



Fakulta elektrotechnická
Katedra aplikované elektroniky a telekomunikací

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Elektromagnetická kompatibilita DC/DC měničů

Autor práce: Jan Blažek
Vedoucí práce: Ing. Zdeněk Kubík

Plzeň 2012

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
Fakulta elektrotechnická
Akademický rok: 2011/2012

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Jan BLAŽEK**
Osobní číslo: **E09B0248P**
Studijní program: **B2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor: **Elektronika a telekomunikace**
Název tématu: **Elektromagnetická kompatibilita DC/DC měničů**
Zadávací katedra: **Katedra aplikované elektroniky a telekomunikací**

Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

1. Prostudujte základní konfigurace DC/DC měničů, jejich normalizaci z hlediska elektromagnetické kompatibility.
2. Popište používané topologie odrušovacích filtrů.
3. Pro předložené vzorky DC/DC měničů navrhnete desky plošných spojů, pro tyto dále navrhnete vhodné odrušovací filtry.
4. Proveďte měření na zhotovených přípravcích.
5. Zhodnoťte naměřené výsledky.


Rozsah grafických prací: **podle doporučení vedoucího**
Rozsah pracovní zprávy: **20 - 30 stran**
Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná/elektronická**
Seznam odborné literatury:

Student si vhodnou literaturu vyhledá v dostupných pramenech podle doporučení vedoucího práce.

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Zdeněk Kubík**
Katedra aplikované elektroniky a telekomunikací
Konzultant bakalářské práce: **Ing. Zdeněk Kubík**
Katedra aplikované elektroniky a telekomunikací
Datum zadání bakalářské práce: **17. října 2011**
Termín odevzdání bakalářské práce: **3. června 2012**


Doc. Ing. Jiří Hammerbauer, Ph.D.
děkan




Doc. Dr. Ing. Vjačeslav Georgiev
vedoucí katedry

V Plzni dne 17. října 2011

Anotace

Práce se zabývá vlivy elektromagnetického přizpůsobení spínaných stejnosměrných měničů napětí na velikost elektromagnetického rušení šířeného po vedení. Zaobírá se především možnostmi potlačí vzniklého rušení a předkládá přehled norem platných v této oblasti. Měření bylo prováděno pomocí tzv. "umělé sítě", kdy byly mezi zkoušený měnič a umělou napájecí síť vkládány různé odrušovací filtry. Naměřené výsledky jsou následně porovnány s mezemi stanovenými normou a zhodnocen účinek změn jednotlivých součástek ve filtru na produkované rušení.

Klíčová slova

Elektromagnetická kompatibilita, EMC, Stejnosměrné měniče, Odrušovací filtry

Abstract

Blažek, Jan. *Electromagnetic compatibility DC/DC converters* [*Elektromagnetická kompatibilita DC/DC měničů*]. Pilsen, 2012. Bachelor thesis (in Czech). University of West Bohemia. Faculty of Electrical Engineering. Department of Applied Electronics and Telecommunications. Supervisor: Zdeněk Kubík

The thesis deals with the effects of electromagnetic compatibility switched DC/DC voltage converters on the size of electromagnetic disturbances by conduit. It mainly deals with the possibilities arising suppress disturbance and provides an overview of standards applicable in this area. The measurements were performed using the so-called "artificial network" when they were inserted between the tested converter and the artificial network different suppression filters. The measured results are then compared with the limits set out standard and evaluated the effect of changes individual components in the filter by the produced disturbance.

Keywords

Electromagnetic compatibility, EMC, DC/DC converters, RFI filters

Prohlášení

Předkládám tímto k posouzení a obhajobě bakalářskou práci, zpracovanou na závěr studia na Fakultě elektrotechnické Západočeské univerzity v Plzni.

Prohlašuji, že jsem svou závěrečnou práci vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce. Jako autor uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této závěrečné práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení § 270 trestního zákona č. 40/2009 Sb.

Také prohlašuji, že veškerý software, použitý při řešení této bakalářské práce, je legální.

V Plzni dne 6. června 2012

Jan Blažek

.....

Podpis

Obsah

Seznam obrázků	vi
Seznam tabulek	vii
Seznam symbolů a zkratk	viii
1 Úvod	1
2 DC/DC měniče	2
2.1 Popis DC/DC měničů	2
2.2 Lineárně regulované měniče	2
2.3 Spínané měniče	3
2.3.1 Dělení spínaných měničů	4
2.3.2 Izolované měniče	4
2.3.3 Klady a zápory spínaných stejnosměrných měničů:	6
3 Elektromagnetická kompatibilita	7
3.1 Význam EMC	7
3.2 Elektromagnetické rušení	8
3.3 Zdroje rušení	8
3.4 Způsoby rušení	9
3.5 Normy a předpisy týkající se EMC DC/DC měničů	11
4 Odrušovací filtry	13
4.1 Odrušovací kondenzátory	13
4.2 Odrušovací tlumivky	15
4.3 Síťové odrušovací filtry	17
5 Měření navržených filtrů	18
5.1 Použité vybavení	18
5.1.1 DC/DC měniče	18
5.1.2 Odrušovací filtr	19
5.1.3 Měřicí přístroje	20
5.2 Naměřené hodnoty	21

5.2.1	Útlum filtru	21
5.2.2	Rušení přenášené po vedení	22
6	Závěr	25
	Reference, použitá literatura	26
	Přílohy	28
A	Desky plošných spojů	28
B	Grafy z naměřených hodnot	29

Seznam obrázků

2.1	Blokové schéma napěťového stabilizátoru se zpětnou vazbou	3
2.2	Blokové schéma galvanicky izolovaného DC/DC měniče	3
2.3	Tři způsoby galvanického oddělení	4
2.4	Dělení měničů podle vnitřního zapojení	5
3.1	Základní řetězec EMC	8
4.1	Zapojení samostatného odrušovacího kondenzátoru (a), na obr. (b) je znázorněno náhradní schéma reálného kondenzátoru a za (c) pak útlumová frekvenční char. ideálního (černá) a reálného kondenzátoru (červená). . . .	14
4.2	Zapojení samostatné odrušovací tlumivky (a), na obr. (b) je znázorněno náhradní schéma reálné tlumivky a za (c) pak útlumová frekvenční charakteristika ideální (černá), reálné s velkým (červená) a malým (zelená) činitelem jakosti Q	15
4.3	Schéma zapojení do obvodu a princip činnosti proudově kompenzované tlumivky.	17
5.1	Schéma filtru použitého pro měření	19
5.2	Umělá síť (a) a rozmístění měřících přístrojů během měření (b), kde je ZO zkoušený objekt, LISN umělá síť a MR měřič rušení	20
5.3	Blokové schéma měření nesymetrického útlumu filtru (a) a měření rušení pomocí umělé sítě (b)	20
5.4	Změřený útlum filtru1 (modře) a filtru6 (zeleně)	21
5.5	Kvazivrcholové (a) a střední (b) rušení změřené na měniči s výkonem 30 W	23
5.6	Kvazivrcholové (a) a střední (b) rušení změřené na měniči s výkonem 50 W	24
A.1	DPS v poloviční velikosti pro filtr a pro 50 W měnič, 30 W je shodný, jen má všechny vývody stejně široké	28
B.1	Srovnání útlumových charakteristik všech použitých filtrů	29
B.2	Střední rušení naměřené na měniči s výkonem 30 W, kde tlustá černá čára značí mez pro zařízení třídy A a přerušovaná pro třídu B	30
B.3	Střední rušení naměřené na měniči s výkonem 50 W, kde tlustá černá čára značí mez pro zařízení třídy A a přerušovaná pro třídu B	31

Seznam tabulek

3.1	Meze pro rušení šířené na síťových svorkách - zařízení třídy A	12
3.2	Meze pro rušení šířené na síťových svorkách - zařízení třídy B	12
4.1	Kapacity odrušovacích kondenzátorů doporučené podle frekvenčního pásma	14
4.2	Vhodné zapojení filtrů podle impedancí	17
5.1	Údaje poskytnuté výrobcem (Power-one) v katalogovém listu	18
5.2	Součástky použité při různých konfiguracích filtru	19
5.3	Jednotlivé konfigurace filtru	19

Seznam symbolů a zkratek

ČSN	Česká státní norma.
DC	Stejnoseměrný. (Direct current.)
DPS	Deska plošných spojů. (Printed circuit board.)
EMC	Elektromagnetická kompatibilita. (Electromagnetic Compatibility.)
EMI	Elektromagnetické rušení. (Electromagnetic interference.)
EHS	Evropské hospodářské společenství. (European Economic Community.)
FCC	Americký federální úřad pro telekomunikace. (Federal Communications Commission.)
IN	Vstup. (Input.)
L	Vložný útlum. (Insertion loss.) [<i>dB</i>]
LEMP	Elektromagnetický impuls od blesku. (Lightning Electromagnetic Pulse.)
LISN	Umělá zátěž vedení. (Line Impedance Stabilizing Network.)
NEMP	Elektromagnetický impuls od nukleárního výbuchu. (Nuclear Electromagnetic Pulse.)
OUT	Výstup. (Output.)
Q	Činitel jakosti. (Quality factor.) [–]

1

Úvod

S nástupem spínaných polovodičových prvků vznikají problémy spjaté, se zamořením okolního prostředí elektromagnetickým rušením. Ať už se jedná o rušení přenášené po vedení nebo zářením, způsobuje vždy problémy dalším zařízením. Schopnost systémů spolehlivě pracovat v reálném prostředí, ve kterém se nacházejí jiné zdroje rušení, a zároveň nevytvářet takové rušení, které by ohrozilo ostatní přístroje, zajišťuje obor EMC. Nejlepší je těmto potížím předcházet a omezovat velikost elektromagnetických emisí co nejbližší u zdroje.

Tato práce je zaměřená na výkonové spínací DC/DC konvertory, používané v různých oblastech elektrotechniky, a především na problematiku jejich elektromagnetického přizpůsobení. Cílem je navrhnout a prakticky změřit účinky změn různých součástí odrušovacího filtru na jeho schopnost potlačit rušení produkované DC/DC měničem. Pro účely měření byl zvolen filtr typu LC s proudově kompenzovanou tlumivkou, který je v této oblasti nejčastěji používán. Výhodou těchto filtrů je, že dokáží účinně potlačit vysokofrekvenční rušení a zároveň na nich vzniká jen minimální úbytek pro pracovní stejnosměrné či nízkofrekvenční napájení. Omezují rušení přicházející z obou stran a chrání tedy jak samotný přístroj, tak další zařízení připojená k síti.

2

DC/DC měniče

2.1 Popis DC/DC měničů

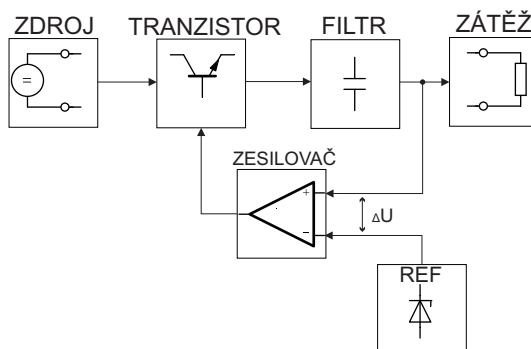
Stejnoseměrné měniče patří mezi zdroje, jež nacházejí uplatnění v mnoha oblastech. Konvertují stejnosměrné vstupní napětí na stejnosměrné výstupní o jiné velikosti (zvyšující, snižující měniče). Výrobci dodávají na trh širokou paletu měničů různých zapojení, výstupních výkonů a s lépe či hůře zvládnutou elektromagnetickou kompatibilitou. Podle konstrukce můžeme DC/DC měniče rozdělit do dvou základních skupin, se spojitou regulací (lineárně regulované) a spínané (impulsní).

2.2 Lineárně regulované měniče

Jedná se spíše o napěťové stabilizátory, než měniče, protože umějí napětí pouze snížit. Hodí se především tam, kde nepotřebujeme příliš velký rozdíl mezi vstupním a výstupním napětím, se vzrůstajícím rozdílem totiž prudce klesá jejich účinnost. Mezi hlavní výhody těchto zdrojů patří jednodušší obvodové zapojení, rychlá odezva na proudové změny a téměř žádné rušení.

Nejjednodušším způsobem, jak snížit stejnosměrné napětí, je použití odporového děliče. Spojitě regulované měniče v podstatě pracují na podobném principu (obr. 2.1). Pomocí tranzistoru se zde vytváří jakýsi zpětnovazebně regulovaný rezistor, na kterém vzniká (alespoň v pracovní oblasti by měl) konstantní úbytek napětí bez ohledu na zatěžovací proud. Možností jak vytvořit zpětnovazební regulaci existuje spousta, všechny využívají srovnání výstupního napětí s referenčním, které můžeme vytvořit třeba pomocí Zenerovy diody.

