Návrh odrušovacího filtru k zabezpečení elektromagnetické kompatibility poplachových zabezpečovacích systémů

Design of Noise Filter to Ensure Electromagnetic Compatibility of Alarm Svstems

František Navrátil

Bakalářská práce
2013

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta aplikované informatiky

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta aplikované informatiky
akademický rok: 2012/2013

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení:	**František NAVRÁTIL**
Osobní číslo:	**A10016**
Studijní program:	**B3902 Inženýrská informatika**
Studijní obor:	**Bezpečnostní technologie, systémy a management**
Forma studia:	**prezenční**
Téma práce:	**Návrh odrušovacího filtru k zabezpečení elektromagnetické kompatibility poplachových zabezpečovacích systémů**

Zásady pro vypracování:

1. **Pojednejte o významu filtrace v oblasti elektromagnetické kompatibility.**
2. **Popište metody návrhu EMI/EMC filtrů.**
3. **Proveďte návrh EMC filtru.**
4. **Vyrobte funkční vzorek EMC filtru.**

Rozsah bakalářské práce:

Rozsah příloh:

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

Seznam odborné literatury:

1. **VACULÍKOVÁ, Polina, VACULÍK, Emil. Elektromagnetická kompatibilita elektrotechnických systémů: Praktický průvodce techniky omezení elektromagnetického vf rušení. 1. vydání. Praha: Grada Publishing, 1998. 487 s. ISBN 80-7169-568-8.**
2. **KAŇUCH, Jan, KOVÁČ, Dobroslav, KOVÁČOVÁ Irena. EMC z hlediska teorie a praxe. 1. vydání. Praha: BEN- technická literatura, 2006. 216 s. ISBN 80-7300-202-7.**
3. **ČSN EN 50130-4 ed. 2 Poplachové systémy. Část 4: Elektromagnetická kompatibilita - Norma skupiny výrobků: Požadavky na odolnost komponentů požárních systémů, poplachových zabezpečovacích a tísňových systémů a systémů CCTV, kontroly vstupu a přivolání pomoci. Praha: ÚNMZ, 2012. 28 s. Třídící znak 334590.**
4. **MYSLÍK, Jiří. Elektromagnetické pole- základy teorie. 1. vydání. Praha: BEN- technická literatura, 2002. 160 s. ISBN 80-86056-43-0.**
5. **ČSN EN 60939-1 ed. 2. Pasivní filtry pro elektromagnetické odrušení - Část 1: Kmenová specifikace. Praha: ÚNMZ, 2011. Třídící znak 358281.**

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Jan Valouch, Ph.D.**
Ústav bezpečnostního inženýrství

Datum zadání bakalářské práce: **25. února 2013**

Termín odevzdání bakalářské práce: **30. května 2013**

Ve Zlíně dne 25. února 2013

L.S.

prof. Ing. Vladimír Vašek, CSc.
děkan

doc. Mgr. Milan Adámek, Ph.D.
ředitel ústavu

ABSTRAKT

Cílem bakalářské práce bylo stanovení významu filtrace jako jednoho z hlavních způsobů zabezpečení elektromagnetické kompatibility elektronických systémů. Součástí díla je rozbor a popis různých metod při postupu návrhu odrušovacího filtru. Dále jsou uváděny různé způsoby ověřování správnosti návrhu zapojení odrušovacího členu. Výstupem práce je vlastní návrh EMC filtru určeného pro napájecí obvody poplachového zabezpečovacího systému a realizace funkčního prototypu.

Klíčová slova:

elektromagnetická kompatibilita, zabezpečovací systémy, odrušení, filtrace, filtr EMC

ABSTRACT

The aim of this thesis was to determine the importance of filtration as one of the main ways to ensure electromagnetic compatibility of electronic systems. Part of this work is an analysis and description of the various methods in the design process noise filter. Listed are also different ways of verifying the correctness of design involvement of a noise member. The result of this work is custom design EMC filter designed for a power circuits alarm security system and implementation of a functional prototype.

Keywords:

electromagnetic compatibility, security systems, suppression, filtering, filter EMC

Rád bych touto cestou vyjádřil poděkování mému vedoucímu bakalářské práce panu Ing. Janu Valouchovi, Ph.D. za odborné vedení, poskytnuté rady a připomínky při zpracování této bakalářské práce.

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 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 – bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití jen s předchozím písemným souhlasem Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše);
- 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 …….…….

podpis diplomanta

OBSAH

ÚVOD **9**
I TEORETICKÁ ČÁST **10**
1 FILTRACE V OBLASTI EMC **11**
1.1 ELEKTROMAGNETICKÁ KOMPATIBILITA ELEKTRONICKÝCH SYSTÉMŮ 11
1.1.1 Elektromagnetická susceptibilita 12
1.1.2 Elektromagnetická interference 12
1.2 DRUHY RUŠIVÝCH SIGNÁLŮ 12
1.2.1 Přírodní a umělé zdroje 13
1.2.2 Funkční a nefunkční zdroje 13
1.2.3 Druhy rušení podle časových průběhů signálů 13
1.2.3.1 Impulzní signály 13
1.2.3.2 Spojité signály 13
1.2.3.3 Kvazi-impulzní signály 13
1.2.4 Klasifikace technických zdrojů podle povahy rušení 14
1.2.4.1 Šum (noise) 14
1.2.4.2 Impulsy (spikes) 14
1.2.4.3 Přechodné jevy (transients) 14
1.2.5 Rozdělení z hlediska kmitočtového spektra 14
1.2.5.1 Nízkofrekvenční rušení 14
1.2.5.2 Vysokofrekvenční rušení 15
1.3 ŠÍŘENÍ RUŠIVÝCH SIGNÁLŮ 15
1.3.1 Galvanická vazba společnou impedancí 16
1.3.1.1 Vazba napájecí sítě 16
1.3.1.2 Vzájemná vazba zdroje a přijímače rušení 16
1.3.1.3 Vazba prostřednictvím zpětného vodiče 16
1.3.1.4 Vazba společným zemničem 17
1.3.2 Indukční vazba 17
1.3.3 Kapacitní vazba 17
1.3.4 Vazba vyzařováním elektromagnetickým polem 18
1.4 DŮSLEDKY NEDODRŽENÍ EMC 18
1.5 ZPŮSOBY ZAJIŠTĚNÍ EMC 19
1.5.1 Zvýšení úrovně EMS 20
1.5.2 Redukce EMI 20
1.6 FILTRACE 21
1.6.1 Odrušovací tlumivky 22
1.6.2 Odrušovací kondenzátory 23
1.6.3 Odrušovací vf filtry 24
1.6.3.1 Napájecí filtry 24
1.6.3.2 Speciální filtry 25
1.6.4 Přepěťové ochrany 26
DÍLČÍ ZÁVĚR 26
2 METODY NÁVRHU EMI/EMC FILTRŮ **27**
2.1 PRINCIP ODRUŠOVACÍHO FILTRU 27
2.1.1 Základní hlediska při návrhu 28

2.1.2 Úskalí při návrhu a realizaci filtru ... 29
2.2 VÝPOČETNÍ METODA NÁVRHU ODRUŠOVACÍHO FILTRU ... 29
2.2.1 Výpočet dle teorie filtru typu k ... 31
2.2.2 Výpočet filtru na základě vložného útlumu ... 32
2.3 SOFTWAROVÝ NÁVRH FILTRU ... 33
2.3.1 FilterPro ... 34
2.3.2 Genesys ... 34
2.3.3 SuperFilter ... 35
2.3.4 FilterLab ... 35
2.3.5 FilterCAD ... 35
2.4 NÁVRH FILTRU POMOCÍ MOBILNÍCH APLIKACÍ ... 35
2.5 ZPŮSOBY OVĚŘENÍ SPRÁVNÉ ČINNOSTI FILTRU ... 36
2.5.1 Měření v simulátoru ... 36
2.5.2 Realizace prototypu a laboratorní ověření ... 37
2.6 TYPICKÁ ZAPOJENÍ KOMERČNÍCH FILTRŮ ... 39
DÍLČÍ ZÁVĚR ... 40
II PRAKTICKÁ ČÁST ... 42
3 NÁVRH EMC FILTRU ... 43
3.1 PARAMETRY NAPÁJECÍ SÍTĚ A ODRUŠOVANÉHO ZDROJE ... 43
3.2 STANOVENÍ POŽADAVKŮ NA PARAMETRY FILTRU ... 44
3.3 VOLBA ZAPOJENÍ ... 45
3.4 VYTVOŘENÍ ÚTLUMOVÉ CHARAKTERISTIKY ... 46
3.5 VÝPOČTY ELEMENTÁRNÍCH KOMPONENTŮ ... 46
3.6 TEORETICKÉ OVĚŘENÍ SPRÁVNOSTI NÁVRHU ... 48
DÍLČÍ ZÁVĚR ... 50
4 REALIZACE PROTOTYPU ... 51
4.1 VOLBA SOUČÁSTEK A KOMPONENTŮ ... 51
4.2 VÝROBA FUNKČNÍHO VZORKU ... 52
4.3 LABORATORNÍ OVĚŘENÍ ... 54
4.3.1 Měření přenosu nesymetrické složky signálu ... 38
4.3.2 Měření přenosu symetrické složky signálu ... 38
ZÁVĚR ... 55
ZÁVĚR V ANGLIČTINĚ ... 56
SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY ... 57
SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK ... 59
SEZNAM OBRÁZKŮ ... 60
SEZNAM TABULEK ... 61

ÚVOD

V dnešní moderní společnosti vlivem narůstající automatizace procesů nabývá elektromagnetická kompatibilita elektronických systémů velké důležitosti, jelikož možných přijímačů i zdrojů rušení stále narůstá. Kdyby nebyla uvažována při realizaci návrhů jakýkoliv elektronických a elektrických systémů, tak by samo zařízení postrádalo svůj funkční smysl. Vlivem vzniklé interference během provozu se zařízení může chovat nepředvídatelně nebo dokonce vůbec nefungovat. Již z historie víme, že spousta případů, kdy nebyla dodržena elektromagnetická kompatibilita, skončila hospodářskými škodami, někdy i s ohrožením života a zdraví lidí. Pro názornost je uváděn jeden typický případ za všechny, kdy vlivem rušení došlo k havárii stíhacího letounu typu Tornádo Severoatlantické aliance. Příčinou zničení stroje bylo elektromagnetické vlnění, které způsobilo poruchu elektronického řídicího systému letadla. Zdrojem rušení byl vysílač o velkém výkonu, okolo kterého letoun prolétl těsně před zřícením. Uvedený příklad je důkazem toho, že v dnešní době nestačí dbát jen na konstrukční provedení zařízení z hlediska možného rušení, ale je také třeba počítat se vzájemným ovlivňováním rozdílných systémů a snažit se tak co nejlépe zajistit elektromagnetickou kompatibilitu.

Na poplachové zabezpečovací systémy jsou obecně kladeny velké nároky na spolehlivost, přesnost, záruku správné a bezchybné činnosti za každých okolností a v každém prostředí. Hlavně v těžkém průmyslovém prostředí, kde se běžně vyskytuje vysoká úroveň intenzity rušivého pole, pocházející od různých výkonových strojů apod., by aplikované poplachové systémy, ať už zabezpečovací, požární nebo kamerové, postrádaly svou uplatitelnost, kdyby nebyly odolné vůči rušení. Nedostatečná elektromagnetická odolnost zařízení by mohla také významně rozšířit možnosti, jak na daném zabezpečovacím systému vlivem narušitele provést sabotáž a tím ho zcela vyřadit z provozu. Způsobů, jak zvýšit odolnost na jedné straně a omezit rušení na straně druhé, čímž by se zabezpečila elektromagnetická kompatibilita, je hned několik s ohledem na druh zařízení, typ a způsob přenosu energie a na místo, kde lze provést odrušení. Filtrace je jedním ze stěžejních řešení odrušení systému, kterému se tato práce bude věnovat.

I. TEORETICKÁ ČÁST

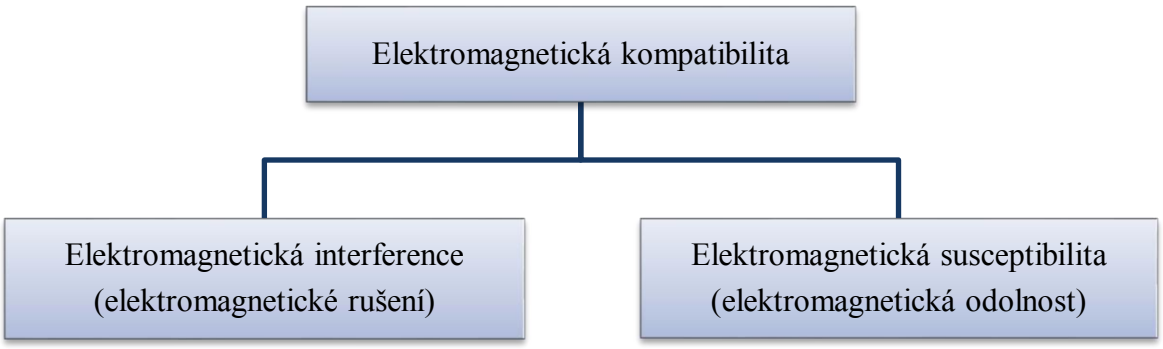
1 FILTRACE V OBLASTI EMC

Úvodní kapitola objasňuje základní pojmy a členění elektromagnetické kompatibility. Dále následuje část, která se zabývá jednotlivými druhy a projevy rušivých signálů, způsoby, jak se tyto signály šíří od zdroje k přijímači rušení, a důsledky, ke kterým může dojít v případě nedodržení EMC. V závěru jsou rozebírány způsoby a možnosti při dodržování EMC, přičemž velký význam v této oblasti zaujímají právě odrušovací prostředky.

1.1 Elektromagnetická kompatibilita elektronických systémů

Elektromagnetická kompatibilita (dále jen EMC), neboli také slučitelnost, je definována jako schopnost zařízení, systému nebo přístroje vykazovat bezchybnou činnost a to i v prostředí, v kterém působí jiné zdroje elektromagnetických signálů, a naopak svou vlastní činností nepřípustně neovlivňovat své okolí, pro které by mohlo prostřednictvím svých signálů působit rušivě. EMC tedy vyjadřuje schopnost správné funkce při společném výskytu více přístrojů nebo zařízení v elektromagnetickém prostředí bez nepřípustného vzájemného ovlivňování jejich normálních funkcí. Zařízení musí být tedy odolné vůči vlivům jiných zařízení a současně nesmí nepříznivě působit na jiné systémy, přitom každé zařízení může být současně vysílačem i přijímačem rušení.

Samotná EMC spolu se spolehlivostí jsou jedním ze základních požadavků na systém, avšak nelze je spolu zaměňovat. Vztah mezi těmito pojmy asi nejlépe vystihuje rčení H. M. Schlikeho: „*Systém sám o sobě může být dokonale spolehlivý – bude však prakticky bezcenný v provozu, pokud současně nebude elektromagneticky kompatibilní. Spolehlivost a elektromagnetická kompatibilita jsou neoddělitelné požadavky na systém, který má fungovat v každé době a za všech okolností*“. [1, s. 18] Celá problematika EMC se člení do dvou základních skupin podle obr. 1. [1]



Obr. 1: Základní členění EMC

1.1.1 Elektromagnetická susceptibilita

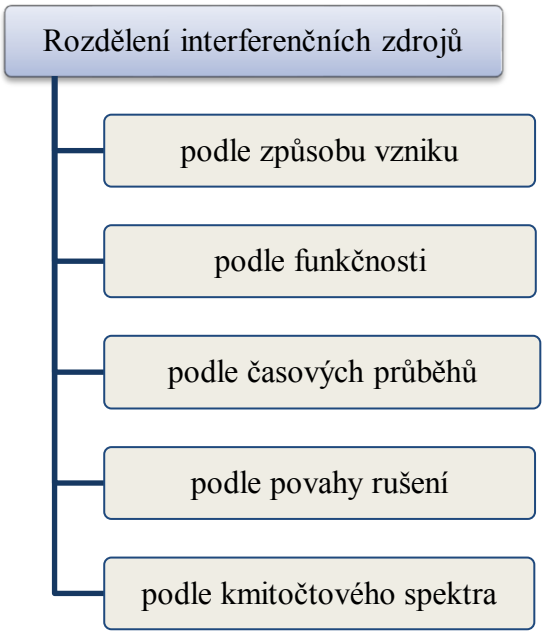
Elektromagnetická susceptibilita (EMS) popisuje odolnost zařízení vůči elektromagnetickému rušení a vyjadřuje schopnost tohoto přístroje bez problémů pracovat v prostředí, kde se vyskytují rušivé vlivy o přípustných velikostech. EMS se především zabývá technickými opatřeními, která navyšují imunitu přijímače rušení, a hlavně se soustřeďuje na odstraňování důsledků rušení bez odstraňování příčin vzniku.

