

Širokopásmový dělič výkonu pro pásma mobilních komunikací

L. Tejmlova, J. Sebesta

Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií VUT v Brně,
Ústav radioelektroniky, Purkyňova 118, Brno
E-mail : xzelin13@feec.vutbr.cz,

Anotace: Článek je zaměřen na návrh děličů výkonu pro pásma mobilních komunikací. Signál je v děliči rovnoměrně rozdělen do dvou přijímačů. V současnosti jsou mobilní přenosy a další služby, jako například LTE, provozovány ve dvou frekvenčních pásmech, a to od 0,81 GHz do 0,956 GHz a od 1,71 GHz do 2,62 GHz. Právě šířka pásma pro přenos je důvodem komplexnějšího návrhu děliče. Tento dokument obsahuje základní principy a teorii návrhu takového děliče, jeho simulaci a optimalizaci parametrů v CST Microwave Studiu. Dále jsou prezentovány výsledky měření navrženého a vyrobeného děliče. V závěru jsou diskutovány S-parametry – přenos vedení, odrazy na jednotlivých branách a izolace mezi výstupy.

Annotation: This document is focused on design of symmetrical wideband splitters, which are determined for distribution GSM (Global System for Mobile Communications) signals from one common antenna to two receivers. At the present time, GSM bands with for example LTE (Long Term Evolution) and others include frequencies in two bands, approximately from 0.81 GHz to 0.956 GHz and from 1.71 GHz up to 2.62 GHz. That is exactly why this complex design of splitter represents wideband solution. This paper contains fundamental theory for designing of wideband splitter and simulated and measured parameters of the optimized splitter in CST Microwave Studio. Designed divider has been also analyzed by the worst case method. Obtained S parameters, such as transmission, isolation or reflections are discussed in the closing part of this paper.

ÚVOD

Obecně lze děličem výkonu nazvat prvek, který rozdělí příchozí signál do dvou nebo více nezávislých výstupních vedení. Následně je pak možné zařadit do obvodu další nezávislá zařízení, například přijímače, které přijímají signál ze stejného zdroje, například z antény, což také mimo jiné přispívá i k úspoře nákladů. Problematikou zabývá např. Jiafeng Zhou s kolektivem [1], jejichž přístup je teoretický a velmi obecný – článek se zabývá teorií přenosu signálu z jednoho vstupu děliče to volitelného počtu jeho výstupů, a to s průchodem přes libovolný počet sekcí. Existuje řada článků, ve kterých se autoři zabývají možností rozšíření pracovního pásma děličů výkonu, našim cílem však není např. další rozšiřování pásma, ale návrh prakticky využitelného zařízení, pracujícího ve dvou pásmech, které lze se zárukou zařadit do provozu. Typickým příkladem aplikace je použití dvou komunikačních systémů v automobilu. Z GSM antény, obvykle umístěné blízko zpětného zrcátka, je signál veden do děliče. Jeden přijímač je pak součástí klasického zabudovaného hands-free pro řidiče, druhý funguje jako nezávislý záchranný systém. V případě, že dojde k dopravní nehodě, je systém schopný automaticky volat tísňové volání či záchrannou službu. V kombinaci s obdobně vyřešeným navigačním systémem se s tísňovým voláním zároveň vysílá poloha automobilu, tedy místo nehody, a to i tehdy, pokud řidič právě volal a měl aktivní navigaci.

V článku jsou stanoveny požadované parametry a vlastnosti takového širokopásmového děliče výkonu. Také je zde navržen motiv vícecestného

Wilkinsonova děliče a optimalizace vybraných parametrů této struktury v CST Microwave studiu. Před vlastní výrobou byla provedena analýza worst-case, neboť reálná výroba zařízení také není 100% přesná. Parametry vyrobeného zařízení, prezentované v poslední kapitole, byly naměřeny síťovým vektorovým analyzátozem Agilent. Výsledný produkt má požadované vlastnosti a může být integrován jako zařízení používané v automobilech podle předchozí definice.

