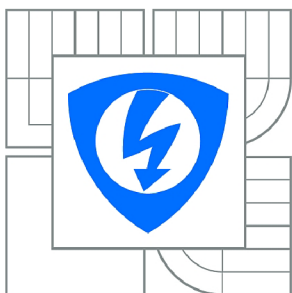




VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



**FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH
TECHNOLOGIÍ**

ÚSTAV RADIOELEKTRONIKY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF RADIO ELECTRONICS

KNIHOVNA STAVEBNÍCH PRVKŮ KOAXIÁLNÍHO FILTRU PRO CST MICROWAVE STUDIO

LIBRARY OF BUILDING ELEMENTS OF COAXIAL FILTERS FOR CST MICROWAVE STUDIO

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

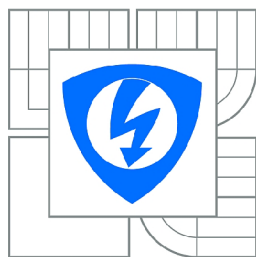
Bc. JIŘÍ VOREK

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

prof. Dr. Ing. ZBYNĚK RAIDA

BRNO 2010



VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

Ústav radioelektroniky

Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor
Elektronika a sdělovací technika

Student: Bc. Jiří Vorek

ID: 83139

Ročník: 2

Akademický rok: 2009/2010

NÁZEV TÉMATU:

Knihovna stavebních prvků koaxiálního filtru pro CST Microwave Studio

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Popište základy teorie koaxiálních filtrů (rezonanční kmitočty, Q_0 , Q_{ext} , vazební koeficienty, topologie) a postup modelování základních stavebních prvků koaxiálních filtrů v prostředí CST MWS (rezonátor, pár svázaných rezonátorů, externí navázání rezonátoru). Sestavte knihovnu ucelených maker základních stavebních prvků koaxiálních filtrů: 1. Rezonátor - hladký, "kloboukový" a "hřibovitý"; 2. Interní vazba - okýnkem, kapacitní sondou a hranolkem; 3. Externí vazba - přímá, kapacitním terčikem a induktivní smyčkou.

Rozšiřte knihovnu základních stavebních prvků o základní topologická uspořádání ucelených koaxiálních filtrů (triplet, quadruplet, quintuplet). Vytvořte komplexní makro pro modelování kompletních filtrů obecné topologie v CST MWS.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

[1] MATTHAEI, G. L., YOUNG, L., JONES, E. M. T. Microwave Filters, Impedance Matching Networks, and Coupling Structures. Norwood, Massachusetts, Artech House, Inc., 1980.

[2] SWANSON, D. G., WENZEL, R. J. Fast analysis and optimization of combline filters using FEM. In IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest, Boston, 2001, p. 1159-1162.

Termín zadání: 8.2.2010

Termín odevzdání: 21.5.2010

Vedoucí práce: prof. Dr. Ing. Zbyněk Raida

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.

LICENČNÍ SMLOUVA POSKYTOVANÁ K VÝKONU PRÁVA UŽÍT ŠKOLNÍ DÍLO

uzavřená mezi smluvními stranami:

1. Pan/paní

Jméno a příjmení: Bc. Jiří Vorek
Bytem: Proskovická 39, Ostrava 30, 700 30
Narozen/a (datum a místo): 25. května 1985 v Ostravě

(dále jen „autor“)

a

2. Vysoké učení technické v Brně

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

Čl. 1

Specifikace školního díla

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

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

Název VŠKP: Knihovna stavebních prvků koaxiálního filtru pro CST Microwave Studio

Vedoucí/ školitel VŠKP: prof. Dr. Ing. Zbyněk Raida

Ústav: Ústav radioelektroniky

Datum obhajoby VŠKP: _____

VŠKP odevzdal autor nabyvateli*:

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

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

* hodící se zaškrtněte

Článek 2

Udělení licenčního oprávnění

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

Článek 3

Závěrečná ustanovení

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

V Brně dne: 21. května 2010

.....

Nabyvatel

.....

Autor

ABSTRAKT

Tato práce se zabývá vývojem nástroje - maker usnadňující návrh koaxiálních dutinových rezonátorů. V práci je popsána problematika návrhu složitých struktur v CST Studio Suite 2009. Za tímto účelem jsou vytvořena makra poskytující hrubý a jemný model optimalizační rutině Tuning-Space Mapping.

KLÍČOVÁ SLOVA

Tuning – Space Mapping, CST Studio, koaxiální dutinový filtr, jemný model, hrubý model, optimalizace, makra, elektromagnetický simulátor pole, Virtual Prototyping, Visual Basic, Pascal

ABSTRACT

This thesis deals with development of tool – macros which help to create coaxial cavity filters. It describes problematic design of complex structures at CST Studio Suite 2009. For this purpose macros supporting coarse and fine model to method Tuning – Space Mapping (TSM) was made. This means creating fine model at CST MWS and coarse model at CST DS.

KEYWORDS

Tuning – Space Mapping, CST Studio, coaxial cavity filter, the fine model, the coarse model, optimization, macros, electromagnetic field simulator, Virtual Prototyping, Visual Basic, Pascal

Vorek, J. *Knihovna stavebních prvků koaxiálního filtru pro CST Microwave Studio*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií. Ústav radioelektroniky, 2010. 38 s. Diplomová práce. Vedoucí práce: prof. Dr. Ing. Zbyněk Raida.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že moji diplomovou práci na téma Knihovna stavebních prvků koaxiálního filtru pro CST Microwave Studio jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

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

V Brně dne 21. května 2010

.....
podpis autora

ÚVOD	1
1 Koaxiální Dutinové rezonátory	3
1.1 Základní parametry	3
1.2 Zapojení do obvodu a buzení.....	5
1.2.1 Buzení rezonátorů proudovou sondou	5
1.2.2 Buzení rezonátorů magnetickou smyčkou	5
1.2.3 Buzení rezonátorů vazebním otvorem	6
1.3 Vazby	6
1.3.1 Interní přímá vazba mezi rezonátory	8
1.3.2 Externí vazba	9
1.3.3 Křížová vazba	10
2 EM simulátory	12
3 Návrh filtru v CST	13
4 Knihovna koaxiálních rezonátorů	15
4.1 Teplotní modely rezonátorů.....	18
4.2 Externí navázání	18
4.2.1 Induktivní navázání drátem	18
4.2.2 Kapacitní navázání terčičkem.....	19
4.3 Interní vazba	20
4.3.1 Induktivní interní vazba okénkem	20
4.3.2 Kapacitní interní vazba tyčinkou	22
5 Tvorba komplexních struktur	23
5.1 Ovládání programu	23
5.2 Návrh filtru	25
6 Modely filtrů	32
7 Metoda TSM	35
ZÁVĚR	36
LITERATURA	37
SEZNAM SYMBOLŮ, VELIČIN A ZKRATEK	38

ÚVOD

Moderní komunikační systémy potřebují ke své funkci stále lepší filtry. Parametry těchto filtrů předurčují funkčnost těchto systémů. Požadavky jsou kladeny na vysoký činitel jakosti, průchozí útlum, činitel odrazu a selektivitu. Tomu lze vyhovět výrobou asymetrických filtrů.

Filtry lze realizovat ve formě mikropásky, vlnovodu, koaxiální dutiny nebo dielektrického rezonátoru. Mikropásky jsou vhodné pro svoji snadnou výrobu, avšak mají malý činitel jakosti a nemohou zpracovat velký výkon. Vlnovody lze také jednoduše vyrobit ale jejich rozměry jsou značné, nedají se tedy použít pro komunikační systémy v rozumné formě. Dielektrické rezonátory potřebují pro svoji funkčnost materiál s velkou permitivitou, to splňuje keramika. Mají extrémně vysoké Q (až 50000)[1], avšak návrh takového filtru a samotná výroba má svá úskalí a není tak vhodný pro výrobu filtru o několika řádech. Koaxiální dutinové filtry vykazují velký činitel jakosti Q , velmi malý průchozí útlum a velkou přeladitelnost. Za pomoci koaxiálních dutinových filtrů lze realizovat velmi vysoký útlum mimo propustné pásmo, což se velmi často využívá právě v duplexerech nebo kombinerech, kde je nutné důkladně od sebe oddělit jednotlivá pásma. Koaxiální dutinové filtry jsou převážně pásmové propusti.

Téma práce je zaměřeno na ulehčení návrhu koaxiálních filtrů a jejich provázaných struktur. To se děje v prostředí CST STUDIO SUITE 2009, dále CST. Ulehčení spočívá ve tvorbě uživatelsky přístupných maker a programu pro návrh komplexních struktur filtru. Tato část uživatelského rozhraní je spjata s relativně novou optimalizační rutinou zvanou Tuning-Space Mapping, zkráceně TSM. Makra totiž nejen vytvoří model filtru během jednoduchého vybrání topologie a zadání parametrů, ale poskytnou fyzikální a obvodové modely pro tuto optimalizační rutinu. Následnou optimalizací, popisem TSM a užitím těchto modelů se zabývá práce Davida Wolanského pod názvem Optimalizace koaxiálních filtrů metodou Tuning-Space Mapping v CST [2]. Sloučením těchto dvou prací se dostává uživateli nástin urychlení návrhu a optimalizace elektromagnetických struktur, snížení nákladů a efektivního využití simulačního programu.

Možný postup návrhu prototypu filtru probíhá v těchto krocích:

1. Syntéza filtru – vazební matice
2. Návrh rezonátoru
3. Návrh vstupně/výstupního navázání
4. Návrh vazeb mezi rezonátory
5. Tvorba dokumentace a technických výkresů
6. Volba materiálu
7. Laboratorní vzor a jeho prvotní ladění
8. Několikanásobné ladění a mechanická modifikace filtru – dosažení specifikace
9. Revize dokumentace a technických výkresů
10. Volba materiálu

11. První prototyp

Body 5. až 8. jsou velmi náročné na technologii a tedy i na čase stráveným doladováním. Pomocí metody nazývané Virtual Prototyping se tyto body zmenší do jednoho a zkrátí se tím i čas výsledného návrh filtru. Virtual Prototyping označuje disciplínu simulace struktur v simulátorech, k tomu určených, bez nutnosti výroby struktury. Díky této koncepci a použitím TSM lze zkrátit návrh filtru o nemalý čas a snížit náklady spojené s návrhem. Pro potřeby Virtual Prototypingu je vytvořena knihovna koaxiálních rezonátorů. Přidán je nástroj, nástavba pro komplexní návrh topologie a tím i zefektivnění použitého CST. Práce je vytvořena pro firmu C-COM v Pardubicích, která se zabývá mimo jiné návrhem a realizací koaxiálních dutinových filtrů. Firma patří pod mezinárodní firmu Andrew.

1 KOAXIÁLNÍ DUTINOVÉ REZONÁTORY

1.1 Základní parametry

Dutinové rezonátory jsou nejčastěji používanými mikrovlnnými rezonančními obvody v pásmech cm a mm vln. Mezi jejich nejvýznamnější vlastnosti, pro něž dosáhly velmi širokého použití, patří velmi vysoká hodnota vlastního činitele Q_0 (řádově 10^3 až 10^5). Obecný dutinový rezonátor lze definovat jako část prostoru vyplněnou dielektrikem a uzavřenou vodivým kovovým pláštěm. Vzniká tak uzavřená dutina o objemu V . Rezonanční kmitočet takové dutiny je dán vztahem [4]

$$f = f_0 + \left(1 - \frac{1}{2Q_0}\right) \quad (1)$$

v němž f_0 je rezonanční kmitočet téhož rezonátoru bez uvažování jeho ztrát a Q_0 je jeho vlastní činitel jakosti (nezatíženého rezonátoru) způsobený ztrátami výkonů v nedokonale vodivých stěnách rezonátoru. Vzhledem k velmi vysoké hodnotě $Q_0 \gg 1$ se skutečný rezonanční kmitočet reálné dutiny f liší jen velmi nepatrně od rezonančního kmitočtu f_0 bezeztrátové dutiny (s ideálně vodivými stěnami). Pro přibližné určení Q_0 lze pro většinu rezonátorů vypuklého tvaru odvodit vztah [4]

$$Q_0 = \frac{2}{\delta} \cdot \frac{V}{S_p}, \quad (2)$$

kde δ je hloubka vniku do vodivých stěn dutiny při rezonančním kmitočtu, V je objem dutiny a S_p vnitřní povrch jeho pláště. Není-li tento povrch opracován do zrcadlového lesku, může být hloubka vniku menší δ než drsnost povrchu vodiče. V modelovém případě se dráha vodivého povrchového proudu prodlouží přibližně $\sqrt{2}$ krát, takže vztah (2) korigovaný na drsnost povrchu stěn dutiny má tvar [4]

$$Q_0 = \frac{2}{\sqrt{2} \cdot \delta} \cdot \frac{V}{S_p} = \frac{\sqrt{2}}{\delta} \cdot \frac{V}{S_p}. \quad (3)$$

Předchozí vztahy platí tím přesněji čím menší je objem V rezonátoru, čím jednodušší tvar má dutina a čím jednodušší uspořádání elektromagnetického pole se v ní tvoří [4].

Je-li dutina rezonátoru vyplněna dielektrikem s nezanedbatelnými, avšak malými ztrátami, charakterizovanými ztrátovým činitelem $\text{tg } \delta \ll 1$, je výsledný činitel jakosti dutiny roven

$$\frac{1}{Q_{0c}} = \frac{1}{Q_0} + \text{tg } \delta. \quad (4)$$

Vlivem ztrát v dielektriku klesne tedy vlastní činitel jakosti rezonátoru na hodnotu $Q_{0c} < Q_0$ [4].

