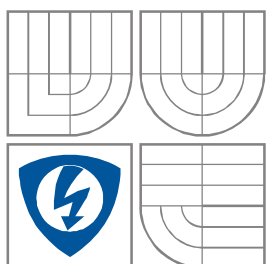


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKACNÍCH
TECHNOLOGIÍ
ÚSTAV RADIOELEKTRONIKY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF RADIO ELECTRONICS

OPTIMALIZACE MODELU ODRUŠOVACÍHO FILTRU

OPTIMIZATION OF EMI FILTER CIRCUITRY

DIPLOMOVÁ PRÁCE
MASTER'S THESIS

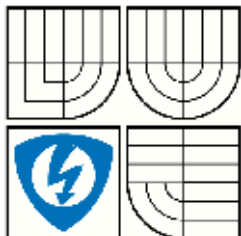
AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Bc. VOJTĚCH SUROVEC

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

Ing. JIŘÍ DŘÍNOVSKÝ, Ph.D.

BRNO 2011



VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

Ústav radioelektroniky

Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor
Elektronika a sdělovací technika

Student: Bc. Vojtěch Surovec
Ročník: 2

ID: 98612
Akademický rok: 2010/11

NÁZEV TÉMATU:

Optimalizace modelu odrušovacího filtru

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Prostudujte současný stav měření vložného útlumu odrušovacích filtru. Dále prostudujte globální optimalizační metody, zvláštní pozornost věnujte PSO.

Pro daný model odrušovacího filtru a simulované útlumové charakteristiky v různých měřicích systémech proveďte optimalizaci hodnot parazitních prvků odrušovacího filtru. Zvláště se zaměřte na vhodnou volbu kritériální funkce.

Pro zadaný model odrušovacího filtru a naměřené útlumové charakteristiky v různých měřicích systémech proveďte optimalizaci hodnot parazitních prvků odrušovacího filtru. Zhodnoťte výsledky, určete do jaké frekvence je model odrušovacího filtru vhodný pro optimalizaci.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

[1] CSN CISPR 17: Metody měření útlumových charakteristik pasivních vysokofrekvenčních filtru a odrušovacích součástek. Česká technická norma, Český normalizační institut. Praha, 2000.

[2] ROBINSON, J.; RAHMAT-SAMII, Y. Particle swarm optimization in electromagnetics. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2004. vol. 52, no. 2, p. 397-407.

Termín zadání: 7.2.2011

Termín odevzdání: 20.5.2011

Vedoucí práce: Ing. Jiří Dřínovský, Ph.D.

prof. Dr. Ing. Zbyněk Raida

Předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

Autor semestrální práce nesmí při vytváření semestrální 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 zákona č. 40/2010 Sb.

Abstrakt

V úvodní části práce jsem teoreticky rozebral současný stav měření vložného útlumu odrušovacího filtru a popsal jednotlivé metody měření. Dále jsem se zabýval globálními optimalizačními metodami a některé z nich teoreticky rozebral. Nejdůkladněji jsem rozebral metodu PSO, kde jsem podrobně popsal princip optimalizace, jelikož je dále použita pro optimalizaci filtru.

V další části práce jsem provedl teoretické matematické vyjádření vložného útlumu odrušovacího filtru a provedl optimalizaci hodnot parazitních prvků zadaného filtru v různých měřicích systémech. Tato optimalizace byla provedena na syntetických datech, aby byla prověřena funkčnost optimalizace a hlavně správná funkčnost vhodně zvolené kritériální funkce.

V poslední části jsem provedl optimalizaci na měřených datech zadaného filtru. Zjistil jsem nepřesnost matematického vyjádření zadaného odrušovacího filtru, a proto jsem optimalizaci použil na nový model filtru. Z nového modelu jsem již získal přesnější výsledky. Dále jsem nový model rozšířil o nové prvky z důvodu přesnější optimalizace. Nakonec jsem filtr optimalizoval novou metodou.

Klíčová slova

Odrušovací filtry, vložný útlum, parazitní prvky, optimalizační metody, metoda roje částic, PSO, kritériální funkce

Abstract

In introduction of work, I presented the state of the art of measuring insertion loss of the EMI filter and the description of individual methods of measuring is also included. After that I dealt with global optimization methods and some of them I theoretically described. Mainly PSO method was studied carefully, and the principle of optimization in details are presented in the thesis, because this method was used for optimization of the filters parameters in the thesis.

Next part of work deals with theoretical and mathematical expression of insertion loss of the EMI filters. Due to the mathematical expression of the insertion loss, the values of parasitic elements of given filter have been optimized in different measuring systems. This optimization was applied on synthetic data. By this step the functionality of optimization was proved and also the fitness function has been tuned and optimised.

The last part of thesis works with optimization on measured data of given filters. I found out inaccuracy in mathematical expression of given model of EMI filter, therefore it was necessary to come up with the new filter model. The accuracy increases by using the new filter model. In next step the new model was enlarged by new spurious components.

Keywords

EMI mains filter, insertion loss, parasitic elements, optimization methods, particle swarm optimization, PSO, fitness function

Bibliografická citace mé práce:

SUROVEC, V. *Optimalizace modelu odrušovacího filtru*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2011. 53 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Jiří Dřínovský, Ph.D..

Prohlášení

Prohlašuji, že svůj semestrální projekt na téma „**Optimalizace modelu odrušovacího filtru**“ jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího semestrálního projektu 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 uvedeného semestrálního projektu dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením tohoto projektu 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 20. května 2011

.....
podpis autora

Poděkování

Děkuji vedoucímu semestrálního projektu **Ing. Jiřímu Dřínovskému, Ph.D.** za účinnou, metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mého semestrálního projektu.

V Brně dne 20. května 2011

.....
podpis autora

Obsah

1	ÚVOD	1
2	FILTRY	2
2.1	IMPEDANCE ENERGETICKÉ SÍTĚ.....	2
2.2	DRUHY RUŠENÍ.....	3
2.3	ZPŮSOBY OMEZENÍ RUŠENÍ	4
2.4	ODRUŠOVACÍ KONDENZÁTORY	5
2.5	ODRUŠOVACÍ TLUMIVKY.....	6
2.6	ODRUŠOVACÍ FILTRY	8
2.6.1	<i>Síťové (napájecí) odrušovací filtry</i>	8
2.6.2	<i>Speciální druhy odrušovacích filtrů</i>	9
3	MĚŘENÍ VLOŽNÉHO ÚTLUMU FILTRU	11
3.1	METODY MĚŘENÍ	11
3.1.1	<i>Standardní metoda</i>	11
3.1.2	<i>Metoda nejhoršího případu</i>	11
3.1.3	<i>Aproximační metoda pro síťové filtry</i>	12
3.2	ZPŮSOBY MĚŘENÍ.....	13
3.2.1	<i>Absolutní metoda</i>	13
3.2.2	<i>Zapojení zkoušeného filtru nebo součástky</i>	14
4	GLOBÁLNÍ OPTIMALIZAČNÍ METODY	15
4.1	GENETICKÉ ALGORITMY	15
4.2	SIMULOVANÉ ŽIHÁNÍ.....	15
4.3	SEKVENČNÍ KVADRATICKÉ PROGRAMOVÁNÍ.....	15
4.4	PSO ALGORITMUS.....	16
4.4.1	<i>Princip PSO</i>	16
4.4.2	<i>PSO jazyk</i>	17
4.4.3	<i>Popis PSO algoritmu</i>	18
4.4.4	<i>Výběr hodnot parametrů</i>	20
4.4.5	<i>Okrajové podmínky</i>	21
5	MATEMATICKÉ VYJÁDŘENÍ VLOŽNÉHO ÚTLUMU FILTRU	22
5.1	SYSTÉMY PRO MĚŘENÍ VLOŽNÉHO ÚTLUMU FILTRŮ	22
5.2	JEDNODUCHÝ MODEL VLOŽNÉHO ÚTLUMOVÉHO FILTRU	23
6	VLASTNOSTI ODRUŠOVACÍCH FILTRŮ	26
6.1	SÍŤOVÝ ODRUŠOVACÍ FILTR SCHURTER 5110.1033.1	26
6.1.1	<i>Asymetrické zapojení</i>	27
6.1.2	<i>Symetrické zapojení</i>	28
6.2	SÍŤOVÝ ODRUŠOVACÍ FILTR SCHAFFNER 321-1/05.....	30
7	VLASTNÍ OPTIMALIZACE	31
7.1	OPTIMALIZACE SYNTETICKÝCH DAT	31
7.2	KRITERIÁLNÍ FUNKCE.....	33
7.2.1	<i>Automatické rozložení</i>	34
7.2.2	<i>Váhování hodnot</i>	34
7.3	OPTIMALIZACE NAMĚŘENÝCH DAT	36
7.3.1	<i>Optimalizace filtru Schurter 5110.1033.1</i>	36
7.3.2	<i>Optimalizace filtru Schaffner 321-1/05</i>	38
8	ZÁVĚR	43
9	SEZNAM OBRÁZKŮ	45
10	SEZNAM TABULEK	46
11	SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ	47

1 Úvod

Všechny výrobky, nejen spotřební elektronika, prodávané v ČR (tj. vyrobené v ČR nebo dovezené do ČR) musejí odpovídat zákonu č. 22/1997 Sb., o technických požadavcích na výrobky a z hlediska EMC (elektromagnetické kompatibility). Elektromagneticky kompatibilní (slučitelný) výrobek je výrobek, který neruší okolí vyzařováním elektromagnetického pole a naopak je odolný vůči vnějšímu rušení [1]. Nejčastěji se používají filtry LC typu dolní propust, které bez potlačení propouštějí signály (proudy) s kmitočtem nižším než je určitý mezní kmitočet f_m a naopak tlumí složky, jejichž kmitočet je vyšší než tento mezní kmitočet. Těchto odrušovacích filtrů existuje celá řada.

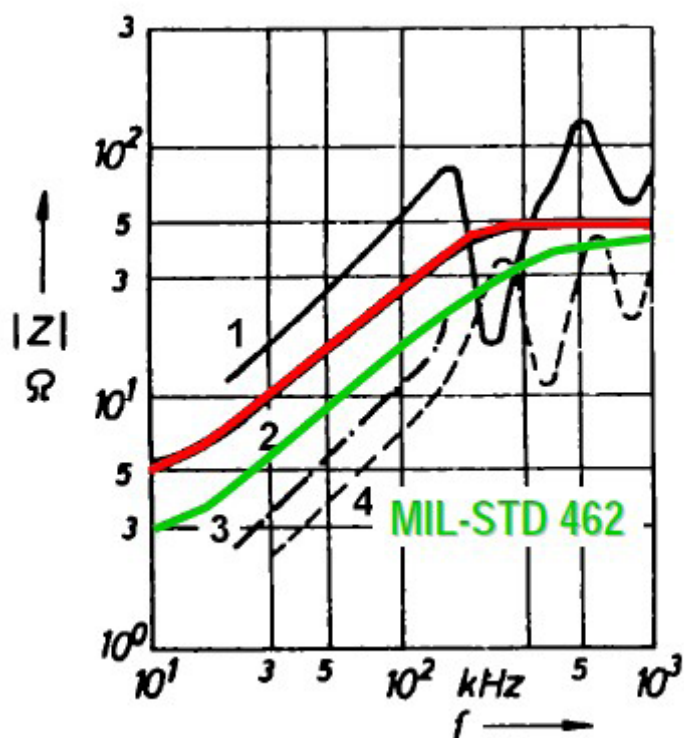
Optimalizací se rozumí postup, který vede k nejlepšímu řešení konkrétního problému. Má široké uplatnění (elektrotechnika, ale i ekonomika a finančnictví, atd). Samotná optimalizace je dnes velmi rozsáhlou matematickou disciplínou. Za její základ lze považovat lineární programování, jehož metodami se podařilo úspěšně vyřešit celou řadu praktických problémů [2]. Globální metody jsou schopny překonávat lokální minima a přibližovat se k minimu globálnímu. Nevýhodou globálních metod je nesrovnatelně vyšší výpočetní náročnost než pro klasické lokální optimalizační metody.

2 Filtry

Filtr lze definovat jako určitý prvek, modul nebo část programu, která nám může buď omezovat, nebo naopak propouštět užitečnou informaci (signál). V elektrotechnice se používá nesčetné množství filtrů, nás ale především budou zajímat odrušovací filtry.

2.1 Impedance energetické sítě

Impedance energetické sítě silně závisí na typu (venkovní síť, průmyslová síť, kabelová zemní síť a provedení sítě, atd.) značně se mění v závislosti na kmitočtu v širokém rozsahu od jednotek po stovky Ω . Typické průběhy jsou uvedeny na obrázku (Obrázek č. 1) [3] spolu se „středními“ hodnotami impedance napájecí sítě stanovenými mezinárodní normou CISPR nebo vojenskou normou MIL-STD 462.

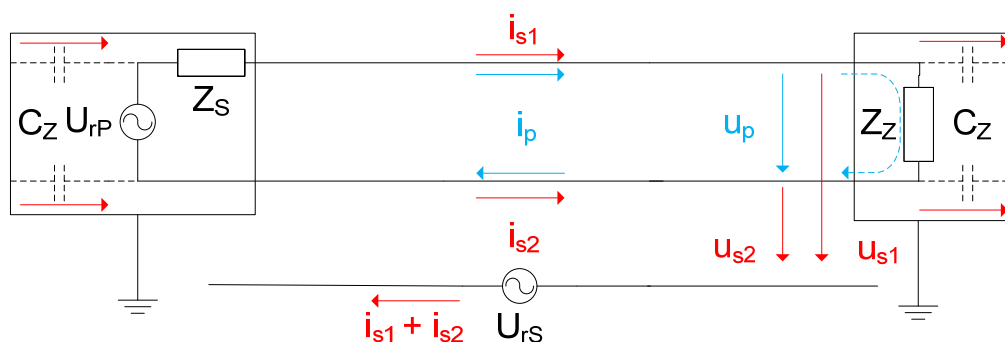


Obrázek č. 1 Impedance různých typů energetických sítí (1 - venkovní síť, 2 — průběh dle normy CISPR, 3 – průmyslová síť, 4- kabelová zemní síť, — průběh dle vojenské normy MIL-STD 462)

2.2 Druhy rušení

Protifázové rušivé signály (P), proudy i_p a napětí u_p (symetrická rušivá napětí, differential mode voltages) se projevují mezi jednotlivými vodiči vedení navzájem, tj. jsou přímo superponovány na užitečné (pracovní) napájecí či datové proudy a napětí na přenosovém vedení. Proudů i_p mají v jednotlivých vodičích vedení stejný směr jako užitečné proudy, proti-fázové napětí u_p působí přímo na impedanci užitečné zátěže.

Soufázové rušivé signály (S), proudy i_s a napětí u_s (nesymetrická rušivá napětí, common mode voltages) se projevují mezi jednotlivými vodiči vedení a společnou zemí (společným zemním vodičem). Proudů i_{s1} a i_{s2} mají v jednotlivých vodičích vedení stejný směr a uzavírají se „přes“ společnou zem průtokem parazitními kapacitami C_Z . Vlivem nesymetrie systému část soufázového rušivého napětí $u_{s1} - u_{s2}$ působí přímo na impedanci Z_Z .

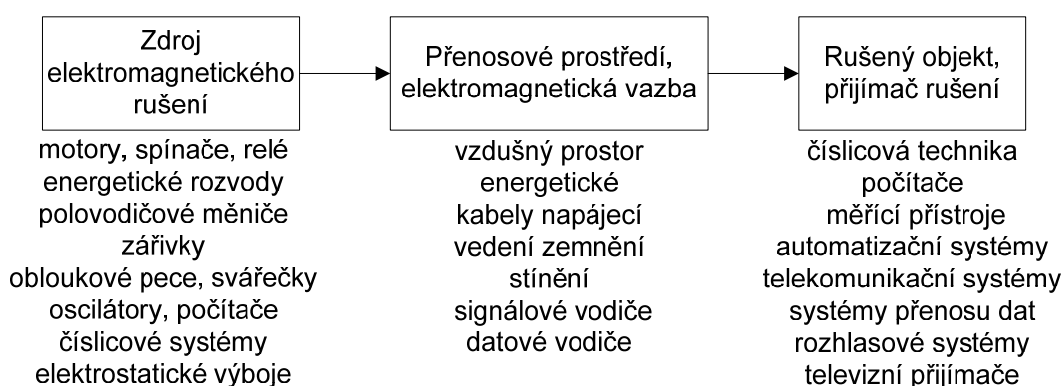


Obrázek č. 2 Protifázové (P) a soufázové (S) rušivé napětí a proudy na vedení

2.3 Způsoby omezení rušení

Jak je patrné ze základního řetězce EMC na obrázku (Obrázek č. 3) lze rušení omezovat ve všech třech oblastech tohoto řetězce: přímo u zdroje (vysílače) rušení, v objektu (přijímači) rušení či na přenosové trase.

Rušení je nejvýhodnější potlačovat u jeho zdroje, neboť tím zaručíme, že nebude rušen pouze vyšetřovaný přijímač, ale ani další objekty, které by jinak mohly být rušeny v budoucnu. Často se stává, že rušení přichází na vstup přijímače spolu s užitečným signálem a na stejném kmitočtu; potom je zásah u zdroje jediným možným způsobem odstranění rušení. Ve všech ostatních případech je žádoucí odstraňovat rušení nejen u zdroje, nýbrž i v přijímači a v přenosových cestách rušivého signálu. Zásah u zdroje je naopak prakticky zcela vyloučen v případě, že rušivý signál je signálem užitečným pro jiný druh zařízení (např. vysílání vysílače) [3].

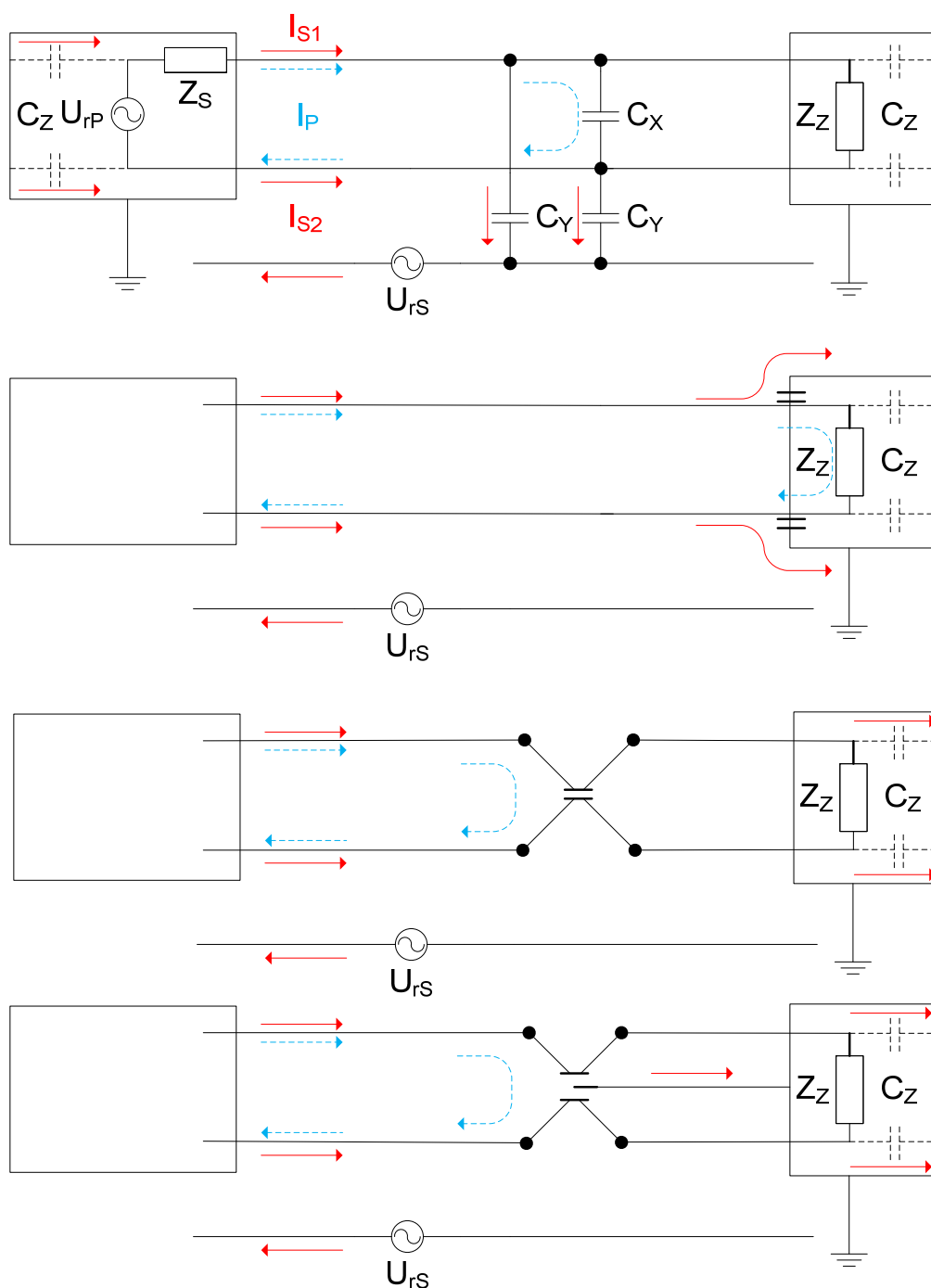


Obrázek č. 3 Základní řetězec EMC a příklady jednotlivých oblastí

Odrušovací filtr spadá až do poslední kategorie a je umístěn na vstupu přijímače, kde omezuje rušení ze sítě.

2.4 Odrušovací kondenzátory

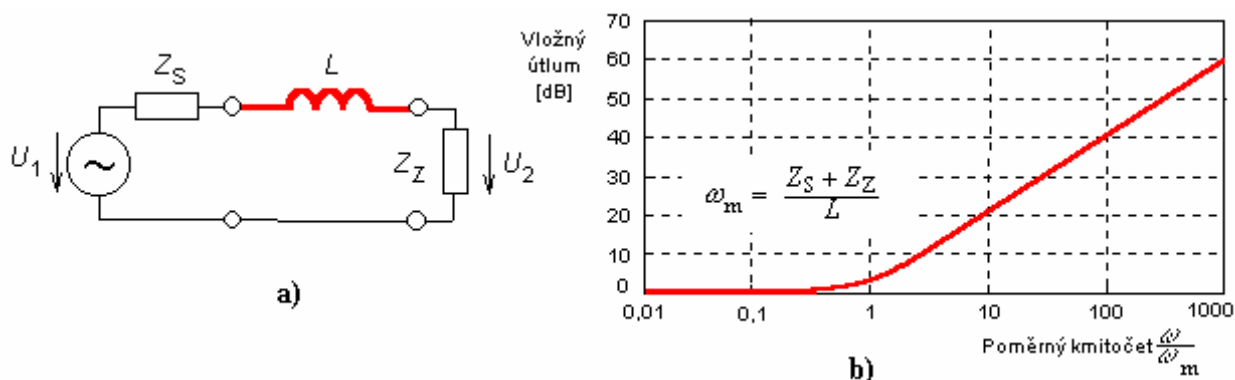
Odrušovací kondenzátory můžeme nalézt ve variantách dvojpólové, trojpólové, čtyřpólové nebo vícepólové. Použití těchto druhů závisí zejména na tom, k čemu je potřebujeme využít. Typické případy k potlačení soufázové (I_S) nebo protifázové složky (I_P) rušivého proudu vedení jsou na obrázku (Obrázek č. 4).