Z daného uspořádání vyplývá řada nevýhod (teplotní závislost, časová nestálost, nelinearita součástek, ...), které komplikují na první pohled jednoduché zapojení. Není také možné galvanicky oddělit vstup a výstup. Proto jsou v současnosti často nahrazovány spínanými měniči.

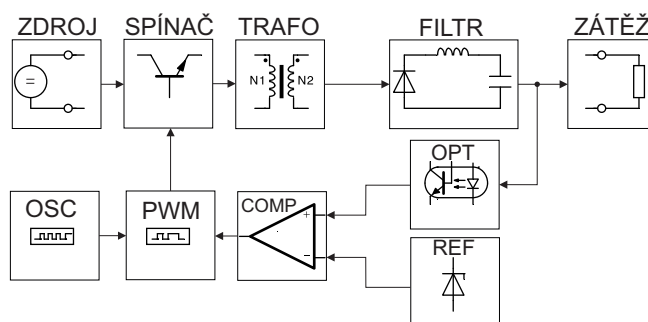


Obr. 2.1: Blokové schéma napětového stabilizátoru se zpětnou vazbou

2.3 Spínané měniče

Měniče, využívající spínacích prvků, jsou v poslední době na vzestupu. Dalo by se říci, že až některé speciální aplikace, pro které jsou lineárně regulované vhodnější, spínané zdroje doslova ovládli trh. Je to způsobeno hlavně jejich vysokou účinností, malými rozměry, a poměrně snadnou a přesnou regulací. Jsou také výhodné, při velkém rozdílu mezi vstupním a výstupní napětím. Jejich praktický návrh však s sebou přináší celou řadou obtíží.

Jak již bylo řečeno, ve srovnání se spojitě regulovanými vyhrávají hlavně díky vysoké účinnosti, která se pohybuje kolem 80 a někdy až 90 %. Tuto jejich vlastnost oceníme kupříkladu všude tam, kde máme omezenou zásobu energie, při napájení z baterií, akumulátorů a podobně, ale vzhledem k tomu, že ceny energií stále rostou, začíná se otázka účinnosti řešit i u zařízení připojených do sítě. Převážná většina dnes používaných spínaných měničů nižších výkonů (do desítek až max. několika set W) pracuje na frekvencích řádu stovek kHz a výše, díky tomu se dají mnohem lépe odfiltrout zbytky jejich nežádoucích střídavých složek. Se staršími typy, které používaly frekvenci 50 Hz nebo jen o málo větší, se již téměř nesetkáme. Tyto měniče nacházejí uplatnění pouze v nenáročných aplikacích, kde nám nevadí větší zvlnění výstupního napětí, nepříliš přesná regulace a horší stabilita, a kde je pro nás nejdůležitější nízká cena.



Obr. 2.2: Blokové schéma galvanicky izolovaného DC/DC měniče

Spínané měniče pracují na principu akumulace energie v indukčnostech nebo kapacitách. Oproti klasickým stabilizátorům jsme schopni s nimi vytvořit i napětí inverzní vůči zdroji. Výkonový stupeň, v podobě tranzistorů nebo tyristorů, je provozován impulsně,

tedy střídavě spínán a rozpínán. Můžeme tedy využívat pulsního režimu, ve kterém součástky vydrží krátkodobě mnohem větší výkon, než jaký by zvládly na trvalé zatížení. Měniče mohou mít i galvanicky izolovaný vstup od výstupu (obr. 2.2). Obvodové řešení spínaných měničů je podstatně složitější než u spojitě regulovaných. Jednotlivé součástky (tranzistory, tyristory, diody, ...) musejí spolehlivě pracovat na vysokých spínacích frekvencích. Řídící obvody jsou dnes většinou dělány v integrovaném provedení. Často bývají i celé měniče dodávány jako hotové stavební díly.

2.3.1 Dělení spínaných měničů

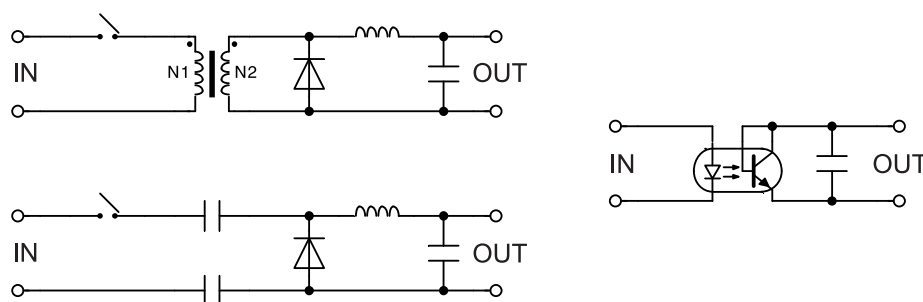
Spínané měniče můžeme rozdělit do několika kategorií podle, principu činnosti (na obr. 2.4 [3]) a výstupního výkonu.

Rozdělení podle výstupního výkonu:

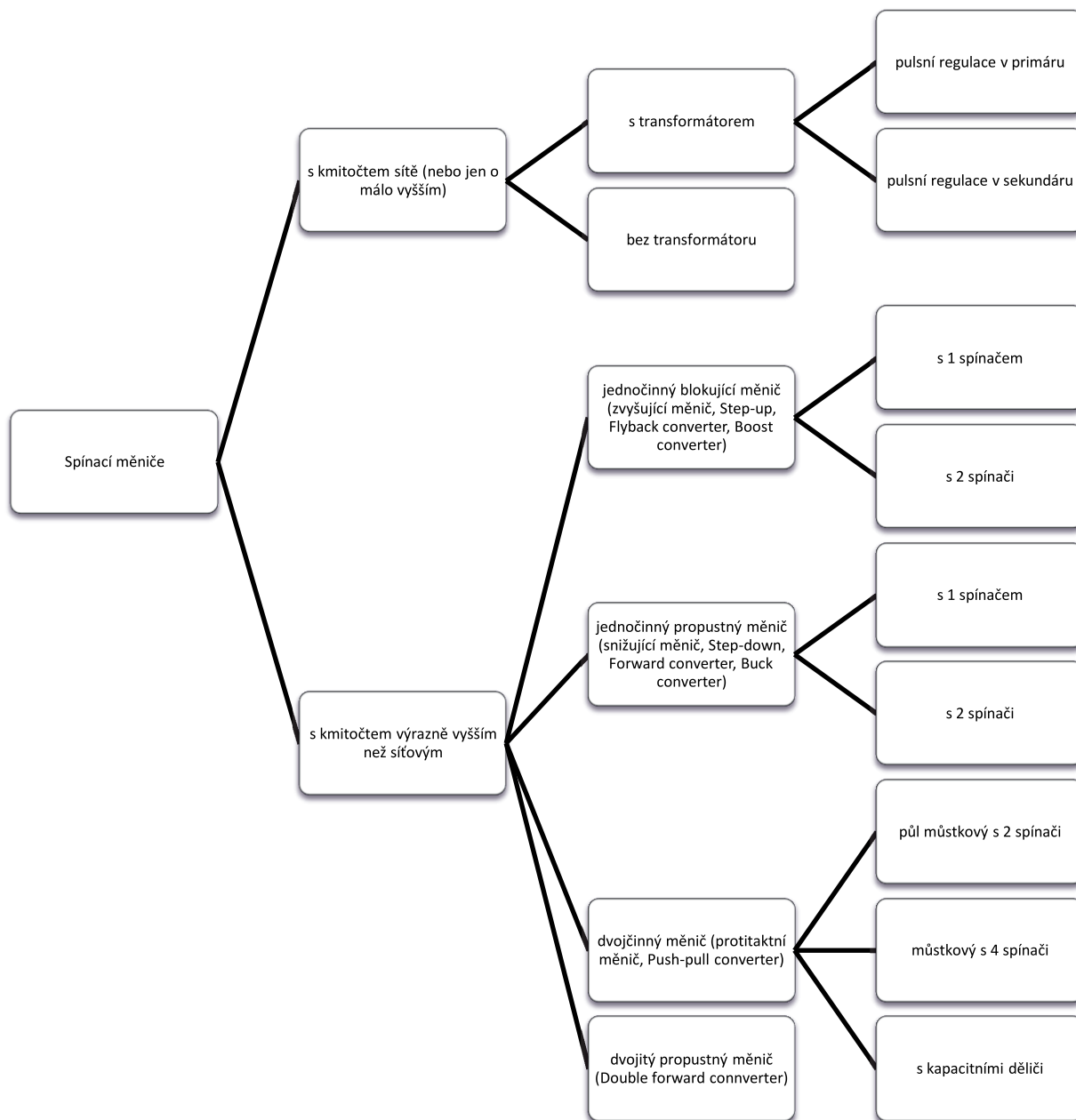
- Do 10 W – Jsou většinou integrovány na čip, který se osazuje na desku plošného spoje. Mají malé rozměry i hmotnost a není problém sehnat je i SMD provedení.
- Do 300 W – Konstruují se často jako samostatné přístrojové celky. Potřebují pasivní nebo aktivní chlazení a kvalitní odrušovací filtry.
- Nad 300 W – Vyrábějí se pouze jako samostatné přístroje. Většinou se neobejdou bez aktivního chlazení, potřebují rovněž velmi kvalitní filtry a elektromagnetické stínění.

2.3.2 Izolované měniče

Spínané měniče můžeme, na rozdíl od spojitě regulovaných, vyrobit i s galvanicky odděleným (izolovaným) vstupem a výstupem. Takovéto měniče pak dokáží chránit napájená zařízení nebo naopak napájecí síť před přepětovými špičkami až několik kV. Galvanického oddělení můžeme v zásadě dosáhnout třemi způsoby (obr. 2.3): oddělovacím transformátorem, pomocí kondenzátorů nebo optočlenu. U výkonových měničů se užívají výhradně transformátory, kondenzátory jsou vhodné jen pro menší proudy (mA) a optočlenu používají některé zpětnovazební obvody.



Obr. 2.3: Tři způsoby galvanického oddělení



Obr. 2.4: Dělení měničů podle vnitřního zapojení

2.3.3 Klady a zápory spínaných stejnosměrných měničů:

Výhody:

- **Vysoká energetická účinnost** – I ty nejlevnější měniče většinou dosahují účinnosti přes 60 % a u kvalitních se pohybuje kolem 80 až 90 %.
- **Velký výstupní výkon** – Velikost výstupního výkonu, kterou můžeme dosáhnout, je přímo závislá na účinnosti. U klasických stabilizátorů jsme limitováni maximálním stálým ztrátovým výkonem (Jouleovy ztráty), který mohou součástky vyzářit do prostoru, aniž by jejich teplota dále stoupala. Pokud bychom tedy chtěli zvýšit výkon, museli bychom zajistit dodatečné chlazení, což celé zařízení dále prodražuje a nelze provádět donekonečna. Značné problémy nastávají už v oblasti desítek W. Se spínanými součástkami naopak není problém vytvořit měniče s výkony stovek W, jelikož moderní spínací prvky mají v sepnutém stavu jen velmi malý odpor, z čehož vyplývá malý výkonový úbytek (vzhledem ke spínanému).
- **Velká proudová zatížitelnost** – Možnost dosažení proudů řádu desítek až stovek A.
- **Malé rozměry a hmotnost** – Výhodné především pro přenosná zařízení.
- **Spousta různých konfigurací** – Snižující měniče, zvyšující měniče, inventory vstupní polarity napětí nebo současná stabilizace několika výstupních hladin napětí.

Nevýhody:

- **Zvlnění výstupního napětí** – Díky impulsnímu charakteru měniče, nikdy nejsme schopni zcela odstranit zvlnění výstupního napětí. Můžeme se jen snažit o potlačení pod úroveň, která už pro nás bude snesitelná a nebude ovlivňovat další zařízení. Velikost zvlnění je závislá na střídě (poměru doby sepnutí a rozepnutí), frekvenci spínání a kvalitě použitých akumulčních prvků.
- **Dynamické parametry** – Dynamické parametry, především odezva na rychlou změnu výstupního proudu, jsou také horší než u klasických stabilizátorů. Je to způsobeno hned několika faktory: v principu nespojitou regulací, zpožděním vyplývajícím z použití akumulčních prvků a nelineární regulací v mezních oblastech. Tato nevýhoda se však daří zlepšovat nasazováním měničů s vyšší spínací frekvencí.
- **Frekvenční rušení** – Největší problém je v současné době s kmitočtovým odrušením spínaných měničů. Musíme pečlivě odstínit samotné spínací prvky i celý měnič, aby nedocházelo k rušení okolních telekomunikačních zařízení. Dále musíme použít vstupní a výstupní filtry, abychom nerušili další zařízení připojená do sítě ani zařízení napájená měničem. Návrh a realizace správných filtrů není jednoduchá ani levná záležitost.

