

Náhradní modelování pasivních drátových součástek používaných v EMI filtrech

Juraj Čásar

Bakalárska práca
2019



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta aplikované informatiky

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta aplikované informatiky
akademický rok: 2018/2019

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Juraj Čásar**
Osobní číslo: **A16847**
Studijní program: **B3902 Inženýrská informatika**
Studijní obor: **Bezpečnostní technologie, systémy a management**
Forma studia: **prezenční**

Téma práce: **Náhradní modelování pasivních drátových součástek používaných v EMI filtrech**

Téma anglicky: **Equivalent Modelling of Passive Components Used in EMI Filters**

Zásady pro vypracování:

1. Seznamte se problematikou náhradního modelování pasivních RLC součástek, a to jak v SMD tak v drátovém provedení.
2. Pro vybrané součástky, zejména drátové L a C používané v EMC filtrech vyberte vhodné fyzikální modely pro tyto součástky.
3. Za pomoci toolboxu v Matlabu pro globální optimalizaci nalezněte R, L, C parametry náhradního modelu tak, aby se výsledné S11 a S21 co nejvíce přiblížilo naměřeným hodnotám S11 a S21 dodaným školitelem pro vybrané součástky.
4. Zhodnoťte rychlost konvergence při globální optimalizaci pro různé složitě náhradní modely pasivních součástek.

Rozsah bakalářské práce:

Rozsah příloh:

Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná/elektronická**

Seznam odborné literatury:

1. **BANSAL, R.. Handbook of engineering electromagnetics. New York: Marcel Dekker, 2004. 690 s. ISBN 0-8247-5628-2.**
2. **ČERNOHORSKÝ, D., Z. NOVÁČEK a Z. RAIDÁ. Elektromagnetické vlny a vedení. Vyd. 2. Brno: VUTIUM, 1999. ISBN 80-214-1261-5.**
3. **SVAČINA, J. Elektromagnetická kompatibilita: principy a metody. Brno: Vysoké učení technické v Brně, 2001, 156 s., ISBN 80-214-1873-7.**
4. **HERINGOVÁ, B., P. HORA. Matlab – díl I, práce s programem. 1995. 151 s.**
5. **JOHNSON, J.M., SAMII, V. R. Genetic algorithms in engineering electromagnetics. IEEE Antennas and Propagation Magazine, 1997, Vol. 39 , No. 4, s. 7 až 21.**
6. **HAUPT, L. R., HAUPT, S. E. Practical genetic algorithms. 2nd Ed. Willey, 2004. 261 s. ISBN 978-0471455653.**

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Stanislav Goňa, Ph.D.**
Ústav elektroniky a měření

Datum zadání bakalářské práce: **20. prosince 2018**

Termín odevzdání bakalářské práce: **15. května 2019**

Ve Zlíně dne 20. prosince 2018

doc. Mgr. Milan Adámek, Ph.D.
děkan



Ing. Jan Valouch, Ph.D.
ředitel ústavu

Prohlašuji, že

- beru na vědomí, že odevzdáním bakalářské práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb. o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších právních předpisů, bez ohledu na výsledek obhajoby;
- beru na vědomí, že bakalářská práce bude uložena v elektronické podobě v univerzitním informačním systému dostupná k prezenčnímu nahlédnutí, že jeden výtisk diplomové/bakalářské práce bude uložen v příruční knihovně Fakulty aplikované informatiky Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně a jeden výtisk bude uložen u vedoucího práce;
- byl/a jsem seznámen/a s tím, že na moji bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, zejm. § 35 odst. 3;
- beru na vědomí, že podle § 60 odst. 1 autorského zákona má UTB ve Zlíně právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona;
- beru na vědomí, že podle § 60 odst. 2 a 3 autorského zákona mohu užít své dílo – diplomovou/bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití jen připouští-li tak licenční smlouva uzavřená mezi mnou a Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně s tím, že vyrovnání případného přiměřeného příspěvku na úhradu nákladů, které byly Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše) bude rovněž předmětem této licenční smlouvy;
- beru na vědomí, že pokud bylo k vypracování bakalářské práce využito softwaru poskytnutého Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně nebo jinými subjekty pouze ke studijním a výzkumným účelům (tedy pouze k nekomerčnímu využití), nelze výsledky bakalářské práce využít ke komerčním účelům;
- beru na vědomí, že pokud je výstupem bakalářské práce jakýkoliv softwarový produkt, považují se za součást práce rovněž i zdrojové kódy, popř. soubory, ze kterých se projekt skládá. Neodevzdání této součásti může být důvodem k neobhájení práce.

Prohlašuji,

- že jsem na bakalářské práci pracoval samostatně a použitou literaturu jsem citoval. V případě publikace výsledků budu uveden jako spoluautor.
- že odevzdaná verze bakalářské práce a verze elektronická nahraná do IS/STAG jsou totožné.

Ve Zlíně, dne 22.5.2019

Juraj Čásar, v. r.

ABSTRAKT

Práca sa zaoberá optimalizáciou parametrov R, L a C náhradných modelov pasívnych súčiastok používaných v EMI filtroch. Teoretická časť obsahuje popis obecných vlastností reálnych komponentov a optimalizačný proces s popísanými použitými algoritmami. Praktická časť obsahuje optimalizáciu parametrov náhradných modelov na základe priebehu impedancie pre určitý frekvenčný rozsah. V poslednej kapitole sú vyhodnotené výsledky a konvergencia pre rôzne náhradné modely pasívnych súčiastok.

Kľúčové slová: pasívne súčiastky, náhradný model, optimalizácia, konvergencia, interferencia

ABSTRACT

The work deals with optimization of parameters R, L and C of equivalent models of passive components used in EMI filters. The theoretical part contains a description of general properties of real components and an optimization process with used algorithms. The practical part includes optimization parameters of equivalent model based on the impedance course for a certain frequency range. In the last chapter are evaluated results and convergence for different equivalent models of passive components.

Keywords: passive components, equivalent model, optimization, convergence, interference

Ďakujem vedúcemu bakalárskej práce Ing. Stanislavovi Goňovi, Ph.D. za účinnú metodickú, pedagogickú a odpornú pomoc a ďalšie cenné rady pri spracovaní tejto práce.

OBSAH

ÚVOD	7
I TEORETICKÁ ČASŤ	8
1 PASÍVNE SÚČIASTKY	9
1.1 KOMPONENTY POVRCHOVEJ MONTÁŽE	10
1.1.1 Osadzovanie drôtenými vývodmi	10
1.1.2 Technológia povrchovej montáže	11
1.2 REZISTOR	12
1.2.1 Reálny rezistor	13
1.3 ODRUŠOVACIE PROSTRIEDKY	15
1.3.1 Tlmivka	15
1.3.1.1 Vlastnosti tlmivky.....	17
1.3.2 Odrušovací kondenzátor.....	18
1.3.2.1 Vlastnosti kondenzátora.....	19
1.4 PRENOSOVÉ VEDENIE	21
2 OPTIMALIZÁCIA	24
2.1 GENETICKÝ ALGORITMUS.....	25
2.2 ROJ ČASTÍ.....	25
II PRAKTICKÁ ČASŤ	26
1 GENETICKÝ ALGORITMUS	27
1.1 NÁHRADNÉ MODELY TLMIVKY	27
1.1.1 Optimalizácia binárnym GA s logaritmicným rozsahom premenných.....	29
1.1.1.1 Kompletný náhradný model troch veličín tlmivky	29
1.1.1.2 Náhradný model LC s konštantným odporom	32
1.1.1.3 Hľadané parametre RL a RC	32
1.1.2 GA s reálnymi premennými	34
1.1.2.1 Kompletný náhradný model troch veličín komponentu	34
1.1.2.2 Náhradný model parametrov L a C.....	35
1.1.2.3 Hľadané parametre RL a RC	36
2 ROJ ČASTÍ	37
2.1 NÁHRADNÝ MODEL KONDENZÁTORA	37
2.2 NÁHRADNÝ MODEL TLMIVKY	38
2.2.1 Rozšírený náhradný model tlmivky	39
2.3 NÁHRADNÝ MODEL REZISTORA	40
3 ZHRNUTIE VÝSLEDKOV	42
3.1 POROVNANIE PRIEBEHU IMPEDANCIE REÁLNEHO MODELU S NÁHRADNÝM.....	43
ZÁVER	46
ZOZNAM POUŽITEJ LITERATÚRY	47
ZOZNAM POUŽITÝCH SYMBOLOV A SKRATIEK	49
ZOZNAM OBRÁZKOV	50
ZOZNAM TABULIEK	52
ZOZNAM PRÍLOH	53

ÚVOD

Pasívne súčiastky patria medzi základnú stavebnú jednotku každého elektronického obvodu. Cievky a kondenzátory so špecifickými parametrami plnia účel filtrovania elektromagnetického rušenia do medzného bodu hradenia, ktorým je rezonančná frekvencia a jej hodnota určuje vhodné frekvenčné pásmo odrušenia. Pri frekvencii mimo rozsahu pásma odrušenia môže mať odrušovací komponent opačný efekt a ešte viac rušiť regulárny prúd obvodu.

V práci sú študované základné pasívne súčiastky ako sú rezistor, cievka a kondenzátor. Uvažuje sa pritom, že náhradné modely R, L alebo C majú celkom tri prvky. Jeden prvok je vždy dominantná veličina prvku a zostávajúce dve predstavujú parazitné vlastnosti. U cievky je uskutočnená analýza pre zložitejší model s piatimi prvkami, kde ďalšie dva parametre predstavujú parazitnú kapacitu oproti zemnej rovine a parazitnú indukčnosť prívodov.

Hodnoty parametrov danej funkcie sú hľadané prostredníctvom globálnych optimalizačných algoritmov. Konkrétne boli použité genetické algoritmy (GA) a metóda časticového roja (PSO). Pri globálnej optimalizácii je pritom zostavená kritériálna funkcia, ktorá predstavuje kvadratickú chybu medzi zmeraným impedančným správaním prvku a impedanciou náhradného modelu. Predmetom optimalizácie je nájsť globálne minimum pre túto chybovú funkciu. Kritériálna funkcia pre dané súčiastky R, L, C je vysoko nelineárna a vykazuje celú radu lokálnych miním. Globálna optimalizácia je uskutočnená na rozsahu frekvencie 100 kHz – 100 MHz. V práci sa študuje každý prvok zvlášť, či je možné s daným typom globálnej optimalizačnej metódy dosiahnuť konvergenciu. Sú tiež diskutované rôzne podoby kritériálnej funkcie (napr. so zohľadnením akosti daného prvku). V poslednej kapitole sú zhrnuté dosiahnuté výsledky.

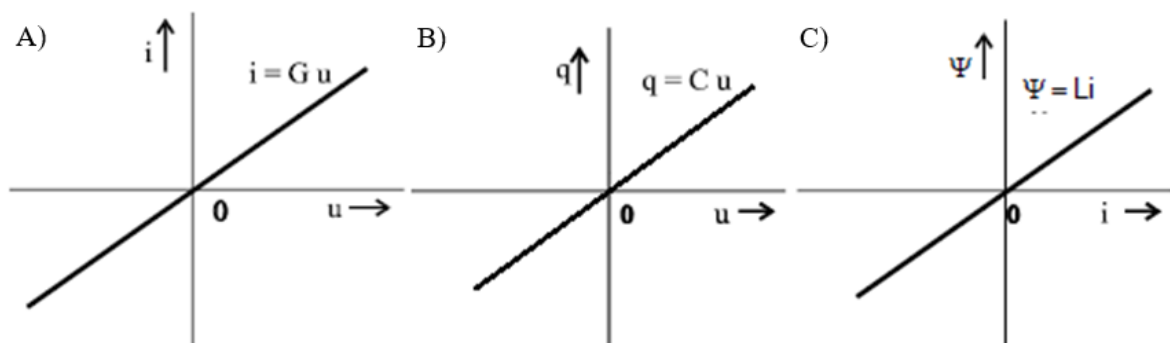
I. TEORETICKÁ ČASŤ

1 PASÍVNE SÚČIASTKY

V závislosti od funkcie prvkov v elektrickom obvode sú rozlíšiteľné prvky aktívne (nezávislé a závislé zdroje elektrickej energie) a prvky *pasívne* (napr. rezistor, kapacitor, induktor), ktoré nemôžu trvalo dodávať energiu. Sú to prvky disipatívne, ktoré energiu spotrebávajú (menia na inú formu energie) a prvky akumulčné, ktoré ju akumulujú (dočasne uchovávajú) vo forme energie elektrického alebo magnetického poľa. [1]

Skutočné, *reálne prvky*, s ktorými sa v praxi stretávame, zvyčajne v sebe zahŕňajú všetky uvedené spôsoby premeny energie. Väčšinou je jeden z nich žiadúci a je dominantný a zvyšné sú zvyčajne nežiadúce a pokladáme ich za parazitné. Pre zjednodušenie analýzy a syntézy definujeme potom ideálne obvodové prvky, ktoré sa vyznačujú iba jediným spôsobom premeny energie. [2]

Vlastnosti *ideálnych prvkov* sú opísané základnými charakteristikami. Charakteristikou prvku rozumieme závislosti jednej veličiny na inej veličine. Táto závislosť vyjadruje dominantné fyzikálne parametre prvku, napr. pre odpor je charakteristika voltampérová $U(I)$ – obr. 1A, pre kapacitu coulombvoltová - $Q(U)$ - obr. 1B a pre indukčnosť weberampérová charakteristika - $\Phi(A)$ – obr.1C. [2]



Obrázok 1 – Charakteristiky ideálnych prvkov [2]

Prostredníctvom ideálnych prvkov vytvárame náhradné schémy, modely reálnych prvkov, od jednoduchých až po značne zložité náhradné schémy podľa toho, akú presnosť náhrady vyžadujeme resp. podľa režimu, v ktorom prvky pracujú. Každý reálny prvok môže byť teda v danej oblasti nahradený modelom zloženým z jedného alebo viacerých ideálnych prvkov rôznych fyzikálnych vlastností. [2]

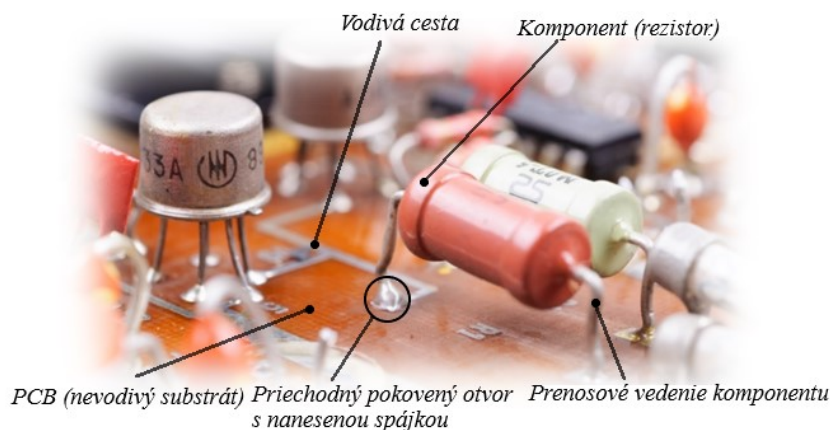
1.1 Komponenty povrchovej montáže

Elektronické komponenty montované alebo priamo umiestnené na povrch vytlačenej obvodovej dosky (angl. printed circuit board - PCB) sa nazývajú komponenty povrchovej montáže (angl. surface mounted devices - SMD). Obvodová doska mechanicky podporuje a elektricky spája komponenty použitím vodivých ciest vyleptaných na nevodivom substráte. [3]

Metóda umiestnenia komponentov priamo na povrch dosky sa nazýva technológia povrchovej montáže (angl. surface mounted technology - SMT). Predchodcom tejto metódy je montovanie komponentov prostredníctvom drôtených vývodov (angl. through hole technology- THT).