NÁVRH DĚLIČE

Požadované parametry

V této části jsou uvedeny požadavky na výkonové děliče pracující v pásmu mobilních komunikací. Jejich struktura je založena na bázi vícecestného Wilkinsonova děliče, kde mikropásková vedení rovnoměrně rozdělují vstupní signál do dvou větví. Spodní strana substrátu je přítom oplátovaná mědí, která tvoří zem zařízení. Jak už bylo zmíněno, dělič musí být naladěn na frekvence mobilních komunikací [2]. V tomto pásmu najdeme například GSM pásma využívaná v Evropě, nebo třeba LTE pásmo, umožňující vysokorychlostní přenos dat v mobilních sítích. Tato a další pásma jsou přehledně vypsána do tabulky (tab. 1).

Tab. 1: Využívané mobilní frekvence

<i>Standard</i>	<i>Frekvence vysílání [MHz]</i>	<i>Frekvence příjmu [MHz]</i>
GSM 900 (Evropa)	876 - 915	921 - 960

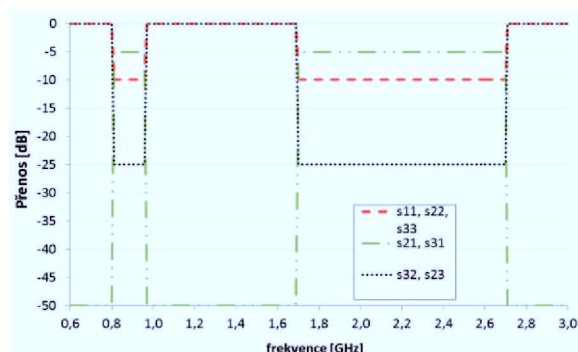
GSM 1800 (Evropa)	1710 - 1785	1805 - 1880
PDC (Jap.)	810 - 826	940 - 956
AMPS/CDMA/ TDMA (USA)	824 - 849	869 - 894
PCS (USA/Jap.)	1850 - 1910	1930 - 1990
UMTS (Evropa)	1920 - 1980	2110 - 2170
LTE (EU pásmo 38)	2570 - 2620	

Dělič pro mobilní komunikace tedy musí pracovat ve frekvenčním pásmu 0,81 GHz až 0,956 GHz a také v pásmu od 1,71 GHz do 2,62 GHz, aby pokryl všechny provozní frekvence GSM a horní pásmo LTE v EU. V těchto pásmech jsou kladeny požadavky na s-parametry (z anglického pojmu „scattering parameters“, v češtině nazývané ekvivalentním výrazem „rozptylové parametry“) následující:

$$\begin{aligned} s_{21}, s_{31} &> -5 \text{ dB} \\ s_{11}, s_{22}, s_{33} &< -10 \text{ dB} \\ s_{23}, s_{23} &< -25 \text{ dB}, \end{aligned}$$

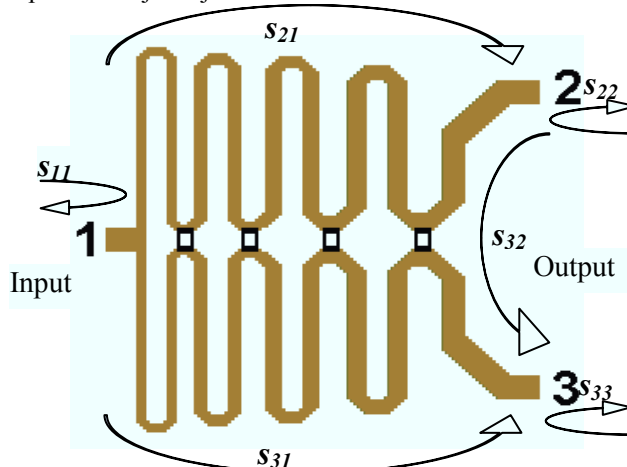
kde s_{11} je vstupní koeficient odrazu při výstupech zakončených přizpůsobenou zátěží (50Ω), s_{22} a s_{33} jsou výstupní koeficienty odrazu při zakončení ostatních dvou vedení přizpůsobenou zátěží (50Ω), s_{21} , s_{31} jsou přenosové koeficienty děličního členu (opět s přizpůsobenou zátěží 50Ω na třetí bráně) a s_{23} , s_{23} jsou úrovně odrazů mezi jednotlivými výstupy – tzv. izolace.

