



Fakulta elektrotechnická
Katedra elektroenergetiky

DIPLOMOVÁ PRÁCE

ANALÝZA PŮSOBENÍ PŘEPĚŤOVÝCH OCHRAN A ODRUŠOVACÍCH PRVKŮ

Autor práce: Bc. David Koutenský
Vedoucí práce: Ing. Miroslav Hromádka Ph.D.

Plzeň 2022

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta elektrotechnická
Akademický rok: 2021/2022

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE (projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: **Bc. David KOUTENSKÝ**
Osobní číslo: **E19N0032P**
Studijní program: **N2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor: **Elektroenergetika**
Téma práce: **Analýza působení přepěťových ochran a odrušovacích prvků**
Zadávající katedra: **Katedra elektroenergetiky**

Zásady pro vypracování

1. Popište způsoby vzniku a šíření rušivých signálů na vedení.
2. Uvedte zařízení pro ochranu před popsányi signály.
3. Sledujte odezvu vybraných zařízení na rušivé signály.
4. Zhodnoťte použitelnost těchto prvků z hlediska ochrany před rušením.

Rozsah diplomové práce: **40 – 60 stran**
Rozsah grafických prací: **podle doporučení vedoucího**
Forma zpracování diplomové práce: **elektronická**

Seznam doporučené literatury:

Clayton R. Paul: Introduction to electromagnetic compatibility, Wiley-Interscience New York, NY, USA ©2006,
ISBN:0471758159

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Miroslav Hromádka, Ph.D.**
Katedra elektroenergetiky

Datum zadání diplomové práce: **8. října 2021**
Termín odevzdání diplomové práce: **26. května 2022**



L.S.

Prof. Ing. Zdeněk Peroutka, Ph.D.
děkan

Doc. Ing. Karel Noháč, Ph.D.
vedoucí katedry

V Plzni dne 8. října 2021

Abstrakt

Diplomová práce se zabývá analýzou působení přepětových ochran a odrušovacích prvků. V teoretické části práce je rozebrán popis vzniku a šíření rušivých signálů, jejich možné důsledky na zařízení a možné předcházení a omezení těchto rušení. Součástí teoretické části je rozbor zařízení, které mohou eliminovat již zmíněné rušivé signály. Jsou zde popsány jejich rozdělení, parazitní vlastnosti a využití. V praktické části jsou provedena měření s vybranými zařízeními a je zde zhodnocena použitelnost zkoušených prvků.

Klíčová slova

Elektromagnetická kompatibilita, elektromagnetické rušení, elektromagnetické vazby, odrušovací tlumivka, odrušovací kondenzátor, odrušovací filtr, přepětové ochranné prvky.

Abstract

The diploma thesis focuses on the analysis of the effect of surge protectors and interference suppression elements. The theoretical part of the work is a description of the origin and propagation of interfering signals, their possible consequences on the device and prevention and reduction of these interferences. Part of the theoretical part is an analysis of devices that can eliminate interfering signals. There is a description and their distribution, parasitic properties and uses. The measurements with selected devices were performed and analyzed the applicability of the tested elements in the practical part.

Keywords

Electromagnetic compatibility, electromagnetic interference, electromagnetic couplings, choke, interference suppression capacitor, interference filter, surge protection.

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů uvedených v seznamu, který je součástí této diplomové práce.

Dále prohlašuji, že veškerý software, použitý při řešení této diplomové práce, je legální.



.....
podpis

V Plzni dne 27. dubna 2022

Bc. David Koutenský

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu práce Ing. Miroslavu Hromádkovi, Ph.D. za cenné profesionální rady, připomínky, metodické vedení práce a za čas, který mi věnoval.

Obsah

Úvod	1
1 Elektromagnetická kompatibilita	2
1.1 Elektromagnetické rušení	2
1.2 Vznik rušivých signálů a jejich možné následky	3
1.2.1 Průmyslové rušení	3
1.2.2 Vysokofrekvenční oscilace	8
1.2.3 Rušení z diodových a tyristorových usměrňovačů	9
1.2.4 Rušení ze spínaných napájecích zdrojů	10
1.2.5 Zdroje kontinuálního rušení	10
1.2.6 Rušení od vnějších energetických vedení VVN a VN	10
1.2.7 Energetické přepětí	10
1.2.8 Zvláštní rušení	13
2 Elektromagnetické vazby rušivých signálů	15
2.1 Galvanická vazba	15
2.2 Induktivní vazba	19
2.3 Kapacitní vazba	21
2.4 Vazba vyzařováním	23
3 Zařízení pro ochranu před rušivými signály	25
3.1 Odrušovací tlumivky	25
3.2 Odrušovací kondenzátory	29
3.2.1 Využití odrušovacích kondenzátorů na vedení	31
3.2.2 Bezpečnostní rozdělení kondenzátorů	32
3.3 Odrušovací filtry	32
3.3.1 Síťové odrušovací filtry	32
3.3.2 Speciální druhy odrušovacích filtrů	33
3.4 Přepětové ochranné prvky	34
3.4.1 Prvky pro hrubou přepětovou ochranu	35
3.4.2 Prvky pro jemnou přepětovou ochranu	36
3.5 Elektromagnetické stínění	38
4 Praktická část a zhodnocení výsledků	41
4.1 Měření odrušovacích kondenzátorů	41
4.2 Měření odrušovacích tlumivek	47
4.3 Měření odrušovacích EMI filtrů	56

4.4	Měření přepětových ochran	58
5	Závěr	63
	Seznam použité literatury	65
	Seznam obrázků	70

Seznam použitých symbolů a zkratek

<i>B</i>	[T]	Magnetická indukce
<i>C</i>	[F]	Kapacita
<i>E</i>	[V m ⁻¹]	Intenzita elektrického pole
<i>f</i>	[Hz]	Frekvence
<i>H</i>	[A m]	Intenzita magnetického pole
<i>K_s</i>	[-]	Koeficient stínění
<i>L</i>	[H]	Indukčnost
<i>M</i>	[H]	Vzájemná indukčnost
<i>P</i>	[W]	Elektrický výkon
<i>R</i>	[Ω]	Odpor
<i>SE</i>	[dB]	Účinnost elektromagnetického stínění
<i>t</i>	[s]	Čas
<i>u_p</i>	[V]	Rušivé napětí přivedené na přijímač rušení
<i>u_r</i>	[V]	Rušivá složka napětí zdroje rušení
<i>W</i>	[J]	Energie
<i>Z_s</i>	[Ω]	Společná impedance sítě
<i>Z₀</i>	[Ω]	Společná impedance zpětného vodiče
<i>Z_r</i>	[Ω]	Impedance zdroje rušení
<i>Z_p</i>	[Ω]	Impedance přijímače rušení
<i>A</i>		Absorbce stínění
EMC		Elektromagnetická kompatibilita
EMI		Elektromagnetické rušení
EMS		Elektromagnetická odolnost
ESD		Elektrostatický výboj
EMP		Elektromagnetický impuls
HEMP		Nukleární elektromagnetický impuls ve vysoké nadmořské výšce
M		Mnohonásobný odraz stínění
NEMP		Nukleární elektromagnetický impuls
LEMP		Bleskový elektromagnetický impuls
R		Odraz stínění
SGEMP		Systémově generovaný nukleární elektromagnetický impuls
SREMP		Nukleární elektromagnetický impuls v nízké nadmořské výšce
VN		Vysoké napětí
VVN		Velmi vysoké napětí

Úvod

Tato práce se zaměřuje na vznik elektromagnetického rušení, přenos a omezení tohoto rušení za pomoci určených odrušovacích zařízení.

V posledních letech množství vyráběných a používaných elektrických a elektronických zařízení strmě vzrostlo. Každé takové zařízení je zároveň vysílačem i přijímačem rušivých signálů. Dle norem EMC musí být každé takové zařízení podrobené zkouškám EMC, a proto jsem se v této práci zabýval možnostmi, jak lze potlačovat vysílané rušení a také jak u přijímacích zařízení zvyšovat odolnost vůči rušení.

Práce se skládá ze dvou hlavních částí. První část je teoretická a druhá část praktická. Teoretická část obsahuje nezbytné znalosti, které jsou využity v praktické části a při analýze výsledků. V teoretické části jsou popsány zdroje rušení, vazby mezi rušenými a rušivými zařízeními a obvody pro eliminaci tohoto rušení. V praktické části jsou popsána měření a jejich průběh. Tato část také obsahuje výčet měřených součástí společně s měřicími přístroji. Dále jsou zde zobrazeny grafické výsledky, které jsou porovnávány s typickými katalogovými charakteristikami.

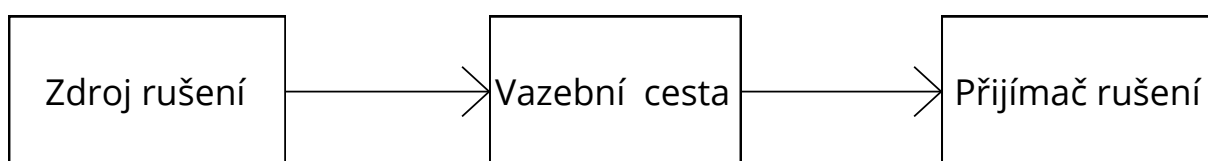
Je důležité zjistit použitelnost odrušovacích prvků pro různé druhy rušení, jelikož působení různých rušivých signálů může mít závažné následky. Rušivý signál může ovlivnit, ale i zničit zařízení, které může být ekonomicky nákladné na opravu. V horším případě může rušivý signál ohrozit na lidském životě a to například z důvodu, že zařízení přestane fungovat správně. Proto je důležité znát a využívat zařízení, která omezují rušivé signály a také vědět, kdy tato zařízení správně a efektivně využít.

Cílem této práce je popsat a posoudit použitelnost různých zařízení pro eliminaci rušivých signálů a to na základě výsledků z praktických měření. V návaznosti na těchto výsledcích a znalostech, následně doporučit co nejefektivnější nasazení odrušovacích zařízení.

1 Elektromagnetická kompatibilita

Z definice elektromagnetické kompatibility je zřejmé, že po zařízení je vyžadováno, aby neovlivňovalo ostatní zařízení včetně sebe samotného a zároveň, aby nebylo ovlivňováno ostatními zařízeními. Elektromagnetická kompatibilita se tedy dělí na dvě kategorie. To jsou elektromagnetická interference (EMI) neboli elektromagnetické rušení a elektromagnetická suscetibilita (EMS) neboli elektromagnetická odolnost. EMI zkoumá příčiny vzniku rušení a působení rušivých signálů na zařízení. EMS zkoumá, jak je zařízení odolné proti rušení.

Základní schéma řetězce EMC je znázorněno na obrázku 1.1,



Obrázek 1.1: Obecné schéma řetězce EMC [vlastní zpracování dle [2]]

kde zdroj rušení může být např. motor, relé, atmosférický výboj atd. Vazební cesta je prostředí, kde se rušivý signál přenáší k přijímači rušení. To je např. vzdušný prostor, kabel, parazitní elektromagnetická vazba atd. Přijímač rušení je zařízení nebo i živý tvor, na kterém se rušení projevuje nebo ho může detekovat. [1]

1.1 Elektromagnetické rušení

Elektromagnetické rušení je jev, při kterém je negativně ovlivněna funkce elektronického nebo elektrického zařízení. Rušení probíhá v kmitočtovém spektru od 0 Hz až po desítky GHz. Rušení se neprojevuje jen v kmitočtových pásmech pro přenos informací, ale projevuje se i nepřímými účinky na životní prostředí. Tato záležitost se považuje nejen za technický, ale i za ekologický problém.

Elektromagnetické rušení lze rozčlenit na dvě hlavní skupiny, umělé rušení a přirozené rušení. Přirozené rušení převážně vzniká při atmosférických poruchách a bleskových výbojích. Umělé rušení, generováno např. technickými zdroji, lze rozdělit na šum (N), impulsy (S) a přechodné jevy (T).

- Šum se především vyznačuje vlivem na křivku napětí a má převážně periodický charakter. Hlavním zdrojem šumu jsou motory a klasické svářečky.
- Impulsy lze pozorovat jako kladné a záporné špičky superponované na napětí sítě. Tyto špičky mají velký poměr amplitudy k době trvání impulsu. Hlavní příčinou

tohoto rušení jsou spínací pochody a tak typickým zdrojem jsou kontaktní spínací přístroje.

- Přejídné jevy se projevují deformací obálky napětí. Jsou to jednorázové náhodné děje, které mohou trvat od několika desítek milisekund po několik sekund. Hlavní příčinou tohoto rušení je zapínání a vypínání spotřebičů o velkých výkonech.

Další dělení je z hlediska kmitočtového spektra. Rušení se rozděluje na nízkofrekvenční rušení a rádiové rušení.

- Nízkofrekvenční rušení se nazývá energetické rušení pokud působí na elektrizační soustavu. Pokud rušení působí na přenosové informační systémy, tak se nazývá akustické rušení.
 - Energetické rušení je v rozsahu 0 Hz až 2 kHz. Způsobuje zkreslení napájecího napětí a odebíraného proudu energetické sítě. Zejména se projevuje tam, kde jsou zařízení citlivá na změnu tvaru křivky napětí. To jsou např. ovládací a sdělovací systémy. Zdrojem rušení jsou spotřebiče odebírající deformovaný nesinusový proud a to jsou např. řízené měniče velkých výkonů.
 - Akustické rušení je udáváno v pásmu nižším než 10 kHz, způsobuje rušení přenosových informačních systémů. Zdroje akustického rušení jsou všechny energetické zdroje.
- Rádiové rušení je v pásmu od 10 kHz do 400 GHz a jeho hlavními zdroji jsou řízené měniče s polovodičovými součástkami.

Toto dělení rušivých signálů patří mezi základní, ale rušivé signály lze dále dělit na funkční a nefunkční. Jiné dělení je na impulsní, kvazimpulsní a spojitě nebo lze rušivé signály rozdělit na úzkopásmové a širokopásmové. [1] [2] [3] [5]

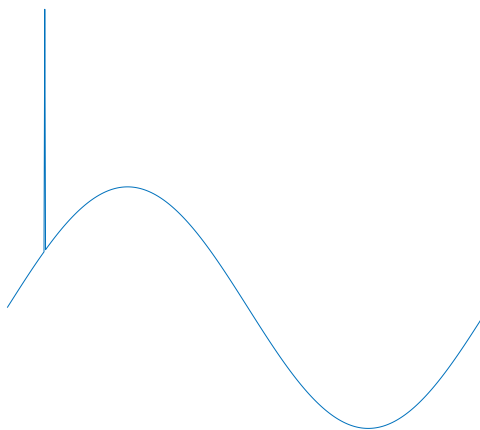
1.2 Vznik rušivých signálů a jejich možné následky

1.2.1 Průmyslové rušení

Jako první skupinu rušivých signálů lze brát průmyslová rušení, která podle svého názvu převážně vznikají v průmyslových energetických sítích.

1.2.1.a Impulsní rušení

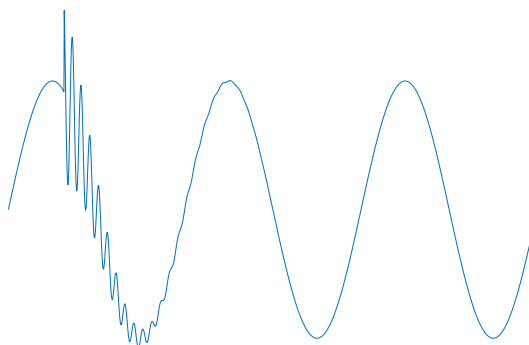
Impulsní rušení může být vyvolané atmosférickými výboji, elektrostatickými výboji nebo spínáním zátěže. Možnými důsledky tohoto rušení je ztráta dat, poškození nebo výpadek systému.



Obrázek 1.2: Impulsní rušení

1.2.1.b Oscilační rušení

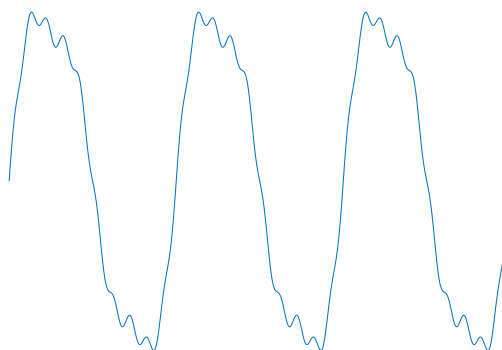
Oscilační rušení může způsobit zvýšené namáhání až poškození izolace, ztrátu dat anebo zničení systému. Rušení vzniká při spínání indukčních či kapacitních zátěží, přepínání vedení nebo spínání kondenzátorů.