Obrázek č. 4 Způsoby použití různých typů odrušovacích kondenzátorů k potlačení soufázových (I_S) a protifázových (I_P) rušivých proudů na vedení

2.5 Odrušovací tlumivky

Odrušovací tlumivky jsou nejnákladnějšími a nejobjemnějšími pasivními prvky užívanými v technice odrušování, a to buď samostatně, nebo jako součást odrušovacích filtrů. Protože se odrušovací tlumivky zapojují do proudových obvodů odrušovaného zařízení, jsou jejich rozměry v první řadě dány velikostí protékajícího pracovního proudu. Principiální zapojení odrušovací tlumivky mezi zdroj rušení (např. výstup napájecí energetické sítě) a přijímač rušení (např. napájecí vstup elektronického přístroje) je uvedeno na obrázku (Obrázek č. 5a) [3].



Obrázek č. 5 Zapojení odrušovací tlumivky do vedení (a) a kmitočtový průběh vloženého útlumu (b).

Odrušovací tlumivka je zapojena v sérii s vnitřní impedancí (vnitřním odporem) sítě Z_s a vstupní impedancí (odporem) napájecího vstupu chráněného přístroje Z_z . Analýzou tohoto jednoprvkového tlumivkového filtru snadno určíme jeho základní parametr - vložený útlum v [dB]

$$L = 20 \cdot \log \left| \frac{U_{20}}{U_2} \right| = 20 \cdot \log \left| 1 + \frac{j\omega L}{Z_s + Z_z} \right| \quad (2.1)$$

kde U_2 je napětí na výstupu filtru, U_{20} je totéž napětí bez filtru a vnitřní a vstupní impedance Z_s a Z_z . Kmitočtový průběh útlumu (Obrázek č. 5a) [3] má dvě oblasti naznačené na obrázku (Obrázek č. 5b) [3].

$$\begin{aligned} L &\approx 0 \quad |dB| \quad \text{pro } \omega L \ll Z_s + Z_z, \\ L &\approx 20 \cdot \log \frac{\omega L}{Z_s + Z_z} \quad |dB| \quad \text{pro } \omega L \gg Z_s + Z_z. \end{aligned} \quad (2.2)$$

Existuje velké množství různých konstrukčních typů odrušovacích tlumivek, které lze podle účelu použití a druhu odrušovaného zařízení rozdělit do dvou skupin.

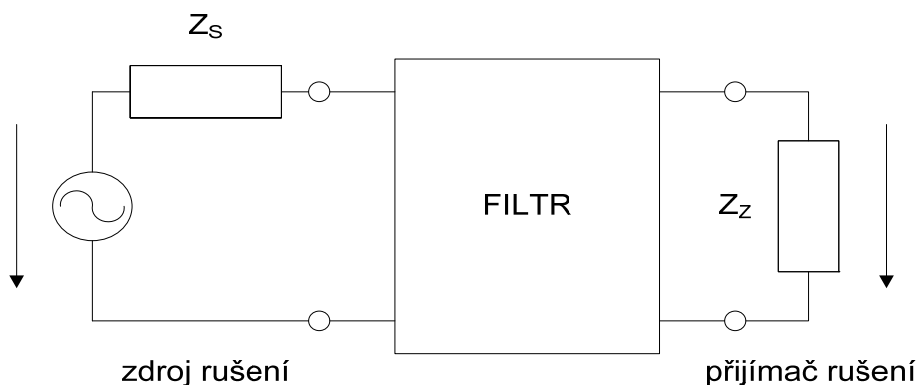
Tlumivky pro potlačení symetrické složky rušení v napájecích obvodech, se tlumivka zapojuje běžným způsobem podélně do proudových vodičů a pracovní proud obvodu jimi protéká ve stejném směru jako rušivý proud.

Tlumivky pro potlačení nesymetrické složky rušení v napájecích obvodech, kterým se říká **tlumivky s proudovou kompenzací**. Princip spočívá v tom, že fázový a zpětný vodič jsou navinuty na společném jádru ve stejném smyslu tak, že pracovní proudy a protifázové rušivé proudy vytvoří opačně orientované magnetické toky, vzájemně se ruší a výsledná indukčnost pro pracovní proud je téměř nulová. Pro soufázové rušivé proudy obou vodičů, které protékající oběma vodiči ve stejném směru se jejich magnetické toky sčítají, takže efektivní indukčnost pro tyto proudy je tedy značná.

2.6 Odrušovací filtry

2.6.1 Síťové (napájecí) odrušovací filtry

Jako síťový odrušovací filtr označujeme filtr zapojený do energetické napájecí sítě či do napájecího vstupu přístroje. Tento druh odrušovacího filtru je v současné praxi EMC pravděpodobně nejčastější. Principiální zapojení filtru do vedení mezi zdroj a přijímač rušení je na obrázku (Obrázek č. 6).



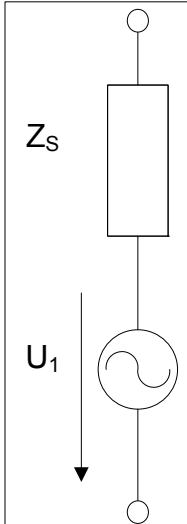
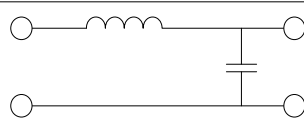
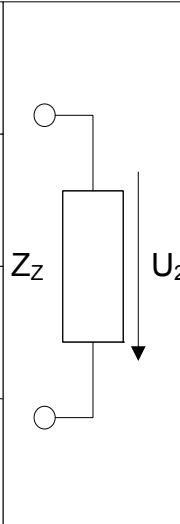
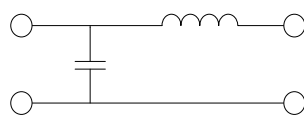
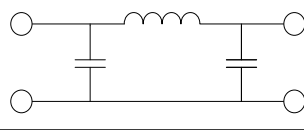
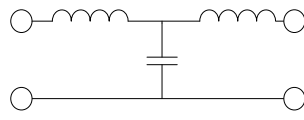
Obrázek č. 6 Odrušovací filtr jako lineární dvojbran

Jakožto lineární obvod může být filtr LC, případně RC, popsán libovolnou sadou svých čtyřpólových parametrů. Např. pomocí kaskádních parametrů lze vložný útlum filtru vyjádřit vztahem

$$L = 20 \cdot \log \left| \frac{U_{20}}{U_2} \right| = 20 \cdot \log \left| \frac{Z_s \cdot Z_z}{Z_s + Z_z} \cdot A_{11} + \frac{1}{Z_s + Z_z} \cdot A_{12} + \frac{Z_s \cdot Z_z}{Z_s + Z_z} \cdot A_{21} + \frac{Z_s}{Z_s + Z_z} \cdot A_{22} \right| \quad (2.3)$$

kde U_2 je napětí na výstupu filtru, U_{20} je totéž napětí bez filtru a A_{11} , A_{12} , A_{21} , A_{22} jsou kaskádní parametry filtru. Ze vztahu je patrné, že vlastnosti filtru a velikost jeho vložného útlumu závisí jednak na jeho vlastních parametrech, jednak na impedančních parametrech zdroje i přijímače rušení. Kvůli neurčitosti těchto impedancí je velmi obtížné navrhnout síťový odrušovací filtr, protože hlavní příčinou velkých odchylek hodnot vložného útlumu je závislost na vnějších pracovních podmínkách obvodu. Rozdíly mezi útlumem filtru v katalogu a skutečnými hodnotami mohou dosáhnout až několik desítek dB.

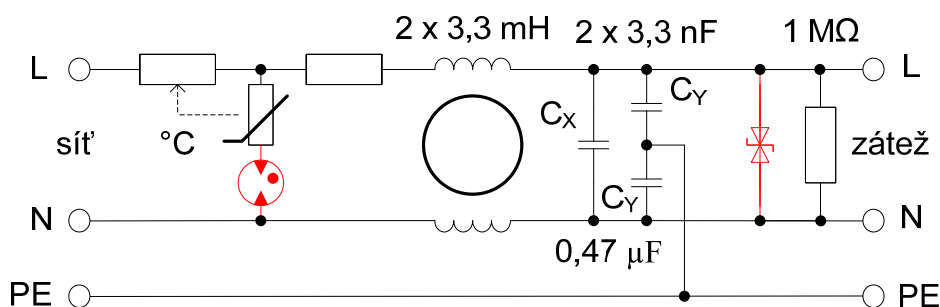
Jelikož na výpočet síťového odrušovacího filtru má vliv mnoho aspektů (celková indukčnost tlumivek, vložný útlum odrušovacího filtru a důležitou roli hrají i ekonomické a konstrukční otázky), jsou tyto výpočty spíše orientačního charakteru. V současnosti jsou skoro všechny navrhované a používané síťové filtry LC sestaveny ze základních Zobelových článků typu L, Γ , T nebo Π a jejich kombinací. Volba vhodného typu článku závisí zejména na známých či předpokládaných velikostech impedancí připojené sítě Z_s a zátěže filtru Z_z jak je patrné na obrázku (Obrázek č. 7).

Síť	Impedance sítě	Struktura základního článku filtru	Impedance zátěže	Síť
	nízká		vysoká	
	vysoká		nízká	
	neznámá asi vysoká		neznámá asi nízká	
	neznámá asi nízká		neznámá asi vysoká	

Obrázek č. 7 Volba struktury síťového filtru podle velikosti zátěžových impedancí Z_s a Z_z

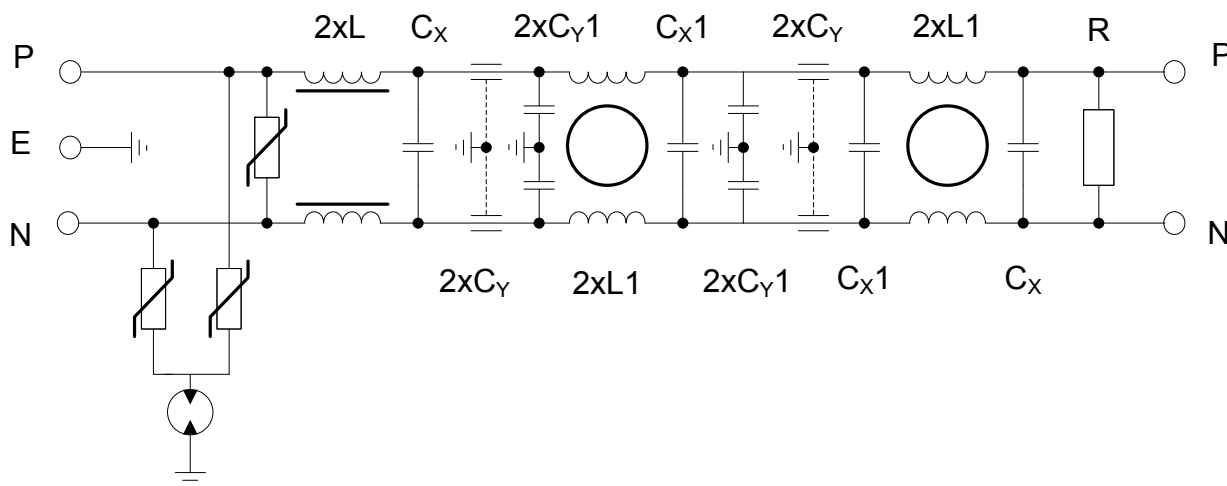
2.6.2 Speciální druhy odrušovacích filtrů

Zvláštním druhem síťových odrušovacích filtrů jsou tzv. filtry NEMP, příp. LEMP, nazývané též filtry EMP. Tyto filtry byly vyvinuty pro ochranu elektronických zařízení proti působení rušivých impulzů velké intenzity. Na rozdíl od běžných síťových odrušovacích filtrů LC má filtr EMP na svém vstupu zapojeny ještě součástky omezující přepětí (bleskojistky, varistory, ochranné diody apod.). Kromě rozsáhlých vojenských aplikací (filtry NEMP) se tyto filtry užívají všude tam, kde je nebezpečí výskytu přepětí v důsledku bouřek, spínacích pochodů apod. schopných ohrozit správnou funkci zařízení. V katalogích výrobců jsou filtry EMP označovány jako „RFI / EMI filters“. Příklad zapojení filtru EMP jakožto síťového odrušovacího filtru s přepětíovými ochranami je na obrázku (Obrázek č. 8) [3].



Obrázek č. 8 Příklad zapojení síťového odrušovacího filtru s přepětíovými ochranami (filtr EMP)

Jiným speciálním typem odrušovacích filtrů jsou tzv. filtry TEMPEST. Slouží k zamezení úniku informací předávaných telekomunikačními zařízeními a zařízeními pro přenos dat, které mohou být zneužity nepovolanými osobami. Každý filtr TEMPEST má svoje technické specifikace. Tyto filtry se vyznačují velmi jakostními parametry: vysokým útlumem 80 až 100 dB ve velmi širokém kmitočtovém rozsahu obvykle od 10 kHz až 1 GHz. Je zřejmé, že takový filtr musí být tvořen mnohastupňovým řetězcem článků LC umístěných ve vysoce kvalitním elektromagneticky stíněném a hermeticky uzavřeném pouzdru se speciálními vstupními a výstupními konektory. Příklad zapojení filtru TEMPEST od firmy Schaffner (bez hodnot jednotlivých součástek) je uveden na obrázku (Obrázek č. 9).



Obrázek č. 9 Možné zapojení filtru TEMPEST

3 Měření vložného útlumu filtru

Útlumové charakteristiky vysokofrekvenčních odrušovacích součástek, tj. kondenzátorů, tlumivek a filtrů, závisí všeobecně na impedancích, mezi kterými pracují (ty mají rozhodující důležitost pro odraz energie na vstupu filtru), na pracovním proudu a napěťových úrovních, také ovšem na dalších činitelích, např. na okolní teplotě. Aby bylo možné provádět výsledky měření těchto charakteristik provedených v různých laboratořích nebo uvedených různými výrobci, musí se použít normalizované zkušební metody [4].

K tomuto účelu je použita norma CISPR 17 Methods of measurement of the suppression characteristics of passive radio interference filters and suppression components z roku 1981. V České republice se využívá Česká technická norma ČSN CISPR 17.

3.1 Metody měření

Existuje řada metod pro měření útlumových filtrů. Každá metoda však má své výhody a nevýhody a je vhodná pro různé typy měření. Tato měření probíhají při definované impedanci 50Ω až 75Ω na vstupu i výstupu filtru. V reálné aplikaci ovšem tyto hodnoty nejsou dodrženy, takže skutečná charakteristika se od udávané standardně naměřené může lišit.

3.1.1 Standardní metoda

Měření útlumových charakteristik filtru se provádí s jeho vstupem a výstupem zakončeným pevnými rezistory, obvykle $Z_0 = 50 \Omega$ až 75Ω . Pro posuzování filtrů se v současnosti v různých zemích používají následující metody:

- bez zátěže, v kmitočtovém rozsahu 10 kHz až 1 GHz
- při zátěži proudem až do 100 A, v kmitočtovém rozsahu 10 kHz až 100 MHz
- při zátěži napětím až do několika kilovoltů, v kmitočtovém rozsahu 10 kHz až 300 MHz

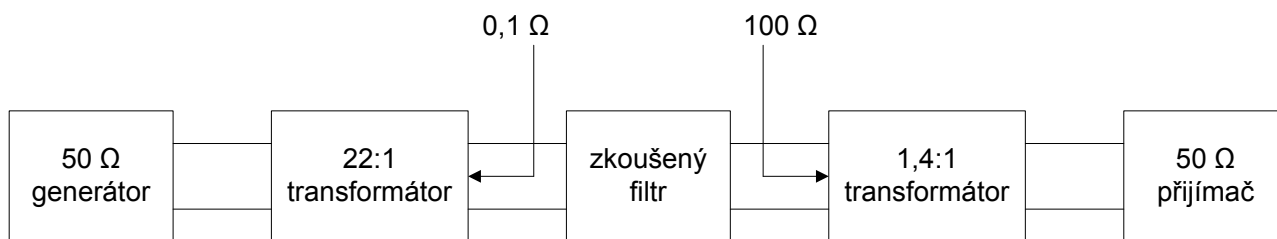
Získané charakteristiky se mohou lišit od charakteristik provozovaných v praxi, protože zatěžovací impedance při měření se liší od impedancí při praktickém použití se skutečným zařízením.

3.1.2 Metoda nejhoršího případu

Tato metoda bývá také označována jako metoda proměnné impedance. Tato metoda funguje na principu připojení dvou proměnných impedancí na vstupní a výstupní svorky zkoušeného filtru. Tyto impedance jsou v průběhu měření na každém proměřovaném kmitočtu nastavovány tak, aby byla získána minimální hodnota vložného útlumu odrušovacího filtru. Velkou nevýhodou této metody je právě nutnost použití těchto proměnných impedancí, jejich konstrukce je totiž pro velmi široká kmitočtová pásma (10 Hz až 1 GHz) značně obtížná. Z tohoto důvodu se tato měřicí metoda při praktických měřeních nepoužívá.

3.1.3 Aproximační metoda pro síťové filtry

V této metodě, která se vztahuje na síťové filtry, se místo měření vložného útlumu v systému $50 \Omega/50 \Omega$ musí měřit v systému $0,1 \Omega/100 \Omega$ (a opačném). V kmitočtovém rozsahu 1 kHz až 300 kHz jsou nutné dva širokopásmové transformátory (1,4:1 a 22:1 pro systém 50Ω). Účelem této metody měření je stanovení při skutečném provozu s nejistou impedancí připojených zařízení, že filtr má v nepropustném pásmu dobrou a předem odhadnutelnou útlumovou charakteristiku a filtr nevykazuje v propustném pásmu nepřijatelné oscilace. Tato metoda bere v úvahu okrajové podmínky představující skutečné obvody, co se týče empiricky stanovených impedancí ze statistických údajů (zdrojů a zátěží). Měření se provádí podle zapojení (Obrázek č. 10)



Obrázek č. 10 Sestava měření u aproximační metody pro síťové filtry

Z teoretické analýzy nepřizpůsobených filtrů vyplývají dva následující problémy:

1) Oscilace v propustném a přechodovém pásmu je způsobena dvěma odlišnými mechanismy různé významnosti:

a) Vnější rezonance na připojení (filtr rezonuje s generátorem anebo zatěžovací impedancí odpovídající zrcadlovému imaginárnímu zakončení). Ve skutečných obvodech jsou takové rezonance naštěstí velmi tlumeny vlivem nízkého Q náhradního ekvivalentního obvodu.

b) Vyjádřené oscilace, které mohou být přiřazeny vlastním rezonancím filtru. Kritické vlastní rezonance se mohou vyskytnout tehdy, a právě tehdy, když jedna připojená (vnější) impedance je mnohem vyšší a druhá mnohem nižší než je charakteristická impedance filtru. Pak je vysoké Q filtru dominantní. To může vést k vložnému zisku (negativnímu vložnému útlumu) až 30 dB. Tento jev se vyskytuje při měřicím systému $0,1/100 \Omega$ (a opačném). Vhodným návrhem filtru ho lze eliminovat.

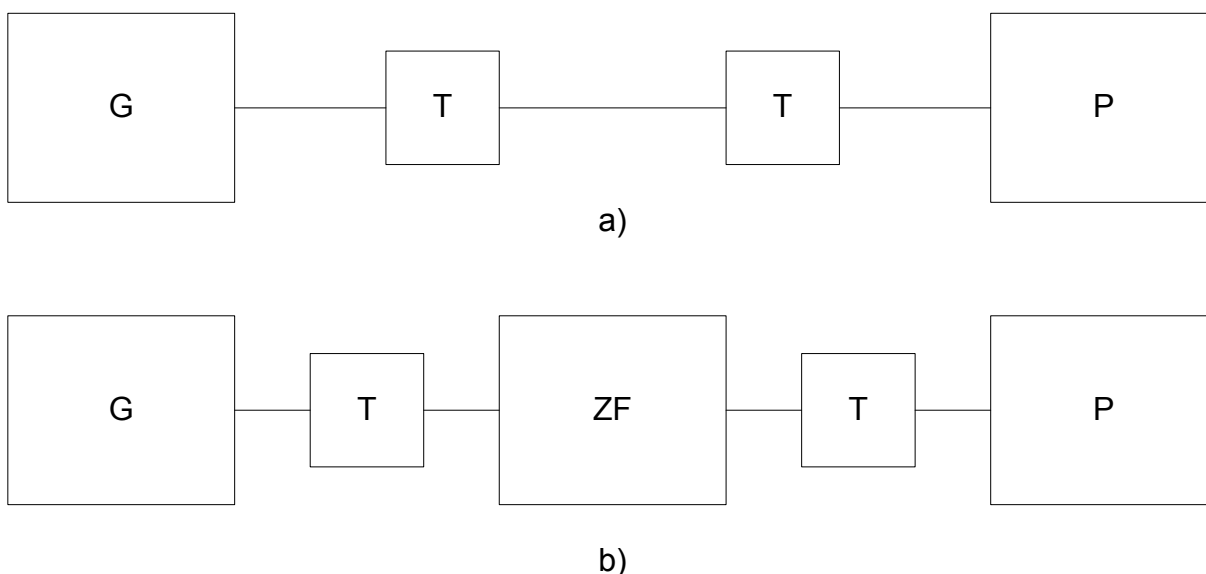
2) Nedokonalé vlastnosti ve spodní části nepropustného pásma. Obecně pro filtry typu dolní propusti, jako jsou síťové filtry, platí, že vlivy impedančního nepřizpůsobení jsou nejnepříjemnější na nejnižších kmitočtech nepropustného pásma. Metoda $0,1/100 \Omega$ (a opačná) identifikuje jakýkoliv filtr, jehož vlastnosti se silně odchyľují od vlastností očekávaných podle výsledků měření v 50Ω systému. V tomto kontextu je třeba podotknout, že násobné dílčí filtry (multiple section filters - členěné filtry) jsou v podmínkách nepřizpůsobení nejen daleko lepší než jednoduché filtry, ale i daleko menší a levnější.

Dodatečně se musí provést zkoušky s prohozenými a otočenými transformátory. Transformátory musí být širokopásmové (feritové) a musí pokrývat kmitočtové pásmo 1 kHz až 300 kHz. Pro systém 75Ω musí být převody transformátorů 27:1 a 1,15:1. Uspokojivý filtr by v kmitočtovém rozsahu 1 kHz až 100 kHz měl mít na jakémkoliv kmitočtu maximální „zesílení“ menší než 10 dB. V kmitočtovém rozsahu nepropustného pásma se nesmí odchyľovat vložný útlum o více než 10 dB od stanovené hodnoty [4].

3.2 Způsoby měření

3.2.1 Absolutní metoda

Struktura soustavy, podle které se měří absolutní metodou vložný útlum filtru bez jeho výkonové zátěže je patrná na obrázku (Obrázek č. 11). Měření na každém kmitočtu se provádí vždy ve dvou krocích. Nejprve se zkoumaný filtr ZF z měřicí trasy odpojí, zůstane pouze generátor G a přijímač P. Propojí se pomocí vhodného kabelu a případně se připojí útlumové nebo transformační členy T (Obrázek č. 11a). Nastaví se úroveň výstupního napětí z generátoru a odečte se vstupní úroveň napětí na přijímači, hodnota U_1 .