Ideální hodnota přenosu při rovnoměrném dělení signálu mezi dva výstupy je -3dB pro každou z větví. Toto však platí pro bezztrátové materiály – jak substrátu, tak vedení. Grafické znázornění hranic požadavků na s-parametry znázorňuje graf na obr. 1.



Obr. 1: Požadavky na s-parametry děliče výkonu

Základní struktura a vyznačení odpovídajících s-parametrů je zřejmá z obr. 2.



Obr. 2: Struktura děliče výkonu a odpovídající s-parametry

Vlastní návrh mikropáskové struktury

Jako vhodný substrát se jeví klasická FR4, ať už díky vlastnostem na funkčních frekvencích [3], tak pro cenovou dostupnost materiálu. Nejdůležitější parametry, které se zadávají i do simulátorů, jsou vypsány v následující tabulce (tab. 2).

Tab. 2: Vybrané vlastnosti materiálu FR4

Parametr	Hodnota
Měrná hustota	1850 kg/m ³
Dielektrická průraznost	> 50 kV
Dielektrická pevnost	20 kV/mm
Dielektrická konstanta (relativní permitivita)	4.70 max 4.35 @ 500 MHz 4.34 @ 1 GHz
Ztrátový činitel	0.018

Princip funkce širokopásmových děličů se liší od úzkopásmových v tom, že se neladí na jednu frekvenci, ale že se ladí na několik různých frekvencí, aby zařízení pracovalo v celé šířce pásma. Dělič má tedy více přizpůsobených sekcí, jejichž délka odpovídá požadovaným frekvencím. V našem frekvenčním pásmu je potřeba naladit dělič na střední frekvenci nižšího pásma a dále na rovnoměrně rozložené tři frekvence v pásmu vyšších kmitočtů. S ohledem na nutnost dostat izolaci mezi výstupy pod 25 dB volíme celkem 4 sekce. Kdybychom sekcí navrhli více, zařízení bude ještě širokopásmovější, ale izolace by byla maximálně asi 19 dB. Spodní laděná frekvence tedy bude určená z rovnice (1).

$$f_1 = \frac{f_{LB\max} - f_{LB\min}}{2} + f_{LB\min}, \quad (1)$$

kde LB znamená nižší frekvenční pásmo. Získáme tedy frekvenci 0,883 GHz.

Dále určíme frekvence pro vyšší mobilní pásmo podle (2).

$$\Delta f = \frac{f_{UB\max} - f_{UB\min}}{n+1}, \quad (2)$$

kde n je počet sekcí děliče. Náš dělič má vyčleněnou jednu sekci pro nižší frekvenční pásmo, a tedy n bude odpovídat zbývajícím počtu sekcí – číslu 3. Zjistíme, že rozdíl mezi laděnými frekvencemi je 250 MHz, a dopočteme podle (3) frekvence, na které naladíme další sekce děliče.

$$f_x = f_{UB\min} + x \cdot \Delta f = 1,7 + x \cdot 0,25 \text{ GHz} \quad (3)$$

Získáme tedy frekvence $f_1 = 1,95 \text{ GHz}$
 $f_2 = 2,2 \text{ GHz}$
 $f_3 = 2,45 \text{ GHz}$.