Zvláštním typem dutinových rezonátorů je koaxiální rezonátor. Ten je tvořen koaxiální dutinou, tedy úsekem souosého vedení uzavřeným na obou koncích nakrátko. Koaxiální rezonátory se provozují prakticky výhradně s videm TEM, tj. s dominantním videm koaxiálního vedení. Jeho rezonanční kmitočet a rezonanční vlnová délka jsou rovny

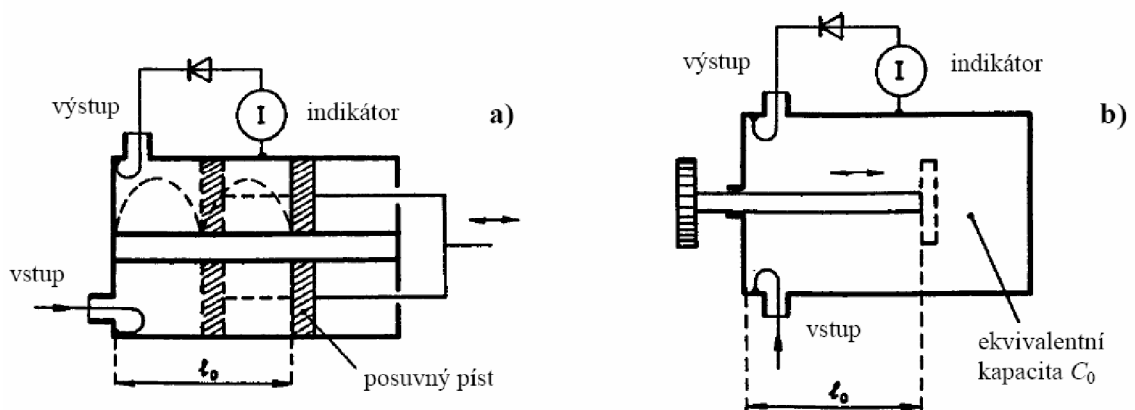
$$f_0^{TEM} = \frac{p}{2l \cdot \sqrt{\epsilon\mu}}, \quad (5)$$

$$\lambda_0^{TEM} = \frac{2l}{p}. \quad (6)$$

Vidové číslo p tedy opět určuje počet půlvln elektromagnetického pole na délce l rezonátoru. Základní vid kmitání je určen hodnotou $p=1$. Konstrukce uvedeného typu půlvlnného koaxiálního rezonátoru je na **obr. 1.1a**. Pro jeho činitel jakosti lze z přibližného vztahu (2) odvodit

$$Q_0 = \frac{2R_0}{\delta} \cdot \frac{\ln \frac{R_0}{r_0}}{1 + \frac{R_0}{r_0} + \frac{4R_0}{l} \cdot \ln \frac{R_0}{r_0}}. \quad (7)$$

Pro konstantní R_0 nastává maximum tohoto výrazu při poměru $R_0/r_0 = 3,6$, tedy při hodnotě, kdy původní koaxiální vedení vykazuje nejmenší měrný útlum [4].



Obrázek 1.1 Koaxiální rezonátory: a) půlvlnný b)čtvrtvlnný (převzato z [4])

Druhý typ koaxiálního rezonátoru, čtvrtvlnný koaxiální rezonátor, využívá rezonančních vlastností čtvrtvlnného zkratovaného vedení. Dle **obr. 1.1b** se do dutiny

zasouvá střední vodič, takže rezonance nastává při

$$l_0 \approx (2p + 1) \cdot \frac{\lambda_0}{4}. \quad (8)$$

Na konci středního vodiče vzniká mezi ním a protější stěnou kapacita C_0 , která zkracuje rezonanční délku (8). Někdy se tato kapacita úmyslně zvětšuje (např. rozšířením středního vodiče), aby se zmenšily celkové rozměry rezonátoru [4]. Na **obr. 1.2** je příklad koaxiálního rezonátoru v CST. Díky zvětšené ploše se zvětší kapacita a tím i zmenší Q_0 .



Obrázek 1.2 Koaxiální rezonátor se zvětšenou plochou středního vodiče

1.2 Zapojení do obvodu a buzení

Použije-li se dutinový rezonátor jako průchozí, tzn. je zapojen do obvodu dvěma vazebními otvory, takže signál při rezonanci dutinou prochází, při rezonanci je v dutině nahromaděna maximální energie, což se projeví prudkým vzrůstem výstupního výkonu. Při větším rozladění rezonančního kmitočtu signál dutinou prakticky neprojde[4].

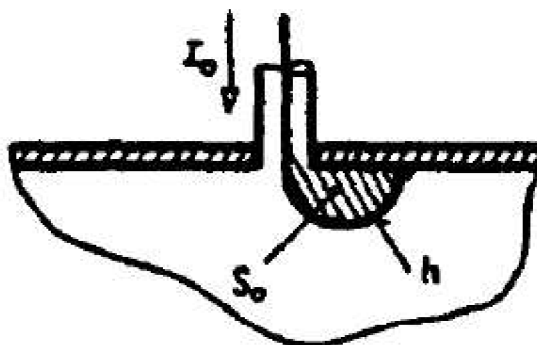
1.2.1 Buzení rezonátorů proudovou sondou

Realizuje se krátkým úsekem lineárního vodiče (např. středního vodiče koaxiálního vedení) s délkou $h \ll \lambda$ zasunutým do buzeného rezonátoru. Pro optimální buzení určitého vidu elektromagnetického pole musí být sonda zasunuta rovnoběžně se siločarami elektrického pole buzeného vidu, a to v místě jeho maximální intenzity. Kmitočet budícího signálu, jímž je sonda napájena, musí být blízký rezonančnímu kmitočtu buzeného vidu v daném rezonátoru. Velikost buzení lze jistou měrou ovlivňovat změnou zasunutí sondy [4].

1.2.2 Buzení rezonátorů magnetickou smyčkou

Je odvozeno od předchozího způsobu, kdy lineární proudovou sondu vytvarujeme do

podoby malé „téměř uzavřené smyčky“ dle **obr. 1.3**. Pro optimální buzení určitého vidu v rezonátoru, musí být plocha smyčky kolmá k magnetickým siločarám toho to vidu a její střed musí být v místě maximální intenzity magnetického pole. Kmitočet buzeného signálu musí být blízký rezonančnímu kmitočtu buzeného vidu v daném dutinovém rezonátoru. Velikost buzení tu lze prakticky regulovat od nuly až do maximální hodnoty prostým natáčením polohy smyčky o úhel 90° . Použití magnetické smyčky jako budícího elementu je nejčastější při buzení vzduchem plněných koaxiálních vedení a zejména koaxiálních rezonátorů [4].



Obrázek 1.3 Proudová smyčka (převzato z [4])

1.2.3 Buzení rezonátorů vazebním otvorem

Ve stěně dutiny rezonátoru je vytvořen malý vazební otvor. V něm se z vnějšku vytvoří budící elektrické pole (vnějším vedením, vnějším vlnovodem či ozářením elektromagnetickou vlnou), kterým je buzen požadovaný vid v buzeném rezonátoru. Pro optimální buzení musí být budící elektrické pole ve štěrbině orientováno kolmo na směr magnetických siločar buzeného vidu a střed štěrbiny musí být umístěn v místě maxima magnetického pole buzeného vidu. Kmitočet budícího pole musí být blízký rezonančnímu kmitočtu buzeného vidu v dutinovém rezonátoru [4].

1.3 Vazby

Vazba dvou obvodů se dá pochopit jako vazba mezi obvodem dodávajícím energii (tj. obvod s napájecím zdrojem), tzv. primárním obvodem, a obvodem se zátěží, tzv. sekundárním obvodem. Impedance, která patří oběma obvodům, se nazývá vazební impedance. Pak se jedná o obvody svázané vazbou [4].

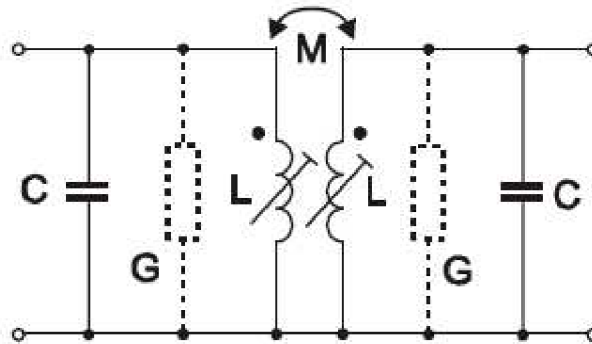
Velikost vazby dvou obvodů se posuzuje podle činitele vazby k definované vztahem

$$k = \frac{Z_v}{\sqrt{Z_1 \cdot Z_2}}, \quad (9)$$

Kde Z_V je modul vazební impedance a Z_1, Z_2 jsou moduly impedance primárního a sekundárního obvodu [4].

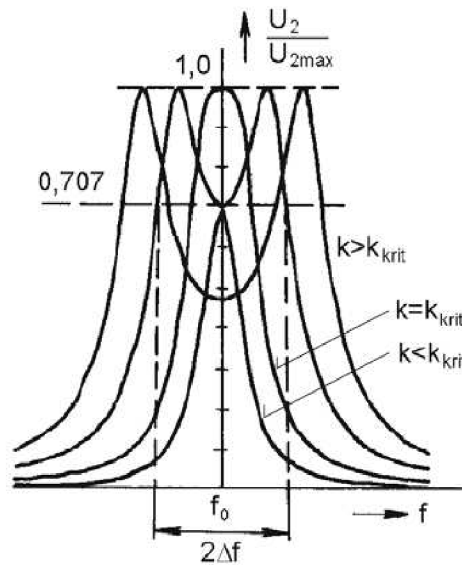
Vazby lze rozdělit následovně. Přímá vazba spojuje dva sousední rezonátory (z pohledu cesty signálu filtrem). Křížová vazba spojuje dva rezonátory mimo cestu šíření. Externí vazba spojuje filtr s okolním světem.

Na **obr. 1.4** je nakreslena často používaná struktura vázaných rezonančních obvodů, u které jsou primární i sekundární rezonanční obvod naladěny na stejný kmitočet f_0 a mají stejný činitel jakosti Q .



Obrázek 1.4 Navázání rezonanční struktury (převzato z [4])

Rezonanční křivky tohoto obvodu pro různé velikosti činitele vazby jsou nakresleny na **obr 1.5**. pro lepší posouzení jejich průběhů jsou znázorněny v normovaném tvaru. Při vazbě menší než je vazba kritická $k < k_{krit}$ a při $k = k_{krit}$ mají rezonanční křivky jeden vrchol, tj. jsou podobné rezonančním křivkám jednoduchého rezonančního obvodu. Je-li $k > k_{krit}$ mají rezonanční křivky dva vrcholy, které se při zvětšování činitele vazby od sebe vzdalují, když primární i sekundární obvod jsou naladěny na stejný f_0 . Vhodným nastavením vazeb lze tedy dosáhnout takového tvaru rezonanční křivky, který se blíží obdélníkovému průběhu ideální pásmové propusti [4].



Obrázek 1.5 Rezonanční křivky (převzato z [4])

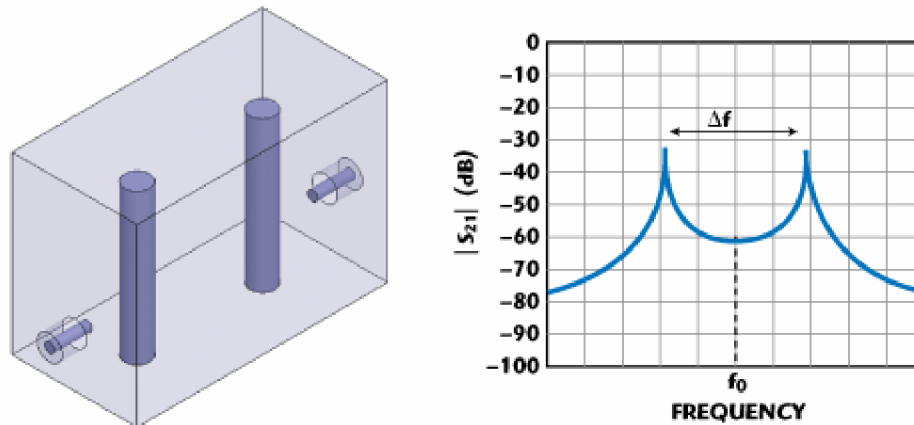
Propustné pásmo vázaných rezonátorů je definováno stejně jako u jednoduchých rezonančních obvodů, jako rozmezí kmitočtů, při kterých poklesne sledovaná veličina o 3 dB. Z **obr. 1.5** vyplývá, že nejširší propustné pásmo budou mít vázané rezonanční obvody při takovém činiteli vazby, kdy pro minimum rezonanční křivky platí $U_2/U_{2max}=0,707$ (pokles o 3 dB). Při dalším zvětšení činitele vazby se již propustné pásmo rozpadá na dvě části. Lze odvodit, že maximální šířka propustného pásma dvou vázaných rezonančních obvodů je 3,1 krát větší než propustné pásmo jediného rezonančního obvodu [4].

1.3.1 Interní přímá vazba mezi rezonátory

Na **obr. 1.6** je ukázka dvou rezonátorů svázaných induktivní (kladnou) vazbou pomocí tzv. okénka. Model obsahuje i vstupní a výstupní porty pro možnost výpočtu přenosové frekvenční charakteristiky. Na **obr. 1.6** je frekvenční charakteristika (S_{21}) modelu. Oba rezonátory jsou identické a oba rezonují na frekvenci f_0 . Vazba mezi rezonátory vede k posunu Δf rezonančního kmitočtu obou dutin. Normovaný vazební koeficient mezi rezonátory 1 a 2 je dán vztahem

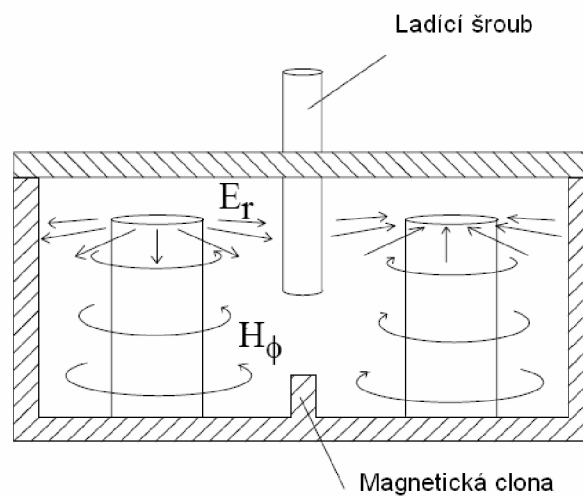
$$M_{12} = \frac{\Delta f}{BW}, \quad (10)$$

kde Δf je vazební šířka pásma a BW je šířka pásma filtru. Vazební koeficient je tedy mírou rozladění obou dutin. Vazba mezi rezonátory nemusí být induktivní (kladná), ale může být i kapacitní (záporná), která je realizována např. kovovou anténkou [5].



Obrázek 1.6 Induktivní vnitřní vazba dvou rezonátorů a s_{21} charakteristika modelu (převzato z [5])

Vazba mezi rezonátory má vždy magnetickou a elektrickou složku. Na **obr 1.7** je příklad dvou rezonátorů s ladícím šroubem a magnetickou clonou. Ladící šroub umístěný mezi otevřené konce obou rezonátorů zvyšuje celkovou vazbu a snižuje elektrickou vazbu. Magnetická clona, zvaná též okénko, snižuje magnetickou vazbu a zmenšuje vazbu celkovou [6].