Obrázek č. 11 Měření vložného útlumu filtru bez výkonové zátěže absolutní metodou: referenční obvod (a), měřicí obvod (b)

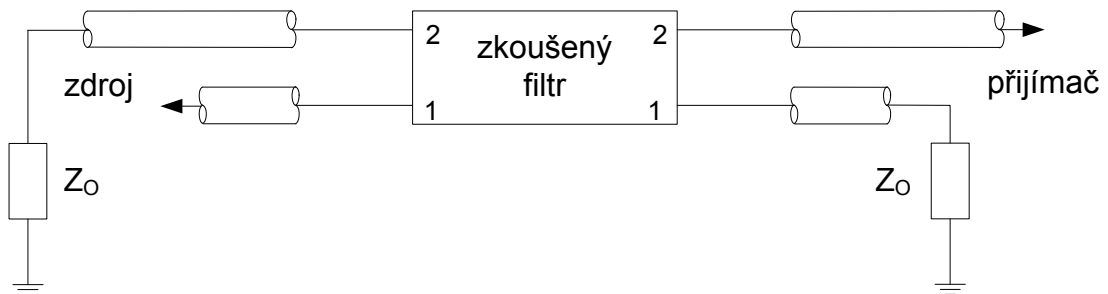
Do trasy se nyní přidá zkoumaný filtr ZF (Obrázek č. 11b), ale výstupní úroveň z generátoru a případné útlumové nebo transformační členy zůstanou nezměněny. Poté se provede nové měření vstupního napětí na přijímači, hodnota U_2 . Podle základních definic je vložný útlum odrušovacího filtru roven:

$$L = 20 \cdot \log \frac{U_1}{U_2} [dB] \tag{3.1}$$

$$L [dB] = U_1 [dB\mu V] - U_2 [dB\mu V]$$

3.2.2 Zapojení zkoušeného filtru nebo součástky

Součástky a filtry pro dvouvodičové obvody se musí zkoušet postupně v symetrickém a nesymetrickém uspořádání. Dvouvodičové filtry a filtry s vícenásobnými nespojenými obvody se musí zkoušet pro každý vývod samostatně. Na všechny nezkoušené vývody se připojí impedance Z_o podle obrázku (Obrázek č. 12).



Obrázek č. 12 Způsob proměrování součástky nebo filtru pro dvouvodičové obvody

4 Globální optimalizační metody

4.1 Genetické algoritmy

Genetické algoritmy (Genetic Algorithms - GA) patří do třídy evolučních algoritmů, které mimo ně zahrnují také evoluční programování, evoluční strategii a genetické programování. Jsou to vyhledávací algoritmy založené na mechanismu přirozeného výběru a principech genetiky. Jejich velkou výhodou je poměrná jednoduchost. Ideovým vzorem pro genetické algoritmy byly principy vývoje, které se uplatňují v přírodě. Zde existují populace jednotlivých živočišných druhů, složených z jedinců různých vlastností. Tyto vlastnosti jsou prvotně zakódovány v jejich genech, které tvoří větší celky, chromozómy. Při křížení vznikají noví jedinci, kteří mají zpravidla náhodně část genů od jednoho rodiče a část genů od rodiče druhého. Přitom ve zvlášť výjimečném případě může dojít k náhodné změně některého genu v chromozómu, tzv. mutaci, která může být pro další vývoj druhu příznivá nebo ne. Podle svých vlastností má každý z potomků větší nebo menší schopnost obstát v přirozeném výběru a vytvořit další generaci. Proces výběru se stále opakuje a v jeho průběhu se zlepšují genetické vlastnosti daného druhu. Tak probíhala celá evoluce v přírodě [5].

4.2 Simulované žihání

Simulované žihání (Simulated Annealing - SA) patří mezi stochastické optimalizační algoritmy, které mají základ ve fyzice, na rozdíl od jiných stochastických optimalizačních algoritmů, které mají většinou svůj základ v biologii. Tyto úlohy mají velmi rozsáhlý prostor přípustných řešení a není možné v rozumném čase všechna řešení otestovat a najít nejlepší řešení (globálně optimální). Metoda simulovaného žihání se inspirovává tzv. horolezeckým algoritmem, který systematicky prohledává stavový prostor všech řešení a snaží se najít řešení nejoptimálnější.

4.3 Sekvenční kvadratické programování

Sekvenční kvadratické programování (Sequential Quadratic Programming - SQP) je jedna z nejefektivnějších metod řešení nelineárních optimalizačních úloh. SQP neřeší nelineární úlohu přímo, ale převádí ji na sekvenci optimalizačních podproblémů. Nejprve se zaměříme na řešení minimalizační úlohy s omezením typu rovnosti a později řešení rozšíříme i na minimalizační úlohy s omezením typu nerovnosti.

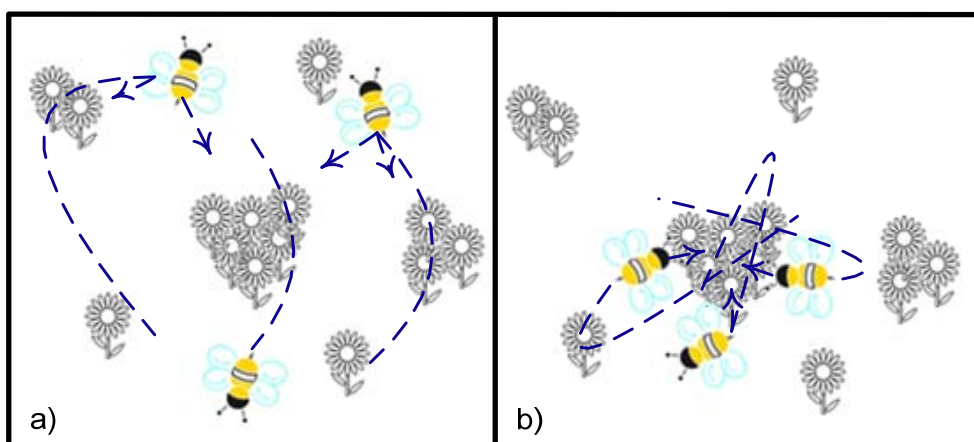
4.4 PSO algoritmus

Od roku 1995, kdy bylo PSO poprvé představeno, se objevila celá řada studií a výzkumů, které PSO využívají. Na základě potřeby testovat jejich závěry, ale i rozvíjet vlastní, bylo rozhodnuto vyvinout vlastní algoritmus. Mezi požadavky byla prioritně rychlost algoritmu, jeho univerzálnost, možnost měnit jednotlivé parametry (iterace, počet agentů...), dále schopnost rekurzivního volání, řešitelnost problémů libovolné dimenze a v neposlední řadě stabilita (zdaleka ne všechny scénáře zadaného algoritmu jsou řešitelné – může jít např. o fyzikální omezení v souvislosti s optimalizací rozměrů antény).

Pro realizaci diplomové práce bylo zvoleno prostředí Matlab. Matlab obsahuje velice rychlé jádro pro práci s maticemi, disponuje celou řadou knihoven a lze se tedy soustředit přímo na řešený problém, umožňuje komfortní grafický i textový výstup. Velká část literatury obsahuje příklady právě z Matlabu, lze tedy porovnávat jednotlivá řešení a pro partikulární problémy využívat publikované segmenty kódu. Velkou výhodou je také možné propojení s Comsolem, ve kterém lze využít dutinového modelu pro modální řešení antén.

4.4.1 Princip PSO

Nejprve se však krátce zmíníme o principu PSO. Optimalizace vychází z rojové inteligence pozorované např. u včelstev a napodobuje jejich chování. V některých aspektech je PSO podobná GA. Ve všech případech jde o samo se organizující systémy vykazující silné kolektivní chování. Zásadní rozdíl však spočívá v přístupu k členu hejna (agentovi), nad kterým jsou definovány určité operace, a disponuje částí znalostí, které má celý roj [6].



Obrázek č. 13 Ukázka principu PSO

Včely hledají na poli místo s největší koncentrací květin, každá včela (agent) je přitahována do oblasti nejvyšší koncentrace nalezené celým rojem a nejlepší koncentrací, kterou našla osobně, viz (Obrázek č. 13a). Nakonec včely začnou kroužit nad místem, kde celý roj našel největší koncentraci květin. Celý roj se kolem tohoto místa stáhne a začne kroužit v naději, že nalezne ještě větší koncentraci květin někde jinde, viz (Obrázek č. 13b).

4.4.2 PSO jazyk

Jazyk PSO vychází z analogie včel v roji. Klíčové názvosloví je uvedeno v tabulce (Tabulka č. 1)

Tabulka č. 1 Základní slovník PSO terminologie

částice/jedinec	jedinec v roji
pozice	N-rozměrná pozice jedince, která reprezentuje řešení problému
roj	úplný soubor jedinců
kritérium	jediné číslo reprezentující nejlepší řešení problémů
pbest	pozice v prostoru parametrů, kde bylo nalezeno nejlepší kritérium pro daného jedince
gbest	pozice v prostoru parametrů, kde bylo nalezeno nejlepší kritérium pro celý roj
V_{\max}	maximální povolená rychlost v daném směru

Podrobnější popisy klíčových slov:

- a) *jedinec*: Každá částice v roji se nazývá částice nebo jedinec. Všichni jedinci roje jednají individuálně podle stejných řídicích principů: mění svoji rychlost, aby našli svou nejlepší pozici v prostoru a přitom i nejlepší pozici celého roje, přestože stále kontrolují hodnoty z jeho aktuálního umístění.
- b) *pozice*: V analogii se včelami v roji, kde každá včela hledá největší koncentraci květin na poli. Tento prostor je reprezentovaný souřadnicemi x-y, tudíž dvourozměrný. Obecně však můžeme tento prostor změnit na N-rozměrný podle řešeného problému. Tento N-rozměrný prostor je prostor řešení, v kterém má být problém optimalizován, kde nějaká sada souřadnic představuje řešení problému. Řešení je fyzické umístění na souřadnicích x-y, ale toto může právě tak snadno představovat amplitudu a fázi prvku excitace ve fázovém poli. Obecně mohou být tyto hodnoty optimalizovány. Redukce optimalizačního problému, k množině hodnot, které by mohly představovat pozici v prostoru řešení, je základní krok ve využití PSO.
- c) *kritérium*: V každém technickém vývojovém výpočtu musí být určitá funkce nebo metoda jak vybrat nejlepší pozici. Kritériální funkce musí vzít pozici v prostoru řešení a vrátit jedno číslo, které představuje hodnotu pozice.
- d) *pbest*: V analogii se včelami na poli, kde si každý jedinec pamatuje nejlepší koncentraci květin, se kterou se potkal. Tato poloha s nejlepší kritériální hodnotou objevená jedincem je známá jako nejlepší osobní objev (pbest). Každý jedinec má svůj vlastní pbest určený cestou, kterou letěl. V každém bodu podél jeho cesty jedinec porovnává hodnotu kritéria s jeho aktuálním umístěním k pbest. Jestli aktuální poloha má lepší kritérium, pbest je nahrazen aktuální pozicí.

- e) *gbest*: Každá včela také nějakým způsobem zná místo s nejvyšší koncentrací květin pro celý roj. Tato poloha s nejlepší kritériální hodnotou objevená celým rojem je známá jako nejlepší celkový objev (*gbest*). Pro celý roj je jeden *gbest*, ke kterému je každý jedinec přitahován. V každém bodu podél jejich cesty každý jedinec porovnává hodnotu kritéria s jejich aktuálním umístěním k *gbest*. Jestliže má aktuální poloha lepší kritérium, *gbest* je nahrazen aktuální pozicí.

4.4.3 Popis PSO algoritmu

Definice prostoru řešení: První krok k implementaci PSO je vybrat parametry, které mají být optimalizované a dát jim dostatečný rozsah, ve kterém se bude hledat optimální řešení. To vyžaduje specifikaci minimální a maximální hodnoty pro každý rozměr v N-rozměrné optimalizaci. Zadává se $x_{\min n}$ a $x_{\max n}$ pro každý prostor, kde n nabývá od 1 do N.

Definice kritériální funkce: Tento důležitý krok poskytuje spojení mezi optimalizačním algoritmem a fyzickým světem. Je velmi kritické vybrat správnou funkci, která by představovala výsledek v jedné číselné hodnotě. Na kritériální funkci se můžeme též dívat jako na funkční závislost, která závisí na všech parametrech, které mají být optimalizovány. Kritériální funkce a prostor řešení musí být specificky vyvinut pro každou optimalizaci, zbytek implementace je nezávislý na fyzickém systému během optimalizace.

Inicializace náhodné pozice roje a rychlosti jedinců: Na začátku hledání optimální pozice v prostoru řešení začne každý jedinec na náhodné pozici s náhodnou rychlostí, náhodným směrem a velikostí. Počáteční pozice je jediná poloha každého jedince, se kterou se setkali, a proto se tato pozice stává *pbest*. První *gbest* je pak vybrán z těchto počátečních pozic.

Systematický let jedinců nad prostorem řešení: Každý jedinec se musí pohybovat prostorem řešení, jako kdyby to byla včelka v roji. Algoritmus působení na každého jedince je stejný, pohybovat se po malých úsecích a kmitat skrz celý roj. Následující kroky jsou vydané na každého jednotlivce individuálně:

- Vyhodnocení kritéria jedince, porovnání gbest a pbest:* Kritériální funkce používá souřadnice jedince v prostoru řešení a vrací hodnotu, která odpovídá aktuální poloze jedince. Jestliže je tato hodnota lepší než aktuální hodnota *pbest* pro daného jedince, nebo globální *gbest*, pak je tato hodnota *pbest* nebo *gbest* nahrazena.
- Aktualizace rychlosti jedince:* Manipulace s rychlostí jedince je hlavním prvkem celé optimalizace. Pečlivé pochopení rovnice pro určování rychlosti jedince je klíčem k porozumění optimalizace jako celku. Rychlost jedince je měněna podle relativní pozice *pbest* a *gbest*. Rychlost je zvyšována ve směru nejlepšího kritéria podle následující rovnice:

$$v_n = w \cdot v_n + c_1 \cdot \text{rand}() \cdot (pbest_n - x_n) + c_2 \cdot \text{rand}() \cdot (gbest_n - x_n) \quad (4.1)$$

kde v_n je rychlost jedince v n -tém prostoru a x_n je souřadnice jedince v n -tém prostoru. Tento výpočet se udělá pro každý N rozměr v N-rozměrné optimalizaci. Z rovnosti vyplývá, že nová rychlost je stará rychlost kalibrována konstantou w a zvětšená ve směru *gbest* a *pbest* pro danou dimenzi, c_1 a c_2 jsou váhy faktoru, které určí relativní „tah“ k *gbest* a *pbest*. Tyto konstanty bývají někdy označovány jako poznávací a společenský faktor působící na jedince. Konstanta c_1 je faktor poznávací, neboli jak moc je jedinec ovlivňován svým nejlepším osobním objevem *pbest*. Konstanta c_2 je faktor společenský, neboli jak moc je jedinec ovlivňován nejlepším objevem roje *gbest*. Vysoká hodnota konstanty c_1 povzbuzuje každého

jedince ke zkoumání prostoru řešení kolem nejlepšího osobního maxima pbest. Vysoká hodnota konstanty c_2 povzbuzuje každého jedince ke zkoumání prostoru řešení kolem nejlepšího objevu roje gbest.

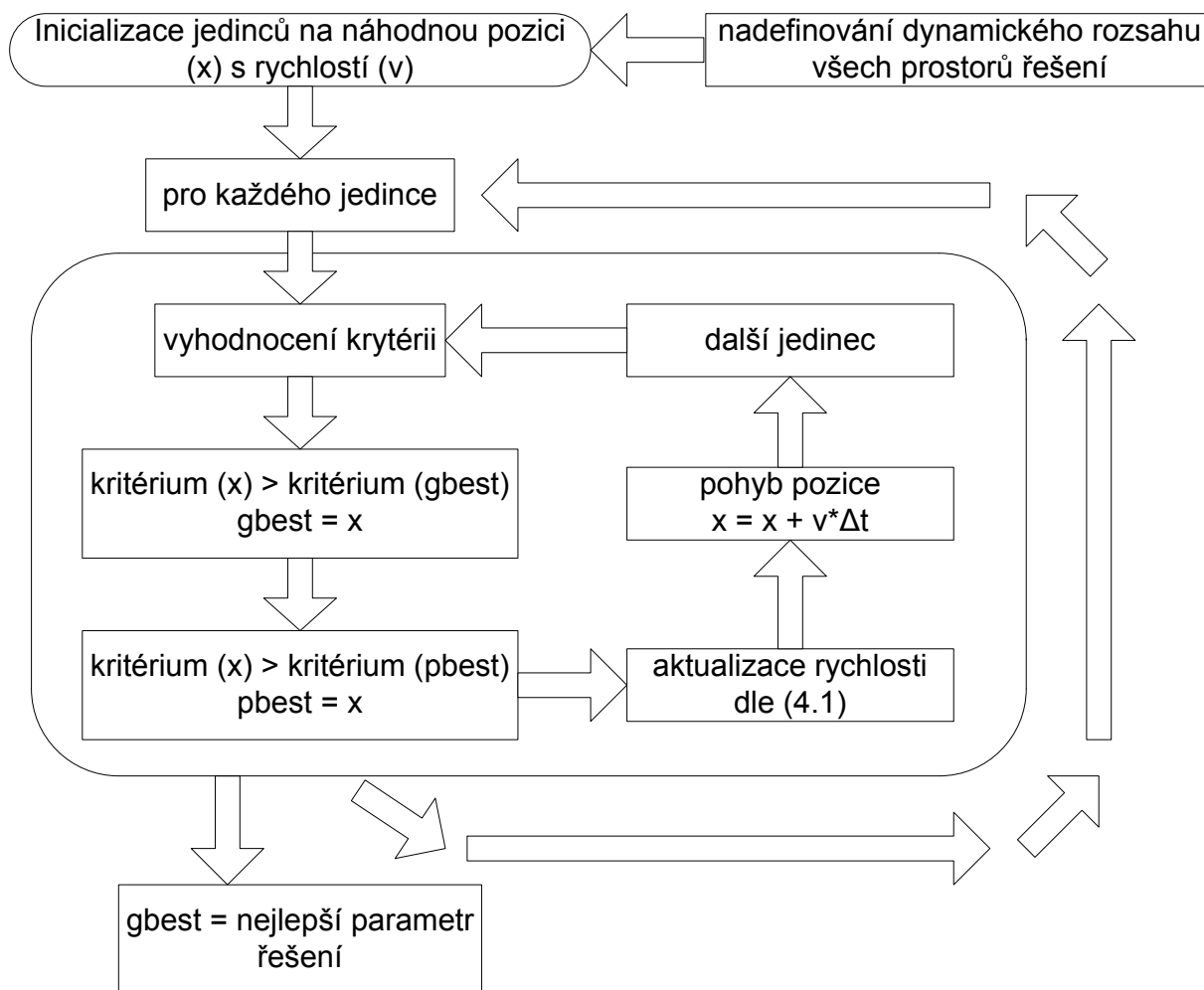
Náhodné číslo funkce $\text{rand}()$ vrací hodnotu mezi 0 až 1. To je obecný případ, že dvě funkce $\text{rand}()$, které se objevují v rovnici (4.1), představují dvě oddělené volání na funkci. Největší implementace používají dvě nezávislá náhodná čísla, která stochasticky mění přitah jedince k pbest a gbest. Tímto je představen náhodný prvek do optimalizace, který je určen k simulování nepředvídatelnosti komponentu přírodního chování roje. Konstanta w je známá jako „inerciální váha“ a toto číslo může nabývat hodnot od 0 do 1. Tím je určeno do jaké míry bude jedinec setrvačný ve své stávající trajektorii neovlivněný tahem k pbest a gbest. Nejvzdálenější jedinec od gbest a pbest cítí největší „tah“ z příslušných lokalit a proto se k nim pohybují rychleji než jedinci, kteří jsou blíže. Jedinec stále zrychluje směrem k nejlepšímu kritériu, až ho přeletí. V tomto bodě začne být tažen opačným směrem. A to je ono „přelétání“ nad pbest a gbest. Mnozí věří, že to je právě tajemství v úspěchu PSO.

- c) *Pohyb jedinců:* Jakmile byla rychlost určena, jedná se již o jednoduchý pohyb jedince k další pozici. Rychlost zůstává stabilní pro daný časový krok Δt . Nová souřadnice x_n je vypočtena pro každý N rozměr podle následující rovnice:

$$x_n = x_n + \Delta t \cdot v_n \quad (4.2)$$

Jedinec je pak přesunut na pozici vypočtenou pomocí rovnice (4.2). Složená povaha tohoto algoritmu složeného z několika nezávislých zástupců udělá především implementaci na paralelních prostorech.

Opakování: Tento proces se uskuteční pro každého jedince v roji. Z praktických důvodů se časový krok volí $\Delta t = 1s$. Po každém časovém kroku jsou všechny pozice jedinců zaznamenány a vyhodnotí se pozice pbest a gbest. Tento cyklus se opakuje, dokud není splněno omezení kritérií. Existuje několik metod jak určit tyto kritéria omezení. Nejčastěji se používá metoda, že uživatel určí počet iterací (počet opakování), je nadefinováno, kolikrát dojde k posunu o časový krok Δt . Další ukončovací kritérium je nadefinování výsledku kritériální funkce. Uživatel si nadefinuje počet iterací, ale jakmile se v průběhu objeví, že řešení je větší nebo rovno kritériální hodnotě, PSO se zastaví v tomto bodě. Toto řešení je výhodné, pokud chce uživatel splnit zadání s jistou přesností, ale není nutné zabývat se nálezem nejlepšího řešení. Ukončovací kritérium může být také např. minimální standardní odchylka. Tato metoda může být použita v určité kombinaci s předchozími zmíněnými kritérii, kdy je porovnávána střední standardní odchylka od všech jedinců s minimální standardní odchylkou definovanou uživatelem. Jestliže je aktuální hodnota střední standardní chyby menší než minimální, pak všichni jedinci musí kroužit kolem výsledného bodu gbest a optimalizace je zastavena. Pro určování střední standardní chyby je důležité uvažovat dynamické rozsahy každé dimenze v optimalizaci.



Obrázek č. 14 Vývojový diagram algoritmu PSO

4.4.4 Výběr hodnot parametrů

Cílem je vyvinout algoritmus s optimální rovnováhou mezi globálním zkoumáním a zkoumáním lokálních maxim. Jedním z prvních problémů bylo ovládat prostor řešení prozkoumávaný rojem. Bez jakýchkoliv hranic či limitů na rychlosti mohli jedinci letět ven z fyzicky smysluplného prostoru řešení. Jeden možný způsob řešení je zavést maximální dovolenou rychlost v_{\max} . Bylo zjištěno, že bez inerciální váhy ($w = 1$) byl v_{\max} nejlépe stanovený kolem 10 až 20% z dynamického rozsahu pro každou dimenzi. Při zahrnutí inerciální váhy doufali v negaci v_{\max} , poté se zjistilo, že pokud bude v_{\max} nastavena stejně z dynamického rozsahu pro každou dimenzi, bude PSO poskytovat lepší výsledky. Brzy bylo zjištěno (metodou pokus - omyl), že nejlepší volba pro c_1 a c_2 je 2,0.