1.1.1 Osadzovanie drôtenými vývodmi

Tento typ montáže je využívaný od predstavenia druhej generácie počítačov (použitie tranzistora namiesto elektrónky). Do PCB sú vyvrtané diery, ktoré definujú, kam má byť komponent umiestnený. Vložené komponenty sú prispájkované k cestám z vodivej zmesi. [4]



Obrázok 3 – Montáž drôtenými vývodmi [3]

Výhody:

- Silnejšie spojenie medzi komponentom a doskou zaručuje vyššiu spoľahlivosť,
- lepšia odolnosť proti mechanickému a environmentálnemu stresu či vysokej teplote,
- ľahšia výmena zariadenia aj spájkovanie. [4]

Limity:

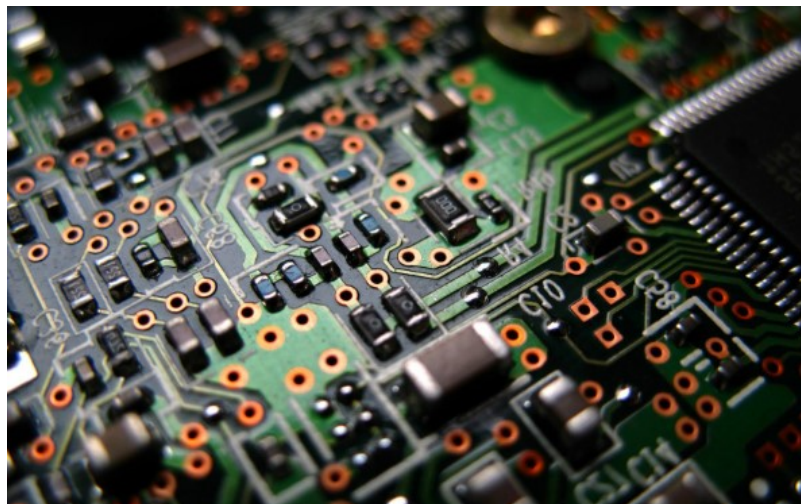
- Vyžaduje veľa miesta,
- vyššia časová náročnosť kvôli vŕtaniu a cena,

- drôtené vodiče komponentov môžu pri dostatočnej dĺžke štruktúry a vysokých frekvenciách narušovať tok normálneho prúdu obvodom. [4][5]

Sú dva druhy komponentov určených na montáž prostredníctvom drôtových vývodov. Pri axiálnych komponentoch sú drôtené vývody umiestnené na oboch koncoch komponentu. Radiálne komponenty majú drôtené vodiče umiestnené na jednej strane.

1.1.2 Technológia povrchovej montáže

Používanou sa stala v polovici osemdesiatych rokov. Technológia je v originálnom znení „Planar Mounting“ voľne preložená ako rovinná montáž. Do PCB nie je nutné vŕtať diery ako u THT, pretože komponenty majú vývody pod alebo okolo obalu. Vývody komponentov vytvoria priamy kontakt s vodivými spojmi na PCB. Na spojenie dosky s komponentom sa používa spájkovacia pasta. [4]



Obrázok 4 – PCB vytvorená technológiou povrchovej montáže [5]

Výhody:

- Menšie komponenty,
- vyššia hustota komponentov (komponent na jednotku plochy) a viac spojení na komponent,
- menšia cena a rýchlejšia montáž,
- malé chyby pri umiestnení komponentov – povrchové napätie roztavenej spájky ťahá komponenty do zarovnania so spájkovacími podložkami,
- menšia rezistencia a indukčný odpor v pripojeniach, dôsledkom je menej rušivých signálov, lepší a predvídateľnejší vysokofrekvenčný výkon,
- môžu byť na PCB z oboch strán. [4][5]

Limity:

- Nie sú vhodné pre navrhovanie alebo testovanie malých obvodov – manuálna oprava či výmena komponentov je na tejto úrovni zložitejšia,
- nie je vhodné pre veľké, vysokovýkonné alebo vysokonapäťové časti, napr. výkonostný obvod,
- nevhodné pre komponenty, ktoré sú vystavené častej mechanickej námahe. [4][5]

1.2 Rezistor

Je dvojpólový obvodový prvok, ktorý mení elektrickú energiu nevratným spôsobom na inú formu energie. V obvode sa používa obvykle k zníženiu veľkosti prúdu alebo získaniu určitého úbytku napätia. [2]

V najjednoduchšom prípade, u tzv. lineárneho rezistora, je ampér voltová charakteristika lineárna (obr. 1A) a prúd je priamo úmerný napätiu. Rezistor je potom popísaný iba jedným parametrom. Existujú však aj tzv. parametrické rezistory, ktorých sklon nie je konštantný, ale závisí na nejakej vonkajšej veličine, ako napr. teplote, intenzite osvetlenia, mechanickom nastavení ovládacieho prvku, napätí v nejakom inom mieste obvodu a pod.. [2]

Základnou veličinou pre obvod striedavého prúdu je impedancia. Impedancia je fyzikálna veličina, ktorá popisuje zdanlivý odpor súčiastky a fázový posun napätia proti prúdu pri prechode harmonického striedavého elektrického prúdu danej frekvencie. Je to komplexná veličina, má zložku reálnu a imaginárnu. [3]

$$Z = \frac{U}{I} \quad (1.1)$$

kde

Z = impedancia [Ω],

U = elektrické napätie [V],

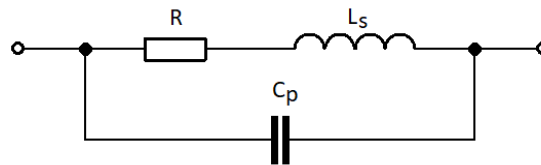
I = elektrický prúd [A].

Rôznych veľkostí odporu sa dosahuje voľbou materiálu a geometrických rozmerov. Elektrická energia, ktorá sa nevratne premieňa na teplo, rezistor zahrieva, pričom časť dodanej energie sa odvádza jeho povrchom do okolia. Teplota rezistora nemôže presiahnuť určitú hodnotu danú vlastnosťami použitých materiálov. Preto sa okrem veľkosti odporu udáva aj najväčší povolený výkon. [2]

Rezistor nespôsobuje fázový rozdiel (φ) medzi napätím a prúdom. Amplitúda oboch veličín dosahuje maximálnych hodnôt v rovnakom čase.

1.2.1 Reálny rezistor

Všeobecne sa okrem prúdového poľa v rezistore a jeho okolí vytvára aj pole elektrické a magnetické. Ich vplyvy, ak sa nemôžu pre predpokladaný druh prevádzky zanedbať, sa dajú rešpektovať modelom rezistora, ktorý obsahuje ďalšie ideálne obvodové prvky – paralelný kapacitor C_p a sériový induktor L_s (obr. 5). [2]



Obrázok 5 – Ekvivalentný model reálneho rezistora

Pri vyšších hodnotách parazitných veličín, kedy ich nie je možné zanedbať pre správnu analýzu obvodu, sa k odporu pridá reaktancia týchto veličín (induktívna, kapacitná). Zložky sú vynesené na osi v komplexnej rovine. Absolútna hodnota impedancie sa počíta použitím Pytagorovej vety. Veľkosť impedancie pre paralelný rezonančný obvod rezistora je možné určiť vhodnou úpravou (1.2). [3]

$$|Z| = \sqrt{R^2 + X^2} \quad (1.2)$$

kde

$|Z|$ = absolútna hodnota impedancie [Ω],

R = elektrický odpor [Ω],

X = celková reaktancia náhradného modelu [Ω].

Veľkosť reaktancie sa vypočíta odčítaním indukčného a kapacitného odporu (1.3).

$$X = X_L - X_C \quad (1.3)$$

kde

X_L = indukčná reaktancia rezistora [Ω],

X_C = kapacitná reaktancia [Ω].

Pri určitej frekvencii, kedy sa reaktancie navzájom odčítajú sa dostáva rezistor do rezonancie danej tzv. Thomsonovou rovnicou (1.4).

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (1.4)$$

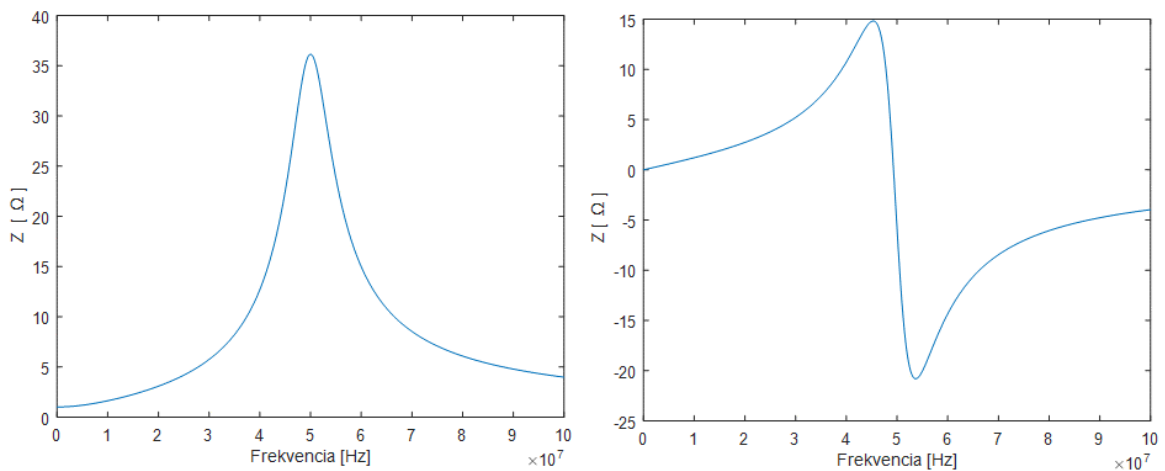
kde

f_0 = rezonančná frekvencia [Hz],

L = indukčnosť [H],

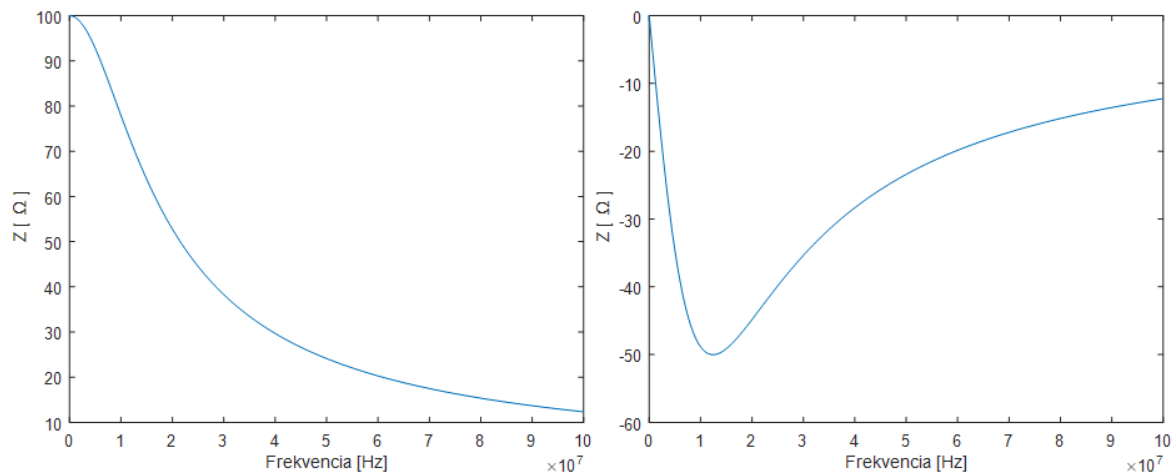
C = kapacita [F].

Rezistor sa správa v rezonancii rozdielne pre malú hodnotu odporu a pre veľkú. Na obr. 6 je znázornený priebeh impedancie pre daný frekvenčný rozsah. Pri malom odpore je najvyššia hodnota impedancie v rezonancii.



Obrázok 6 – Priebeh absolútnej hodnoty impedancie (vľavo) a reaktancie (vpravo) pri rezonancii 5 MHz pre uvažovaný odpor 1 Ω

Pri väčšej hodnote odporu 100 Ω , je najvyššia hodnota impedancie pri menších frekvenciách nezávisle na rezonančnej.



Obrázok 7 - Priebeh absolútnej hodnoty impedancie (vľavo) a reaktancie (vpravo) v okolí 5 MHz pre uvažovaný odpor 100 Ω

1.3 Odrušovacie prostriedky

Používaním odrušovacích prostriedkov sa znižuje úroveň generovaného elektromagnetického rušenia u zdrojov rušenia, jednak zvyšuje odolnosť zariadenia proti rušeniu a tým zvyšuje spoľahlivosť ich funkcie v spoločnom elektromagnetickom prostredí. [7]

Použitie jednotlivých typov odrušovacích prostriedkov má úskalía takého druhu, že ich nekvalifikovaná aplikácia môže úroveň rušenia naopak zvýšiť, alebo narušiť správnu funkciu zariadenia a vyradiť ho trvale z prevádzky, alebo ohroziť bezpečnosť obsluhujúceho človeka. Zanedbanie kvalifikovaného prístupu k riešeniu problematiky v štádiu návrhu vedie z pravidla k záveru, že náprava chýb strojí toľko, koľko samotné zariadenie. [7]

1.3.1 Tlmivka

Pod pojmom "tlmivka" sa rozumie cievka s magnetickým alebo nemagnetickým jadrom, reprezentujúca realizáciu obvodového prvku - sústredenej indukčnosti. Konštrukčné vyhotovenie a parametre tlmivky závisia od účelu jej použitia a môžu sa navzájom zásadne líšiť. Odrušovacie tlmivky sú určené pre potlačenie nežiadúceho vysoko frekvenčného rušenia (interferencia), vznikajúceho pri činnosti elektrických zariadení. [7]

Ideálna tlmivka (tlmivka bez strát a kapacity) predstavuje pre striedavý prúd indukčný odpor

$$X_L = \omega L = 2\pi fL \quad (1.5)$$

kde

X_L = indukčná reaktancia tlmivky [Ω]

L = hlavný parameter indukčnosti [H],

ω = uhlová rýchlosť [$\text{rad}\cdot\text{s}^{-1}$],

f = frekvencia [Hz].

