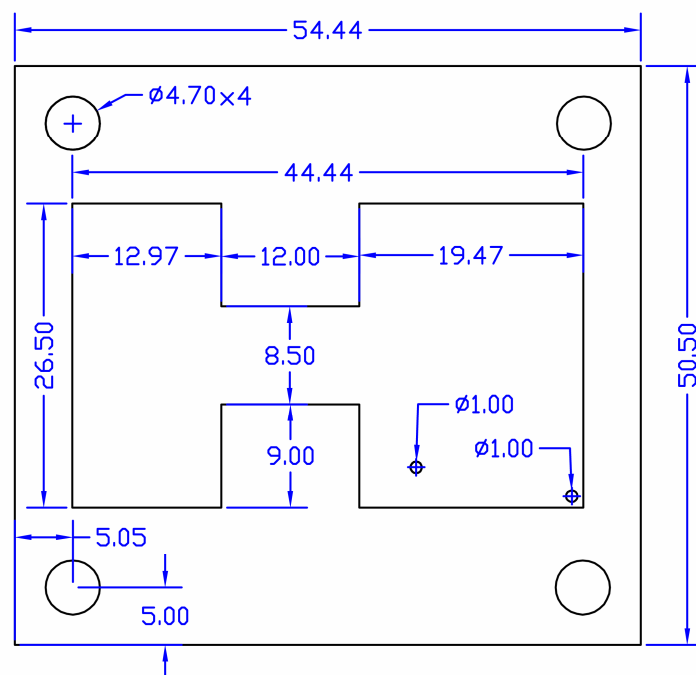
```

```

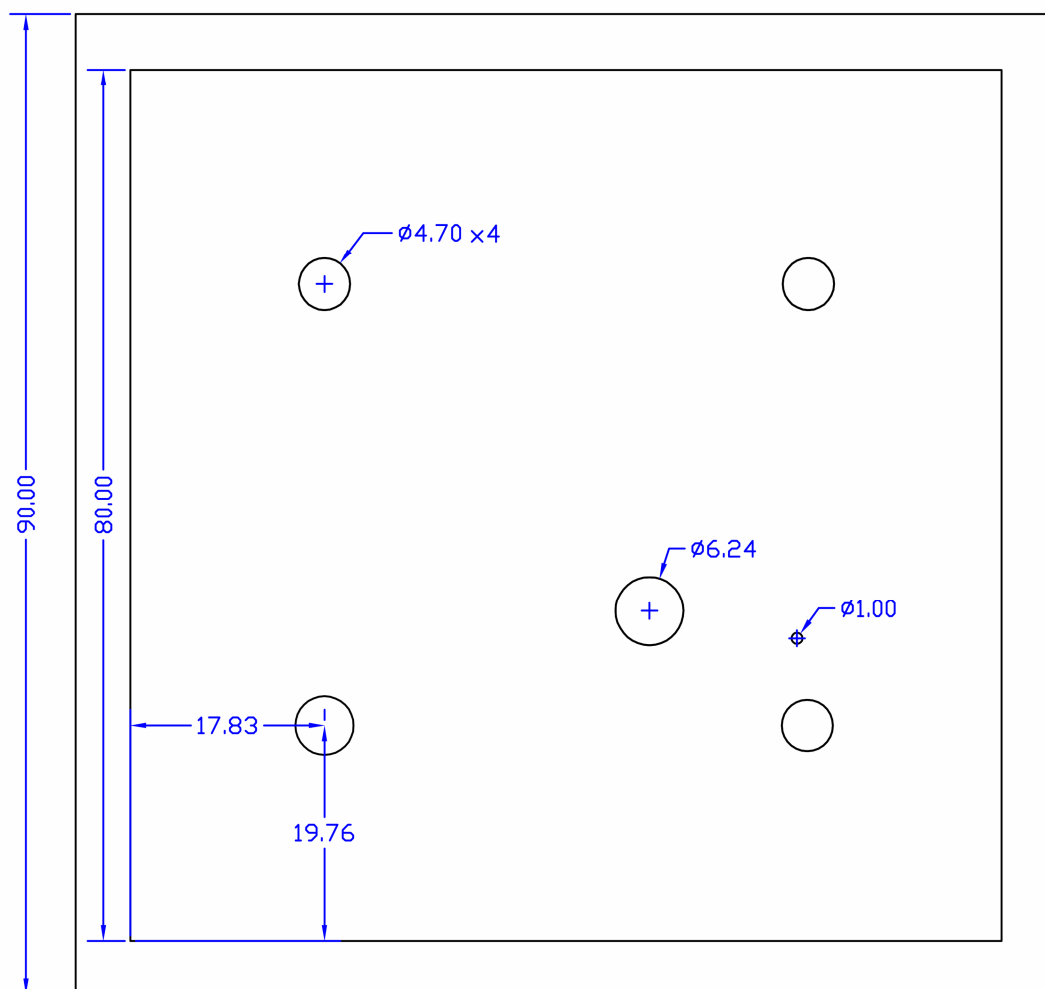
        pomocna_konstanta = 4*n_meander*log((2*(a_meander+w_ef))/w_ef);
        L_solver = 0.1*d_meander*1e3*(pomocna_konstanta-K_n);
        L_solver = L_solver * 1e-9;
        matice_vysledku (n,1) = w_ef;    % první sloupec je šířka
mikropásku
        matice_vysledku (n,2) = L_solver; % druhý sloupec je vypočítaná
kapacita
        matice_vysledku (n,3) = n;    % třetí sloupec je počet kroků
algoritmu
        else % Pokračování podmínky pro platnost aproximačních vztahů
            w_f = (w_ef+((2*h)/pi()))*(log(17.08*((w_ef/(2*h))+0.85))));
            pomocne_a = log(6.28*((w_ef/(2*h))+0.85));
            pomocne_b =
(w_ef/h)+((2/pi()))*(log(17.08*((w_ef/(2*h))+0.85)));