Dalším parametrem je inerciální váha w . Hodnota w určuje rovnováhu mezi globálním a lokálním zkoumáním. Pokud se nastaví větší hodnota inerciální váhy, je tendence ke globálnímu průzkumu, jedinci jsou méně přitahováni k lokacím pbest a gbest a více se soustředí na let ve svém originálním směru. Obráceně, pokud se nastaví menší hodnota inerciální váhy, je tendence k lokálnímu průzkumu, jedinci jsou hodně přitahováni k lokacím pbest a gbest. Brzy se ukázalo, že vhodný rozsah inerciální váhy je od 0,4 do 0,9 a je vhodné váhu obměňovat lineárně.

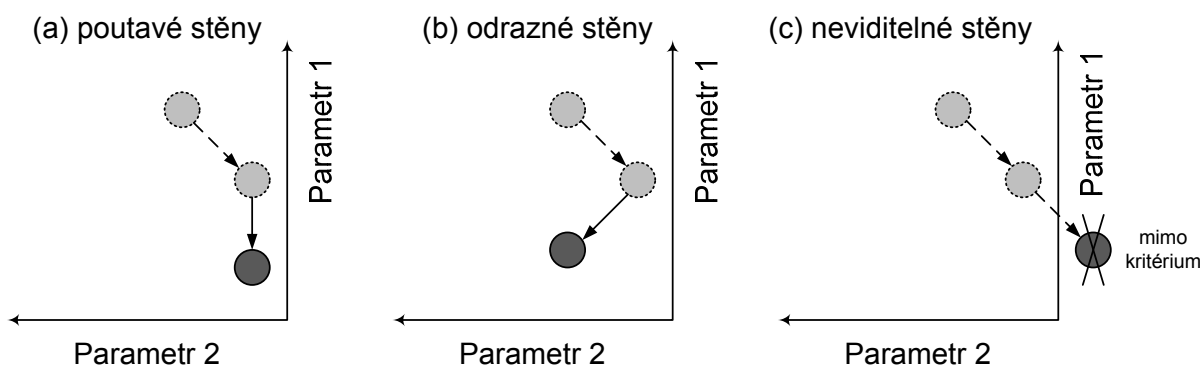
Důležitá je také volba iterací. Jestliže je maximální množství iterací příliš velké, PSO může začít stagnovat a čekat na snížení setrvační váhy k tomu, aby začalo využívat maximálního množství. Podobně příliš málo iterací může mít za následek využívání pouze lokálního maxima jedince před necháním času roji k důkladnému průzkumu prostoru řešení a nalezení globálního maxima.

Další důležitý parametr, který musí být pečlivě vybrán je populační velikost. Velká populační velikost poskytuje nejdůkladnější prozkoumání prostoru řešení, za cenu časové náročnosti počítání a vyhodnocení kritériální funkce. Pro metodu PSO bylo zjištěno, že relativně malá populační velikost může dostatečně prozkoumat prostor řešení a tudíž se vyhnout časové náročnosti výpočtu kritériální funkce. Parametrická studia zjistila, že populační velikost kolem 30 jedinců a dokonce i menší populační velikosti kolem 10 až 20 jedinců byly dostačující k řešení některých problémů.

4.4.5 Okrajové podmínky

Skoro v každém případě je žádoucí omezit hledání v v prostoru řešení jenom na to co je fyzicky možné. Zkušenost ukázala, že v_{max} , omezující faktor a setrvačná váha neudrží jedince vždy v prostoru řešení. Proto byly zavedeny tři hraniční podmínky. Tyto podmínky jsou zobrazeny na obrázku (Obrázek č. 15).

- Poutavé stěny:** Když jedinec narazí na hranici v prostoru řešení v jednom rozměru, je jeho rychlost v daném prostoru nulová a jedinec může být nakonec tažen zpět směrem k dovolenému prostoru řešení. V tomto případě stěny absorbují energii jedince, kterou byl hnán z prostoru řešení.
- Odrazné stěny:** Když jedinec narazí na hranici v jednom z prostorů, znaménko jeho rychlosti je v této dimenzi změněno a jedinec je odražen směrem k prostoru řešení.
- Neviditelné stěny:** Jedinci mají povoleno letět bez jakéhokoliv fyzického omezení. Nicméně jedinci, kteří poletují vně dovoleného prostoru řešení, nejsou ohodnoceni kritériální funkcí. Motivací této hraniční podmínky je úspora času při vyhodnocování jedinců, kteří jsou v dovoleném prostoru řešení, ale nedochází k zásahu do přírodního pohybu roje.



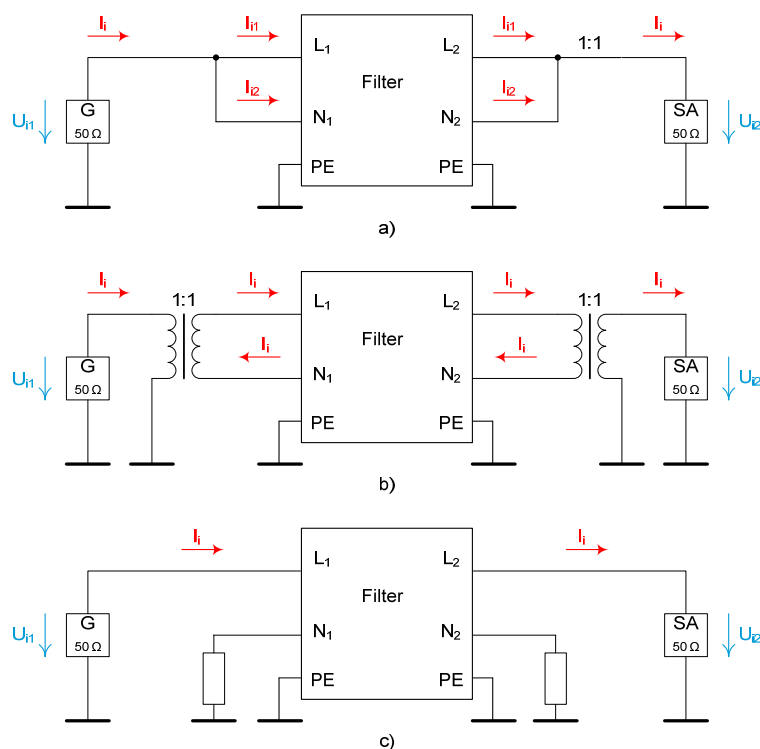
Obrázek č. 15 Hraniční podmínky: (a) poutavé stěny, (b) odrazné stěny, (c) neviditelné stěny

5 Matematické vyjádření vložného útlumu filtru

EMI filtry jsou jedním z nejčastěji užívaných nástrojů pro potlačení elektromagnetického rušení (EMI) která se šíří po napájecí síti. Nejpřednější úkol filtrů je obvykle zvýšit odolnost elektronického zařízení ovládaného na vstupech elektrického vedení a současně snížit úroveň emisí vysokého kmitočtu dodávaného vybavením do vnější výkonové sítě. Nejdůležitější charakteristické rysy filtrů jsou hodnoty vložného útlumu nebo RF zeslabení. Vložný útlum filtrů závisí na aktuální frekvenci rušivého signálu. Výkon filtru závisí na aktuální impedanci, která je připojena k zakončovacím svorkám filtru, proudové zátěži, atd. Obecně se zde vyskytuje mnoho parametrů, podmínek a vlivů, které mohou snížit vložný útlum filtru. Pokrytí všech těchto možností v nastavení měření a v záznamových i katalogových listech je téměř nemožné [7].

5.1 Systémy pro měření vložného útlumu filtrů

Filtry obvykle mají víc než dvě svorky na vstupní a výstupní straně, např. jednofázový odrušovací filtr má minimálně tři svorky (živá, neutrální a zem). Tato situace komplikuje správnou reprezentaci technických parametrů filtru. Je také možné určit několik konfigurací zapojení zdroje a přijímače rušení a následné šíření rušivých signálů výkonovou sítí. Tato situace je zobrazená na obrázku (Obrázek č. 16). Tyto tři různé měřicí systémy mohou být uskutečněny pro jednofázový EMI filtr. Nejběžněji uváděná data jsou měřena v asymetrickém režimu a). Několik výrobců nabízí data pro systém b), který je nazýván symetrický. Poslední systém je označen jako nesymetrický c).



Obrázek č. 16 Možné systémy měření vložného útlumu: a) asymetrický, b) symetrický, c) nesymetrický

Výrobci EMI filtrů obvykle zveřejňují útlumové charakteristiky pro asymetrický systém a pro systém s impedancemi $50 \Omega / 50 \Omega$ [8], [9]. První číslo znamená hodnotu zakončovací impedance na vstupních svorkách filtru. Druhé číslo vyjadřuje hodnotu výstupní zakončovací impedance. Několik výrobců poskytuje data také pro symetrický systém pro různé zakončovací impedance, například: $50 \Omega / 50 \Omega$; $0.1 \Omega / 100 \Omega$ (a naopak). Vložný útlum měřený se zakončovací impedancí $0.1 \Omega / 100 \Omega$ a naopak je definovaný mezinárodní normou CISPR 17 [4]. Např. společnost Schaffner, obecně známý výrobce EMI filtrů, publikovala aplikační poznámku [10], kde je jasně popsán definovaný měření jako v CISPR 17. Podobný standard je definovaný Ministerstvem obrany Spojených států amerických [11].

Systémy se zakončovacími impedancemi $0.1 \Omega / 100 \Omega$ a naopak jsou doporučeny v [4] pro testování nejhorší případu. Jinými slovy, EMI filtry budou mít v tomto systému nejhorší vložný útlum. Tato metoda se zakončovacími impedancemi $0.1 \Omega / 100 \Omega$ (a naopak) není tak široce užívána výrobci filtru pravděpodobně proto, že signálové generátory a spektrální analyzátoři mají vstupní resp. vstupní impedanci 50Ω . Pro měření v systému $0.1 \Omega / 100 \Omega$ a naopak je nezbytné použít dvou impedančních transformátorů. Tyto transformátory transformují 50Ω na 0.1Ω a 100Ω . Transformátory mohou být dvou druhů, buď s výstupy vyváženými, nebo nevyváženými.

5.2 Jednoduchý model vložného útlumového filtru

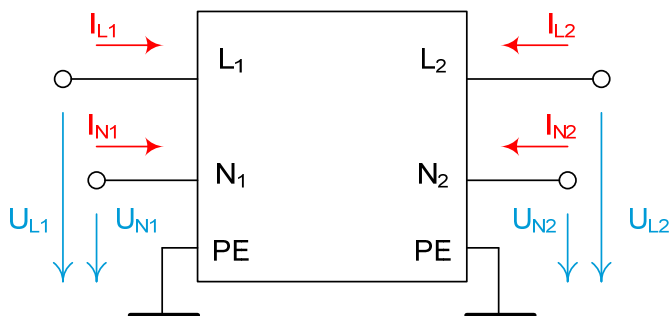
Srovnání různých filtrů z několika společností není jednoduché. Největší problém je získat data pro různé filtry a zároveň různé kombinace zakončovacích impedancí. Jeden způsob je přes analýzu modelů filtru. Tento přístup má několik výhod. Metoda založená na modelech není tak zdlouhavá jak mnoho měření s jinou zakončovací impedancí. Pro tvoření modelů je mnoho komerčních softwarů (PSPice, Micro-cap, Ansoft Designer, atd). Tyto veškeré softwarové systémy jsou velmi specializované pro specifické úkoly. Výkonová analýza EMI filtru by měla být velmi univerzální a proměnná, protože konfigurace každého filtru je velmi individuální. Z toho důvodu byl pro tuto analýzu vybrán program Matlab. Používání tohoto programu přináší univerzálnost, protože stanovení vloženého útlumu užívá jen Y parametry. Základní jednofázový EMI filtr, jehož schéma zapojení je zobrazené na obrázku (Obrázek č. 17), by mohl být popsán následujícími rovnicemi

$$\begin{aligned}
 I_{L1} &= Y_{11} \cdot U_{L1} + Y_{12} \cdot U_{N1} + Y_{13} \cdot U_{L2} + Y_{14} \cdot U_{N2} \\
 I_{N1} &= Y_{21} \cdot U_{L1} + Y_{22} \cdot U_{N1} + Y_{23} \cdot U_{L2} + Y_{24} \cdot U_{N2} \\
 I_{L2} &= Y_{31} \cdot U_{L1} + Y_{32} \cdot U_{N1} + Y_{33} \cdot U_{L2} + Y_{34} \cdot U_{N2} \\
 I_{N2} &= Y_{41} \cdot U_{L1} + Y_{42} \cdot U_{N1} + Y_{43} \cdot U_{L2} + Y_{44} \cdot U_{N2}
 \end{aligned} \tag{5.1}$$

kde I_{x1} je vstupní proud pro svorky L_1 a N_1 , I_{x2} je výstupní proudů. Stejným způsobem jsou znázorněny vstupní a výstupní napětí na obrázku (Obrázek č. 17). Y_{xy} jsou parametry admitanční matice testovaného EMI filtru. Soustavu rovnic (5.1) lze jednoduše přepsat do matice

$$I = Y \cdot U \tag{5.2}$$

kde I je vektor neznámých proudů a U je vektor proměnných napětí. Rovnice (5.1) přesně popisují vlastnosti libovolného EMI filtru, ale pro správné výpočty, je nezbytné přidat více rovnic, které se budou odvolávat na uspořádání impedance sítě, viz. (Obrázek č. 16) a na umístění zdroje rušivého signálu. Data vložného útlumu jsou získány výpočtem těchto rovnic. Skutečná frekvence, na které je ztráta vložného útlumu testována výpočtem, je také obsažená v každém prvku matice Y . Touto metodou je možné určit hodnoty vložného útlumu (L [dB]).



Obrázek č. 17 Ukázka napětí a proudů na testovaném filtru

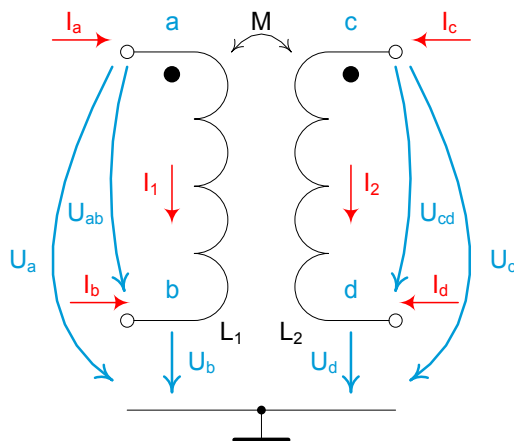
Filtry obvykle zahrnují proudově kompenzované tlumivky, pro které není snadné použít modifikovanou metodu uzlových napětí. Tato metoda se spíše hodí pro popis jednoduchých a lineárních elektronických obvodů. Výše uvedená ukázka metody musí být rozšířena pro správné určení vstupní admitanční matice Y EMI filtrů. Vstup admitanční matice Y musí být rozšířen dvěma sloupci a dvěma řádky. Vliv proudově kompenzovaných tlumivek je zapsán přidáním buněk.

$$\begin{aligned} U_{ab} &= j \cdot \omega \cdot L_1 \cdot I_1 + j \cdot \omega \cdot M \cdot I_2 \\ U_{cd} &= j \cdot \omega \cdot M \cdot I_1 + j \cdot \omega \cdot L_2 \cdot I_2 \end{aligned} \quad (5.3)$$

kde význam jednotlivých proměnných je zřejmý z obrázku (Obrázek č. 18). Konstanty L a M představují vlastní a vzájemné koeficienty proudově kompenzované tlumivky. Vztah mezi těmito dvěma konstantami je dán

$$M = k \cdot \sqrt{L_1 \cdot L_2} \quad (5.4)$$

kde k je součinitel vazby. Hodnoty vlastních indukčností L_1 a L_2 jsou obvykle stejné pro většinu filtrů ($L = L_1 = L_2$).



Obrázek č. 18 Proudově kompenzovaná tlumivka se vzájemnými koeficienty

$$\begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \\ I_d \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 \\ -1 & 1 & 0 & 0 & j\omega L & j\omega M \\ 0 & 0 & -1 & 1 & j\omega M & j\omega L \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} U_a \\ U_b \\ U_c \\ U_d \\ I_1 \\ I_2 \end{bmatrix} \quad (5.5)$$

Tato uvedená matice je odvozena pro jednofázový EMI filtr, který obsahuje jen jednu proudově kompenzovanou tlumivku. Pro popis filtru s více tlumivkami je nezbytné vytvořit větší matici. Tento fakt rychle snižuje efektivitu a univerzálnost této analýzy. Nejmenší velikost matice by mohla být 4 x 4, protože jednofázové filtry mají obvykle 2 vstupní a 2 výstupní svorky. Takto je možné vytvořit univerzální vztah pro výpočet vloženého útlumu, který závisí jen na parametrech filtrů (Y_{11} až Y_{44}). Tyto parametry jsou definovány pro vstupní a výstupní uzly (svorky) EMI filtru. Zbytek uzlů musí být zmenšený na dimenzi na 4 x 4. Pro tuto redukci je možné použít pivotní kondenzace. Princip redukce je možný zapsat v této matematické formě

$$M_R = M_E - M_{EI} \cdot (M_I)^{-1} \cdot M_{IE} \quad (5.6)$$

Matice M_E , M_{EI} , M_I a M_{IE} byly vytvořeny z admitanční matice EMI filtru následujícím způsobem

$$\begin{bmatrix} M_E & M_{IE} \\ M_{EI} & M_I \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} X_I \\ X_E \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_I \\ L_E \end{bmatrix}, \quad (5.7)$$

kde X_I a X_E představují vnitřní a vnější neznámé. L_I a L_E zase představují externí zdroje. Matice M_R je konečná redukováná matice po pivotní kondenzaci. Tato matice má velikost 4 x 4. Každý prvek matice je použit do vztahu pro výpočet vloženého útlumu, kde celý výpočet závisí na frekvenci. Popisovanou metodou je možné počítat vložený útlum jednofázových EMI filtrů, jelikož toto nastavení počítá jen s hodnotami, které nemají zahrnuté parazitní prvky, z čehož vyplývá, že výpočty vloženého útlumu nejsou možné na vyšší frekvenci. Hodnota vazby součinitele k by měla být nastavena měřením či optimalizací. Hodnoty měření vloženého útlumu, například v $50 \Omega / 50 \Omega$, které jsou dány v záznamových listech, by mohly být použity pro optimalizaci.

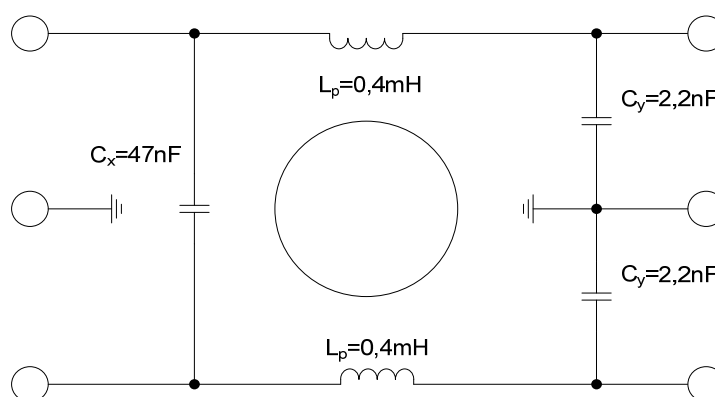
Metoda by mohla být upravena pro vícefázové filtry a podobné nastavení může být použito pro výpočet vloženého útlumu s jinými vstupními impedancemi [12].

6 Vlastnosti odrušovacích filtrů

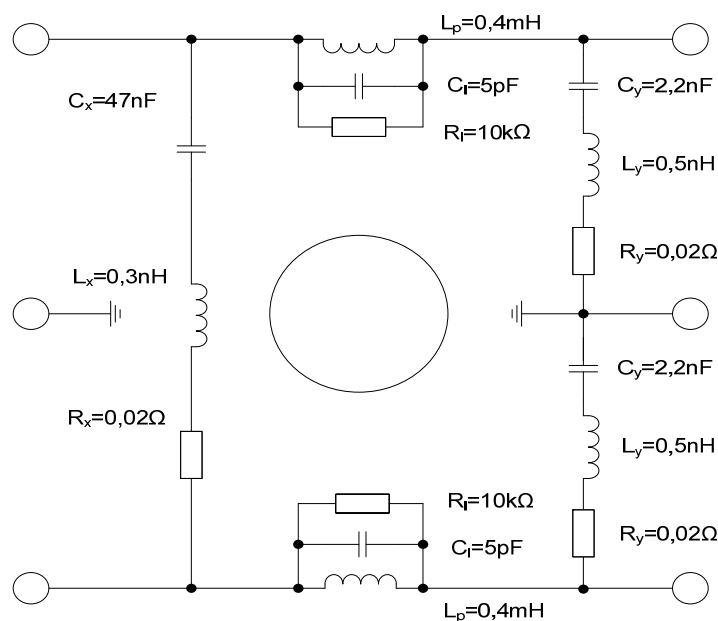
Základní vlastností odrušovacího filtru je jeho vložný útlum, který je frekvenčně závislý v širokém rozsahu frekvencí. Vložný útlum filtru závisí nejen na obvodovém řešení odrušovacího filtru, ale také na impedančních podmínkách na vstupu a výstupu filtru, které jsou neurčité [13].

6.1 Síťový odrušovací filtr Schurter 5110.1033.1

Tento síťový odrušovací filtr je vestavěný v přístrojové zástrčce společnosti SCHURTER [8]. Vnitřní zapojení filtru je zobrazeno na obrázku (Obrázek č. 19). Pro naše použití však potřebujeme reálné zapojení (Obrázek č. 20). Zde se začnou projevovat parazitní prvky, které hrají velkou roli na útlum filtru, což je patrné na obrázcích (Obrázek č. 23 a Obrázek č. 24).