Obrázek 1.3: Oscilační rušení

1.2.1.c Harmonické a mezipharmonické složky rušení

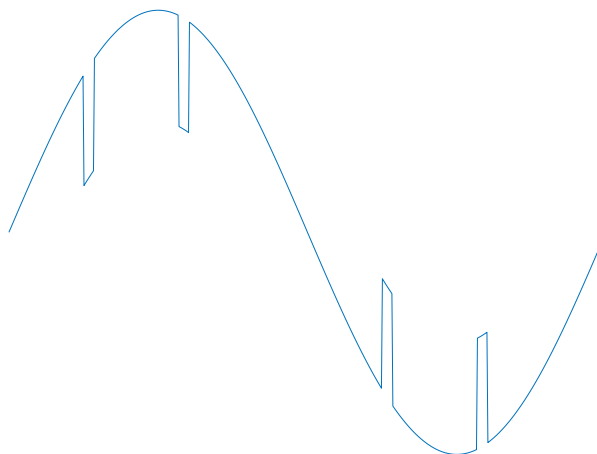
Možné příčiny vzniku tohoto rušení jsou: využívání nelineární zátěže, frekvenčních měničů nebo poškozených zařízení. Možné následky tohoto rušení jsou: přehřívání transformátorů, motorů a kabelů, výpadky systémů nebo blikání světel.



Obrázek 1.4: Harmonické a mezipharmonické složky rušení

1.2.1.d Periodické pulsní rušení

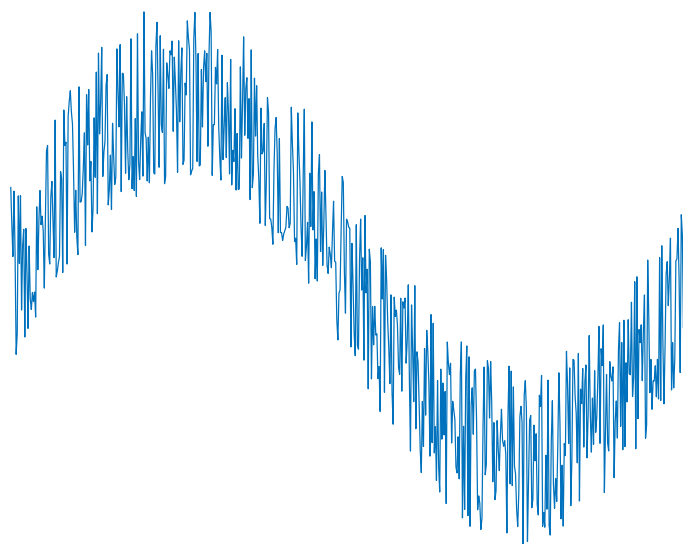
Toto rušení způsobuje ztrátu dat a výpadky systémů. Vyskytuje se v systémech s řízenými pohony, obloukovými pecemi a spínanými zdroji.



Obrázek 1.5: Periodické pulsní rušení

1.2.1.e Šum

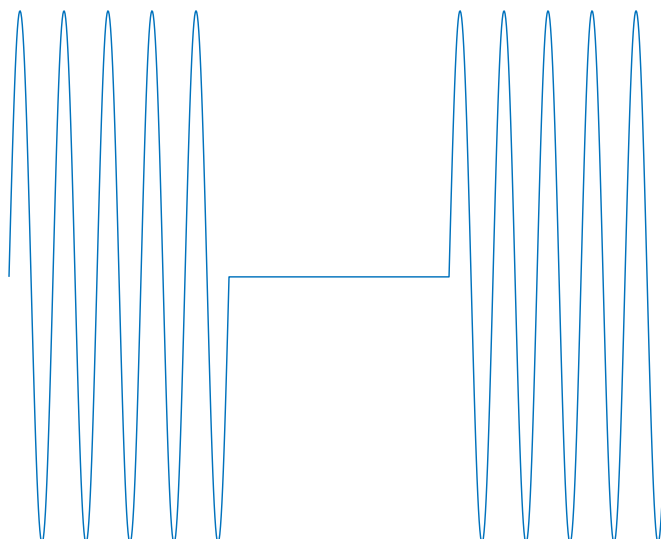
Toto rušení opět negativně ovlivňuje zařízení a může vést ke ztrátě dat nebo výpadku zařízení. Způsobují ho především poškozená zařízení, impulsní usměrňovače anebo zařízení umístěna v blízkosti vysokofrekvenčního zdroje.



Obrázek 1.6: Šum

1.2.1.f Přerušení napájecího napětí

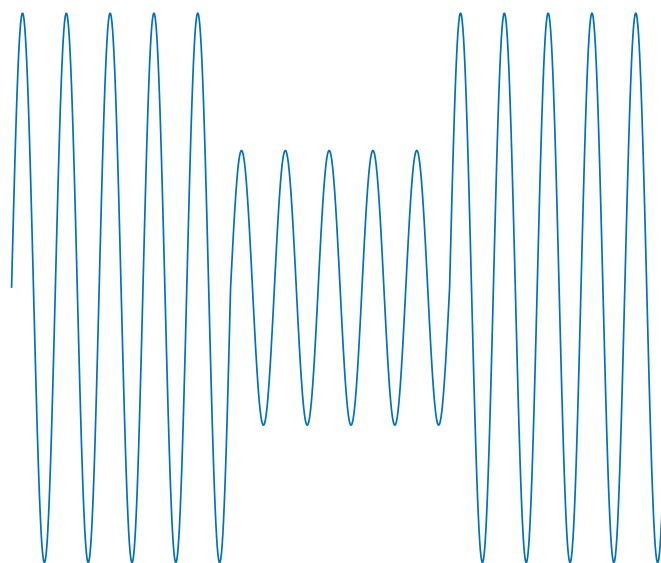
Jako následky přerušení napájecího napětí se mohou vyskytovat možná poškození anebo vypnutí systému. Vznik tohoto rušení je ze selhání komponent, působení systémových ochran nebo z dalších obecných poruch.



Obrázek 1.7: Přerušení napájecího napětí

1.2.1.g Pokles napájecího napětí

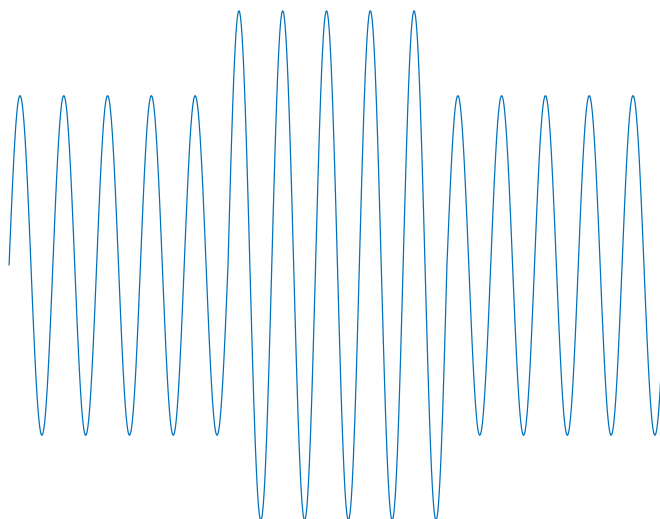
Pokles napětí může vzniknout při startu motoru nebo skupiny motorů, při elektricky vzdálených systémových poruchách, zkratech v síti anebo připojením velké zátěže k síti. Jako možný následek rušení je ztráta dat nebo výpadek systému.



Obrázek 1.8: Pokles napájecího napětí

1.2.1.h Zvýšení napájecího napětí

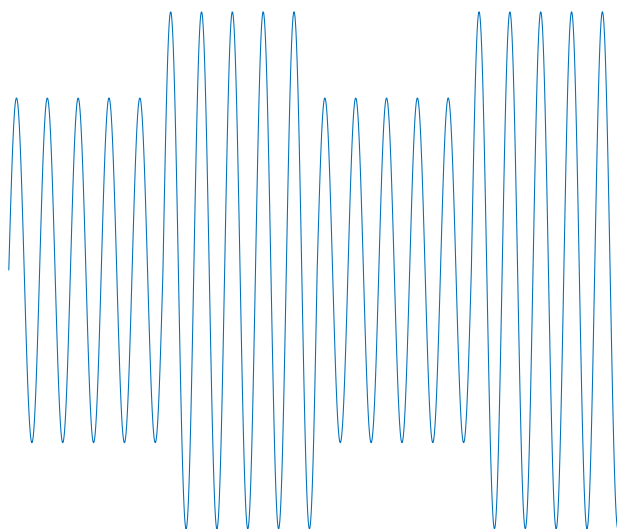
Zvýšení napájecího napětí může mít za následek změna konfigurace zatížení sítě, případně poruchy v systému. Možné následky rušení jsou nežádoucí vypínání, zkracování životnosti anebo poškození zařízení.



Obrázek 1.9: Zvýšení napájecího napětí

1.2.1.i Kolísání napájecího napětí

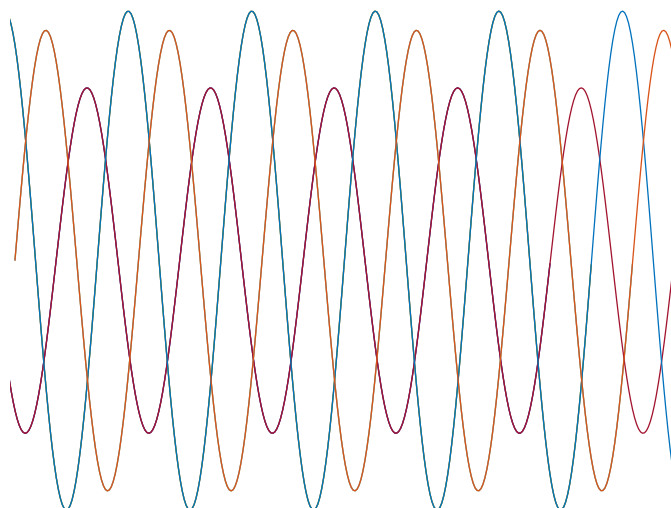
Kolísání napájecího napětí může být způsobeno proměnnou zátěží, obloukovými peccemi nebo častým zapínáním a vypínáním zátěže. Důsledky tohoto rušení jsou: blikání světel a elektromechanické kmity na zařízení.



Obrázek 1.10: Kolísání napájecího napětí

1.2.1.j Nesymetrie trojfázového napětí

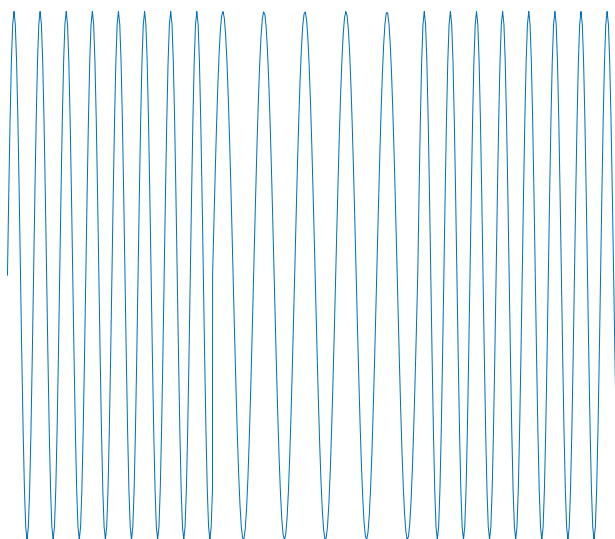
Nesymetrické trojfázové napětí je způsobeno nerovnoměrným zatížením fází. Z tohoto důvodu se může narušit funkce trojfázových měničů napětí anebo se motory připojené k tomuto nesymetrickému napětí mohou více zahřívat.



Obrázek 1.11: Nesymetrie trojfázového napětí

1.2.1.k Změny kmitočtu napájecího napětí

V důsledku chybně regulovaného generátoru může dojít ke změnám kmitočtu napájecího napětí a to může způsobit selhání frekvencí synchronizovaných zařízení. [1] [3] [5]

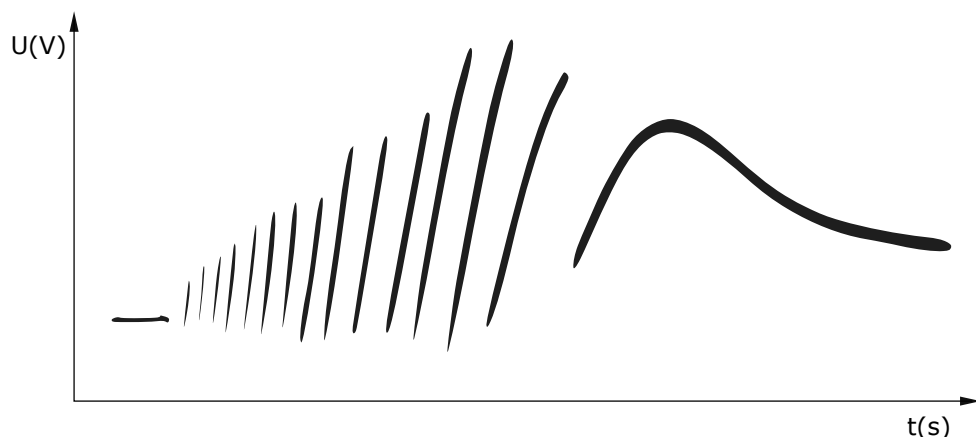


Obrázek 1.12: Změna kmitočtu napájecího napětí

1.2.2 Vysokofrekvenční oscilace

Na obrázku 1.13 je naznačen další typ rušení. Jsou to vysokofrekvenční oscilace, které vznikají při rozpínacích procesech kontaktů, spínačů, stykačů a relé. Při rozepnutí stykače vzniká mezi kontakty napětí, které se zvyšuje. Pokud napětí vzroste nad určitou mez, přeskóčí mezi kontakty výboj, který zhasne a znovu zde narůstá napětí a celý děj se opakuje. Na kontaktech se vyskytují velmi strmé impulsy s vysokým napětím. Je to přechodný jev. Tento přechodný jev, který má pilovitý průběh je nazýván burst. Toto rušení je možné

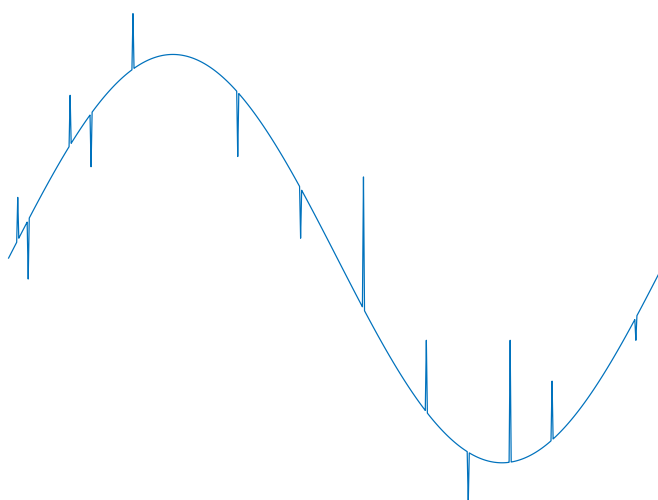
odstranit, pokud napětí mezi kontakty bude nižší než průrazné napětí. To lze zajistit za pomoci RC obvodu, který překlene kontakty nebo za pomoci přepětových ochran. [3] [5]



Obrázek 1.13: Vysokofrekvenční oscilace napětí na kontaktech rozpojovaného relé

1.2.3 Rušení z diodových a tyristorových usměrňovačů

Jako další typ rušivého signálu může být rušení způsobené usměrňovacími prvky, zejména spínacími pochody u tyristorového usměrňovače. Tyto prvky jsou hojně používány u průmyslových zařízení velkých výkonů. Při chodu těchto zařízení se opětovně spínají velké proudy a vznikají zde rušení v podobě napěťových impulsů, které se periodicky opakují. Pokud jsou usměrňovače připojeny přímo k energetické síti bez použití přepětových ochran a vhodných filtračních zařízení, tak ve velké míře deformují síťové napětí. Tato rušení mohou vypadat různě, záleží na řídicím úhlu tyristoru. Jedna z možných variant průběhu rušeného napětí je znázorněna na obrázku 1.14. [3]