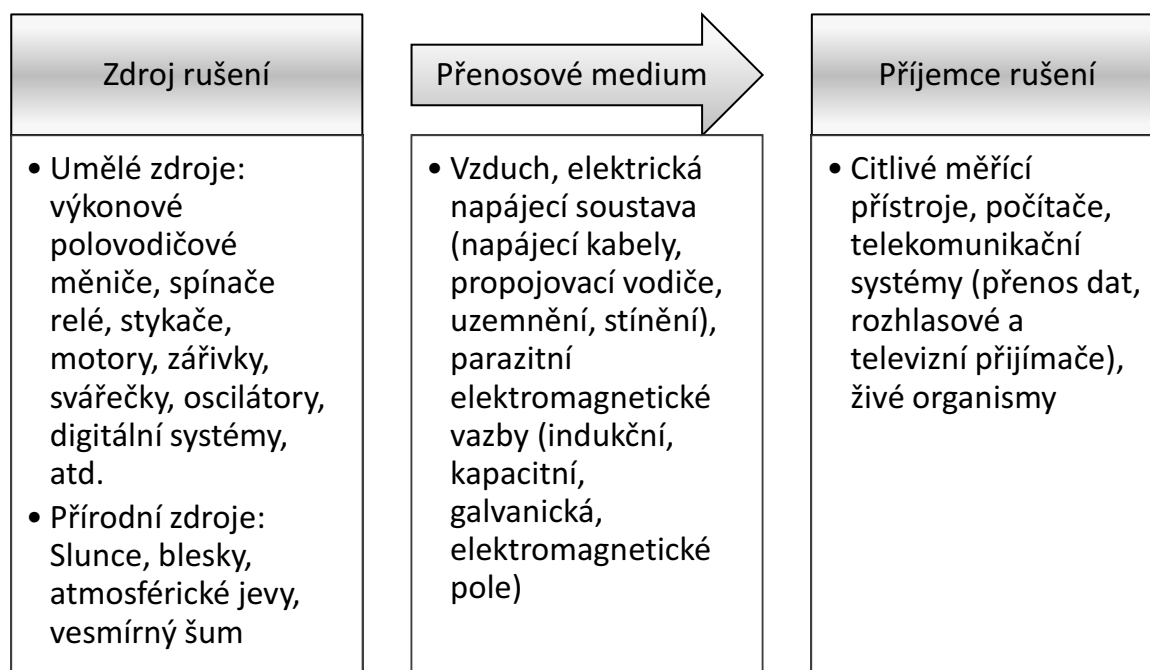
3

Elektromagnetická kompatibilita

3.1 Význam EMC

Pojem "elektromagnetická kompatibilita" neboli zkráceně EMC (z anglického Electromagnetic Compatibility) je relativně mladý vědní obor, který zkoumá vzájemné působení různých systémů a snaží se je optimalizovat. Samostatný obor se z této problematiky vytvořil v 60. letech v USA. Do té doby byla elektromagnetická slučitelnost řešena v každém odvětví jinak. Jakékoli zařízení, po kterém chceme, aby správně a spolehlivě fungovalo v reálném provozu, musí být elektromagneticky kompatibilní s okolním prostředím, v němž bude provozováno. EMC se zabývá také vlivy elektrických a magnetických polí na živé organismy. I když v současné době víme, že tato pole na živé organismy vliv mají, je tato oblast ještě dosti neprobádaná. Především o dlouhodobých účincích nízko úrovněových polí neexistuje zatím příliš mnoho relevantních studií.

V roce 1979 vydal americký Federální úřad pro telekomunikace FCC (Federal Communications Commission) první nařízení týkající se komplexně EMC. Nastavil tak první právní limity v oblasti vyzařování elektromagnetických emisí. Nařízení přišlo jako reakce, na velký boom nastupující digitální techniky v té době. Pokroky v integrovaných obvodech, které pracují stále s menšími výkonovými úrovněmi a jsou tedy náchylné na rušení, a zároveň pokroky ve vývoji výkonových spínacích prvků, které jsou jedním ze zdrojů rušení, vedly k nutnosti stanovit způsoby měření EMC a přípustné limity rušení. Šlo o průlomový krok, protože výrobci, kteří nesplnili tyto normy, nemohli uvádět své výrobky na trh. V Evropě se objevil první pokus o sjednocení národních norem v roce 1989 vydáním směrnice Rady EHS č. 89/336/EEC "O sbližování zákonů členských států týkající se elektromagnetické kompatibility". Tato směrnice podobně jako nařízení FCC nastavila limity elektromagnetických emisí. Po té následovaly další normy či předpisy a výrobci se museli problematikou EMC začít více zabývat. [1]



Obr. 3.1: Základní řetězec EMC

3.2 Elektromagnetické rušení

Zkráceně EMI (z anglického Electromagnetic interference) je obecně nežádoucí jev ovlivňující chování elektrických či elektrotechnických zařízení vyzářením elektromagnetické energie ve frekvenčním spektru od 0 Hz do desítek GHz. Rušení zamožuje některé části frekvenčního spektra, používaného např. v telekomunikačních přenosech. Má ale i negativní účinky na životní prostředí, a proto není už jen technickým ale i ekologickým problémem.

V oblasti EMI se zabýváme příčinami a následky rušení a zároveň možnostmi jeho omezení. Zaměřujeme se na zdroje, přenosové cesty a příjemce rušení (viz základní řetězec působení EMC obr. 3.1 [1]). Přitom každá část zařízení či systému může být zároveň zdrojem (vysílačem) i příjemcem rušení. EMI dělíme na vnější, které není produktem samotného zařízení a jehož původce většinou nejsme schopni přesně určit, vnitřní, způsobené přímo zařízením, a vzájemné, působící navzájem mezi několika známými zařízeními.

3.3 Zdroje rušení

Zdrojem elektromagnetického rušení je každé elektrické či elektrotechnické zařízení, jelikož nelze postavit ideální přístroj, který by žádné rušení neprodukoval. Počet zařízení způsobujících rušení v současné době stále roste. Mezi nejvýznamnější nadále patří především průmyslové zdroje, které ovlivňují tvar síťového napětí. Obzvláště nebezpečné je, pokud se takto vytvořené rušení dostane k transformační stanici, kde se díky nelineární magnetizační charakteristice vytvářejí vyšší harmonické.

Zdrojů elektromagnetického rušení existuje mnoho a s rozvojem polovodičových spínacích prvků se jejich počet stále zvyšuje. Polovodičové prvky se v současnosti používají v oblastech, kde to dříve bylo nemyslitelné. Dokážeme pomocí nich velmi rychle spínat i proudy v řádu kA, to za použití mechanických spínacích prvků nebylo možné. Na jednu stranu je to výhoda, jelikož nám umožňují plynulejší řízení, ovšem vzniká tím velký problém v podobě rušení. Taková zařízení mohou potom rušit nejen jiné přístroje připojené do sítě, ale i telekomunikační kanály nebo sama sebe.

3.4 Způsoby rušení

Rušivé signály můžeme dělit podle nejrůznějších kritérií, např. podle tvaru, způsobu šíření, účinků na užitečný signál apod. Zde jsou uvedeny některé způsoby jejich dělení.

Rozdělení podle toho, jak působí na rušený objekt:

- **Symetrické rušení** – Někdy také označované jako sériové nebo protifázové, působí mezi jednotlivými vodiči vedení a superponuje se (sčítá nebo odčítá) přímo na užitečné napětí či proud přenášený vedením. Díky tomu je velmi složité jej odstranit. V případě, že užitečný signál pracuje na stejném kmitočtu jako přicházející rušení, tak je to dokonce zcela nemožné. Jedinou možností jak, tato rušení omezit je, oddělení užitečného signálu pomocí pásmových propustí od zbytku frekvenčního spektra. Zdroje symetrického rušení jsou zpravidla zařízení či přístroje připojené přímo k vedení (napájecí síti).
- **Nesymentrické rušení** – Někdy též souhlasné či soufázové, projevují se mezi vodiči vedení a společnou zemí nebo kostrou. Toto rušení má ve všech vodičích vedení (kromě zemnicího) stejný směr a v případě symetrického napájení se tedy k jednomu vodiči přičítá a od druhého se odčítá, následně se pak uzavírá přes zemní vodič. Většinou jej způsobují vnější zdroje rušení. Jeho odstranění je snazší než u symetrického, často postačuje zapojení odrušovacích kondenzátorů proti zemi či přidání proudově kompenzované tlumivky před vstup přístroje.

Rozdělení podle tvaru a doby trvání rušivého signálu:

- **Impulsy** – Skokové změny impulsního charakteru, kdy délka pulsu je mnohem menší než jeho amplituda. Nastávají tzv. napěťové špičky s kladnou nebo zápornou polaritou. Tento druh rušení způsobují převážně spínací prvky (tranzistory, tyristory, relé, stykače, ...).
- **Přechodné děje** – Náhodné jednorázové děje vznikající zpravidla po připojení nebo odpojení zátěže s velkým kapacitním či induktivním charakterem. Většinou odezní

po několika sekundách. Vyvolává je např. zapínání a vypínání spotřebičů s velkým odběrem.

- Šum – Změny převážně periodického charakteru, které se svým účinkem projevují hlavně na tvaru křivky napětí. Jeho typické zdroje jsou motory.

Toto rozdělení je spíše teoretické, v praxi se setkáváme s různými kombinacemi všech těchto tří druhů rušení a není tak jednoduché jej přesně zařadit.

Dále můžeme druhy rušení rozdělit podle oblasti frekvenčního spektra, do níž zasahují:

- **Nízkofrekvenční** – Objevuje se přibližně v pásmu 0 až 10 kHz a ovlivňuje jak elektrizační soustavu, tzv. "energetické rušení", tak přenosové informační systémy, tzv. "akustické rušení". Energetické rušení působí na tvar síťového napájecího napětí zkreslujícími a deformačními účinky, což může mít vliv na všechna zařízení připojená do stejné části sítě. Akustické rušení se dříve negativně projevovalo na telefonní, rozhlasové a televizní přenosy, i když přímo nezasahuje do nosné přenášeného signálu. Dnešní digitální technika už je ale vůči němu odolnější.
- **Vysokofrekvenční** – V pásmu zhruba od 10 kHz do stovek GHz, někdy také označované jako rádiové rušení, působí přímo na nosné kmitočty používané v radiotelekomunikačních přenosech.

Pro snadnější orientaci je ovšem lepší rozdělit si rušivé signály podle způsobu vzniku a šíření do těchto skupin:

- **Rušení působící v rozvodné napájecí síti** – Většinou se uvažuje frekvenční rozsah 0 až 30MHz, protože vyšší kmitočty už se po vedení špatně šíří a patří spíše do rádiové oblasti. Spadají sem všechny přístroje a zařízení připojená do rozvodné sítě, které produkují vyšší harmonické základního kmitočtu sítě (50 Hz). Tato zařízení způsobují napěťové úbytky na impedancích vedení, které se následně projevují rušivě. Mezi další typické zdroje rušení do sítě patří: mechanické spínací či rozpínací prvky, impulsně řízené měniče s polovodičovými součástkami, aj.).
- **Rušení radiotelekomunikačních přenosů** – Podle radiotelekomunikačního řádu sem patří veškeré rušení přenášené vzdušným prostředím ve frekvenčním pásmu 9 kHz až 400 GHz.
- **Lokální elektrostatické výboje** – Mají jen nízkou energii, ale velkou amplitudu napětí. Představuje nebezpečí především pro integrované obvody typu CMOS.

- **Atmosférické výboje** – Blesky způsobují strmé elektromagnetické pulsy (LEMP), které mohou působit destruktivně na blízko se nacházející přístroje a rušivě na ty vzdálenější.
- **NEMP** – Nukleární elektromagnetický impuls, vznikající při výbuchu nukleárních bomb nebo silných erupcích na Slunci (díky velké vzdálenosti a magnetickému poli Země nejsou tak nebezpečné), je charakteristický strmou náběžnou hranou a extrémně velkou amplitudou. Má devastující účinky na všechna elektronická zařízení, s výjimkou některých, převážně vojenských, která jsou zkonstruována, aby NEMP odolala.

3.5 Normy a předpisy týkající se EMC DC/DC měničů

Norma:	ČSN EN 55022 ed.2
Název:	Zařízení informační techniky - Charakteristiky vysokofrekvenčního rušení - Meze a metody měření
Třídící znak:	33 4290
Obor:	33 - ELEKTROTECHNIKA - ELEKTROTECHNICKÉ PŘEDPISY 3342 - Ochrana radiového příjmu před rušením
Vydána:	04/2007
Platnost od:	01.10.2009
Platnost do:	01.12.2013

Norma se zabývá vysokofrekvenčním rušením v pásmu 9 kHz až 400 GHz šířeném jak po vedení, tak zářením. Od 1.12.2013 bude nahrazena normou ČSN EN 55022 ed.3 (Vydána: 11/2011), která v současné době platí souběžně. Stanovuje limity pro některé oblasti kmitočtového spektra s ohledem na ochranu rozhlasového vysílání, telekomunikačních služeb a jiných zařízení pracujících v blízkosti zdroje rušení. Norma dělí přístroje do dvou skupin [12]:

- **Třída B** – Do této třídy patří přístroje určené pro domácí použití, kde se předpokládá užívání rozhlasových a televizních přijímačů ve vzdálenosti do 10 m od tohoto přístroje. Tato třída zahrnuje např.:
 - zařízení bez pevného místa použití, přenosná napájená z vestavěných baterií,
 - telekomunikační koncová zařízení napájená z telekomunikační sítě,
 - osobní počítače a připojená pomocná zařízení.
- **Třída A** – Zahrnuje všechny ostatní přístroje, které nespádají do třídy B.