Obrázek č. 19 Schéma zapojení odrušovacího filtru Schurter 5110.1033.1



Obrázek č. 20 Schéma reálného zapojení odrušovacího filtru Schurter 5110.1033.1

6.1.1 Asymetrické zapojení

Reálné zapojení obvodu a zjednodušeného ekvivalentního obvodu je zobrazeno na obrázku (Obrázek č. 21), kde jsou v podélné větvi zařazeny proudově kompenzované tlumivky a jejich parazitní prvky. Všechny prvky jsou v podélné větvi paralelně, a proto pro ekvivalentní obvodové prvky lze psát přepočtení vztahy

$$C_{lp}^{asy} = 2 \cdot C_l, \quad (6.1)$$

$$R_{lp}^{asy} = \frac{R_l}{2}, \quad (6.2)$$

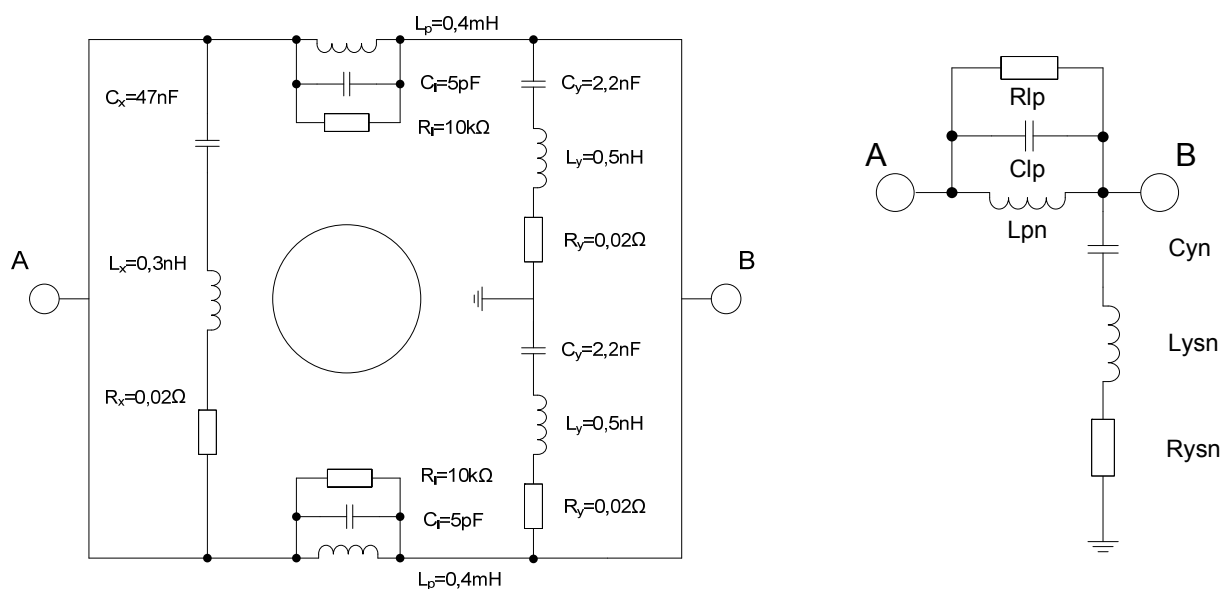
$$L_{pn}^{asy} = \frac{L_p \cdot (1+k)}{2}. \quad (6.3)$$

V příčné větvi jsou zařazeny kondenzátory a jejich parazitní prvky. Jsou vytvořeny dva sériové rezonanční obvody, které jsou paralelně, a proto lze psát přepočtení vztahy

$$C_{yn}^{asy} = 2 \cdot C_y, \quad (6.4)$$

$$R_{ysn}^{asy} = \frac{R_{ys}}{2}, \quad (6.5)$$

$$L_{ysn}^{asy} = \frac{L_{ys}}{2}. \quad (6.6)$$



Obrázek č. 21 Reálné zapojení obvodu a zjednodušeného obvodu v asymetrickém měřícím systému

6.1.2 Symetrické zapojení

Reálné zapojení obvodu a zjednodušeného ekvivalentního obvodu je zobrazeno na obrázku (Obrázek č. 22), kde jsou v podélné větvi zařazeny proudově kompenzované tlumivky a jejich parazitní prvky. Tyto prvky tvoří dva rezonanční obvody, které jsou v sérii, a proto pro ekvivalentní obvodové prvky lze psát přepočtení vztahy

$$C_{lp}^{sym} = \frac{C_l}{2}, \quad (6.7)$$

$$R_{lp}^{sym} = R_l \cdot 2, \quad (6.8)$$

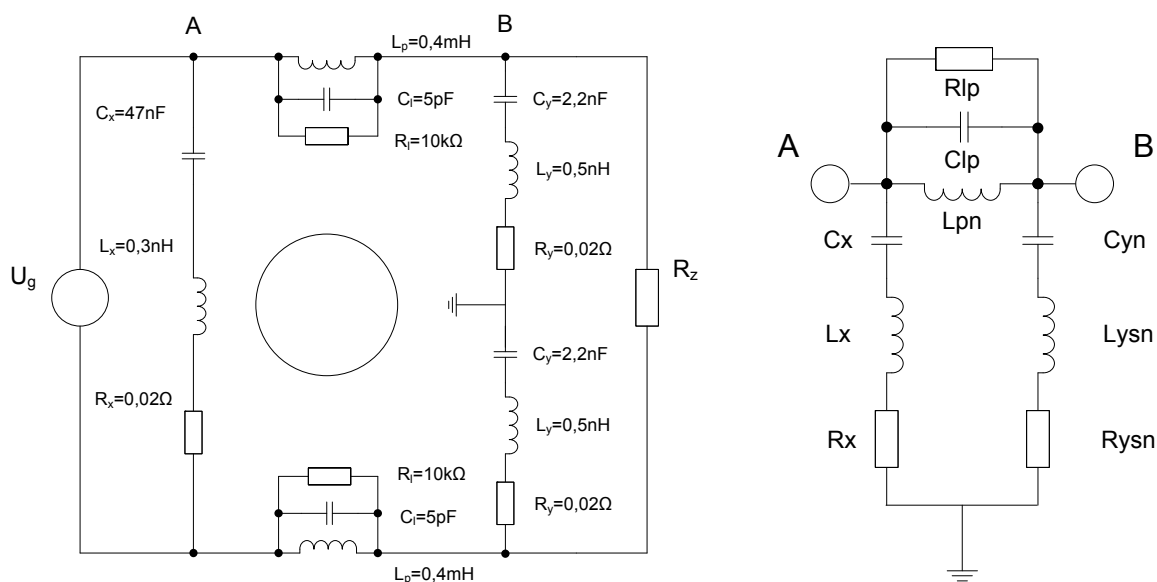
$$L_{pn}^{sym} = L_p \cdot (1 + k) \cdot 2. \quad (6.9)$$

V příčné větvi jsou zařazeny kondenzátory a jejich parazitní prvky. Je vytvořeno sériové spojení prvků, a proto lze psát přepočtení vztahy

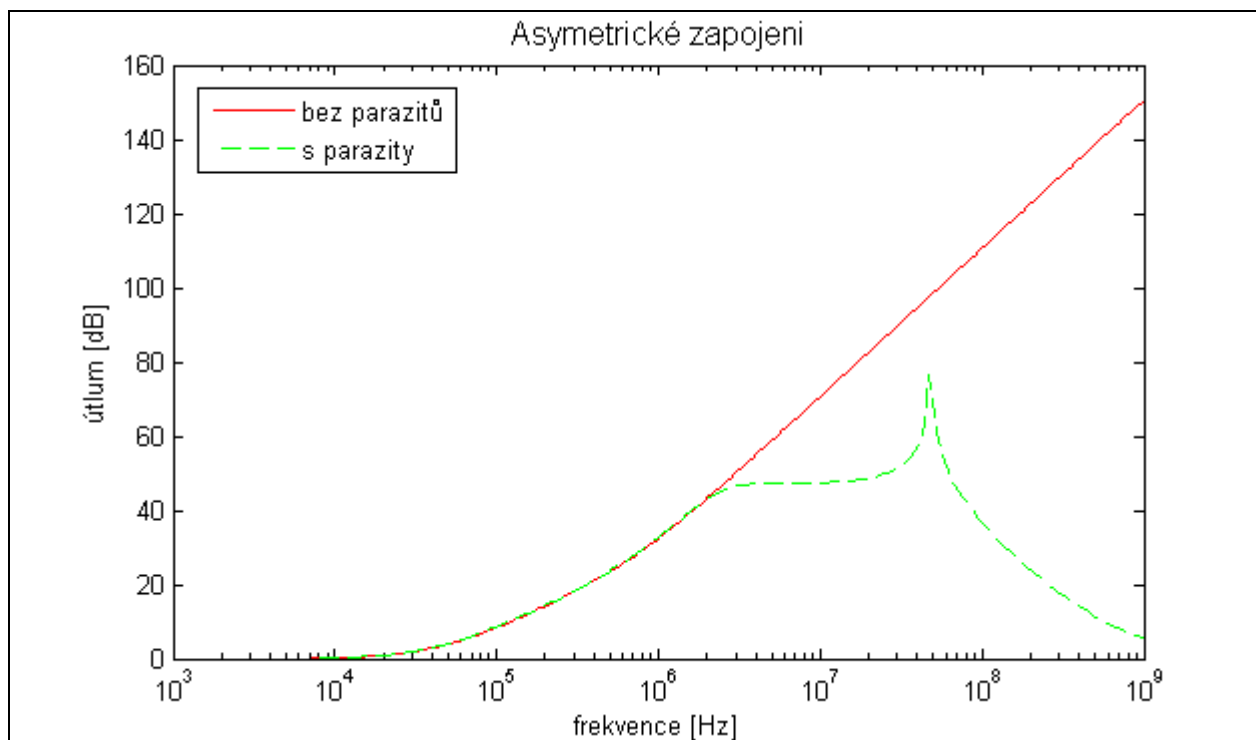
$$C_{yn}^{sym} = \frac{C_y}{2}, \quad (6.10)$$

$$R_{ysn}^{sym} = R_{ys} \cdot 2, \quad (6.11)$$

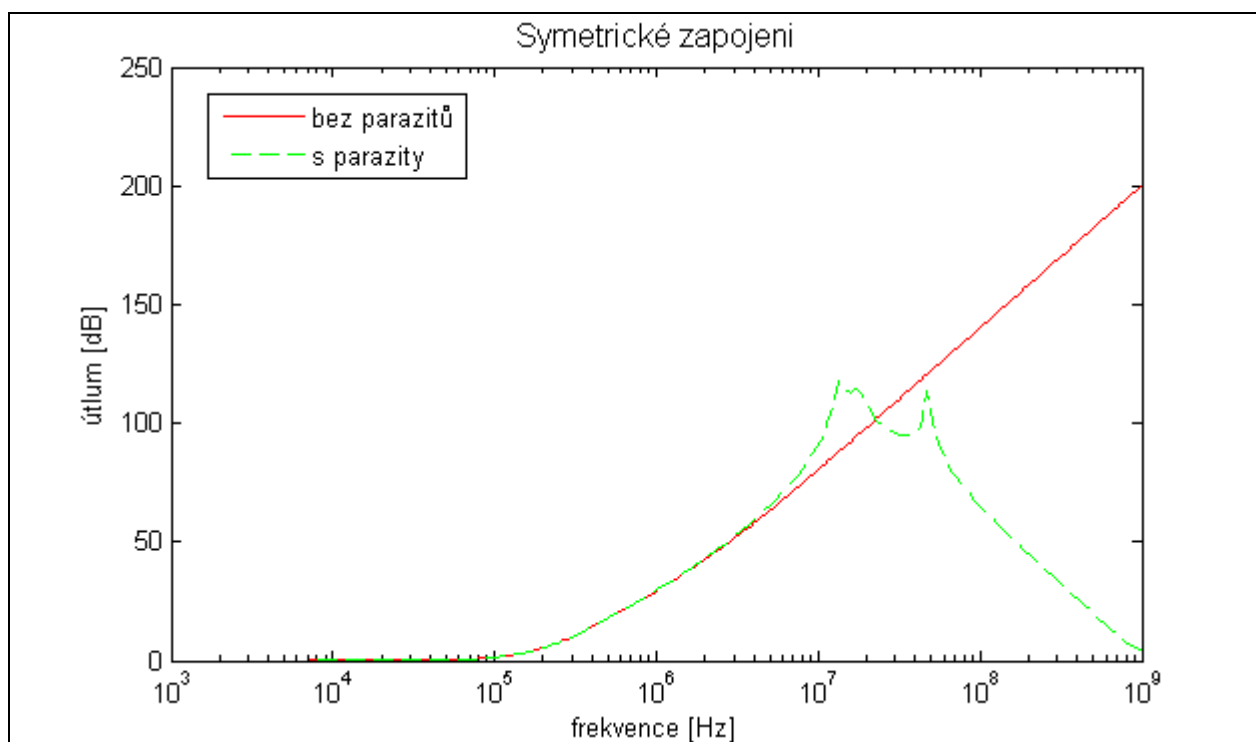
$$L_{ysn}^{sym} = L_{ys} \cdot 2. \quad (6.12)$$



Obrázek č. 22 Reálné zapojení obvodu a zjednodušeného obvodu v symetrickém měřicím systému



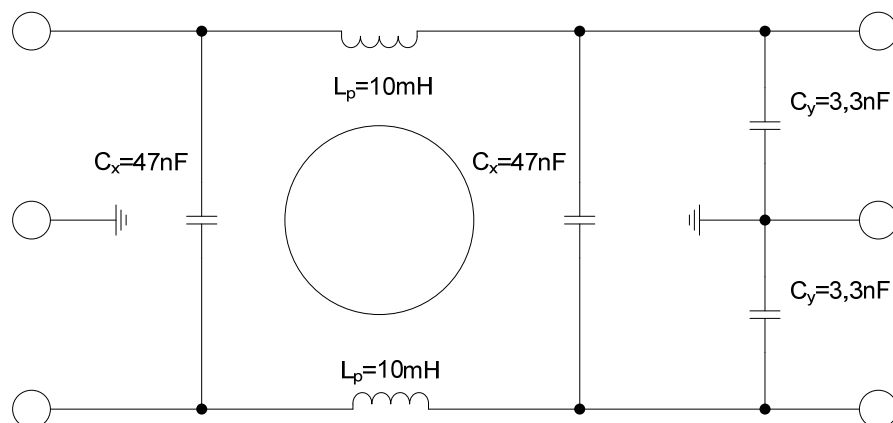
Obrázek č. 23 Útlumové charakteristiky pro asymetrické zapojení



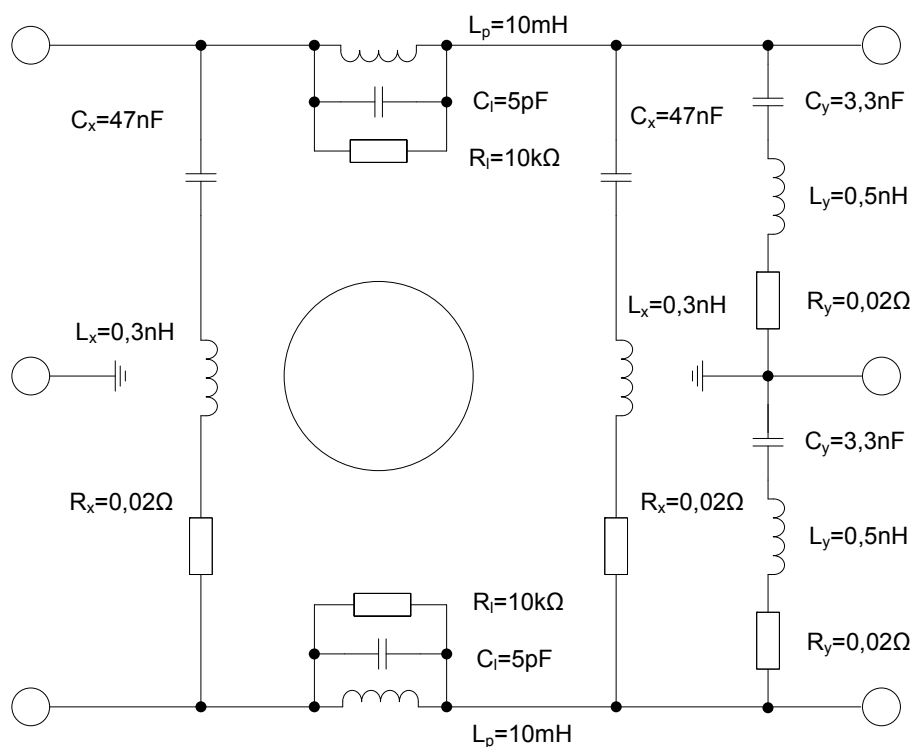
Obrázek č. 24 Útlumové charakteristiky pro symetrické zapojení

6.2 Síťový odrušovací filtr Schaffner 321-1/05

Tento filtr je stejně tak jako předchozí vestavěn v přístrojové zástrčce společnosti SCHAFFNER. Vnitřní zapojení filtru je zobrazeno na obrázku (Obrázek č. 25). Pro naše použití však potřebujeme reálné zapojení (Obrázek č. 26).



Obrázek č. 25 Schéma zapojení odrušovacího filtru schaffner 321-1/05



Obrázek č. 26 Schéma reálného zapojení odrušovacího filtru schaffner 321-1/05

7 Vlastní optimalizace

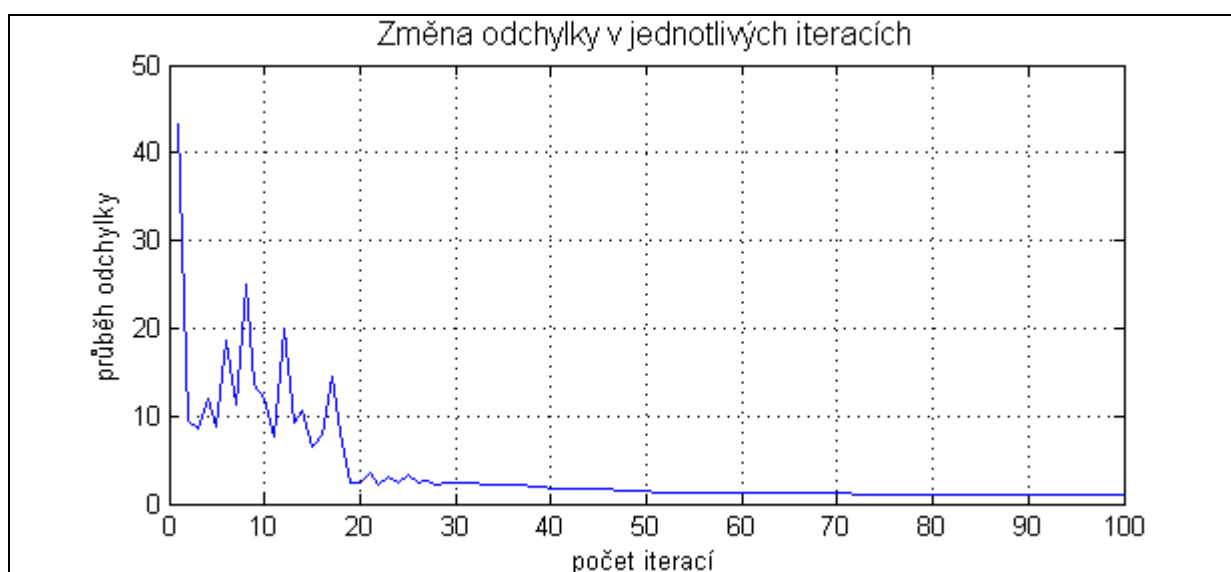
Pro odladění celé optimalizace bylo nejprve použito mnou zvolených hodnot filtru (syntetická data), kde byla očekávána téměř 100% shoda vypočtených a optimalizovaných dat. Po úspěšném dokončení optimalizace na vypočtených datech se mohlo přejít k optimalizaci dat měřených. Zde však vyšly najevo drobné nedostatky, které původní optimalizace měla, ale pro optimalizaci na vypočtených hodnotách nebyly patrné. Pro vysvětlení a popsání vad a nedostatků, které byly opraveny, jsem vyčlenil právě tuto kapitolu.

7.1 Optimalizace syntetických dat

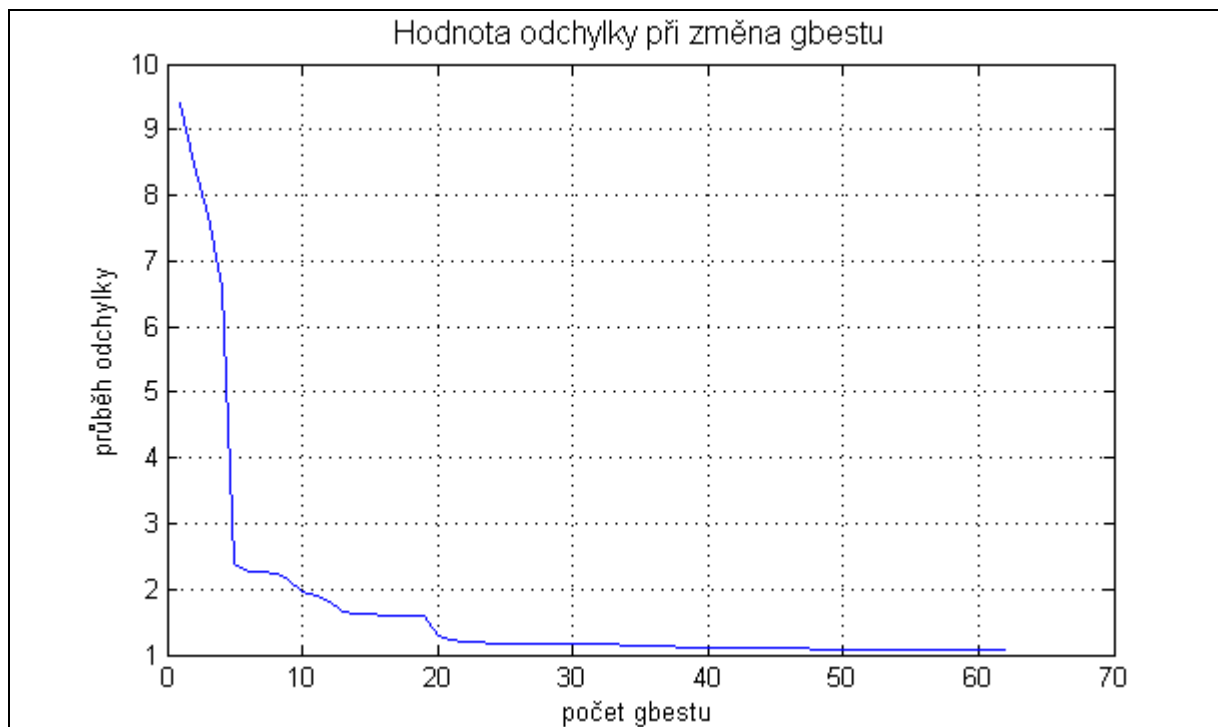
Po vytvoření matematického modelu filtru Schurter bylo možné vytvořit vlastní útlumové charakteristiky, které byly použity pro optimalizaci. Výsledky optimalizace jsou patrné v tabulce (Tabulka č. 2). Pro systém $50 \Omega / 50 \Omega$ jsem zobrazil grafické průběhy optimalizace, a to změnu odchylky v jednotlivých iteracích (Obrázek č. 27), změnu gbest hodnot (Obrázek č. 28), závislost útlumu na frekvenci v asymetrickém měření (Obrázek č. 29) a symetrickém měření (Obrázek č. 30). Jak je patrné, útlumové charakteristiky jsou téměř totožné, a to potvrzuje správnou funkčnost zvolené kritériální funkce.