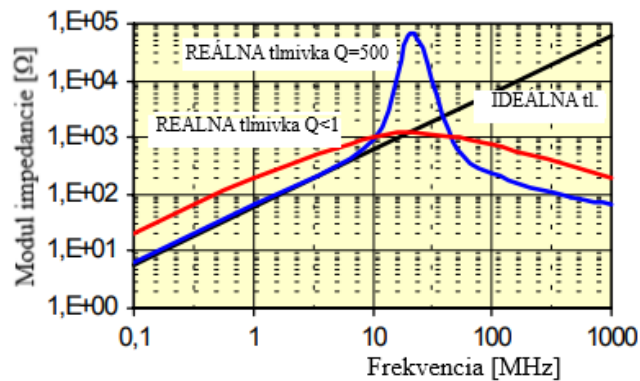
Zo vzťahu je zrejmé, že so zvyšujúcou frekvenciou narastá hradiaci účinok tlmivky. Závislosť indukčnej reaktancie na frekvencii je lineárna (obr. 8). Prúd sa nezávisle na frekvencii oneskoruje za napätím o uhol $\frac{\pi}{2}$. [7]

Zapája sa do série s vnútornou impedanciou siete Z_S a vstupnou impedanciou (odporom) napájacieho vstupu chráneného prístroja Z_Z . Podmienkou účinného potlačenia rušenia na vedení je použitie iba v *nízko impedančných systémoch*, kedy je impedancia zdroja

a prijímača rušenia oveľa menšia ako reaktancia tlmivky na frekvenciách odrušovaného pásma ($Z_z + Z_S \ll \omega L$). [8]

Ak je tlmivka vyhovujúca v určitom impedančnom systéme (napr. $Z_z \approx Z_S \approx 50\Omega$), je vyhovujúca aj v každom systéme s nižšími hodnotami impedancie zdroja a prijímača rušenia. [8]

Ideálna tlmivka = sústredená čistá indukčnosť nemôže byť nikdy fyzicky realizovaná, pretože reálna tlmivka tvorí sériovo-paralelný rezonančný obvod LCR, ktorého správanie je vďaka magnetickému jadrú nelineárne. Okrem toho väčšina parametrov tohto obvodu sú frekvenčne a teplotne závislé komplexné veličiny. [7]



Obrázok 8 – Frekvenčná závislosť impedancie ideálnej tlmivky a tlmivky s veľkým a malým Q [8]

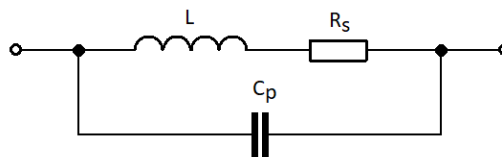
Na rozdiel od tlmiviek používaných na iné účely ako odrušovacie, musí mať odrušovacia tlmivka také parametre, ktoré zaručia jej maximálny hradiaci účinok v chránenom frekvenčnom pásme. K sledovaným vlastnostiam predovšetkým patria:

- maximálna indukčnosť L pri optimálnom počte závitov, rozmeroch, hmotnosti a cene,
- vysoká rezonančná frekvencia f_0 , tj. minimálne parazitné kapacity,
- tvar magnetického obvodu jadra a jeho permeabilita musia byť také, aby umožňovali dosiahnuť maximálnej indukčnosti pri minimálnom počte závitov,
- čo najnižší činiteľ akosti ($Q < 1$) tj. veľké činné straty,
- malý úbytok napätia ΔU voči pracovnému prúdu odrušovaného zariadenia. [7][8]

1.3.1.1 Vlastnosti tlmivky

Pri reálnom prevedení obvodového induktora musí existovať vzájomná kapacita medzi vinutím a z toho vyplýva paralelný rezonančný obvod pre induktor. Pri malých frekvenciách je kapacitor otvorený obvod, ale ako frekvencia stúpa a náhradný obvod je viac zahrnutý, reaktancia kapacitora začne dominovať. V rezonancii je paralelný rezonančný obvod otvorený a nad túto frekvenciu sa cievka správa ako kapacitor. Pre zvýšenie vhodného operačného rozsahu môže byť vinutie realizované menšie, ale to limituje veľkosť prúdu, ktorý môže tiecť cievkou. [9]

Model reálnej cievky je možné realizovať odporom vodiča R_s , z ktorého je cievka navinutá. Pri rýchlych časových zmenách prúdu sa navyše uplatňuje aj elektrické pole medzi závitmi, proti jadru, prípadne proti zemi, čo je možné modelovať pridaním ďalšieho prvku a to paralelne zapojeným kapacitorom C_p (obr. 9). Pre dosiahnutie väčšej indukčnosti sa často používajú cievky s feromagnetickými jadrami. V tomto prípade je nutné počítať aj so všetkými nepriaznivými dôsledkami hysterzie, tie možno zahrnúť tiež do rezistora. [2]



Obrázok 9 – Ekvivalentný model reálnej cievky

Veľkosť impedancie tohoto paralelného rezonančného obvodu sa počíta podľa rovnice (1.2). Pri frekvencii nižšej ako je rezonančná, je vplyv vlastnej kapacity malý a odrušovací účinok so zvyšovaním frekvencie narastá. Uplatňujú sa zložky X_L a R . Pri frekvenciách vyšších ako rezonančná frekvencia f_0 , začína prevládať kapacitná zložka X_C , celková impedancia klesá a tým aj odrušovací účinok tlmivky. Rezonančná frekvencia je daná rovnicou (1.4). Prechodom tlmivky jej vlastnou rezonanciou sa rozširuje odrušovacie pásmo, pretože nad f_0 sa tlmivka nespráva ako kapacita, ale ako frekvenčne závislý odpor, pretože úlohu indukčnej zložky preberá na seba činná zložka R . Pokles vložného útlmu je tak menej strmý. [7][8]

Pre presnú analýzu správania reálnych tlmiviek sú značne ovplyvňujúcim parametrom straty vyjadrené akosťou tlmivky.

$$Q = \frac{2\pi f_0 L}{R} = \frac{X_L}{R} \quad (1.6)$$

kde

Q = akosť tlmivky [-],

f_0 = rezonančná frekvencia [Hz],

L = vlastná indukčnosť [H],

R = celkový odpor vyjadrujúci činné straty [Ω].

Ďalším obmedzujúcim parametrom cievky je najväčší dovolený tepelný výkon, ktorý sa môže odvieť povrchom vinutia do okolia bez toho, aby sa prekročila dovolená teplota.[8]

Akost' tlmivky (Q) charakterizuje veľkosť strát a značne ovplyvňuje priebeh frekvenčnej závislosti na impedancii. Čím sú straty väčšie (menšie Q), tým je priebeh impedancie pozvoľnejší a nemá ostro vyjadrený bod vlastnej rezonancie. Na rozdiel od rádiatechnických aplikácií (rezonančné obvody), kde je cieľom dosiahnuť tlmivku s najmenšími stratami a s ostrou rezonančnou krivkou (Q čo najväčšie), v odrušovacej technike je snahou mať prechod bodom rezonancie čo najviac pozvoľný (Q čo najmenšie). [7]

1.3.2 Odrušovací kondenzátor

Podstata odrušovacieho kondenzátora je založená na jeho základnej vlastnosti, že má tým menšiu impedanciu, čím je frekvencia vyššia. Kondenzátor sa správa rôzne v obvodoch jednosmerného a striedavého elektrického prúdu. Zatiaľ čo pre jednosmerný prúd predstavuje skoro nekonečný odpor (kvalita dielektrika, izolácia medzi polepami), tak striedavý prúd môže kondenzátorom pretekať. Ale nie je to skutočný priechod prúdu ako u vodičov. Ide o striedavo nabíjajúci a vybíjajúci prúd kondenzátora. Javí sa to tak, že priechodu striedavého prúdu kladie určitý odpor, ktorý je závislý na frekvencii a kapacite kondenzátora.[2] [10]

Pre striedavý prúd predstavuje ideálny kondenzátor kapacitný odpor (1.7).

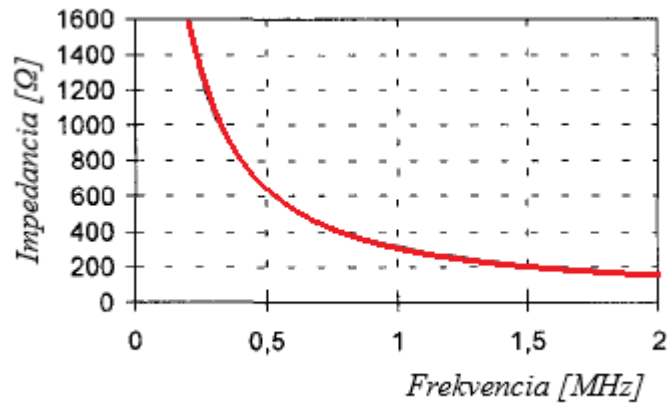
$$X_C = \frac{1}{\omega C} \quad (1.7)$$

kde

X_C = kapacitný odpor kondenzátora [Ω],

C = kapacita kondenzátora [F].

Napätie sa nezávisle na frekvencii oneskoruje za prúdom o uhol $\frac{\pi}{2}$. Pri nízkych frekvenciách ($f = 0$) sa odpor blíži k nekonečnu. Pri zvyšovaní frekvencie sa reaktancia znižuje a pri vysokej frekvencii ($f \rightarrow \infty$) sa chová ako skrat (obr. 10). [7]

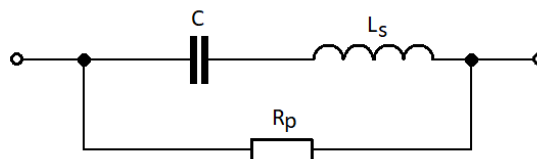


Obrázok 10 – Priebeh impedancie ideálneho kondenzátora 500pF [7]

Odrušovacie kondenzátory slúžia na potlačanie interferencie a používajú sa buď samostatne alebo v kombinácii s tlmivkami (LC) či odpormi (RC, RL). Zapája sa paralelne k vnútornej impedancii siete Z_S a vstupnú impedanciu napájacieho vstupu chráneného prístroja Z_Z . Podmienkou účinného potlačenia rušenia na vedení je použitie iba vo *vysoko impedančných systémoch*, kedy je impedancia zdroja a prijímača rušenia oveľa väčšia ako reaktancia kondenzátora na frekvenciách odrušovaného pásma ($\omega C \gg 1 / (Z_S || Z_Z)$). [8]

1.3.2.1 Vlastnosti kondenzátora

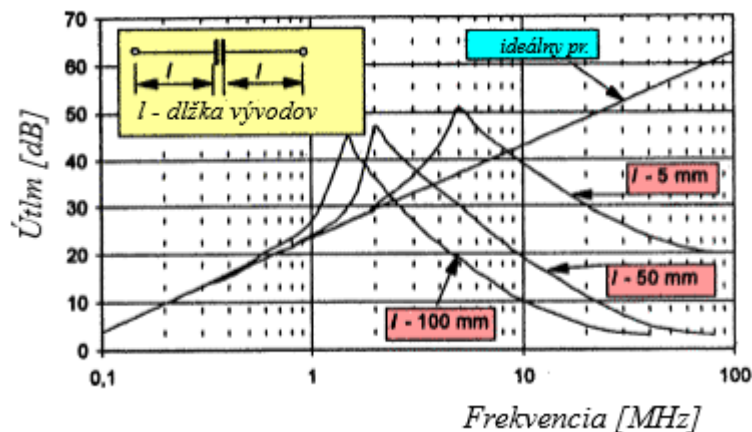
Okrem svojej dominantnej vlastnosti - kapacity - vykazuje aj ďalšie nežiadúce vlastnosti. Paralelný odpor R_p (obr. 11) v sebe zahŕňa zvodový a izolačný odpor. Zvodový odpor, označený ako vonkajší odpor, v sebe zahŕňa odpory prívodov a kontakty kapacitora. Izolačný odpor, označený ako vnútorný odpor, určený vodivosťou a stratami použitého dielektrika (istá elektrická vodivosť), meniacou sa teplotou a frekvenciou spôsobuje vznik prúdového poľa. Vo väčšine aplikáciách je považovaný vnútorný odpor za konštantný, aj keď je v rôznych materiáloch frekvenčne a teplotne závislý. [7]



Obrázok 11 – Používaný model reálneho kondenzátora

Na odrušovacie vlastnosti kondenzátorov má zásadný význam ich parazitná indukčnosť L_S , ktorá zahŕňa vnútorné indukčnosti elektród a vonkajšie indukčnosti prívodov. Indukčnosť a odpor vytvárajú parazitný rezonančný obvod, nad ktorého rezonančnou frekvenciou má odrušovací kondenzátor induktívny charakter a jeho vložený útlm s rastúcou frekvenciou klesá (obr. 12). V rezonancii je impedancia kondenzátora najnižšia a reálna. [7][8]

Vzniká sériový rezonančný obvod. Ten sa vyznačuje najnižšou hodnotou impedancie v rezonancii. Veľkosť impedancie sa počíta úpravou rovnice (1.2).

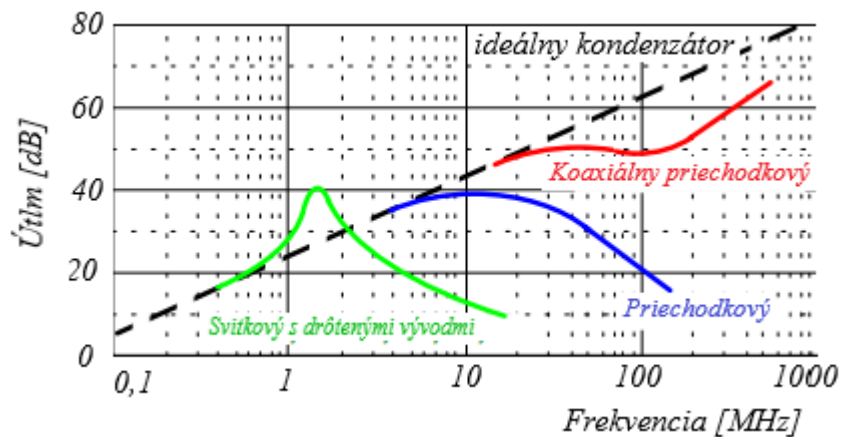


Obrázok 12 – Vplyv dĺžky vývodov dvojpólového kondenzátora 250 nF na hodnotu jeho vložného útlmu [7]

Indukčnosť priameho vodiča je približne 10 nH/m . Nasledujúce hodnoty sú vnútorné indukčnosti rôznych typov kondenzátorov s ich indukčnosťou:

- Porcelánové, keramické 1.4[nH],
- tantalové fóliové 50 [nH],
- tantalové s tuhým elektrolytom 20 [nH],
- tantalové fóliové, spájkové očka, hranaté púzdro 23 [nH][7].

Z obr. 12 je zrejmé, že čím menšia je dĺžka vývodov, tým širšie je hradiace pásmo. Dobré odrušovacie kondenzátory preto musia mať dĺžky vývodov čo najkratšie. Konštrukcia kondenzátora teda zohráva dôležitú úlohu. Z toho hľadiska sú najvýhodnejšie priechodkové a hlavne koaxiálne priechodkové kondenzátory pri frekvenciách vyšších ako 1MHz (obr. 13). Veľkosť kapacity odrušovacieho kondenzátora volíme v závislosti na frekvencii rušenia. Čím nižšia je dolná frekvencia potlačovaného pásma, tým väčšia kapacita je vyžadovaná. [8]



Obrázok 13 – Frekvenčný priebeh vložného útlmu rôznych typov kondenzátorov [8]

Parameter značne ovplyvňujúci priebeh impedancie je stratový činiteľ. Ide o funkciu kapacity vyjadrujúca vlastnosti materiálu dielektrika, pracovnej teploty, napätia, frekvencie a v istej miere aj výrobnéj technológie. [7]

$$tg\delta = R_S\omega C = \frac{R_S}{X_C} \quad (1.8)$$

kde

$tg\delta$ = stratový činiteľ [-],

R_S = celkový odpor kondenzátora [Ω],

C = kapacita kondenzátora [F],

X_C = reaktancia kondenzátora [Ω].

1.4 Prenosové vedenie

Keď cestuje vlna prenosovým vedením a dosiahne koniec, je generovaná odrazená vlna, pokiaľ nie je na konci vedenia záťaž rovnakej hodnoty impedancie ako impedancia vedenia. [9]

Konštrukčné prevedenie komponentov výrazne ovplyvňuje hodnotu rezonancie. U drôtených komponentoch sa prejavujú parazitné veličiny oveľa skôr spolu s hodnotou rezonancie.