Obrázek 1.7 ladící prvky vazeb rezonátorů (převzato z [6])

1.3.2 Externí vazba

Pomocí této vazby se filtr připojuje k dalším obvodům. Hodnota vazby se často vztahuje k externímu činiteli jakosti Q_{ext} . Na **obr. 1.8** je model rezonátoru pro výpočet externího činitele jakosti. Externí navázání je zde koncipováno jako střední vodič koaxiálního vedení, které je vedeno přímo do rezonátoru. V praxi existuje více možností, jak provést externí navázání, např. pomocí terčíku nebo drátové smyčky. V modelu na **obr. 1.8** je implementován port, aby bylo možné změřit kmitočtovou

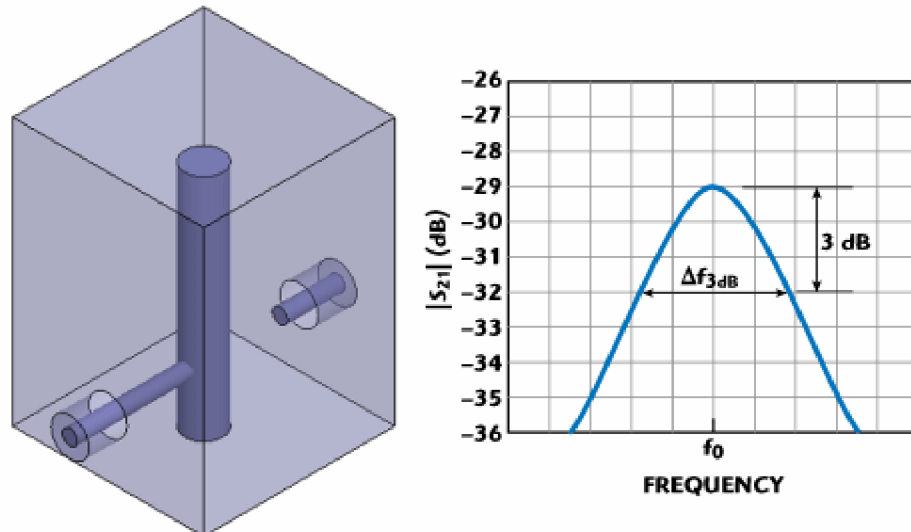
přenosovou charakteristiku. Vliv tohoto portu lze zanedbat pokud maximální hodnota rezonanční charakteristiky je pod úrovní -25dB až -30dB. Šířku pásma externího navázání lze určit podle **obr. 1.8**. Externí Q_{ext} lze tedy určit jako

$$Q_{EXT} = \frac{f_0}{\Delta f_{3dB}}. \quad (11)$$

Externí Q_{ext} lze také formulovat pomocí normovaného vazebního koeficientu M_{01}

$$Q_{EXT} = \frac{f_0}{(BW \cdot M_{01}^2)}, \quad (12)$$

kde BW je šířka pásma filtru. Je také možné vypočítat externí Q_{ext} pomocí skupinového zpoždění parametru s_{11} . Hodnota externího Q_{ext} se bude zmenšovat, jestliže se bude zvyšovat výška portu externího navázání [5].



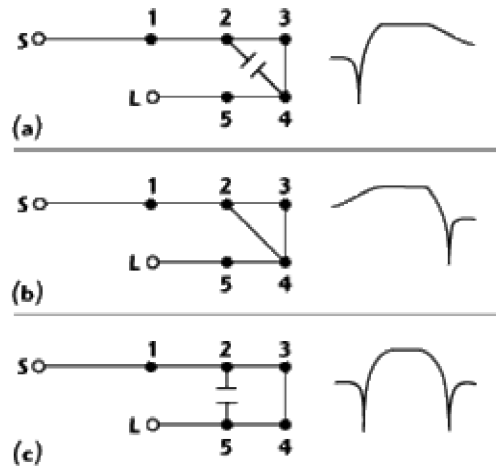
Obrázek 1.8 Externí navázání rezonátoru a s_{21} charakteristika (převzato z [5])

1.3.3 Křížová vazba

Hlavní funkcí této vazby je vytvořit nulu (transmission zero - TZ) v přenosu na určitém kmitočtu. To samozřejmě přispívá ke zvětšení selektivity filtru. Další funkcí křížové vazby je ekvalizovat skupinové zpoždění v propustném pásmu [5].

Křížové vazby mohou být jak induktivního, tak kapacitního charakteru. Na **obr. 1.9** jsou schémata základních struktur filtru a odpovídající kmitočtové charakteristiky. Černé body s čísly reprezentují rezonátory, bílé kruhy reprezentují vstupní (S – source) a výstupní (L – load) porty. Induktivní vazba je reprezentována plnou čarou, kapacitní vazba má symbol kondenzátoru. Jak již bylo řečeno, induktivní vazba je kladného charakteru a kapacitní vazba má záporný charakter. Jedna křížová vazba, která odděluje

jeden rezonátor (triplet) může, za určitých podmínek, poskytnout velký útlum mimo propustné pásmo, který odpovídá dalším dvěma dodatečným pólům filtru. Využití křížové vazby tedy může snížit potřebný řád filtru. Nevýhodou je, že zvýšením selektivity filtru na jedné straně pásma se ovšem snižuje selektivita filtru na opačné straně pásma. Na **obr. 1.9** jsou zobrazeny nejznámější konfigurace filtru s křížovými vazbami. Na **obr. 1.9a** je triplet s kapacitní křížovou vazbou, **obr. 1.9b** zobrazuje triplet s induktivní křížovou vazbou. Na **obr. 1.9c** je konfigurace kvadruplet s křížovou vazbou, která odděluje dva rezonátory. Vzniknou tak dvě TZ, každá na opačné straně propustného pásma [5].



Obrázek 1.9 Umístění křížových vazeb a související frekvenční charakteristiky (převzato z [5])

2 EM SIMULÁTORY

Používání 3D elektromagnetických (EM) simulátorů polí k vytvoření mikrovlnných/RF zařízení je v dnešní době velice rozšířeno. Mnoho komerčních EM simulátorů je na trhu dostupných (**tabulka 2.1**) a s jejich pomocí lze navrhnout jakékoliv elektromagnetické struktury na platformě běžně dostupných počítačů. Není potřeba velkých sálových počítačů jak tomu bylo v době před deseti lety. Mnoho firem v dnešní době utrácí nemalé peníze za používání EM softwaru a jejich efektivní využití pro velice specifické problémy. V mnoha případech Virtual Prototyping může nahradit návrh ve skutečné laboratoři návrhem v EM simulátoru. Jak mikrovlnné odvětví průmyslu stále více utrácí za EM simulátory, je velice důležité těmto simulátorům porozumět a využívat je efektivně [3].

Simulátor	Typ	Metoda	Web Link
Ansoft HFSS	Frekvenční doména	FEM	www.Ansoft.com
CST MWS	Časová doména	FDTD	www.Cst.de
FEST 3D	Frekvenční doména	Integral Equation	www.Aurorasat.es
MICIAN	Frekvenční doména	Mode Matching	www.Mician.com
FLEX PDE	Frekvenční doména	FEM 2-D	www.Pedsolutions.com

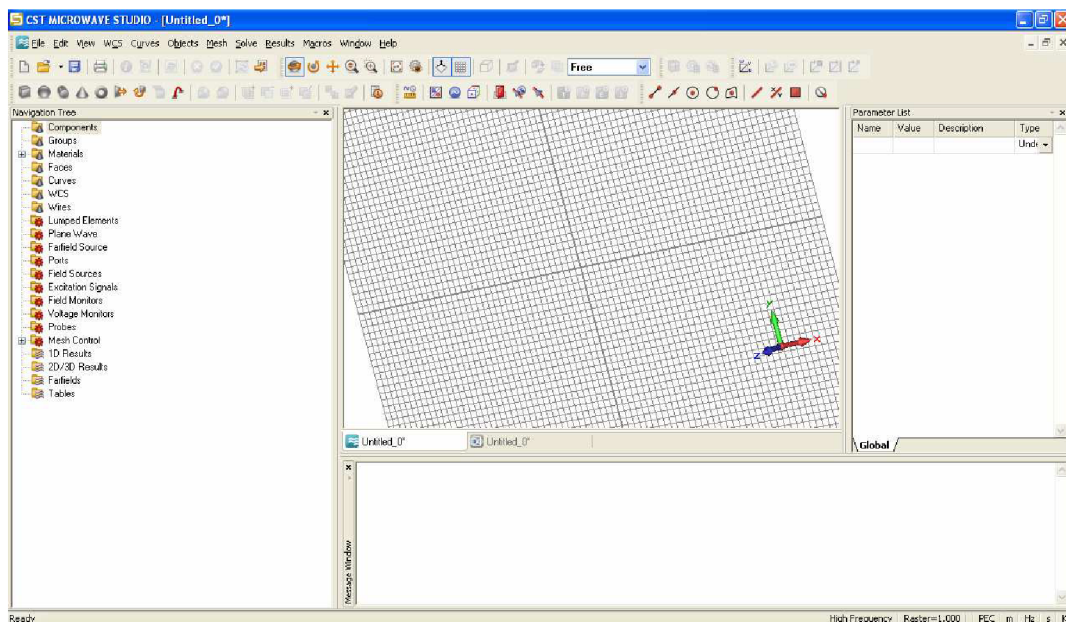
Tabulka 2.1 přehled používaných EM simulátorů (převzato z [3])

Pro potřeby simulace koaxiálních filtrů je potřeba simulátor se zabudovaným eigen mode solver. Ten umí vypočítat rezonanční kmitočty vázaných struktur, jejich Q a vazební koeficienty [8]. Rychlou metodou pro výpočet prostorového rozložení EM pole je metoda konečných prvků (FEM, *finite element method*) a metoda konečných diferencí v časové oblasti (FDTD, *finite difference time domain method*). Metodu FEM využívá Ansoft HFSS, metodu FDTD CST Microwave Studio (MWS).

Ačkoliv je dle [3] Ansoft HFSS přesnější a méně náročný na výpočetní výkon (a tím o něco rychlejší a dokonce přesnější než CST MWS), v simulátoru CST je navíc obsažen obvodový simulátor, který je nutný k optimalizaci rutinou TSM. Z toho důvodu je tato práce věnována návrhu filtrů v CST MWS.

3 NÁVRH FILTRU V CST

Struktury, ve kterých se bude počítat EM pole, vyžadují pro tyto výpočty nejenom svoje rozměry a materiál, ale je třeba znát i kmitočet, na kterém bude struktura simulována. Pro vyšší kmitočty bude struktura rozdělena do více prvků a tím bude zabírat i více místa v operační paměti počítače. Důležité jsou taky jednotky rozměru, zda se bude počítat v metrech, milimetrech a podobně. To vše je nutné zadat nejlépe před samotným návrhem, pak je práce díky definici jednotky jednodušší. Bude-li se počítat odezva filtru na jednotkový impuls, je potřeb ataky definovat časovou jednotku. To vše se zadává v programové nabídce Solve a položce Set Units, počáteční a koncová frekvence v položce Frequency range. Materiál se přiřazuje objektu z nabídky Properties jeho kontextového menu v navigačním stromě (obr 3.1).



Obrázek 3.1 Prostředí CST

Tvorba struktur probíhá v 3D, jedná se o tří-dimenzní kartézský souřadnicový systém. Tvorba sestává z vybrání jednoduchého prvku (koule, čtverec, kužel, atd.) a jeho úpravy do požadovaného tvaru v nabídce Objects. Velice důležité je tvořit všechno parametricky, tzn. zadávat hodnoty názvem proměnné. Díky tomu lze během návrhu měnit proporce jednoduchou změnou proměnné v seznamu parametrů. Jednoduché prvky je pak třeba různě pospojovat a ořezat, což se děje přes programovou nabídku Objects a položku Boolean. Hrany rezonátoru se oříznou vybráním hrany pomůckou Select edge a následným zaoblením skrz nabídku Blend edge taktéž z Objects. Je-li struktura hotova, lze ji nakopírovat pomůckou Transform. Takto zkopírované struktury jsou svázané parametry, dědí je.

Navázání vloženým středem koaxiálního vedení je asi nejproblematictější část. Vytvořený „drát“ je potřeba ohnout a v místě ohybu vytvořit koleno o předem

definovaném rádiusu. Je potřeba napřed definovat hranu, kolem které se bude koleno točit. Použitím nástroje Edge from coordinates se definuje ona hrana. Nejjednodušší způsob je zadat ji parametricky. Je třeba pamatovat na směr, kterým je navržena. Platí zde pravidlo pravé ruky, kde na palci je vybraná plocha, ukazováček ukazuje směr nakreslené hrany (z bodu 1 do bodu 2) a prostředníček směr točení. Vytvořením se hrana i vybere Jakmile je hrana vybraná, postačí vybrat plochu, ze které bude koleno taženo, kliknutím na pomůcku Pick face. Následně postačí vyplnit parametry a ohyb je zhotoven.

Tento postup je nejvíce zdlouhavý na celém návrhu. Nemluvě o potřebě různě parametricky manipulovat se strukturou. Bude-li se například muset koleno otáčet na jinou stranu, nelze pouze změnit parametr úhlu, ale musí se celá struktura na něm závislá navrhnout znovu.

Vytvoření terčíku je o něco jednodušší. Postačí vložit na „drát“ další válec a ten na stranách zaoblit pomůckou Blend edge.

Mezi dvěma strukturami je vhodné vytvořit vazbu. Bude-li potřeba struktura o více jak dvou dutinách, což se stane skoro ve všech případech, má CST přichystané překvapení pro uživatele v podobě zmíněné dědičnosti, která nejde zrušit. To je problém zejména při kopírování složitě vytvořených částí, u kterých uživatel strávil až desítky minut. Vazbu je tedy potřeba navrhnout a nakreslit znovu. Časová náročnost takto vytvořených struktur a filtru značně roste s počtem vazeb.

Dalším mezníkem je používání historie návrhu. CST si pamatuje jakoukoli operaci a ukládá si ji do seznamu historie – History list. Neuváženým smazáním, kombinováním a měněním tohoto seznamu si lze udělat z návrhu noční můru.

Tímto popisem je jasné, že pro potřeby návrhu a optimalizace struktury, je potřeba pomůcka. CST nabízí možnost ulehčení těchto prací pomocí vestavěného Visual Basic prostředí, ve kterém lze navrhnout automatizaci procesu návrhu.

Zkušenému uživateli tvorba jednoho filtru obsahujícího 7 dutin trvá 8 hodin. Bude-li potřeba filtr jenom o jednu dutinu menší nebo větší, mění se jeho parametry a musí se překreslit znovu. Makra umožňují snížit dobu návrhu do jednotek minut. Uživatel pouze vybere typ rezonátoru a vazeb, zadá potřebné parametry a má model filtru připravený k simulaci. Makra poskytují také pomocné modely pro optimalizaci pomocí TSM. Výsledné modely jsou připravené pro parametrickou analýzu.