1.1.2 Elektromagnetická interference

Elektromagnetickou interferenci (EMI), takzvané rušení, můžeme charakterizovat jako proces, kdy signál generovaný zdrojem rušení je přenášen prostřednictvím elektromagnetické vazby do rušeného systému. EMI se věnuje identifikaci zdrojů rušení, řeší popis a měření signálů, jež se podílí na rušení. Zabývá se také zjišťováním parazitních přenosových cest. Kompatibilita celého systému se především dosahuje technickými opatřeními především na straně zdrojů rušení a na případných přenosových cestách mezi jednotlivými systémy. Elektromagnetická interference se tedy oproti susceptibilitě týká hlavně příčin vzniku rušení a jejich odstraňování.

1.2 Druhy rušivých signálů

Rozdělení rušivých signálů lze provést podle interferenčních zdrojů, které generují převážně rušivé signály do svého okolí a především do rušených systémů. [2]



Obr. 2: Klasifikace rušivých signálů [2], upravil Navrátil 2013

1.2.1 Přírodní a umělé zdroje

Přírodní zdroje rušivých signálů vznikají zcela nezávisle na činnosti člověka a musí se brát jako fakt. Jejich vzniku se nedá zabránit, tudíž se musí jejich následkům předcházet. Hlavním směrem snažení o zamezení rušení je upřít pozornost k umělým interferenčním zdrojům, které vznikly lidskou technickou činností.

1.2.2 Funkční a nefunkční zdroje

Funkční zdroje jsou zařízení, jejichž hlavní funkcí je interferovat záření (např. sdělovací vysílače) ale přitom mohou nepříznivě ovlivňovat činnost jiného systému, pro který signál nebyl původně určen. Ostatní zdroje, které při své činnosti generují nežádoucí signály pro všechny další zařízení, nazýváme zdroje nefunkční nebo parazitní.

1.2.3 Druhy rušení podle časových průběhů signálů

Zdroje elektromagnetického rušení lze rovněž klasifikovat podle časových průběhů signálů:

1.2.3.1 Impulzní signály

Průběh impulzního signálu se projevuje časovou posloupností jednotlivých impulzů nebo přechodových jevů mezi různými úrovněmi signálu.

1.2.3.2 Spojité signály

Spojitý průběh rušení je pravý opak průběhu impulzního, kdy na rušené zařízení nepřetržitě působí zdroj interference způsobem, který nelze považovat za posloupnost oddělených jevů.

1.2.3.3 Kvazi-impulzní signály

Tento typ rušení se projevuje kombinací předchozích dvou typů, přičemž charakter rušení nemusí být vždy tak zjevný na to, aby se dalo určit, jestli jde o spojitý či nespojitý průběh.

1.2.4 Klasifikace technických zdrojů podle povahy rušení

1.2.4.1 Šum (noise)

Patří sem změny projevující se na tvaru křivky signálu, např. na napájecím napětí. Šum má převážně periodický průběh, který je nasuperponován na užitečný signál. Typickými zdroji šumových signálů jsou elektromotory a rotační svářečky.

1.2.4.2 Impulsy (spikes)

Jsou to změny impulzního charakteru s velkým poměrem amplitudy k době trvání signálu. Tyto impulsy, stejně jako šum, jsou superponovány na napětí sítě jako kladné nebo záporné špičky. Zdroje impulzního charakteru rušení jsou veškeré kontaktní spínací přístroje a spínací pochody při spínání elektrických obvodů.

1.2.4.3 Přechodné jevy (transients)

Náhodné, jednorázové děje s dobou trvání od několika period síťového napětí až po několik sekund. Přechodové jevy vznikají jako důsledek náhlé změny zatížení při připojování nebo odpojování zařízení o velkých výkonech k rozvodné napájecí síti.

1.2.5 Rozdělení z hlediska kmitočtového spektra

Důležitý údaj z hlediska použití vhodných odrušovacích prostředků pro potlačení rušení je šířka kmitočtového spektra, která se dělí na úzkopásmové rušení představující zejména užitečné signály televizních a rozhlasových vysílačů a širokopásmové rušení, které má většina průmyslových zdrojů, ať již mají časový průběh spojitý nebo impulzní. Z hlediska obsazení kmitočtového spektra lze rušení dále rozdělit na nízkofrekvenční a vysokofrekvenční.

1.2.5.1 Nízkofrekvenční rušení

Nízkofrekvenční rušení se projevuje dvojím způsobem, a to energeticky a akusticky.

1.2.5.1.1 Energetické nízkofrekvenční rušení

Tento typ rušení má vliv na energetickou složku v pásmu kmitočtů od 0 do 2 kHz a jejím působením má hlavně vliv na deformaci (zkreslení) napájecího napětí a odebíraného proudu. Nízkofrekvenční energetické rušení má rušivý vliv na zařízení a přístroje, která jsou značně závislá na tvaru křivky napájecího napětí. Mezi tato zařízení patří zejména

ovládací a sdělovací systémy, osvětlení apod. Obecně je zdrojem energického rušení každá nelineární zátěž, která deformuje odebíraný proud z napájecí sítě.

1.2.5.1.2 Akustické nízkofrekvenční rušení

Akustické nízkofrekvenční rušení působí v kmitočtovém pásmu do 10 kHz, kde negativním způsobem ovlivňuje funkci přenosových informačních systémů, jako jsou řídící a měřící zařízení, informační a komunikační soustavy.

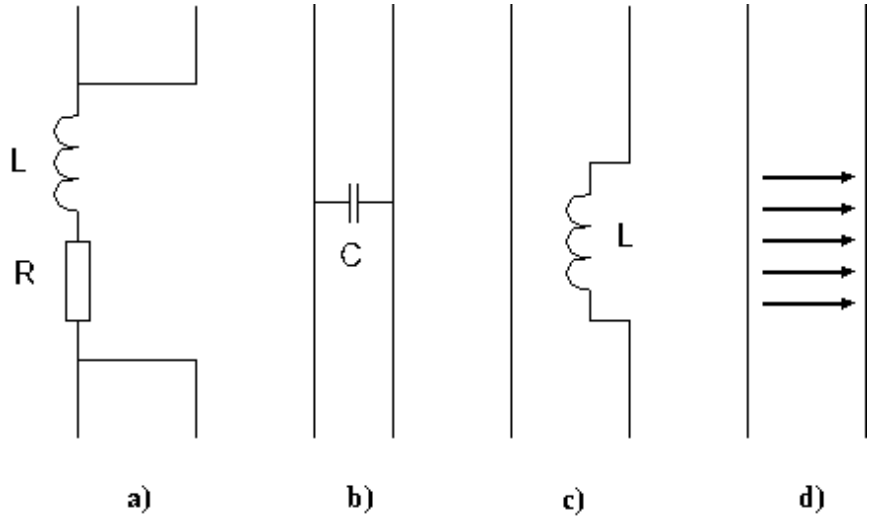
1.2.5.2 Vysokofrekvenční rušení

Vysokofrekvenční rušení nebo také rádiové rušení leží v pásmu od 10 kHz do 400 GHz (podle Radiokomunikačního řádu). Ke zdrojům působících v tomto pásmu patří prakticky všechna zařízení interferující rušivé signály, jelikož téměř vždy frekvenčně sahají až do těchto oblastí kmitočtového spektra.

1.3 Šíření rušivých signálů

Každý zdroj projevující se rušivě vůči svému okolí může svou energii přenášet dvěma způsoby, a to po vedení ve formě proudů, které následně vyvolají rušivá napětí, anebo vyzařováním prostřednictvím elektromagnetického pole. V průmyslovém prostředí zpravidla převládá rušení po vedení, jelikož tato zařízení bývají účelně zapojována krátkými spoji a většinou uzavřena do kovových uzemněných skříní, což podstatně snižuje původní intenzitu rušivého vyzařování. Zato u přírodních zdrojů rušení převládá způsob šíření vyzařováním. Základní způsoby šíření rušení jsou znázorněny na obr. 3, kde je:

a) galvanická vazba,
b) kapacitní vazba,
c) induktivní vazba a
d) vazba vyzařováním. [3]



Obr. 3: Druhy elektromagnetických vazeb [3], upravil Navrátil 2013

1.3.1 Galvanická vazba společnou impedancí

Vzniká vždy, když mezi zdrojem rušení a přijímačem rušení je společná impedance, která tvoří vazební člen, prostřednictvím kterého se rušivý signál přenáší galvanickou složkou, tj. složkou založenou na elektrické vodivosti. Základní galvanické vazby společných impedancí jsou rozebrány níže.

1.3.1.1 Vazba napájecí sítě

Vzniká vazbou na společném vedení, kde pracovní napájecí proudy zdroje rušení a přijímače rušení protékají v určité délce společným vodičem. Na tomto úseku vzniká úbytek napětí způsobený pracovním proudem ze zdroje rušení. Vzniklý úbytek napětí následně působí podobně jako modulační napětí u amplitudové modulace. Vazba vzniká na společném transformátoru, napájecím zdroji, přepínači nebo konektoru.

1.3.1.2 Vzájemná vazba zdroje a přijímače rušení

Vazba společných impedancí mezi zdrojem a přijímačem vzniká především v obvodech zpracování signálů, např. pronikání rušení z napájení do řídících obvodů zařízení, převodníků, snímačů neelektrických veličin a referenčních zdrojů.

1.3.1.3 Vazba prostřednictvím zpětného vodiče

Vazba společnou impedancí zpětného vodiče je téměř totožná s vazbou společné impedance napájecí sítě s rozdílem, že vazba mezi systémy se nachází na jiné části obvodu, konkrétně na zpětném vodiči. Není zcela bezvýznamné, že na určitých úsecích je zpětný

vodič spojen s ochranným, čímž se oddělují pracovní dráhy proudů zdrojů obvodů právě kvůli vzájemnému ovlivňování. Pečlivost v oddělování těchto smyček musí úměrně narůstat s citlivostí zařízení s vědomím, že zpětný vodič bývá po celé své délce považován za vztažný vodič (s nulovým potenciálem).

1.3.1.4 Vazba společným zemničem

Společný zemnič může být nebezpečný tím, že při poruchových stavech spojuje zařízení, na kterém se vytvořilo poruchové napětí s dalšími zařízeními, na nichž se může lavinovitě přenést napětí z předchozího zařízení, a tím by se závada rozšířila. Kromě ochrany před vznikem nebezpečného dotykového napětí na kostrách zařízení zemnič svádí všechna rušivá napětí do země, která byla odstraněna stíněním.

1.3.2 Indukční vazba

Vzniká na základě principu elektromagnetické indukce mezi dvěma obvody, protéká-li aspoň jedním obvodem elektrický proud. Tento typ vazby vlastně odpovídá principu transformátoru, kdy změna proudu v prvním obvodu vyvolá rušivý signál, který se přenese do druhého obvodu. Vlastní přenos je závislý na mnoha faktorech, především na vzdálenosti mezi obvody, kmitočtu proudu, délce souběhu, vzájemné konfiguraci a hlavně na vzájemné indukčnosti obou obvodů. Indukční vazba je přímým důsledkem magnetického pole vytvořeným zdrojem rušení na okolní obvody a je dominantní vazbou u nízkoimpedančních obvodů. Může vznikat nejen u sousedních obvodů nebo mezi vodiči, ale také mezi stínícími plášti, uzemňovacími vodiči a konstrukčními mechanickými prvky, které mohou tvořit nežádoucí uzavřené pasivní obvody.

1.3.3 Kapacitní vazba

S nárůstem impedancí obvodů, což jest se zvyšujícím se kmitočtem, se začíná stále více uplatňovat kapacitní vazba, tzv. vazba obvodů elektrickým polem. Tato vazba vniká vlivem přítomnosti parazitních kapacit mezi jednotlivými vodiči a také mezi vodičem a zemí. Stejně jako u předchozí vazby, i zde je vazbový činitel závislý na mnoha parametrech. Kapacita se zmenšuje s logaritmem vzdálenosti vodičů, případně s výškou vodiče vůči zemi, a zvětšuje se s narůstajícím průměrem vodiče. Proto je pro zmenšení tohoto činitele vazby, stejně jako u indukční vazby, nutné obvod zdroje rušení co nejvíce vzdálit od rušených přístrojů. Kapacitní vazba je dominantní u vysokoimpedančních obvodů.

1.3.4 Vazba vyzařováním elektromagnetickým polem

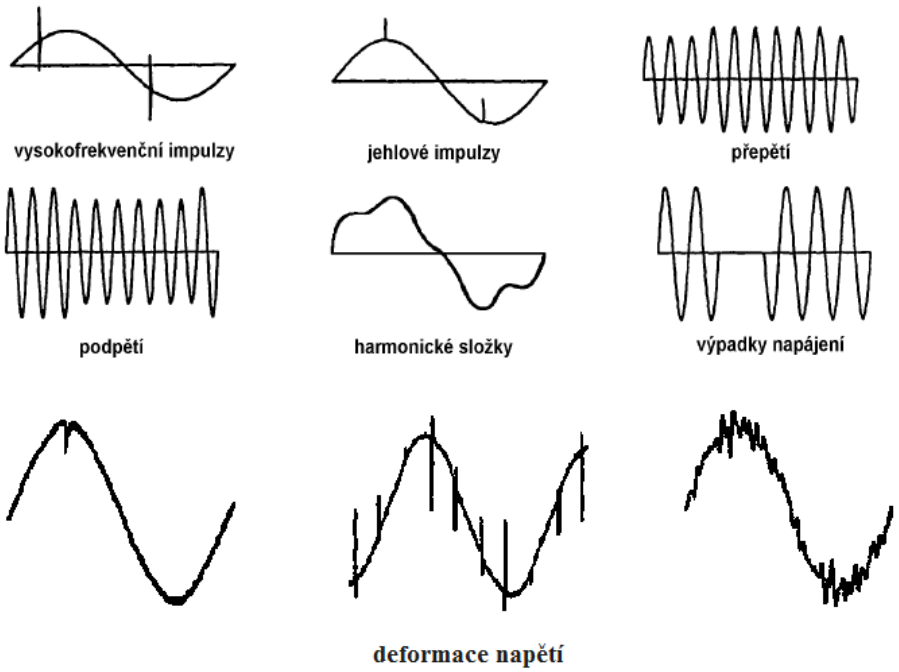
Parazitní vazba vyzařování vzniká mezi systémy v těch případech, kdy vzhledem k velké vzdálenosti je vyloučena vazba indukční i kapacitní. Rušení vazbou vyzařováním se dostává do rušeného zařízení prostřednictvím jejího svodu nebo anténou, přičemž pojem anténa nemusí být brán jako účelové zařízení pro zachycení funkčního a nefunkčního signálu, ale i jako část obvodu přijímače, který může jako anténa sloužit. Na nižších kmitočtech se vazba mezi obvody realizuje kapacitní nebo indukční vazbou a oproti tomu při vyšších kmitočtech se uplatňuje už jen vazba rušivým elektromagnetickým polem, což je vyzařováno převážně vedením. Velikost rušivého elektromagnetického pole přenášeného do okolí je menší, čím je intenzita, průměr vodiče přijímače, délka souběhu rušivého a ovlivňovaného vedení menší, a zároveň vzdálenost mezi vedením rušivého zdroje a vodičem přijímače rušení je větší.