Vo veľa aplikáciách je žiadúce mať zhodu impedancie záťaže s charakteristickou impedanciou prenosového vedenia a eliminovať odrazené vlny, aby sa maximalizovala sila do-

daná do zát'aže a minimalizovalo skreslenie a šum. Redukovanie či eliminovanie odrazených vln do zát'aže je dôležité hlavne pri vysokofrekvenčných obvodoch, ktoré pri nadmerných hodnotách môžu poškodiť generátor, tiež kvôli minimalizácii horúcich miest pozdĺž prenosového vedenia, ktoré sú spôsobené stojatými vlnami a nie prekročením kapacity prenosu energie. [9]

Reálna časť vstupnej impedancie systému vedie k strate energie kvôli nedokonalosti materiálu. Imaginárna vedie k induktívnej či kapacitnej zát'aži, ktorú štruktúra systému prezentuje. Maximum prenosu energie je dosiahnutý, keď sa vstupná impedancia systému rovná s impedanciou prenosového vedenia v rámci sledovaného frekvenčného pásma. [9]

S parametre popisujú vstupno-výstupný vzťah medzi portami v elektrickom systéme. Port môže byť definovaný ako akékoľvek miesto, kde má byť doručené napätie a prúd. Obecne, S_{MN} predstavuje prenos energie z portu M do portu N. Parameter S11 potom reprezentuje odrazenú vlnu/energiu smerujúcu z portu 1 naspäť do portu 1. Parameter S22 by reprezentoval odrazenú vlnu/energiu z portu 2 naspäť do portu 2. [16]

$$S_{11} = \frac{Z}{2Z_0 + Z} \quad (1.9)$$

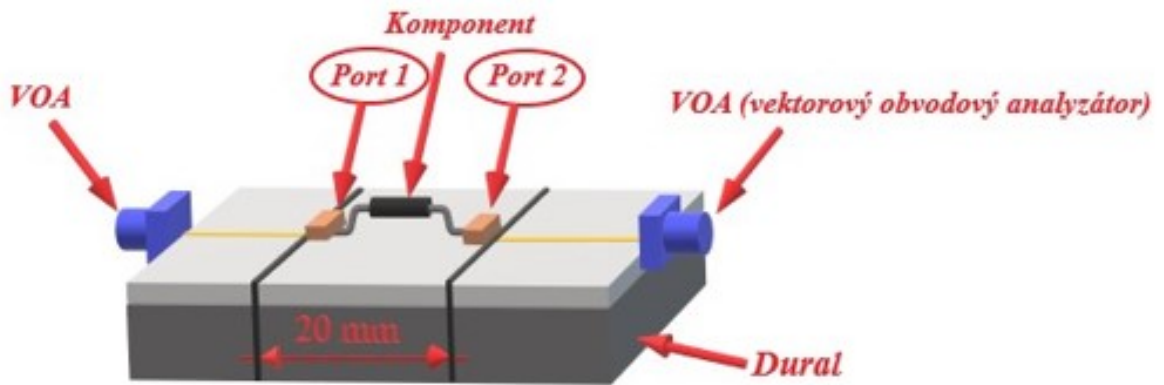
$$S_{21} = \frac{2Z_0}{2Z_0 + Z} \quad (2.0)$$

kde

Z = impedancia meraného dvoj pólu (súčiastky) [Ω],

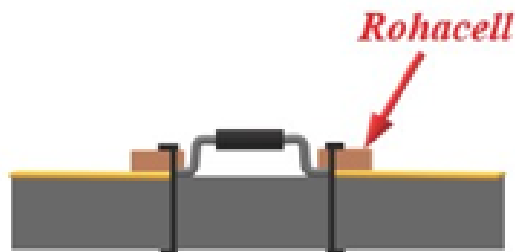
Z_0 = impedancia vedenia [Ω].

Meranie impedancie komponentov pri frekvencii do 100 MHz nie je možné realizovať meracím mostom (RLC), pretože pracuje do frekvencie 1-2 MHz. Z toho dôvodu sa meranie realizuje na VOA (vektorový obvodočný analyzátor). Meranie S parametrov je znázornené na obr. 12 (obr. 13 pôdorys). Na nevodivom substráte je vodivá cesta s odporom 50Ω , ktorá spája komponent s VOA. Nevodivý materiál Rohacell situovaný pri portoch pritláča vedenie komponenta k vodivej ceste.

Obrázok 14 – Meranie parametrov S_{11} a S_{22} na VOA

Najskôr sa uskutoční kalibrácia VOA. Následne sa zmerajú hodnoty S_{11} a S_{22} na oboch portoch a vypočíta sa impedancia.

Pri maximálnom prenose energie je hodnota S_{11} na minime. Široké pásmo systému je definované ako frekvenčný rozsah, kde je hodnota S_{11} menšia ako -10dB . V číselných hodnotách to znamená, že je v systéme nesúlad impedancie, ktorý odráža menej ako 10% energie späť do prenosového vedenia. [11]

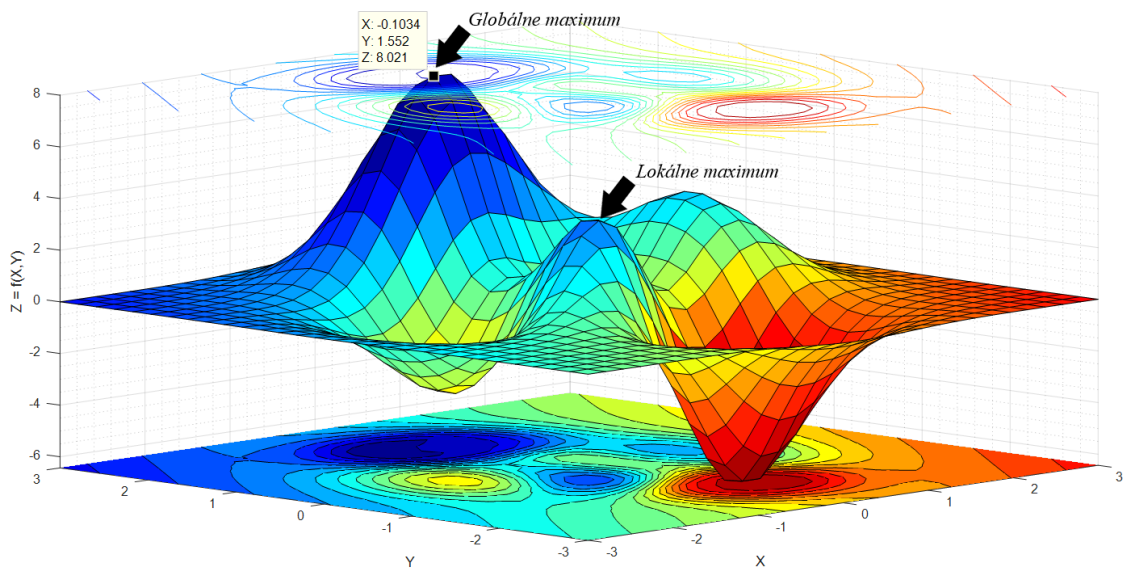
Obrázok 15 – Pôdorys meracej stanice parametrov S_{11} a S_{22}

2 OPTIMALIZÁCIA

Účelom matematickej optimalizácie je maximalizovanie alebo minimalizovanie funkcie systematickým zvolením vstupných hodnôt z povoleného rozsahu a prepočítaním hodnoty funkcie vyjadrený nasledujúcou formuláciou. [13]

Je daná funkcia $f: \mathbf{A} \rightarrow \mathbb{R}$, prvok $x_0 \in \mathbf{A}$ tak, že $f(x_0) \leq f(x)$ pre všetky $x \in \mathbf{A}$ („minimalizácia“) alebo tak, že $f(x_0) \geq f(x)$ pre všetky $x \in \mathbf{A}$ („maximalizácia“). [13]

Množina \mathbf{A} je často špecifikovaná obmedzeniami, ktoré musia prvky množiny dodržať.



Obrázok 16 – Povrch cost funkcie f pre dve dimenzie problému s vrstevnicovým zobrazením v spodnej rovine. Funkcia je daná v tomto prípade

$$f = 3(1 - x)^2 e^{-x^2 - (y+1)^2} - 10 \left(\frac{x}{5} - x^3 - y^5 \right) e^{(-x^2 - y^2)} - 1/3 e^{-(x+1)^2 - y^2}$$

Funkcia f je nazývaná objektívna, stratová, cost či fitness. Často sa vyskytuje pri modelovaní fyzikálnych javov, kde cieľová funkcia má význam energie fyzikálneho systému, ktorá má byť v rovnovážnom stave minimálna. [14]

Elektromagnetické optimalizačné problémy vo všeobecnosti zahŕňajú veľké číslo parametrov, ktoré sú skoro vždy nelineárneho charakteru. Často využívajú modely skutočného elektromagnetického fenoménu. [14]

2.1 Genetický algoritmus

Genetické algoritmy (GA) sú robustné, stochasticky založené metódy hľadania, modelované na princípoch naturálnej selekcie a evolúcie. GA dovoľuje populácií zloženej z určitého počtu individuálnych jedincov sa vyvinúť podľa špecifikovaných pravidiel vyberania do stavu, ktorý maximalizuje tzv. fitness (minimalizuje cost funkciu). [15]

Sú zvlášť efektívne, keď je cieľom nájsť približné globálne maximum vo vyšších dimenziách. Oproti konvenčným technikám sa odlišujú v nasledujúcich bodoch:

- Pracujú so skupinou (populáciou) skúšobných riešení paralelne,
- väčšinou pracujú so zakódovanými parametrami funkcie,
- používajú jednoduché stochastické operátory (selekcia, kríženie a mutácia) na nájdenie optimálneho riešenia. [15]

Pri zachovaní analógie naturálnej selekcie, postupné populácie pokusných riešení sa nazývajú generácie. Generácie sú tvorené z jedincov, ktorým je priradený tzv. fitness reprezentujúci mieru vhodnosti pre aplikované riešenie. Ďalšie generácie (GA iterácia) sú vytvorené z detí z dvoch jedincov súčasnej generácie produkovaných selektívnou reprodukciou. [15]

GA sú klasifikované ako globálne optimalizačné techniky. Rozdiel medzi lokálnymi a globálnymi je taký, že lokálne produkujú výstup vysoko závislý na počiatočných podmienkach.[14]

2.2 Roj častíc

Je tiež populačne založený algoritmus, ktorý vyvíja niekoľko potencionálnych riešení naraz. Množina riešení (častice) sa hýbe rozdielne počas každej iterácie po povrchu cost funkcie. Počas iterácií algoritmus vyhodnocuje objektívnu funkciu pre každú časticu. Častice sú definované polohou a rýchlosťou pohybu. Ďalej si každá častica pamätá svoju najlepšiu polohu. [17]

Inšpirácia pre algoritmus sú krdle vtákov, hmyzu. Každá častica je priťahovaná pod určitým uhlom k najlepšej lokácii aké doteraz našla a tiež k najlepšej lokácii akýkoľvek člen roju našiel. Po niekoľkých iteráciách a nájdení globálneho riešenia sa častice zhromaždia okolo jedného miesta a rozsah vzdialenosti medzi časticami je minimálny. [17]

II. PRAKTICKÁ ČASŤ

1 GENETICKÝ ALGORITMUS

Cieľom je za pomoci panelu nástrojov (angl. toolbox) v Matlabe pre globálnu optimalizáciu nájsť R, L, C hodnoty náhradného modelu tak, aby sa scattering parametre čo najviac priblížili vypočítanému fyzikálnemu modelu. V kódoch je implementovaná impedancia namiesto scattering parametrov, pretože vytvorí lepší povrch funkcie. Panel nástrojov globálnej optimalizácie poskytuje funkcie, ktoré hľadajú globálne riešenie viac dimenzionálneho problému.

Najskôr bol problém riešený prostredníctvom genetického algoritmu (GA). Ten sa delí na tzv. reálne a binárne GA. Binárny GA bol použitý logaritmický. V prostredí Matlab sú vytvorené tri typy .m súborov v závislosti od funkcie. V prvom type súboru je zamerané impedančné správanie konkrétneho komponentu uložené v premennej Z_MEAS. Rozumie sa tým matica vektorov pre frekvenčný rozsah 100 kHz – 100MHz. Ďalej je zvolený algoritmus pre hľadanie globálnych riešení problémov, ktoré obsahujú viac maxím alebo miním s potrebným nastavením. Jedným z parametrov je odkazovanie na tzv. cost funkciu.

V druhom súbore je iba jedna funkcia (cost), ktorá predstavuje kvadratickú chybu medzi zmeraným impedančným správaním prvku a impedanciou náhradného modelu. Výstupom je hodnota funkcie cost. Algoritmus sa systematickým spôsobom snaží o dosadenie takých hodnôt, pri ktorých by výstupná hodnota funkcia dosahovala minimálnej hodnoty (globálne minimum).

Tretí typ súboru obsahuje iba rovnicu pre výpočet impedancie paralelného/sériového rezonančného obvodu v závislosti od konkrétneho komponentu. Má tri premenné: indukčnosť, kapacitu, odpor a jeden konštantný parameter frekvenciu.

Je viac variantov cost funkcií za cieľom konvergencie generácií pre daný typ problému. Prvá cost funkcia zahŕňa iba impedanciu, v ďalšej variante je implementovaný aj výpočet akosti. V spomenutom frekvenčnom rozsahu treba zvoliť vhodný frekvenčný krok, ktorý je rozdielni v závislosti od prvku. V poslednej podobe cost funkcie je hustejšie vzorkovanie pre lepšie zaznamenanie rezonancie. V prílohe je ukážka jednej podoby týchto troch typov súborov.

1.1 Náhradné modely tlmivky

Fyzický model axiálnej tlmivky TL 22 μ H od výrobcu Fastron.

S rozsahmi parametrov udávaných výrobcom:

$$L = 1 \mu\text{H} - 330 \mu\text{H}$$

$$\text{Frekvenčný rozsah zdroja} = 8\text{MHz} - 180\text{MHz}$$

$$\text{Rozsah odporu} = 0.19 \Omega - 28 \Omega$$

Pre vhodný fyzikálny model boli zvolené nasledujúce parametre:

$$L_S = 22 \mu\text{H}$$

$$R_S = 5 \Omega$$

Rezonančná frekvencia (medzný bod hradenia) je $f_0 = 5 \text{ Mhz}$.

Zo vzorca pre rezonančnú frekvenciu je vypočítaná hodnota parazitnej kapacity C_P :

$$C_P = \frac{1}{4\pi^2 f_0^2 L_S} = \frac{1}{4\pi^2 (5 * 10^6)^2 22 * 10^{-6}} = 46.06 \text{ pF}$$

Priebeh impedancie je vypočítaný ako sériová indukčnosť a odpor s paralelnou kapacitou, kde je frekvencia konštanta:

$$Z = \frac{1}{Y} = \frac{1}{\frac{1}{R_S + j\omega L_S} + j\omega C_P} = \frac{1}{\frac{1}{5 + j2\pi f 22 * 10^{-6}} + j2\pi f 46.06 * 10^{-12}}$$

j predstavuje imaginárnu jednotku.

Ďalej je vypočítaný činiteľ akosti (Q):

$$Q_0 = \frac{\omega_0 L}{R_S} = \frac{2\pi f_0 22 * 10^{-6}}{5} = 138.23$$

Počet frekvenčných krokov je vypočítaný z medzných hodnôt frekvenčného rozsahu:

$$\Delta f = 10 \text{ kHz} = \text{citlivosť kroku}$$

$$N_P = \frac{f_{max} - f_{min}}{\text{krok}} + 1 = \frac{100 - 0.1}{0.01} + 1 = 9991 \text{ frekvenčných krokov}$$

Vypočítané hodnoty predstavujú vhodné parametre pre impedančné správanie tlmičky. Pre frekvenčný rozsah od 100 kHz do 100 MHz je vytvorený povrch cost funkcie v závislosti od dosadzovaných variabilných (RLC). Vypočítané hodnoty fyzikálneho modelu predstavujú globálne minimum funkcie. Cieľom je nájdenie globálneho minima nástrojom optimalizácie.