Druhy rušení dále dělí do následujících skupin:

- Rušení přenášené po vedení na:
 - síťových svorkách,
 - telekomunikačních vstupech/výstupech,
- Rušení šířené zářením

Oblast rušení šířeného po vedení určuje limity v kmitočtovém pásmu 150 kHz až 30 MHz. Pro rušení šířené zářením jsou stanoveny emisní meze v rozsahu od 30 MHz do 1 GHz měřené ve vzdálenosti 10 m. V tab. 3.1 a tab. 3.2 [12] jsou uvedeny meze potřebné pro vyhodnocení naměřených hodnot.

Kmitočtový rozsah [MHz]	Meze [dB μ V]	
	Kvazivrcholové	Střední
0,15 až 0,5	79	66
0,5 až 30	73	60
POZNÁMKA Pro kmitočty rozhraní platí nižší mez.		

Tab. 3.1: Meze pro rušení šířené na síťových svorkách - zařízení třídy A

Kmitočtový rozsah [MHz]	Meze [dB μ V]	
	Kvazivrcholové	Střední
0,15 až 0,5	66 až 56	56 až 46
0,5 až 5	56	46
5 až 30	60	50
POZNÁMKA Pro kmitočty rozhraní platí nižší mez.		
POZNÁMKA V pásmu 0,15 MHz až 0,5 MHz klesá mez lineárně s logaritmem kmitočtu.		

Tab. 3.2: Meze pro rušení šířené na síťových svorkách - zařízení třídy B

4

Odrušovací filtry

Jestliže chceme dosáhnout co nejlepší EMC zařízení a systémů, je bezpodmínečně nutné použití odrušovacích filtrů. Správně navržený a zkonstruovaný filtr výrazně optimalizuje EMC, ale při nekvalifikované aplikaci se může úroveň rušení naopak zvýšit a v krajních případech dokonce zařízení úplně vyřadit z provozu. Při navrhování filtru není důležitá jen kvalita samotného filtru, ale i jeho umístění. Filtr bychom měli zařazovat co nejbližší ke zdroji rušení, nebo pokud se jedná o příjemce rušení, tak co nejbližší vstupním svorkám. Často se stává, že rušivý signál přichází k příjemci na stejném kmitočtu jako užitečný, pak jediným způsobem odstranění je nalézt zdroj rušení a umístit filtr přímo za něj. Naopak pokud je rušivý signál zároveň signálem užitečným pro jiná zařízení, je jedinou možností zařazení filtru před vstup přístroje. V ostatních případech je vhodné odstraňovat rušení ve všech částech základního řetězce EMC (u zdroje, přenosového média i příjemce). Odrušovacích prostředků existuje spousta a každý má svá specifika. Mezi nejpoužívanější patří:

- Odrušovací kondenzátory
- Odrušovací tlumivky a proudem kompenzované tlumivky
- Odrušovací LC filtry
- Elektrické a magnetické stínění
- Přepěťové ochranné prvky

4.1 Odrušovací kondenzátory

Mohou být použity samostatně (schéma zapojení na obr.4.1 (a)) nebo jako součást LC filtrů. Samostatný kondenzátor je účinný pouze ve vysokoimpedančních systémech, kdy je impedance zdroje rušení (napájecí sítě) a impedance zátěže mnohem větší než impedance kondenzátoru. To vyplývá ze vztahu pro výpočet vloženého útlumu [10]:

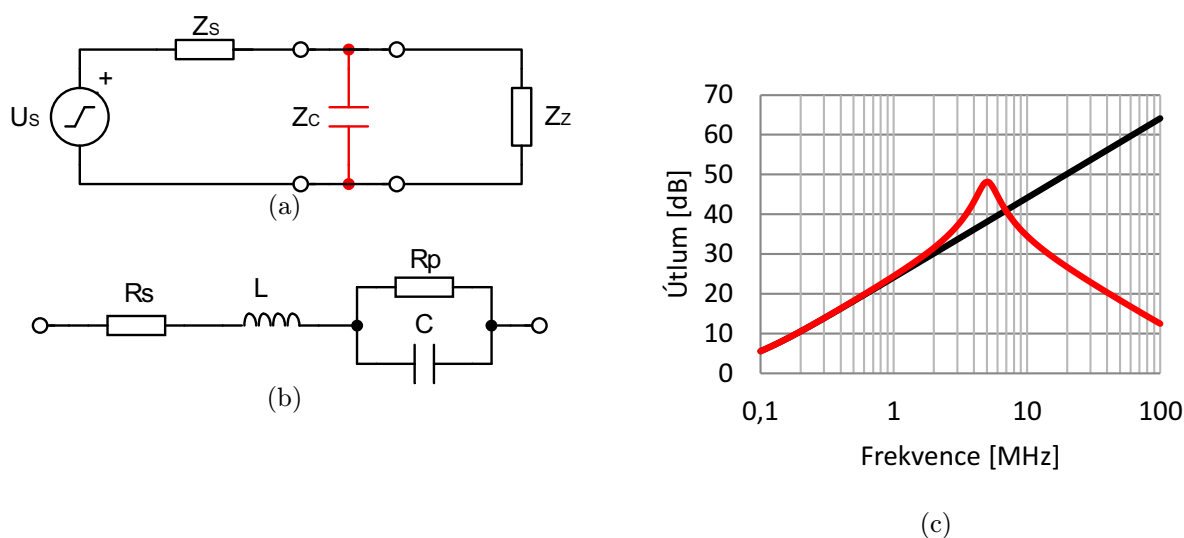
$$L = 20 \cdot \log \left| \frac{U_{20}}{U_2} \right| = 20 \cdot \log \left| 1 + j\omega C \cdot \frac{Z_Z \cdot Z_S}{Z_Z + Z_S} \right| \quad [dB], \quad (4.1)$$

kde U_{20} je napětí na zátěži bez použití kondenzátoru a U_2 stejné napětí s kondenzátorem.

Na odrušovací vlastnosti kondenzátorů mají zásadní vliv jejich parazitní parametry, nejdůležitější jsou parazitní indukčnost vývodů a svodový odpor. Indukčnost vývodů vytváří spolu s vlastní kapacitou rezonanční obvod. Velikost parazitní indukčnosti se u běžných kondenzátorů pohybuje řádu jednotek až desítek nH. Na obr. 4.1 (c) je vidět rozdíl mezi kmitočtovou charakteristikou ideálního kondenzátoru a reálného, při respektování vlastní parazitní indukčnosti a svodového odporu. Jeho útlum stoupá až do rezonančního kmitočtu, pak převládne induktivní charakter a začne klesat. Chceme tedy, aby rezonanční frekvence byla co nejvyšší, pokud možno až za hranicí nejvyššího signálu, který potřebujeme odfiltrovat. Umožňuje-li to konstrukce, dáváme přednost koaxiálním průchodkovým kondenzátorům, před axiálními, jelikož mají kratší vývody. Nejlepším řešením je však v tomto ohledu použití SMD součástek. Kapacitu odrušovacího kondenzátoru vybíráme podle frekvenčního pásma, které chceme odfiltrovat. Orientační hodnoty jsou v tab. 4.1. [1]

Chráněné kmitočtové pásmo	Doporučené hodnoty odrušovacích kondenzátorů
10 kHz až 0,5 MHz	5 až 0,5 μF
0,5 MHz až 6 MHz	0,5 až 0,1 μF
6 MHz až 30 MHz	100 až 1 nF
nad 30 MHz	méně než 1 nF

Tab. 4.1: Kapacity odrušovacích kondenzátorů doporučené podle frekvenčního pásma

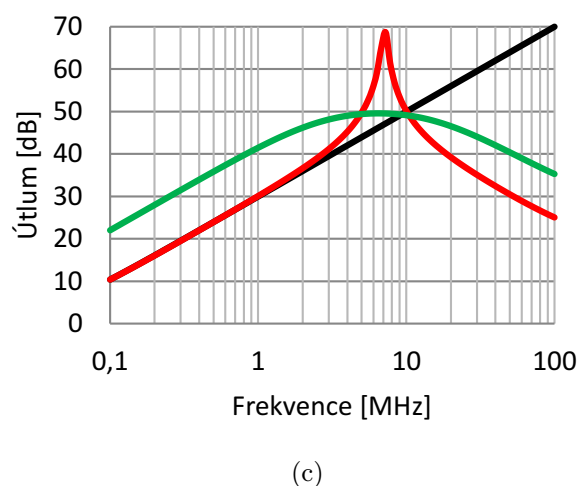
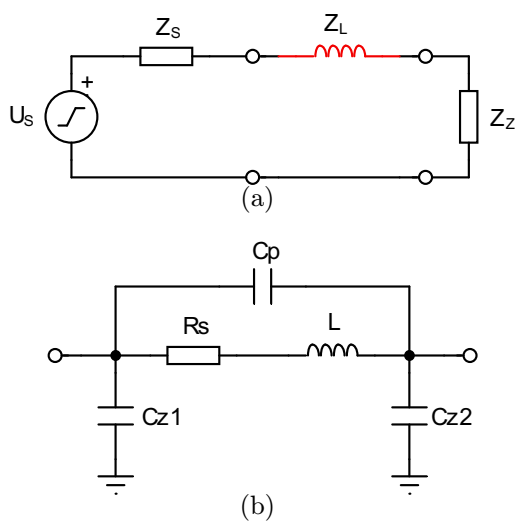


Obr. 4.1: Zapojení samostatného odrušovacího kondenzátoru (a), na obr. (b) je znázorněno náhradní schéma reálného kondenzátoru a za (c) pak útlumová frekvenční char. ideálního (černá) a reálného kondenzátoru (červená).

V nejčastějším případě, širokopásmového rušení, je výhodnější spojit několik menších kondenzátorů paralelně, než použít jeden velký. K odrušování se používají speciální řady kondenzátorů, které mají redukovanou kmitočtovou závislost dielektrika a jsou stavěny na vyšší průrazná napětí. Větší průrazné napětí je velmi důležité, protože v případě průrazu v podstatě zkratují síťové napětí k zemi či kostře. Aby nedošlo k ohrožení zdraví, užívá se pro tyto účely výhradně řada Y (tzv. bezpečnostní kondenzátory). Jinak se pro běžné odrušování používá řada X, které se dále dělí na X1 (v případě nebezpečí přepětových špiček větších než 1.2 kV) a X2 (nejlevnější varianta). [10]

4.2 Odrušovací tlumivky

Tlumivky se stejně jako kondenzátory mohou používat buď samostatně, nebo jako součást LC filtrů. Patří mezi nejnákladnější součástky užívané v odrušovací technice. Jejich rozměry a hmotnost také nejsou zanedbatelné, i přesto jsou však nedílnou součástí každého kvalitního odrušovacího filtru. V současné době je na trhu celkem velký výběr nejrůznějších tlumivek, ale občas je nutné, zvláště u větších výkonů, nechat ji vyrobit na zakázku. Správně navrhnout a vyrobit tlumivku nemusí být vždy tak jednoduché, jak se může na první pohled zdát. Odrušovací tlumivky zapojujeme do proudových obvodů zařízení, a jejich rozměry jsou tak dány maximálním možným protékajícím proudem.



Obr. 4.2: Zapojení samostatné odrušovací tlumivky (a), na obr. (b) je znázorněno náhradní schéma reálné tlumivky a za (c) pak útlumová frekvenční charakteristika ideální (černá), reálné s velkým (červená) a malým (zelená) činitelem jakosti Q .

Samostatně použitá tlumivka je účinná jen v nízkoimpedančních systémech, kde platí, že impedance zdroje rušení (napájecí sítě) a vnitřní impedance příjemce rušení, je mnohem menší než impedance tlumivky. Zapojujeme jí vždy do série mezi zdroj a přijímač rušení a pro velikost jejího vloženého útlumu pak platí vztah [10]:

$$L = 20 \cdot \log \left| \frac{U_{20}}{U_2} \right| = 20 \cdot \log \left| 1 + \frac{j\omega L}{Z_Z + Z_S} \right| \quad [dB], \quad (4.2)$$

kde U_{20} je napětí na zátěži bez použití tlumivky a U_2 stejné napětí s tlumivkou. Vložný útlum se někdy také značí IL (z anglického Insertion loss).