1.4 Důsledky nedodržení EMC

Vlivem špatného nebo dokonce chybějícího odrušení zařízení může dojít nejen k chybné a nepředvídatelné činnosti zařízení i s možným rizikem vzniku hospodářských škod a havárií, ale i k ohrožení života a zdraví lidí. Nedostatečné zabezpečení EMC může také zařízení nenávratně poničit. Na druhou stranu samotné zařízení, generující pro svou činnost užitečné signály, může působit rušivě vůči ostatním přístrojům ve svém společném elektromagnetickém prostředí. Rušivé signály, nejčastěji šířící se po vedení, mohou mít řadu podob deformací sinusového napětí a rušivých projevů zobrazených na obr. 4.

Ohledně poplachových zabezpečovacích systémů mohou důsledky nedodržení elektromagnetické kompatibility zapříčinit:

- planý poplach,
- sabotáž,
- neovladatelnost,
- poruchy v nastavení systému a
- nefunkčnost systému.



Obr. 4: Deformace síťového napětí [1,2], upravil Navrátil 2013

1.5 Způsoby zajištění EMC

Způsobů, jak zajistit EMC určitého zařízení, je hned několik a jejich volba závisí na specifikacích odrušovaného zařízení. Z obecného hlediska lze způsoby členit podle místa odrušení a to:

1. u zdroje rušení,
2. na přenosové cestě nebo u
3. rušeného objektu (přijímače rušení).

Zdaleka nejvýhodnější řešení je zamezit vzniku rušení přímo u zdroje, čímž nám odpadá zkoumání přenosové cesty a elektromagnetické kompatibility přijímače rušení. Vzhledem k tomu, že každý zdroj rušení může být zároveň i rušeným objektem, je lepší uvažovat o samotných způsobech zvýšení odolnosti (zvýšení susceptibility) a snížení rušení (redukce interference) konkrétního zařízení.

Z hlediska rušení je nejdůležitějším blokem v systému napájecí zdroj, přes který se rušivé signály přenášejí do všech podsystémů a mohou tím narušit jeho běžnou činnost. Elektronická zařízení jsou především citlivá na pulzní vysokofrekvenční elektromagnetická pole, elektrostatické výboje a na galvanické složky rušení vlivem přechodných dějů vyskytujících se v napájecích sítích a uzemňovacích obvodech.

1.5.1 Zvýšení úrovně EMS

Na zvýšení odolnosti přístroje vůči rušení vnějšího i vnitřního by se mělo myslet již při návrhu a konstrukci základních prvků, jako jsou desky plošných spojů (dále jen DPS) a kabeláže. Při samém začátku by se měl konstruktér pozastavit nad těmito aspekty přímo ovlivňujícími EMC výsledného zařízení:

a) volba typu logiky, přičemž zásadou by mělo být používání co nejpomalejší varianty (pokud ještě vyhoví požadavkům), a to z důvodu, že pomalejší logika generující nižší kmitočty vyzařované energie se hůře šíří a lépe potlačuje než rychlá logika s vyšším pracovním kmitočtem,
b) správné uspořádání součástí na DPS, což zvyšuje odolnost a zamezuje vzniku parazitních vazeb mezi součástkami. Vzhledem k rozmístění je vhodné umístit komponenty rychlé logiky, digitální, propojovací a vstupně-výstupní obvody odděleně;
c) uspořádání signálových tras, čili jejich oddělení stejně jako u součástí na DPS, také značně zlepší EMC desky a okolí,
d) rozvod napájení, přičemž jsou-li na desce umístěny jak analogové, tak digitální obvody, tak je nutné tyto části napájet ze samostatných zdrojů elektrické energie a vyvarovat se tím vytváření smyček. Tímto opatřením se vyhneme možnému vzniku vazby společnou impedancí mezi těmito obvody.

Pro zvýšení vlastní odolnosti je třeba také použít kvalitní stínění celého zařízení, napájecí část, která obsahuje síťový odrušovací člen (filtr) a transformátor s uzemněným stíněním.

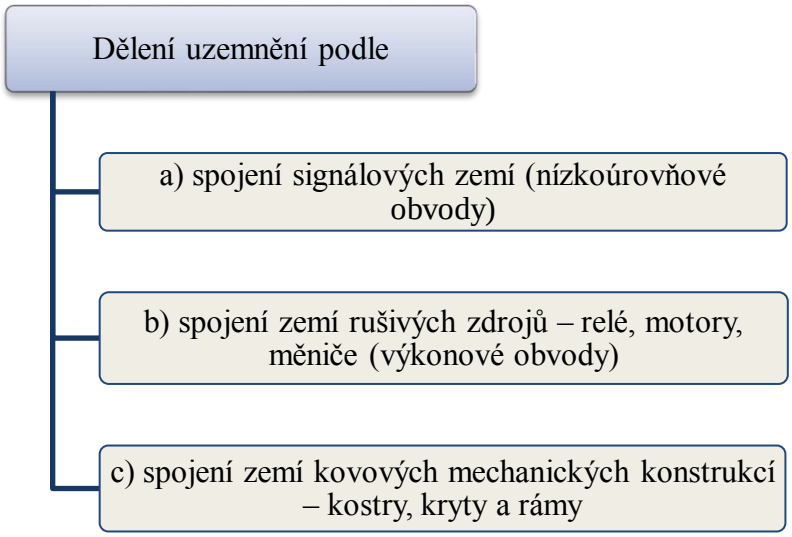
1.5.2 Redukce EMI

Snížení interference docílíme především použitím odrušovacích prostředků k potlačení či omezení elektromagnetického rušení zdroje, které se přenáší po společném vedení. Redukci vyzařované rušivé energie do prostoru nelze provést bez kvalitně provedeného stínění zdroje. Kryt odrušovacího členu musí být spojený s krytem celého zařízení, avšak umístěn tak, aby se napájecí kabely nemohly dostat dovnitř jinak než přes odrušovací prvek, za kterým by měl v bezprostřední blízkosti následovat oddělovací transformátor. Je-li předpoklad, že příslušné zařízení bude pracovat v prostředí, kde se budou vyskytovat zdroje generující impulsy velké energie (např. měniče), je použití stíněného transformátoru nutné.

Vhodnou topologií součástí zařízení lze zamezit vzájemné interference tím, že:

- maximálně vzdálíme citlivé obvody od zdrojů rušení,
- minimalizujeme indukční vazby ve vzdáleném vedení citlivých vodičů,
- správně orientujeme prvky a směry vedení kabeláže,
- ke zvýšení vf útlumu použijeme vodivých příchytek a spojek stínění uvnitř skříní,
- použijeme co nejkratších spojů pro realizaci zemnění,
- provedeme propojení stínění u kabelů, které se navzájem kříží,
- podle norem umisťujeme zemnící kolíky a dutinky na určité části stínícího obalu a
- stínění a zemnění realizujeme zvláště spolehlivě.

Při provádění kabeláže je snahou minimalizovat délku vodičů a dodržovat zásady důkladného oddělení silových a datových cest. Během návrhu montáže se doporučuje použitou kabeláž rozdělit do několika skupin s ohledem na velikost přenášeného proudu. Vodiče jednotlivých skupin nesmí být vedeny v jednom svazku a je třeba je pokládat na uzemněnou kovovou konstrukci zařízení. Samotné stínění kabelů se nesmí používat jako střední (zpětný) vodič. Rozdělení uzemnění neboli zemních spojení, které připojujeme zásadně samostatně, také minimalizujeme rušivé vazby.

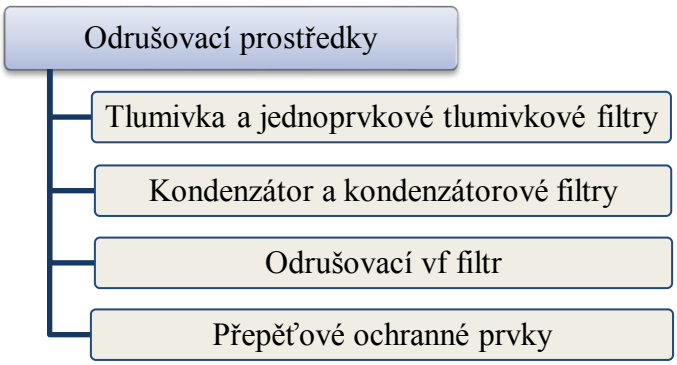


Obr. 5: Rozdělení uzemnění podle druhů spojení

1.6 Filtrace

Tyto odrušovací prostředky aplikujeme jak ke zvýšení odolnosti přijímače, tak i pro snížení rušení u zdroje, a to především po vedení, tj. na spojové cestě mezi jednotlivými systémy. Nesprávnou volbou odrušovacího prostředku dochází většinou k neúčinnosti

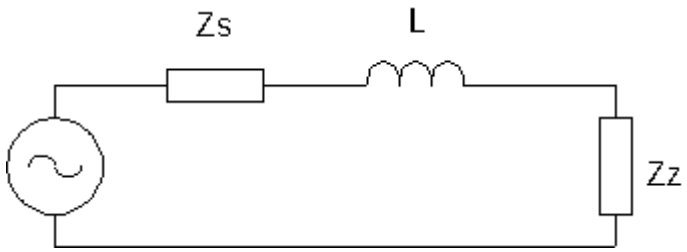
odrušovacího prostředku, ale také může dojít ke zhoršení parametrů odrušovaného zařízení, ba dokonce k ohrožení obsluhy. Takovýto nevhodně zvolený způsob potlačení EMI může naopak zvýšit celkovou úroveň rušení. Následující diagram na obrázku č. 6 znázorňuje jednotlivé odrušovací prostředky. [4]



Obr. 6: Jednotlivé odrušovací prostředky

1.6.1 Odrušovací tlumivky

Odrušovací tlumivky jsou ohledně odrušovací techniky pasivní součástky, které nabývají největších parametrů, a tudíž jsou na ně vykládány největší náklady. Jsou zapojovány do proudových obvodů odrušovaného zařízení. V důsledku toho je jejich velikost přímo úměrná velikosti protékajícího pracovního proudu. Tlumivka se tedy zapojuje přímo mezi výstup napájecí energetické sítě (zdroj rušení) a napájecí vstup přístroje (přijímač rušení). Tento jednoprvkový tlumivkový filtr je zapojen v sérii s vnitřní impedancí (odporem) sítě a vstupní impedancí napájecího vstupu přístroje (Obr. 7). Tlumivku pro účinné potlačení rušení je vhodné použít v nízkoimpedančních systémech, tedy tam, kde je impedance zdroje i přijímače rušení mnohem menší, než vlastní reaktance tlumivky ($Z_S+Z_Z<<\omega L$).



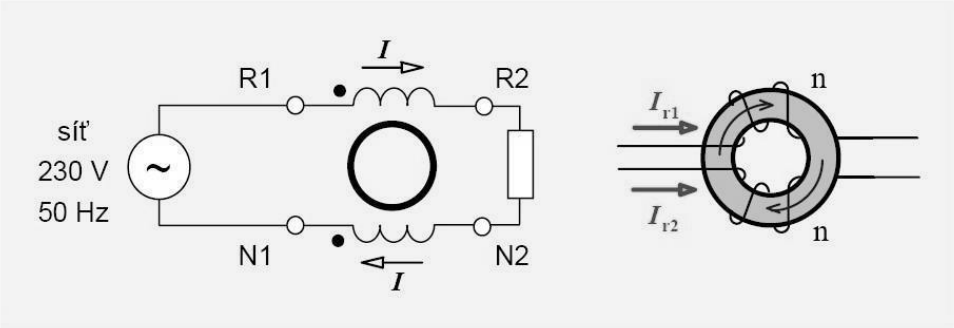
Obr. 7: Zapojení odrušovací tlumivky do vedení [3],

upravil Navrátil 2013

Kvalitní odrušovací tlumivka musí především splňovat tyto požadavky:

- velká indukčnost při malých rozměrech, malém počtu závitů a při nízké hmotnosti,
- vysoký rezonanční kmitočet tlumivky (minimální parazitní kapacity),
- mimo oblast síťových kmitočtů musí mít co největší činné ztráty,
- tlumivka s feromagnetickým jádrem se nesmí přesycovat při pracovních proudech,
- tvar magnetického obvodu jádra a jeho permeabilita musí být zvolena tak, aby bylo dosáhnuto co největší indukčnosti při minimálním počtu závitů tlumivky. [5]

V odrušovací technice se hojně používá zapojení tlumivky s proudovou kompenzací pro potlačení nesymetrické složky signálu**.** Princip zapojení této tlumivky spočívá v tom, že fázový a zpětný vodič jsou navinuty na společném jádru ve stejném smyslu tak, že pro pracovní proud 50 Hz a pro protifázové rušivé proudy mají jejich magnetické toky opačný směr, kdy se vzájemně vyruší a výsledná indukčnost pro jmenovitý proud je nulová. Pro soufázové rušivé proudy obou vodičů (protékající oběma vodiči ve stejném směru, obr.8) mají magnetické toky souhlasný směr, takže indukčnost je maximální. Přitom nedochází k přesycení jádra ani k úbytku napětí v obvodu pracovního proudu.

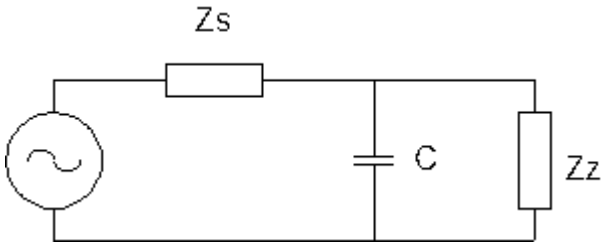


Obr. 8: Odrušovací tlumivka s proudovou kompenzací [4]

1.6.2 Odrušovací kondenzátory

Odrušovací kondenzátory mohou být používány samostatně nebo mohou být zapojené do určitých kombinací tzv. kondenzátorových filtrů. Kondenzátor jako odrušovací prvek se zapojuje paralelně k vnitřní impedanci napájecí Z_S sítě a vstupní impedanci odrušovaného přístroje Z_Z podle obr.9. Použití odrušovacích kondenzátorů je účinné jen tehdy, pokud je jejich vlastní reaktance mnohem menší, než vnitřní impedance zdroje rušení a impedance napájecí sítě. Z předcházejícího plyne, že odrušovací kondenzátor je nutné používat ve vysokoimpedančních systémech, kde platí: $\omega C >> (1/Z_S || Z_Z)$. Při nižších hodnotách impedancí zdroje a přijímače účinnost odrušení značně klesá. Velikost kapacity

odrušovacího kondenzátoru volíme v závislosti na kmitočtovém spektru rušení. Čím nižší je dolní kmitočet potlačovaného pásma, tím větší by měla být vlastní kapacita.



Obr. 9: Zapojení odrušovacího kondenzátoru
do vedení [4], upravil Navrátil 2013

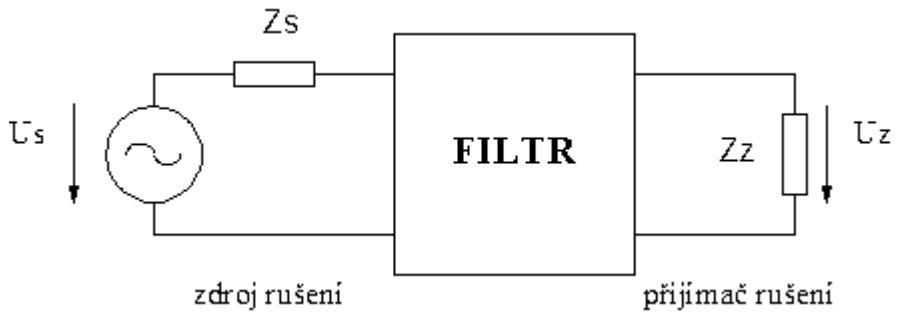
1.6.3 Odrušovací vf filtry

Pro dokonalejší ochranu zařízení před působením vysokofrekvenčního rušení šířící se po vedení se používají odrušovací filtry, které kombinují předchozí dva typy odrušovacích prvků. Nejčastěji se aplikují filtry LC typu dolní propust, jež bez potlačení propouštějí proudy s kmitočtem nižším než je stanovený mezní kmitočet f_m a naopak nepropouštějí (tlumí) signály, jejichž frekvence je vyšší než mezní kmitočet. Odrušovací filtry obecně dělíme na:

a) síťové (napájecí) odrušovací filtry a
b) speciální odrušovací filtry.