1.1.1 Optimalizácia binárnym GA s logaritmickým rozsahom premenných

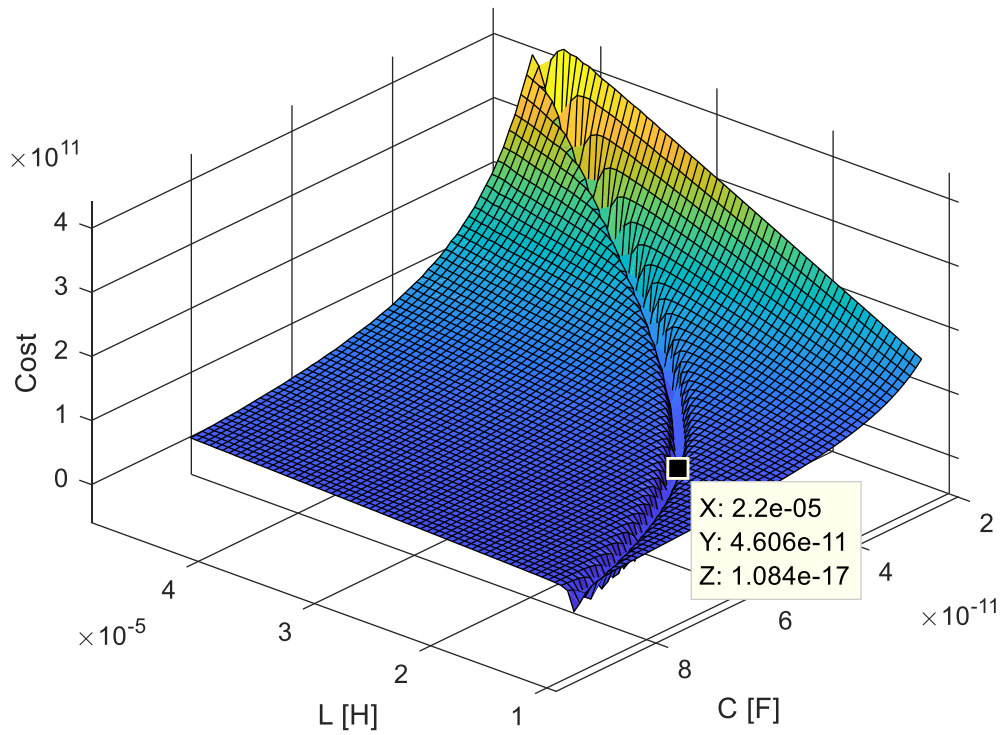
Výhodou logaritmickéj stupnice je, že umožňuje zobrazovať veličiny v rozpätí mnoho rádov. Pre tento typ problému je to vhodný postup riešenia, keď sa parametre pohybujú zároveň v mikro, nano či piko.

1.1.1.1 Kompletný náhradný model troch veličín tlmivky

Sú hľadané hodnoty troch parametrov náhradného modelu. Odporúčaná počet jedincov na jednu variabilnú je 24, v tomto prípade by ich malo byť teda 72. Tento počet je navyšený osemkrát pre vnesenie diverzity. Medze pre odpor sú $1e-2$ až $1e+2$, indukčnosť $1e-7$ až $1e-5$ a pre kapacitu $1e-12$ až $e1-9$.

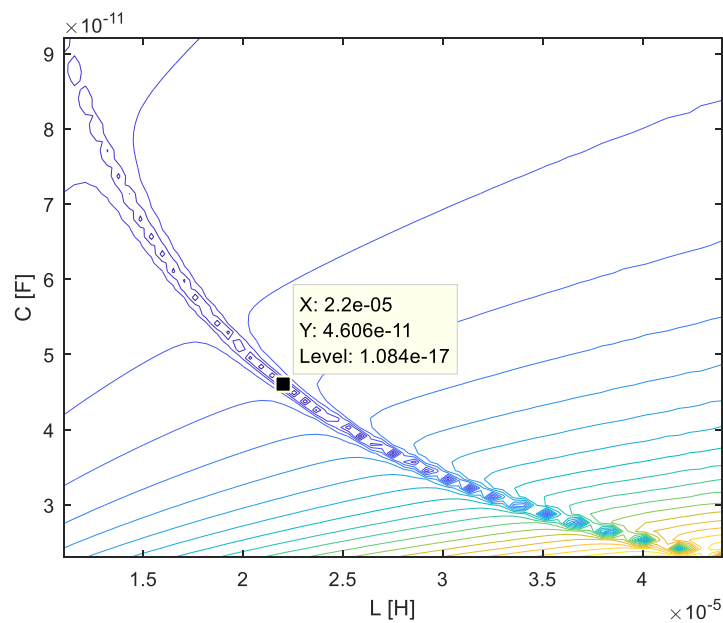
Po 250 generáciách je hodnota cost funkcie vysoká ($2,85e+10$) a hodnoty sú $R=1\Omega$ $L=6,3\ \mu\text{H}$ a $C=16,03\ \text{nF}$. Pre druhý beh boli zmenené medze $R \in < 2; 200 >$. Po 900 generáciách boli hodnoty $R=4,03$, $L=19,7\ \mu\text{H}$ a $C=51,4\ \text{pF}$. Bol spustený ešte jeden beh, kedy boli hodnoty $R=3,62\Omega$, $L=18,7\ \mu\text{H}$ a $C=54,2\ \text{pF}$.

Pre zobrazenie povrchu funkcie pre dve premenné sú vhodné obr. 17-20 s konštantným malým (5Ω) a veľkým (50Ω) odporom. V grafoch je znázornená indukčnosť, kapacita a hodnota funkcie impedancie pre frekvenčný rozsah 100kHz až 100MHz. Čierny štvorec s hodnotami parametrov zobrazuje globálne minimum.



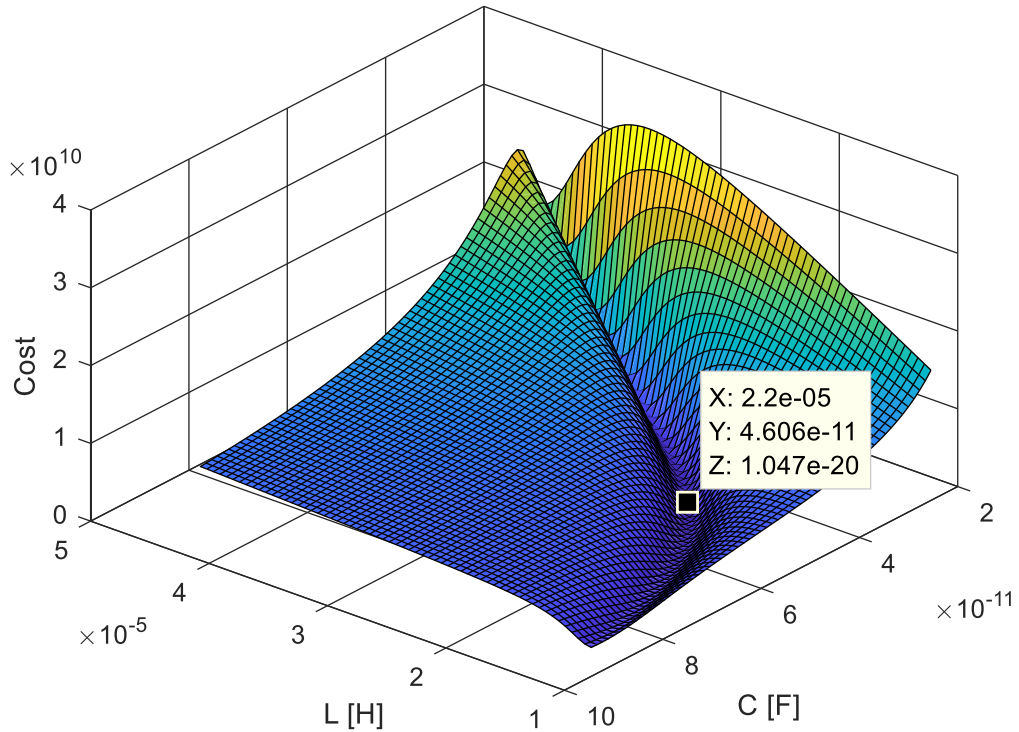
Obrázok 17 – Povrch cost funkcie pre dve premenné s uvažovaným odporom 5Ω

Ten istý povrch funkcie je zobrazený vo vrstevnicovom grafe so zaznačeným globálnym minimom. V oboch grafoch sa počíta s odporom 5Ω .



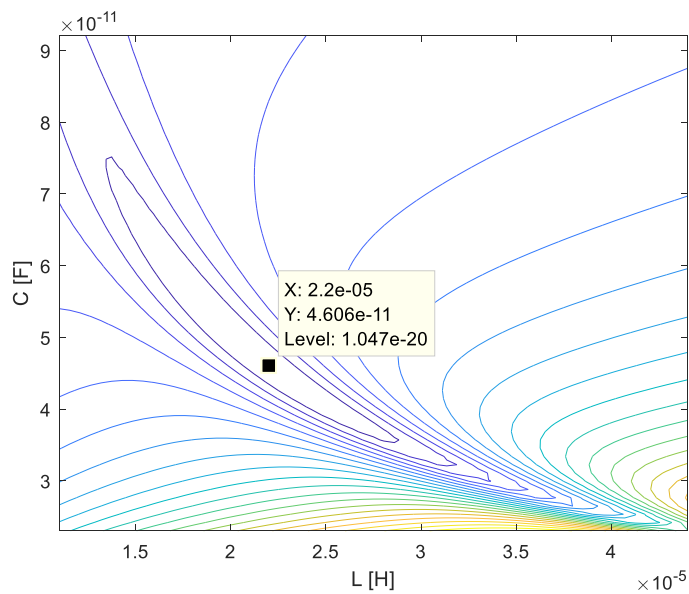
Obrázok 18 – Vrstevnicový graf pre dve premenné s odporom 5Ω

Druhý zobrazený graf s rovnakými podmienkami okrem konštantného vyššieho odporu 50Ω . Na grafoch je vidieť, že s meniacim odporom sa mení tvar údolia, nie celej funkcie.



Obrázok 19 - Povrch cost funkcie tlmivky pre dve premenné s uvažovaným odporom 50Ω

Z vrstevnicového grafu s počítaným odporom 50Ω je vidieť jasnejšie globálne minimum zobrazené čiernym štvorcem.



Obrázok 20 – Vrstevnicový graf tlmivky dvoch premenných s odporom 50Ω

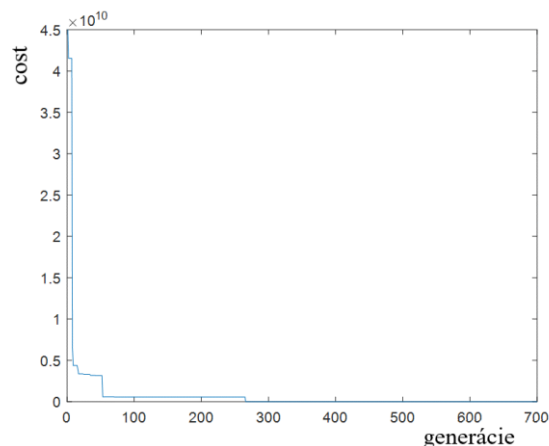
1.1.1.2 Náhradný model LC s konštantným odporom

Povrch funkcie pre dve premenné, ako bolo demonštrované vyššie, je podobný. Preto je ďalším postupom riešenia hľadanie minima dvojdimenzionálneho problému. Odpor má konštantnú hodnotu 5Ω .

Nezahrnutá akosť

Pre optimalizáciu boli zvolené nasledujúce parametre. Po navýšení jedincov v generácii ako v predošlom prípade, sa generácie síce plnili pomalšie, ale cost funkcia kvôli diverzite klesala pomerne rýchlo. Mutácia má hodnotu 0,05. Medze v prípade indukčnosti boli od $1e-6$ až $1e-3$ a pre kapacitu od $1e-12$ do $1e-6$.

Najväčší progres bol pri prvých šesťdesiatich generáciách, kedy cost klesol na $5,702e+8$. Následne vývoj stagnoval, cost funkcia klesla ešte trochu na hodnotu $5,646e+8$. Po 265 generáciách bola optimalizácia zastavená s výslednými hodnotami pre $L = 21,45\mu\text{H}$ a pre $C = 50,21\text{ pF}$. Presnejšieho výsledku nie je možné docíliť ani po navýšení iterácií.



Obrázok 21 – Vývoj cost funkcie tlmivky pre hľadané parametre L a C

Po zahrnutí akosti či hrubého vzorkovania bol vývoj od začiatku zaseknutý na rovnakej hodnote, nekonvergoval.

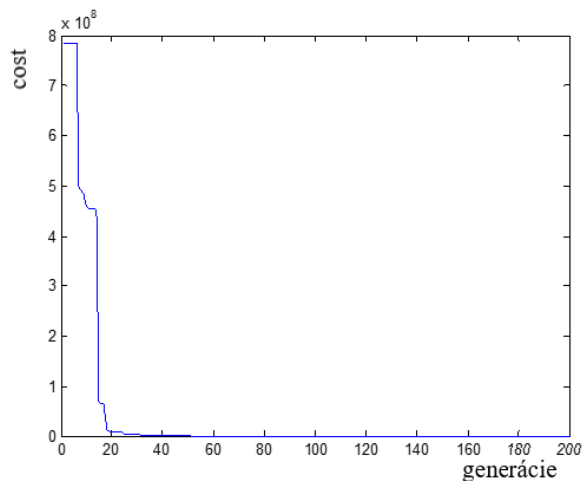
1.1.1.3 Hľadané parametre RL a RC

Nezahrnutá akosť

V prípade hľadania odporu, kde bola konštantná kapacita a v druhom prípade induknosť, konvergencia od začiatku stagnovala. Nastavenie bolo rovnaké ako predošlé, akurát boli zmenené medze. Dokonca aj v prípade nastavenia medzí pre odpor $1e-1$ až $1e+1$ zostávala výsledná hodnota odporu na hranici medze. Pri kombinácií LR boli medze pre induknosť $1e-8$ až $1e-5$ a RC $1e-12$ až $1e-5$. V danej kategórii nebolo možné docíliť konvergenie.

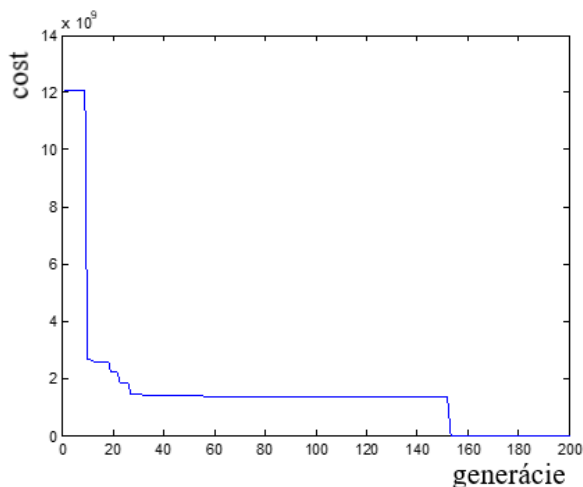
Zahrnutá akosť

Hľadané sú parametre R a C. Zahrnutím ďalšieho kritéria (Q) do cost funkcie by malo uľahčiť hľadanie minima. Prvý beh optimalizácie od začiatku stagnoval a nevyvíjal sa. Medze pre odpor boli $1e-2$ až $1e+2$ a kapacitu $1e-12$ až $1e-6$. Pred druhým behom bol počet jedincov v generácii navýšený ako pre tri dimenzie problému a vynásobený osemkrát ($24 \cdot 3 \cdot 8$). Ďalej bol zvýšený počet bitov na jeden gén z 20 na 30. Hodnota mutácie navýšená z hodnoty 0,05 na 0,1. Odpor bol navýšený na hodnotu 50Ω .