Obrázek 1.14: Deformace síťového napětí vlivem tyristorových měničů

1.2.4 Rušení ze spínaných napájecích zdrojů

Toto rušení způsobují napájecí zdroje řízené impulsy. Zdroj přerušovaně spíná usměrněné a filtrované napětí. K regulaci se používá pulsně šířková modulace. Vzniká zde velké množství rušivých signálů v důsledku strmosti spínacích impulsů. Zdroj je nutné vybavit EMI filtrem pro nižší ovlivňování okolních zařízení a elektrické sítě. [3]

1.2.5 Zdroje kontinuálního rušení

Jako zdroje, které způsobují kontinuální rušení se označují ty, jejichž trvání je buď trvalé anebo trvá relativně delší časový úsek. Mezi tyto zdroje se řadí televizní a rozhlasové vysílače, případně radarové vysílače. Jako ochranu na straně přijímače lze využít elektromagnetické stínění. [3] [7]

1.2.6 Rušení od vnějších energetických vedení VVN a VN

Toto rušení se vyskytuje v blízkosti elektrických vedení. Rušení od vedení VVN a VN jsou náročná na vyhledání a zároveň i na odstranění. Negativně ovlivňují provoz radiokomunikační služby. Rušení lze rozdělit na dva druhy:

- **Korónový výboj**

Vzniká v silně nehomogéním elektrickém poli v okolí hrotů, ostrých hran a vodičů velmi vysokého napětí. Síla výbojů se mění v závislosti na atmosférických podmínkách. Koróna nejvíce ruší provoz na středních a dlouhých vlnách. Na krátké a velmi krátké vlny již téměř nepůsobí. Negativním důsledkům tohoto rušení lze předejít tím, že jsou venkovní linky VVN navrženy mimo obytná území. [3]

- **Kapacitní výboj**

Vyskytuje se u vedení vysokého napětí při nedokonalém spojení kovových předmětů. Především se jedná o místa spojů závěsných kloubových izolátorů, kde vznikne izolační vrstva. Při překročení izolační pevnosti této vrstvy dochází k jiskrovému výboji. Rušení lze odstranit využitím jiné konstrukce izolátoru. [3] [5]

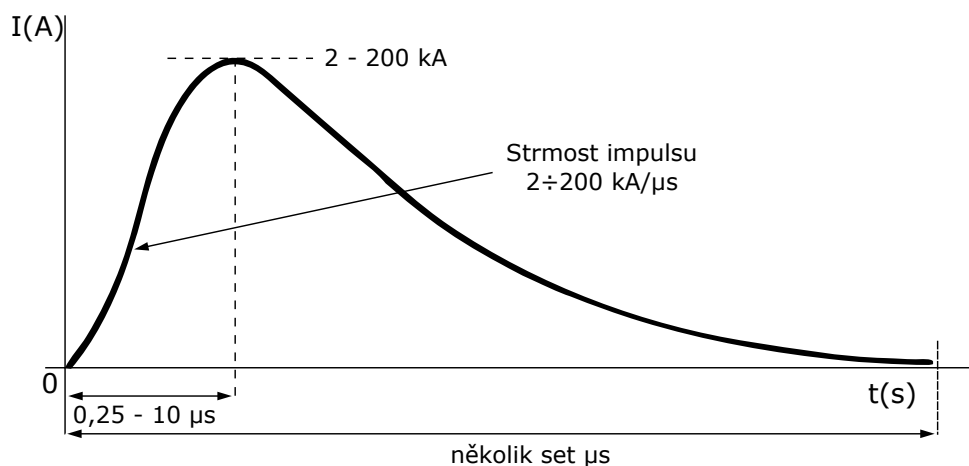
1.2.7 Energetické přepětí

Energetické přepětí lze rozdělit podle vzniku do dvou základních skupin a to na přírodní a uměle vytvořené.

1.2.7.a Atmosférický výboj (LEMP)

Hlavním přírodním energetickým přepětím je atmosférický výboj, který se označuje zkratkou LEMP z anglického názvu Lightning ElectroMagnetic Pulse. Výboj vzniká v bouřkách složitými procesy separace nábojů. V atmosféře se vytváří přebytek záporných

nábojů a postupně se přibližuje záporně ionizovaný kanál směrem k zemi. Když se dostatečně přiblíží k zemi, tak od země postupně vzroste kladně ionizovaný kanál. Když se kanály setkají, tak vytvoří velice vodivý ionizovaný kanál, kterým následně protéká velmi vysoký proud. Tento proud v 10 % případů překročí hranici 40 kA a v 1 % přesahuje 100 kA. Atmosférický výboj má dobu náběhu pulsu obvykle kolem 1 μs a dobu rozpadu přibližně 50 μs [4]. Celková energie atmosférického výboje může být až 10 MJ. Nejvyšší rušení vzniká ve frekvenčním pásmu 2 až 30 kHz a to až 140 dB μV . S rostoucí frekvencí klesá velikost rušení se strmostí 20 dB/dek až do frekvence cca. 100 MHz.

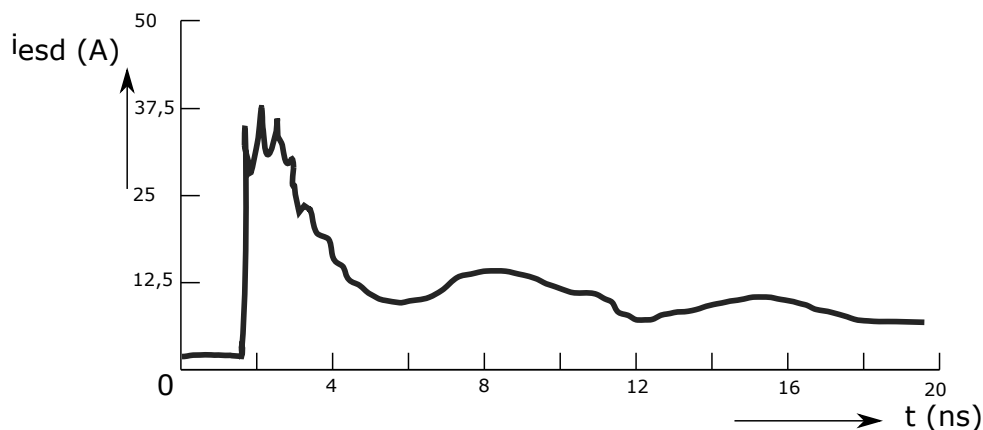


Obrázek 1.15: Proudový impuls při úderu blesku

Atmosférický výboj, který přímo zasáhne budovu, má za následek proudový impuls. Tento impuls protéká jak hromosvodem, tak se zároveň může uzavírat i skrz kovové konstrukce budovy. Blízko těchto kovových konstrukcí může být umístěn vnitřní elektrický nebo datový rozvod, na který se při nedosažení dostatečné vzdálenosti může induktivní vazbou zavléct atmosférický výboj. Tento jev lze nazvat jako nepřímý účinek blesku. Pro ochranu zařízení uvnitř budovy je nutné koordinovat přepětové ochrany s dokonalým zemním systémem. Důsledky atmosférického výboje mohou být silně rušivé až destruktivní pro blízka, ale i vzdálená zařízení. [1] [2] [3] [5]

1.2.7.b Lokální elektrostatické výboje (ESD)

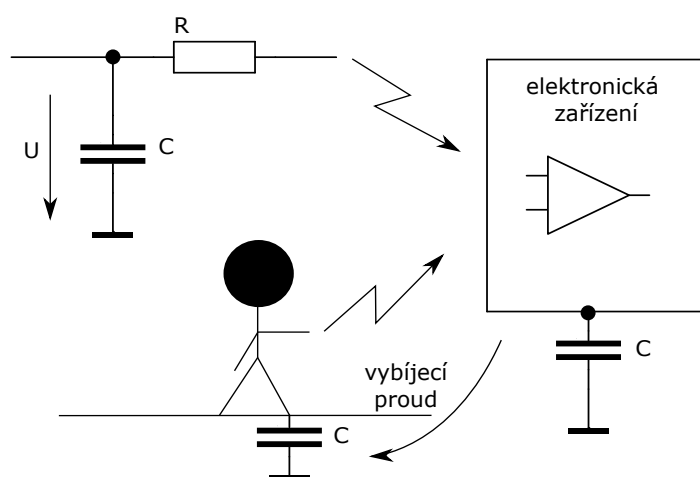
ESD vzniká při tření materiálů. Pokud se o sebe dva neutrální nevodivé materiály třou, přenáší se náboj z jednoho materiálu na druhý. Míra přenosu náboje závisí na triboelektrické řadě, která určuje relativní polaritu materiálu. To ovlivňuje, který materiál bude kladně a který záporně nabitý. Dále vznik ESD ovlivňují faktory jako je čistota, hladkost povrchu, kontaktní plocha a tlak, stupeň tření nebo rychlost separace. ESD se nemusí vyskytovat jen při kontaktu nevodivých materiálů s nevodivými, ale může se vyskytnout i při kontaktu s vodiči.



Obrázek 1.16: Proudový impuls při vybití elektrostatického náboje [3]

I když je energie ESD většinou velmi nízká, tak napětí může dosahovat až desítek kV. Tak vysoké napětí může být velice nebezpečné pro elektronická zařízení. Při současném trendu využití integrovaných obvodů, ve většině elektronických zařízení, je zřejmě největším nebezpečím pro zničení elektrostatický náboj vznikající při chůzi. Tření končetin o podlahu a tření částí oděvu může způsobit napětí až 15 kV. Pro zamezení vzniku ESD jsou nejdůležitější tyto podmínky:

- zaměstnanci obsluhující elektronická zařízení mají vhodné oblečení z hlediska elektrostatického napětí.
- Povrchy podlah, stolů a židlí jsou z antistatických materiálů.
- V místnostech pro práci s elektronickými přístroji je zavedena regulace vlhkosti.



Obrázek 1.17: Ilustrace vzniku lokálního elektrostatického výboje

Na obrázku 1.17 lze vidět, jak ESD působí při nevhodném výběru oblečení a podlah z hlediska elektrostatického napětí. Nad nákresem člověka je ekvivalentní obvod paže.

Ekvivalentní kapacita může být např. 100 pF a odpor vybíjené paže člověka může být např. 1 kΩ. Napětí, které vniklo, má až 15 kV. Z těchto parametrů lze dopočítat energii elektrostatického výboje:

$$W = \frac{1}{2}CU^2 = \frac{1}{2} \cdot (100 \cdot 10^{-12}) \cdot (15 \cdot 10^3)^2 \approx 11\text{mJ}. \quad (1.1)$$

Tato energie je velmi malá, avšak vybíjecí impuls je velmi rychlý a velký [3]. Vybíjecí impuls ESD je na první pohled podobný atmosférickému výboji, ale není tomu tak. Kvantitativní parametry jsou významně odlišné. Proud během 1 ns dosáhne několika ampér a poté několik desítek nanosekund klesá k 0 (viz obrázek 1.16). Následky výboje mohou být destrukční pro celé zařízení anebo výboj může poškodit jen určitou součástku. Výboje mohou být také mikroskopického charakteru a jejich působení nemusí být okamžité, ale mohou snižovat životnost zařízení postupně. [2] [3] [5]

1.2.8 Zvláštní rušení

1.2.8.a Nukleární elektromagnetický impuls (NEMP)

NEMP neboli nuclear electromagnetic pulse je tvarem velmi podobný atmosférickému výboji, ale má rozdílné kvantitativní parametry viz tabulka 1.1. Tento impuls vzniká při výbuchu jaderné nálože. Následky tohoto elektromagnetického pulsu jsou pro blízká zařízení zničující. Dosah destrukční zóny je závislý na typu jaderné zbraně a na výšce nad zemí, ve které jaderná nálož exploduje.

Tabulka 1.1: Srovnání parametrů LEMP a NEMP [3]

	E_{\max} (kV/m)	H_{\max} (A/m)	Náběžná hrana (ns)	Kmitočtové spektrum	Dosah účinků
LEMP	10 ÷ 100	100 ÷ 1000	100 ÷ 10000	1 kHz ÷ 5 MHz	jednotky km
NEMP	30 ÷ 100	100 ÷ 1000	5 ÷ 8	0,1 ÷ 100 MHz	stovky až tisíce km

Časový a prostorový vývoj NEMP je velmi složitý, protože zahrnuje interakci vysokoenergetických částic s různými materiály. K této složitosti přispívají další efekty, například efekty způsobené interakcí neutronů a zkreslení trajektorií nabitých částic v důsledku magnetického pole Země. Nukleární elektromagnetický puls lze klasifikovat na tři typy:

- výbuchy ve vysokých nadmořských výškách (>100 km) označovány jako výškový EMP (HEMP). Charakteristickým rysem HEMP je, že ovlivňuje velmi rozsáhlou geografickou oblast, a proto představuje současné ohrožení velkého počtu systémů. Po tomto ostrém pulsu následuje pomalejší a méně závažnější elektromagnetické pole, které trvá přibližně stovky sekund. Rozsáhlé systémy, jako jsou sítě pro přenos energie, jsou zvláště citlivé na tento druh impulsu.

- Výbuchy blízko země (SREMP), SREMP označujeme výbuchy, které mají silné elektromagnetické pole s mnohem omezenějším geografickým rozsahem než HEMP.
- Systémově generovaný EMP (SGEMP), SGEMP zahrnuje interakci dopadajících částic a fotonů s pouzdry zařízení a tak vzniká velmi vysoké pole a poškození elektronických součástí.

Pro omezení dopadu NEMP na elektrická zařízení je možné použít elektromagnetický pulsní filtr [6].

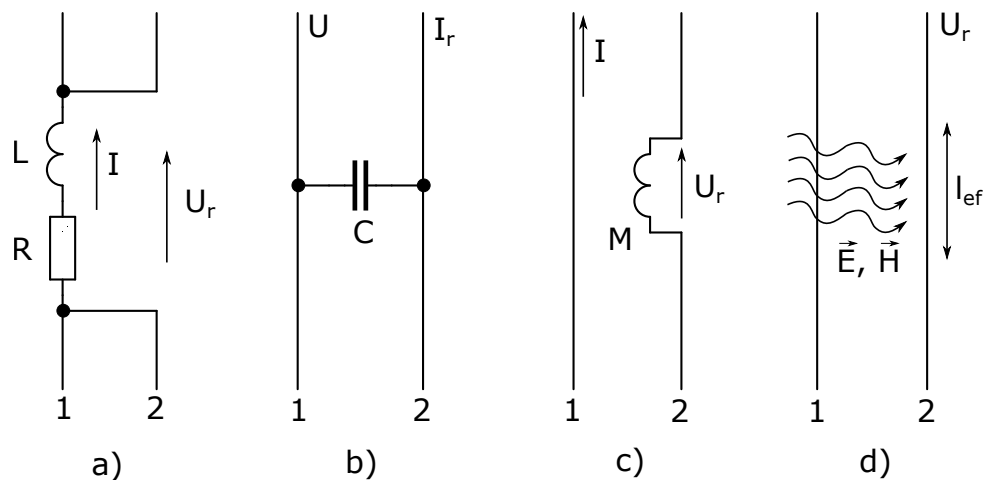
1.2.8.b Rušení mimozemského původu

Jako toto rušení se převážně uvažuje rušení způsobené Sluncem. Slunce vlivem erupcí a koronových výbojů vysílá k Zemi sluneční vítr složený z nukleárních částic. Částice při srážce s ionty a molekulami v zemské atmosféře vytvářejí tzv. geomagnetické bouře. Kosmické záření, které dopadá na Zemi, může být rušivé zejména pro velmi vysoké kmitočty. Tato rušení bývají často širokopásmová. Pro omezení mimozemského rušení se používají stíněné vodiče. [2] [3] [4] [5]

2 Elektromagnetické vazby rušivých signálů

Elektromagnetické vazby je nutné znát, aby bylo možné zjistit, jak se rušivý signál šíří a jak je možné tento signál potlačit pod normou požadovanou mez nebo ho vhodně eliminovat. Pokud by se podařilo eliminovat všechny přenosové vazby, tak by vznikl dokonale kompatibilní systém. Z fyzikálního hlediska lze rozdělit elektromagnetické vazby na:

- galvanickou (obrázek 2.1a)
- kapacitní (obrázek 2.1b)
- induktivní (obrázek 2.1c)
- vyzařováním (obrázek 2.1d)



Obrázek 2.1: Základní druhy elektromagnetických vazeb: a) galvanická, b) kapacitní, c) induktivní, d) vyzařováním, vlastní zpracování dle [9]

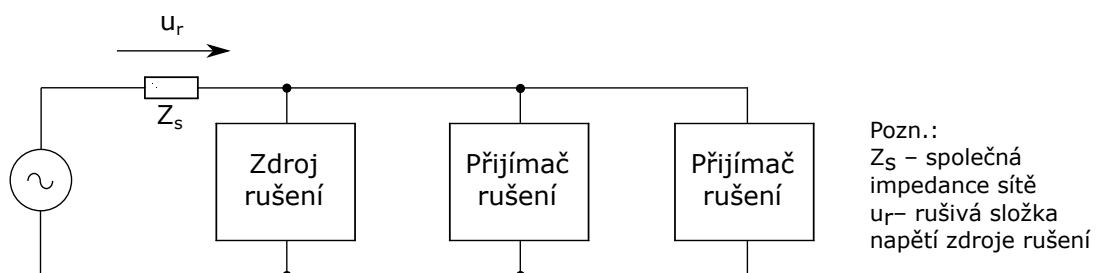
2.1 Galvanická vazba

Také lze nazvat jako vazba přes společnou impedanci. Je to vazba mezi dvěma elektrickými systémy se společnou impedancí, skrz kterou se uzavírají proudové smyčky těchto systémů. Společná impedance se většinou skládá ze sériového RL obvodu. Na impedanci vzniká úbytek napětí vlivem průchodu proudu z prvního obvodu. Vzniklý úbytek napětí, vytvořen proudem prvního obvodu, může působit jako rušivé napětí pro druhý obvod. Frekvence proudu je rozhodující faktor v tom, jaká část impedance se více uplatní pro

přenos rušivého napětí. Pro nízké kmitočty bude mít hlavní vliv odporový člen, pro vysoké kmitočty bude rozhodující induktivní člen. Při vysoké frekvenci vyvolá indukčnost výrazné napěťové špičky. Galvanické vazby lze dále rozdělit na:

- **Galvanická vazba se společnou impedancí napájecí sítě**

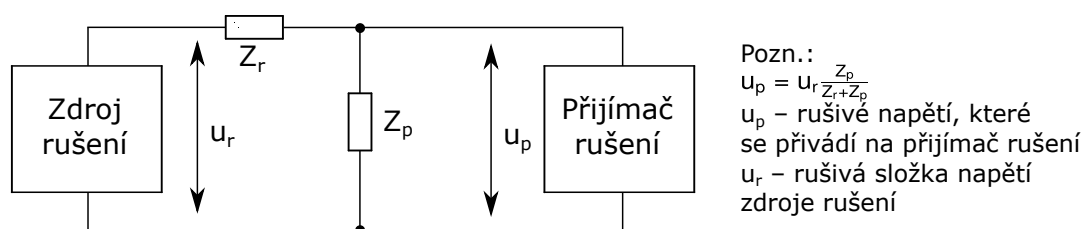
Obecně se tato vazba vyskytuje na všech místech, kde ve společném vedení procházejí napájecí proudy jak od rušeného zařízení, tak i zdroje rušení. Na úseku, kde společně procházejí tyto proudy, vzniká úbytek napětí od rušivého proudu. Napěťový úbytek lze následně přirovnat k modulačnímu napětí v amplitudové modulaci. Tento druh vazby nemusí být nutně jen na vedení, ale může vznikat i ve společném napájecím, distribučním anebo oddělovacím transformátoru.



Obrázek 2.2: Galvanická vazba společnou impedancí napájecí sítě, vlastní zpracování dle [1]

- **Galvanická vazba společnou impedancí mezi zdrojem a přijímačem rušení**

Tento typ galvanické vazby se nejčastěji vyskytuje v obvodech pro zpracování signálu. To mohou být například řídicí obvody měničů, které jsou připojeny z napájecí sítě, snímače neelektrických veličin anebo převodníky signálu.

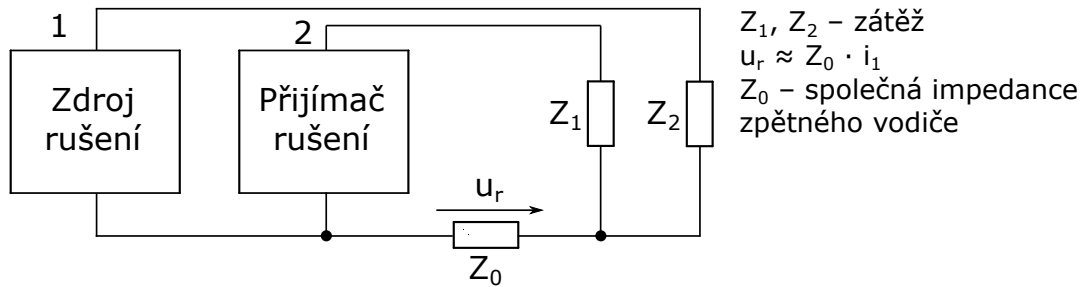


Obrázek 2.3: Galvanická vazba společnou impedancí mezi zdrojem a přijímačem rušení, vlastní zpracování dle [1]

- **Galvanická vazba společnou impedancí zpětného vodiče**

Tento druh vazby je velmi podobný galvanické vazbě se společnou impedancí sítě. Hlavní rozdíl spočívá v místě vazby. Tentokrát je vazební impedance v místě zpětného vodiče. V praxi se vazba se společnou impedancí zpětného vodiče nachází většinou u bloků technického zařízení, kde jsou chybně odděleny logické obvody. Další místo, kde se v praxi může vyskytnout tento druh rušení je měřicí technika a

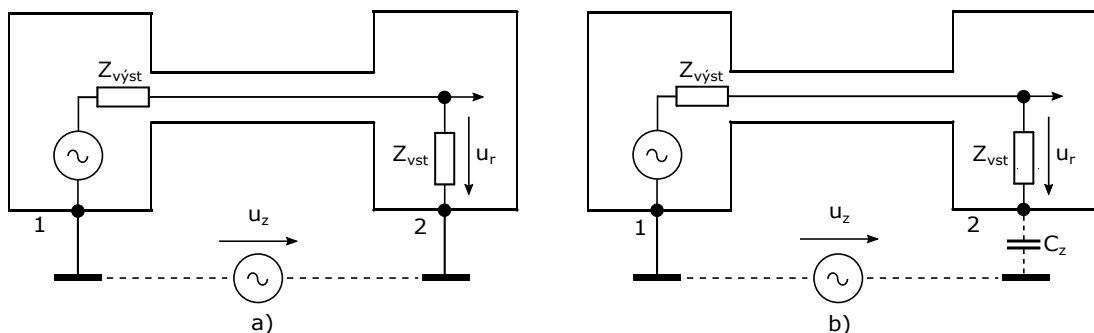
zpracování dat. Vazba vzniká nedůsledným oddělením proudových smyček analogových a digitálních obvodů (přijímač rušení) od proudových smyček stabilizátorů a vyhlazovacích filtrů usměrňovače (zdroj rušení). V závislosti na citlivosti přijímače rušení se musí přikládat větší pozornost na oddělení proudových smyček. Tato skutečnost je dána tím, že zpětný vodič je často považován za vztažný vodič s nulových referenčním potenciálem.



Obrázek 2.4: Galvanická vazba společnou impedancí zpětného vodiče, vlastní zpracování dle [1]

- **Galvanická vazba společnou impedancí zemní smyčky**

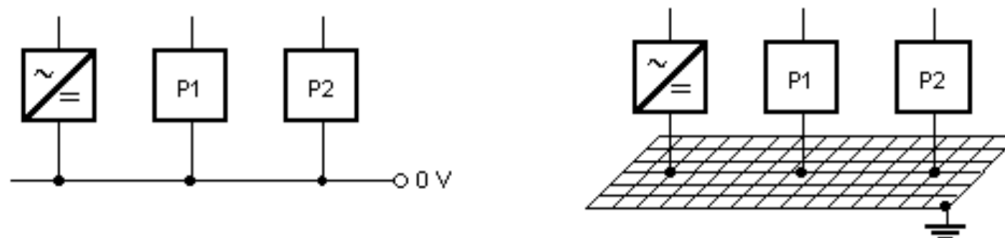
Tento druh parazitní vazby často vzniká u systémů, které mají oddělené zemnění ve dvou různých bodech. Nahodilé rušivé zemní napětí (u_z) vzniká působením zemních proudů mezi těmito dvěma body. Následně (u_z) přes uzavřenou zemní smyčku vyvolá na vstupu spotřebiče rušivé napětí (u_r). Rušivé napětí lze omezit tím, že se zvýší impedance zemní smyčky. Pro nízkofrekvenční signály lze systém uzemnit v jednom bodě a tím galvanicky rozpojit zemní smyčku. V místě zaniklého druhého bodu uzemnění vznikla malá zemní kapacita proti společné zemi. Celkový útlum uzemněného systému v jednom bodě je pro nízké frekvence velmi vysoký. Avšak při vzrůstajícím kmitočtu se útlum smyčky snižuje až na stejnou hodnotu, jakou měla galvanicky uzavřená smyčka. Další možnosti pro omezení zemní smyčky a zmenšení rušivého proudu smyčkou jsou: oddělovací transformátor, feritové kroužky, vedení s útlumovým pláštěm, optočlen atd. [1] [3] [5] [7] [8]



Obrázek 2.5: Galvanická vazba a) uzavřenou zemní smyčkou, b) rozpojenou zemní smyčkou

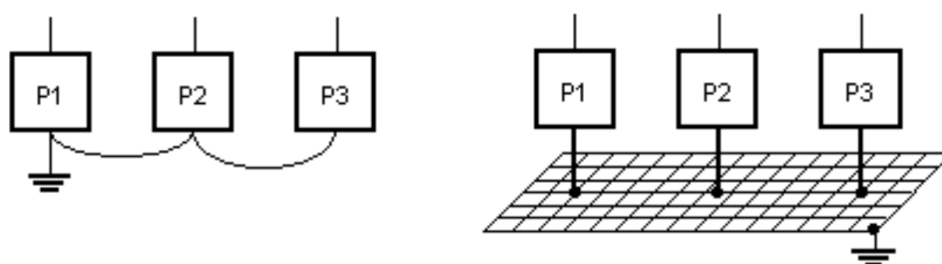
Pro omezení již zmíněných galvanických vazeb jsou využívány tyto postupy:

1. Velikost společného zemnicího vodiče nebo zemnicí plochy musí být dostatečně dimenzována.



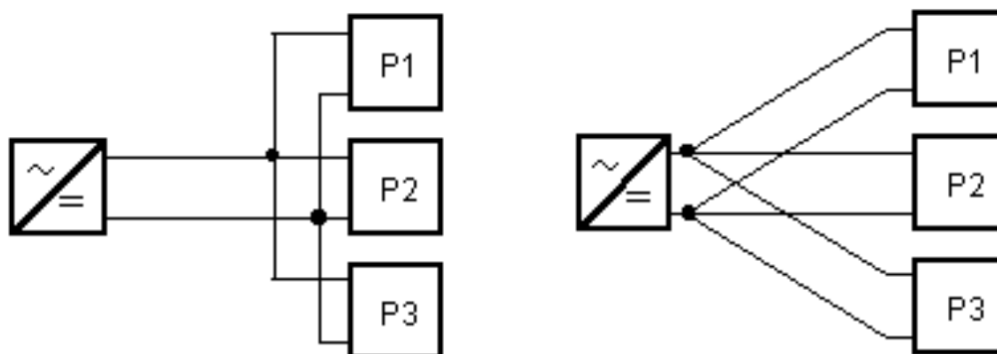
Obrázek 2.6: Zařízení připojená ke společnému zemnicímu vodiči (vlevo - nevhodné řešení, vpravo - lepší řešení) [3]

2. Zařízení připojit masivním vodičem a přímou cestou ke společnému zemnicímu vodiči .



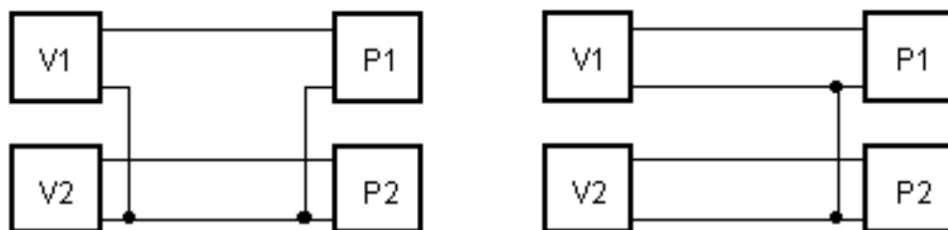
Obrázek 2.7: Dostatečné dimenzování společného zemnicího vodiče (vlevo - nevhodné řešení, vpravo - lepší řešení) [3]

3. Omezit slučování napájecího vodiče pro různá zařízení, každý blok má vlastní napájecí kabel.



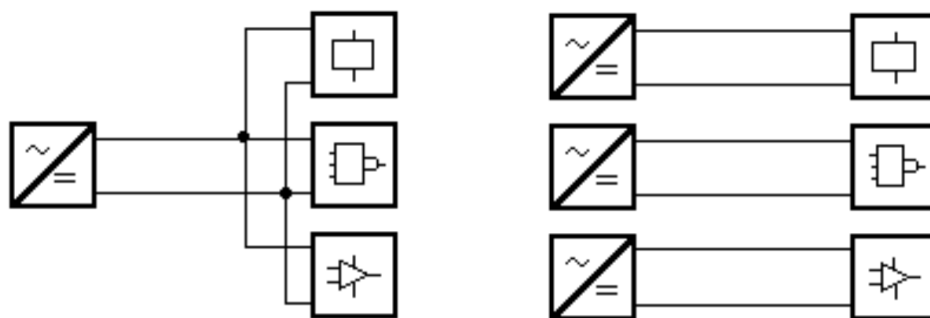
Obrázek 2.8: Připojená zařízení k napájecímu zdroji (vlevo - nevhodné řešení, vpravo - lepší řešení) [3]

4. Neslučovat společný vodič v případě signálových linek.



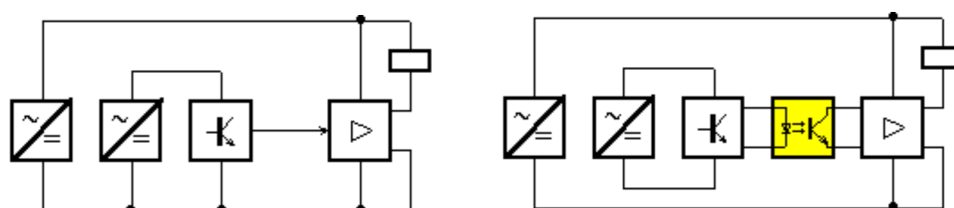
Obrázek 2.9: Propojení zemních vodičů u signálových linek (vlevo - nevhodné řešení, vpravo - lepší řešení) [3]

5. K napájení různých elektronických zařízení využít vlastní napájecí zdroj.



Obrázek 2.10: Realizace napájení různých elektronických zařízení (vlevo - nevhodné řešení, vpravo - lepší řešení) [3]

6. Tam, kde je to možné, galvanicky oddělit výkonové a signálové obvody.



Obrázek 2.11: Propojení výkonových a signálových obvodů (vlevo - nevhodné řešení, vpravo - lepší řešení) [3]

2.2 Induktivní vazba

Induktivní vazba využívá princip elektromagnetické indukce. Pokud tedy jedním elektrickým obvodem protéká střídavý elektrický proud, tak se v druhém elektrickém obvodu indukují rušivé napětí skrze časově proměnné magnetické pole. Stejný princip využívá

například transformátor. Velikost rušivého napětí je dána Faradayovým indukčním zákonem:

$$U_r = -\frac{d\phi}{dt} \approx -\frac{\Delta\phi}{\Delta t} = -S \cdot \frac{\Delta B}{\Delta t} = -\mu_0 \cdot S \cdot \frac{\Delta H}{\Delta t}, \quad (2.1)$$

kde S je plocha smyčky tvořená vodičem rušeného obvodu.