1.6.3.1 Napájecí filtry

Napájecí odrušovací filtry jsou v současné praxi nejčastější. Umisťují se do energetické napájecí sítě nebo do napájecího vstupu přístroje podle obr. 8 mezi zdroj a přijímač rušení. Filtry se dělí v závislosti podle funkce na EMI, EMC popřípadě EMI/EMC a jejich popis uvádí následující tabulka č. 1.



Obr. 10: Zapojení odrušovacího filtru [4], upravil Navrátil 2013

Tab. 1: Dělení a popis jednotlivých filtrů

Filtry EMI	Určený k potlačování šíření rušení od zdroje rušení ven (tzn. do napájecí sítě, zátěže)
Filtry EMC	Určený ke snížení citlivosti zařízení na rušení
Filtry EMI/EMC	Filtr použitelný jak pro odrušování zdroje, tak i pro snižování citlivosti

1.6.3.2 Speciální filtry

Mezi speciální odrušovací filtry patří prvky pro ochranu elektronických zařízení proti působení rušivých impulzů velké intenzity (zkráceně EMP – Electromagnetic Pulse). Na rozdíl od běžných sítových odrušovacích filtrů má filtr EMP na svém vstupu zapojené prvky omezující přepětí (viz. přepěťové ochrany v následující části). Tyto filtry se používají tam, kde je předpokládán nebezpečný výskyt přepěťových impulzů například v důsledku spínacích přechodů, blesků apod. schopných ohrozit správnou funkci elektronických zařízení. Filtry proti bleskům se také označují pod zkratkou LEMP (Lightning Electromagnetic Pulse - elektronický impulz blesku). V rozsáhlých vojenských aplikacích se tyto filtry speciálně označují NEMP (elektromagnetický impulz vyvolaný jaderným výbuchem).

Mezi další speciální odrušovací filtry patří tzv. filtry TEMPEST (Temporary Emanation and Spurious Trasmission - přechodné úniky a nepravé přenosy), které slouží k zamezení úniku informací mezi telekomunikačními zařízeními a zařízeními pro přenos dat. Únik dat může být zneužit nepovolanými osobami, proto jsou technické parametry těchto filtrů utajené.

V telekomunikačních zařízeních se dále používají datové filtry k omezení rušivých signálů na datových a signálových vedeních. Hlavním rozdílem těchto datových filtrů od filtrů síťových je nižší pracovní proud a pracovní napětí. Obvykle jsou zapojovány v systémech, kde impedance jsou si navzájem rovny (Z_s=Z_z) a propouštěné signály jsou značně širokopásmové.

1.6.4 Přepěťové ochrany

Jako přepěťové ochranné prvky označujeme součástky k potlačení nebo omezení napěťového přepětí na vedeních. Aplikují se tam, kde vznikají rušivé elektromagnetické děje o vysoké intenzitě např. blesky nebo elektrostatické výboje apod. Ochranné přepěťové prvky se obvykle rozlišují podle rychlosti své reakce a především podle ochranné úrovně napětí a to na:

1. hrubou ochranu, kde patří jiskřiště a bleskojistky (výbojky) a
2. jemnou ochranu, mezi kterou patří varistory, Zenerovy a speciální lavinové diody.

Filtry EMC popřípadě EMI/EMC na rozdíl od filtrů EMI zpravidla obsahují určitý typ přepěťové ochrany.

Dílčí závěr

Poplachový zabezpečovací systém umístěný především v těžkém průmyslovém prostředí, kde je riziko elektromagnetické interference největší, může být rušen řadou zdrojů generující signály o různých průbězích v širokém kmitočtovém spektru. Aplikovaný způsob zamezení negativních vlivů by měl být univerzálně účinný. Neméně důležitá je také samotná konstrukce a kryt (stínění) systému, jež může elektromagnetické kompatibilitě, respektive její susceptibilitě značně napomáhat.

Vzhledem k tomu, že se rušící signály přenášejí do přístroje převážně po vedení, je aplikace odrušovacího prostředku nezbytná k zabezpečení EMC. Nejideálnější je použití odrušovacího filtru jako nejefektivnějšího způsobu odrušení elektronického zařízení. Odrušovací filtr kombinuje základní jednoprvkové filtry: tlumivky a kondenzátory. Vhodným doplňkem EMI/EMC filtru je také vhodně zvolená přepěťová ochrana, která by měla být již součástí napájecí sítě.

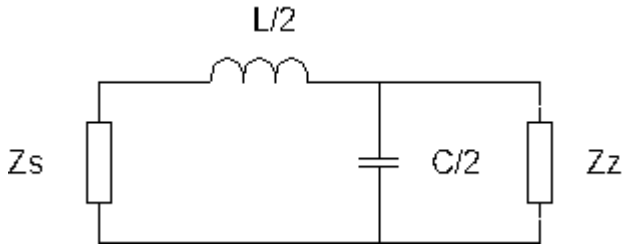
2 METODY NÁVRHU EMI/EMC FILTRŮ

Kapitola nejprve popisuje princip filtru dolní propusti, základní hlediska při obecných návrzích a omezení spojená s návrhem a realizací odrušovacího filtru. Následující část se zabývá již samotnými metodami návrhů filtrů, mezi které patří výpočetní a softwarový návrh filtru a návrh filtru s pomocí mobilních aplikací. Dále se budeme zabývat variantami ověřování správné a požadované činnosti filtru a ke konci kapitoly uvedeme přehled nejběžnějších, komerčně vyráběných EMI a EMC filtrů.

2.1 Princip odrušovacího filtru

Obecně jsou filtry definovány jako dvojbrany, které v určité části kmitočtového spektra propouštějí elektrické signály s minimálním potlačením, nejlépe s nulovým útlumem, a při ostatních kmitočtech s maximálním potlačením, tedy teoreticky s nekonečným útlumem. V praxi je však nemožné realizovat filtr s ideálními vlastnostmi, proto je snahou, aby v propouštěném pásmu útlum nepřekročil nejvýše přípustnou hodnotu a aby v pásmu zádrže útlum neklesl pod požadovanou hodnotu.[1]

Ohledně odrušovací techniky mluvíme o filtru LC typu dolní propust (obr. 11), který má propustné pásmo od nulového kmitočtu až do mezního kmitočtu f_m. Útlumová charakteristika má spojitý průběh, nemůže se tedy měnit skokově jako je to u teoretického průběhu. Proto se mezi propustným a nepropustným pásmem nachází tzv. oddělující přechodový interval, který je z jedné strany ohraničen kmitočtem f_0, kde je již útlum 3dB a z druhé strany kmitočtem s požadovaným útlumem.



Obr. 11: Zapojení základního článku typu L

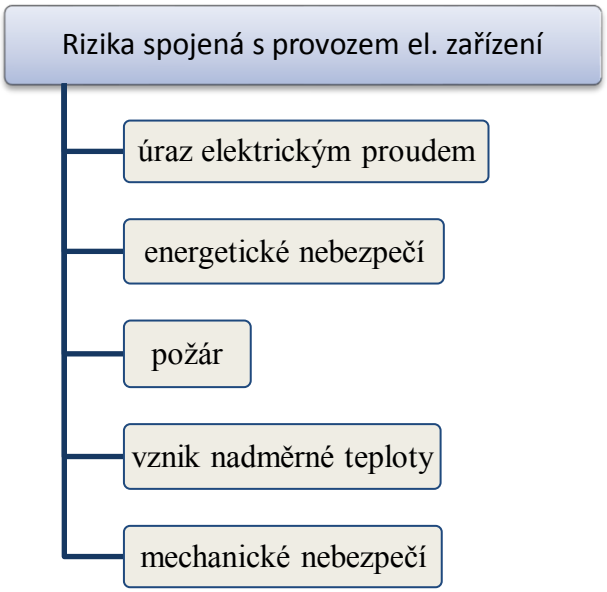
Princip činnosti filtru LC v zapojení článku L vychází ze zapojení reaktance X_L, představující tlumivku do série k impedanci Z_S a Z_Z, a reaktance X_C, tedy kondenzátoru zapojeného paralelně k těmto impedancím. Takto sestavený obvod propouští proudy s kmitočty $<f_m$, jelikož hodnota X_L cívky je vlivem malého kmitočtu velmi malá a klade jen malý odpor procházejícímu proudu a naopak impedance kondenzátoru je velmi velká.

Z tohoto důvodu proudy snadno protečou přes cívku do zátěže bez toho, aby se větvili přes kondenzátor. Pro proudy o kmitočtech $>f_m$ se hodnoty impedancí prvků obrátí, což bude mít za následek skutečnost, že reaktance cívky bude vlivem vysokého kmitočtu razantně omezovat protékající proud. Malá část proudu, která i přesto projde, se uzavře přes kondenzátor o malé reaktanci. Schopnost kondenzátoru uzavírat přes sebe proudy nezávisí jen na hodnotě X_C, ale značně závisí také na impedanci zátěže. Čím větší bude X_C na určitém kmitočtu v porovnání s Z_Z, tím větší část vf proudů se dostane do zátěže a tím bude menší účinek filtrace. Proto musí být impedance odrušovacího filtru závislá na hodnotách L a C a rovna impedanci zátěže i zdroje.

2.1.1 Základní hlediska při návrhu

Základním hlediskem při návrhu odrušovacího síťového filtru je, aby jeho použití v napájecí soustavě na vstupu zařízení nezhoršovalo provozní podmínky zařízení a sítě, popřípadě aby nedocházelo k ohrožení jejich správné činnosti. Důležitými aspekty návrhu jsou cena, rozměry a váha filtru. Tyto tři skutečnosti by měli být minimální.

Stejnou důležitost, jako je funkčnost a účinnost filtru má také jeho elektrická bezpečnost (dále jen EB). EB je jedním z předpokladů bezproblémové aplikace a funkčnosti filtru, kdy je riziko vzniku škod a poranění uživatele minimální. Každé elektrické zařízení musí být zkonstruováno tak, aby byla zaručena EB a z tohoto hlediska by měl konstruktér vycházet již při prvotní úvaze nad vlastním návrhem filtru. [6]



Obr. 12: Rizika spojená s provozem elektrických zařízení

2.1.2 Úskalí při návrhu a realizaci filtru

Vlastnosti filtru včetně jeho vložného útlumu závisí nejen na jeho vlastních parametrech, ale také na impedančních parametrech zdroje Z_s a přijímače rušení Z_z. Impedance napájecí sítě značně závisí na typu a provedení sítě a silně se mění v závislosti na kmitočtu v širokém rozsahu od jednotek až po stovky Ω. Z tohoto plyne, že odrušovací filtr může vykazovat velké odchylky hodnot vložného útlumu v závislosti na obvodu, v němž je zapojen. Rozdíly mezi stanoveným a skutečným útlumem mohou dosahovat až desítky dB. Neurčitost velikosti impedance zdroje způsobuje značné obtíže při návrhu síťového odrušovacího filtru. [2]

Dále jsou teoretické návrhy filtrů komplikovány:

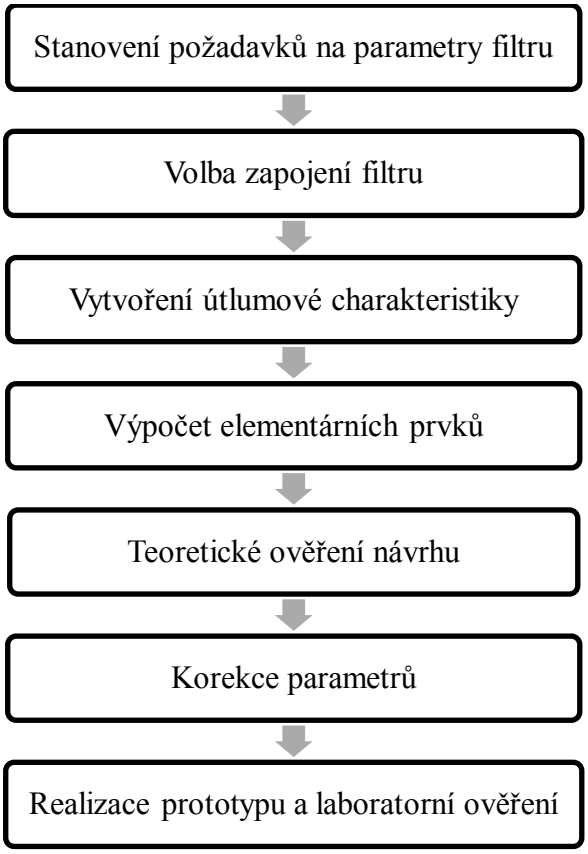
1. Komponenty filtrů, jelikož vlivem širokého rozsahu pracovních kmitočtů nemohou být reprezentovány náhradními zapojeními se soustředěnými parametry.
2. Směrem od mezního kmitočtu k vyšším kmitočtům útlum filtru teoreticky neustále roste za předpokladu ideálních vlastností použitých prvků. V praxi ale vlivem parazitních vlastností reálných kapacit a indukčností se omezují kmitočtová pásma a útlum filtru.
3. Od určitých kmitočtů, kdy převládají kapacity indukčností a indukčnosti kondenzátorů se změní původní dolnofrekvenční propust na hornofrekvenční.
4. Celková indukčnost tlumivek nesmí být velká tak, aby při průchodu proudu na ní nevznikl úbytek napětí větší než 1 až 2% ze jmenovitého napětí sítě.

2.2 Výpočetní metoda návrhu odrušovacího filtru

Při návrhu odrušovacího filtru výpočetní metodou postupujeme podle vývojového diagramu znázorněného na obr. 13. Prvním, čím bychom se měli zabývat, jsou samotné vlastnosti zařízení, mezi kterými bude odrušovací člen zapojen. Stanovení požadavků na parametry filtru závisí především na velikosti napájecího napětí PZS a proudu, který bude z napájecí sítě odebírán. Dále jsou důležité velikosti vstupní Z_{vst} a výstupní $Z_{výst}$ impedance filtru, které by měli být impedančně přizpůsobeny impedancím Z_S a Z_Z, aby platilo: $Z_S=Z_{vst}$ a zároveň $Z_Z=Z_{vyst}$. Kdyby nedošlo k impedančnímu přizpůsobení, podstatně by se snížil účinek filtrace. Mezi základní požadavky patří také velikost útlumu, kmitočet f_0 a kmitočet, při kterém nastane požadovaný útlum. K neméně důležitým parametrům patří také rozměry, hmotnost a cena.

Po stanovení požadavků se zvolí nejvíce vyhovující zapojení filtru. Volba zapojení je závislá na impedančních poměrech sítě, filtru a zátěže a na požadovaných pásmech propustnosti a pásmech potlačení.

Třetí blok diagramu se zabývá stanovením žádané útlumové charakteristiky, která bude závislá hlavně na typu filtru. Pro filtr EMI bude rozhodující úroveň rušení odrušovaného zařízení a požadované meze rušení dle platných norem týkajících se omezení rušení od zdrojů rušení. V případě filtru EMC vycházíme z požadavku na úroveň odolnosti zařízení vůči rušení.



Obr. 13: Procesní postup při návrhu filtru, upravil Navrátil 2013 [2]

Výpočet parametrů elementárních komponentů filtru můžeme provést následovně:

- dle teorie filtru typu k,
- nebo z orientačního výpočtu na základě požadovaného útlumu.