Obrázok 22 – Vývoj cost funkcie pre hľadané parametre L a R s malým odporom

Už po dvadsiatich generáciách sa hodnoty pohybovali v požadovaných hodnotách. Po približne päťdesiatich generáciách (cost $3,73e+5$) boli hodnoty $R=50\Omega$ a $C=46,06pF$. Nie je jasné, čo spôsobilo takú rýchlu konvergenciu. Bol preto spustený ešte jeden beh s rovnakým nastavením, ale s odporom 5Ω .



Obrázok 23 - Vývoj cost funkcie pre hľadané parametre L a R s veľkým odporom

Po tridsiatich generáciách (cost $1,389e+9$) sa vývoj ustálil. Výsledné hodnoty boli pre $R=5,0937\Omega$ a $C=46,13pF$, teda skoro presné. Dôvod, prečo nebolo možné nájsť presné

hodnoty je pravdepodobne kvôli malému odporu. Globálne minimum pre väčší odpor je jasnejšie a tak s tým genetika lepšie pracuje. Dosiachnutie takéhoto výsledku mohlo byť spôsobené aj predošlými dvomi behmi optimalizácie.

Hrubé vzorkovanie

Po dvoch behoch optimalizácie bez klesania cost funkcie bol spustený ešte tretí, kedy po 260 generáciách mal cost hodnotu $1,09e+9$ a hodnoty boli skoro presné. Vývoj nepokračoval. Výsledky pre odpor boli $5,0254 \Omega$ a pre kapacitu $46,06 \text{ pF}$.

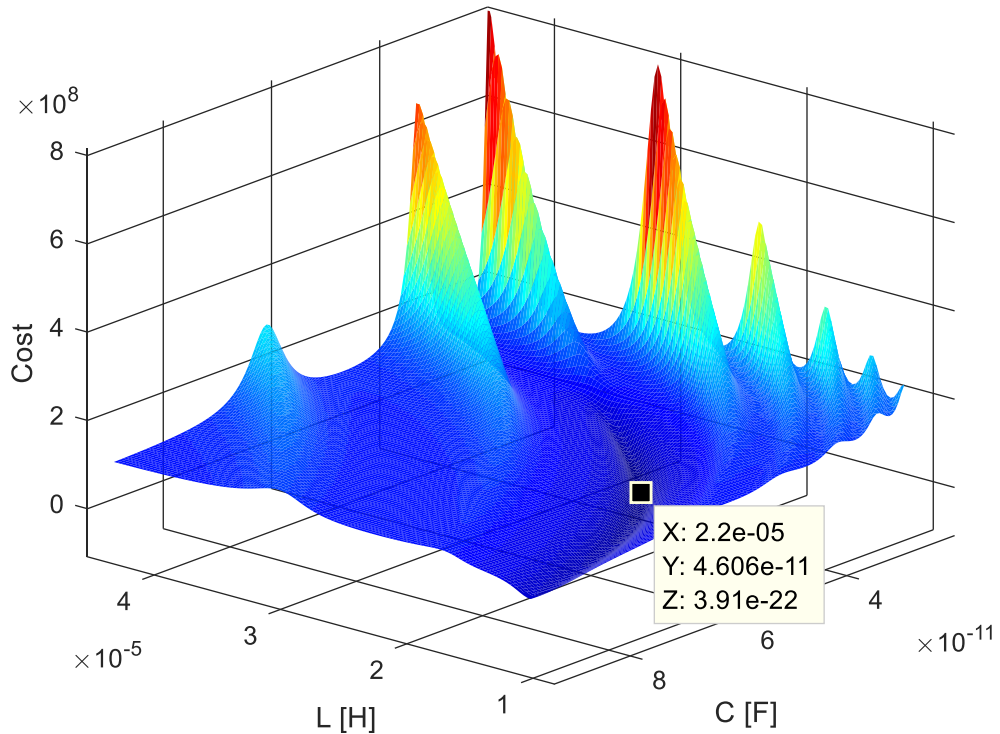
1.1.2 GA s reálnymi premennými

Je druhým typom GA, ktorému sú hodnoty posúvané v reálnych číslach a nie sú prevedené do binárnej podoby ako to bolo v predošlom prípade. Ich rozdiel nie je len v spôsobe predávaní hodnôt, ale aj pri nástrojoch vývinu optimalizácie. Genetické algoritmy sú stochastické a výsledok závisí od vhodnosti iniciálnych hodnôt konkrétnej iterácie. Preto je počet jedincov v každej generácii navýšený a konkrétny problém riešený viacerými behmi optimalizácie pre dôveryhodnosť výsledkov. Metóda selekcie je zvolená ruleta pre vnesenie náhodnosti.

1.1.2.1 Kompletný náhradný model troch veličín komponentu

Je daný trojdimenzionálny problém. Hodnoty RLC spodných medzí sú $[-10;1e-8;1e-12]$ a horných $[+10;1e-5;1e-9]$. Veľkosť populácie je navýšená osemkrát. Metóda selekcie jedincov je ruleta. Generácie sa nevyvíjajú s implementáciou akosti, bez akosti ani s hrubým

vzorkovaním. Rozdiel medzi najlepším a najhorším riešením je minimálny, populácie sú zdegenerované. Hodnoty sa nepohybovali ani v požadovaných rádoch (piko, nano).

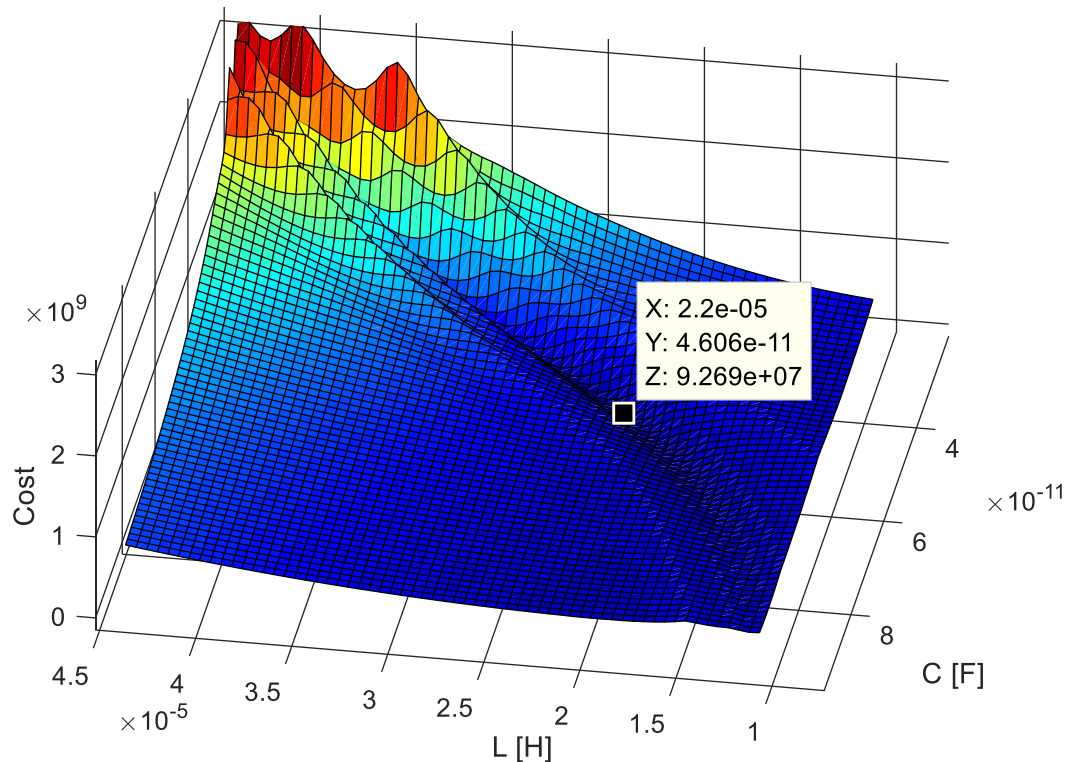


Obrázok 24 – Povrch cost funkcie cievky dvoch premenných s konštantným odporom 50Ω a hrubým vzorkovaním rezonancie

Hrubým vzorkovaním sa myslí menší frekvenčný krok v oblasti rezonančnej frekvencie. Zmenšený frekvenčný krok značne ovplyvní povrch cost funkcie (obr. 24).

1.1.2.2 Náhradný model parametrov L a C

Sú hľadané dva parametre s konštantným odporom 5Ω . Nastavenie je rovnaké okrem úpravy medzí pre dve dimenzie. Vývoj generácií od začiatku stagnuje. Ani s implementovaním druhej verzie hrubého vzorkovania pri rezonančnej frekvencii. Dôvod nie je známy.



Obrázok 25 - Povrch cost funkcie cievky dvoch premenných s konštantným odporom 50Ω a druhým typom hrubého (inteligentného) vzorkovania rezonancie

1.1.2.3 Hľadanie parametre RL a RC

Bez akosti

Pri hľadaní parametru s odporom bol vývoj lepší. Podmienky boli ako v predošlom prípade. Po troch behoch optimalizácie (hľadání RL) a vyradenia kapacity ($C=0$ v cost funkcii) sa začali generácie vyvíjať a začala klesať hodnota cost funkcia. Konvergencia bola zastavená po približne 1 100 generáciách s výslednými hodnotami odporu $4,9996 \Omega$ a indukčnosťou $21,9797 \mu\text{H}$. Cost funkcie mal hodnotu $5,49\text{e}+5$.

Hrubé vzorkovanie

V tejto kategórii generácie začali konvergovať iba pri hľadaní RC. Konvergencia skončila po 420 generáciách s výsledným, pomerne vysokým costom $8,514\text{e}+9$ a hodnotami $R=5,131 \Omega$ a $C=47,43\text{pF}$. Najlepší výsledok je prekvapivo docielený bez zahrnutia akosti a hrubého vzorkovania. So zahrnutím akosti vývoj od začiatku stagnoval v akejkol'vek kombinácii.

2 ROJ ČASTÍC

Hľadanie troch parametrov prostredníctvom genetických algoritmov nebolo úplne ideálne. Preto ako ďalší postup riešenia tohto trojdimenzionálneho problému je algoritmus roju častíc.

2.1 Náhradný model kondenzátora

Modelovanie náhradného modelu elektrolytického axiálneho kondenzátora s kapacitou 0,22 μF od výrobcu Fischer & Tausche.

Pre vhodný fyzikálny model boli zvolené nasledujúce parametre:

$$C_S = 0,22 \mu\text{F}$$

Rezonančná frekvencia (medzný bod hradenia) je $f_0 = 5 \text{ Mhz}$.

Zo vzorca pre rezonančnú frekvenciu je vypočítaná hodnota sériovej indukčnosti L_S .

$$L_P = \frac{1}{4\pi^2 f_0^2 C_S} = \frac{1}{4\pi^2 (5 * 10^6)^2 0,22 * 10^{-6}} = 4,606 \text{ nH}$$

Odpor je vypočítaný po vhodnej úprave z rovnice pre stratový činiteľ (1.8). Hodnota činiteľa akosti je vyššia a je dosadená odhadom.

$$R_P = \frac{Q}{2\pi f_0 C_P} = \frac{100}{2\pi 5 * 10^6 * 0,22 * 10^{-6}} = 14,469 \Omega$$

Priebeh impedancie je vypočítaný úpravou rovnice (1.2), ako sériová kapacita a indukčnosť s paralelným odporom, kde frekvencia je konštantna.

$$Z = \frac{1}{Y} = \frac{1}{\frac{1}{\frac{1}{j\omega C_S} + j\omega L_S} + \frac{1}{R_P}} = \frac{1}{\frac{1}{j2\pi f 22 * 10^{-6} + j2\pi f * 4,606 * 10^{-9}} + 14,469}$$

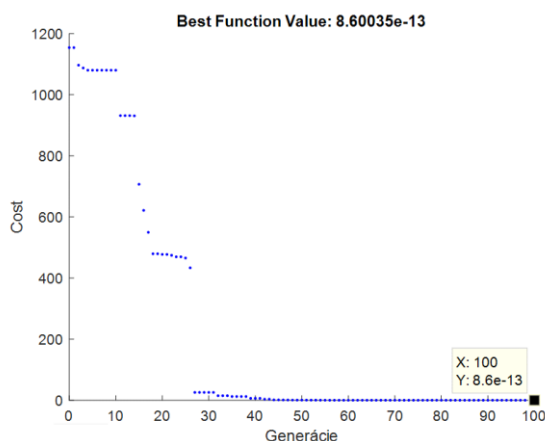
j predstavuje imaginárnu jednotku.

Počet frekvenčných krokov je vypočítaný z medzných hodnôt frekvenčného rozsahu:

$$\Delta f = 10 \text{ kHz} = \text{citlivosť kroku}$$

$$N_P = \frac{f_{max} - f_{min}}{\text{krok}} + 1 = \frac{100 - 0.1}{0.01} + 1 = 9991 \text{ frekvenčných krokov}$$

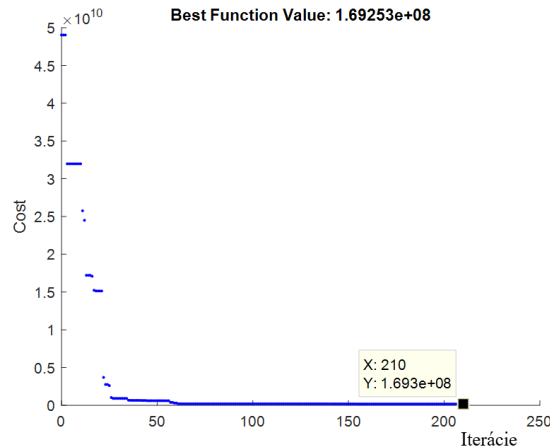
Je vytvorený vhodný fyzikálny model kondenzátora. Hľadané sú tri parametre R, L a C, ktoré majú podľa vymenovaného poradia nastavené medze pre spodnú hranicu [1e-3;1e-10;1e-8] a pre hornú hranicu [1e+3;1e-7;1e-5]. Po skončení behu optimalizácie bol výstup nasledovný. Prvý výstupný parameter bol tzv. exitflag, ktorý vráti kladný integer definujúci dôvod zastavenia algoritmu. V tomto prípade bolo vrátené číslo 1 a vyjadruje relatívnu zmenu cost hodnoty počas posledných stagnujúcich generácií (default 20), ktorá je menšia ako tolerancia funkcie (default 1e-6). Inak povedané, optimalizácia skončí, keď je zmena cost funkcie počas posledných 20 generácií menšia ako 1e-6. Hodnota cost funkcie začínala hodnotou 1154 a počas sto generácií sa vyvinula na hodnotu 8,6e-13. Výsledné hodnoty boli pre R=14,469Ω, L=4,906nH a pre kapacitu C=22μF, teda skoro presné hodnoty.