Pokud je známa vzdálenost vodičů r a vodič, kterým protéká proud má kruhový průřez, lze z první Maxwellovy rovnice doplnit intenzitu magnetického pole jako:

$$\begin{aligned} \oint_c \mathbf{H} \, dl &= I + \frac{d\Psi}{dt} \approx H \cdot l = I \\ H \cdot 2\pi r &= I \\ H &= \frac{I}{2\pi r}. \end{aligned} \quad (2.2)$$

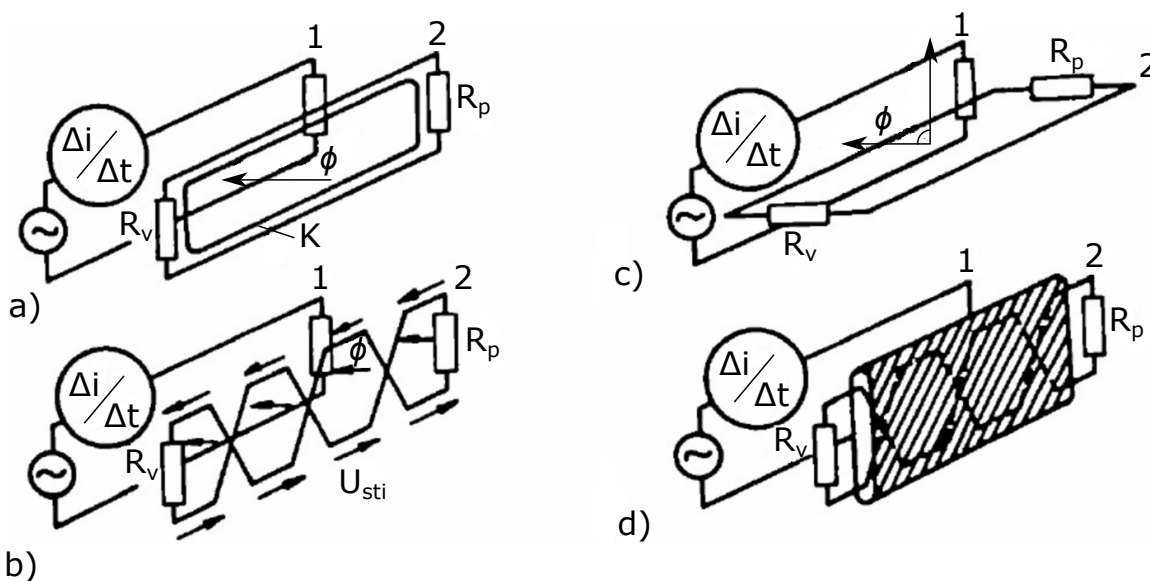
Po dosazení z rovnice 2.2 do rovnice 2.1 vychází vzorec pro rušivé napětí:

$$U_r \approx -\frac{\mu_0 S}{2\pi r} \cdot \frac{\Delta I}{\Delta t}. \quad (2.3)$$

Z tohoto vzorce je patrné, jak lze omezit induktivní parazitní vazbu. Je to:

- zkrácení délky souběžných vodičů,
- zvětšení vzdálenosti vodičů obou obvodů,
- zmenšení plochy smyčky vodiče rušeného obvodu (např. otočením rušené smyčky kolmo k rušící smyčce)

Praktické způsoby omezení induktivní vazby jsou uvedeny na obrázku 2.12.



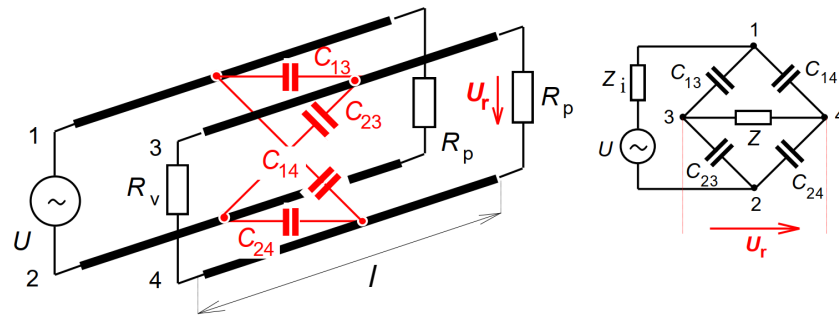
Obrázek 2.12: Způsoby omezení induktivní vazby: a) omezení induktivní vazby závitem K nakrátko; b) kompenzace induktivní vazby zkroucením vodičů odvodu přijímače; c) omezení induktivní vazby kolmým natočením vazebních smyček d) omezení induktivní vazby stíněním obvodu přijímače. [3]

Ve vzorci 2.3 je významný poslední člen, tj. změna proudu za čas. Tento člen je zejména nebezpečný pro velké proudy, které mají rychlé časové změny, jako je to například u atmosférického výboje nebo u lokálního elektrostického výboje. Při těchto výbojích dochází k velkým indukovaným napětím, které mohou způsobit poškození elektronických zařízení. [1] [3] [5] [7] [8]

2.3 Kapacitní vazba

Kapacitní parazitní vazba vzniká kvůli existenci parazitních kapacit mezi souběžnými vodiči anebo mezi vodičem a zemí. Obecně lze napsat, že kapacitní vazba vzniká mezi vysokoimpedančními obvody s odlišnými potenciály. Kapacitní vazbu lze rozdělit na další tři druhy:

- Kapacitní vazba galvanicky oddělených obvodů



Obrázek 2.13: Parazitní kapacitní vazba galvanicky oddělených obvodů (vlevo), náhradní schéma kapacitní vazby galvanicky oddělených obvodů (vpravo) [5]

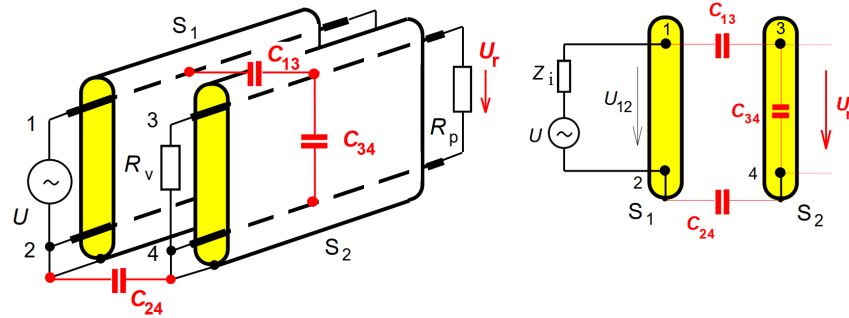
Na obrázku 2.13 je znázorněna kapacitní vazba galvanicky oddělených obvodů. Vodiče 1 a 2 jsou zdroj rušení. Vodiče 3 a 4 jsou přijímač rušení. Pokud se podíváme na náhradní schéma, tak lze rušivé napětí ovlivnit vyvážením kapacitního můstku (viz obrázek 2.13) podle rovnice:

$$\frac{C_{13}}{C_{23}} = \frac{C_{14}}{C_{24}}. \quad (2.4)$$

Náhradní schéma lze takto sestavit pod podmínkou, že vlnová délka rušivého signálu je významně delší než délka obou vedení. Omezit rušivé napětí lze zkroucením obou párů vodičů a to je příhodné i pro snížení indukivní vazby. Další způsob snížení kapacitní vazby je využití stíněných vodičů (viz. obrázek 2.14). Vodivá stínění jsou propojena v rušivém i rušeném obvodu s jedním vodičem z obvodu. Velikost rušivého napětí, které se přenesou na rušený obvod, závisí na poměru kapacit $\frac{C_{13}}{C_{34}}$ a $\frac{C_{24}}{C_{34}}$ a to na základě vztahu:

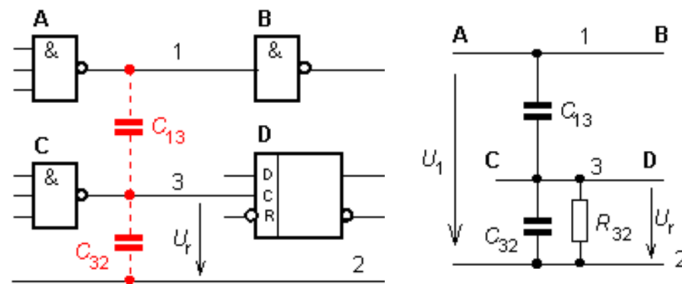
$$U_r = U_{12} \cdot \frac{1}{1 + \frac{C_{34}}{C_{13}} + \frac{C_{34}}{C_{24}}}. \quad (2.5)$$

Z tohoto vztahu vyplývá, že omezení vazby stíněním je tím lepší, čím nižší jsou kapacity C_{12} , C_{13} ve srovnání ke kapacitě C_{34}



Obrázek 2.14: Omezení parazitní kapacitní vazby galvanicky oddělených obvodů za pomoci stíněných vodičů [5]

- Kapacitní vazba obvodů se společným vodičem



Obrázek 2.15: Kapacitní vazba obvodů se společným vodičem [3]

Kapacitní vazba obvodů se společným vodičem se velmi často vyskytuje v číslicových a analogových obvodech. Tato vazba je naznačena na obrázku 2.15. Jsou zde signálové vodiče 1, 3 a společný referenční vodič 2. Kvůli parazitní kapacitě C_{13} je ovlivňován vstup do obvodu **D** od výstupu z obvodu **A**. Rušivé napětí je frekvenčně závislé a u tohoto typu vazby lze definovat:

$$U_r = U_1 \cdot \frac{C_{13}}{C_{13} + C_{32}} \quad (2.6)$$

Pro číslicové obvody, kde jsou signály zejména pulsního charakteru, lze odvodit přibližný vztah:

$$U_r \approx R_{32} \cdot I_r = R_{32} \cdot C_{13} \cdot \frac{\Delta u_1}{\Delta t} \quad (2.7)$$

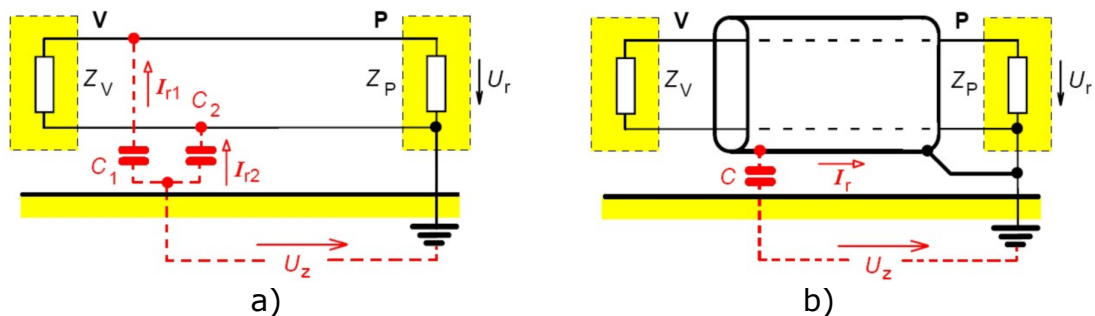
Pro omezení vazby se využívají:

- Snížení odporu mezi vodiči 2 a 3 na minimum
- Omezení kapacity C_{13} (oddálení signálových vodičů a zkrácení souběhu na minimum)

- Snížení všech časových změn signálů v obvodu na co nejnižší úroveň postačující k správnému chodu obvodu
- Zvýšení kapacity C_{32} (přiblížení signálového a vztažného vodiče)
- Elektricky odstínit signálové vodiče 1 a 3

• Kapacitní vazba vůči zemi

Tato vazba vzniká, pokud je mezi vedením a společnou zemí velká kapacita. Na obrázku 2.16a jsou tyto kapacity značeny jako C_1 a C_2 . Rušivé napětí v zemi (U_z) se může průtokem rušivých proudů skrz parazitní kapacity projevit jako rušivé napětí U_r na vstupních svorkách rušeného zařízení **P**. Omezení této vazby lze realizovat stíněním přívodního vedení do rušeného zařízení. Pokud by stínění bylo dokonale vodivé, tak by parazitní kapacitní vazba byla omezena úplně. Prakticky to však není možné. Pro vyšší frekvence rušivých signálů tak klesá účinnost stínění. Rušivé napětí, které vzniklo jako průchod rušivého proudu nedokonale vodivým stíněním, se přenáší na vstup zařízení **P**. Užití stínění ale není bezvýznamné. Pokud srovnáme rušivé napětí bez stínění a se stíněním, tak je napětí při stínění přívodních kabelů výrazně nižší. [1] [3] [5] [7]



Obrázek 2.16: a) Kapacitní vazba vůči zemi, b) eliminace kapacitní vazby vůči zemi [3]

2.4 Vazba vyzařováním

Vazba vyzařováním neboli vazba elektromagnetickým polem je typická pro větší vzdálenosti mezi rušeným a rušivým zařízením. To jsou vzdálenosti, ve kterých již není možné uvažovat kapacitní ani induktivní vazbu. Vzdálenost, za kterou je vazba klasifikována jako vazba vyzařováním, je dána vztahem:

$$r = \frac{\lambda}{2\pi} = \frac{c}{2\pi f}, \quad (2.8)$$

kde c je rychlost světla a f je frekvence rušivého signálu. Jako zdroj rušení lze uvažovat blízké vysílače, atmosférická rušení nebo různé druhy průmyslových rušení. Tyto rušivé signály se typicky šíří skrz vazbu elektromagnetickým polem. Elektromagnetické vlny se

indukují na vodiče zařízení a projevují se v podobě rušivého napětí. V signálových obvodech může toto rušivé napětí až zcela překrýt užitečné signály. Pokud je známa vzdálenost od zdroje a výkon, který vysílá rušivé zařízení, tak lze zapsat vztah pro intenzitu elektrického pole:

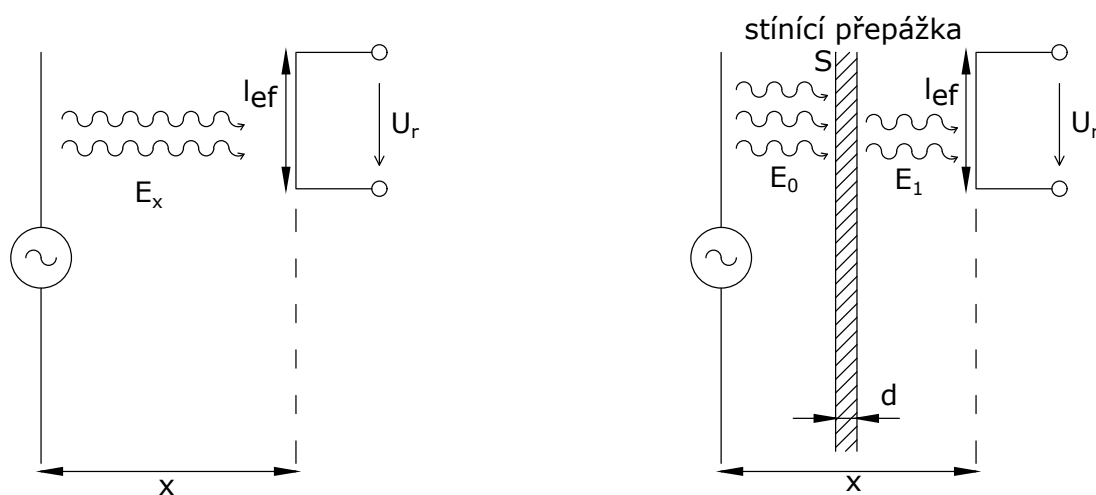
$$E_x = 0,3 \cdot \frac{\sqrt{P}}{x}. \quad (2.9)$$

Tento vztah platí jen pro vzdálenosti $x \gg \lambda/2\pi$, kde λ značí vlnovou délku signálu. Následně lze z E_x dopočítat hodnotu rušivého napětí:

$$U_r = E_x \cdot l_{ef}, \quad (2.10)$$

kde l_{ef} je efektivní délka přijímací antény.