Prostředky toto umožňující jsou shrnuty do knihovny koaxiálních filtrů. V této knihovně je obsažen mocný nástroj pro postihnutí širokých možností topologie a tím i vazeb.

4 KNIHOVNA KOAXIÁLNÍCH REZONÁTORŮ

Modely dutinových rezonátorů jsou vytvořeny ve formě maker. Makra jsou psána v jazyku Visual Basic. Velikost okna maker je do 1280 na 800 pixelů. Uživatel zadá hodnoty proporcí rezonátorů, z nichž je filtr složen, a program je vykreslí. Neméně důležitým účelem je poskytnutí takto vytvořených modelů k parametrické analýze. To se děje skrz parametry vkládané do seznamu parametrů. Propočítávají také vzdálenosti různých částí a tak lze postihnout výše zmíněné zahnutí vazebního prvku. Vykreslené makro lze zpřístupnit skrz seznam historie. Zde je řádek po řádku makro zkopírováno a uživatel může řádky upravit dle svého uvážení. Makra se starají o vykreslování nulových velikostí, tzn. že opakováním procesu skrz historie nenastane žádný problém s hlášením nulových hodnot pro vykreslované objekty.

Rezonátory jsou zde vytvořeny v těchto tvarech:

- hladký – Straight resonator
- klobouk – Hat resonator
- hřib - Mushroom resonator

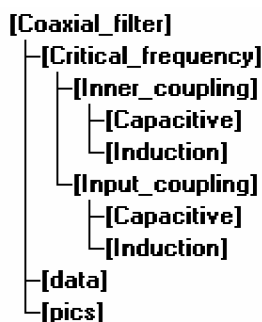
Modely navazujících prvků:

- Induktivní navázání smyčkou, přímá vazba – input inductive
- Kapacitní navázání terčíkem – input capacitive

Modely vazebních prvků mezi rezonátory:

- Vnitřní vazba okénkem a hranolkem – inner inductive
- Vnitřní vazba kapacitní sondou – inner capacitive

Cesta k makrům se nachází v adresáři, kde je nainstalováno CST, v podadresáři `library\macros\coaxial_filter`; viz **obr. 4.1**. Uživatel je musí ručně nakopírovat před spuštěním CST, a nebo v nástrojové liště CST MWS v položce Macros vyvolá nabídku Set global library paths. Zde postačí vybrat adresář s makry, kliknout na tlačítko OK a makra jsou připravena k použití.



Obrázek 4.1: Adresáře maker

Obsah jednotlivých adresářů:

- data;
 - alfy; textový soubor s názvy materiálů a jejich teplotním koeficientem. Lichý řádek je název materiálu a sudý řádek hodnota.
 - uložené poslední hodnoty ve tvaru tvar rezonátoru_typ makra
- pics; obrázky se schémata ve formátu BMP. Tvar souborů je tvar rezonátoru_typ makra
- Critical_frequency a jeho podadresáře obsahují makra modelů hladky.mcs, klob.mcs a hrib.mcs

tvar rezonátoru hladky, klob, hrib

typ makra „o“ pro vazbu vnitřní induktivní
 „t“ pro vazbu vnitřní kapacitní
 „d“ pro navázání induktivní
 „k“ pro navázání kapacitní

Makra pro teplotní modely nemají přívlástek.

Volání maker probíhá přes programovou nabídku Macros. Zde jsou makra pod položkou *coaxial_filter* k dispozici.

Globálně jsou nastaveny jednotky pro frekvenci v megahertzích – Mhz, teplota je ve stupních Celsia – °C, čas v pikosekundách – ps a měřítko velikosti v milimetrech – mm. Hodnoty pro úhly ohybu se zadávají ve stupních a hodnoty teplotní roztažnosti odporu v miliontinách Ω – ppm.

Makra vyprodukují komponentu s názvem typu rezonátoru a typu makra. Komponenty bez přívlástku jsou pro teplotní makra. Tyto komponenty sdružují jednotlivé části modelu, se kterými lze manipulovat. Popsány jsou detailně v sekcích maker.

Potvrzením makra se stávající komponenta vytvořená týmž makrem nahradí nově vytvořenou. Spuštěním každého makra se upraví průhlednost materiálu vakua na hodnotu 45.

Nulové hodnoty proměnných se nedoporučují. Až na výjimky, popsané níže, vyvolá CST výstražnou zprávu a makro se zastaví. To samé platí pro hodnoty záporné.

V adresáři *data* se nachází hodnoty uložené z posledního provedeného makra. Při každém potvrzení makra se hodnoty uloží. Při opětovném spuštění makra se jeho dialogové okno otevře s těmito hodnotami.

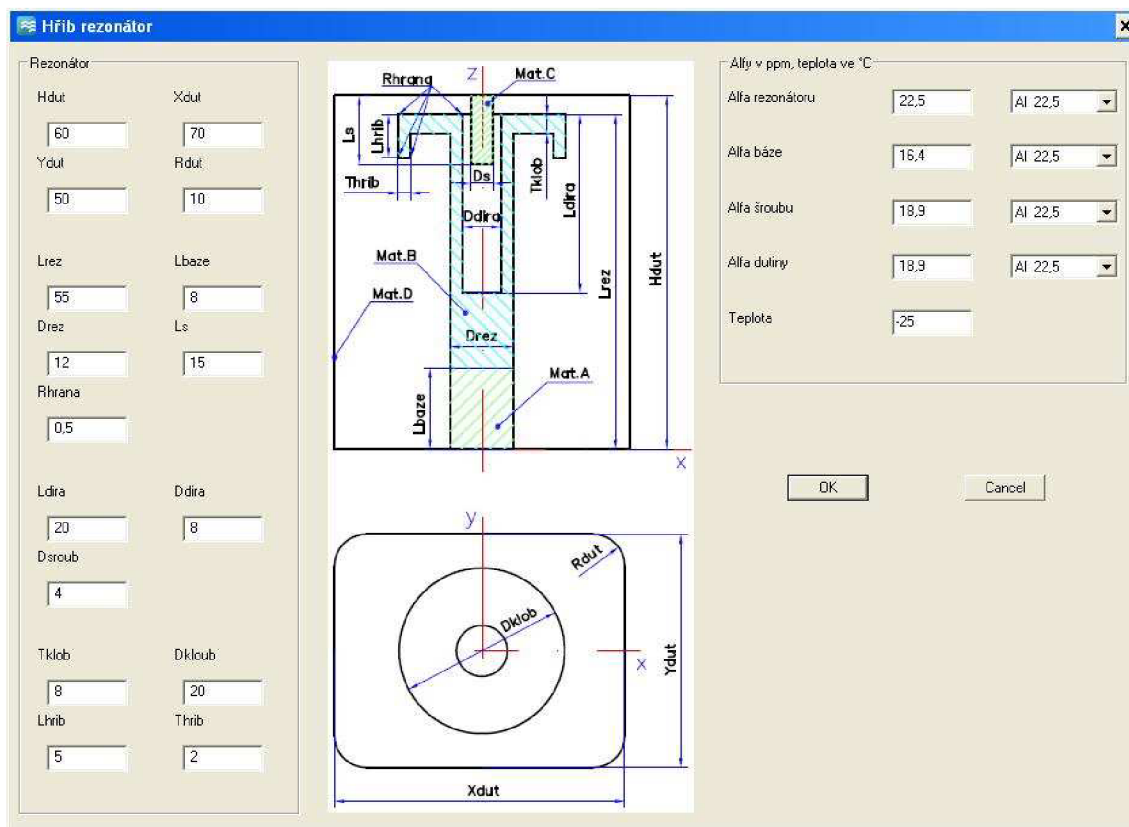
Při vytváření rezonátoru ve tvaru klobouku lze vytvořit i hladký rezonátor. To lze provést buď zadáním nulové hodnoty „Dklob“ a nebo hodnotu z „Drez“ zkopírovat do kolonky „Dklob“.

Dialogová okna maker jsou rozdělena do tří částí. Nalevo se zadávají hodnoty pro model rezonátoru, uprostřed je schéma modelu a napravo se zadávají údaje pro navazující komponenty nebo teplotní roztažnost materiálů, z kterých je rezonátor složen. Velikost dutiny lze měnit od hranatého tvaru po ryze eliptický tvar.

4.1 Teplotní modely rezonátorů

Na **obr. 4.2** je zobrazeno dialogové okno teplotně závislého rezonátoru. V části „Rezonátor“ jsou pole pro vyplnění těla rezonátoru. Část „Alfy v ppm...“ slouží pro zadání teplotní roztažnosti odporu buď zadáním do kolonky, nebo vybráním z rozbalovacího menu. Hodnota z rozbalovacího menu se přepíše do příslušné kolonky nalevo. Teplota, při níž je teplotní roztažnost nulová, je 25°C.

Komponenta je rozdělena na části baze, dutina, polstar, rezonator a sroub.



Obrázek 4.2 Dialog teplotně závislého rezonátoru

4.2 Externí navázání

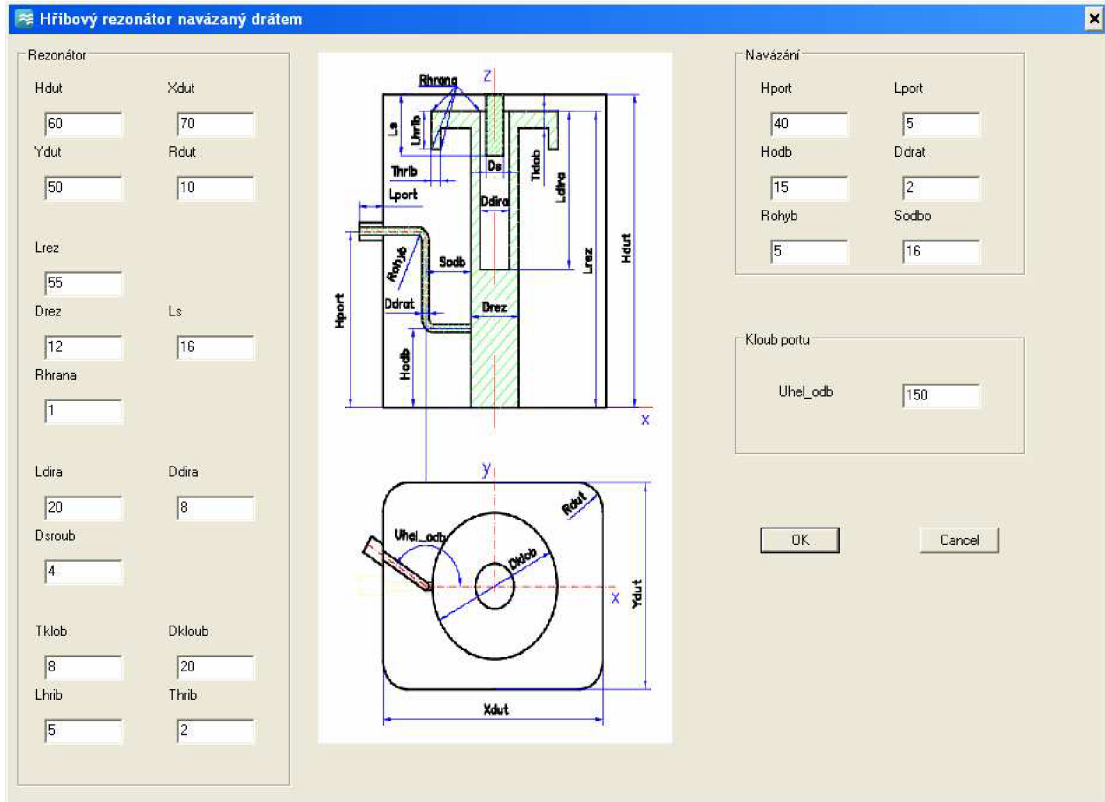
V části „Rezonátor“ jsou pole pro vyplnění těla rezonátoru. Části napravo od schématu slouží pro parametry navazujícího členu. K portu modelu je přidán port CST s názvem „port1“. Navázání je provedeno indukčně – **obr. 4.3** nebo kapacitně – **obr. 4.4**.

4.2.1 Induktivní navázání drátem

Je třeba dávat pozor na výšku H_{odb} a H_{port} , kvůli kolenům. Jsou dvě a tedy minimální rozdíl mezi H_{odb} a H_{port} je D_{drat} . Výjimkou je požadavek přímého

navázání.

Komponenta je rozdělena na části dutina, polstar, rezonátor, sroub a inwire.



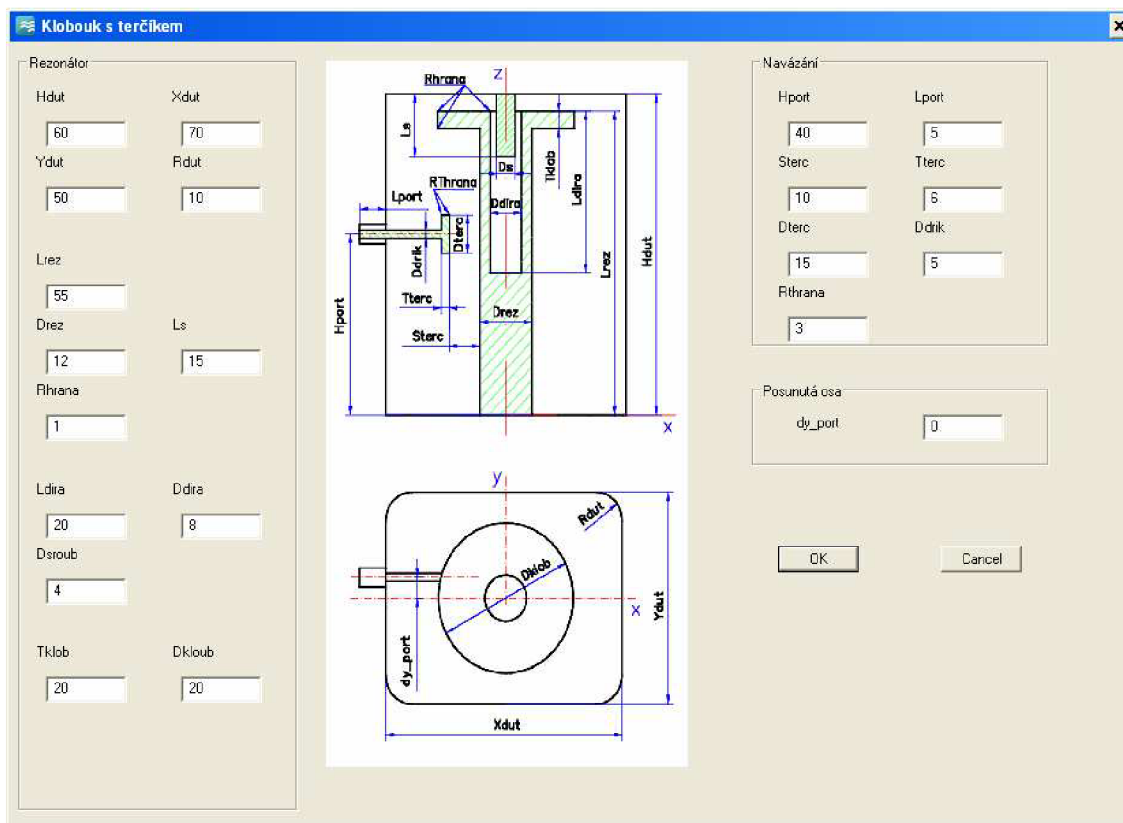
Obrázek 4.3 Dialog rezonátoru navázaného drátem

- Hport bude-li rovno nule, port se naváže z podstavy dutiny
- Hodb bude-li rovno nule, drát se naváže na podstavu dutiny
- Sodbo bude-li rovno nule, drát bude navázán, se středem ve své ose, na rezonátor s posunutím v ose y velikostí $\sin(Uhel_odb) * Drez / 2$
- Uhel_od úhel v jednotkách stupňů se zadává v intervalu $\pm <90^\circ; 270^\circ >$
- Rohyb rádius se zadává jako velikost úsečky nad níž bude kruhový ohyb. V případě kolmého úhlu drátu se jedná o poloměr jeho tloušťky.
- Je-li potřeba přímé navázání bez kolen, stačí zadat Sodbo= 0 nebo Hport= Hodb.