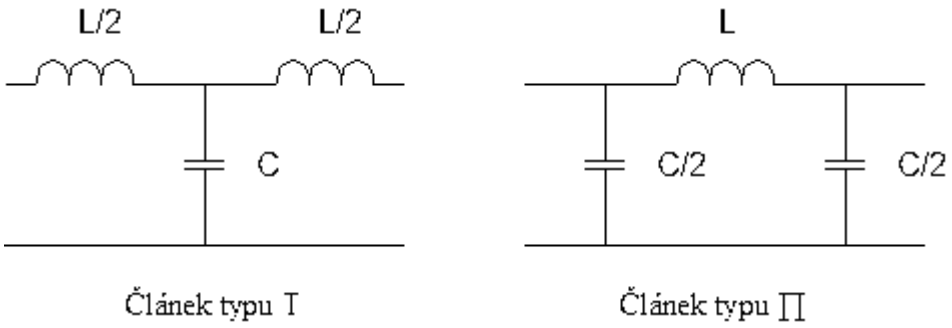
Následně se ověří návrh filtru analyzováním jeho frekvenční charakteristiky, porovnají se výsledky teoretického výpočtu s možnostmi technické realizace, popřípadě se provede nutná korekce parametrů filtru.

V poslední etapě procesního postupu při návrhu filtru se provede realizace prototypu a laboratorně se ověří jeho funkčnost s porovnáním požadavků na odrušení.

2.2.1 Výpočet dle teorie filtru typu k

Základem teorie výpočtu filtru je zapojení dvou poločlánků L (obr. 11, s.27) typu k do článků T nebo Π (obr. 14), u kterých se předpokládá, že obsahují pouze komponenty L a C a jsou symetricky zatížené, tj. $Z_{vst}=Z_{výst}=Z$. Při výpočtu se jako výchozí hodnoty použijí:

1. charakteristická impedance Z,
2. mezní frekvence f_0 a
3. požadovaný útlum na určitém kmitočtu f.

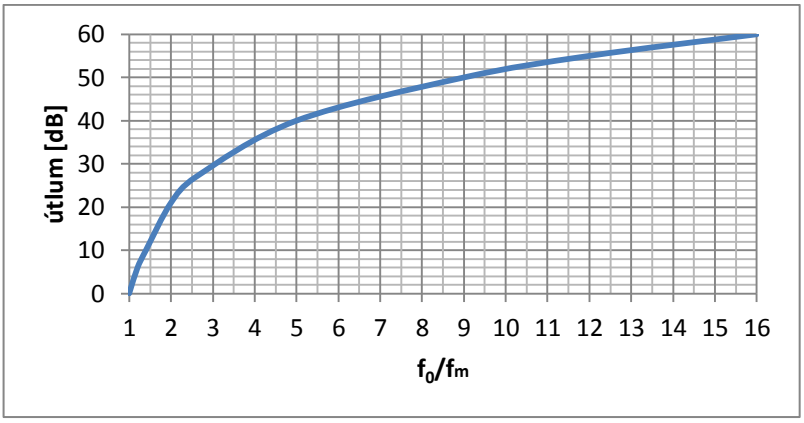


Obr. 14: Základní články typu T a Π [4], upravil Navrátil 2013

Samotný výpočet spočívá ve stanovení hodnot indukčnosti L a kapacity C, které nám zabezpečí žádoucí mezní kmitočet $f_{m,}$ a ve stanovení potřebného počtu článků nutných pro požadovaný vložný útlum. Výrazy potřebné k výpočtu filtru jsou následující:

$$\mathrm{L} = \frac{\mathrm{R}}{\pi \mathrm{f_m}}, [\mathrm{H}, \Omega, -, \mathrm{Hz}] \text{ a pro } \mathrm{C} = \frac{1}{\pi \mathrm{f_m R}}, [\mathrm{F}, -, \mathrm{Hz}, \Omega].$$

Nakonec podle poměrného kmitočtu f_0/f_m a grafu na obr. 15 se určí hodnota útlumu článku. Žádanou hodnotu útlumu dostaneme sestavením dvojitého, popřípadě n-tého článku T nebo Π, který má oproti základnímu článku dvojnásobný až n-násobný útlum.



Obr. 15: Graf pro výpočet vložného útlumu článku T a Π

v pásmu potlačení [2], upravil Navrátil 2013

2.2.2 Výpočet filtru na základě vložného útlumu

Základem této výpočetní metody je požadovaný útlum, který je definován vztahem:

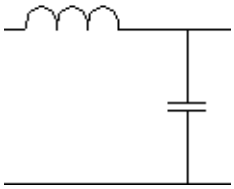
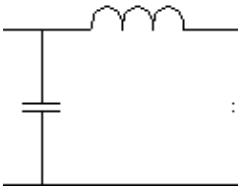
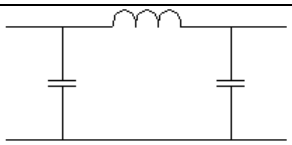
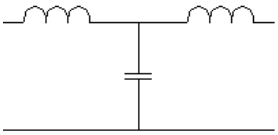
$$A_U = 20 \log \frac{U_{vst}}{U_{výst}}, [-, V, V] ,$$

mezní kmitočet f_m a zvolená hodnota buď indukčnosti L nebo kapacity C. Zpravidla se volí hodnota indukčnosti L s přihlédnutí k proudovému omezení na ni kladenému a následně se dopočte hodnota kapacity kondenzátoru. Počet článků a tedy i typ zapojení závisí především na velikosti požadovaného vložného útlumu filtru:

- pro A_U do 30dB se použije jeden článek typu L,
- pro A_U od 30dB do 50dB se zvolí násobný článek L nebo článek Π, popřípadě T
- a pro A_U od 50dB do 70dB se použijí násobné zapojení článků L, Π a T.

Volba zapojení filtru závisí také na odhadované velikosti uzavírajících impedancí sítě a zátěže. Síť jako zdroj rušení a zařízení představující přijímač rušení musí mít daleko menší impedanci na svých vstupních svorkách než je impedance na svorkách sítě. Bude platit, že $Z_S >> Z_Z$ a na impedanci sítě se vytvoří velké rušivé napětí. Z toho vyplývá, že jestli bude Z_S malá, musí mít filtr indukční vstup, tedy sériové zapojení Z_S-L, a jestli bude mít Z_S velkou, tak musí mít kapacitní vstup, tj. paralelní spojení Z_S a C podle tabulky č. 2. [2]

Tab. 2: Různé kombinace zapojení podle velikosti impedance sítě a zátěže

Z_S	Zapojení filtru	Z_Z
nízká		vysoká
vysoká		nízká
asi vysoká		asi vysoká
asi nízká		asi nízká

2.3 Softwarový návrh filtru

Návrh pomocí počítače a speciálního softwaru nám může přinést značné zjednodušení, zvýšení kvality a komplexnosti návrhu, což ovšem značně závisí ve výběru vhodného programu. Na internetu je dostupnost SW nástrojů pro návrh filtrů velká, většinou však mívají jen omezené možnosti. Nabídka komplexnějších programů s velkými možnostmi návrhu je malá a některé programy byly vytvořeny pouze jako soubory jiných výpočetních matematických systémů typu MATLAB, Mathcad nebo Maple. Někteří výrobci elektronických obvodů vytvořili také programy pro návrhy, které jsou však úzce zaměřeny na filtry, v nichž jsou přednostně aplikovány součástky, které firma sama vyrábí. Častým problémem je také dostupnost, kdy pořízení kvalitních programů je finančně náročné a mnohdy není ani možnost si funkce vyzkoušet v rámci demoverze nebo trial verze. Při výběru vhodného softwarového nástroje pro naše použití můžeme postupovat podle různých aspektů, jako jsou např. uživatelská přívětivost, náročnost či rozsah použití. Co se

týče obecných návrhů filtrů RLC, měla by být mezi základní hodnotící kritéria zahrnuta volba:

1. typu filtru (DP, HP, PP, PZ),
2. libovolných zakončovacích impedancí,
3. typu aproximace,
4. návrhu základních zapojení výsledných filtrů,
5. maximálního řádu a možnost:

1. individuální modifikace hodnot jednotlivých součástek,
2. zobrazení výsledných schémat s možností exportu,
3. analýzy přenosových vlastností filtru. [7]

Volbou aproximace máme na mysli základní typy: Bessel (1), Butterworthov (2), Čebyšev (3), inverzní Čebyšev (4), Gauss (5) a Cauer (6), které charakterizují průběh modulové závislosti (závislost útlumu na kmitočtu).

2.3.1 FilterPro

První program FilterPro je jedním z volně šiřitelných programů s poměrně velkými možnostmi při návrzích filtrů. Umožňuje návrh všech základních typů frekvenčních filtrů s aproximacemi Bessel, Butterworthov, Čebyšev a Gauss o maximálním řádu 10. Navrhovatel má možnost navrhnout filtr buď podle vlastností filtru, nebo na základě pevně daných hodnot součástek. U komponentů je možné zvolit zaokrouhlování vypočtených hodnot podle vybraných výrobních řad kondenzátorů a rezistorů. Nevýhodou je nutnost aplikace operačního zesilovače, což může být v různých okolnostech zbytečné. [8]

2.3.2 Genesys

Jako další softwarový nástroj, který umožňuje propracované návrhy elektronických obvodů je program zvaný Genesys. Disponuje komplexními nástroji pro simulaci, optimalizaci, analýzu a syntézu obvodů. Mezi přednosti patří také možnost zobrazení 3D simulace elektromagnetického vyzařování do okolí. Komplexnost návrhu platí i ohledně pasivních filtrů s jakoukoliv aproximací a řádem. Nevýhodou je však vysoká cena, z čehož vyplývá, že jen pro občasné použití může být pořízení programu nevýhodné. [9]

2.3.3 SuperFilter

SuperFilter kromě návrhů pasivních filtrů nabízí také návrhy aktivních a digitálních filtrů. Postup návrhu se liší v závislosti na zvoleném typu a funkce filtru, kde je možnost také stanovit řád filtru (maximálně 20 řádů). Program podle požadovaných parametrů: útlumu, frekvence, pásma propustnosti a maximálního zvlnění analyzuje všechny typy filtrů podle aproximace a vyobrazí přehled návrhů podle dosažení potřebných vlastností. SuperFilter dokonce obsahuje vlastní rozsáhlou knihovnu topologií sítí, podle které se taktéž analyzují požadavky na filtraci v závislosti na zvoleném obvodu, do něhož bude výsledný odrušovací člen aplikován. [10]

2.3.4 FilterLab

Softwarový nástroj FilterLab je určený pro návrhy filtrů typu dolní propusti s maximálním osmým řádem. Volba aproximace je taktéž omezena na Bessela, Butterworthova a Čebyševova s pásmem propustnosti od 0,1Hz do 10MHz. V rámci změn návrhu lze libovolně pozměnit jen hodnoty kapacit a průběh přechodu mezi pásmem propustnosti a zadržení. FilterLab neobsahuje nástroj pro analýzu, ale jen generátor modelu, který umožňuje analýzu filtru ve speciálním programu na simulaci. [11]

2.3.5 FilterCAD

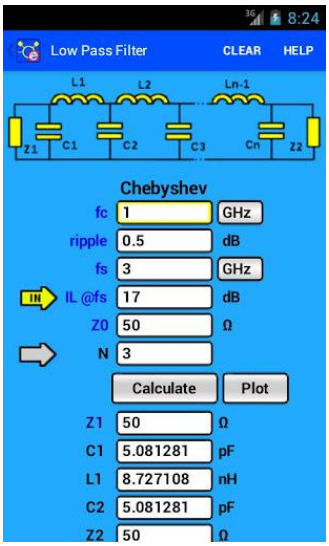
Program FilterCAD je koncipován tak, aby i uživatelé bez speciálních odborných znalostí v dané problematice byli s minimem úsilí schopni navrhnout vhodný filtr. Pro zkušenější konstruktéry naopak umožňuje změnit navrhované hodnoty součástek a komponentů. Umožnuje sestavení základních čtyř typů filtru do šestnáctého řádu pomocí téměř všech aproximací a také umožnuje návrh na základě ručního nadefinování vlastností filtru. Návrhy pomocí FilterCAD jsou přednostně zaměřeny na konstrukce, kde lze aplikovat vlastní firemní součástky. [12]

2.4 Návrh filtru pomocí mobilních aplikací

Mezi mobilními aplikacemi pro chytré telefony a tablety jsou k dispozici také programy, které mohou být efektivním, a rychlým nástrojem při návrhu odrušovacího filtru. Na zatím nejrozšířenější platformě Android existuje program RF & Microwave, který disponuje velkým výběrem nástrojů, mezi které patří mimo jiné také návrh DP, HP, PP, PZ, PI a T článků. Disponuje možností vytvoření útlumové charakteristiky a následného exportu.

V jeho nezpoplatněné verzi se však musíme spokojit pouze s návrhem základního článku L typu DP s Čebyševovou aproximací. Program výše uvedený článek navrhne s určitým řádem v závislosti na požadovaném útlumu. [13]

Dále stojí za zmínku aplikace FilterCalc určená pro návrh aktivních analogových filtrů typu dolní a horní propust s Butterworth a Chebyshevovou aproximací a aplikace Active Filter Calculator s podobnými vlastnostmi. Vývojáři těchto dvou programů uvádějí na distribučních stránkách však velmi stručné a neúplné informace o parametrech programů.



Obr. 16: Aplikace

RF & Microwave Toolbox

2.5 Způsoby ověření správné činnosti filtru

Správnost návrhu filtru a tím i jeho funkčnost a realizovatelnost lze ověřit dvěma způsoby, přičemž každá z nich má své výhody, ale také nevýhody, které je třeba zhodnotit. V obou případech pro nás bude rozhodující analýza kmitočtových charakteristik. Ověřit požadované vlastnosti odrušovacího filtru můžeme následujícími způsoby:

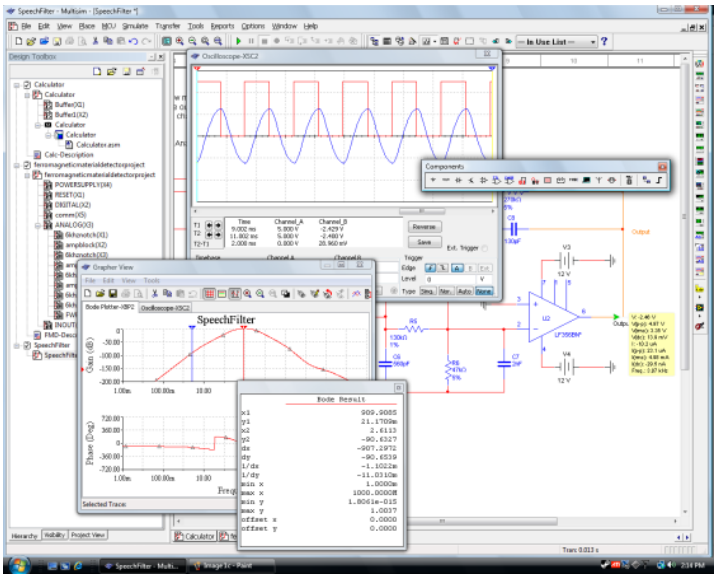
a) proměření pomocí simulačního softwaru, nebo
b) realizací laboratorní zkoušky.

2.5.1 Měření v simulátoru

Měření v simulačním softwaru pomocí PC je metoda velice rychlá a nenáročná na realizaci. Provedení spočívá v nakreslení schématu pro testování elektronického obvodu, zapojení virtuálních měřicích přístrojů s následnou simulací činnosti obvodu a podrobnou

analýzou vlastností. Výhodou je také aplikovaná kontrola elektrických návrhových pravidel, která méně zkušenému uživateli pomůže předcházet zásadním chybám. Samozřejmostí je také přehledné grafické zobrazení výsledků měření a možnost exportu.

Simulačně analyzační programy bývají většinou součástí speciálních softwarů pro návrhy filtrů, ale existují i nástroje určené pouze pro simulaci, jako je NI Multisim na obr. č. 17.



Obr. 17: SW NI Multisim

Tento program obsahuje kromě obecných vlastností uvedených výše také rozsáhlé knihovny součástek, analýz a měřících přístrojů. Umožnuje interaktivní simulaci a návaznost obvodů na návrh DPS. Je vydáván v několika placených verzích, které se mezi sebou liší hlavně rozsáhlostí knihoven. [14]

Nevýhoda této metody ověření filtru spočívá v tom, že při měření a následné analýze na obvod nepůsobí okolní vlivy spojené s praktickou aplikací filtru a že vlastnosti elementárních elektrických prvků jsou spíše ideální, než skutečné s parazitními parametry.