Tabulka č. 2 Hodnoty nalezené pomocí PSO optimalizace

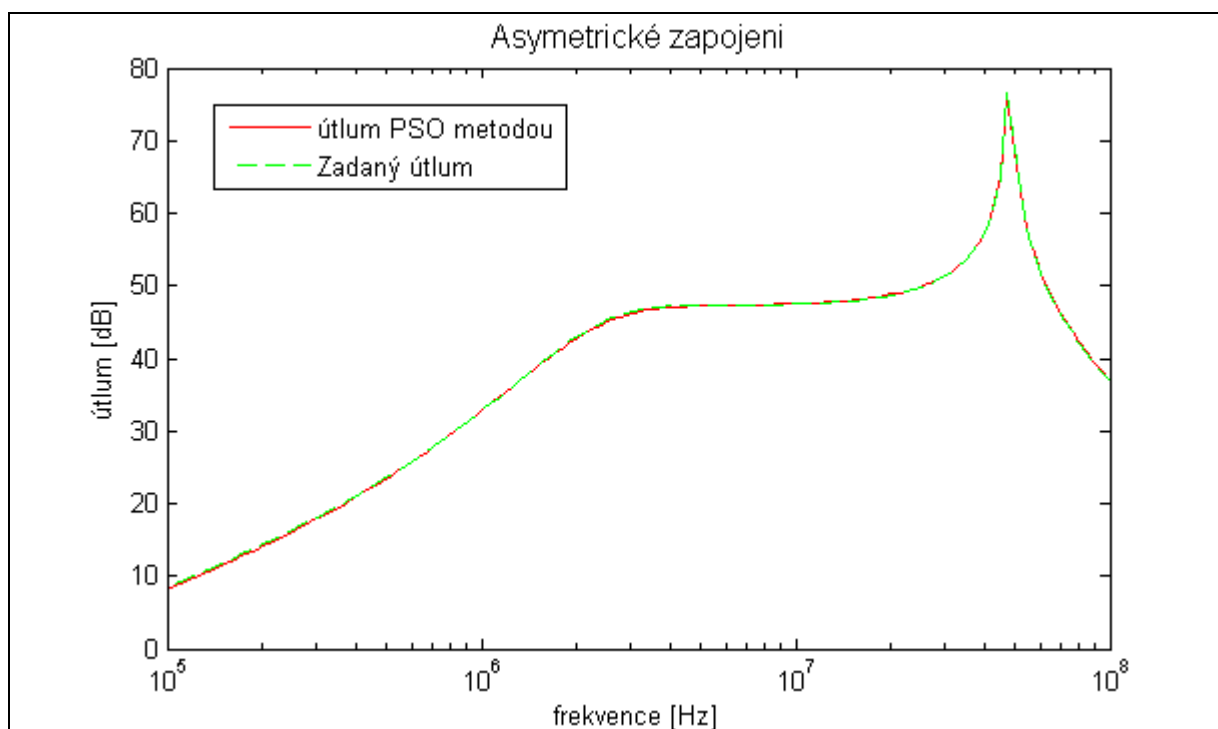
Prvky	Zvolené hodnoty	Nalezené hodnoty v systémech		
		50/50	0,01/100	100/0,01
L_x [nH]	3	2,886	1,1008	2,9026
R_x [Ω]	0,02	0,0196	0,0230	0,0195
L_y [nH]	5	4,6297	4,6235	1,3189
R_y [Ω]	0,02	0,0394	0,0354	0,0447
C_1 [pF]	5	5,1739	5,3364	5,1419
R_1 [k Ω]	10	8,6405	8,9848	10,559



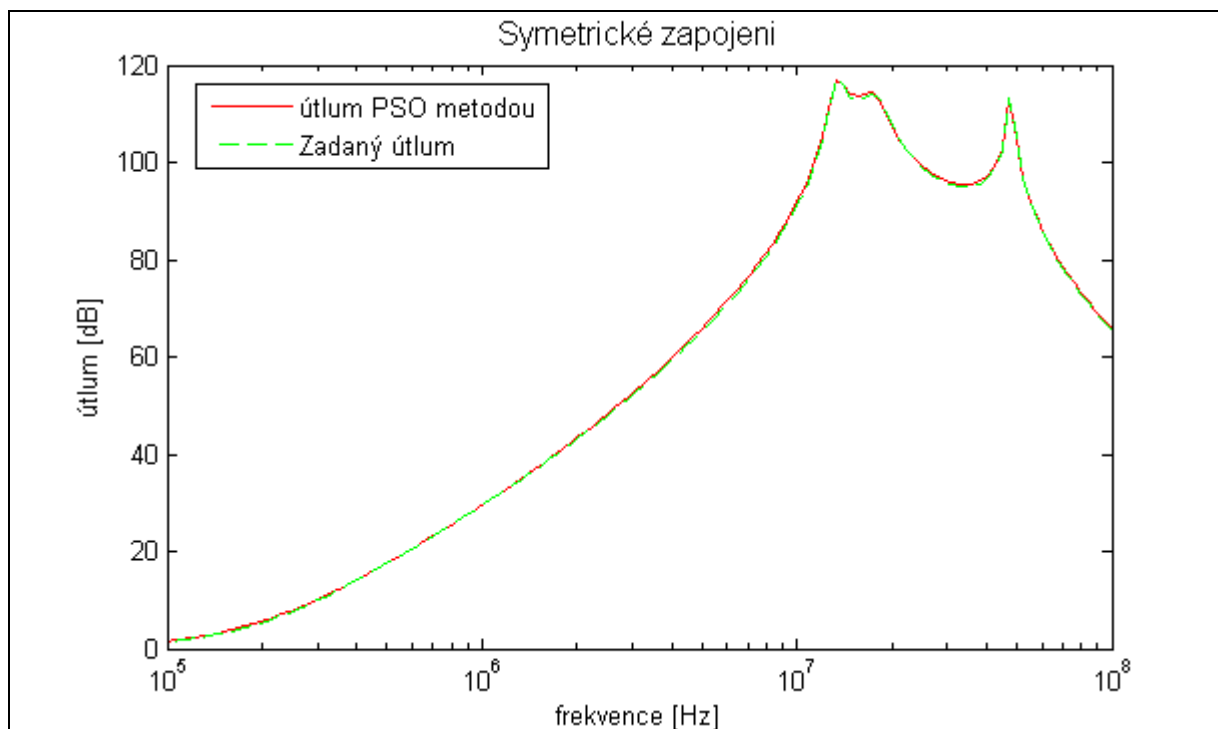
Obrázek č. 27 Průběh odchylky (X_v) v jednotlivých iteracích



Obrázek č. 28 Změna gbest hodnot



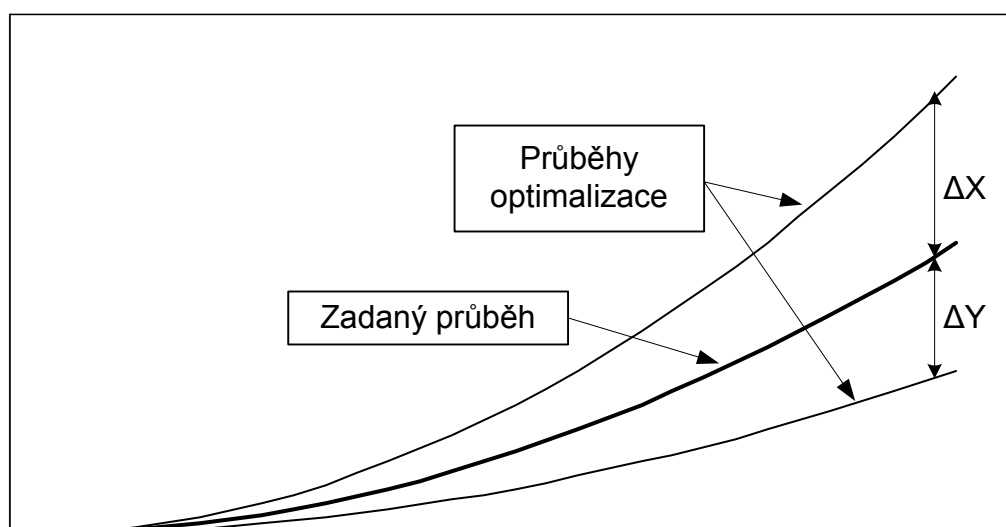
Obrázek č. 29 Závislost útlumu na frekvenci v asymetrickém měření



Obrázek č. 30 Závislost útlumu na frekvenci v symetrickém měření

7.2 Kriteriační funkce

Pro PSO optimalizaci je nejdůležitější zvolit vhodnou kriteriační funkci, aby byla optimalizace úspěšná. Zvolil jsem porovnávání odchylky od zadaného průběhu. Důležité však bylo vyřešit problém tak, aby byly brány v potaz kladné i záporné hodnoty a vzít jako výslednou vždy tu, která má větší hodnotu, protože tato hodnota je nejvíce vzdálena od útlumové charakteristiky a určuje nejhorší možnou úroveň. Názorná ukázka je patrná z ukázky uvedené na obrázku (Obrázek č. 31).



Obrázek č. 31 Výběr hodnot pro kriteriační funkci

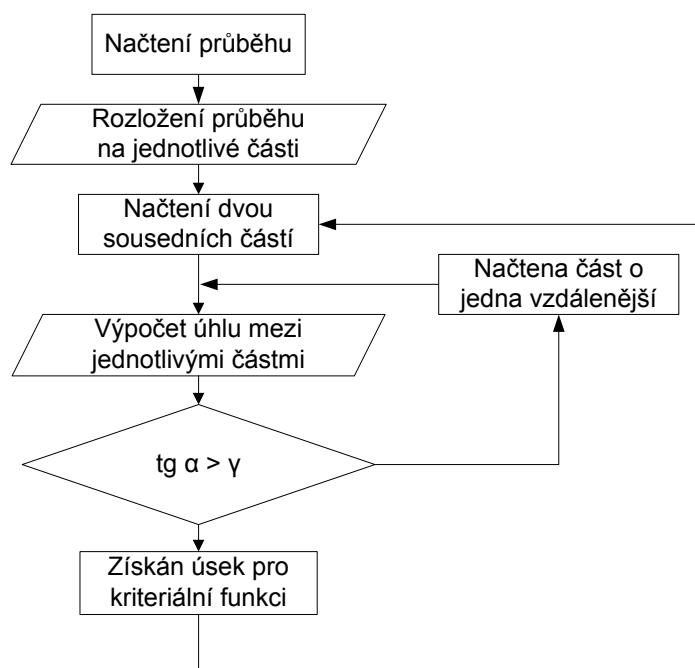
Při složitějším průběhu jsem tento průběh nejprve rozdělil na více částí ručně, kde jsem dané odchylky porovnával a součet těchto odchylek pak dal výslednou hodnotu. Ruční rozdělení se později při použití optimalizace na měřených datech ukázalo jako nedostačující a proto bylo zavedeno automatické rozložení.

7.2.1 Automatické rozložení

Jelikož bylo zapotřebí pro složitější průběhy brát v úvahu více hodnot pro kritériální funkci, byla do algoritmu přidána funkce na automatické rozložení optimalizovaného průběhu. Podle optimalizovaného průběhu lze měnit konstantu γ , podle které se automatické dělení provádí. Při ostrém průběhu může být konstanta větší, ať zbytečně není do kritériální funkce dáována každá hodnota průběhu a naopak. Princip algoritmu je patrný z obrázku (Obrázek č. 32).

Dále byla optimalizace opatřena možností volby počtu částí, které požadujeme brát v potaz do kritériální funkce. Tímto způsobem se lze zaměřit na několik nejhorších částí a tím pádem nebrat v úvahu celý změřený průběh. Pokud totiž bude nejhorších hodnot jen pár a ostatní hodnoty velké nebudou (ale zároveň nebudou ani zanedbatelné), způsobí nakonec velké množství těchto malých odchylek velkou hodnotu.

Například naměřený průběh má 400 částí. Pomocí automatického rozložení a nastavení konstanty např. $\gamma = 0.5$ získáme 120 částí. Nakonec si však můžeme zvolit, kolik částí se bude uvažovat do kritériální funkce.



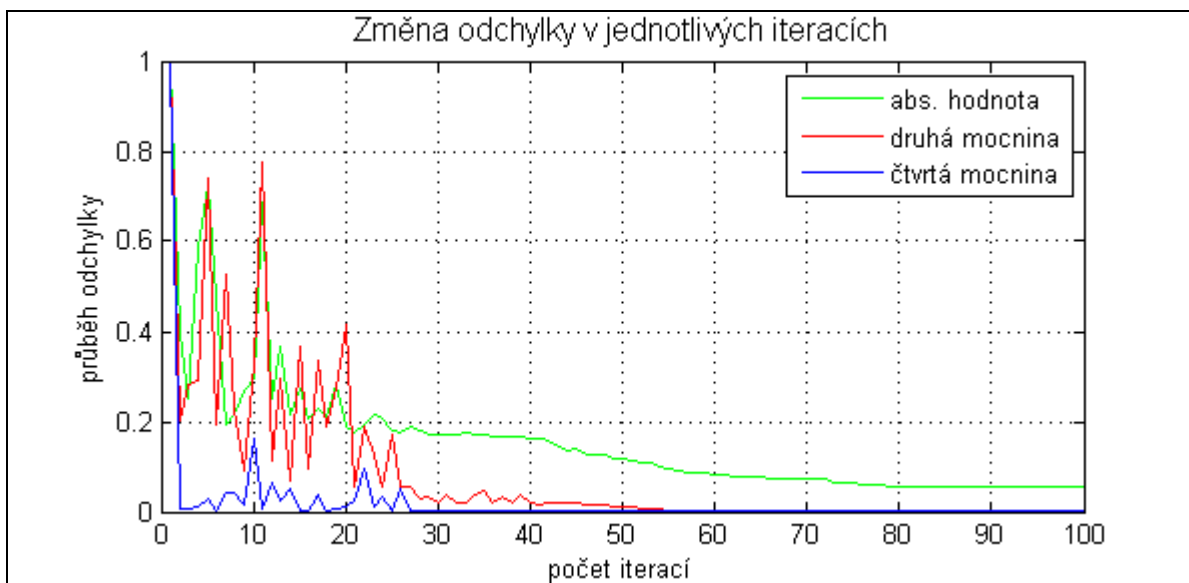
Obrázek č. 32 Vývojový diagram automatického rozložení

Každá část má svojí maximální hodnotu, nicméně, než je tato hodnota zahrnuta do kritériální funkce je ještě váhována.

7.2.2 Váhování hodnot

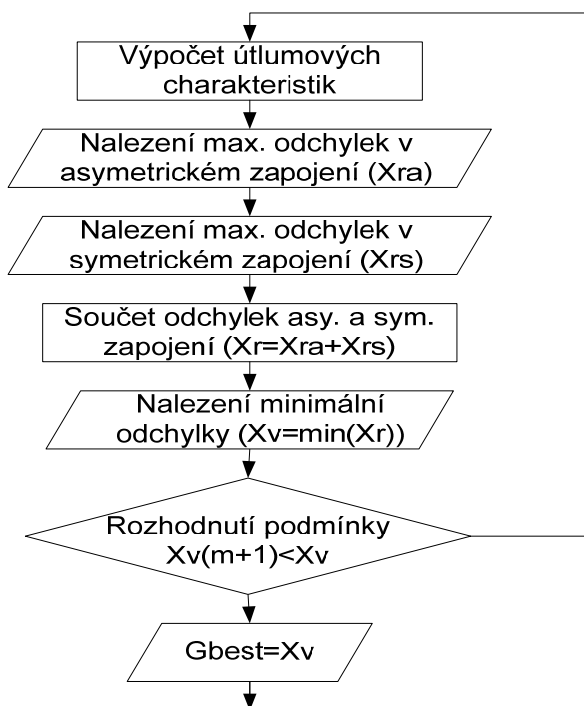
Váhování bylo zahrnuto z důvodu vyšší přesnosti při optimalizaci. Nejprve bylo zvoleno používat pouze absolutních hodnot, aby nehrálo roli, jestli je odchylka kladná nebo záporná.

Pro optimalizaci to byl sice dostačující způsob, ale byla zde delší časová prodleva, než optimalizace našla vhodné řešení. Proto bylo použito umocnění hodnot a tím posílení horších hodnot, díky němu optimalizace dříve pozná, že dochází k přibližování vhodného řešení a snaží se tyto odchylky eliminovat. Názorně ukázáno na obrázku (Obrázek č. 33)



Obrázek č. 33 Ukázka změny váhování

Vývojový diagram kritériální funkce je zobrazen na obrázku (Obrázek č. 34).



Obrázek č. 34 Vývojový diagram kritériální funkce

7.3 Optimalizace naměřených dat

Celá kapitola je rozdělena do více částí, kde v každé části jsou jednotlivě popsány průběhy optimalizace, komplikace a dosažené výsledky. Nejprve byla optimalizace prováděna na filtru Schurtet. Jelikož výsledky nebyly dostačující, přesel jsem na optimalizaci filtru Schaffner, který má podobné zapojení, ale jeho útlumové charakteristiky nemají tak ostré průběhy a optimalizace by mohla být úspěšná.

7.3.1 Optimalizace filtru Schurter 5110.1033.1

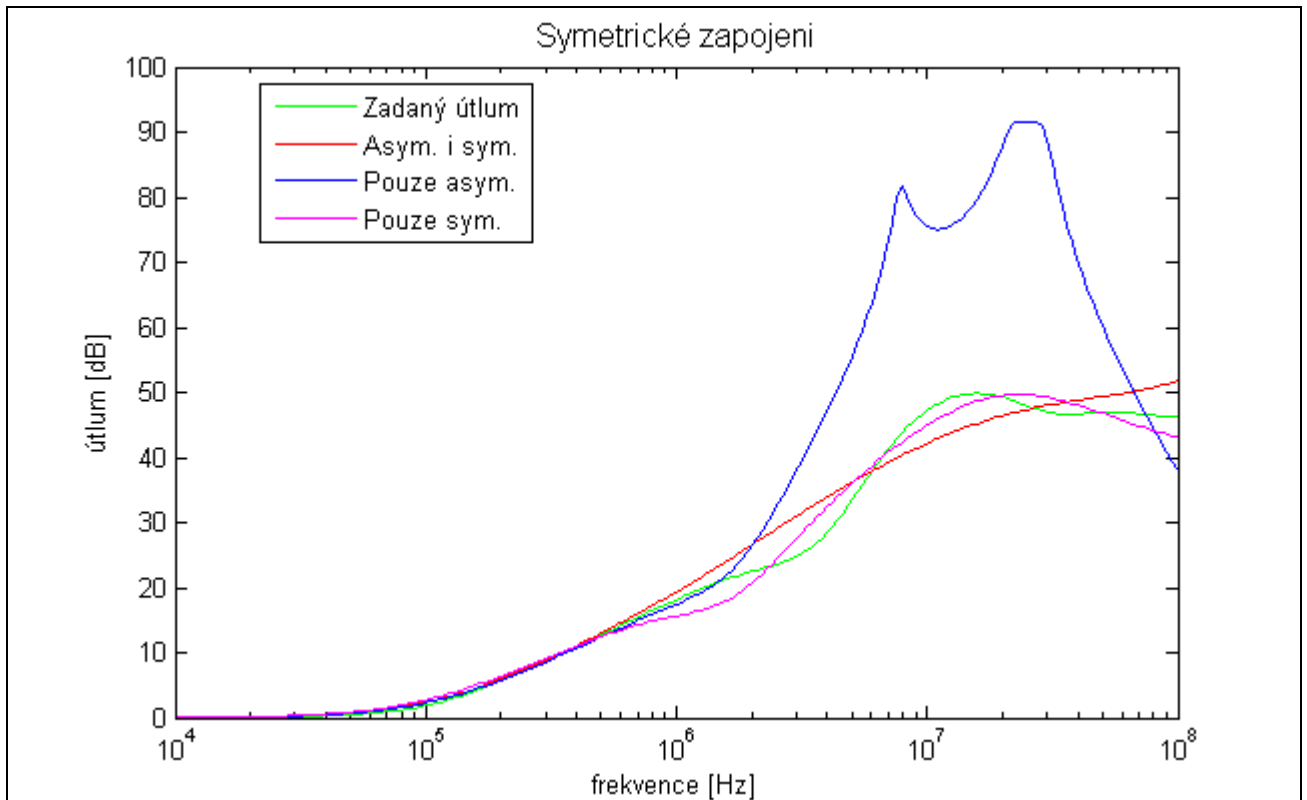
Pro optimalizaci byl vytvořený matematický model podle schématu (Obrázek č. 20). Pro názornou ukázkou jsem zvolil systém $50 \Omega / 50 \Omega$, kde jsem použil tři druhy kriteriální funkce:

- Nejprve jsem použil variantu, kdy je do kriteriální funkce zahrnuto jak asymetrické tak symetrické zapojení. Tento způsob je nejideálnější, protože jednou optimalizací můžeme najít funkční hodnoty parazitních prvků filtru, které odpovídají skutečným hodnotám. Neboť jedny hodnoty musí dát správné útlumové charakteristiky pro obě dvě zapojení. Bohužel, optimalizace žádné vhodné hodnoty prvků nenašla.
- Ve druhé variantě bylo do kriteriální funkce zahrnuto asymetrické zapojení. Zde optimalizace našla funkční hodnoty pouze pro asymetrické zapojení. Důvodem je nejspíše to, že pro výpočet útlumové charakteristiky nejsou brány hodnoty C_x , R_x a L_x , protože dochází ke zkratu tohoto uzlu.
- Posledním způsobem bylo použití kriteriální funkce pouze se symetrickým zapojením. Toto zapojení počítá útlumovou charakteristiku se všemi prvky, avšak tímto způsobem byly nalezeny pouze nejlepší funkční hodnoty pro symetrické zapojení, ale i tak nedostačující.

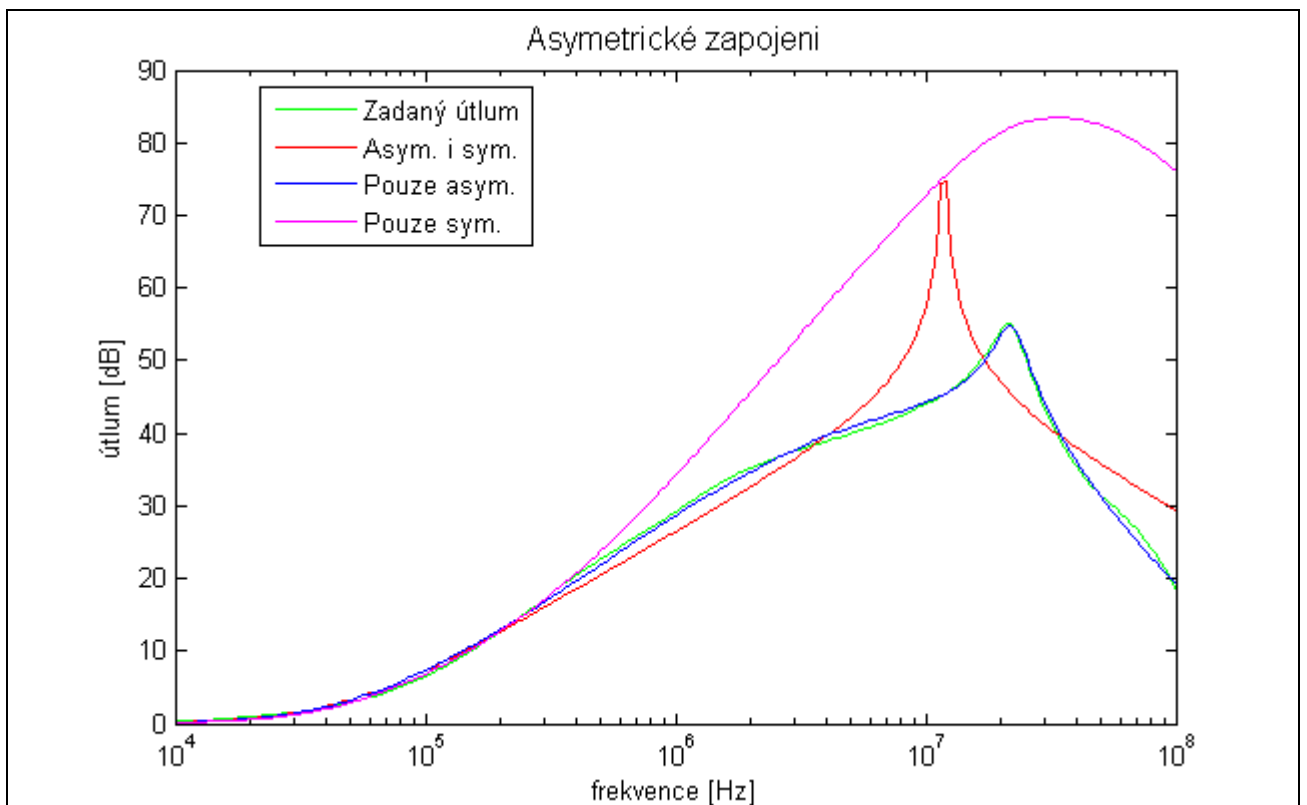
Nalezené hodnoty jsou zapsány v tabulce (Tabulka č. 3), kde můžeme pozorovat určité shody, ale také diametrální rozdíly. Všechno je to způsobeno rozdílnou volbou kriteriální funkce. Dále jsou tyto útlumové charakteristiky vyneseny ve dvou grafech, jak pro symetrické (Obrázek č. 35), tak i asymetrické zapojení (Obrázek č. 36).