Obrázok 26 – Klesanie hodnoty cost funkcie kondenzátora naprieč generáciám

2.2 Náhradný model tlmivky

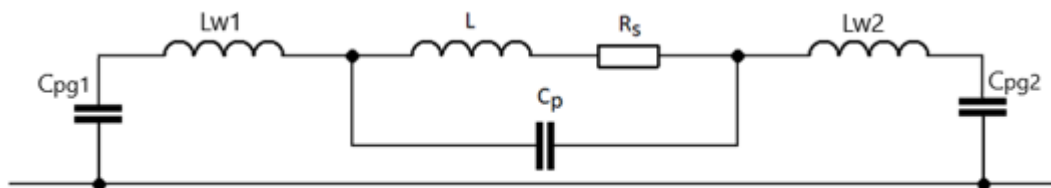
Je zvolený taký istý fyzikálny model tlmivky ako v kap. 1. Sú hľadané tri parametre RLC náhradného modelu tlmivky a ich medze podľa vymenovaného poradia sú pre spodné [1e-2;1e-7;100e-12] a pre horné [1e+2;1e-5;1e-11]. Behy optimalizácie boli zastavené kvôli malej zmene hodnoty cost funkcie. Od určitého bodu klesal cost pomaly. Preto bol navýšený počet stagnujúcich iterácií na 50 a znížená tolerancia zmeny funkcie o dva rády (1e-8). Po dvesto iteráciách boli hodnoty R=5,63275Ω, L=23,4716μH a C=43,172pF.



Obrázok 27 – Vývoj cost funkcie naprieč iteráciám

2.2.1 Rozšírený náhradný model tlmivky

Ekvivalentný model rozšírenej reálnej tlmivky, okrem toho, že je to paralelný rezonančný obvod, v sebe zahŕňa aj ďalšie parametre. Zahŕňa indukčnosti prívodov a kapacity oproti zemi. Vzniká tak obvod s dvomi slučkami. Prvú slučku tvorí samotný paralelný obvod tlmivky s indukčnosťou prívodov a druhá tvorí paralelné kapacity oproti zemi.



Obrázok 28 – Rozšírený náhradný model tlmivky so zahrnutou indukčnosťou prívodov a kapacity oproti zemi C_{pg}

Hodnota impedancie samotnej tlmivky indukčnosti $0,22 \mu\text{H}$ je vypočítaná v (kap. 1.1). Kapacity odporov oproti zemi a indukčnosti sú nasledujúce.

$$C_{pg/m} = \frac{1}{\frac{c}{\sqrt{\epsilon_v}} Z} e_L = \frac{1}{\frac{3 * 10^8}{\sqrt{4,2}} 50} 0,01 = 1,366 \left[\frac{\text{pF}}{\text{m}} \right]$$

$$C_p = 0,0136 \text{ pF}/10\text{mm}$$

kde

c = rýchlosť svetla [m/s],

Z = impedancia vedenia [Ω],

e_L = dĺžka vedenia [m],

ϵ_v = relatívna permitivita materiálu [-].

$$L_{Wm} = \frac{1}{c} Z_{e_w} = \frac{1}{\frac{3 * 10^8}{\sqrt{\epsilon_v}}} 50 * 0,01 = 3,42 \left[\frac{nH}{m} \right]$$

$$L_W = 0,0342 \text{ nH}/10\text{mm}$$

Prvá slučka sa počíta ako sériová indukčnosť prívodov, ku ktorej sa pripočíta impedancia samotnej cievky.

$$Z_{B1} = 2Z_W + Z_{CIEVKY} = \text{impedancia prvej slučky}$$

Indukčnosť prívodov sa vypočíta ako ideálny indukčný odpor vypočítaný z rovnice (1.5).

Druhá slučka predstavuje výpočet paralelnej kapacity dvoch kondenzátorov.

$$Z_{B2} = 2Z_{cg} = \text{impedancia druhej slučky}$$

Hodnota jedného kondenzátora oproti zemi sa vypočíta z rovnice (1.7) pre kapacitný odpor.

Celková hodnota impedancie týchto dvoch slučiek sa vypočíta paralelným zapojením.

$$Z_{celkova} = \frac{Z_{B1}Z_{B2}}{Z_{B1} + Z_{B2}} = \text{celková impedancia náhradného obvodu}$$

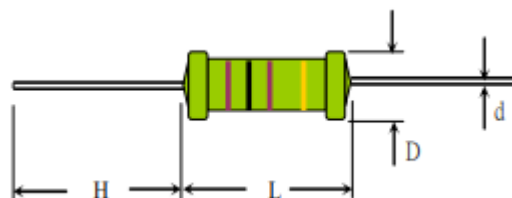
Nastavenie medzí bolo nasledovné $R \in < 1e - 2; 1e + 2 >$, $L \in < 1e - 12; 1e - 5 >$ a $C \in < 1e - 13; 1e - 10 >$. Po 101 iteráciách boli nájdené hodnoty pre $R=4,472\Omega$, $L=21,79 \mu\text{H}$ a $C=47,58\text{pF}$.

2.3 Náhradný model rezistora

Je daný fyzikálny model reálneho rezistora s hodnotou odporu 1Ω s tromi premennými a boli zvolené nasledujúce parametre.

$$R_S = 1 \Omega$$

Indukčnosť na 1 mm rezistora je približne 1 nH.



Obrázok 29 – Rezistor so znázorenými časťami konštrukcie

Sú dané dve dĺžky prívodov $H = 2 * 7 \text{ mm} = 14 \text{ mm}$. Dĺžka komponentu bez prívodov $L = 5 \text{ mm}$.

$$L_p \doteq 19 \text{ nH} \doteq 20 \text{ nH} = \text{celková hodnota indukčnosti rezistora}$$

Z rovnice (1.4) je vypočítaná kapacita paralelného kapacitora.

$$C_p = \frac{1}{4\pi^2 f_0^2 L_p} = \frac{1}{4\pi^2 (5 * 10^6)^2 * 19 * 10^{-9}} = 0,5334 \text{ nF}$$

Priebeh impedancie je vypočítaný úpravou rovnice (1.2) ako sériový odpor a indukčnosť s paralelným odporom, kde frekvencia je konštanta.

$$Z = \frac{1}{Y} = \frac{1}{\frac{1}{j\omega L_s + R_s} + j\omega C_p} = \frac{1}{\frac{1}{5 + j2\pi f 20 * 10^{-9}} + j2\pi f 0,5334 * 10^{-9}}$$

j predstavuje imaginárnu jednotku.

$$Q \doteq \frac{\omega_0 L_s}{R} = \frac{2\pi 50 * 10^6 * 20 * 10^{-9}}{1} = 6,28$$

Počet frekvenčných krokov je vypočítaný z medzných hodnôt frekvenčného rozsahu a citlivosť kroku zvolená 100 kHz.

$$N_p = \frac{f_{max} - f_{min}}{krok} + 1 = \frac{100 - 0.1}{0.1} + 1 = 1000 \text{ frekvenčných krokov}$$

Po 67 iteráciách bola optimalizácia zastavená kvôli malej zmene hodnoty cost počas 40 iterácií. Medze boli nasledujúce $R \in < 1e - 2; 1e + 2 >$, $L \in < 1e - 12; 1e - 4 >$, $C < 1e - 12; 1e - 4 >$. Výsledné hodnoty boli $R=1\Omega$, $L=8,98\text{nH}$ a pre $C=0,59\mu\text{F}$.

3 ZHRNUTIE VÝSLEDKOV

V nasledujúcich tabuľkách sú je zhrnutie dosiahnutých výsledkov pre rôzne náhradné modely vrátane rýchlosti dosiahnutého výsledku. Červené kríže vyjadrujú, že v danej kategórii nebolo možné docieľiť konvergencie. Zelené značky začiatku prezentujú úspešnú konvergenciu presného či skoro presného výsledku. Farebné pozadie je vo vzťahu s rýchlosťou dosiahnutých výsledkov. U zeleného pozadia boli výsledky dosiahnuté v rozsahu iterácií/generácií = $gen \in < 0; 100 >$, u oranžového $gen \in < 101; 500 >$ a u červeného $gen \in < 501; 1500 >$. Prvá tabuľka s týka GA a druhá PSO.

Tabuľka 1 – Vyhodnotenie konvergencie pre rôzne náhradné modely a implementácie cost funkcie

		TLMIVKA					
		GA s reálnymi premennými			Binárny GA s logaritmickým rozsahom premenných		
		Zahrnuté Q	Nezahrnuté Q	Hrubé vzorkovanie	Zahrnuté Q	Nezahrnuté Q	Hrubé vzorkovanie
Hľadané parametre	LC	✗	✗	✗	✗	✓	✗
	RL a RC	✗	✓	✓	✓	✗	✓
	RLC	✗	✗	✗	✓	✓	✓

Parametre boli najskôr hľadané prostredníctvom GA s reálnymi premennými. Požadované výsledky boli docielené po vhodnej úprave cost funkcie iba pre dvojdimenzionálny problém hľadaného odporu a indukčnosti alebo kapacity. V ostatných kategóriách nebolo možné docieľiť konvergencie. Ďalší postup riešenia problému bol prostredníctvom binárnych GA s logaritmickým rozsahom premenných. V tejto kategórii bol častokrát najväčší progres konvergencie pri začiatkových generáciách, kedy klesla hodnota cost funkcie skokom. Hodnoty náhradného modelu troch dimenzií boli docielené po viac generáciách (>1000).

Pri PSO nebol problém dosiahnuť konvergencie hneď pre tri parametre náhradných modelov komponentov. Vytvorené boli modely pre všetky tri základné pasívne komponenty. Požadované hodnoty boli nájdené v malom rozmedzí <40;80> iterácií, ktoré sa líšili každým behom a preto nemá význam ich kategorizovať podľa rýchlosti.

Tabuľka 2 – Dosiahnutie výsledkov PSO algoritmom

	PSO
Cievka	✓
Kondenzátor	✓
Rezistor	✓

3.1 Porovnanie priebehu impedancie reálneho modelu s náhradným

1) Zmeraná fyzikálny model tlmivky (Z-MEAS)

$$R=5 \Omega$$

$$L=22\mu\text{H}$$

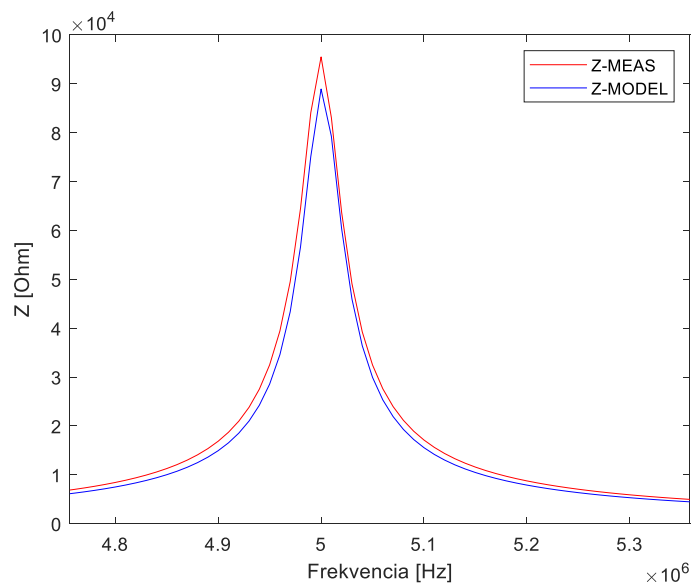
$$C=46,06\text{pF}$$

a) Náhradný model tlmivky vytvorený bin. GA

$$R=4.3 \Omega$$

$$L=19.7 \mu\text{H}$$

$$C=51.41\text{pF}$$



Obrázok 30 – Priebeh impedancie fyz. modelu zmeraných hodnôt (červená) a náhradného modelu tlmivky

b) Rozšírený a jednoduchý náhradný model tlmivky vytvorený PSO

Náhradný model tlmivky (Z-MODEL1).

$$R=3,62\Omega$$

$$L=18,7\mu\text{H}$$

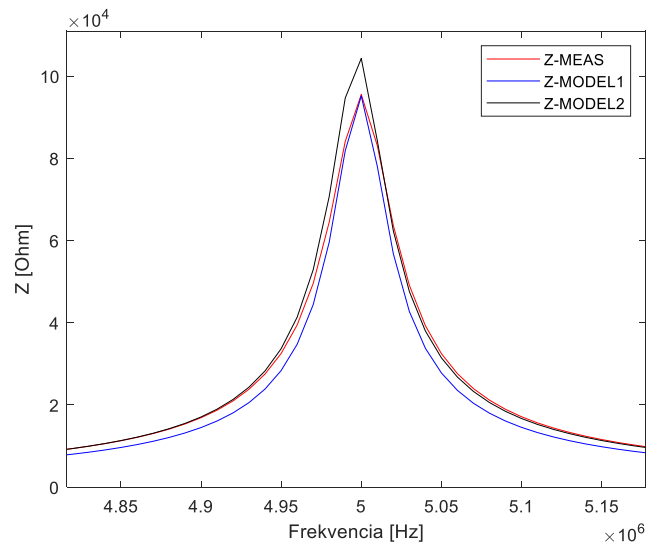
$$C=54,56\text{pF}$$

Náhradný model zložitej tlmivky (Z-MODEL2).

$$R=4,471\Omega$$

$$L=2,2\mu\text{H}$$

$$C= 46,56\text{pF}$$



Obrázok 31 – Priebeh impedancie zmeraného modelu (červená), jednoduchej cievky (modrá) a zložitej cievky (čierna)

2) Zmeraný fyzikálny model kondenzátora (Z-MEAS)

$$R=14,469 \Omega$$

$$L=4,606\text{nH}$$

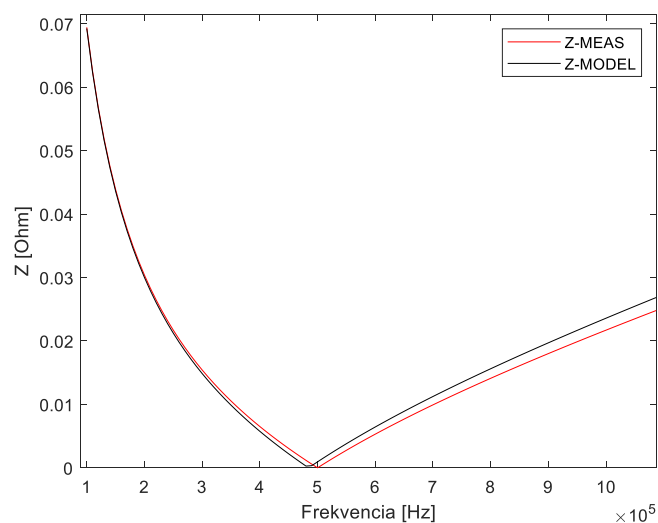
$$C=0,22\mu\text{F}$$

a) Náhradný model kondenzátora vytvorený GA (Z-MODEL)

$$R=14,469\Omega$$

$$L=4,906\text{nH}$$

$$C=0,22\mu\text{F}$$



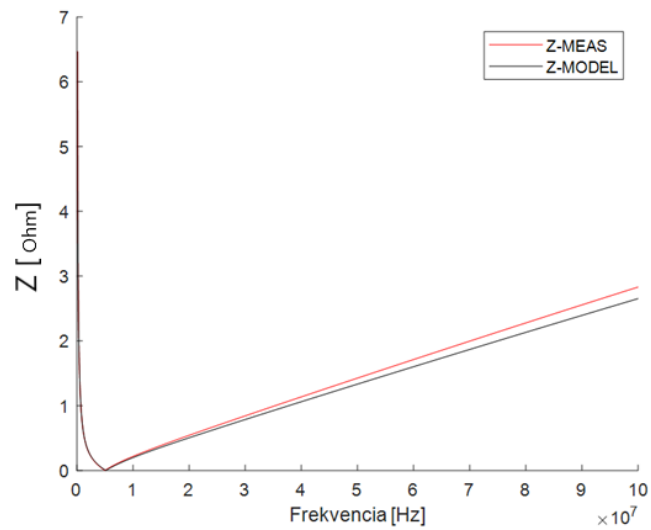
Obrázok 32 – Priebeh impedancie kondenzátora zmeraného fyz. modelu (Z-MEAS) a náhradného modelu (Z-MODEL)

b) Náhradný model kondenzátora vytvorený PSO (Z-MODEL)

$$R=14,469\Omega$$

$$L=4,326\text{nH}$$

$$C=0,22\ \mu\text{F}$$



Obrázok 33 - Priebeh impedancie kondenzátora zmeraného fyz. modelu (Z-MEAS) a náhradného modelu (Z-MODEL)