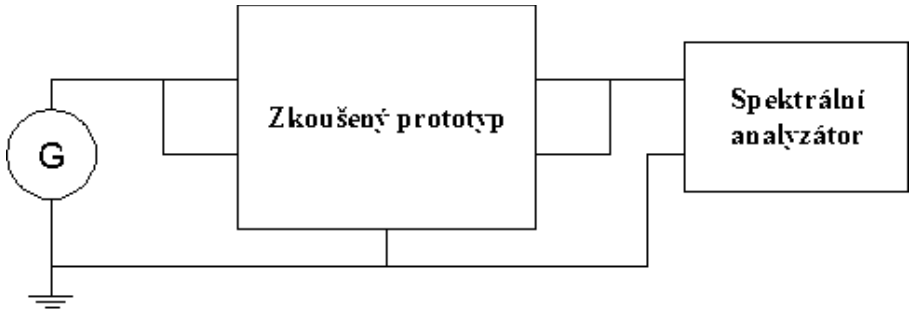
2.5.2 Realizace prototypu a laboratorní ověření

Laboratornímu ověření předchází praktická realizace prototypu filtru, který se otestuje. Z tohoto faktu vyplývá, že pokud bude následnou analýzou zjištěna nesrovnalost s požadavky na odrušení, bude zapotřebí změnit hodnoty komponentů, nebo dokonce přeformulovat zapojení, což již nese určité finanční prostředky navíc. Realizace prototypu nám nabízí možnost filtr přímo aplikovat do systému, pro který je určen, a tím si nejlépe ověřit jeho funkčnost. Oproti předchozí metodě, je laboratorní měření náročnější také z hlediska potřebnosti kvalitních generátorů a měřících přístrojů.

Dle normy o pasivních filtrech pro elektromagnetické odrušení, by se odrušovací filtr měl podrobit funkční zkoušce pro přenos nesymetrického a symetrického signálu. Samotný pokus netkví jen v charakteristice přivedeného signálu, ale také na odlišných variantách zapojení. [17]

2.5.2.1 Měření přenosu nesymetrické složky signálu

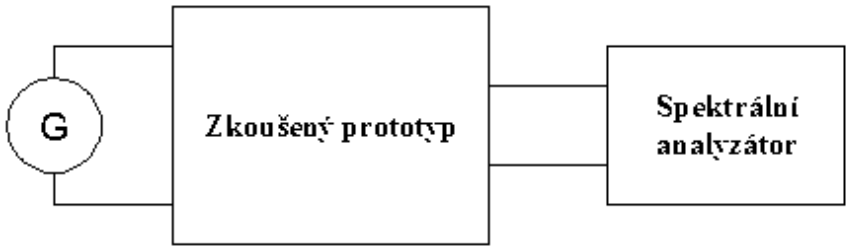
Zkušební obvod – filtr je připojen třemi vývody, z nichž jeden (kostra zařízení) je spojen se zemí. Vstupní nesymetrický signál je přiveden mezi vstupní vývod filtru a zem, výstupní signál je měřen analyzátorem mezi výstupním vývodem a zemí. V této variantě zkušebního obvodu je společné propojení mezi generátorem, filtrem a analyzátorem podle obr. č. 27.



Obr. 18: Nesymetrický zkušební obvod

2.5.2.2 Měření přenosu symetrické složky signálu

Při měření přenosu symetrické složky signálu je zkoumaný filtr do obvodu zapojen čtyřmi vývody. Zkušební signál je přiveden na dva vstupní vývody symetricky vůči zemi, tj. na oba vývody signál o stejné velikosti, ale opačné fáze. Výstupní signál je pak změřen mezi zbývajícími dvěma výstupními vývody filtru.

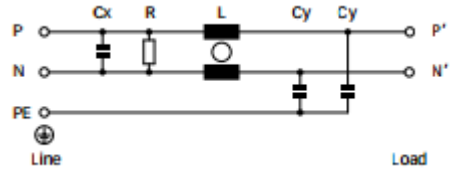
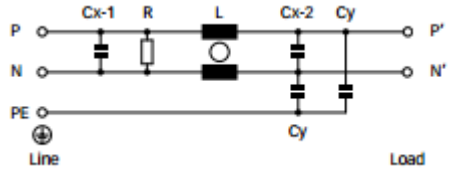
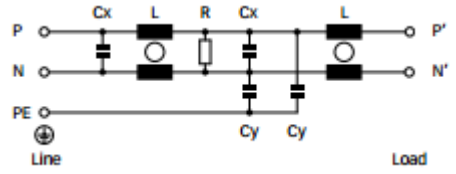


Obr. 19: Symetrický zkušební obvod

2.6 Typická zapojení komerčních filtrů

Mezi nejvýznamnější světové výrobce odrušovacích prostředku patří švýcarská firma Schaffner s širokým portfoliem EMC/EMI filtrů. Nejpoužívanější varianta jednofázového EMC/EMI filtru je typ FN 2010, který lze aplikovat jak pro zvýšení úrovně EMS zařízení, tak i pro redukci nežádané EMI. Tento filtr se vyrábí v několika verzích v závislosti na jmenovitém proudu, přičemž s rostoucím proudem klesá hodnota indukčnosti L. Pro zvýšení účinku odrušení se přidá kondenzátor Cx na stranu výstupu filtru (typ FN 2020), popřípadě vložením dalších dvou odrušovacích tlumivek L (typ FN 2070).

Tab. 3: Zapojení vybraných filtrů firmy Schaffner

FN 2010		Standartní útlum
FN 2020		Zvýšený útlum
FN 2070		Vysoký útlum

Dílčí závěr

Předcházející část práce by měla ujasnit základní princip odrušovacího filtru typu dolní propusti a upozornit na případná úskalí, která se mohou při návrhu vyskytnout. Než započneme práci se samotným návrhem filtru, je dobré se zamyslet jakým způsobem, popřípadě jakou metodou by bylo nejideálnější provést prvotní sestavení obvodu. K určitému přehledu by mu měl stačit předcházející oddíl, v němž je uváděn přehled metod.

Provedení návrhu výpočtem je z uvedených metod nejnáročnější, jelikož jsou kladeny určité nároky na znalosti a zkušenosti konstruktéra v dané problematice. Avšak tento postup návrhu může být nenahraditelným ve speciálních případech, kdy je zapotřebí zkonstruování odrušovacího členu o velmi specifických vlastnostech.

Co se týče návrhů pomocí softwarových nástrojů, je uvedeno hned několik vybraných programů. Jejich souhrnný přehled s porovnáním základních vlastností programů je znázorněn v tabulce č. 4, kde jsou uvedeny také licenční podmínky, které mohou být taktéž rozhodující při výběru programu. První program FilterPro je jedním z volně šiřitelných programů s poměrně velkými možnostmi při návrzích filtrů, nevýhodou je však nutnost aplikace aktivního členu (operačního zesilovače), což za určitých okolností může být zbytečné. Další programy Genesys a SuperFilter jsou komerčně prodávané programy s velkou nabídkou možností při návrhu, avšak za odpovídající cenu. Čtvrtý program FilterLab je ukázkou typického programu s velmi omezenými možnostmi. Poslední program FilterCAD je dobře zpracovaný, nicméně však zaměřen na aplikaci vlastních firemních součástek.

Tab. 4: Srovnání vlastností vybraných programů [7, 9]

	FilterPro	Genesys	SuperFilter	FilterLab	FilterCAD
Typy filtru	DP, HP, PP, PZ	DP, HP, PP, PZ	DP, HP, PP, PZ	DP	DP, HP, PP, PZ
Typy aproximace	1, 2, 3, 5	1, 2, 3, 4, 5, 6	1, 2, 3, 4, 5, 6	1, 2, 3	1, 2, 3, 4, 6
Z zakončení	•	•	•	-	-
Maximální řád	10	-	20	8	16
Modifikace parametrů	•	•	•	-	•
Analýza filtru	•	•	•	-	-
Licence	Freeware	Trial	Demo	Freeware	Freeware
Výrobce	Texas Instruments	Eagleware	Zarkor	Microchip Technology	Linear Technology

V rámci mobilních aplikací přichází pro návrh filtru v úvahu jen RF & Microwave Toolbox, který má dostačující možnosti oproti ostatním aplikacím, pracujícím na platformě android, což také dokazuje mnohonásobně větší počet uživatelů, jejž si ji stáhlo a nainstalovalo na svých zařízeních.

Způsoby, kterými lze ověřit správnou a požadovanou funkčnost filtru, jsou dva, ale nejideálnější je jejich kombinace vyplývající z jejich popisů. Nejdříve je vhodné provést teoretické ověření pomocí programového simulátoru, při kterém by měly být odhaleny zásadní nedostatky, a následně vykonat realizaci prototypu s následným proměřením v laboratoři. Výsledky obou metod by se měly lišit jen minimálně.

II. PRAKTICKÁ ČÁST

3 NÁVRH EMC FILTRU

Pro návrh odrušovacího filtru EMC byla zvolena výpočetní metoda na základě teorie filtru typu k. Tento způsob návrhu dává určitý prostor k individuálnímu sestavení filtru pro konkrétní systém, který je potřeba tímto způsobem odrušit. Teoretické ověření správnosti a funkčnosti návrhu bude provedeno pomocí simulačního programu Multisim s následným vytvořením napěťové přenosové závislosti filtru.

3.1 Parametry napájecí sítě a odrušovaného zdroje

Veškeré poplachové zabezpečovací systémy na trhu jsou napájeny ze střídavé sítě 230V jednofázově. Jelikož však samotné ústředny využívají ke své činnosti většinou stejnosměrný proud o velikosti 12V, je zapotřebí tuto energii transformovat napájecím zdrojem ústředny na požadované parametry. Dříve, než se provede transformace napětí, je třeba provést filtraci neboli odrušení ústředny od negativních vlivů ze společné rozvodné sítě. Velikost maximálního odebíraného proudu přímo z napájecí sítě se liší u jednotlivých typů ústředen, jak je znázorněno v tabulce č. 5.

Tab. 5: Srovnání proudových odběrů ústředen vybraných výrobců

Typ ústředny	**Maximální proudový odběr**
Jablotron JA-106K	0,20 A
Jablotron JA-83K OASiS a JA-63K PROFI	0,10 A
Honeywell Galaxy Flex	0,70 A
Honeywell Galaxy Dimension	1,00 A
DSC PC585	0,55 A
DSC Power	0,50 A
Texecom Premier	1,0 A
Risco Prosys	0,6 A
Spektra SP	0,18 A
Magelan MG	0,18 A

Jak je ze srovnání zřejmé, ústředny od různých výrobců odebírají proud maximálně 1A. Aby bylo možné aplikovat filtr do jakékoliv ústředny, musí být adekvátně proudově přizpůsoben. Souhrnně jsou parametry napájecí sítě a napájecího zdroje ústředen uvedeny v následující tabulce.

Tab. 6: Parametry sítě a napájecího zdroje

Parametry napájecí sítě	
Typ sítě	TN-S
Jmenovité napětí	AC 230V
Kmitočet	50 Hz
Impedance	50 Ω

Parametry napájecího zdroje ústředen	
Jmenovité napětí	AC 230V
Max. odebíraný proud	1 A
Kmitočet	50 Hz
Impedance	50 Ω

Pozn.: Síť TN-S se vyznačuje odděleným středním a ochranným vodičem.

3.2 Stanovení požadavků na parametry filtru

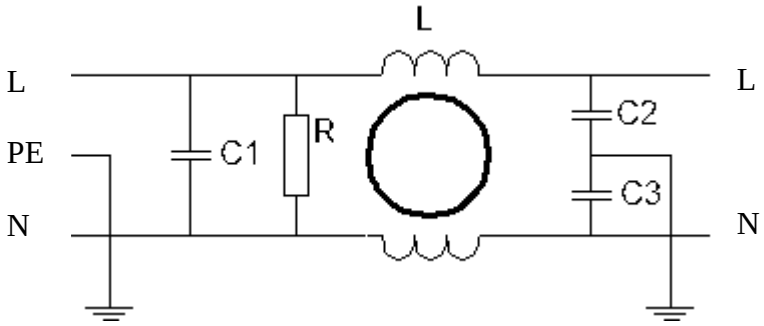
Požadavky na charakteristické veličiny odrušovacího filtru musí být dimenzovány s ohledem na obvody, mezi které se umístí. Parametry filtru, jmenovitě tedy napětí, proud a impedance se přímo odvíjí od parametrů napájecí sítě a napájecích zdrojů ústředen PZS. Velikost horního mezního kmitočtu je stanovena s ohledem na normu ČSN EN 50 130-4, která udává obecné požadavky na odolnost komponentů poplachových systémů. V tomto dokumentu je uvedeno, že zařízení by mělo být odolné proti působení rušení v rozsahu od 150 kHz až do 100 MHz. [16] Dolní mezní kmitočet je pak stanoven jako trojnásobně nižší, než je horní mezní kmitočet. Celkový vložný útlum odrušovacího článku bude 30dB, což pro efektivní odrušení poplachových zabezpečovacích systémů bude dostačující.

Tab. 7: Požadované parametry filtru

Impedance	50 Ω
Jmenovitý proud	1 A
Dolní mezní kmitočet f_0	60 kHz
Horní mezní kmitočet f_h	150 kHz
Vložný útlum	30 dB

3.3 Volba zapojení

Zapojení odrušovacího filtru je zvoleno s ohledem na velikosti impedance napájecí sítě a napájecího zdroje ústředny PZS podle tabulky č. 2. Žádaný vložný útlum je v rozmezí 30 až 50 dB, čemuž také odpovídá zapojení Π nebo T článku. Z ekonomického hlediska bude volba Π článku výhodnější než volba T článku, protože bude obsahovat dvakrát méně tlumivek. Tím bude filtr levnější a bude mít menší rozměry i váhu než v případě volby T článku. Zároveň filtr obsahuje dvě tlumivky, které budou doplněny o proudové kompenzace v provedení vertikálního toroidu, jenž zabezpečí vyrušení protifázového rušení, které by se přenášelo po středním vodiči.



Obr. 20: Zapojení navrhovaného filtru EMC

Vzhledem k zapojení odrušovacích kondenzátorů, které v obvodu v podstatě zkratují rušivé napětí k zemi, je nutné zajistit bezpečnost proti úrazu elektrickým proudem. Odrušovací kondenzátory jsou rozdělené do dvou tříd podle průrazných parametrů a zapojení:

- mezi fází a středním vodičem pro potlačení protifázové složky signálu (C_1), tedy tam kde průrazem kondenzátoru nemůže dojít k ohrožení osob, se aplikuje kondenzátor třídy X a
- mezi fází (popřípadě středním vodičem) a ochranným vodičem pro potlačení soufázové složky signálu (C_2 a C_3), kde by se případným průrazem dostalo fázové napětí na kostru zařízení a přímo tak ohrozilo obsluhu, se zapojují tzv. bezpečnostní kondenzátory třídy Y.

Kondenzátory třídy X se dále dělí na podtřídy:

- X1- použití v obvodech, kde je výskyt přepěťových špiček větších než 1,2 kV a
- X2 – v případech, kdy přepětí bývají menší než 1,2 kV.