Délka každé sekce tedy závisí na kmitočtu a na relativní permitivitě, jak lze vidět ze vztahu (4).

$$\lambda_g = \frac{v_f}{f} = \frac{c}{f \cdot \sqrt{\epsilon_{\text{efr}}(f)}}. \quad (4)$$

Výpočtem čtvrtin vlnových délek je dána konečná délka (l_x) jednotlivých sekcí našeho děliče [4]:

$$l_1 = \frac{\lambda_{g1}}{4} = \frac{\lambda_{0,885}}{4} = 40,84 \text{ mm}$$

$$l_2 = \frac{\lambda_{g2}}{4} = \frac{\lambda_{1,95}}{4} = 18,53 \text{ mm}$$

$$l_3 = \frac{\lambda_{g3}}{4} = \frac{\lambda_{2,2}}{4} = 16,43 \text{ mm}$$

$$l_4 = \frac{\lambda_{g4}}{4} = \frac{\lambda_{2,45}}{4} = 14,75 \text{ mm}$$

Šířky jednotlivých mikropáskových vedení (x_x) jsou dány nutností rovnoměrného impedančního přizpůsobování děliče z první sekce o impedanci Z_{0T} podle (5) na impedanci výstupních vedení Z_0 (50 Ω) [4].

$$Z_{0T} = \sqrt{2} \cdot Z_0. \quad (5)$$

Ze vzorce (6) spočteme šířku vedení, jejíž impedance je právě 50 Ω .

$$Z_0 = \frac{87}{\sqrt{\epsilon_r + 1,41}} \cdot \ln \frac{5,98 \cdot h}{0,8 \cdot w + t}, \quad (6)$$

kde w reprezentuje šířku pásku, t tloušťku pásku a h je šířka substrátu.

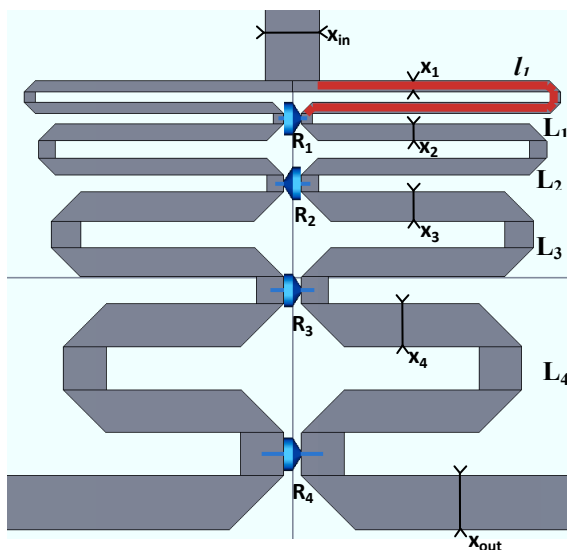
Vybereme tedy jednotlivé impedance sekcí zařízení a dopočítáme k nim reálnou šířku mědi v daných úsecích:

$$\begin{aligned} Z_1 &= 100 \Omega & X_{L1} &= 0,70 \text{ mm} \\ Z_2 &= 85 \Omega & X_{L2} &= 1,05 \text{ mm} \\ Z_3 &= 70 \Omega & X_{L3} &= 1,62 \text{ mm} \\ Z_4 &= 55 \Omega & X_{L4} &= 2,57 \text{ mm} \\ Z_0 &= 50 \Omega & X_{Z0} &= 2,95 \text{ mm} \end{aligned}$$

Důležité je, aby byla každá sekce vedení zakončena přizpůsobovacím rezistorem. Hodnoty těchto rezistorů jsou dané šířkou předchozího vedení, tedy impedancí, na konci které se vyskytují, a jsou komplexně definovány v literatuře [5]. Jejich hodnoty jsou tedy:

$$\begin{aligned} R_1 &= 100 \Omega & R_2 &= 180 \Omega \\ R_3 &= 300 \Omega & R_4 &= 470 \Omega. \end{aligned}$$

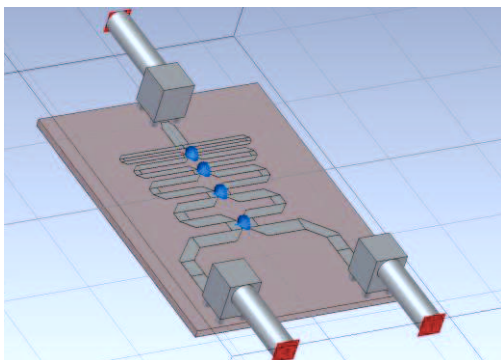
Strukturu s vyznačenými parametry prezentuje obr. 3.