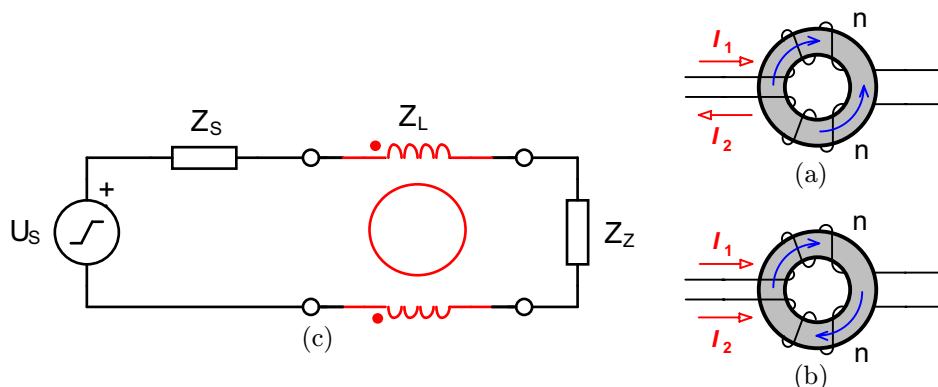
Rozhodující význam na odrušovací schopnosti tlumivek mají opět jejich parazitní parametry. Kromě indukčnosti, která je žádoucí, vykazuje každá tlumivka také odpor vinutí, mezizávitovou parazitní kapacitu, kapacitu proti jádru a někdy i proti zemi. Všechny tyto parametry způsobují, že se reálná tlumivka, chová jako sérioparalelní rezonanční obvod.

Na rozdíl od běžně užívaných tlumivek, u kterých většinou požadujeme co nejlepší činitel jakosti, mají tlumivky, používané jako odrušovací, činitel jakosti $Q < 1$. Na obr. 4.2 (c) je srovnání mezi tlumivkou ideální, reálnou s velkým a malým Q , ze kterého je dobře vidět, že tlumivky s malým Q lépe filtrují širokopásmové frekvenční rušení a jejich útlum prudce neklesá ani za rezonančním kmitočtem. Odrušovací tlumivka by tedy měla splňovat:

- Co největší indukčnost, při konstrukčně snesitelných rozměrech, hmotnosti, počtu závitů a ceně
- Nízký činitel jakosti $Q < 1$
- Vysoko posazený rezonanční kmitočet
- Malý úbytek napětí při jmenovitém proudu

Podle konstrukce dělíme odrušovací tlumivky do dvou skupin:

- Tlumivky pro potlačení nesymetrické složky rušení, ty se svým tvarem a způsobem vinutí neliší od běžně užívaných v jiných oblastech elektrotechniky. Zapojují se sériově mezi zdroj přijímač rušení (obr. 4.2 (a)) a jejich nevýhody jsou: poměrně malá dosažitelná indukčnost (při větších proudech) a činitel jakosti $Q \gg 1$.
- Tlumivky pro potlačení symetrické složky rušení, které jsou téměř výhradně vyráběny pro účely odrušování. Jsou většinou známy pod názvem "proudově kompenzovaná tlumivka" nebo "tlumivka s proudovou kompenzací". Tlumivka využívá jednoho společného jádra, na kterém jsou navinuta dvě vinutí ve stejném směru. Připojuje se sériově (každé vinutí samostatně) mezi obě svorky zdroje a příjemce rušení (obr. 4.3 (c)). Princip fungování je takový, že při průchodu symetrického rušení se v jádře sčítají magnetické toky od obou vinutí (obr. 4.3 (a)) a tlumivka se tak jeví jako by měla dvojnásobnou indukčnost. Naopak pro nesymetrické proudy se magnetické toky odčítají (obr. 4.3 (b)), výsledná indukčnost tlumivky je téměř nulová a dochází tedy jen k minimálnímu úbytku napětí v pracovní oblasti.



Obr. 4.3: Schéma zapojení do obvodu a princip činnosti proudově kompenzované tlumivky.

4.3 Síťové odrušovací filtry

Jsou tvořeny různými kombinacemi LC prvků (základní jsou v tab. 4.2 [1]). Zapojují se mezi napájecí energetickou síť a napájené zařízení či systémy. Zajišťují lepší EMC tím, že chrání jak samotná zařízení před rušením ze sítě, tak síť, potažmo ostatní přístroje připojené do stejné části sítě, před rušením napájených zařízení.

Rozdělení základních topologií LC filtrů podle vhodnosti použití:

Impedance sítě (Z_s)	Zapojení filtru	Impedance zátěže (Z_Z)
nízká		nízká
vysoká		vysoká
nízká		vysoká
vysoká		nízká
neznámá, asi vysoká		neznámá, asi vysoká
neznámá, asi nízká		neznámá, asi nízká

Tab. 4.2: Vhodné zapojení filtrů podle impedancí

5

Měření navržených filtrů

Účelem měření bylo vyhodnocení vlivu různých parametrických změn, prováděných na odrušovacím filtru, na velikost rušení do napájecí sítě, produkovaného DC/DC měničem. Měření bylo prováděno podle normy ČSN EN 55022 ed.2 uvedené v kapitole 3.5. Pro účely měření byla navržena a vyrobena univerzální deska plošných spojů (viz příloha A.1 (a)), do které je možné zasadit několik druhů odrušovacích tlumivek a kondenzátorů, dále pak dvě desky pro použité měniče (příloha A.1 (b)). Desky pro odrušovací filtr a měniče jsou udělány samostatně a opatřeny svorkami, aby bylo během měření možné snadno ověřit účinky stejného filtru na dva různé měniče.

5.1 Použité vybavení

5.1.1 DC/DC měniče

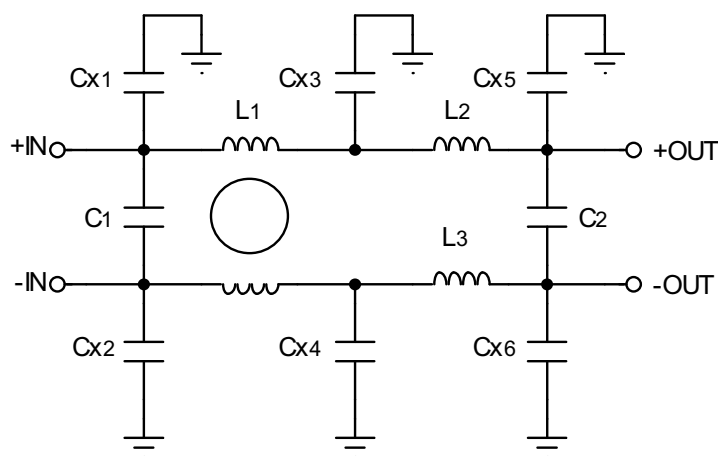
K měření jsme použili izolované spínané měniče od výrobce "Power-one", konkrétně modely s výkonem 30 W a 50 W. V následující tabulce jsou uvedeny základní parametry těchto měničů (bližší informace je možné dohledat v katalogovém listu od výrobce [13, 14]).

Parametry měničů		
modelová řada	HAS30	HBS50
model	HAS030ZH-A	HBS050ZG-A
výstupní výkon	30 W	50 W
vstupní napětí	36 – 75 V	34 – 75 V
výstupní napětí	12 V	5 V
zvlnění výstupního napětí (špička – špička)	150 mV	100 mV
maximální vstupní proud	1,3 A	1,8 A
maximální výstupní proud	2,5 A	10 A
typická účinnost (při 48V a plném zatížení)	88 %	82 %
spínací frekvence	250 kHz	500 kHz
izolační schopnost	vstup/výstup	1500 V
	vstup/zem	1050 V
	výstup/zem	500 V

Tab. 5.1: Údaje poskytnuté výrobcem (Power-one) v katalogovém listu

5.1.2 Odrušovací filtr

Pro měření byl použit filtr (schéma zapojení viz obr. 5.1), který by měl zajistit ochranu jak před sériovým, tak souhlasným rušením. K potlačení symetrického rušení zde slouží kondenzátory C_1 , C_2 a tlumivky L_2 , L_3 . Souhlasnou složku rušení by pak měly odstranit kondenzátory zapojené proti zemi (C_{X1} až C_{X6}) a proudově kompenzovaná tlumivka L_1 , u které se pro nesymetrické proudy sčítají indukčnosti obou vinutí. Byla zhotovena univerzální deska plošného spoje (viz. příloha A.1), na kterou se dají umísťovat různé velké součástky podle schéma na obr. 5.1. Díky této desce bylo možné postupně vyzkoušet 6 různých konfigurací filtru. Hodnoty jednotlivých součástek zapojovaných postupně do filtru naleznete v tab. 5.2 a celkové konfigurace měřených filtrů poté v tab. 5.3.



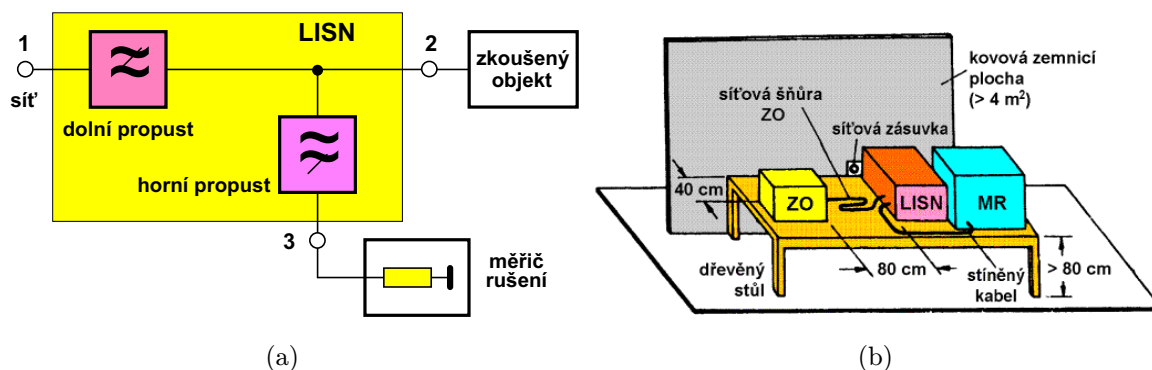
Obr. 5.1: Schéma filtru použitého pro měření

Součástka	Symbol	Hodnoty
Proudově kompenzovaná tlumivka	L_1	2,29 mH; 1,88 mH; 1,42 mH
Sériové tlumivky	L_2 a L_3	5 μ H
Vstupní paralelní kondenzátor	C_1	0,47 μ F; 1 μ F
Výstupní paralelní kondenzátor	C_2	1,5 μ F; 2,2 μ F
Kondenzátory proti zemi	C_{x1} až C_{x6}	10 nF; 100 nF

Tab. 5.2: Součástky použité při různých konfiguracích filtru

Označení	Filtr1	Filtr2	Filtr3	Filtr4	Filtr5	Filtr6
L_1	1,88 mH	2,29 mH;	1,42 mH	1,42 mH	1,88 mH	1,42 mH
L_2 a L_3	5 μ H	5 μ H	5 μ H	5 μ H	5 μ H	5 μ H
C_1	1 μ F	1 μ F	1 μ F	1 μ F	1 μ F	0,47 μ F
C_2	2,2 μ F	2,2 μ F	2,2 μ F	2,2 μ F	2,2 μ F	1,5 μ F
C_{x3} a C_{x4}	100 nF	100 nF	100 nF	100 nF	100 nF	100 nF
C_{x1} , C_{x2} , C_{x5} , C_{x6}	100 nF	100 nF	100 nF	10 nF	10 nF	10 nF
Rezonanční kmitočet [MHz]	1,20	1,20	1,20	2,00	1,95	1,95

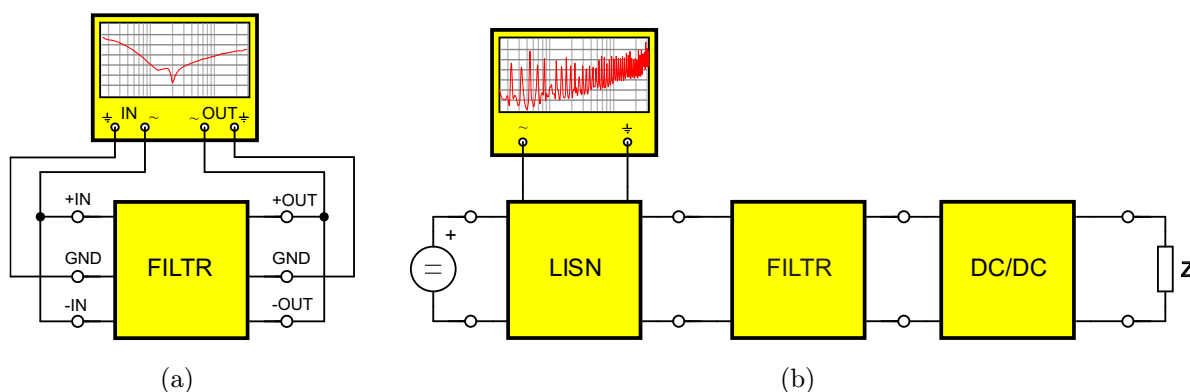
Tab. 5.3: Jednotlivé konfigurace filtru



Obr. 5.2: Umělá síť (a) a rozmístění měřících přístrojů během měření (b), kde je ZO zkoušený objekt, LISN umělá síť a MR měřič rušení

5.1.3 Měřicí přístroje

Před měřením samotného rušení byl nejdříve změřen útlum jednotlivých filtrů pomocí spektrálního analyzátoru (Agilent E4402B), aby bylo možné srovnat výsledky obou měření, filtr s větším útlumem na daném rozsahu by měl samozřejmě lépe omezovat rušení. Přístroj využívá tzv. "absolutní metodu", při níž je nejprve provedena kalibrace (zapojením měřících svorek nakrátko), poté připojen filtr podle obr. 5.3 (a) a změřeno výstupní napětí na filtru při různých frekvencích, posléze pak z předchozí kalibrace vypočítán útlum. Měření prováděl přístroj zcela automaticky a ihned po připojení filtru vykreslil jeho kmitočtovou útlumovou charakteristiku.