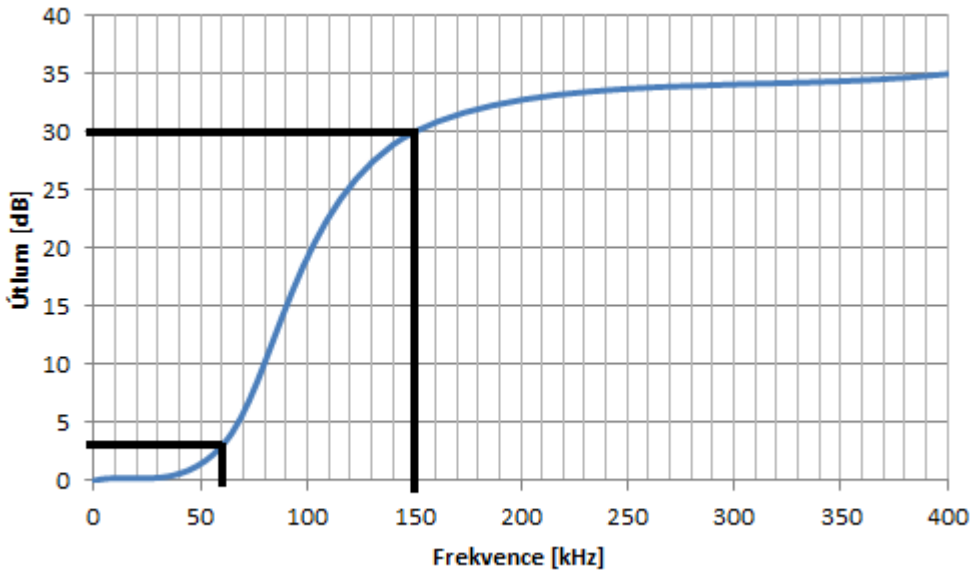
Bezpečnostní kondenzátory třídy Y se také dělí na podtřídy, které jsou:

- Y1- pro špičkovou hodnotu napětí 8 kV a
- Y2- pro hodnotu napětí 5 kV. [2]

Zapojení je také doplněno odporem R o velké velikosti pro vybití nábojů všech kondenzátorů po odpojení napájecího napětí, aby se na svorkách dlouhodobě nevyskytoval potenciál.

3.4 Vytvoření útlumové charakteristiky

Teoretický průběh útlumové charakteristiky navrhovaného odrušovacího síťového článku je jen orientační, dává nám však určitou představu o velikosti propustného pásma a pásma zádrže. Při frekvenci 60 kHz by měl útlum dosahovat 3 dB a při kmitočtu 150 kHz již požadovaný útlum 30 dB podle grafu na obrázku níže.



Obr. 21: Požadovaný průběh útlumové charakteristiky

3.5 Výpočty elementárních komponentů

Prvotní výpočet se provede po volbě odrušovací tlumivky, na kterou jsou kladeny určité požadavky. Jelikož je tlumivka zapojena podélně do obvodu, tj. vřazena v propojovacích vodičích, protéká jí proud, který odebírá ústředna PZS. Tlumivka musí být proudově dimenzována na plný pracovní proud tak, aby se její magnetický obvod procházejícím proudem nepřesycoval. V této souvislosti je ideální volba tlumivky o hodnotě 2 x 6,8 mH o jmenovité hodnotě proudu 1 A.

Hodnota reaktance pro síťový kmitočet bude:

$$X_L(f) = 2\pi f \cdot L = 2\pi \cdot 50 \cdot 0{,}0068 = 2{,}13\Omega$$

a pro napětí o frekvenci 150 kHz bude klást odpor:

$$X_L(f_h) = 2\pi f_m \cdot L = 2\pi \cdot 150000 \cdot 0{,}0068 = 6\ 408{,}8\Omega.$$

Výpočet hodnoty odrušovacího kondenzátoru C_1:

$$C = \frac{1}{\pi f_m R} = \frac{1}{\pi \cdot 150000 \cdot 50} = 42{,}44\text{nF}$$

Nejbližší vyráběná hodnota odrušovacího kondenzátoru třídy X je 33 nF. Velikosti reaktancí při jmenovitém a horním mezním kmitočtu jsou:

$$X_{C1}(f) = \frac{1}{2\pi f \cdot C} = \frac{1}{2\pi \cdot 50 \cdot 33 \cdot 10^{-9}} = 96\ 457{,}54\Omega$$

$$X_{C1}(f_h) = \frac{1}{2\pi f_m \cdot C} = \frac{1}{2\pi \cdot 150000 \cdot 33 \cdot 10^{-9}} = 32{,}15\Omega$$

Na kondenzátory třídy Y, zapojených mezi fázovým vodičem a ochranným vodičem jsou kladeny nároky v souvislosti na proud, který jimi protéká. Velikost tohoto proudu nesmí překročit mezní hodnotu, která by vyvolala zásah ochranných přístrojů. Proto jsou kapacity kondenzátorů třídy Y omezeny na jednotky nanofaradů (maximálně 10 nF). Z těchto důvodů byla zvolena hodnota kapacity 4,7 nF. Dle normy zabývající se pasivními filtry pro elektromagnetické odrušení [17] by tento unikající proud dvouvodičových filtrů neměl překročit hodnotu 0,75 mA při jmenovitém napětí a kmitočtu. Vypočet tohoto proudu je následující:

$$I_{LK} = 2\pi \cdot f_R \cdot U_R \cdot C_y = 2\pi \cdot 50 \cdot 230 \cdot 4{,}7 \cdot 10^{-9} = 0{,}34\text{mA}.$$

Výpočet reaktancí kondenzátorů při různých kmitočtech:

$$X_{C2,3}(f) = \frac{1}{2\pi f \cdot C} = \frac{1}{2\pi \cdot 50 \cdot 4{,}7 \cdot 10^{-9}} = 677\ 255\ \Omega$$

$$X_{C2,3}(f_h) = \frac{1}{2\pi f_m \cdot C} = \frac{1}{2\pi \cdot 150000 \cdot 4{,}7 \cdot 10^{-9}} = 225\ \Omega$$

Výpočet normovaného kmitočtu:

$$\frac{f_m}{f_0} = \frac{150000}{60000} = 2{,}5$$

Podle výpočtu normovaného kmitočtu, který jsme získali podílem horního a dolního ohraňujícího kmitočtu, a následným odečtením hodnoty útlumu z grafu na obrázku č. 15 jsme získali vložný útlum filtru 30dB.

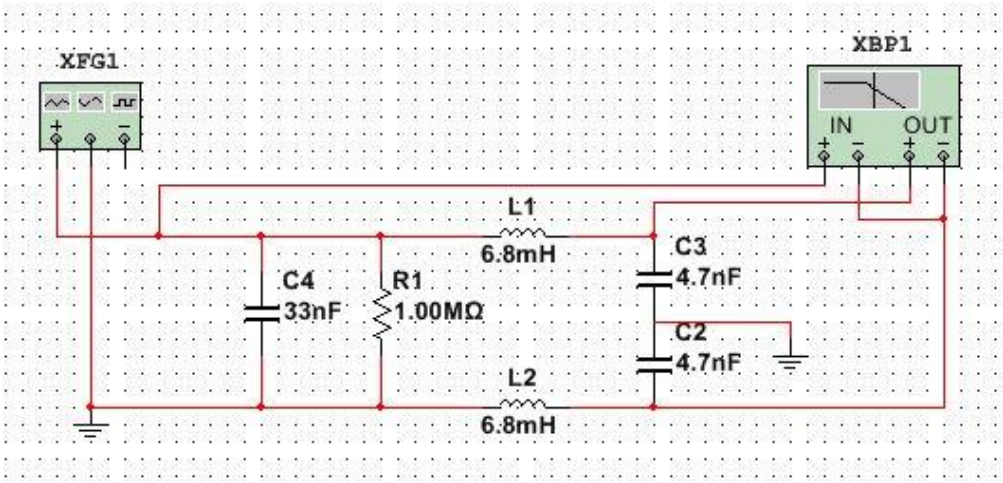
Hodnota odporu pro vybíjení kondenzátoru se v odrušovacích síťových filtrech volí v řádu MΩ. Pro tento odrušovací filtr byla zvolena hodnota 1 MΩ. Celkový seznam vypočítaných hodnot komponentů je uveden v tabulce 8.

Tab. 8: Soupiska komponentů

L	2 x 6,8 mH
C_1	33 nF
C_2	4,7 nF
C_3	4,7 nF
R	1 MΩ

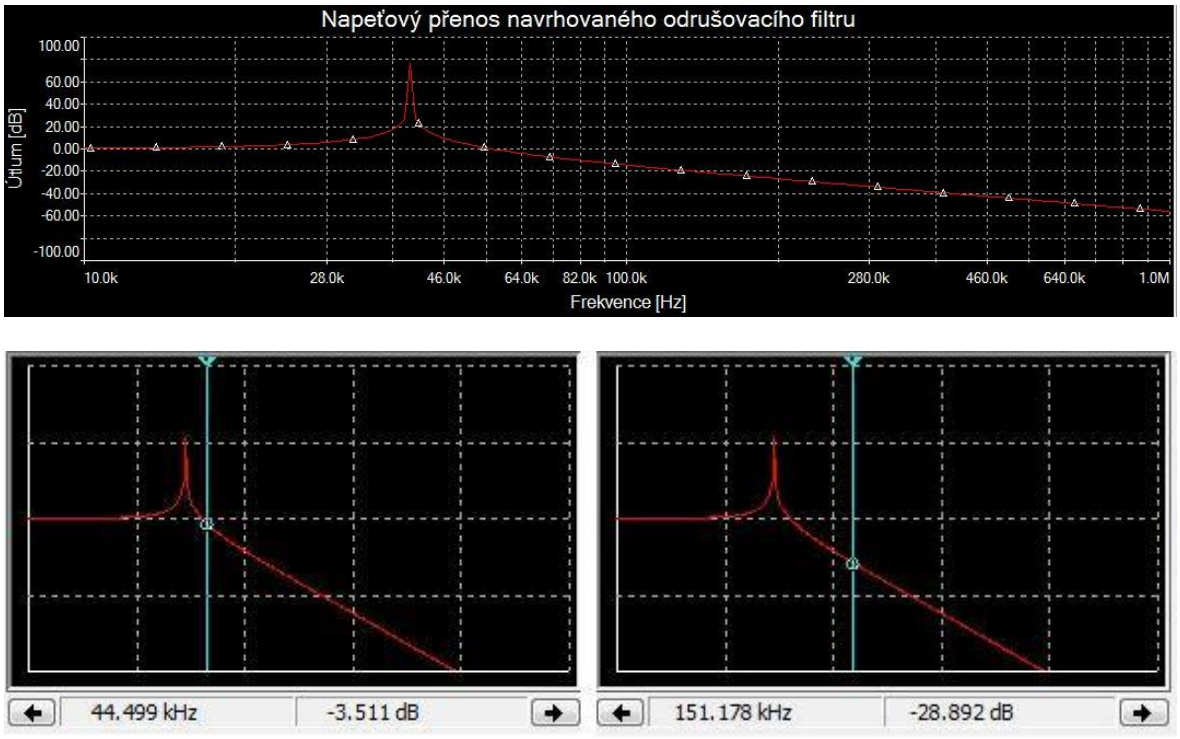
3.6 Teoretické ověření správnosti návrhu

Správnost návrhu je možné teoreticky ověřit počítačovým programem Multisim. V této „elektronické laboratoři na PC“ určené k analýze a simulaci obvodu bylo sestaveno zapojení navrhovaného filtru. Hodnoty jednotlivých elementárních součástek jsou zvoleny podle určitých výrobních řad z knihovny programu, nelze tedy aplikovat součástky o hodnotách přímo vypočtených a bohužel ani proudově kompenzovanou tlumivku. Na vstup článku je zapojen funkční generátor (ve schématu označen XFG1) a na výstup tzv. zapisovač (XBP1), který slouží k zobrazení a měření amplitudové charakteristiky v závislosti na kmitočtu procházejícího elektrického signálu.



Obr. 22: Měření v SW Multisim

Výsledný napěťový přenos filtru je zobrazen na následujícím grafu. V levé dolní části je znázorněna dolní mezní frekvence při přenosu zhruba -3dB a v pravé části můžeme vidět požadovaný napěťový přenos -29 dB při horním mezním kmitočtu cca 150 kHz. Při určitých frekvencích je přenos v chybných kladných hodnotách, jelikož v praxi nemůže nastat, aby pasivní článek do obvodu dodával elektrickou energii. Právě z těchto důvodů považujeme toto měření jen jako orientační.



Obr. 23: Znázornění napěťového přenosu

Dílčí závěr

Návrh filtru EMC, uvedený v předchozí kapitole, je provedený na základě principu dolní propusti s ohledem na impedanční přizpůsobení a na bezpečnost zařízení, což se významně projevilo na reaktančních poměrech filtru. Při síťovém kmitočtu f= 50 Hz jsou hodnoty reaktance tlumivky menší než impedance sítě a zdroje ústředny a reaktance kondenzátoru jsou větší v poměru s X_L o celé 4 řády. Naopak při mezním kmitočtu 150 kHz, kdy útlum dosahuje téměř 30 dB je tento poměr obrácený, avšak poměr reaktancí je dvojnásobně menší z důvodů použití bezpečnostních kondenzátorů, jejichž hodnoty jsou zredukované s ohledem na maximální unikající proud.

Tab. 9: Impedanční poměry filtru

Reaktance	Při f= 50 Hz	Při f= 150 kHz
X_L	2,13 Ω	6 408,8 Ω
X_{C1}	96 457,54 Ω	32,15 Ω
$X_{C2,3}$	677 255 Ω	225 Ω

Při neustálém zvyšování frekvence procházejícího proudu až do hodnot MHz vložný útlum filtru narůstá a tím se odrušovací účinek stále navyšuje.

4 REALIZACE PROTOTYPU

Na základě uvedeného návrhu filtru EMC v předchozí kapitole, je provedena realizace funkčního prototypu, jehož postup je nastíněn níže. Součástí je i funkční zkouška filtru ověřující jeho účinnost odrušení.

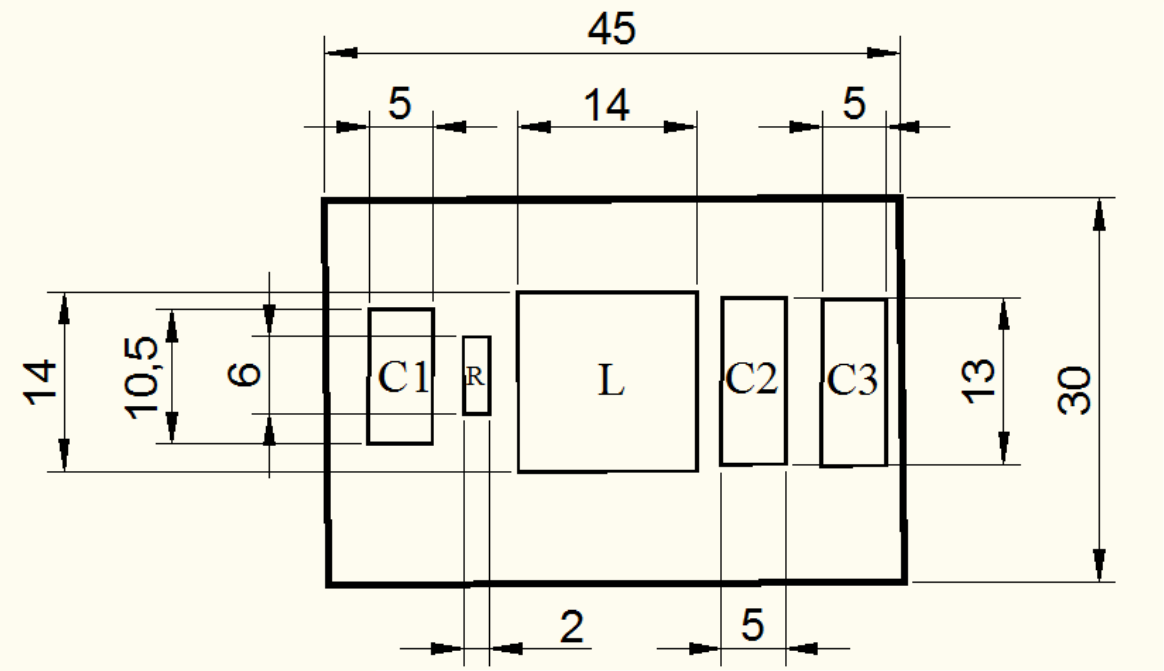
4.1 Volba součástek a komponentů

Dle tabulky číslo 8, která uvádí soupisku požadovaných parametrů elementárních prvků filtru, byly zvoleny a pořízeny následující součástky v tabulce 10, která kromě komerčního označení prvků uvádí také tolerance hodnot, doplňkové parametry a skutečné rozměry součástek. V poznámkách jsou pak uvedené informace o technologickém provedení.