Po potvrzení se může vyskytnout varovné hlášení: "Moc velký nebo malý úhel drátu. Interval je +/-<90;270>", tím bude úhel nastaven automaticky na 90 stupňů.

4.2.2 Kapacitní navázání terčíkem

Komponenta je rozdělena na části dutina, polstar, rezonátor, sroub, inwire a terc.



Obrázek 4.4 Dialog rezonátoru navázaného terčíkem

K odstranění terčiku slouží proměnná Tterc nebo Dterc zadané následujícími parametry:

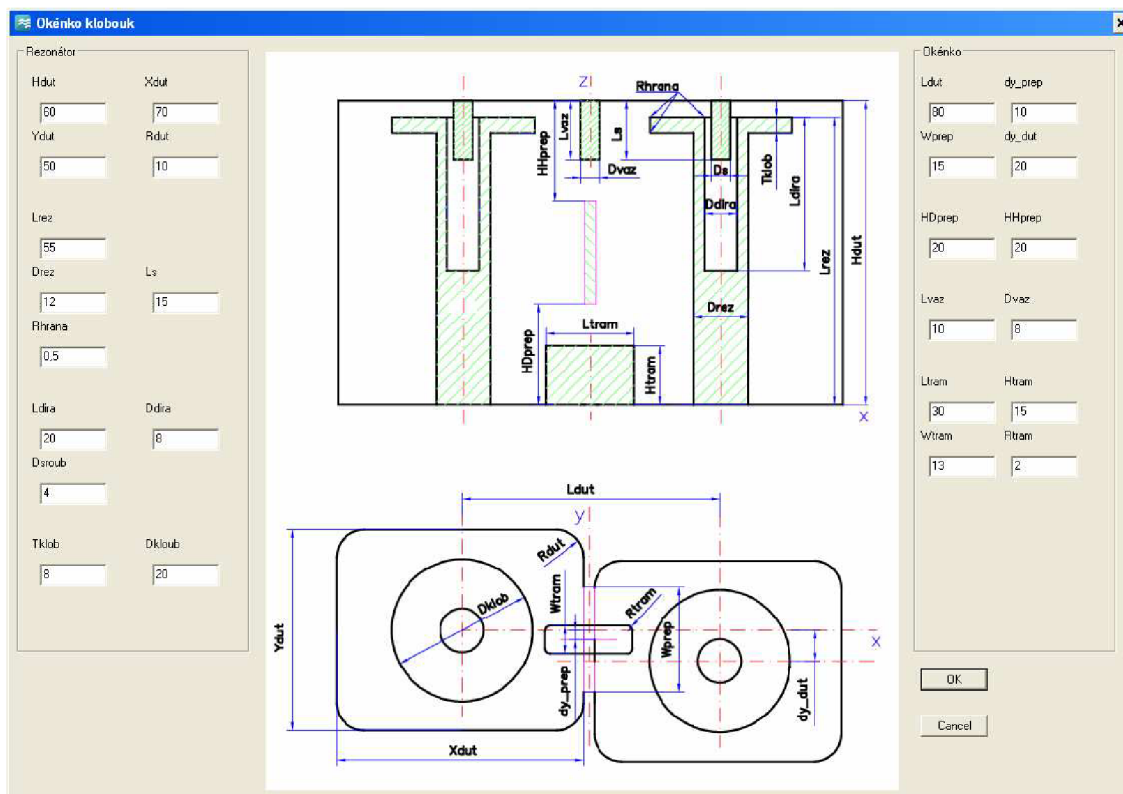
- Tterc bude-li rovno nule, zaoblí se vnější hrana dříku směrem k rezonátoru
- Dterc bude-li menší nebo rovno Ddřik, Tterc bude roven 0 a zaoblí se jenom vnější hrana dříku směrem k rezonátoru.

4.3 Interní vazba

V části „Rezonátor“ jsou pole pro vyplnění těla rezonátoru. Části napravo od schématu slouží pro objekty spojující dutiny. Vazba je opět induktivní **obr 4.5** nebo kapacitní **obr 4.6**. V návrhu vazeb jsou oba rezonátory totožné.

4.3.1 Induktivní interní vazba okénkem

Komponenta je rozdělena na části dutina, polstar, polstar_1, rezonator, rezonator_1, sroub, sroub_1, spodni_kostka, vrchni_kostka. Část vrchni_kostka je vazební šroub snižující elektrickou vazbu a část spodni_kostka je kovový hranolek-trámeček snižující vazbu magnetickou. Tato vazba postihuje široké možnosti svázání. Lze ji použít pro tvorbu jednoho vrchního okénka, spodního okénka nebo přidáním hranolku. Kombinace lze různě kombinovat.

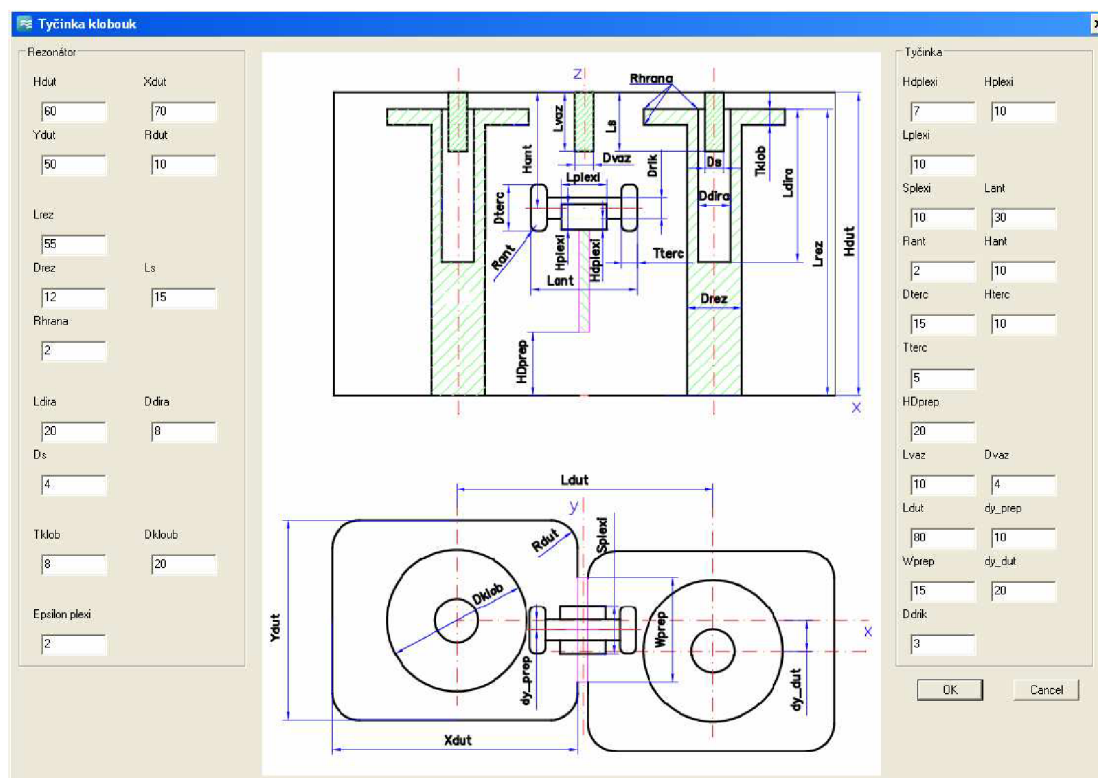


Obrázek 4.5: Dialog rezonátorů svázaných okénkem

Pro zrušení trámku postačí zadat 0 pro jednu z proměnných: Wprep, Ltram, Htram. Zrušení přepážek se provede zadáním 0 do HHprep a HDprep.

4.3.2 Kapacitní interní vazba tyčinkou

V části „Rezonátor“ je proměnná „Epsilon“, do které se zadává relativní permitivita plexiskla nesoucí dřík s terčíkem. Komponenta je rozdělena na části dutina, polstar, polstar_1, rezonátor, rezonator_1, sroub, sroub_1, vrchni_kostka, tyčinka a plexi.



Obrázek 4.6: Dialog rezonátorů svázaných terčíkem

Zrušení přepážek se provede zadáním 0 do HHprep a HDprep. K odstranění terčiku slouží proměnná Tterc nebo Dterc a lze je zadat následujícím způsobem:

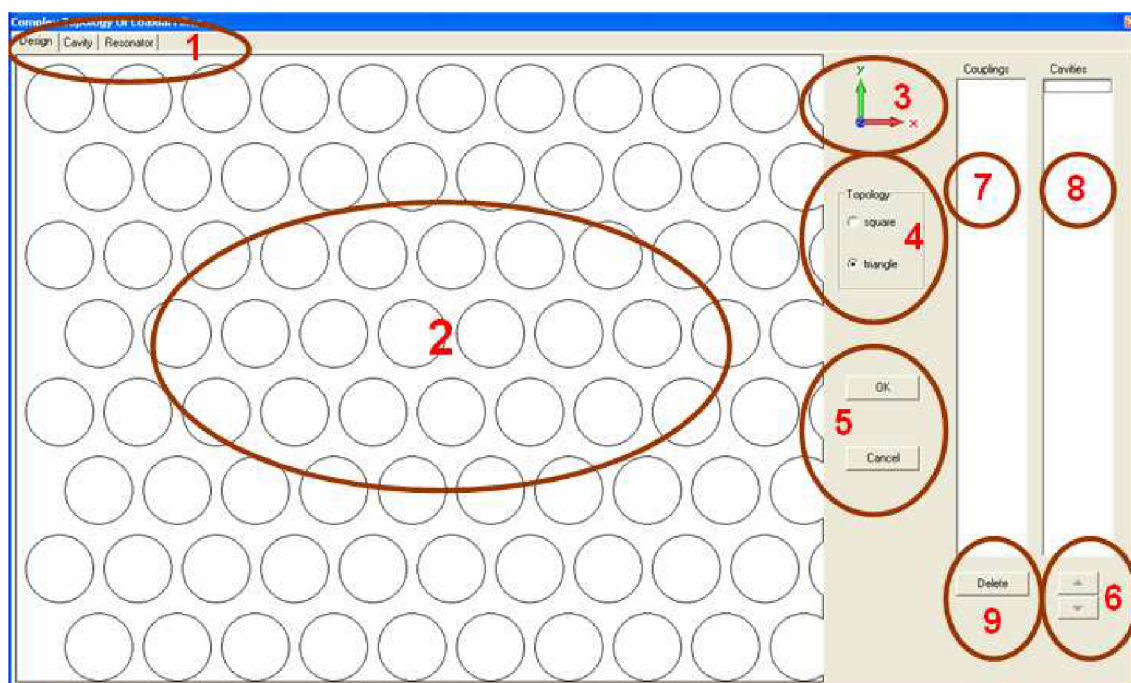
- Tterc bude-li rovno nule, zaoblí se vnější hrana dříku směrem k rezonátoru
- Dterc bude-li menší nebo rovno Ddrik, Tterc bude roven 0 a zaoblí se jenom vnější hrana dříku směrem k rezonátoru.

5 TVORBA KOMPLEXNÍCH STRUKTUR

Návrh a úprava struktury se provádí spuštěním makra Topology. Obslužné makro nejprve spustí program cavity.exe a posléze vykreslí a načte veškeré parametry a struktury v tomto programu zadané. Program byl tvořen z důvodu absence uživatelsky přijatelného rozhraní maker-dialogů, skrz které uživatel komunikuje s CST. Počínaje spuštěním a dokončením jakéhokoli makra konče není možno do CST přistupovat. Program je napsán v jazyce Object Pascal pro aplikační prostředí win32 (tvořen pod Windows XP SP3 česká verze) a je volán z maker.

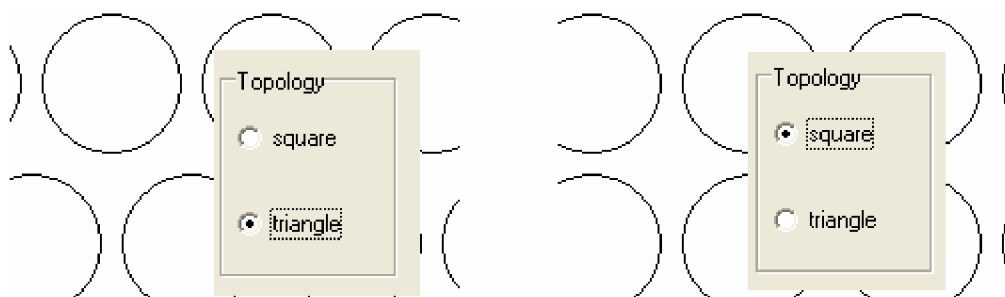
5.1 Ovládání programu

Spuštěním makra se objeví okno programu s následujícím uspořádáním (**obr. 5.1**). Dále je třeba podotknout, že program nehlídá, co uživatel zadá. Veškeré parametry a návrhy vykresleny tak, jak jsou nadefinovány.