Jako efektivní ochrana proti této vazbě se využívá stínící kryt. Energie, která dopadala na zařízení, se při využití stínícího krytu částečně odrazí a pohltí. Zbylá část, která prošla skrz kryt, je zeslabena na hodnotu E_1 . Jak velká je účinnost stínění závisí zejména na vodivosti, permeabilitě a tloušťce přepážky a také na kmitočtu rušivého signálu. [1] [3] [5]



Obrázek 2.17: Vazba elektromagnetickým polem (vlevo), omezení vazby elektromagnetickým polem (vpravo), vlastní zpracování dle [3]

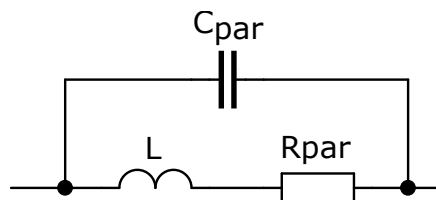
3 Zařízení pro ochranu před rušivými signály

Zařízení pro ochranu před rušivými signály lze dle základního přenosového řetězce, který je znázorněn na obrázku 1.1, využívat ve třech částech tohoto řetězce. To jsou zařízení umístěná přímo u vysílače, přijímače rušení anebo ve vazební cestě. Tyto varianty jsou využívány dle konkrétního případu rušení, ale pokud je to možné, tak je nejvýhodnější potlačovat rušení přímo u jeho zdroje. V mnoha případech však nelze potlačit zařízení přímo u zdroje, jelikož rušení je na stejném kmitočtu jako užitečný signál nebo dokonce užitečný signál pro jedno zařízení je rušivý signál pro jiná zařízení (např. televizní vysílače). Nejúčinnější varianta, pokud je to možné, je odstranit rušení u zdroje, přijímače a také v přenosové cestě.

Pro omezení rušivých signálů po vedeních, tj. přes galvanickou, induktivní a kapacitní vazbu, se převážně využívají odrušovací tlumivky, kondenzátory, kmitočtové filtry a přepětové ochrany. Omezení rušivých signálů přes vazbu vyzařováním se realizuje pomocí stínění přijímacího zařízení.[5] [9]

3.1 Odrušovací tlumivky

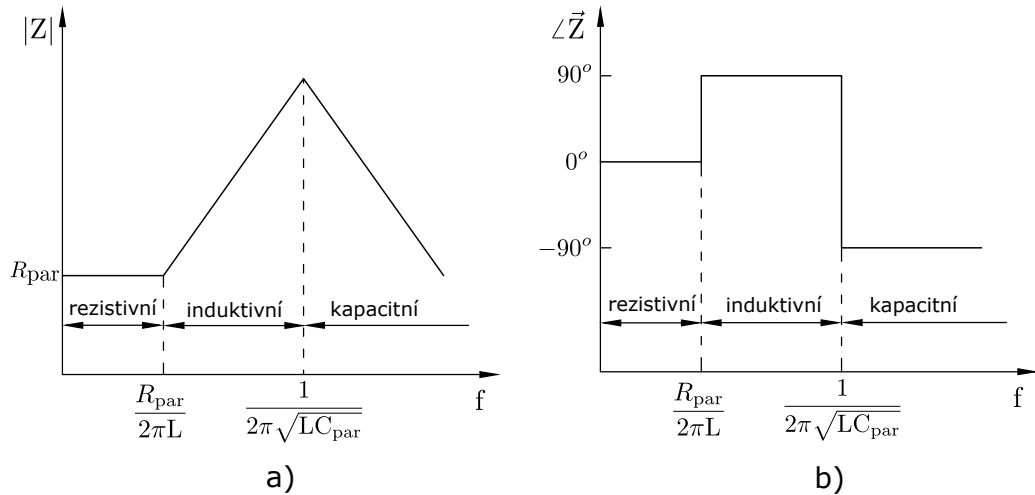
Odrušovací tlumivky se na první pohled mohou zdát jako jednoduchá součástka, ale jejich návrh je poměrně složitá věc. V odrušovací technice patří tlumivky mezi nejobemnější pasivní prvky. Tlumivky jsou velmi drahé, hlavně v případech, kdy je nutné speciálně vyrobit tlumivku pro konkrétní případ. To jsou případy zařízení o větších výkonech nebo zařízení s vyššími nároky na EMC. Samotné tlumivky se zejména zapojují do proudových obvodů odrušovaného zařízení a tak jejich velikost odpovídá velikosti procházejícího proudu.



Obrázek 3.1: Náhradní schéma reálné tlumivky

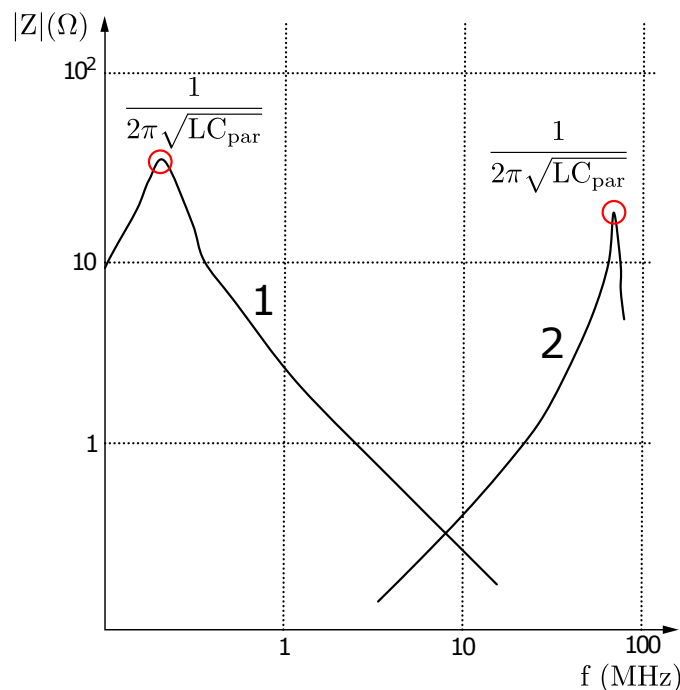
Výroba ideální tlumivky, která obsahuje pouze indukčnost, se v praxi nedá realizovat. Tlumivku vždy tvoří RLC obvod jako na obrázku 3.1 s parazitním odporem R_{par} a kapacitou C_{par} . Velikosti těchto parazitních veličin se odvíjejí od výroby tlumivky. Pokud se například navíjejí závity ve vrstvách přes sebe, aby se zkrátila délka induktoru a zmenšily

se rozměry, tak se tímto výrobním procesem zvýší parazitní kapacita tlumivky, což může negativně ovlivnit její vlastnosti. Tento jev lze vidět v Bodeho diagramu na obrázku 3.2, který je znázorněn pouze pro demonstraci a je zřejmé, že impedanční úhel nepřechází skokem z 90° na -90° . Impedance mění charakter se zvyšující se frekvencí postupně a to z rezistivního charakteru v induktivní a následně v kapacitní charakter.



Obrázek 3.2: Bodeho diagram impedance a) amplituda b) fáze

Znázornění, které je bližší realitě, lze najít na obrázku 3.3. Zde jsou znázorněny impedanční charakteristiky dvou tlumivek o různých indukčnostech. Indukčnost první tlumivky je 10 mH a indukčnost druhé tlumivky je 6 μH . Lze vidět, že se zvyšující se indukčností klesá rezonanční frekvence tlumivky. Při použití velkých indukčností je dobré nezapomenout na tento jev [4].



Obrázek 3.3: Velikost impedance v závislosti na frekvenci: (1) indukčnost 10 mH; (2) indukčnost 6 μH

Další parametr, na který je nutné brát ohled, je jakost tlumivky(Q). Jakost ovlivňuje kmitočtový průběh impedance a velikost ztrát v tlumivce. Tlumivka s nízkým Q nemá výrazný přechod mezi rezonančním bodem a zbytkem impedanční charakteristiky. V odrušovací tlumivce jsou vyžadovány větší ztráty a tudíž i menší Q .

Pokud je tlumivka přesycená, tak místo odrušovacího zařízení může být zdrojem rušení a to hlavně v nízkofrekvenční oblasti.

Na základě již zmíněných skutečností lze definovat obecné požadavky na výrobu dobré odrušovací tlumivky. Tyto požadavky jsou:

- velká indukčnost při co nejmenších rozměrech tlumivky a malém počtu závitů. Přitom je nutno uvažovat cenu a hmotnost tlumivky.
- Minimální parazitní kapacita tlumivky. To lze zajistit vysokým rezonančním kmitočtem.
- Zajistit co největší činné ztráty a tím i větší útlum mimo oblast síťových kmitočtů ($Q < 1$). Například typická hodnota vložného útlumu u kmitočtů frekvence kolem 100 kHz je mezi 15 až 20 dB. (vložený útlum, viz níže)
- Tlumivka, ve které je využito feromagnetické jádro, se nesmí přesycovat při pracovních proudech.
- Permeabilita a tvar magnetického obvodu by měla být taková, že tlumivka dosáhne maximální indukčnosti při minimálním počtu závitů.

Důležitý zmíněný parametr tlumivky, odrušovacích kondenzátorů anebo filtrů je vložený útlum L , který je nejčastěji udáván v decibelech. Základní vztah pro výpočet vložného útlumu lze zapsat jako:

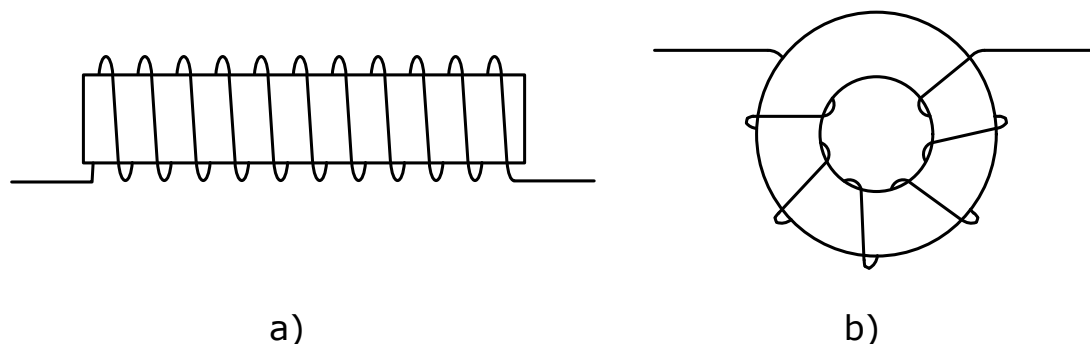
$$L = 20 \cdot \log \left| \frac{U_{20}}{U_2} \right|, \quad (3.1)$$

kde U_2 je napětí na zařízení při použití filtru a U_{20} je stejné napětí bez přítomnosti filtru. Do tohoto vztahu lze dosazovat impedance podle konkrétních obvodů. Lze tak zjistit konkrétní hodnoty vložného útlumu z uspořádání prvků obvodu. [1] [2] [4] [9]

Odrůšovací tlumivky lze rozdělovat podle konstrukce, účelu použití, ale hlavní rozdělení je podle druhu potlačovaného rušení:

- **Tlumivky pro potlačení symetrické složky rušení**

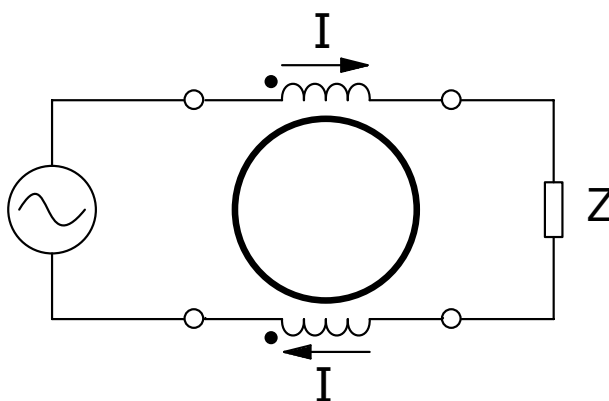
V tomto případě se tlumivky zapojují podélně do proudových obvodů a proud zde protéká stejným směrem. Většinou se využívají pro omezení parazitních vazeb mezi signálovými a řídicími obvody. V tomto případě je nejčastějším typem tlumivka s feromagnetickým jádrem a to jak s otevřeným magnetickým obvodem (obrázek 3.4a), tak i s uzavřeným (obrázek 3.4b).



Obrázek 3.4: a) Odrušovací tlumivka na otevřeném jádru, b) Odrušovací tlumivka na uzavřeném jádru

- **Tlumivky pro potlačení nesymetrické složky rušení**

Jinak nazývané jako tlumivky s proudovou kompenzací. Fázové vodiče a zpětný vodič jsou navinuty na jednom společném jádře. Vodiče jsou vinuty ve stejném směru jako na obrázku 3.5b. To má za důsledek, že magnetické toky rušivých proudů, které mají opačný směr, se vzájemně vyruší. [5] [9]



Obrázek 3.5: Odrušovací tlumivka s proudovou kompenzací

Při využití vícestupňových tlumivek je nutné uvažovat také rozložení tlumivek v prostoru. Pokud jsou tlumivky umístěny blíže k sobě, tak se vliv na vložný útlum zvyšuje z důvodu vzájemné indukčnosti. Útlum lze také ovlivnit úhlem natočení tlumivky vzhledem k druhé tlumivce a způsobem instalace. Při srovnání je vliv změny vzdálenosti větší než změna úhlu. Pro snížení vlivu na vložný útlum by měla být vzdálenost mezi tlumivkami co největší [10]. Pro levné, snadné a účinné omezení vf rušení v napájecím vedení lze využít indukční útlumové členy neboli feristory. Feristor se navleče na rušící vodič a utlumuje rušení. Pokud není feristor zvolený správně, tak se může stát dodatečným zdrojem rušení. Důležité jsou materiály, ze kterých je tvořeno jádro feristoru. Tyto materiály musí mít velké ztráty a velkou počáteční permeabilitu, aby feristor pracoval správně [1]. Typické provedení feristoru lze vidět na obrázku 3.6.



Obrázek 3.6: Typické provedení feristoru umístěného kolem vodiče [11]

3.2 Odrušovací kondenzátory

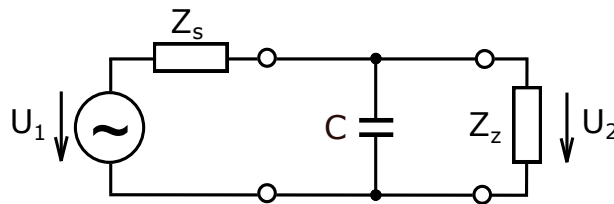
Zapojení odrušovacích kondenzátorů je paralelně ke vstupní impedanci odrušovaného zařízení a vnitřní impedanci sítě jako např. u obrázku 3.7. Pro toto zapojení lze zapsat vložný útlum odrušovacího kondenzátoru a to z rovnice 3.1. Útlum je roven:

$$L = 20 \cdot \log \left| \frac{U_{20}}{U_2} \right| = 20 \cdot \log \left| 1 + j\omega C \frac{Z_S \cdot Z_Z}{Z_S + Z_Z} \right|, \quad (3.2)$$

kde napětí U_{20} je napětí na zátěži Z_Z bez přítomnosti filtru a napětí U_2 je napětí na výstupu filtru. Vložný útlum lze rozdělit na dvě oblasti:

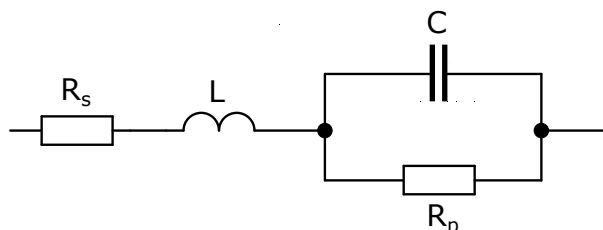
$$\begin{aligned} \text{pro } \omega C \ll 1/(Z_S || Z_Z) &\Rightarrow L \approx 0 \text{ (dB)} \\ \text{pro } \omega C \gg 1/(Z_S || Z_Z) &\Rightarrow L \approx 20 \cdot \log \left(\omega C \frac{Z_S \cdot Z_Z}{Z_S + Z_Z} \right) \text{ (dB)} \end{aligned} \quad (3.3)$$

Z výsledků rovnice 3.3 je zřejmé, že odrušovací kondenzátory jsou účinné v případech, kdy je reaktance odrušovacího kondenzátoru menší než vnitřní impedance napájecí sítě a zdroje rušení. Využití kondenzátorů je optimální pro vysokoimpedanční sítě a s klesající impedancí klesá i účinnost odrušovacího kondenzátoru.