3) Zmeraný fyzikálny model rezistora (Z-MEAS)

$$R=1\ \Omega$$

$$L=19\text{nH}$$

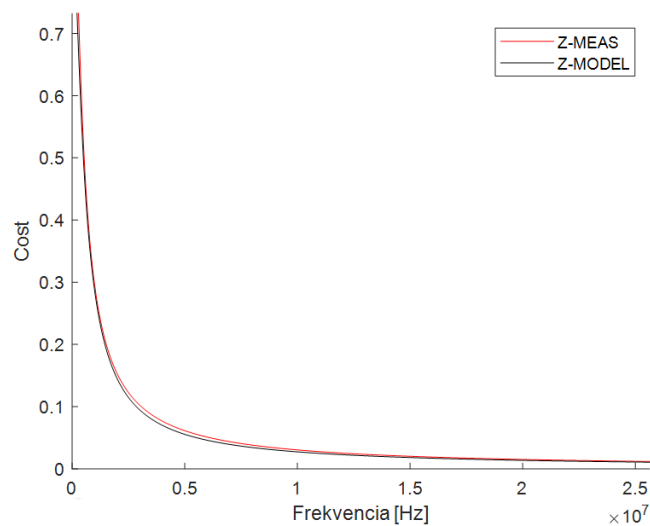
$$C=0,533\mu\text{F}$$

a) Náhradný model rezistora vytvorený PSO (Z-MODEL)

$$R=1\ \Omega$$

$$L=8,98\text{nH}$$

$$C=0,590\mu\text{F}$$



Obrázok 34 - Priebeh impedancie rezistora zmeraného fyz. modelu (Z-MEAS) a náhradného modelu (Z-MODEL)

ZÁVER

Cieľom práce bolo hľadanie troch parametrov náhradných modelov pasívnych komponentov tak, aby sa výsledné hodnoty čo najviac priblížili nameraným hodnotám fyzikálneho modelu.

Prostredníctvom nástrojov globálnej optimalizácie boli aplikované tri algoritmy na daný problém. GA s reálnymi premennými pre niektoré druhy problému a kritériálnych funkcií nekonverguje, ani po implementácii ďalšieho kritéria (akosti) a inteligentného vzorkovania pri rezonančnej frekvencii (výrazná zmena povrchu cost funkcie). Môže to byť spôsobené charakterom kritériálnej funkcie, ktorá vykazuje celú radu lokálnych miním s jedným globálnym, ktorý je situovaný v určitom „kaňone“.

Ďalší použitý typ algoritmu, binárny GA s logaritmickými premennými, vykazoval lepšie výsledky a dosahuje konvergencie. Pravdepodobne to je spôsobené veľkým rozdielom rádov premenných, s ktorými algoritmus pracuje. Hodnoty troch premenných algoritmus našiel, aj keď to trvalo dlhšie (viac ako tisíc generácií). Pri hľadaní malého odporu mali algoritmy problém nájsť globálne minimum. Napríklad tlmivka má pri menšom odpore celú radu lokálnych miním vyjadrených ostrými bodmi. So zvyšovaním odporu sa tieto body zlejú. To umožňuje GA lepší vývoj a dopracovanie sa k výsledku.

Algoritmom roju častíc bolo možné nájsť cieľové hodnoty už pri málo generáciách (menej ako sto iterácií). Nebolo treba upravovať podobu cost funkcie ako v predchádzajúcich prípadoch. Boli nájdené požadované tri parametre náhradných modelov rezistora, kondenzátora, tlmivky a zložitejšieho obvodu tlmivky. Rój častíc pracuje s takýmto typom problému lepšie ako GA kvôli spôsobe pohybu častíc a poradí si viacerými lokálnymi minimami. Na základe priebehu impedancie boli náhradné modely porovnané so zmeranými fyzikálnymi modelmi pre demonštráciu priblíženia parametrov.

ZOZNAM POUŽITEJ LITERATURY

- [1] DEDKOVÁ, Jarmila a Jiří SEDLÁČEK. *Elektrotechnický seminář*. Brno: VUTIUM, 2003, s. 8-16. ISBN 80-214-2466-4.
- [2] BRANČÍK, Lubomír. *Elektrotechnika 1*. Brno: VUTIUM, 2004, s. 26-38. ISBN 80-214-2607-1.
- [3] Impedance. Wikipedia [online]. Praha, 2018 [cit. 2019-05-13]. Dostupné z: <https://cs.wikipedia.org/wiki/Impedance>
- [4] Vytlačená obvodová doska. Eurocircuits [online]. Belgium, 2015 [cit. 2019-05-12]. Dostupné z: <https://www.eurocircuit.com/pcb-printed-circuit-board/>
- [5] Základné princípy PCB montáže. *EPrPartner* [online]. Great Britain, 2012 [cit. 2019-05-12]. Dostupné z: <https://eprpartner.com/through-hole-vs-surface-mounted/>
- [6] Montáž drôtenými vývodmi vs povrchová montáž. Telancorp [online]. USA, 2017 [cit. 2019-05-12]. Dostupné z: https://telancorp.com/print_through-hole-vs-surface-mount/
- [7] Identifikácia el. komponentov [online]. Belgium, 2013 [cit. 2019-05-12]. Dostupné z: <https://www.wellpcb.com/special/identifying-circuit-board-parts.html>
- [8] VACULÍKOVÁ, Polina a Emil VACULÍK. Elektromagnetická kompatibilita elektrotechnických systémov. Praha: GRADA, 1998, s. 173-230. ISBN 80-7169-568-8.
- [9] SVAČINA, Jiří. Elektromagnetická kompatibilita. Brno: VUTIUM, 2001, s. 35-45. ISBN 80-214-1873-7.
- [10] BANSAL, Rajeev. Handbook of engineering electromagnetics. New York: Marcel Dekker, 2004, s. 223-568. ISBN 0-8247-5628-2.
- [11] Kapacitný odpor [online]. 2005 [cit. 2019-05-12]. Dostupné z: http://oklike.c-a-v.com/soubory/kapac_odpor.htm
- [12] RAIDA, Zbyněk, Dušan ČERNOHORSKÝ a Zdenek NOVÁČEK. Elektromagnetické vlny a vedení. Brno: VUTIUM, 1999, s. 27-32. ISBN 80-214-1261-5.
- [13] Mathematical optimization. Wikipedia [online]. [cit. 2019-05-14]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Mathematical_optimization
- [14] HAUPT, Randy a Sue HAUPT. Practical genetic algorithms. 2. dopl. vyd. Canada: JOHN WILEY, 2004. ISBN 0-471-45565-2.
- [15] JOHNSON, J. Genetic algorithms in engineering electromagnetics. IEEEExplore [online]. 1997, (39), 7 - 21 [cit. 2019-05-14]. Dostupné z: <https://ieeexplore.ieee.org/document/632992>

- [16] S-parameters. *Antenna theory* [online]. Canada, 2008 [cit. 2019-05-17]. Dostupné z: <http://www.antenna-theory.com/definitions/sparameters.php>
- [17] What is particle swarm optimization. Matlab [online]. 2017 [cit. 2019-05-21]. Dostupné z: <https://www.mathworks.com/help/gads/what-is-particle-swarm-optimization.html>

ZOZNAM POUŽITÝCH SYMBOLOV A SKRATIEK

Φ Magnetický indukčný tok

Ω Ohm

H Henry

V Volt

A Ampér

F Farad

H Henry

Hz Hertz

Rad.s⁻¹ Radián za sekundu

EMI Electromagnetic interference (elektromagnetické rušenie)

EMC Electromagnetic compatibility (elektromagnetická kompatibilita)

φ Fázový rozdiel

m Meter

mm Milimeter

ZOZNAM OBRÁZKOV

Obrázok 1 – Charakteristiky ideálnych prvkov [2]	9
Obrázok 2 – Charakteristiky ideálnych prvkov	9
Obrázok 3 – Montáž drôtenými vývodmi [3]	10
Obrázok 4 – PCB vytvorená technológiou povrchovej montáže [5]	11
Obrázok 5 – Ekvivalentný model reálneho rezistora.....	13
Obrázok 6 – Priebeh absolútnej hodnoty impedancie (vľavo) a reaktancie (vpravo) pri rezonancii 5 MHz pre uvažovaný odpor 1 Ω	14
Obrázok 7 - Priebeh absolútnej hodnoty impedancie (vľavo) a reaktancie (vpravo) v okolí 5 MHz pre uvažovaný odpor 100 Ω	14
Obrázok 8 – Frekvenčná závislosť impedancie ideálnej tlmivky a tlmivky s veľkým a malým Q [8]	16
Obrázok 9 – Ekvivalentný model reálnej cievky.....	17
Obrázok 10 – Priebeh impedancie ideálneho kondenzátora 500pF [7]	19
Obrázok 11 – Používaný model reálneho kondenzátora	19
Obrázok 12 – Vplyv dĺžky vývodov dvoj pólového kondenzátora 250 nF na hodnotu jeho vložného útlmu [7]	20
Obrázok 13 – Frekvenčný priebeh vložného útlmu rôznych typov kondenzátorov [8]	21
Obrázok 14 – Meranie parametrov S11 a S22 na VOA	23
Obrázok 15 – Pôdorys meracej stanice parametrov S11 a S22	23
Obrázok 16 – Povrch cost funkcie f pre dve dimenzie problému s vrstevnicovým zobrazením v spodnej rovine. Funkcia je daná v tomto prípade	24
Obrázok 17 – Povrch cost funkcie pre dve premenné s uvažovaným odporom 5 Ω ..	30
Obrázok 18 – Vrstevnicový graf pre dve premenné s odporom 5 Ω	30
Obrázok 19 - Povrch cost funkcie tlmivky pre dve premenné s uvažovaným odporom 50 Ω	31
Obrázok 20 – Vrstevnicový graf tlmivky dvoch premenných s odporom 50 Ω	31
Obrázok 21 – Vývoj cost funkcie tlmivky pre hľadané parametre L a C.....	32
Obrázok 22 – Vývoj cost funkcie pre hľadané parametre L a R s malým odporom ..	33
Obrázok 23 - Vývoj cost funkcie pre hľadané parametre L a R s veľkým odporom ..	33
Obrázok 24 – Povrch cost funkcie cievky dvoch premenných s konštantným odporom 50 Ω a hrubým vzorkovaním rezonancie	35

Obrázok 25 - Povrch cost funkcie cievky dvoch premenných s konštantným odporom 50 Ω a druhým typom hrubého (inteligentného) vzorkovania rezonancie.....	36
Obrázok 26 – Klesanie hodnoty cost funkcie kondenzátora naprieč generáciám	38
Obrázok 28 – Vývoj cost funkcie naprieč iteráciám.....	39
Obrázok 29 – Rozšírený náhradný model tlmivky so zahrnutou indukčnosťou prívodov a kapacity proti zemi C_{pg}	39
Obrázok 30 – Rezistor so znázornenými časťami konštrukcie.....	40
Obrázok 31 – Priebeh impedancie fyz. modelu zmeraných hodnôt (červená) a náhradného modelu tlmivky	43
Obrázok 32 – Priebeh impedancie zmeraného modelu (červená), jednoduchej cievky (modrá) a zložitej cievky (čierna)	44
Obrázok 33 – Priebeh impedancie kondenzátora zmeraného fyz. modelu (Z-MEAS) a náhradného modelu (Z-MODEL).....	44
Obrázok 34 - Priebeh impedancie kondenzátora zmeraného fyz. modelu (Z-MEAS) a náhradného modelu (Z-MODEL).....	45
Obrázok 35 - Priebeh impedancie rezistora zmeraného fyz. modelu (Z-MEAS) a náhradného modelu (Z-MODEL).....	45

ZOZNAM TABULIEK

Tabuľka 1 – Vyhodnotenie konvergenzie pre rôzne náhradné modely a implementácie cost funkcie.....	42
Tabuľka 2 – Dosiahnutie výsledkov PSO algoritmom	42

ZOZNAM PRÍLOH

PRÍLOHA P1:Jedna z podôb (GA s reálnymi premennými) optimalizácie zdrojových kódov v troch typoch súborov (.m) v závislosti od ich funkcie.

.....54

PRÍLOHA P2: Všetky zdrojové kódy sú uložené na priloženom DVD

PRÍLOHA P1: Jedna z podôb (GA s reálnymi premennými) optimalizácie zdrojových kódov v troch typoch súborov (.m) v závislosti od ich funkcie.

- a) Súbor (GA_sQ) pre zvolenie optimalizačného algoritmu vrátane jeho nastavenia a zameraného impedančného správania komponentu v premennej Z_MEAS.

```
function GA_sQ
global Constants;
Constants=cell(1,2);
nvars = 3;
LB = [1e-2;1e-8;1e-12];
UB = [1e+2;1e-5;1e-8];
options = gaoptimset('PopulationSize',48*4*8,'SelectionFcn',...
@selectionroulette,'Generations',800,'Display','iter','PlotFcns',...
@gaplotbestindiv,'Mutation',@mutationadaptfeasible,...
'TolFun',1e-9,'StallGenLimit',500,'StallTimeLimit',1e9);
Rs=5;
Ls=22*1e-6;
Cp=46.06*1e-12;
ff=linspace(0.1*1e6,100*1e6,9991);
Z_MEAS = impd_civky(ff,Ls,Cp,Rs);
omg0_MEAS=1/sqrt(Ls*Cp);
Q_MEAS=omg0_MEAS*Ls/Rs;
Constants{1}=ff;
Constants{2}=Z_MEAS;
Constants{3}=Q_MEAS;
Constants{4}=omg0_MEAS;
[x] = ga(@cost_sQ,nvars,[],[],[],[],LB,UB,[],options);
fprintf(' R=%g [ohm]\n',x(1));
fprintf(' L=%g [nH] \n',x(2)/1e-9);
fprintf(' C=%g [pF] \n',x(2)/1e-12);
```

- b) Cost funkcia so zahrnutou akosťou

```
function costi = cost_sQ(x)
global Constants;
ff=Constants{1};
Z_MEAS=Constants{2};
Q_MEAS=Constants{3};
omg0_MEAS=Constants{4};
R = x(1);
L = x(2);
C = x(3);
Z_MODEL=impd_civky(ff,L,C,R);
cost_sqr_abs=sum((imag(Z_MEAS) - imag(Z_MODEL)).^2) + ((real(Z_MEAS) - real(Z_MODEL)).^2));
Q_MODEL=omg0_MEAS*L/R;
cost_Q=(Q_MEAS-Q_MODEL)^2;
kQ=1e6;
costi = cost_sqr_abs + cost_Q*kQ;
```

- c) Funkcia pre výpočet správania impedancie tlmivky

```
function Z = impd_civky(ff,L,C,R)
Z = 1./ ( 1./(R+li*2*pi*ff*L) + li*2*pi*ff*C );
```