Obr. 5.3: Blokové schéma měření nesymetrického útlumu filtru (a) a měření rušení pomocí umělé sítě (b)

Měření rušení bylo provedeno pomocí umělé sítě (konkrétně PMM L2-16), někdy také LISN (z anglického Line Impedance Stabilizing Network), což je zařízení používané k měření rušení vysílaného zkoušeným objektem do přenosové napájecí sítě. Princip činnosti je patrný z obr. 5.2 (a) [10], konkrétní zapojení pak na obr. 5.3 (b). Dolní propust zajišťuje minimální útlum pro užitečné napětí a zároveň nepropouští vnější rušivé signály ze sítě do měřené soustavy. Tvoří ji většinou LC filtr, který by měl mít ve zkoumaném kmitočtovém pásmu útlum min. 30 dB. Horní propust pak přesměrovává vysokofrekvenční složku

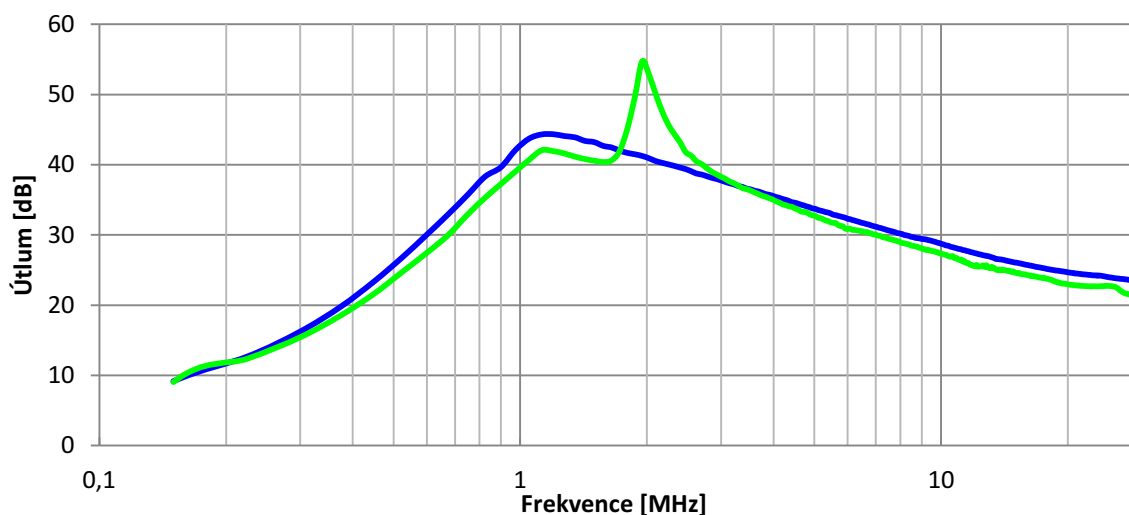
(rušení) do měřicího přístroje. Často to bývá jen oddělovací kondenzátor, u kterého požadujeme co nejmenší kmitočtovou závislost v pracovní oblasti. Na obr. 5.2 (b) [10] je schématicky znázorněno, jak by mělo ideálně vypadat uspořádání pracoviště během měření. Rušení pronikající do sítě bylo měřeno přijímačem EMI (PMM 8000+) a získaná data automaticky posílána do PC, na kterém se po proměření celého frekvenčního rozsahu (150 kHz až 30 MHz) vykreslily grafy naměřených hodnot.

5.2 Naměřené hodnoty

Všechny údaje, naměřené pomocí měřících přístrojů, byly přeneseny do PC a tam dále zpracovány do podoby grafů. Nejprve byla měřena útlumová charakteristika samotného filtru, a pak jeho vliv na omezení úrovně rušení přenášeného do sítě.

5.2.1 Útlum filtru

Námi zvolený filtr by měl efektivně pracovat v kmitočtovém pásmu stanoveném podle normy (viz. kapitola 3.5) pro rušení šířené po vedení, tedy 150 kHz až 30 MHz, ale jak je vidět z obr. 5.4 dosahovali všechny měřené maximálního útlumu mezi 1 až 2 MHz (přesné hodnoty naleznete v tab. 5.3) a dále již jeho účinnost klesá. Je to zřejmě způsobeno velkou parazitní indukčností použitých kondenzátorů. Pokud by byl filtr doplněn např. SMD kondenzátory, myslím, že by se jeho rezonanční frekvence posunula o něco výše. Na obr. 5.4 jsou zobrazeny útlumové charakteristiky dvou filtrů, které se od sebe nejvíc lišily, zbylé naleznete v příloze B.1.



Obr. 5.4: Změřený útlum filtru1 (modře) a filtru6 (zeleně)

Největší vliv na útlum filtru měly přitom kondenzátory připojené proti zemi. Po výměně 100 nF kondenzátorů za 10 nF došlo k vytvoření ostré špičky v útlumové charak-

teristice v oblasti 2 MHz, jak je vidět na obr. 5.4 (zelená křivka), což pro účely širokopásmového odrušování není příliš vhodné, jelikož za touto špičkou nastává poměrně strmý pokles útlumu. Nejlépe se pak jevil filtr měřený jako první, který je na obr. 5.4 vykreslen modře.

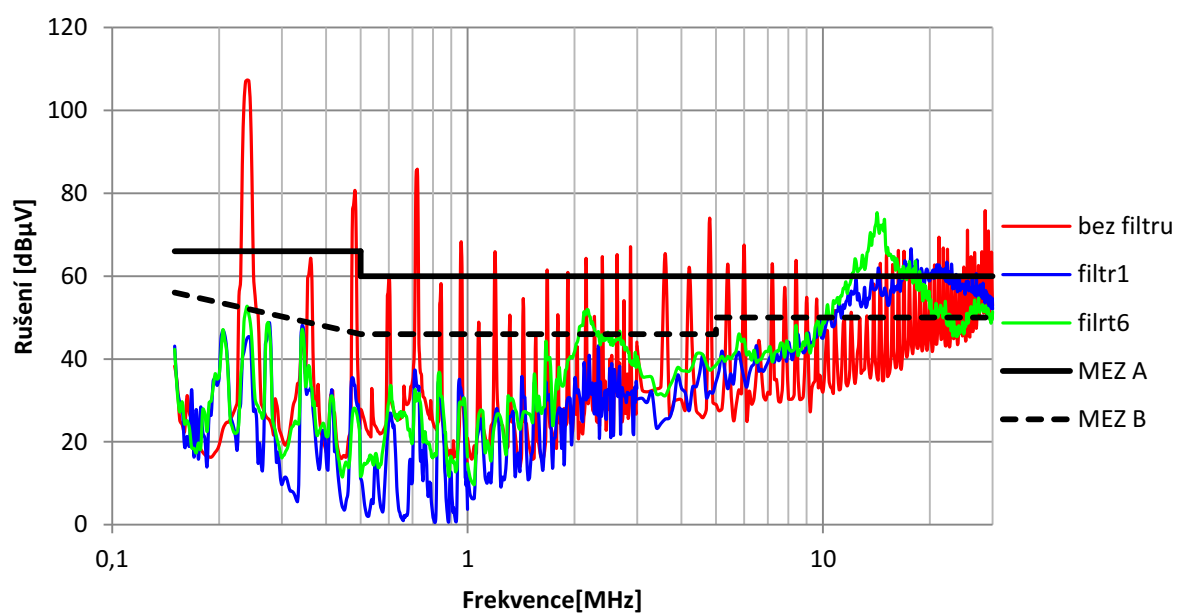
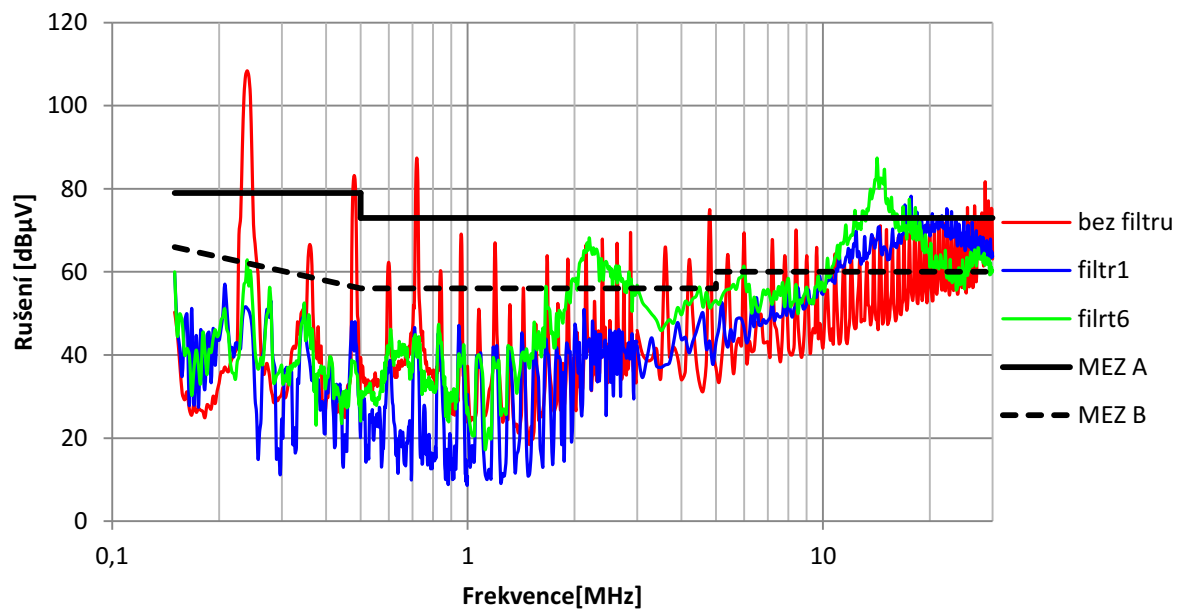
5.2.2 Rušení přenášené po vedení

Měniče byly osazeny do desek viz DPS v příloze A.1, které byly navrženy bez výrobcem doporučeného základního odrušovacího filtru, jenž by se měl přidávat přímo na desku s měničem. Důvodem bylo, aby mohlo být pro srovnání změřeno rušení samotného měniče bez jakéhokoli odrušení. Při měření padesáti watového měniče však nastal problém, kdy po zatížení větším než cca 60 % kleslo výstupní napětí měniče pod toleranční mez udávanou výrobcem. Rušení bylo zřejmě natolik veliké, že vyvolalo nestabilitu samotného měniče. Musela být proto použita deska dříve navržená vedoucím práce panem Ing. Zdeňkem Kubíkem, která tento minimální doporučený filtr obsahovala. Rušení naměřené na tomto měniči tedy není zcela bez filtru. S druhým měničem o výkonu 30 W problém nebyl.