Obrázek 5.1 Uspořádání programu a záložka *Design*

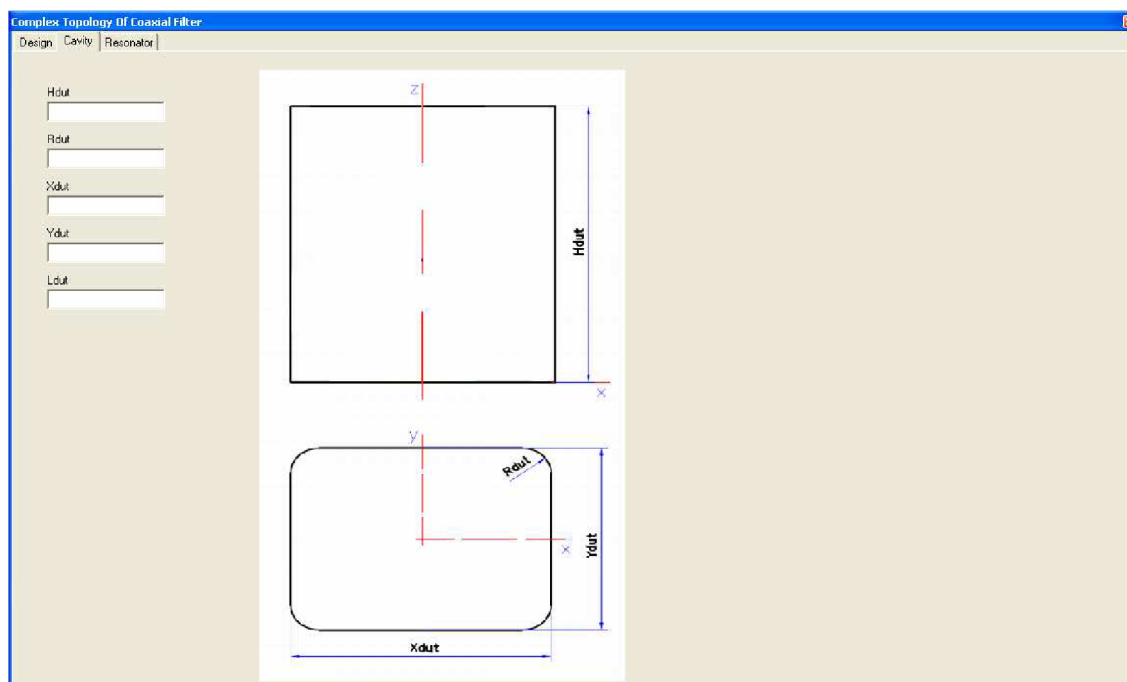
Základním prvkem návrhu je pracovní prostor, který sestává z černých kruhů (2). Tuto topologii kruhů lze měnit během návrhu na čtvercovou nebo do tvaru rovnoramenného trojúhelníku (**obr. 5.2**). To vše lze provést vybráním typu topologie v kolonce Topology (4).



Obrázek 5.2 Změna topologie

Následný návrh se překreslí do CST MWS pracovního prostoru dle orientace os (3). Tato orientace je totožná jak v CST MWS tak v programu, uživatel má tedy stejnou perspektivu při návrhu v CST MWS i programu. Polohu pracovní plochy lze považovat v ose Z rovnou nule a vektorem kolmo vzhůru. V seznamu označeném (7) se uchovávají vazby mezi dutinami a v seznamu (8) souřadnice jednotlivých dutin. Pomocí šipek (6) lze měnit číslování dutin. Tlačítkem Delete (9) se maže vybraná vazba. Nastavení dutiny a rezonátoru lze provést kliknutím na patřičnou záložku v nástrojové liště (1).

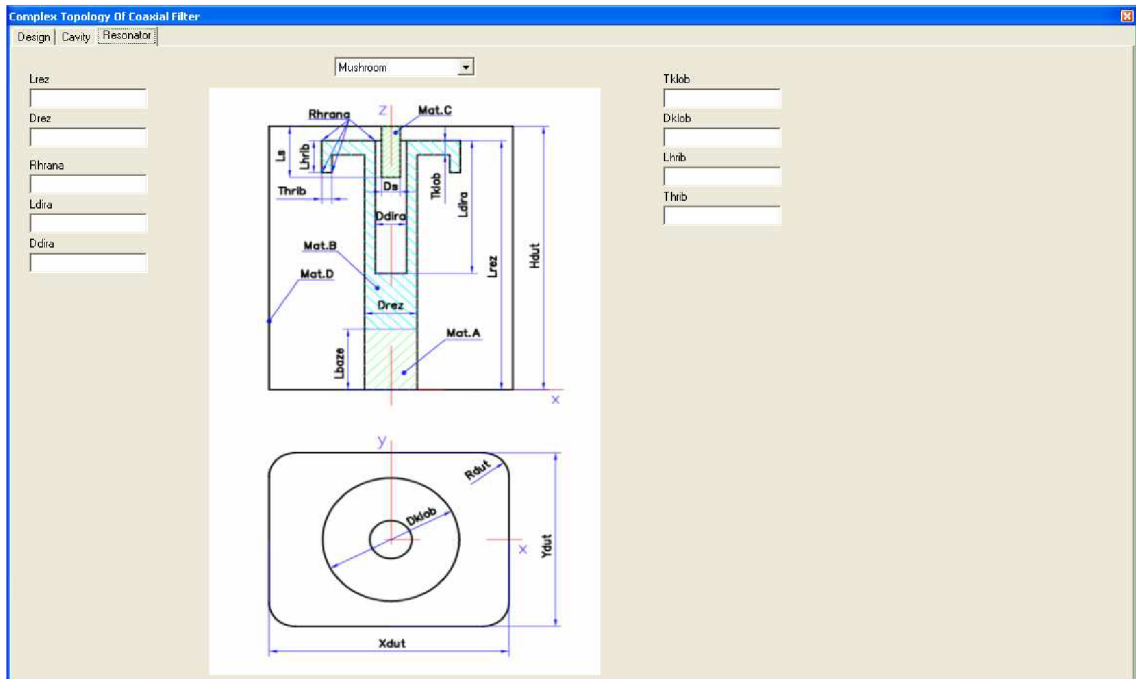
Záložka Cavity (**obr 5.3**) v sobě skrývá políčka pro určení parametrů dutiny a náskres, ve kterém jsou tyto parametry definovány. Lze tedy přehledně vidět, jak který parametr ovlivňuje dutinu.



Obrázek 5.3 Záložka Cavity

Poslední záložka (**obr 5.4**) určuje typ a tvar rezonátoru. Je zde obsažena roletka, ve které je možno vybrat typ rezonátoru. Dle vybrání se zobrazí i patřičný náskres. Různé

parametry náležejí různému typu rezonátoru. Z toho důvodu se některé parametry po pravé straně vyřadí. Nelze tedy do nich zadávat hodnoty a tento stav je indikován zašedlým políčkem.



Obrázek 5.4 Záložka Resonator

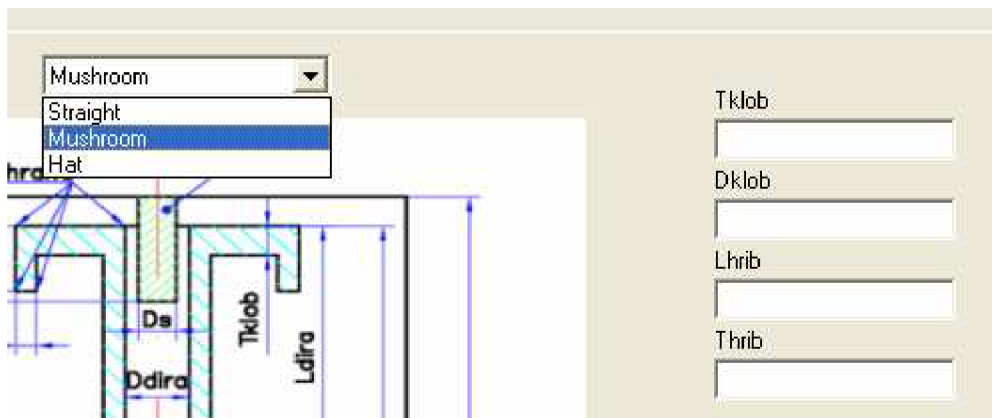
Program cavity.exe spolu s makrem Topology.mcs je uložen v adresáři coaxial_filter. Potřebnou komponentou je i knihovna smoothC.bas uložená v tomtéž adresáři. Pro komunikaci mezi programem a CST je používán soubor cavity, vkládaný do téhož adresáře. Ten obsahuje veškeré informace o filtru v textové formě a je mazán pokud:

- a) program byl ukončen tlačítkem Cancel;
- b) makro provedlo veškeré operace úspěšně.

Z toho plyne mít dostatečná oprávnění pro zápis souborů do adresáře coaxial_filter i s podadresáři. Dále se v adresáři data ukládají informace o posledním průběhu tvorby filtru pod souborem cavity.ini. Jedná se o textové informace o rezonátoru, dutině a vazbách. Z toho plyne uložení veškerých zadaných parametrů pro tyto struktury a jejich následné užití při dalším spuštění makra.

5.2 Návrh filtru

Na začátku všeho je potřeba definovat samotný rezonátor. Pro celou topologii filtru je použit pouze jeden typ v jedné dutině. Vstoupí se tedy do záložky Resonator a zde se vybere typ rezonátoru (**obr. 5.5**). Vybráním se změní náhled a vyřadí/povolí parametry napravo. Nepoužitelné parametry tedy zešednou, a nelze do nich nic zapisovat.

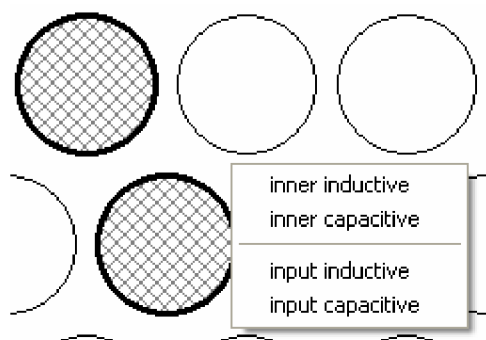


Obrázek 5.5 Vybrání typu rezonátoru

Veškeré parametry se zadávají podobně jako v prostředí CST. Je-li například proměnná *prom* definovaná v globálních parametrech (je zobrazena v seznamu parametrů), může se napsat do kolonky výraz typu: „3+*prom*“. Lze tak zapsat jakoukoli matematickou formuli, která je podporována CST a lze ji užít pro práci s globálními parametry. Naopak nelze zapsat neznámou proměnnou a čekat, že se zobrazí dialogové okno, jenž poslouží pro zadání její hodnoty. Veškeré parametry se musí vyplnit, v opačném případě CST zobrazí varovnou hlášku.

V dalším kroku je třeba nadefinovat dutinu. To se provede v záložce Cavity. Parametry se zapíší do příslušných kolonek. Je zde taky důležitý parametr *Ldut*, což je vzdálenost mezi dutinami.

Na konci toho řetězce je samotná definice filtru a jeho topologie. To se provádí v záložce Design. Dopředu je třeba vědět, kde začít, protože prostor pro práci je ohraničen maximální velikostí 10 dutin v horizontálním a 8 dutin ve vertikálním směru. Pro pořádek 10 v ose *x* a 8 v ose *y* tedy pro filtr s 78 dutinami a vstupním/výstupním navázáním. Tvorba filtru se započne výběrem kruhu, ve kterém zamýšlený rezonátor s dutinou bude. Vybraný kruh se zobrazí vyšrafovaný šedou barvou. Pro potřeby určení vazby je potřeba kruhy vybrat dva (**obr. 5.6**). Pokud se vybere tentýž kruh, ukáže se hláška v seznamu vazeb. Vybráním dvou kruhů alias dutin, zobrazí se kontextová nabídka s nabídkou interních a navazujících vazeb (**obr. 5.6**).