Obr. 3: Parametry děliče výkonu

SIMULACE A OPTIMALIZACE

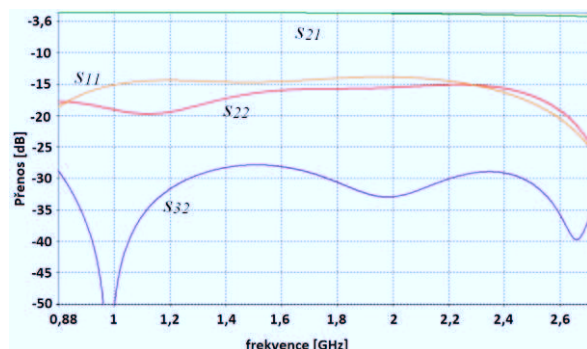
Dělič byl nakreslen v programu CST Microwave Studio a byl doplněn o konektory SMB-JWE typu (obr. 4). Substrát FR4, na který byl následně dělič vyroben, měl hodnotu relativní permitivity $\epsilon_r = 4,34$ na frekvenci 1 GHz a byl oboustranně oplátován mědí o tloušťce dCu = 35 μm .



Obr. 4: Navržený dělič s konektory

Simulace

V simulátoru CST Microwave studia byla provedena analýza navržené struktury ve frekvenční oblasti. Výsledek je vykreslen v obr. 5. Je patrné, že navržený motiv splňuje požadavky, avšak je potřeba strukturu optimalizovat, abychom měli co největší rezervy v úrovních přenosu, odrazů a přeslechů. Optimalizací se budeme snažit dosáhnout přenosu těsně pod -3 dB, odrazů na branách co nejnižších a izolace mezi výstupy alespoň 30 dB.

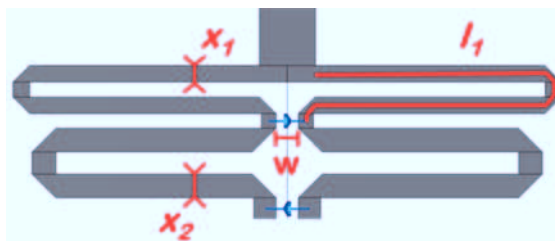


Obr. 5: Analýza navrženého motivu

Optimalizace

Z nabízených optimalizačních metod byla vybrána Nelder-Mead Simplex algorithm, což je globální nelineární optimalizační metoda, minimalizující účelovou funkci v mnohorozměrném prostoru. Z pohledu geometrie se jedná o analogii metody trojúhelníků [6], [7].

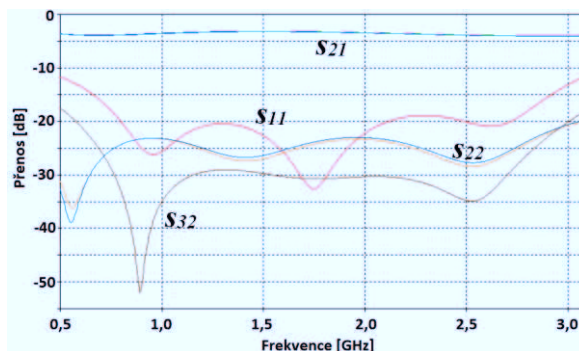
Nejprve jsme nechali zoptimalizovat šířky jednotlivých vedení (x_1 , x_2 , x_3 a x_4), aby jejich impedanci odpovídaly dané hodnoty rezistorů, volené pevně z řady E24. S šířkou vedení byla optimalizovaná i rozteč mikropáskového motivu v místech umístění rezistorů (w). Dalším krokem byla optimalizace délek vedení v jednotlivých sekcích děliče (l_1 , l_2 , l_3 a l_4). Optimalizované veličiny názorně vyobrazuje obr. 6.