Tabulka č. 3 Hodnoty nalezené optimalizací filtr Schurter

Optimalizované prvky	Optimalizováno pro zapojení		
	Asym. i sym.	Pouze asym.	Pouze sym.
L_x [nH]	7.8377	7.7875	66.830
R_x [Ω]	1.1466	0.0512	3.3795
L_y [nH]	1.0294	14.192	15.168
R_y [Ω]	2482.5	0.5158	3.2609
C_1 [pF]	28.603	0.13302	100.00
R_1 [k Ω]	14189	2.1782	13.299



Obrázek č. 35 Výsledky optimalizace filtru Schurter v symetrickém zapojení pro různé kritériální funkce



Obrázek č. 36 Výsledky optimalizace filtru Schurter v asymetrickém zapojení pro různé kritériální funkce

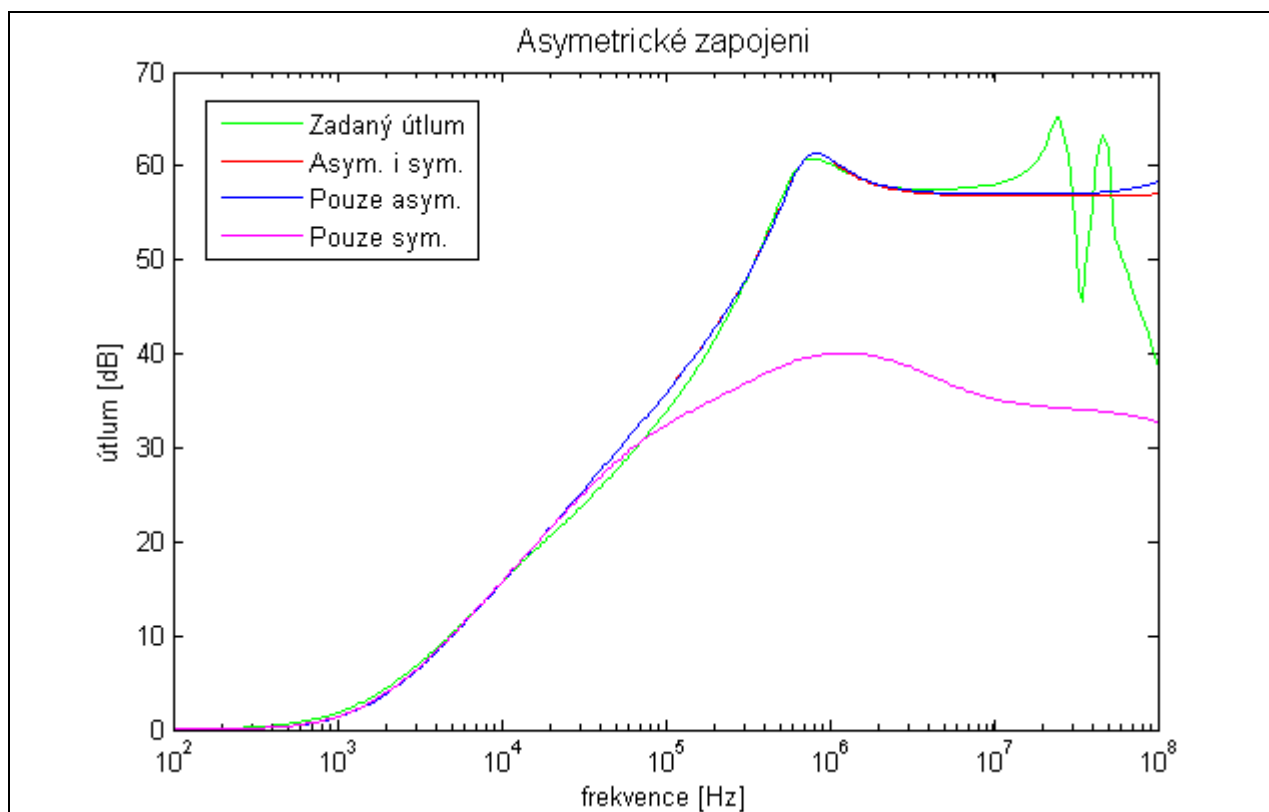
7.3.2 Optimalizace filtru Schaffner 321-1/05

Pro optimalizaci byl vytvořený matematický model podle schématu (Obrázek č. 26). Pro názornou ukázkou jsem zvolil systém $50 \Omega / 50 \Omega$. Podobně jako v prvním případě jsem použil tři druhy kritériální funkce. Výsledky optimalizací jsou zobrazeny v tabulce (Tabulka č. 4). Zde lze shodu pozorovat mnohem častěji, z čehož lze usuzovat správnost určitých hodnot.

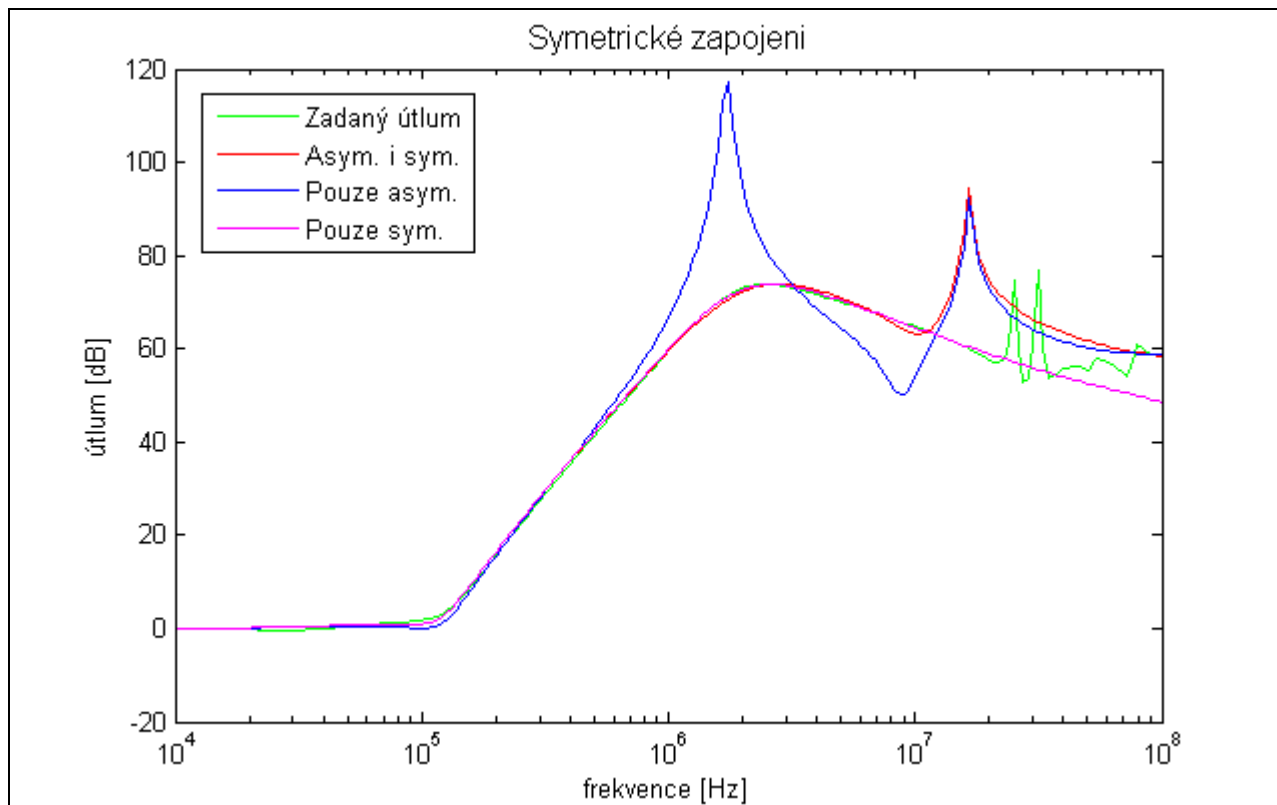
Tabulka č. 4 Hodnoty nalezené optimalizací filtru Schaffner

Optimalizované prvky	Optimalizováno pro zapojení		
	Asym. i sym.	Pouze asym.	Pouze sym.
L_x [nH]	127.75	191.08	141.110
R_x [Ω]	2.5222	0.1603	2.4411
L_y [nH]	0.01	0.1	5000
R_y [Ω]	0.01	0.01	100
C_1 [pF]	2.5042	2.4603	10
R_1 [k Ω]	12.008	11.978	10

Ovšem jak lze pozorovat z grafů (Obrázek č. 37) a (Obrázek č. 38), tak optimalizace je funkční jen do frekvencí v řádu jednotek MHz, pak se optimalizované a naměřené charakteristiky opět liší. Dále lze pozorovat ne zcela dostačující přesnost, což může být způsobeno špatně zvoleným referenčním obvodem.



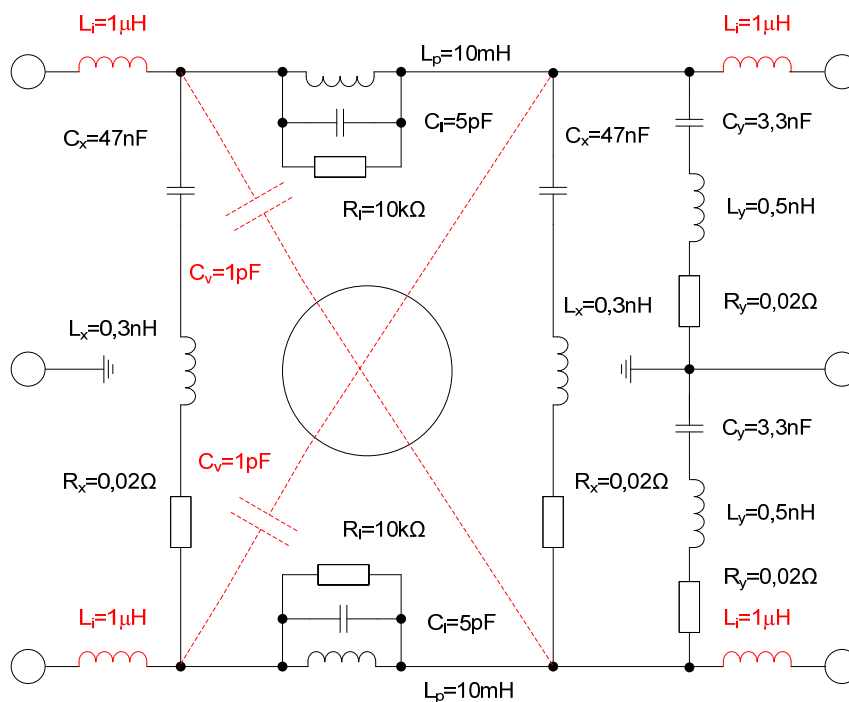
Obrázek č. 37 Výsledky optimalizace filtru Schaffner v asymetrickém zapojení pro různé kritériální funkce



Obrázek č. 38 Výsledky optimalizace filtru Schaffner v asymetrickém zapojení pro různé kriteriální funkce

7.3.2.1 Úprava referenčního obvodu

Jelikož stále nebyla dosažena požadovaná přesnost výsledku optimalizace, přistoupil jsem k možnosti úpravy obvodu (Obrázek č. 39).



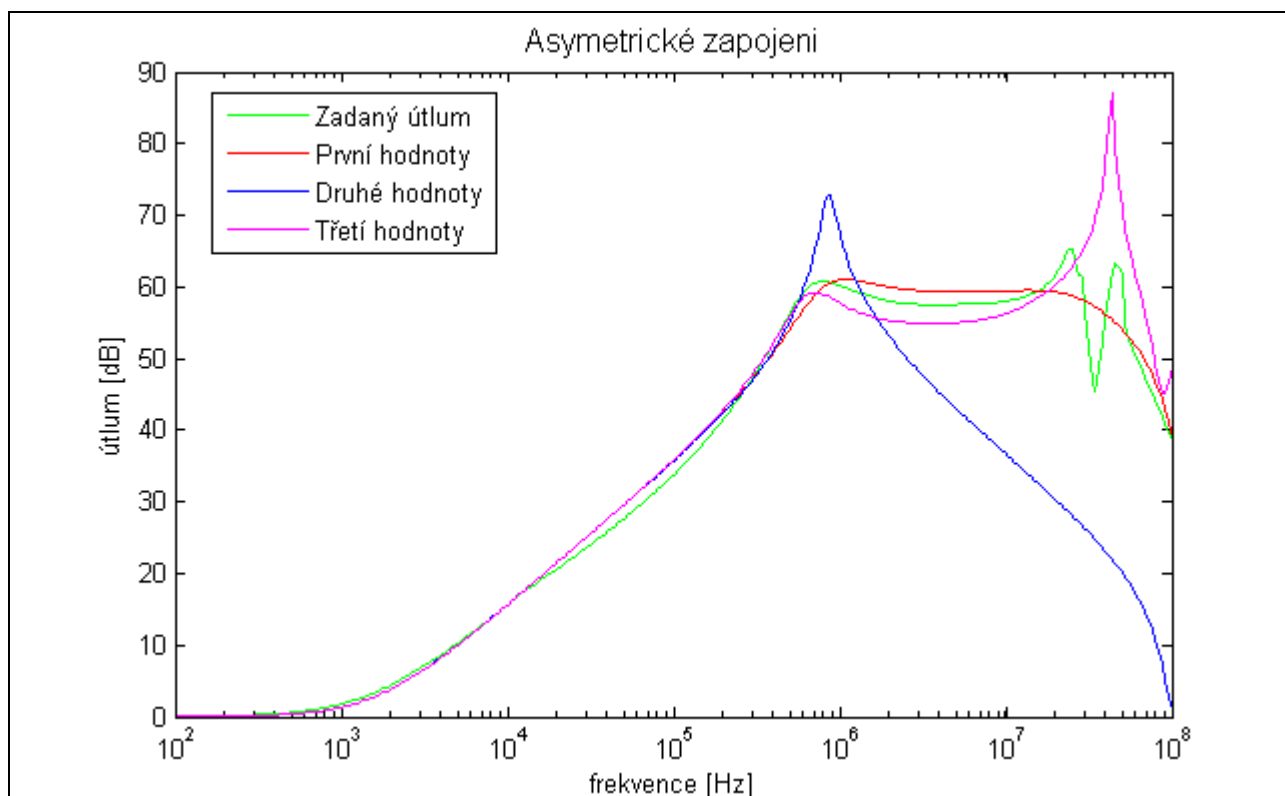
Obrázek č. 39 Úprava obvodu Schaffner 321-1/05

Do obvodu byla zahrnuta vstupní vazba indukcí L_i a vnitřní kapacitní vazba C_v . Pomocí těchto vazeb by mohlo dojít k dosažení přesnější optimalizace. Bohužel se těmito prvky matematické vyjádření rapidně rozšířilo. Z počáteční matice o velikosti 6×6 se stala matice s velikostí 10×10 . Kvůli tomu došlo i k rapidnímu nárůstu prvků jednotlivých Y parametrů, které jsou nepostradatelné pro výpočet útlumu filtru. Před rozšířením měl nejdelší Y parametr necelých 100 znaků, po rozšíření to bylo přes 270 tisíc znaků. Tím pádem nebylo možné provést rozumnou optimalizaci, jediné přepsáním celého programu, který by pracoval maticově a tím snížil časovou náročnost. V tabulce (Tabulka č. 5) níže jsou pouze hodnoty odvozené od předchozí optimalizace.

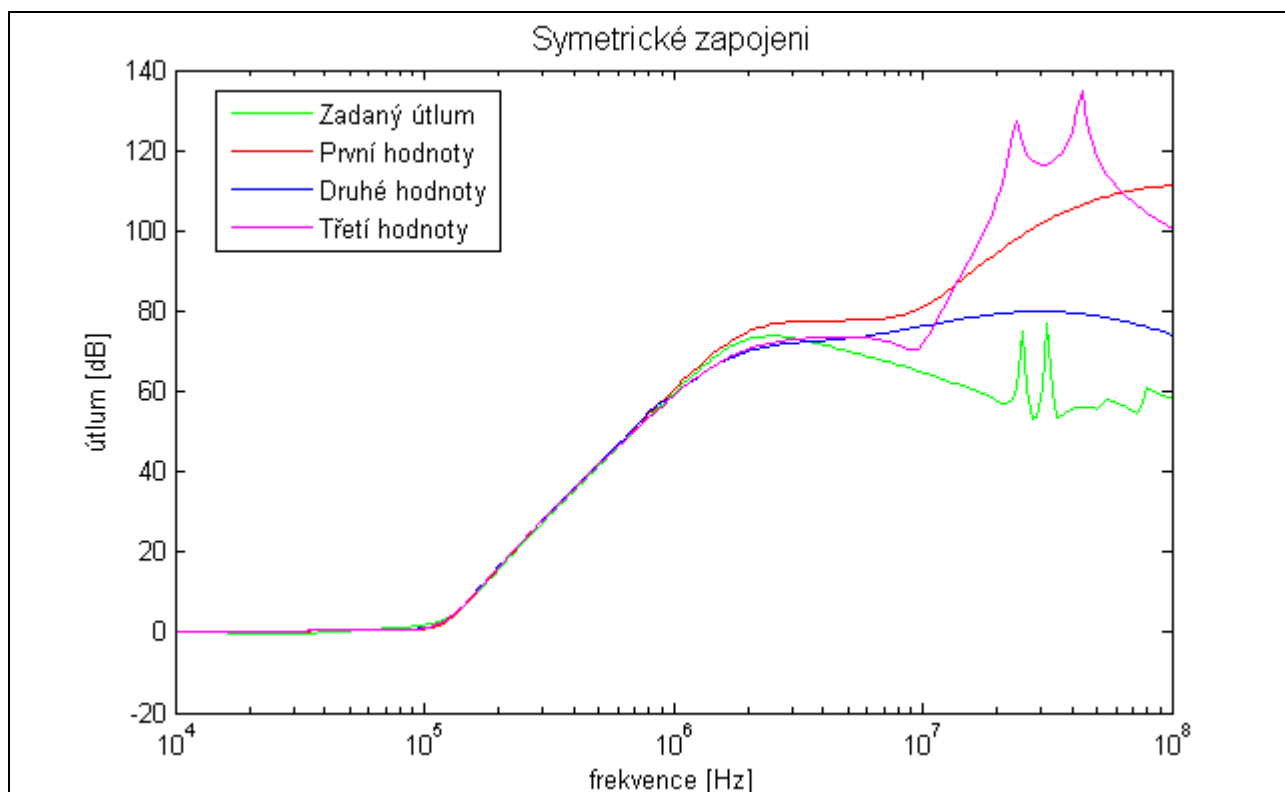
Tabulka č. 5 Tabulka odvozených hodnot pro upravený filtr Schaffner

Prvky	Hodnoty prvků $C_v=1\text{pF}$ a $L_i=1\mu\text{H}$		
	První hodnoty	Druhé hodnoty	Třetí hodnoty
L_x [nH]	140	189.25	165.47
R_x [Ω]	2.4	3.1485	3.096
L_y [nH]	11.6	50000	3.923
R_y [Ω]	3.4	10	0.0513
C_l [pF]	94.7	0.294	2.232
R_l [k Ω]	10	18.5	10.53

Z vynesení grafů (Obrázek č. 40) a (Obrázek č. 41) lze pozorovat vylepšení přesnosti útlumových charakteristik v náběhu filtru, z čeho můžeme usuzovat výhodu přidání nových proměnných. Je to však pouze orientační z důvodu odvození hodnot, nikoli optimalizace.



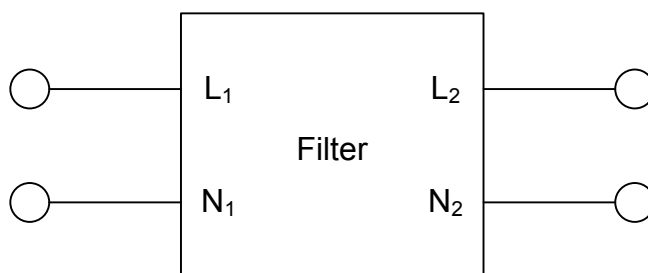
Obrázek č. 40 Výsledky odvozených hodnot upraveného filtru Schaffner v asymetrickém zapojení



Obrázek č. 41 Výsledky odvozených hodnot upraveného filtru Schaffner v asymetrickém zapojení

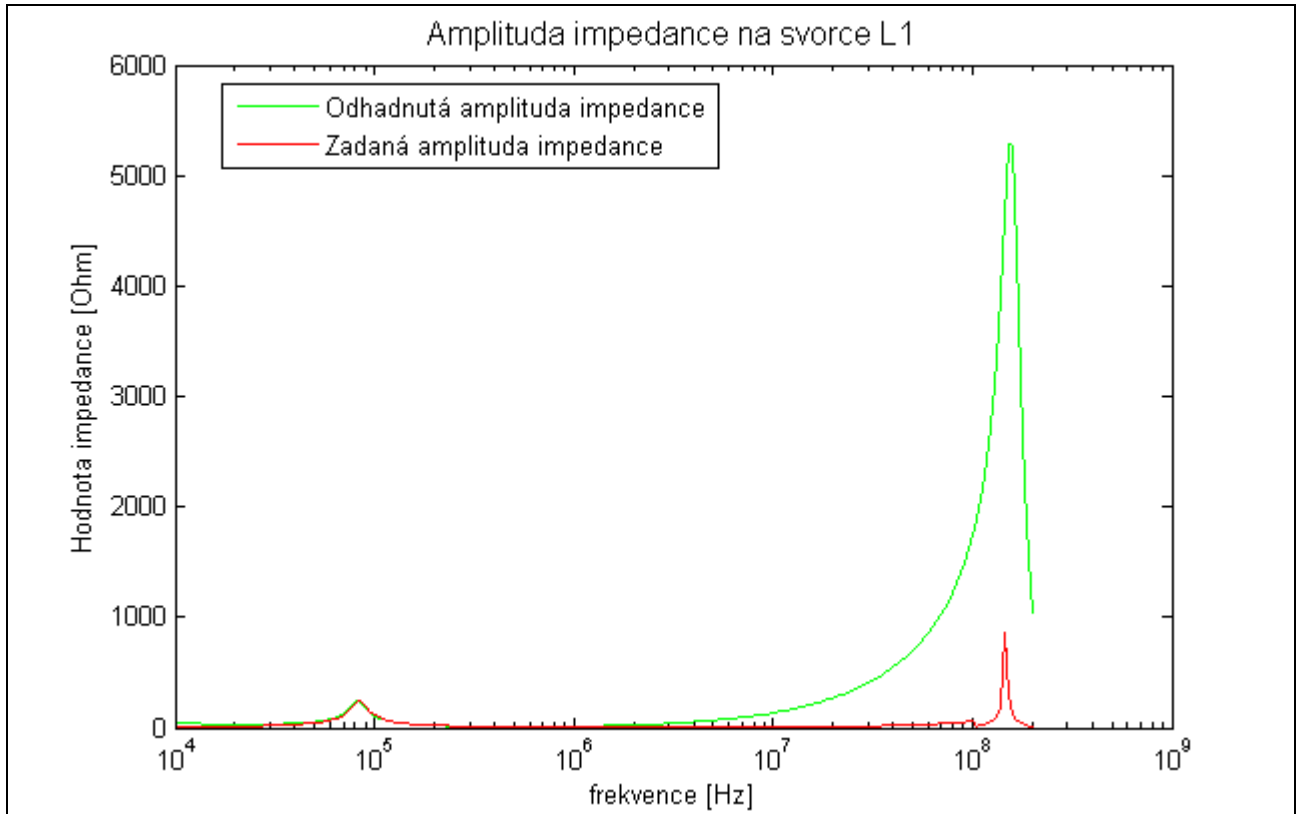
7.3.2.2 Výpočet pomocí impedance na svorce L_1

Dalším způsobem, jak pomocí optimalizace zjistit hodnoty parazitních prvků, bylo porovnávání impedance na svorce L_1 (Obrázek č. 42). Zde se dalo vycházet jak z vlastních hodnot impedance, tak z úhlu a pozorovat při jaké frekvenci dochází k rezonanci a k překlopení na indukční nebo kapacitní charakter.