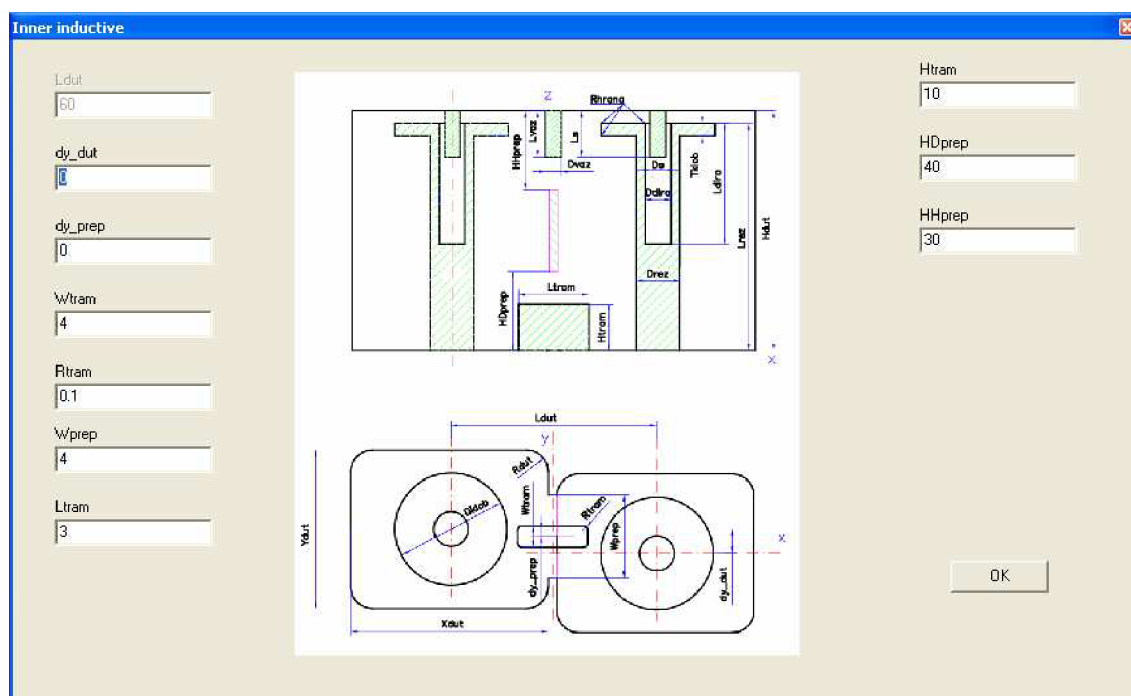


Obrázek 5.6 Výběr dutin a vazby

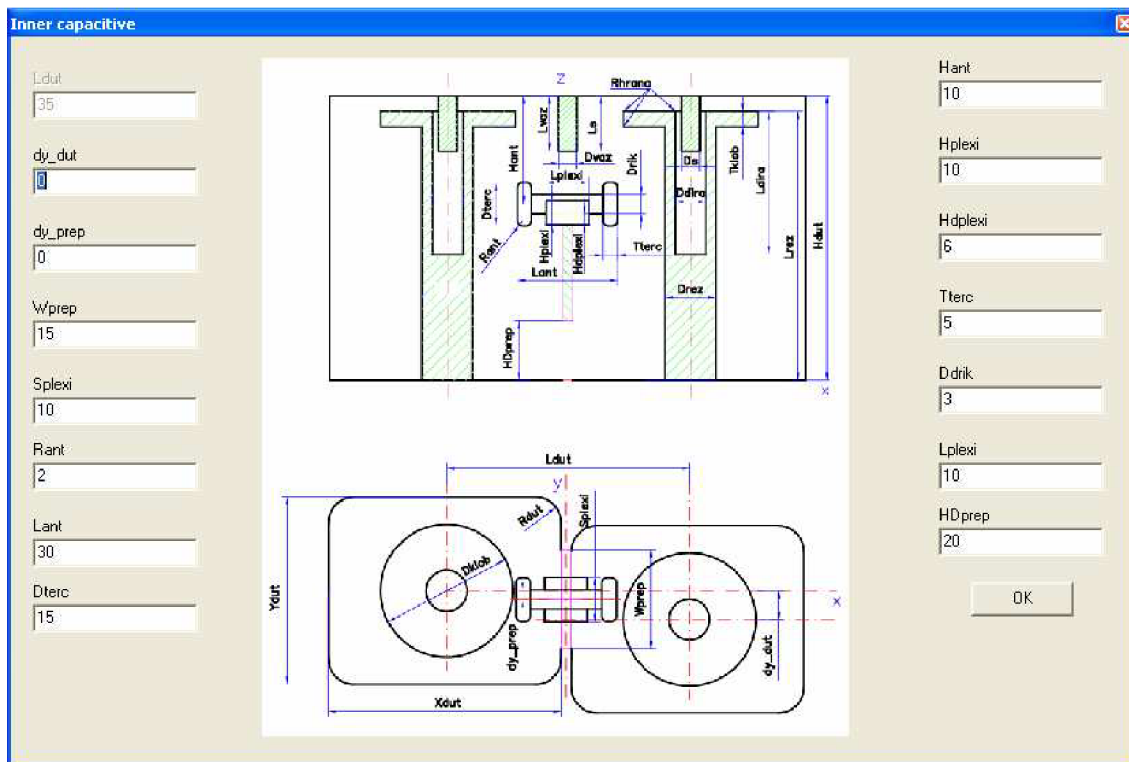
Vybráním vazby se otevře okno k ní příslušné. Dělení vazeb je následující:

- vnitřní
 - indukční – inner inductive (**obr 5.7**)
 - kapacitní – inner capacitive (**obr 5.8**)
- vnější
 - indukční – input inductive (**obr 5.9**)
 - kapacitní – input capacitive (**obr 5.10**)

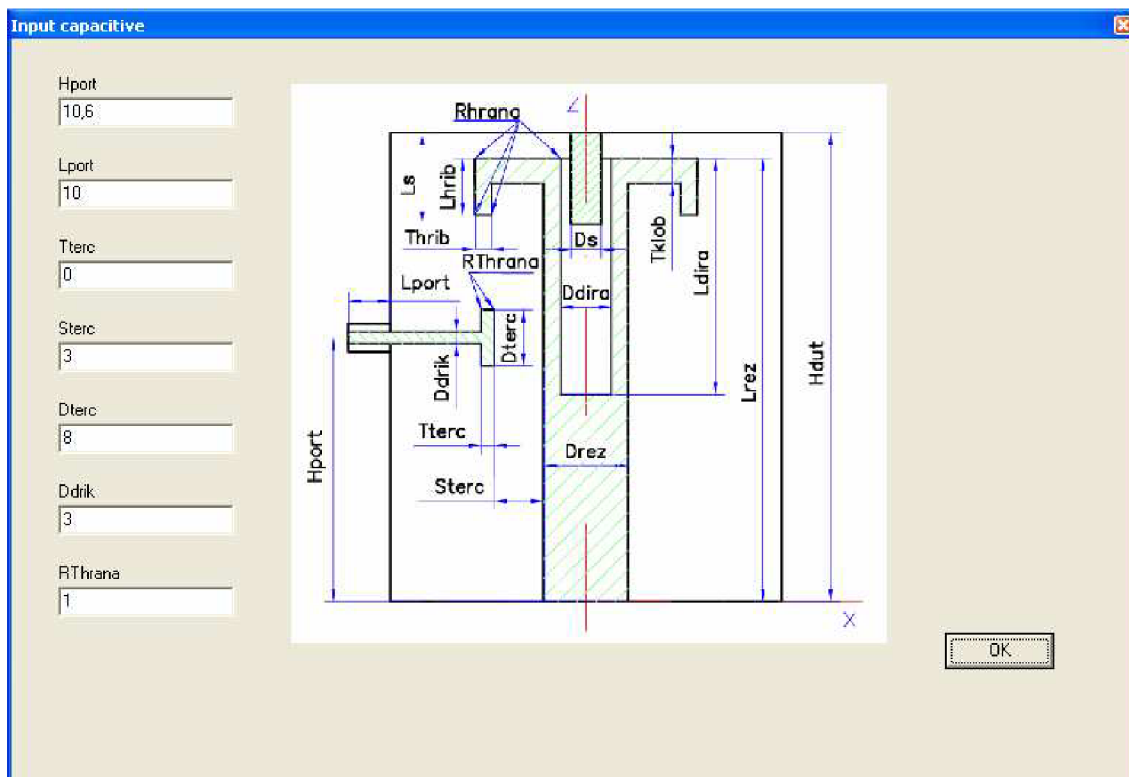
V parametrech se objevuje parametr L_{dut} , který je zde orientačně. Hodnota se může měnit v záložce Cavity a je stejná pro celý filtr. Dutiny mezi středy jsou od sebe vzdáleny stejně.



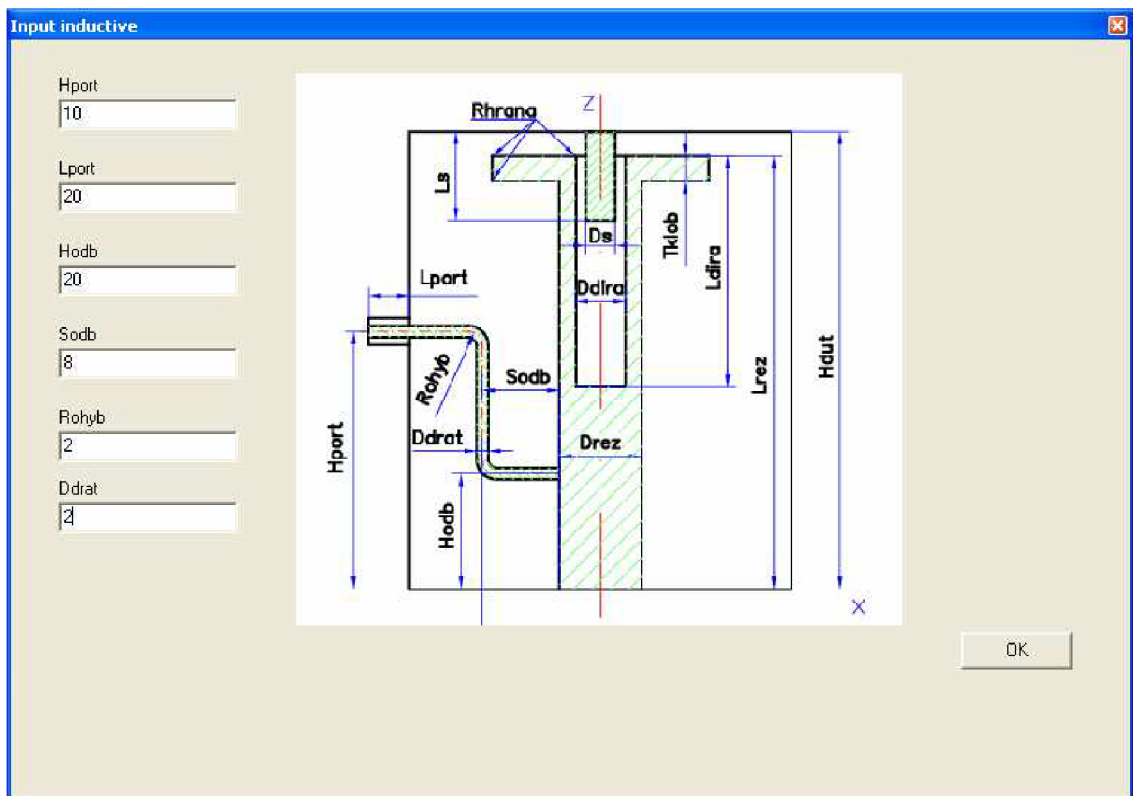
Obrázek 5.7 Vnitřní indukční vazba



Obrázek 5.8 Vnitřní kapacitní vazba

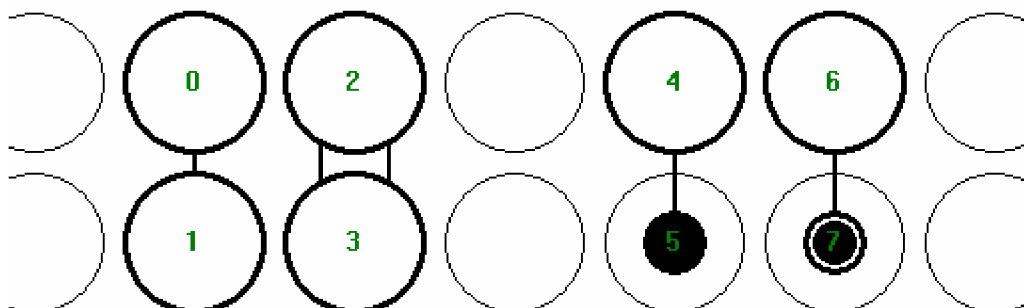


Obrázek 5.9 Vnější navázání kapacitou



Obrázek 5.10 Vnější navázání indukci

Veškeré vazby mají stejné vlastnosti jako vazby popsané v oddíle 4. Přijetí parametrů pro vazbu je třeba odsouhlasit tlačítkem OK v pravé dolní části. Parametry vazby a dutin, tedy jejich pozic, se vloží do seznamů napravo od pracovního prostoru. Dále je vazba znázorněna v pracovním prostoru dle svého typu buď jako jedna čára (indukční) a nebo jako dvě čáry (kapacitní) (**obr. 5.11**). Podobně je znázorněno i navázání, to je část, kde se nachází port CST do struktury. Indukční navázání je jeden plný černý kruh a kapacitní sestává z jednoho kruhu, kolem něhož je kružnice (**obr. 5.11**). Pro přehlednost, dvě čáry znamenají kapacitu, jedna čára znamená indukci.

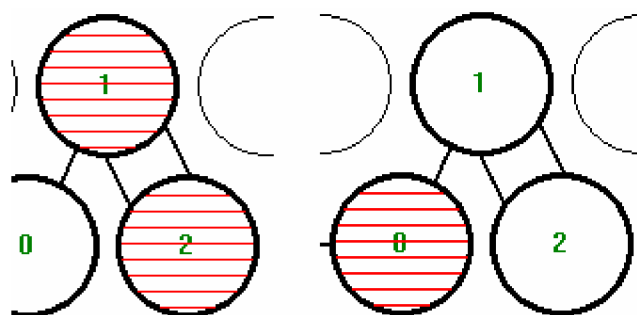


Obrázek 5.11 Znázornění vazeb v pracovním prostoru

Specifikum pro vstupní navázání je takové, že tvorba probíhá tažením vazby ven ze struktury. První je třeba označit dutinu, do které bude dáno navázání, a teprve posléze lze vybrat místo, kde bude port. Toho se dá využít právě pro natočení portu, protože ten je vždy na dutině rezonátoru. Veškeré polohy vazeb, jak jsou vidět na pracovní ploše, budou i ve skutečnosti v prostředí CST.

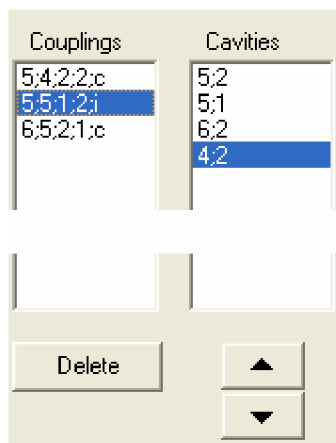
Vytvořené vazby, respektive souřadnice dutin z nich vytvořených v pořadí x_1 , x_2 , y_1 , y_2 , v , lze vidět v levém seznamu (**obr. 5.13**). Zde x_1 a y_1 jsou souřadnice první dutiny, x_2 a y_2 souřadnice druhé dutiny, v značí vazbu i-induktivní a c-kapacitní. Veškeré dutiny použité k tvorbě vazeb jsou uloženy v seznamu napravo se svými souřadnicemi x , y (**obr. 5.13**). Díky takto rozdělenému seznamu vazeb a dutin je snadné upravovat návrh filtru. Úpravami se rozumí změna čísla dutiny a mazání vazeb.

Označením vazby v seznamu se vazba (propojené dutiny) označí v pracovním prostoru horizontálním šrafováním červené barvy (**obr. 5.12**). Takto vybranou vazbu lze odstranit tlačítkem smaž pod seznamem (**obr. 5.12**). Nebudou-li na dutiny určující vazbu navázány další dutiny, tyto dutiny budou smazány také. Smazáním dutin se resetuje číslování. To je potřeba u mazání uvážit a zkontrolovat, popřípadě provést úpravy.



Obrázek 5.12 Označení vazby nebo dutiny ze seznamu

Změna čísla dutiny se provádí označením dutiny v seznamu a posunutím tlačítkem šipky nahoru nebo dolů (**obr. 5.13**). Dutina si vymění místo v seznamu o jednu pozici a tím i svoje číslo. Číslování dutin začíná od nuly a změna se provede okamžitým překreslením dutin.