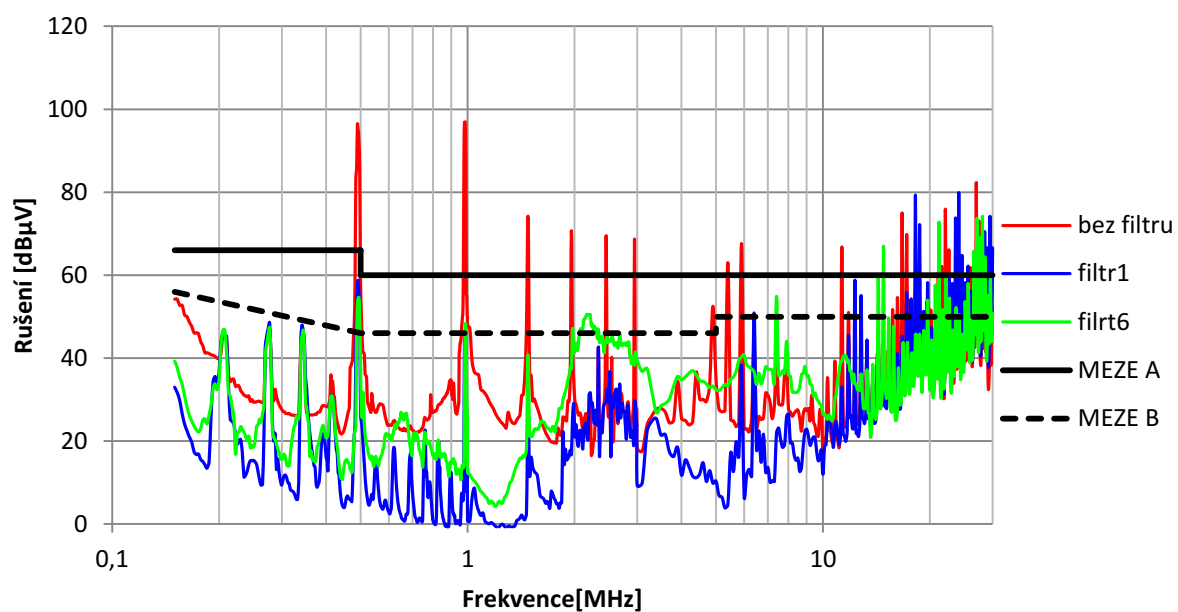
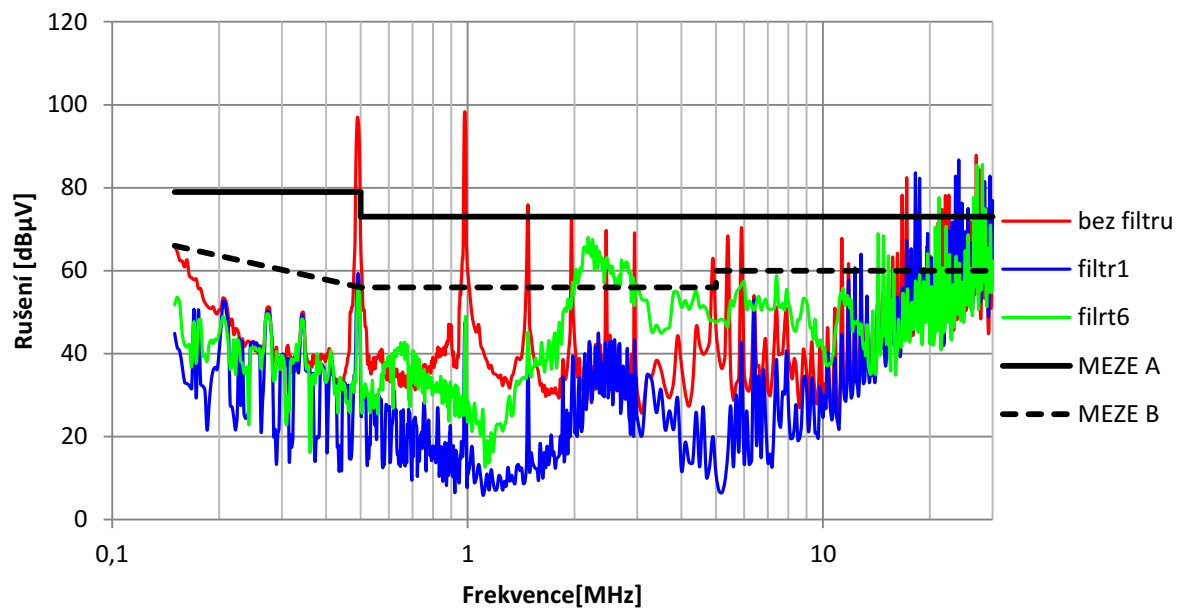
Z naměřených hodnot (obr. 5.5 a 5.6) je na první pohled zřetelný rozdíl spínacích frekvencí obou měničů, 30 W využívá podle katalogového listu 250 kHz a 50 W 500 kHz (skutečné naměřené jsou 240 a 490 kHz). Pro první je tedy nejvýraznější špička na 240 kHz, pak následují vyšší harmonické (celé násobky 240 kHz), u druhého je to 490 kHz a jeho vyšší harmonické.

Žádný ze zkoušených filtrů nedokázal pokrýt celé měřené pásmo natolik, aby přístroj splňoval limity stanovené normou. Může za to rezonanční kmitočet, který se u všech pohyboval mezi 1 a 2 MHz (viz graf na obr. 5.4 a přesné hodnoty jednotlivých rez. frekvencí v tab. 5.3). Nad 10 MHz kvůli tomu přestávaly účinně omezovat vzniklé rušení. Příčinou jsou, jak už bylo předesláno v kapitole 5.2.1, parazitní parametry použitých součástek, především pak kondenzátorů. V následujících grafech jsou zobrazeny zase jen výsledky prvního a posledního filtru, jako u naměřeného útlumu na obr. 5.4, zbylé jsou uvedeny v příloze (pro 30 W měnič obr. B.2 a pro 50 W obr. B.3).

Nejlepších výsledků pro měnič s výkonem 30 W bylo dosaženo s filtrem č. 1 a č. 4, které dokázaly až do 10 MHz plnit limity pro zařízení třídy B (viz kapitola 3.5) a nad 10 MHz téměř splnily limity pro třídu A. U druhého je výběr nejlepšího poněkud obtížnější, protože by se dalo říci, že příliš neuspěl žádný z použitých filtrů. První harmonickou (490 kHz) nejvíce potlačil filtr č. 3, který už bohužel stejně nefungoval pro vyšší harmonické. Ty pak nejlépe tlumil filtr č. 1 až do cca 10 MHz (nad kterými nefungoval žádný měřený).



Obr. 5.5: Kvazivrcholové (a) a střední (b) rušení změřené na měniči s výkonem 30 W



Obr. 5.6: Kvazivrcholové (a) a střední (b) rušení změřené na měniči s výkonem 50 W

6

Závěr

Elektromagnetickou kompatibilitou se v současnosti musíme zabývat téměř ve všech oblastech elektrotechniky, od miniaturních integrovaných obvodů až po výkonovou elektroniku. Projektanti by již od počátku návrhu nových zařízení měli pomýšlet na dopady elektromagnetického rušení, protože případné opomenutí zásad EMC může způsobit velké škody. Odrušení špatně koncipovaných přístrojů není často vůbec jednoduché a stojí výrobce nemalé prostředky, nehledě na to, že může v krajních případech dojít i poškození jiných citlivých zařízení. Výrobci dnes mnohdy zapomínají, či záměrně kvůli snížení výrobních nákladů, vynechávají kvalitní elektrické a magnetické odstínění, nutné především k oddělení výkonových od ostatních citlivých částí systému (mikroprocesorová technika, obvody pro zpracování analogových signálů, ...). Nejčastějším prohřeškem je pak umístění výkonových spínacích prvků na plošný spoj společně s jinými, na rušení náchylnými, součástkami a obvody. Rušení vzniklé v napájecí části se následně může přenášet i po signálových vstupech a výstupech. Podle nařízení vlády č. 616/2006 Sb. "O technických požadavcích na výrobky z hlediska jejich elektromagnetické kompatibility" musejí všechna zařízení a přístroje uváděné na trh splňovat povolené limity elektromagnetických emisí přenášených jak po vedení, tak zářením. Pokroky v počítačových simulačních programech již sice umožňují komplexní modelování i se zahrnutím EMC, ale k ověření chování v reálném provozu je stále nutné provést praktické měření.

Z provedeného měření vyplynulo, že největší vliv na odrušovací schopnosti filtrů mají parazitní parametry použitých součástek. Nesprávným výběrem můžeme filtr zcela znehodnotit. Snaha výrobců, o navyšování účinnosti použitím vyšších spínacích frekvencí, klade větší nároky na odrušovací filtry. Rezonance filtru by v ideálním případě měl ležet až za hranicí nejvyššího rušivého signálu. U námi použitých toho však dosaženo nebylo, jelikož měření probíhalo v rozmezí od 150 kHz do 30 MHz a rezonanční frekvence filtrů byly mezi 1 a 2 MHz. Díky tomu, pak zkoumané filtry nedokázaly v oblasti na 10 MHz omezit produkované rušení pod normou stanovené limity. Tento problém by bylo možné vyřešit, např.: použitím kondenzátorů proti zemi s menší kapacitou (podle tab. 4.1 [1]) či s menší parazitní indukčností vývodů (SMD), nebo přidáním dalšího LC stupně s vyšším rezonančním kmitočtem, který by zvýšil řád filtru a posunul celkovou rezonanci.

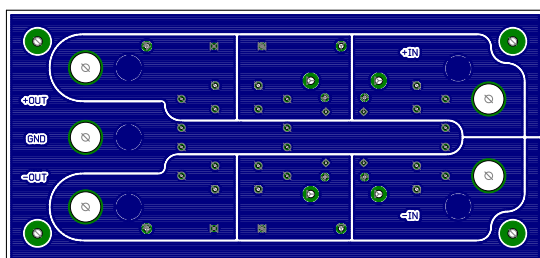
Literatura

- [1] VACULÍKOVÁ, Polina. *Elektromagnetická kompatibilita elektrotechnických systémů: praktický průvodce techniky omezení elektromagnetického vř rušení*. 1. vyd. Praha: Grada, 1998. 487 s. ISBN 80-7169-568-8.
- [2] KOVÁČ, Dobroslav, KOVÁČOVÁ, Irena a KAŇUCH, Ján. *EMC z hlediska teorie a aplikace*. 1. vyd. Praha: BEN, 2006. 216 s. ISBN 80-7300-202-7.
- [3] HAMMERBAUER, Jiří. *Elektronické napájecí zdroje a akumulátory*. 1. vyd. Plzeň: ZČU, 1996. 181 s.
- [4] FAKTOR, Zdeněk. *Transformátory a tlumivky pro spínané napájecí zdroje*. Praha: BEN - technická literatura, 2002. 243 s. ISBN 80-86056-91-0.
- [5] HUMLHANS, Jan. *Nábojové pumpy: funkce, přehled, použití*. 1. vyd. Praha: BEN - technická literatura, 2002. 191 s. ISBN 80-7300-046-6.
- [6] KREJČIŘÍK, Alexandr. *Napájecí zdroje I: základní zapojení analogových a spínacích napájecích zdrojů*. 2. vyd. Praha: BEN, 1997. 351 s. ISBN 80-86056-02-3.
- [7] KREJČIŘÍK, Alexandr. *Napájecí zdroje II: integrované obvody ve spínaných zdrojích*. 2. vyd. Praha: BEN, 1997. 351 s., 2 volné listy. ISBN 80-86056-03-1.
- [8] KREJČIŘÍK, Alexandr. *Napájecí zdroje III: pasivní součástky v napájecích zdrojích a preregulátory - aktivní harmonické filtry*. 1. vyd. Praha: BEN, 1999. 349 s. ISBN 80-86056-56-2.
- [9] KREJČIŘÍK, Alexandr. *DC/DC měniče*. 1. vyd. Praha: BEN, 2001, 111 s. ISBN 80-7300-045-8.
- [10] SVAČINA, Jiří. *Základy elektromagnetické kompatibility [i.e. compatibility]: přednášky*. Vyd. 2. Brno: Vysoké učení technické, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav radioelektroniky, 2005, 155 s. ISBN 80-214-2864-3.
- [11] BOKR, Ladislav. *Vliv konstrukce síťového filtru na vložný útlum*. Plzeň, 2010. Bakalářská práce. Západočeská univerzita, Fakulta elektrotechnická. Vedoucí práce Jiří Skála.

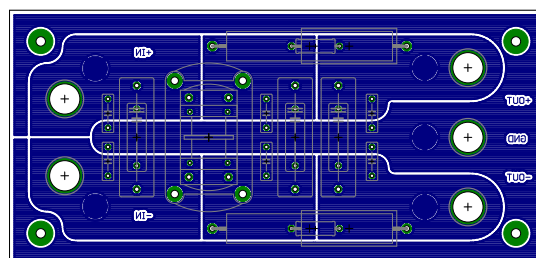
- [12] ČSN EN 55022 ed. 2. *Zařízení informační techniky - Charakteristiky vysokofrekvenčního rušení - Meze a metody měření* Český normalizační institut, 2007.
- [13] The Datasheet Archive. *HAS30 DC-DC Series Data Sheet* [online].
©2012 [cit. 2012-03-02]. Dostupné z:
<<http://www.datasheetarchive.com/indexdl/Datasheet-071/DSA00340547.pdf>>.
- [14] The Datasheet Archive. *HBS50 DC-DC Series Data Sheet* [online].
©2012 [cit. 2012-03-02]. Dostupné z:
<<http://www.datasheetarchive.com/indexdl/Datasheet-071/DSA00340554.pdf>>.