            e_ef = e_r-((e_r-1)/2)*(pomocne_a/pomocne_b);
            Z_v = ((120*pi())/sqrt(e_ef))*(h/w_f);
            pomocna_konstanta = 4*n_meander*log((2*(a_meander+w_ef))/w_ef);
            L_solver = 0.1*d_meander*1e3*(pomocna_konstanta-K_n);
            L_solver = L_solver * 1e-9;
            matice_vysledku (n,1) = w_ef;    % první sloupec je šířka
mikropásku
            matice_vysledku (n,2) = L_solver; % druhý sloupec je vypočítaná
kapacita
            matice_vysledku (n,3) = n;    % třetí sloupec je počet kroků
algoritmu
        end
        else % Rovnost vypočítané a zvolené kapacity
            fprintf ('K dosažení výsledku bylo zapotřebí kroků = %d\n', n)
            break % Zastavení cyklu for
        end
    end
end

if (round(L_solver*1e12) ~= (round(L*1e12))) % Pokud algoritmus
nekonverguje k řešení
    disp('Se zadanými parametry nemá algoritmus řešení pokuste se změnit
parametry')
else % Řešení konverguje
    if (w_ef/h)<=(1/(2*pi())) % Rozdělení výpočetních vztahů podle w
        syms w
        delta_w = solve ((t/pi())*(1+log((4*pi()*w)/t)));
        delta_w_double = double(delta_w);
        w_s = (w_ef - delta_w_double)*1e3;    % mm
    else
        delta_w = (t/pi())*(log((2*h)/t)+1) ;
        w_s = (w_ef - delta_w)*1e3;    % mm
    end
    fprintf ('Rozměr "w" indukčnosti je [mm] = %d\n', w_s)
    fprintf ('Rozměr "a" indukčnosti je [mm] = %d\n', a_meander*1e3)
    fprintf ('Rozměr "d" indukčnosti je [mm] = %d\n', d_meander*1e3)
    fprintf ('Počet délek d je [mm] = %d\n', n_meander)