Obr. 6: Optimalizované parametry

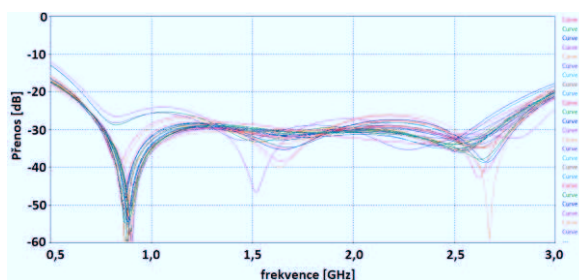
Následně byla struktura zoptimalizována lokální optimalizační metodou Trust Region Framework [8], která velmi rychle, během jedenácti kroků, konvergovala k nalezení optima.

Na následujícím obrázku (obr. 7) jsou k vidění výsledné průběhy s-parametrů po optimalizaci.



Obr. 7: Parametry optimalizovaného děliče

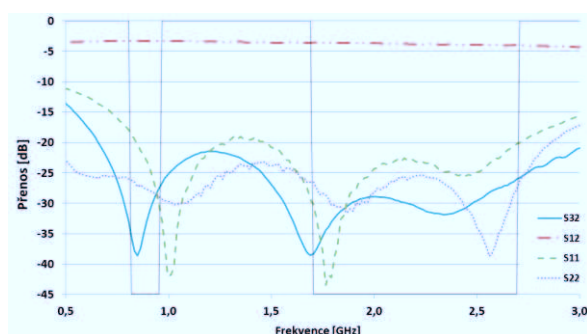
Byla provedena worst-case analýza s rozmitáním vybraných parametrů do $\pm 10\%$. Výsledek například pro izolaci, s_{32} , zobrazuje obr. 8. Je zřejmé, že hodnota izolace jen ojedinele klesla pod hodnotu 25 dB.



Obr. 8: Worst-case analýza pro s_{32}

MĚŘENÍ

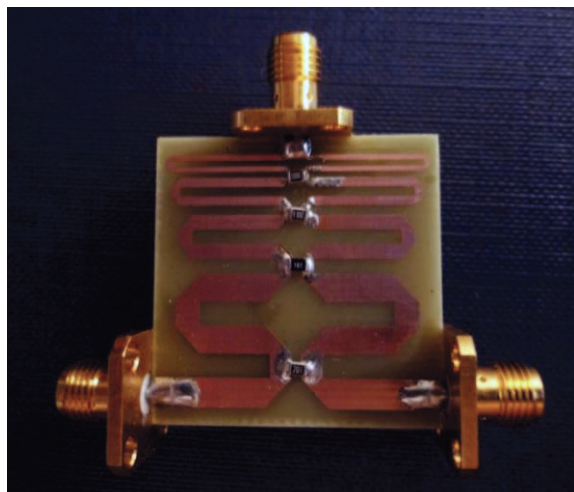
S-parametry zařízení byly měřeny dvouportovým vektorovým síťovým analyzátozem, pracujícím do 8 GHz. Po zkalibrování přístroje bylo zařízení připojeno jako dvouportové, přičemž třetí port byl zatížen charakteristickou impedancí 50Ω , a tím pádem přizpůsoben. Naměřené s-parametry jsou vykresleny na obr. 9. Tenkou plnou čarou jsou vyznačeny frekvenční hranice spodního a vrchního pásma mobilních přenosů.