Tab. 10: Seznam použitých součástek

Prvek	Označení	Hodnota	Tolerance hodnoty	Doplňkový parametr	Rozměr [mm]	Poznámky
L	CAF1100A6.8	2 x 6,8 mH	30 %	1 A, Rdc=0,342	14x14x8	Toroidní, vertikální
C_1	CFAC033N	33 nF	20 %	275 V	5x10,5x11	Fóliový, radiální X2
$C_{2,3}$	CFAC004N7	4,7 nF	20 %	300 V	5x13x11	Fóliový, radiální Y2/X1
R	MPR1M	1 MΩ	0,1 %	0,6 W	3x5	Metalizovaný, pouzdro 0207
Box	AH100	-	-	-	45x30x22	Cínovaný plech
Konektor (5x)	Faston VBK	-	-	-	2,8x0,8	Vidlice na kabel přímá

Zvolení boxu, v kterém budou součástky uloženy, bylo provedeno v závislosti na rozměrech použitých prvků a na základě náčrtu teoretického rozmístění součástek (Obr. 23). Tento náčrt nám umožňuje konkrétní představu o vnitřním provedení filtru a hlavně jsme si tímto způsobem ověřili, zda nebudou při realizaci problémy s umístěním součástek.



Obr. 24: Náčrt rozložení součástek ve zvoleném boxu

4.2 Výroba funkčního vzorku

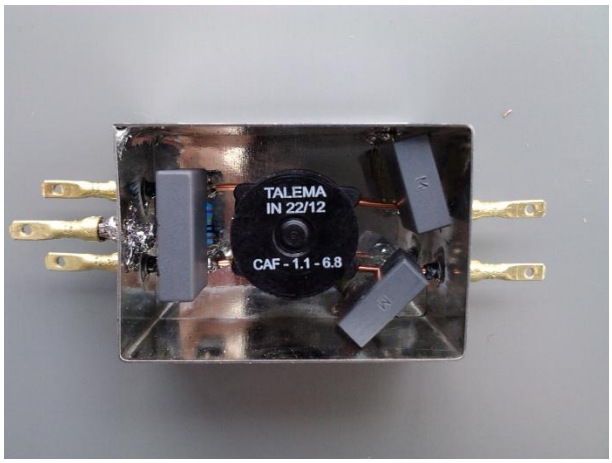
Po pořízení všech potřebných součástek a komponentů potřebných k realizaci prototypu filtru, byl postup výroby funkčního vzorku následující:

1. vyvrtání děr pro přívod a vývod filtru,
2. zhotovení tří přívodů (L, N a PE),
3. montáž dvou vývodů (L a N),
4. pájení přímé (proudové) části- tlumivky a
5. letování nepřímé (napěťové) části- kondenzátorů a rezistoru.

Pozn.: Jako materiál ke spojování vnitřních dílů byl použit cín.

Fotodokumentace zhotoveného prototypu filtru je znázorněna na třech snímcích níže:

Obr. 25: Celkový vzhled realizovaného filtru EMC



Obr. 26: Vnitřní provedení- horní pohled

Obr. 27: Vnitřní provedení- spodní pohled

4.3 Laboratorní ověření

Laboratorní ověření parametrů filtru bylo provedeno s běžně dostupnými měřicími přístroji, mezi které patřil multimetr Metex M-3890D, použit pro proměření impedance filtru a přístroj Uni-T UT603, jež byl použit k ověření jmenovitých hodnot kondenzátorů a tlumivky. Výsledky měření jsou uvedené v následující tabulce.

Tab. 11: Ověření hodnot filtru

Prvek	Označení	Hodnota	Tolerance hodnoty	Naměřená hodnota
L	CAF1100A6.8	2 x 6,8 mH	30 %	2 x 7,4 mH
C_1	CFAC033N	33 nF	20 %	33,3 nF
C_2	CFAC004N7	4,7 nF	20 %	5,3 nF
C_3	CFAC004N7	4,7 nF	20 %	5,2 nF
R	MPR1M	1 MΩ	0,1 %	1 MΩ
Z	-	-	-	0,7 Ω

Pozn.: Z= celková impedance filtru naměřená mezi vstupními a výstupními svorky.

ZÁVĚR

Elektromagnetická kompatibilita stejně jako elektrická bezpečnost je jedním ze základních požadavků, které jsou kladeny na poplachové zabezpečovací systémy. Její nedodržení nabízí případnému narušitelovi reálnou možnost usnadnění činnosti pří překonávání PZS. Základní pasivní opatření k zabezpečení EMC systému, by mělo být provedeno už samotnou vlastní konstrukcí – správné uložení vnitřních součástek, komponentů, vedení a dobře provedeného celkového stínění kovovým krytem apod. Mezi aktivní prostředky patří aplikace napájecích odrušovacích prostředků – filtrů, ať už aplikovaných přímo při výrobě do ústředen systémů, nebo dodatečně vložených mezi přívodem ze sítě a napájecími svorky. Způsobů a nástrojů, jak navrhovat konkrétní filtr, je uvedeno v práci hned několik. Vždy by měl každý návrh vycházet z požadavků na parametry filtru, jež jsou závislé na parametrech použitých zařízení a také ze znalostí a zkušeností konstruktéra. Avšak při každém návrhu, který je spojen s vlastní realizací, hraje značnou roli dostupnost specifických součástek na trhu, což nám do jisté míry svazuje ruce oproti výrobcům komerčních filtrů, kteří s dostupností většinou problémy nemají z důvodů určitých výhod při velkovýrobě.

Realizace prototypu filtru byla provedena v souladu provedeného návrhu. Laboratorní měření se týkalo ověření jmenovitých hodnot součástek aplikovaných do odrušovacího článku, v jež jsme si ověřili, zda se hodnoty součástek shodují s těmi uvedenými v katalogovém listu, popřípadě zda skutečné hodnoty jsou ve výrobní toleranci. Měření frekvenční charakteristiky nebylo provedeno z důvodů absence speciálních přístrojů, potřebných pro ověření celkového přenosu. Při případné aplikaci filtru do ústředny, měly by být vodiče co nejkratší pro maximální účinnost odrušení. Je nezbytné také uvést, že navržený a realizovaný filtr EMC, který je určen pro montáž do síťové napájecí části ústředny, nemusí zabezpečit elektromagnetickou kompatibilitu PZS jako celku. Zapotřebí je tedy v rámci komplexního zabezpečovacího systému posuzovat a popřípadě zajišťovat EMC jednotlivých komponentů zvlášť prostředky k nim přizpůsobenými.

ZÁVĚR V ANGLIČTINĚ

Electromagnetic compatibility as well as electrical safety is one of the basic requirements that are placed on security alarm systems. Its failure has a potential intruder real possibility of facilitating the work in overcoming the intruder alarm system. The basic passive measures to protect the EMC system should be done already by its very own design - right fit internal parts, components, management and overall well-made metal shielding cover, etc. Among the active agents include the application of power suppression devices - filters, whether applied directly during its production into panel systems or additionally inserted between the mains supply and power supply terminals. There are different methods and tools to design specific filter, and is shown in the work of several. There should always each proposal based on the requirements of the filter parameters, which depend on the parameters of the equipment and the knowledge and experience of the designer. However, each proposal that is associated with the implementation itself plays a significant role in the availability of specific components on the market. This fact does ties our hands against manufacturers of commercial filters. Due to certain advantages during manufacturing, they don´t have a problem with parts availability.

Implementation of a prototype filter made in accordance made proposal. Laboratory measurements concerned the verification of the nominal values of the components applied in EMC article, in which we tested whether the component values match those specified in the data sheet, or if the actual values are in manufacturing tolerance. Measurement of the frequency response has not been done due to lack of special equipment needed to verify the total transmission. In case of possible application of the filter to the control panel, wires should be as short as possible for maximum efficiency suppression. It is also necessary to note that designed and implemented EMC filter, which is designed for mounting to a wall power of the panel may not ensure electromagnetic compatibility intruder alarm system as a whole. What is needed within a comprehensive security system is to assess, and where appropriate, to ensure EMC individual components are specially adapted to them.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

[1] SVAČINA, Jiří. *Elektromagnetická kompatibilita: principy a poznámky*. Vyd. 1. Brno: Vysoké učení technické, 2001, 156 s. ISBN 8021418737.

[2] VACULÍKOVÁ, Polina a Emil VACULÍK. *Elektromagnetická kompatibilita elektrotechnických systémů: praktický průvodce techniky omezení elektromagnetického vf rušení*. 1. vyd. Praha: Grada, 1998, 487 s. ISBN 8071695688.

[3] KAŇUCH, Jan, KOVÁČ, Dobroslav, KOVÁČOVÁ Irena. *EMC z hlediska teorie a aplikace*. 1. vydání. Praha: BEN- technická literatura, 2006. 216 s. ISBN 80-7300-202-7.

[4] DŘÍNOVSKÝ, Jiří, T. FRÝZA, J. SVAČINA, Z. KEJÍK a V. RŮŽEK. *Encyklopedie elektromagnetické kompatibility* [online]. 2010 [cit. 2013-02-04]. Dostupné z: http://www.radio.feec.vutbr.cz/emc/index.php?src=home

[5] MYSLÍK, Jiří. Elektromagnetické pole- základy teorie. 1. vydání. Praha: BEN-technická literatura, 2002. 160 s. ISBN 80-86056-43-0.

[6] VLČEK, Jiří. *Bezpečnost elektrických zařízení: příručka pro konstruktéry*. 1. vyd. Praha: BEN - technická literatura, 2007, 109 s. ISBN 978-80-7300-222-0.

[7] HÁJEK, Karel a Jiří SEDLÁČEK. *Kmitočtové filtry*. 1. vyd. Praha: BEN - technická literatura, 2002, 535 s. ISBN 80-7300-023-7.

[8] Pandatron.cz - Elektrotechnický magazín. *FilterPro: Představení volně dostupného programu od společnosti Texas Instruments určeného pro návrh kmitočtových filtrů.* [online]. 2009 [cit. 2013-04-09]. Dostupné z: http://pandatron.cz/?600&filterpro

[9] AGILANT TECHNOLOGIES. *Genesys Key Features* [online]. 2013 [cit. 2013-04-09]. Dostupné z: http://www.home.agilent.com/agilent/editorial.jspx?cc=CZ&lc=eng&ckey=1664088&nid=-34275.0.08&id=1664088

[10] SUPERFILTER.NET. *Super Filter* [online]. 2005 [cit. 2013-04-09]. Dostupné z: http://www.superfilter.net/index.htm

[11] MICROCHIP TECHNOLOGY INC. *FilterLab Filter Design Software* [online]. 2012 [cit. 2013-04-09]. Dostupné z: http://www.microchip.com/stellent/idcplg?IdcService=SS_GET_PAGE&nodeId=1406&dDocName=en010007&redirects=filterlab

[12] LINEAR TECHNOLOGY CORPORATION. *Design Support - Software: FilterCAD* [online]. 2013 [cit. 2013-04-09]. Dostupné z: http://www.linear.com/designtools/software/#Filter

[13] *Aplikace pro Android ve službě Google Play: RF & Microwave Toolbox* [online]. 2012 [cit. 2013-03-26]. Dostupné z: https://play.google.com/store/apps/details?id=mwave.mcalculator&feature=more_from_developer

[14] CADWARE S.R.O. *Produkty: NI Multisim* [online]. 2006 [cit. 2013-04-09]. Dostupné z: http://www.cadware.cz/index.php?page=18&lang=cz

[15] ROBENEK, Jan. Hw.cz. *Bleskový návrh kmitočtových filtrů: FilterPro (TM)* [online]. 2009 [cit. 2013-03-26]. Dostupné z: http://www.hw.cz/teorie-a-praxe/bleskovy-navrh-kmitoctovych-filtru.html

[16] ČSN EN 50130-4 ed. 2 *Poplachové systémy. Část 4: Elektromagnetická kompatibilita - Norma skupiny výrobků: Požadavky na odolnost komponentů požárních systémů, poplachových zabezpečovacích a tísňových systémů a systémů CCTV, kontroly vstupu a přivolání pomoci*. Praha: ÚNMZ, 2012. 28 s. Třídící znak 334590.

[17] ČSN EN 60939-1 ed. 2. *Pasivní filtry pro elektromagnetické odrušení - Část 1: Kmenová specifikace*. Praha: ÚNMZ, 2011. Třídící znak 358281.

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

EMC	Electromagnetic Compatibility – elektromagnetická kompatibilita
EMS	Electromagnetic Susceptibility – elektromagnetická odolnost
EMI	Electromagnetic Interference – elektromagnetické rušení
DPS	Deska plošných spojů
EMP	Electromagnetic Pulse – elektromagnetické impulzy velké intenzity
LEMP	Lightning Electromagnetic Pulse – elektronický impulz blesku
NEMP	Nuclear Electromagnetic Pulse – impulz vyvolaný jaderným výbuchem
TEMPEST	Temporary Emanation and Spurious Transmission – úniky a nepravé přenosy
Z_S	Impedance sítě
Z_Z	Impedance zařízení
f_m	Mezní kmitočet
C	Kondenzátor
L	Cívka, tlumivka
X_C	Reaktance kondenzátoru
X_L	Reaktance cívky
EB	Elektrická bezpečnost
PZS	Poplachový zabezpečovací systém
Z_{vst}	Vstupní impedance
$Z_{výst}$	Výstupní impedance
Au	Napěťový přenos
DP	Dolní propust
HP	Horní propust
PP	Pásmová propust
PZ	Pásmová zádrž

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1: Základní členění EMC 11
Obr. 2: Klasifikace rušivých signálů [2], upravil Navrátil 2013 12
Obr. 3: Druhy elektromagnetických vazeb [3], upravil Navrátil 2013 16
Obr. 4: Deformace síťového napětí [1,2], upravil Navrátil 2013 19
Obr. 5: Rozdělení uzemnění podle druhů spojení 21
Obr. 6: Jednotlivé odrušovací prostředky 22
Obr. 7: Zapojení odrušovací tlumivky do vedení [3], ... 22
Obr. 8: Odrušovací tlumivka s proudovou kompenzací [4] 23
Obr. 9: Zapojení odrušovacího kondenzátoru 24
Obr. 10: Zapojení odrušovacího filtru [4], upravil Navrátil 2013 24
Obr. 11: Zapojení základního článku typu L 27
Obr. 12: Rizika spojená s provozem elektrických zařízení 28
Obr. 13: Procesní postup při návrhu filtru, upravil Navrátil 2013 [2] 30
Obr. 14: Základní články typu T a Π [4], upravil Navrátil 2013 31
Obr. 15: Graf pro výpočet vložného útlumu článku T a Π 32
Obr. 16: Aplikace 36
Obr. 17: SW NI Multisim 37
Obr. 27: Nesymetrický zkušební obvod 38
Obr. 28: Symetrický zkušební obvod 38
Obr. 19: Zapojení navrhovaného filtru EMC 45
Obr. 20: Požadovaný průběh útlumové charakteristiky 46
Obr. 21: Měření v SW Multisim 49
Obr. 22: Znázornění napěťového přenosu 49
Obr. 23: Náčrt rozložení součástek ve zvoleném boxu 52
Obr. 24: Celkový vzhled realizovaného filtru EMC 53
Obr. 25: Vnitřní provedení- horní pohled 53
Obr. 26: Vnitřní provedení- spodní pohled 53

SEZNAM TABULEK

Tab. 1: Dělení a popis jednotlivých filtrů 25
Tab. 2: Různé kombinace zapojení podle velikosti impedance sítě a zátěže 33
Tab. 3: Zapojení vybraných filtrů firmy Schaffner 39
Tab. 4: Srovnání vlastností vybraných programů [7, 9] 41
Tab. 5: Srovnání proudových odběrů ústředen vybraných výrobců 43
Tab. 6: Parametry sítě a napájecího zdroje 44
Tab. 7: Požadované parametry filtru 44
Tab. 8: Soupiska komponentů 48
Tab. 9: Impedanční poměry filtru 50
Tab. 10: Seznam použitých součástek 51
Tab. 11: Ověření hodnot filtru 54