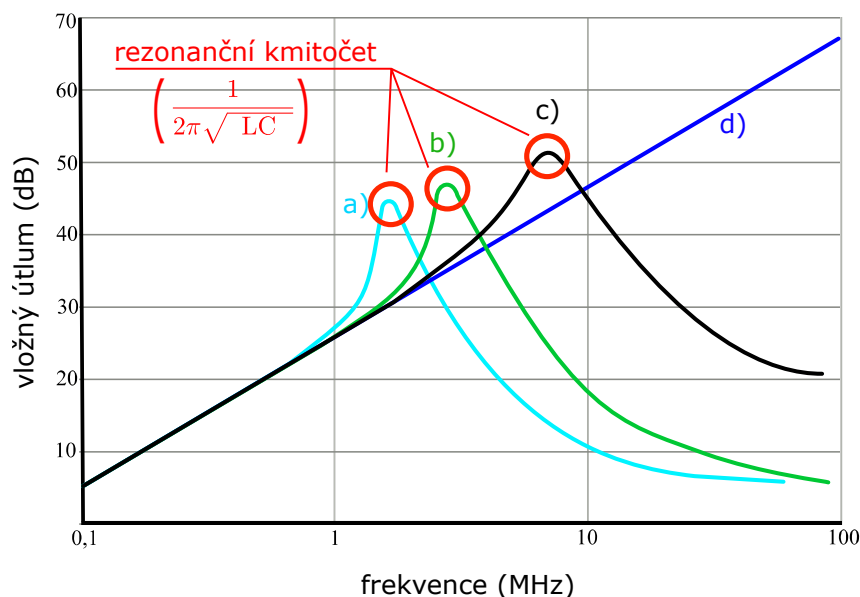
Obrázek 3.7: Zapojení odrušovacího kondenzátoru na vedení

Pro odrušovací kondenzátory jsou stejně jako pro tlumivky zásadní jejich parazitní parametry. Náhradní schéma reálného kondenzátoru obsahuje parazitní indukčnost a ztrátový odpor, viz obrázek 3.8.



Obrázek 3.8: Náhradní schéma reálného kondenzátoru

Kvůli parazitním prvkům vzniká na kondenzátoru parazitní rezonanční obvod. S rostoucím kmitočtem se postupně mění charakter impedance kondenzátoru z kapacitního na induktivní. Bod, ve kterém přejde kondenzátor z kapacitního na induktivní charakter je naznačen v obrázku 3.9 a je nazýván jako rezonanční kmitočet. S rostoucí frekvencí nad rezonančním kmitočtem postupně klesá i vložený útlum.



Obrázek 3.9: Orientační velikost impedance v závislosti na délce vývodů a frekvenci: a) délka vývodů 100 mm b) délka vývodů 50 mm c) délka vývodů 10 mm d) ideální průběh

Pro co nejlepší odrušení při využití odrušovacího kondenzátoru je nutné připojit kondenzátor co nejkratším přívodem. To je důležité zejména pro vyšší kmitočty. Pokud je to možné, tak se pro odrušení využívají zejména průchodkové koaxiální kondenzátory. Kapacita odrušovacího kondenzátoru je volena podle frekvence rušení. Doporučené kapacity lze najít v tabulce 3.1. V závislosti na spodní hranici odrušovaného pásma je vybrána kapacita. Čím nižší dolní kmitočet, tím bude použitá kapacita vyšší.

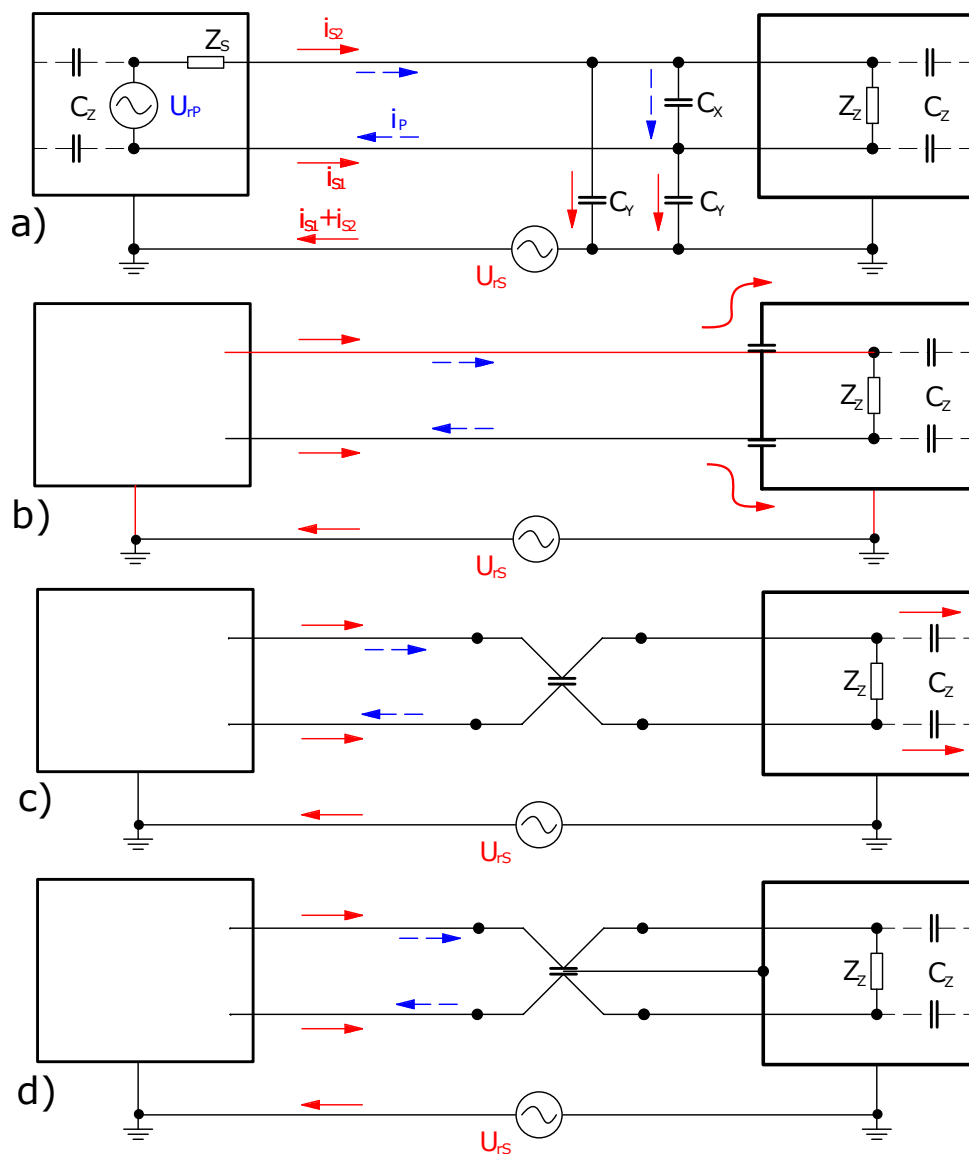
Tabulka 3.1: Doporučené kapacity k odrušení různých kmitočtových pásem [9]

Odrušované kmitočtové pásmo	Doporučené hodnoty odrušovacích kondenzátorů
10 kHz – 0,5 MHz	5 – 4 – 2 – 1 – 0,5 μF
0,5 MHz – 6 MHz	0,5 – 0,25 – 0,1 μF
6 MHz – 30 MHz	100 nF až 1000 pF
nad 30 MHz	méně než 1000 pF

Pro širší pásma kmitočtů se využívá více menších kondenzátorů zapojených paralelně. Naneštěstí při paralelním spojení více prvků může dojít k parazitní rezonanci mezi jednotlivými kondenzátory a to může mít vliv na útlum. U odrušovacích kondenzátorů je nutné uvažovat kmitočtovou závislost dielektrika.

Kondenzátory lze dělit podle materiálu dielektrika, konstrukčního provedení a z hlediska bezpečnosti. Rozdělení podle dielektrika je na: elektrolytické, keramické, plastové, papírové a slídové. Podle provedení jsou to: dvoupólové, trojpolové, čtyřpólové a pětípólové. Rozdělení z hlediska bezpečnosti je na: Odrušovací kondenzátory třídy X a Odrušovací kondenzátory třídy Y.

3.2.1 Využití odrušovacích kondenzátorů na vedení



Obrázek 3.10: Způsoby použití různých typů odrušovacích kondenzátorů (protifázové, soufázové proudy) [12]

Podle provedení kondenzátorů se eliminují soufázové nebo protifázové složky rušení. Na obrázku 3.10 jsou uvedena typická zapojení kondenzátorů na vedení. V zapojení na obrázku 3.10a jsou naznačeny dvoupólové bezpečnostní kondenzátory (C_y) a dvoupólové odrušovací kondenzátory (C_x). Bezpečnostní kondenzátory se využívají pro potlačení sou-

fázového rušivého proudu. Odrušovací kondenzátory se využívají pro potlačení protifázového rušivého proudu. Na obrázku 3.10b lze vidět trojpólové odrušovací kondenzátory, které ochrání zařízení jen před soufázovým rušením. Protifázové rušení se potlačuje zapojením čtyřpólového odrušovacího kondenzátoru jako na obrázku 3.10c. Pokud by bylo nutné potlačit obě dvě složky rušení, tak je možné využít pětipólový odrušovací kondenzátor jako na obrázku 3.10d. [12]

3.2.2 Bezpečnostní rozdělení kondenzátorů

Důležité rozdělení je z hlediska bezpečnostní třídy. Kondenzátor "zkratuje" rušivé napětí k zemi a tím vzniká parametr, který se nazývá průrazné napětí.

- **Odrušovací kondenzátory třídy X**

Využívají se v případech, kde průraz dielektrika neohrožuje bezpečnost lidského života. Není zde omezena velikost kapacity. Třidu X lze dále rozdělit na podtřídy X_1 a X_2 podle normy IEC 384-14. Podtřída kondenzátoru X_1 je používána v případech, kde je hrozba napěťové špičky vyšší než 1,2 kV. V případě, že je hrozba menších přepětí, tak je využívána podtřída kondenzátorů X_2 .

- **Odrušovací kondenzátory třídy Y**

Zapojení kondenzátoru třídy Y je realizováno mezi fázovým a ochranným vodičem. Využívají se všude tam, kde je hrozba úrazu unikajícím proudem. Zde je omezena kapacita kondenzátorů pro daný svodový proud. Pro svodový proud 3,5 mA je to maximálně 50 nF a pro svodový proud 0,75 mA je maximální hodnota kapacity 10 nF. [1] [7] [9]

3.3 Odrušovací filtry

Filtry lze definovat jako dvojbrany, které v určité části kmitočtového spektra utlumí elektrický signál, ale ve zbylé části spektra signál propustí s minimálním útlumem [1]. Odrušovací filtry se využívají v případě, že samotná tlumivka anebo kondenzátor nesplní požadované vlastnosti pro dané použití. Nejčastěji se pro odrušování využívají pasivní LC filtry typu dolní propust. Tyto filtry potlačují vyšší frekvence než je mezní kmitočet a propouštějí signály s nižšími frekvencemi než mezní kmitočet. Základní rozdělení odrušovacích filtrů je na síťové a speciální.

3.3.1 Síťové odrušovací filtry

V současné době patří mezi nejčastěji využívané druhy filtrů. Síťový odrušovací filtr se zapojuje do napájecího přívodu zařízení nebo do energetické sítě. Při využití pasivních prvků může být filtr popsán parametry obvodu. Pro vyjádření útlumu lze za pomoci prvků z kaskádní matice napsat vzorec:

$$L = 20 \cdot \log \left| \frac{U_{20}}{U_2} \right|$$

$$L = 20 \cdot \log \left| \frac{Z_Z}{Z_Z + Z_S} \cdot A_{11} + \frac{1}{Z_Z + Z_S} \cdot A_{12} + \frac{Z_Z \cdot Z_S}{Z_Z + Z_S} \cdot A_{21} + \frac{Z_S}{Z_Z + Z_S} \cdot A_{22} \right|, \quad (3.4)$$

kde Z_Z je impedance přijímače rušení, Z_S je impedance zdroje rušení a A_{11} , A_{12} , A_{21} a A_{22} jsou komplexní prvky z kaskádní matice pro daný filtr. Zde je vidět, že velikost útlumu závisí jak na vlastních parametrech, tak i na impedanci zdroje a přijímače rušení. Proto při použití určitého filtru pro různé obvody může mít tento filtr velký rozdíl v útlumu. V závislosti na frekvenci a provedení napájecí sítě se impedance značně mění a tak jsou stanoveny střední hodnoty impedance pro energetické napájecí sítě v mezinárodní normě CISPR. Tím je poměrně komplikován návrh filtru. Další komplikace pro návrh filtru vznikají:

- při využití tlumivek ve filtru. Celková indukčnost nesmí vyvolat úbytek napětí větší než 2 % z jmenovité hodnoty při frekvenci 50 Hz .
- Odrušovací filtr nesmí zhoršit ani ohrozit správnou činnost odrušovaného zařízení a napájecí sítě.
- Odrušovací filtr pro vysoké výkony má nízký vlastní rezonanční kmitočet díky parazitním vlastnostem zmíněných v kapitolách 3.1 a 3.2. Při působení obou parazitních složek zároveň se může změnit zamýšlená dolní propust v nechtěnou horní propust a to může funkci obvodu výrazně zhoršit.

Ze zmíněných komplikací lze vyvodit, že neexistuje univerzální síťový filtr, který by ochránil libovolné zařízení. Při návrhu se vychází z rámcového výpočtu, následně zkoušky a případného odladění. Pro správnou funkci zařízení je důležité nejen filtr správně navrhnout, ale i správně umístit. Filtr by měl být umístěn tak, aby rušivé signály mohly vstupovat do zařízení pouze přes navržený filtr.

3.3.2 Speciální druhy odrušovacích filtrů

Specifickým druhem síťových filtrů jsou filtry EMP. Jejich funkce je především ochrana proti impulsům s velkou intenzitou. EMP filtry se od síťových filtrů odlišují tím, že ke samotnému filtru je na vstup připojena součástka, která omezuje přepětí. Dále lze specifikovat EMP filtry na LEMP a NEMP filtry. LEMP filtr se využívá hlavně v místech, kde je velká pravděpodobnost vzniku atmosférických přepětí. NEMP filtr je využíván především pro vojenské aplikace.

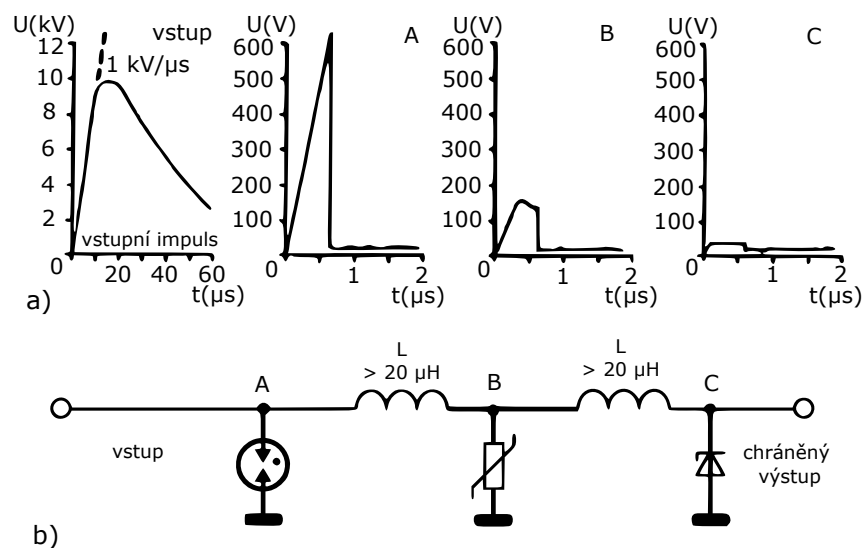
Další druh speciálního odrušovacího filtru je takzvaný TEMPEST filtr (Temporary Emanation and Spurious Transmission). Tento filtr omezuje únik informací, které nejsou

šifrované a přes parazitní vazby by se mohly šířit po vedení. Tyto filtry se vyznačují vysokým útlumem v širokém frekvenčním pásmu. To lze realizovat za pomoci víceúrovňových LC filtrů, které jsou umístěny v hermeticky uzavřeném stíněném pouzdře.