end

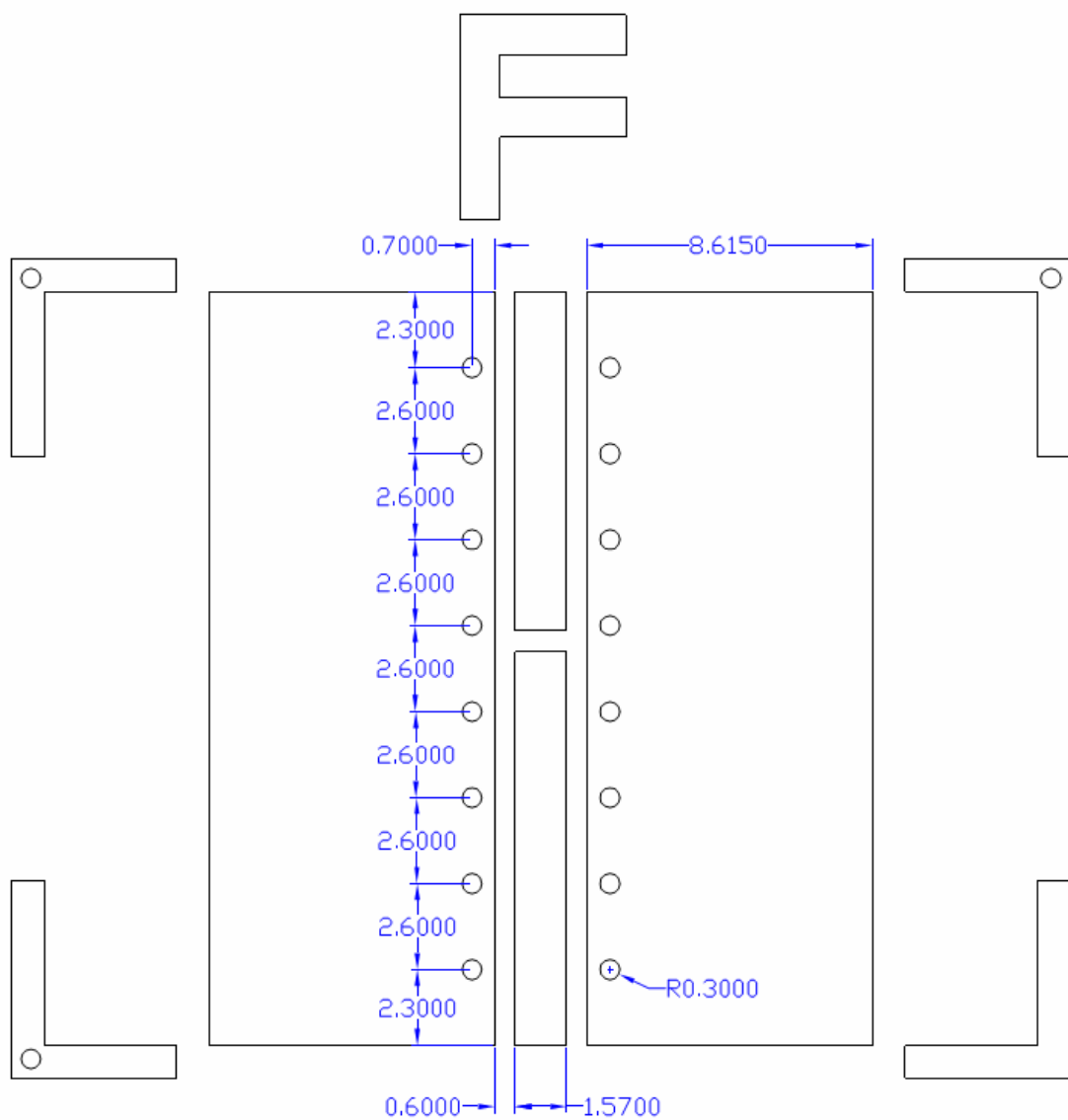
```



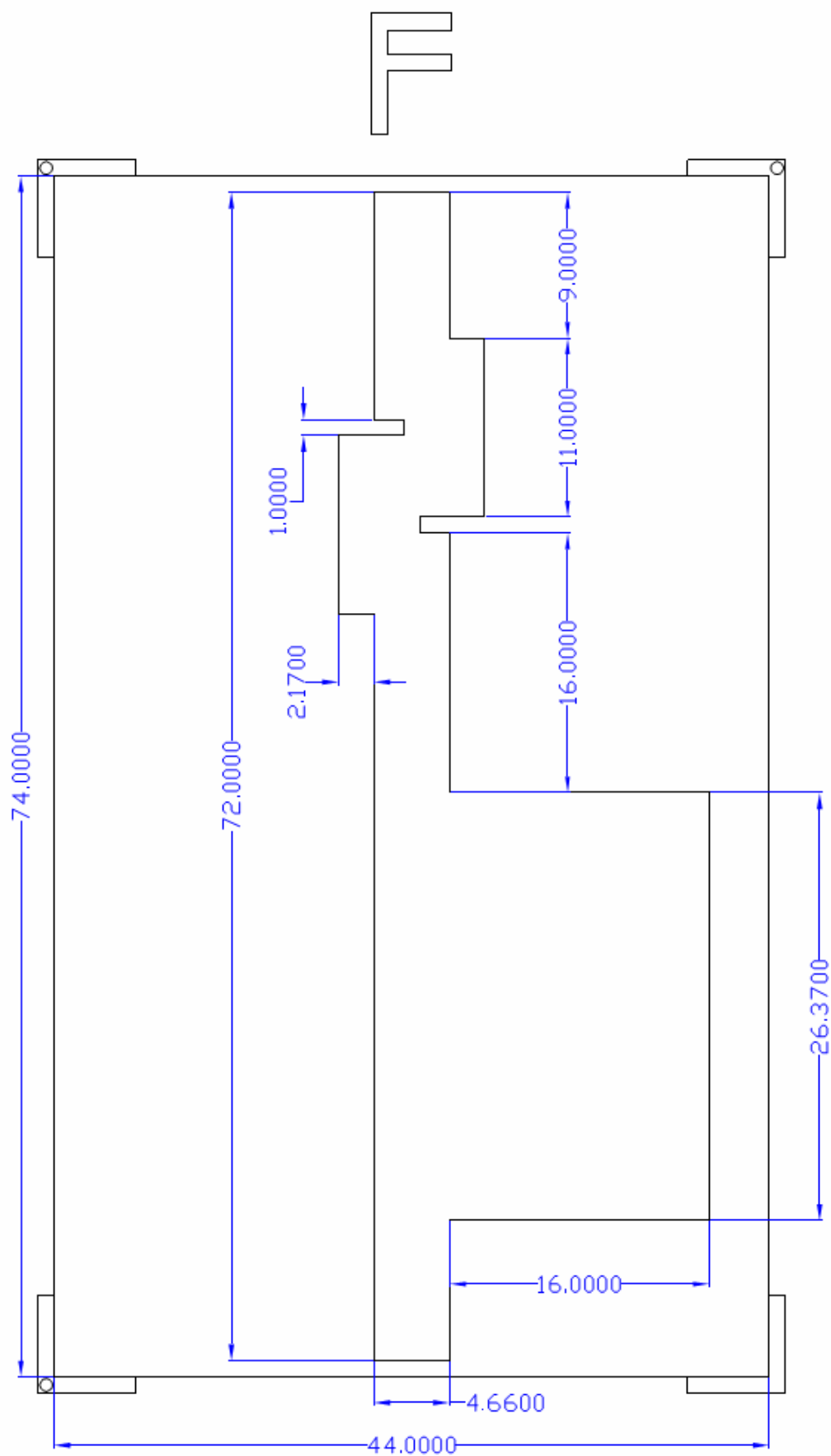
Příloha 4 Výkres rozměrů flíčku PIFA_H



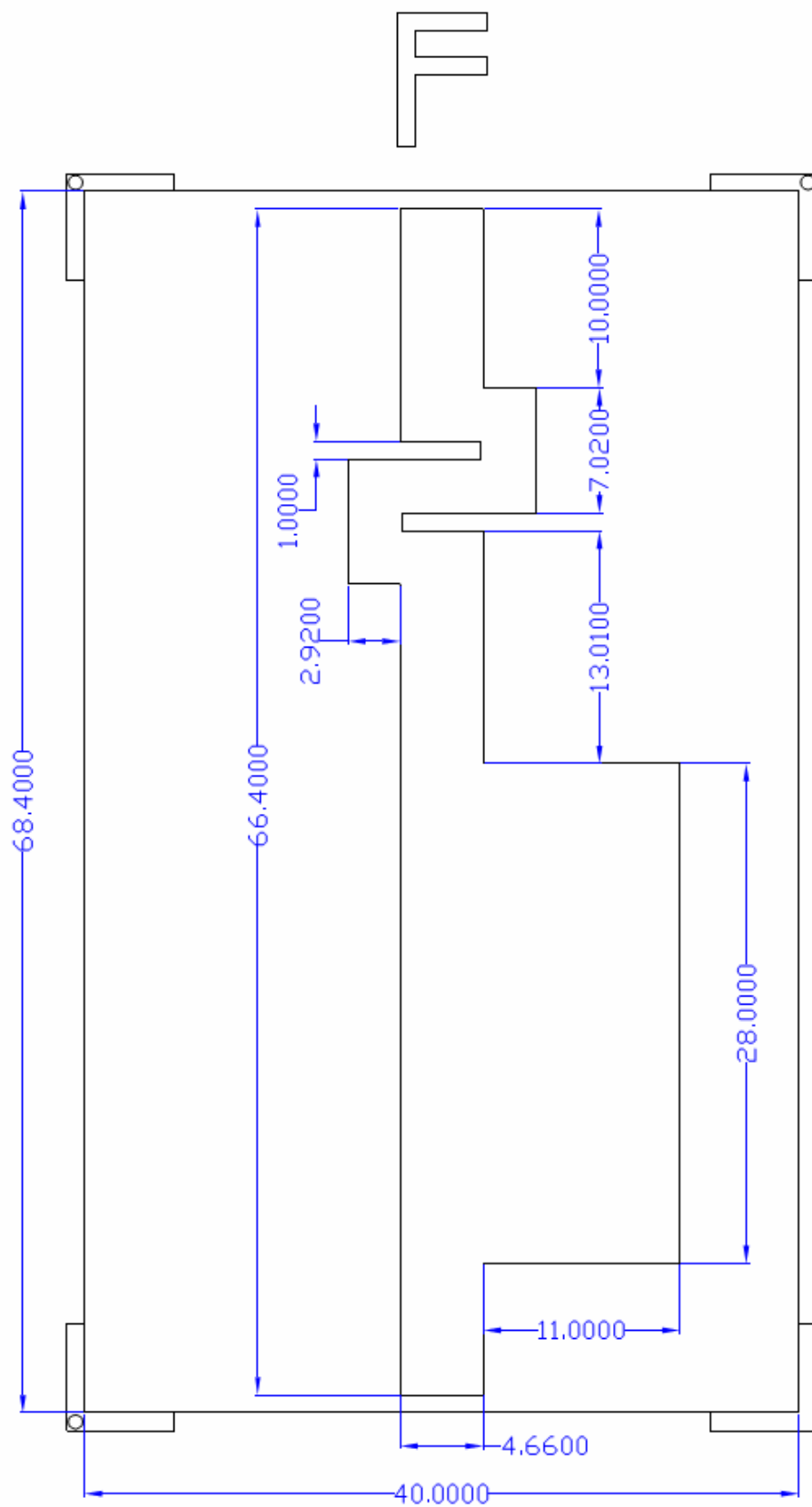
Příloha 5 Výkres rozměrů zemní plochy PIFA_H



Příloha 6 Výkres rozměrů koplanárního vedení



Příloha 7 Výkres rozměrů mikropáskového vedení pro dolní kmitočet f_d



Příloha 8 Výkres rozměrů mikropáskového vedení pro dolní kmitočet f_h

13. OBSAH PŘILOŽENÉHO CD

- **1.TEXT** složka obsahuje hlavní text diplomové práce
- **2.POUŽITÉ_OBRÁZKY** složka obsahuje obrázky použité v hlavním textu diplomové práce
- **3.SIMULAČNÍ_MODELY**
 - KAP. 5 složka obsahuje simulační modely použité v kapitole 5
 - KAP. 6 složka obsahuje simulační modely použité v kapitole 6
 - KAP. 7 složka obsahuje simulační modely použité v kapitole 7
 - OSTATNÍ složka obsahuje simulační modely použité v jiných kapitolách
- **4.NAMĚŘENÉ_TABULKY**
 - SMĚROVÉ_CHARAKTERISTIKY složka obsahuje tabulky a skripty pro vytvoření směrových charakteristiky
 - S-PARAMETRY složka obsahuje tabulky naměřených hodnot činitele odrazu realizovaných výrobků
- **5.PODKLADY_PRO_VÝROBU**
 - VÝROBA_ANTÉNY složka obsahuje výkresy pro výrobu antény PIFA_H
 - VÝROBA_KOPLANÁRNÍHO_PO složka obsahuje výkresy pro výrobu koplanárního přizpůsobovacího obvodu
 - VÝROBA_MIKROPÁSKOVÉHO_PO složka obsahuje výkresy pro výrobu mikropáskového přizpůsobovacího obvodu
- **6.SKRIPTY_MATLAB** složka obsahuje skripty z programu matlab uvedené v příloze hlavního textu diplomové práce