Obr. 9: Naměřené s-parametry děliče výkonu

Je zřejmé, že reálně vyrobený a osazený prvek nebude mít vlastnosti jako namodelovaná, a ve mnoha vlastnostech pro výpočet ideální struktura. Vidíme však, že vyrobené zařízení splňuje původní požadavky pro jeho správnou funkci. Přenos ze vstupu na výstupy je v celém frekvenčním pásmu vyšší než -5 dB, odrazy na branách jsou ve vrchním pásmu dokonce ještě o 10 dB nižší, než bylo požadováno. Izolace mezi výstupními branami dosahuje hodnot 26 dB a vyšších, přičemž nejnižších hodnot dosahovala na nejvyšších frekvencích horního pásma, tedy mezi 1,55 GHz a 1,71 GHz (izolace menší než 28 dB).

Rozměry osazeného děliče výkonu jsou i s konektory 45x60x12 mm. Fotografie vyrobeného zařízení je k vidění na obr. 10.



Obr. 10: Vyrobený a osazený dělič výkonu

ZÁVĚR

Navržený dělič výkonu pro pásma mobilních komunikací byl vyroben a byly proměřeny jeho přenosové charakteristiky. V celém frekvenčním rozsahu vyhovuje přenos děliče podmínkám pro správnou funkci zařízení. Všechny s-parametry v pásmech 0,81 GHz až 0,956 GHz a 1,71 GHz až 2,62 GHz splňují požadavky a zároveň je zařízení

dostatečně malé, aby mohlo být jednoduše implementováno do automobilu. Přenosové pásmo je možné zúžit zařazením pásmového filtru, dle aplikační potřeby. Nabízí se také možnost zlepšit přenosové vlastnosti děliče vložení aktivního předzesilovače.

LITERATURA

- [1] JIAFENG ZHOU, K.A. MORRIS a M.J. LANCASTER. General Design of Multiway Multisection Power Dividers by Interconnecting Two-Way Dividers. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*. 2007, roč. 55, č. 10, s. 2208-2215. ISSN 0018-9480.
- [2] Technologie mobilního internetu – od CSD po LTE Advanced. VRBACKÝ, Jakub. *Mobilizujeme.cz* [online]. 12. 2. 2012 [cit. 2012-07-01]. Dostupné z: <http://mobilizujeme.cz/clanky/technologie-mobilniho-internetu-od-csd-po-lte-advanced-vedecke-okenko>.
- [3] LAMITEC CZECH S.R.O. *Základní materiály pro plošné spoje. Desky z tvrzené skleněné tkaniny plátované měděnou fólií: LAMPLEX FR-4*. 1. vyd. 2001. Dostupné z: <http://semach.cz/pdf/lamplex.pdf>.
- [4] PEDRO J. GONZÁLEZ, Fernando Noriega. Designing LC Wilkinson power splitters. *R.F. design*. Overland Park, KS: Primedia Intertec, 2002, August, s. 18-24. ISSN 1945-2535.
- [5] S. B. Cohn. A Class of broadband Three-port TEM-Mode Hybrids. *IEEE Transactions Microwave Theory and Techniques*, vol. MTT-16, no. 2, pp. 110–116, Feb. 1968.
- [6] ČERNOHORSKÝ, Dušan, Zbyněk RAIDÁ, Zbyněk ŠKVOR a Zdeněk NOVÁČEK. *Analýza a optimalizace mikrovlnných struktur*. 1. vyd. Blansko: VUTIUM, 1999. ISBN 80-214-1512-6.
- [7] TAUFER, I. a M. JAVŮREK. Metoda simplexů: Efektivní nástroj pro řešení optimalizačních úloh. *CHEMagazín: časopis pro chemicko-technologickou a laboratorní praxi*. Pardubice: Ing. Miloslav Rotrekl, 2010, roč. 6, č. 10. ISSN 1210-7409.
- [8] SOKOL, Vratislav. Optimization Techniques in CST STUDIO SUITE. s. 30. Dostupné z: http://www.cst.com/Content/Events/downloads/ugm2011/Talk_6-1-4_CST_UGM_2011.pdf.