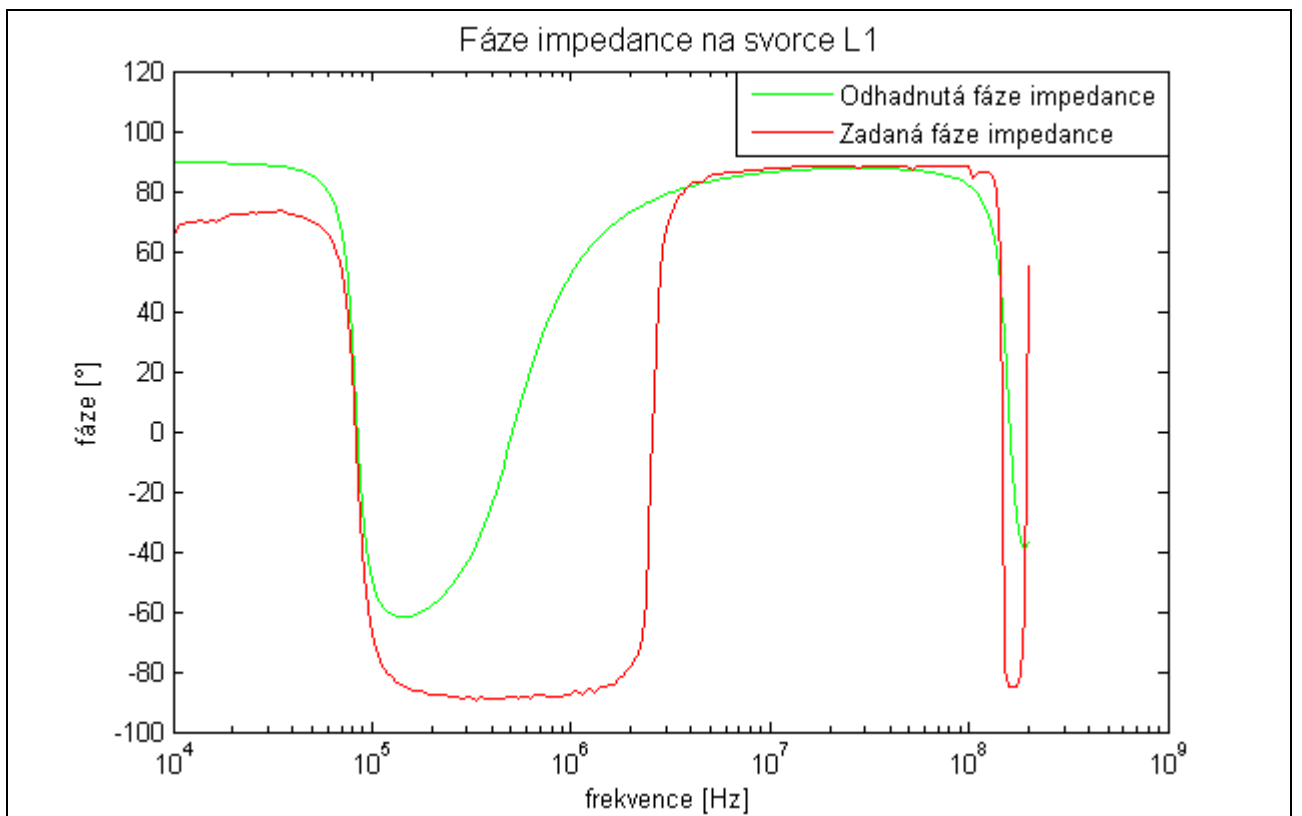


Obrázek č. 42 Popis svorek měřeného filtru

Z grafů (Obrázek č. 43) a (Obrázek č. 44) lze pozorovat určitou shodu, bohužel ani v tomto případě nešla použít optimalizace (výpočet měl přes 450 tisíc znaků). Dosažené výsledky tak byly získány pouze odhadem od předchozích výsledků optimalizace.



Obrázek č. 43 Hodnoty amplitud impedancí na svorce L_1 filtru Schaffner



Obrázek č. 44 Hodnoty fáze impedancí na svorce L_1 filtru Schaffner

8 Závěr

V úvodní části práce jsem se teoreticky seznámil se způsoby použití a měření vložného útlumu odrušovacího filtru. Dále jsem prostudoval základní typy globálních optimalizačních filtrů, přičemž největší pozornost jsem věnoval metodě roje částic neboli PSO. Popsal jsem podrobně průběh a hlavní části této optimalizace, protože byla následně použita pro optimalizaci hodnot vložného útlumu odrušovacího filtru.

Dále jsem uvedl teoretický způsob matematického vyjádření vložného útlumu odrušovacího filtru, který byl použit pro výpočet. Tento krok je nezbytný po další postup práce. Se získanými daty jsem mohl provést optimalizaci syntetických dat, abych ověřil funkčnost celé optimalizace a hlavně správnou volbu kritériální funkce, která je nezbytná pro celou optimalizaci. Díky správným výsledkům optimalizace jsem mohl usoudit, že celá optimalizace a kritériální funkce byla zvolena vhodně. A proto jsem mohl přistoupit k dalšímu kroku.

Při optimalizaci naměřených dat filtru Schurter 5110.1033.1 bylo dosaženo neuspokojivých výsledků při použití asymetrického i symetrického zapojení do kritériální funkce. Toto použití je nejdůležitější, protože dochází k vzájemnému ovlivňování obou systémů. Jelikož nebyly dosaženy vhodné výsledky, přistoupil jsem k použití jiných kritériálních funkcí. Při použití asymetrického zapojení do kritériální funkce došlo k výraznému zlepšení v asymetrickém zapojení, symetrické však bylo neuspokojivé. Pro symetrické zapojení v kritériální funkci nenastala shoda v symetrickém a ani v asymetrickém zapojení.

Proto jsem vyzkoušel optimalizaci filtru Schaffner 321-1/05, který má vhodnější útlumové charakteristiky pro optimalizaci. Zde při opětovném použití kritériální funkce pro asymetrické i symetrické zapojení došlo ke shodě jak v asymetrickém tak symetrickém zapojení. Tato shoda však byla patrná především v řádu jednotek MHz, ve vyšších řádech již nastaly rozdíly. Proto jsem zkusil upravit matematický model přidáním vstupní indukce L_i a vnitřní kapacitní vazby C_v . O prospěchu se můžeme bavit pouze teoreticky, protože došlo k nárůstu Y parametrů ze stovek znaků na počet větší než 270 tisíc, což znemožnilo provést vhodnou optimalizaci z časového důvodu (jedna optimalizace by trvala více než 13 dnů). Dále jsem provedl pokus pro optimalizaci přes impedanci na svorce L_1 kde jsem měl k dispozici amplitudu a fázi impedance, ale ani tady se nedala optimalizace provést z důvodů časové náročnosti.

V závěru této práce mohu poznamenat, že matematický model filtru Schurter nebyl zvolen správně a model byl vhodný pro optimalizaci do frekvencí v řádu stovek kHz, pro vyšších kmitočty se začaly projevovat parazitní prvky, které v modelu chyběly, a proto nastaly odchylky charakteristik. Pro filtr Schaffner se dala optimalizace provést do jednotek MHz, při vyšších hodnotách se také projevíly parazitní prvky, které nebyly zahrnuty v matematickém modelu. Při nárůstu Y parametrů a pro urychlení optimalizace navrhuji upravit celý program, který by místo „for“ cyklů pracoval s maticemi. Tím by se časová náročnost podstatně snížila a dala by se provést optimalizace i náročnějších matematických modelů než doposud.

Použitá literatura a odkazy na zdroje

- [1] Automa. *Vydání čísla 2000, číslo 09* [online] c2000, poslední revize 12. března 2010 [cit. 2010-03-28] <http://www.odbornecasopisy.cz/index.php?id_document=27890>
- [2] Katedra matematiky PřF OU. *Optimalizace a operační výzkum*. [online] c2006, poslední revize 13. prosince 2010 [cit. 2010-03-28] <<http://www.osu.cz/fpr/kma/index.php?-kategorie=490&id=7435>>
- [3] SVAČINA, J., *Elektromagnetická kompatibilita, principy a metody*. Brno: Vysoké učení technické 2001. „Připojujeme se k Evropské Unii“, svazek 2, 156 stran. ISBN 80-214-1873-7
- [4] ČSN CISPR 17 – *Bibliografická citace. Metody měření útlumových charakteristik pasivních vysokofrekvenčních filtrů a odrušovacích součástek*. Česká technická norma, Český normalizační institut. Praha Listopad 2000. (tř. znak 33 4227)
- [5] Programujte. *Genetické algoritmy a jejich aplikace v praxi* [online] c2005, poslední revize 15. dubna 2010 [cit. 2009-04-19] <<http://programujte.com/?akce=clanek&cl=2005072601-geneticke-algoritmy-a-jejich-aplikace-v-praxi>>
- [6] ROBINSON, J.; RAHMAT-SAMII, Y. *Particle Swarm Optimization in Electromagnetics*. IEEE transactions on antennas and propagation, Volume 52, No. 2, February 2004. pages 397 – 407
- [7] DŘÍNOVSKÝ, J.; SVAČINA, J.; RAID, Z. Simple Models of EMI Filters for Low Frequency Range. *Radioengineering*, 2008, roč. 17, č. 3, s. 8-14. ISSN: 1210-2512.
- [8] Schurter AG, Switzerland. [online] c2002, poslední revize 26. října 2010 [cit. 2010-11-23] <<http://www.schurter.com/>>
- [9] Schaffner Holding AG, Switzerland. [online], c2004, poslední revize 12. března 2011 [cit. 2011-4-11] <<http://www.schaffner.com/>>
- [10] Schaffner Holding AG, Switzerland, CISPR 17 Measurements (application note). [online], c20002 poslední revize 12. března 2011 [cit. 2011-4-11], <<http://www.schaffner.com.cn/sc/UploadFile/200691958328797.pdf>. >
- [11] MIL-STD-220B: Test Method Standard - Method of Insertion Loss Measurement. Military Standard, Department of Defence USA. June 2004. 28 pages. [online], [cit. 2011-4-11] <<http://www.dsc.dla.mil/Downloads/MilSpec/Docs/MIL-STD220/std220.pdf>>
- [12] DŘÍNOVSKÝ, J. SVAČINA, J. Estimation of EMI filter performance for the "worst-case" system. *Radioengineering (Part I: Special Issue: Electromagnetic Compatibility)*, 2006, vol. 15, no. 4, p. 16-21, ISSN 1210-2512.
- [13] KEJÍK, Z., DŘÍNOVSKÝ, J., *Zjednodušené ekvivalentní obvody pro reálný model EMI filtru*. Ústav radioelektroniky, FEKT VUT v Brně. 4 stránky

9 Seznam obrázků

OBRÁZEK Č. 1 IMPEDANCE RŮZNÝCH TYPŮ ENERGETICKÝCH SÍTÍ (1 - VENKOVNÍ SÍŤ, 2 — PRŮBĚH DLE NORMY CISPR, 3 – PRŮMYSLOVÁ SÍŤ, 4- KABELOVÁ ZEMNÍ SÍŤ, — PRŮBĚH DLE VOJENSKÉ NORMY MIL-STD 462).....	2
OBRÁZEK Č. 2 PROTIFÁZOVÉ (P) A SOUFÁZOVÉ (S) RUŠIVÉ NAPĚTÍ A PROUDY NA VEDENÍ.....	3
OBRÁZEK Č. 3 ZÁKLADNÍ ŘETĚZEC EMC A PŘÍKLADY JEDNOTLIVÝCH OBLASTI.....	4
OBRÁZEK Č. 4 ZPŮSOBY POUŽITÍ RŮZNÝCH TYPŮ ODRUŠOVACÍCH KONDENZÁTORŮ K POTLAČENÍ SOUFÁZOVÝCH (I_S) A PROTIFÁZOVÝCH (I_P) RUŠIVÝCH PROUDŮ NA VEDENÍ.....	5
OBRÁZEK Č. 5 ZAPOJENÍ ODRUŠOVACÍ TLUMIVKY DO VEDENÍ (A) A KMITOČTOVÝ PRŮBĚH VLOŽENÉHO ÚTLUMU (B).....	6
OBRÁZEK Č. 6 ODRUŠOVACÍ FILTR JAKO LINEÁRNÍ DVOJBRAN.....	8
OBRÁZEK Č. 7 VOLBA STRUKTURY SÍŤOVÉHO FILTRU PODLE VELIKOSTI ZÁTĚŽOVÝCH IMPEDANCÍ Z_S A Z_Z	9
OBRÁZEK Č. 8 PŘÍKLAD ZAPOJENÍ SÍŤOVÉHO ODRUŠOVACÍHO FILTRU S PŘEPĚŤOVÝMI OCHRANAMI (FILTR EMP) ...	9
OBRÁZEK Č. 9 MOŽNÉ ZAPOJENÍ FILTRU TEMPEST.....	10
OBRÁZEK Č. 10 SESTAVA MĚŘENÍ U APROXIMAČNÍ METODY PRO SÍŤOVÉ FILTRY.....	12
OBRÁZEK Č. 11 MĚŘENÍ VLOŽNÉHO ÚTLUMU FILTRU BEZ VÝKONOVÉ ZÁTĚŽE ABSOLUTNÍ METODOU: REFERENČNÍ OBVOD (A), MĚŘICÍ OBVOD (B).....	13
OBRÁZEK Č. 12 ZPŮSOB PROMĚŘOVÁNÍ SOUČÁSTKY NEBO FILTRU PRO DVOUVODIČOVÉ OBVODY.....	14
OBRÁZEK Č. 13 UKÁZKA PRINCIPU PSO.....	16
OBRÁZEK Č. 14 VÝVOJOVÝ DIAGRAM ALGORITMU PSO.....	20
OBRÁZEK Č. 15 HRANIČNÍ PODMÍNKY: (A) POUTAVÉ STĚNY, (B) ODRAZNÉ STĚNY, (C) NEVIDITELNÉ STĚNY.....	21
OBRÁZEK Č. 16 MOŽNÉ SYSTÉMY MĚŘENÍ VLOŽNÉHO ÚTLUMU: A) ASYMETRICKÝ, B) SYMETRICKÝ, C) NESYMETRICKÝ.....	22
OBRÁZEK Č. 17 UKÁZKA NAPĚTÍ A PROUDŮ NA TESTOVANÉM FILTRU.....	24
OBRÁZEK Č. 18 PROUDOVĚ KOMPENZOVANÁ TLUMIVKA SE VZÁJEMNÝMI KOEFICIENTY.....	24
OBRÁZEK Č. 19 SCHÉMA ZAPOJENÍ ODRUŠOVACÍHO FILTRU SCHURTER 5110.1033.1.....	26
OBRÁZEK Č. 20 SCHÉMA REÁLNÉHO ZAPOJENÍ ODRUŠOVACÍHO FILTRU SCHURTER 5110.1033.1.....	26
OBRÁZEK Č. 21 REÁLNÉ ZAPOJENÍ OBVODU A ZJEDNODUŠENÉHO OBVODU V ASYMETRICKÉM MĚŘICÍM SYSTÉMU.....	27
OBRÁZEK Č. 22 REÁLNÉ ZAPOJENÍ OBVODU A ZJEDNODUŠENÉHO OBVODU V SYMETRICKÉM MĚŘICÍM SYSTÉMU.....	28
OBRÁZEK Č. 23 ÚTLUMOVÉ CHARAKTERISTIKY PRO ASYMETRICKÉ ZAPOJENÍ.....	29
OBRÁZEK Č. 24 ÚTLUMOVÉ CHARAKTERISTIKY PRO SYMETRICKÉ ZAPOJENÍ.....	29
OBRÁZEK Č. 25 SCHÉMA ZAPOJENÍ ODRUŠOVACÍHO FILTRU SCHAFFNER 321-1/05.....	30
OBRÁZEK Č. 26 SCHÉMA REÁLNÉHO ZAPOJENÍ ODRUŠOVACÍHO FILTRU SCHAFFNER 321-1/05.....	30
OBRÁZEK Č. 27 PRŮBĚH ODCHYLKY (X_i) V JEDNOTLIVÝCH ITERACÍCH.....	31
OBRÁZEK Č. 28 ZMĚNA GBEST HODNOT.....	32
OBRÁZEK Č. 29 ZÁVISLOST ÚTLUMU NA FREKVENCI V ASYMETRICKÉM MĚŘENÍ.....	32
OBRÁZEK Č. 30 ZÁVISLOST ÚTLUMU NA FREKVENCI V SYMETRICKÉM MĚŘENÍ.....	33
OBRÁZEK Č. 31 VÝBĚR HODNOT PRO KRITERIÁLNÍ FUNKCI.....	33
OBRÁZEK Č. 32 VÝVOJOVÝ DIAGRAM AUTOMATICKÉHO ROZLOŽENÍ.....	34
OBRÁZEK Č. 33 UKÁZKA ZMĚNY VÁHOVÁNÍ.....	35
OBRÁZEK Č. 34 VÝVOJOVÝ DIAGRAM KRITERIÁLNÍ FUNKCE.....	35
OBRÁZEK Č. 35 VÝSLEDKY OPTIMALIZACE FILTRU SCHURTER V SYMETRICKÉM ZAPOJENÍ PRO RŮZNÉ KRITERIÁLNÍ FUNKCE.....	37
OBRÁZEK Č. 36 VÝSLEDKY OPTIMALIZACE FILTRU SCHURTER V ASYMETRICKÉM ZAPOJENÍ PRO RŮZNÉ KRITERIÁLNÍ FUNKCE.....	37
OBRÁZEK Č. 37 VÝSLEDKY OPTIMALIZACE FILTRU SCHAFFNER V ASYMETRICKÉM ZAPOJENÍ PRO RŮZNÉ KRITERIÁLNÍ FUNKCE.....	38
OBRÁZEK Č. 38 VÝSLEDKY OPTIMALIZACE FILTRU SCHAFFNER V ASYMETRICKÉM ZAPOJENÍ PRO RŮZNÉ KRITERIÁLNÍ FUNKCE.....	39
OBRÁZEK Č. 39 ÚPRAVA OBVODU SCHAFFNER 321-1/05.....	39
OBRÁZEK Č. 40 VÝSLEDKY ODVOZENÝCH HODNOT UPRAVENÉHO FILTRU SCHAFFNER V ASYMETRICKÉM ZAPOJENÍ.....	40
OBRÁZEK Č. 41 VÝSLEDKY ODVOZENÝCH HODNOT UPRAVENÉHO FILTRU SCHAFFNER V ASYMETRICKÉM ZAPOJENÍ.....	41
OBRÁZEK Č. 42 POPIS SVOREK MĚŘENÉHO FILTRU.....	41
OBRÁZEK Č. 43 HODNOTY AMPLITUD IMPEDANCÍ NA SVORCE L_1 FILTRU SCHAFFNER.....	42
OBRÁZEK Č. 44 HODNOTY FÁZE IMPEDANCÍ NA SVORCE L_1 FILTRU SCHAFFNER.....	42

10 Seznam tabulek

<i>TABULKA Č. 1 ZÁKLADNÍ SLOVNÍK PSO TERMINOLOGIE</i>	<i>17</i>
<i>TABULKA Č. 2 HODNOTY NALEZENÉ POMOCI PSO OPTIMALIZACE</i>	<i>31</i>
<i>TABULKA Č. 3 HODNOTY NALEZENÉ OPTIMALIZACÍ FILTR SCHURTER</i>	<i>36</i>
<i>TABULKA Č. 4 HODNOTY NALEZENÉ OPTIMALIZACÍ FILTR SCHAFFNER</i>	<i>38</i>
<i>TABULKA Č. 5 TABULKA ODVOZENÝCH HODNOT PRO UPRAVENÝ FILTR SCHAFFNER.....</i>	<i>40</i>

11 Seznam použitých zkratek a symbolů

Zkratky

CISPR	mezinárodní výbor pro rádiovou interferenci v rámci Mezinárodní elektrotechnické komise
ČSN	česká státní norma
EMC	elektromagnetická kompatibilita (Electromagnetic Compatibility)
EMP	elektromagnetický impulz (Electromagnetic Pulse)
GA	genetické algoritmy (Genetic Algorithms)
gbest	globální maximum (global best position)
LEMP	bleskový výboj (Lightning Electromagnetic Pulse)
NEMP	elektromagnetický impulz vyvolaný jaderným výbuchem (Nuclear Electromagnetic Pulse)
pbest	maximum jedince (personal best position)
PSO	metoda roje částic (Particle Swarm Optimization)
SA	simulované žihání (Simulated Annealing)
SQP	sekvenční kvadratické programování (Sequential Quadratic Programming)
TEMPEST	přechodné úniky a nepravé přenosy (Temporary Emanation and Spurious Transmission)

Symboly

i_p	protifázový rušivý proud	(A)
i_s	soufázový rušivý proud	(A)
u_p	protifázové rušivé napětí	(U)
u_s	soufázové rušivé napětí	(U)
v_n	rychlost jedince	(-)
w	inerciální váha	(-)
C_{lp}	přepočítaná hodnota pro zjednodušený obvod	(F)
C_{yn}	přepočítaná hodnota pro zjednodušený obvod	(F)
F	kmitočet	(Hz)
I	proud	(A)
K	omezující faktor (constriction factor)	(-)
L_{pn}	přepočítaná hodnota pro zjednodušený obvod	(H)
L_{ysn}	přepočítaná hodnota pro zjednodušený obvod	(H)
R_{lp}	přepočítaná hodnota pro zjednodušený obvod	(Ω)
R_{ysn}	přepočítaná hodnota pro zjednodušený obvod	(Ω)
U	napětí	(V)