Příloha A

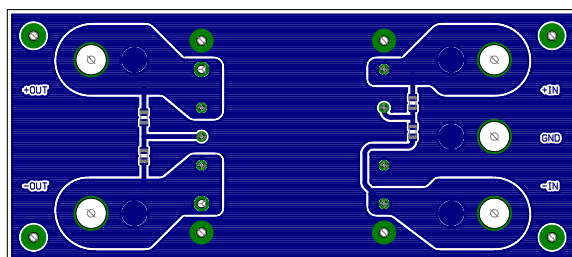
Desky plošných spojů



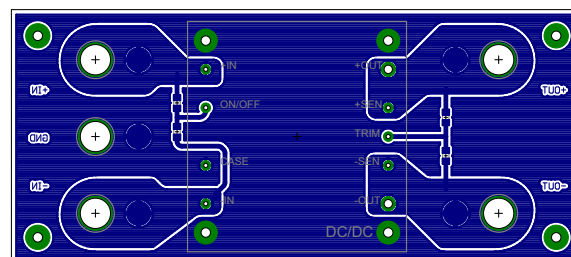
(a) DPS pro filtr při pohledu zdola (tzv. bot-tom view)



(b) Osazovací výkres pro filtr při pohledu shora (tzv. top view)



(c) DPS pro 50 W měnič při pohledu zdola (bot-tom view)

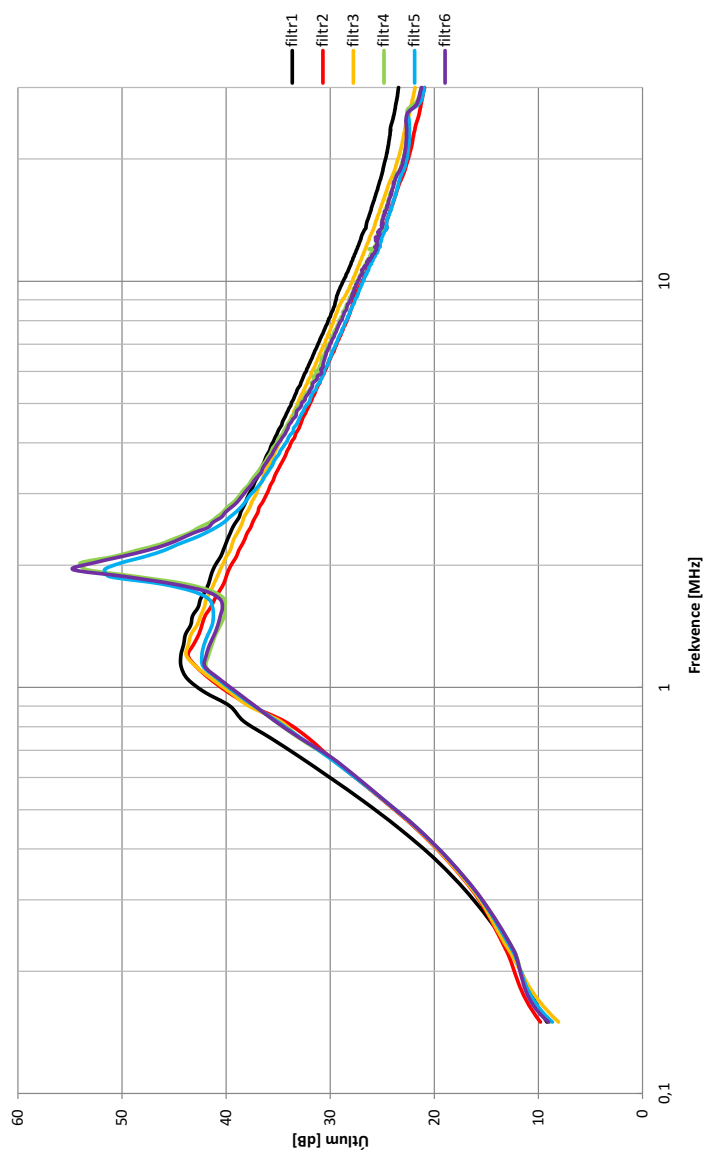


(d) Osazovací výkres pro 50 W měnič při pohledu shora (top view)

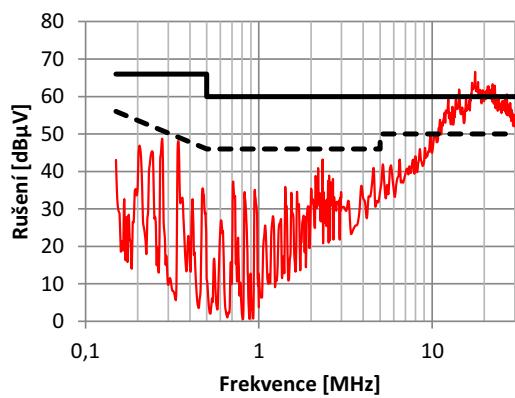
Obr. A.1: DPS v poloviční velikosti pro filtr a pro 50 W měnič, 30 W je shodný, jen má všechny vývody stejně široké

Příloha B

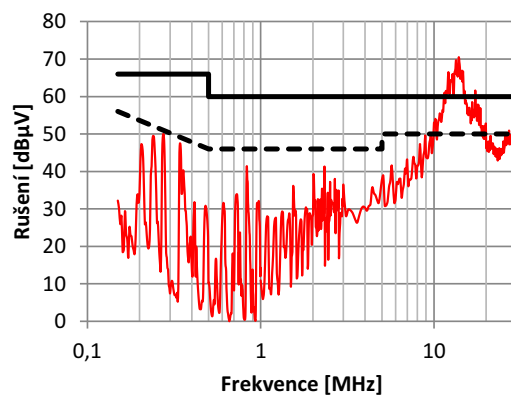
Grafy z naměřených hodnot



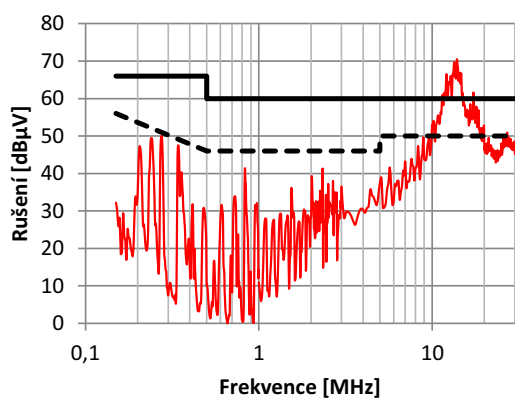
Obr. B.1: Srovnání útlumových charakteristik všech použitých filtrů



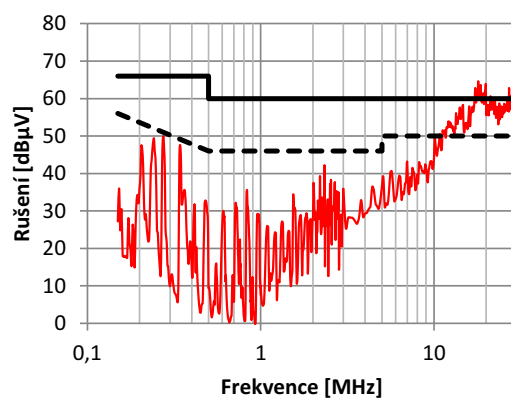
(a) filtr 1



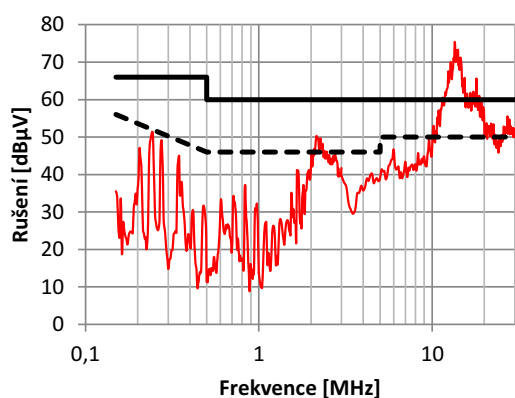
(b) filtr 2



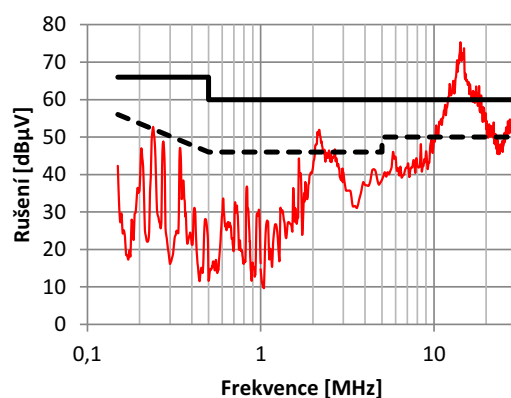
(c) filtr 3



(d) filtr 4

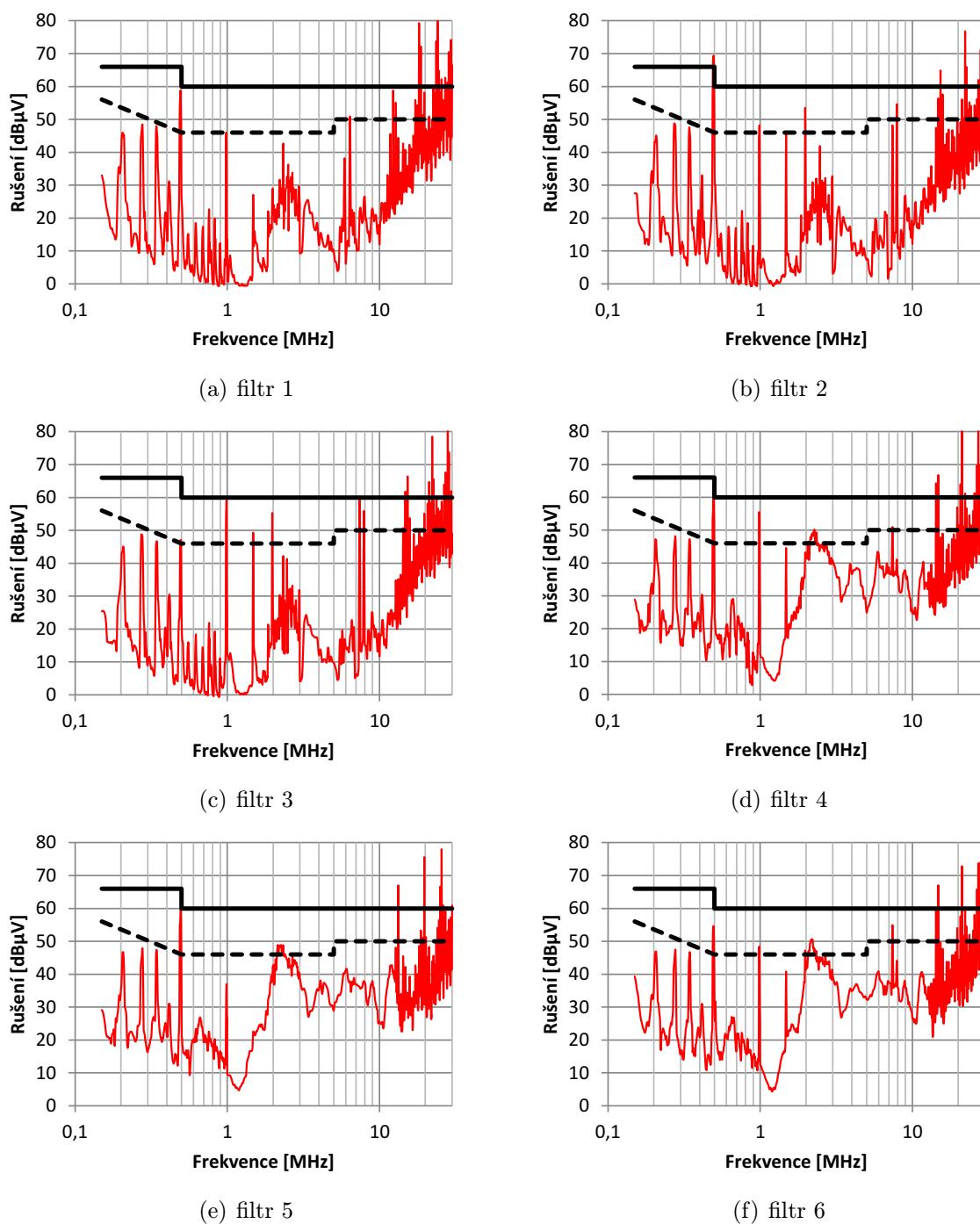


(e) filtr 5



(f) filtr 6

Obr. B.2: Střední rušení naměřené na měničích s výkonem 30 W, kde tlustá černá čára značí mez pro zařízení třídy A a přerušovaná pro třídu B



Obr. B.3: Střední rušení naměřené na měniči s výkonem 50 W, kde tlustá černá čára značí mez pro zařízení třídy A a přerušovaná pro třídu B