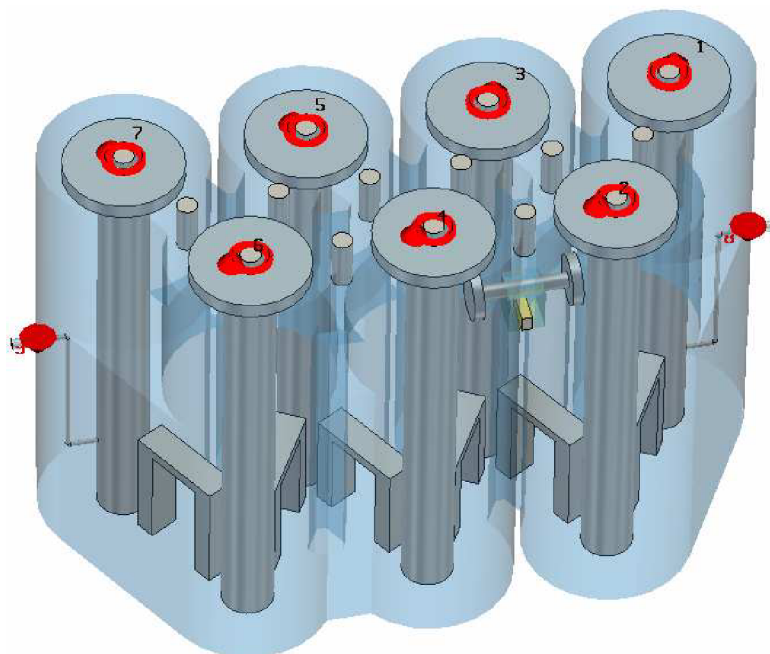
Obrázek 5.13 Seznamy vazeb (vlevo) a dutin (vpravo)

Zelená čísla v kruzích jsou potřebné označení pro vazby. Jelikož se nadále z modelu budou využívat parametrické proměnné pro optimalizaci, je potřeba tyto parametry označit. Parametr vazebního členu tedy bude navíc doplněn o informaci, mezi kterými dutinami se nachází; například HDprep_1_2.

6 MODELÝ FILTRŮ

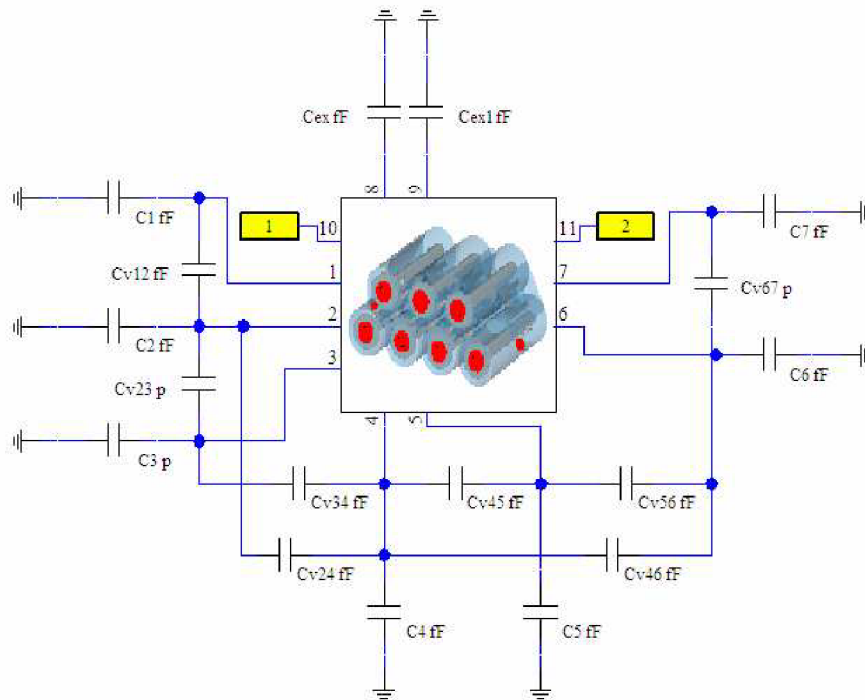
Makro díky programu vykreslí navržený filtr do CST MWS i CST DS. Příkladem budiž sedmi-stupňový filtr (**obr. 6.1**). Jednotlivé komponenty jsou pojmenovány dle volného jména, které samotné CST uvádí. Pojmenování je tedy component1, component2, ..atd. Jelikož se počítá s tím, že filtr bude i samotným projektem, není vhodné vykreslovat jiné uživatelem definované struktury skrz globální parametry, které by mohly mít shodné názvy s parametry obsažené v definovaném filtru. Na vstupy a ladící kolíky filtru jednotlivých rezonátorů je navázán diskretní port. Je tažen skrz celý objem dílčí komponenty polstar a navazujících dutin, které znázorňují přípojný konektor. Na vstup i výstup filtru je připojen normální port. Diskretní porty na vstupech jsou zde pro optimalizaci vstupního navázání. Na velikosti diskretního portu na vstupu a výstupu nezáleží, tj. může se stát že bude překrývat tělo rezonátoru a být různě natočen. Tyto porty jsou zde jen pro upřesnění vazeb v CST DS a jsou tvořeny jako poslední, mají nejvyšší čísla. Makra také vkládají materiál s názvem plexi, má zelenou barvu a hodnotu permitivity zadanou uživatelem. Upravuje taky průhlednost materiálu vacuum. Jednotky jsou měněny dle předpisu v oddíle 4. Parametry jsou pojmenovány dle komponenty, místem kam se váže a názvem parametru, například component1_2_Wtram. Parametry jsou tak od sebe odlišeny a je zřejmé kam patří.

První vykreslená komponenta (je-li vytvořen nový projekt, jedná se o component1) obsahuje část cavity, která spojuje dohromady veškerý volný prostor, tedy vacuum. Část cavity je sloučena dohromady ořezáním, tj. vazby na dutiny přiléhají. Uděláno je tak z důvodu špatného meshování při úplném spojení všech vazeb i dutin do jednoho celku cavity.



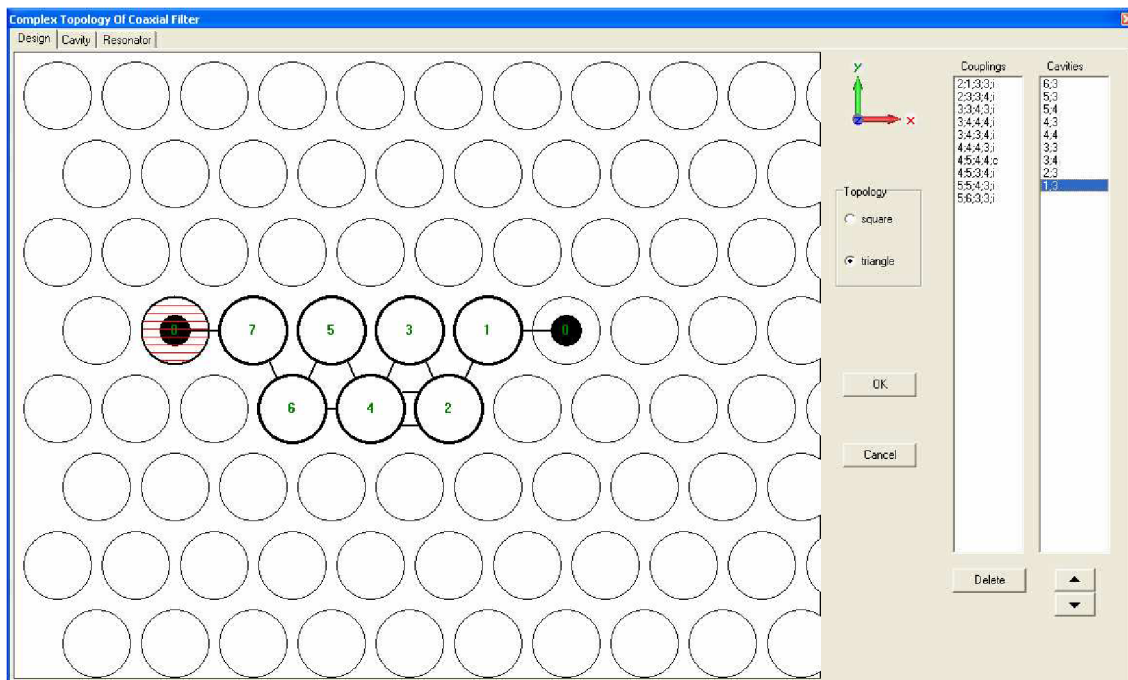
Obrázek 6.1 Navržený sedmistupňový filtr

Díky portům je schopno CST DS propojit rezonátory ladící kapacitou a vytvořit tak prostor pro optimalizaci filtru. Hrubý model pro optimalizaci v CST DS je vidět na **obr. 6.2**. Kondenzátory mezi dutinami jsou vazební a jsou označeny Cv plus čísla, mezi kterými dutinami jsou vloženy, tedy například Cv23. Počítá se s filtrem do desíti dutin. Dutiny jsou k zemi přivedeny kondenzátory s označením C plus čísla dutiny. Externí navázání je provedeno s kondenzátory označené Cex.



Obrázek 6.2 Hrubý model sedmistupňového filtru

Uživatel takto vytvořené modely může rovnou simulovat. Pro potřeby jemnější vykreslení pole jsou vytvořeny polštáře, pojmenovány v komponentě jako polstar. V těchto místech je diskretizační mřížka zjemněna. Na **obr. 6.2** je návrh sedmistupňového filtru v programu.

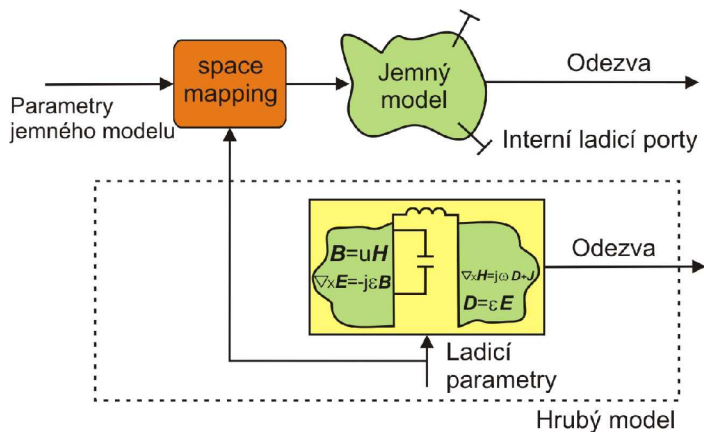


Obrázek 6.2 Návrh filtru užitím programu

7 METODA TSM

Metoda vyžaduje hrubý a jemný model filtru. Jemný model je vytvořen v CST MWS a obsahuje veškeré parametry a rozměry z kterých je tento filtr stvořen. Hrubý model, též označován jako ladící model je vytvořen v prostředí CST DS a je vytvořen přidáním klasických obvodových prvků (kapacity, indukty, vázaná vedení atd.) do struktury jemného modelu. Těmito obvodovými prvky, které jsou přidány do struktury jemného modelu pomocí speciálních diskretních portů, je hrubý model laděn. [7]. Koncept TSM je znázorněn na **obr. 7.1**

Simulováním modelu, které makra vytvořila v CST MWS, se v CST DS vytvoří v bloku filtru s-parametry. Na tyto parametry, označené v DS porty, se připojí obvodové prvky. Pro lepší shodu se skutečným měřením a tedy i odezvou jsou to kondenzátory. Filtr lze následně optimalizovat, veškeré parametry jsou totiž v CST provázané.



Obrázek 7.1 Koncept TSM a hrubého modelu (převzato z [7])

ZÁVĚR

Byla popsány základní principy koaxiálních filtrů a jejich vazeb. Popsáním situace 3D elektromagnetických simulátorů bylo vybráno CST Studio Suite jako program pro tvorbu koaxiálních filtrů. Pro komplikované prostředí CST byly navržena knihovna základních stavebních prvků koaxiálních filtrů a nastavba CST, pomáhající vytvořit složité topologie. Modely obsažené v knihovně jsou rezonátory typu hladký, hřib a klobouk. Vazby mezi rezonátory byly vytvořeny také a jedná se o interní a navazující vazby indukci a kapacitou. Následně byly rezonátory provázány do ucelených koaxiálních filtrů typu triplet, quadruplet a quintuplet. Pomocným prostředkem byla nastavba, program vytvořený v jazyku Object Pascal. Tento program umožňuje návrh i složitějších struktur a je schopen vytvořit celý filtr. Model z programu je následně předán skrz makra do CST Microwave Studia jako jemný model a CST Design Studia jako model hrubý. Tyto modely jsou plně funkční a lze je použít pro optimalizaci.

Tento návrh je schopen obstát v koncepci Virtual Prototypingu a díky optimalizační rutině Tuning-Space mapping popsané v [2] a použitím modelů v CST MWS a CST DS této práce snížit dobu návrh prototypu filtru na zlomek procent původního času návrhu a tím i částky k tomu určené. Nesporné obrovské ušetření času je použití nastavbového programu pro CST.

Veškeré zdrojové kódy jsou přiloženy na datovém nosiči.

LITERATURA

- [1] HAGENSEN, M., Narrowband Microwave Bandpass Filter Design by Coupling Matrix Synthesi. Microwave Journal.Vol. 53, Number 4, Page 218, April 2010. Dostupný na WWW: <<http://www.mwjjournal.com>>
- [2] WOLANSKÝ, D. Optimalizace koaxiálních filtrů metodou Tuning-Space Mapping v CST. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií. Ústav radioelektroniky, 2010. 62 s.
- [3] YU, M., PANARIELLO, A., ISMAIL, M., ZHENG, J., 3-D EM Simulator for Passive Devices: IEEE Microwave Magazine, Volume 9, Number 6, December 2008. ISSN 1527-3342
- [4] HANUS Stanislav, SVÁČINA Jiří, Vysokofrekvenční a mikrovlnná technika, Brno: FEKT VUT v Brně, 2002
- [5] HAGENSEN, M., Narrowband Microwave Bandpass Filter Design by Coupling Matrix Synthesi. Microwave Journal.Vol. 53, Number 4, Page 218, April 2010. Dostupný na WWW: <<http://www.mwjjournal.com>>
- [6] THOMAS, J. B. Cross coupling in coaxial cavities filters: Overview tutorial, Microwave Theory and Techniques, IEEE Vol. 51, Issues 4, 1368-1376, Apr 2003. ISSN 0018-9480
- [7] TEMPLÍK, P. Optimalizace. Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně Fakulta technologická, 2005. 38 s., 9 příl.

SEZNAM SYMBOLŮ, VELIČIN A ZKRATEK

TSM	Tuning-Space Mapping
CST	CST Studio Suite 2009
CST MWS	CST Microwave Studio
CST DS	CST Design Studio
EM	elektromagnetický
FEM	metoda konečných prvků
FDTD	metoda konečných diferencí v časové oblasti
Q_0	činitel jakosti nezátžené dutiny
Q_{ext}	činitel dutiny použitím externího navázání
TEM	elektromagnetický vid
f_0, f_0^{TEM}	rezonanční kmitočet
Δf	vazební šířka pásma
Δf_{3dB}	pásmo pro pokles o 3 dB
BW	šířka pásma filtru
TZ	transmission zero – nulový přenos
$\lambda_0, \lambda_0^{TEM}$	kritická vlnová délka
l_0	délka vniku vodiče
k, M_{12}	vazba
Z_V	modul vazební impedance
Z_1, Z_2	moduly impedance primárního a sekundárního obvodu