Další druh filtru se využívá k odrušení signálových a datových vedení. Je to datový filtr, jehož hlavní odlišnost je nižší pracovní napětí a proud. Velmi častým požadavkem je zde velká strmota útlumové charakteristiky. To lze realizovat víceúrovňovým LC filtrem. Pro jednodušší případy s nižšími nároky je možné využít feristory, které jsou podstatně levnější. [9] [5] [1]

3.4 Přepětové ochranné prvky

Přepětové ochranné prvky jsou součástky, které se využívají pro omezení přepětí. Vznik a důsledky těchto přepětí jsou zmíněny v kapitole 1.2. Hlavním účelem přepětových ochran je, aby se na zařízení, které má být chráněno přepětovou ochranou, nedostalo vyšší napětí než povolené. Důležité také je, aby ochrana reagovala na přepětí ještě pod úrovní elektrické pevnosti zařízení. Přepětové ochrany převážně pracují na principu změny impedance v závislosti na napětí a lze je rozdělit na dvě základní skupiny. To je tzv. hrubá přepětová ochrana a jemná přepětová ochrana. Hlavními rozdíly mezi ochranami jsou: rychlost reakce, ochranná úroveň napětí a konstrukce ochrany. V praxi neexistuje prvek, který by splnil všechny požadavky. Z tohoto důvodu se zapojují ochrany kaskádně. Většinou se využívají hrubé ochrany (např. bleskojistka) doplněné o varistory a další prvky pro jemnou přepětovou ochranu (např. Zenerovy diody a supresorové diody). Tímto postupem lze vytvořit univerzální systém ochrany proti přepětí s požadovanými vlastnostmi. Obvyklý příklad zapojení lze vidět na obrázku 3.11b. Kde jsou postupně zapojeny: bleskojistka (A), varistor (B) a Zenerova dioda (C).

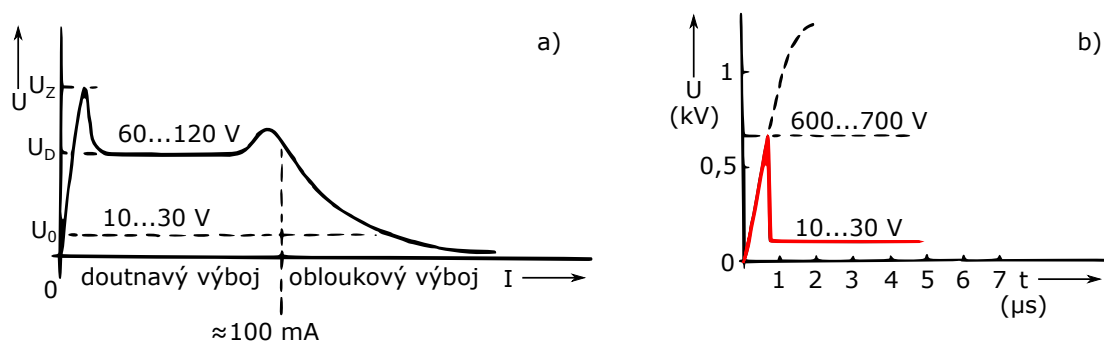


Obrázek 3.11: a) průběhy napětí v jednotlivých bodech kombinované přepětové ochrany
b) Zapojení kombinované přepětové ochrany

Na obrázku 3.11a lze vidět průběhy na vstupu a v bodech A, B, C s tím, jak jsou postupně omezovány přepětovými ochranami. Mezi ochranami jsou zapojeny zpoždovací členy, bez kterých by jako první reagovala Zenerova dioda. Jako člen s nejjemnějším omezením a nejrychlejší reakcí by byla nepřipustně přetížena a nejspíše zničena. Ostatní ochrany by byly vyřazeny z procesu omezení a nepodílely by se na ochraně. Zpoždovací členy lze realizovat indukčnostmi nebo odpory. Při montáži je důležité připojit ochranu co nejkratším přívodem. Pro dlouhé přívody vzniká vlivem vlastní kapacity a indukčnosti strmý napěťový impuls, který může být větší než hodnota, na kterou má přepětové zařízení omezovat. Také proto jsou dlouhé přívody nevhodné pro vysofrekvenční techniku. [1] [5] [9] [13]

3.4.1 Prvky pro hrubou přepětovou ochranu

Pro nejhrubější omezení přepětí se většinou využívá vzduchové jiskřiště. To může omezovat přepětí od 1 kV až do jednotek MV. Hlavní část vzduchového jiskřiště tvoří dvě elektrody. Při přepětí vznikne mezi elektrodami výboj a přepětí se sníží. Velkou nevýhodou jiskřiště je, že vznik výboje a tedy omezení přepětí nezáleží pouze na konstrukci jiskřiště, ale i na tlaku a vlhkosti vzduchu mezi elektrodami. Z tohoto důvodu je jiskřiště nepřesné a v dnešní době se využívá převážně pro ochranu venkovních vedení. Druhou a v současné době nejvíce využívanou hrubou ochranou je bleskojistka. Je to zařízení, které má elektrody umístěny ve skleněném nebo keramickém pouzdře a pouzdro je naplněno vzácným plynem. Tato skutečnost by měla zaručit značnou míru reprodukovatelnosti parametrů výboje.

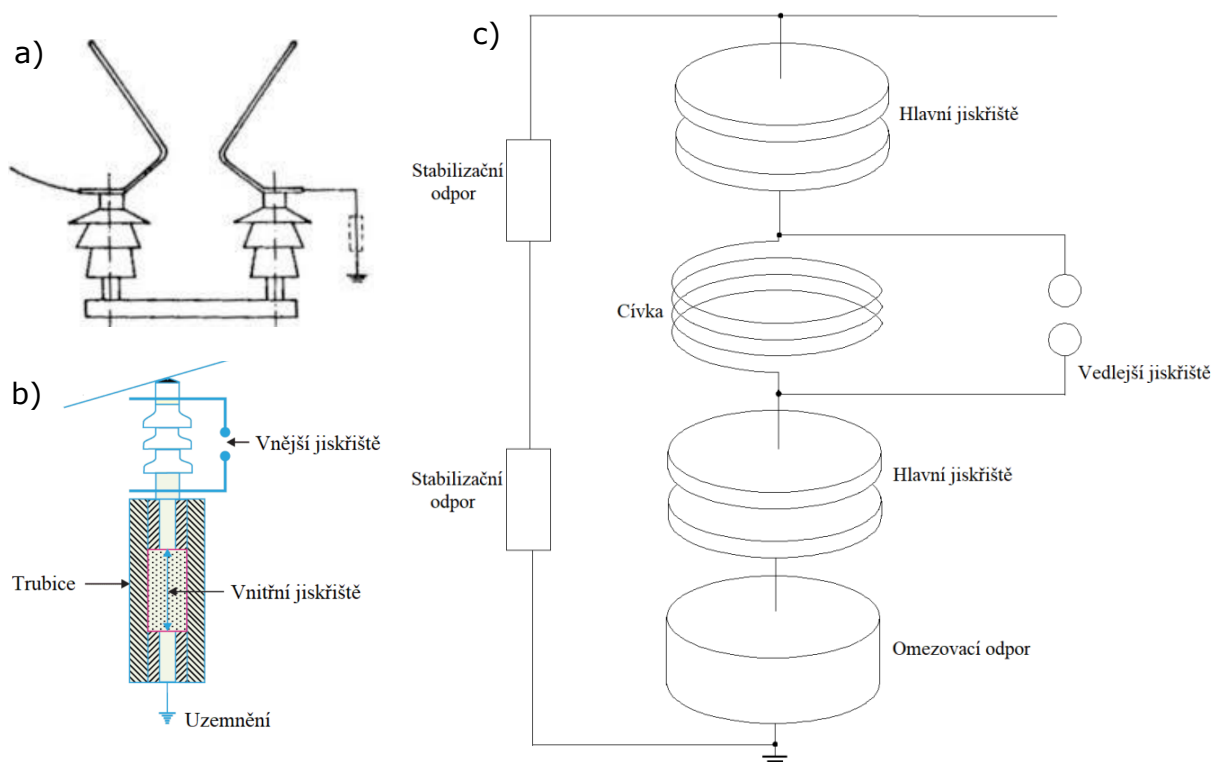


Obrázek 3.12: a) Statická V-A charakteristika plynem plněné výbojky b) časový průběh strmého napěťového impulsu na výbojce [9]

Bleskojistky se většinou vyrábí se zapalovacími napětími v rozsahu od 90 V až po několik kV. Konstrukce bleskojistik může být například tzv. růžková bleskojistka, vyfukovací bleskojistka nebo ventilová bleskojistka (viz. obrázek 3.13).

Při působení nízkého napětí působí bleskojistka na obvod zanedbatelně. Mezi elektrodami je izolační odpor, který je vyšší než 10 G Ω . Pokud napětí přesáhne U_z (zápalné napětí), tak se v bleskojistce zapálí oblouk a odpor strmě klesne až k jednotkám ohmu. Po zapálení oblouku přechází bleskojistka do režimu doutnavého výboje, kde napětí klesne

mezi 60 až 120 V. Pokud bleskojistkou při výboji protéká proud, který je vyšší než 100 mA, tak vznikne obloukový výboj a pak napětí na výbojce klesne až k 10 V.



Obrázek 3.13: Konstrukce a) růžkové bleskojistky b) vyfukovací bleskojistky c) ventilové bleskojistky [14]

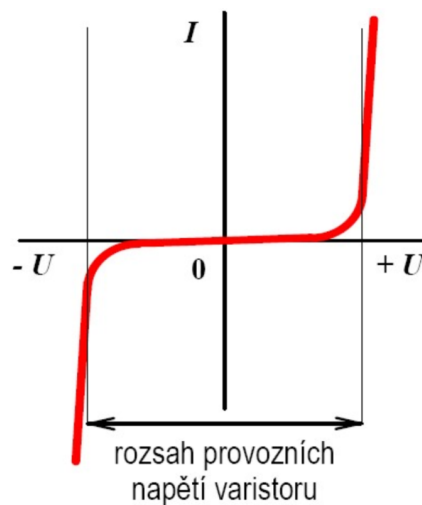
Hodnota zápalného napětí U_Z je velmi závislá na derivaci napětí v čase tj. du/dt . Pro bleskojistky lze definovat statické zapalovací napětí (U_{Zstat}) a to tak, že $du/dt < 100 \text{ V/s}$. Velikost U_{Zstat} následně záleží na konstrukci bleskojistky, ale většinou je v rozmezí od 90 do 1200 V. Definice dynamického zápalného napětí je pro změnu $du/dt = 1 \text{ kV}/\mu\text{s}$ a velikost se pohybuje mezi 600 až 700 V. Jak se chová bleskojistka pro pomalý nárůst napětí lze vidět na obrázku 3.12a a pro rychlý nárůst napětí je reakce bleskojistky na obrázku 3.12b. Bleskojistky plněné plynem mají nevýhodu, že jsou závislé na časové změně napětí, jejich doba odezvy je poměrně dlouhá (až 100 μs) a vzniklý oblouk má nízké napětí, které komplikuje samovolné uhašení oblouku. Z tohoto důvodu se v obvodech nízkého napětí často ochrana doplňuje o tavnou pojistku, kterou je oblouk uhašen pokud neuhasne samovolně. Výhodami bleskojistek jsou: vysoká výkonová zatížitelnost, schopnost svádět vysoké proudy a nízká vlastní kapacita. V dnešní době jsou bleskojistky využívány jako základní hrubá ochrana v energetických a telekomunikačních sítích nebo pro elektrická zařízení. [1] [9] [13]

3.4.2 Prvky pro jemnou přepětovou ochranu

Pro jemnější omezení přepětí se využívají součástky jako varistory, Zenerovy diody a supresorové diody (transil a trisil).

- **Varistor**

Slovo varistor vzniklo sloučením anglických slov variable resistor, tedy v překladu proměnný odpor. Varistor je polovodičová součástka, která je závislá na napětí. Princip varistoru je rozdílný od bleskojistky. Varistor omezí napětí na určenou hodnotu, která téměř nezávisí na protékajícím proudu součástkou. To lze vidět na voltampérové charakteristice na obrázku 3.14. Materiály pro výrobu varistorů jsou především oxid zinečnatý (ZnO) anebo karbid křemičitý (SiC). Pro zlepšení vlastností se mohou přidávat příměsi hliníku, galia anebo india (např. pro snížení zbytkového napětí se přidává Al^{3+}) [15]. Rozdíl mezi těmito druhy je zejména ve strmosti V-A charakteristiky. Varistor typu SiC má větší svodový proud, z tohoto důvodu je výhodné ho doplnit o jiskřiště.



Obrázek 3.14: V-A charakteristika varistoru [9]

Konstrukcí je dán rozsah ochranného napětí varistoru, který je od jednotek V až k jednotkám kV. V tomto rozsahu je odpor varistoru řádech teraohmů a mimo provozní rozsah klesá odpor až k jednotkám ohmu. Varistor je navrhován tak, aby zde mohl protékat proud až k desítkám ampér. Velká výhoda varistoru je v jeho rychlé reakční době (desítky ns) a ve schopnosti absorpce velké části vysokonapětového impulsu. Nevýhodou je omezené využití ve vysokofrekvenční technice (např. datové a telekomunikační sítě) a to pro poměrně vysokou vlastní kapacitu ($0,4 \div 40$ nF). Další nevýhodou je rostoucí svodový proud při dlouhodobé zátěži.

- **Supresorové (Zenerovy) diody**

Tento druh ochrany se využívá zejména pro ochranu nejcitlivějších zařízení (např. integrované obvody). V kombinované přepětové ochraně se tyto prvky zařazují co nejbližší k chráněnému zařízení. Zenerovy diody jsou v této problematice využívány mnoho let, ale pro ochranu před rychlými impulsy se používají supresorové diody. Tyto diody mají oproti klasickým Zenerovým diodám rychlejší reakci, v závěrné oblasti je lze zatížit vyšším proudem a jsou schopny absorbovat větší část energie.

Supresorové diody se vyrábějí s ochranným napětím v rozmezí od 6 do 440 V. Diody lze jen těžko využít ve vysokofrekvenční technice vzhledem k vysoké vlastní kapacitě (až 15000 pF), která velmi tlumí užitečný signál. Zásadní výhodou, kvůli které se diody využívají, je velmi krátká doba reakce na přepětový impuls (jednotky ns). [1] [9]

3.5 Elektromagnetické stínění

Elektromagnetickým stíněním lze velmi často redukovat rušení jak u přijímače, tak i u vysílače. K tomuto omezení se využívají stínění nebo stínící kryty. Není nutné vždy odstínit celé zařízení, ekonomicky výhodnější je odstínit pouze část přístroje. Pokud jsou zařízení velmi citlivá a je nutné se vyhnout nežádoucím vazbám, tak je nutné stínit všechny obvody samostatně. K tomuto kroku by se mělo přistoupit až jako k poslednímu, po vyčerpání všech ekonomicky výhodnějších možností. Při správné realizaci nosného krytu z hlediska EMC lze ušetřit pozdější náklady na elektromagnetické stínění. Účinnost elektromagnetického stínění lze zjistit ze vztahu:

$$K_s = \frac{E_i}{E_0}, \quad (3.5)$$

kde K_s je koeficient stínění, E_i je intenzita elektrického pole uvnitř stínícího krytu a E_0 je intenzita elektrického pole ve stejném bodě bez využití stínění. V praxi se velmi často udává účinnost stínění SE:

$$SE = 20 \cdot \log \frac{1}{K_s} = 20 \cdot \log \left| \frac{E_0}{E_i} \right|. \quad (3.6)$$

Pokud je známa pouze intenzita magnetického pole, tak lze psát analogicky stejné rovnice (3.5 a 3.6), jen se zde použije intenzita magnetického pole \mathbf{H} namísto intenzity elektrického pole \mathbf{E} .

Účinnost stínění je možné rozebrat do třech složek: R (Odraz - **R**eflection), A (Absorbce - **A**bsorption) a M (Mnohonásobný odraz - **M**ultiple Reflection):

$$SE \text{ [dB]} = R \text{ [dB]} + A \text{ [dB]} + M \text{ [dB]}. \quad (3.7)$$

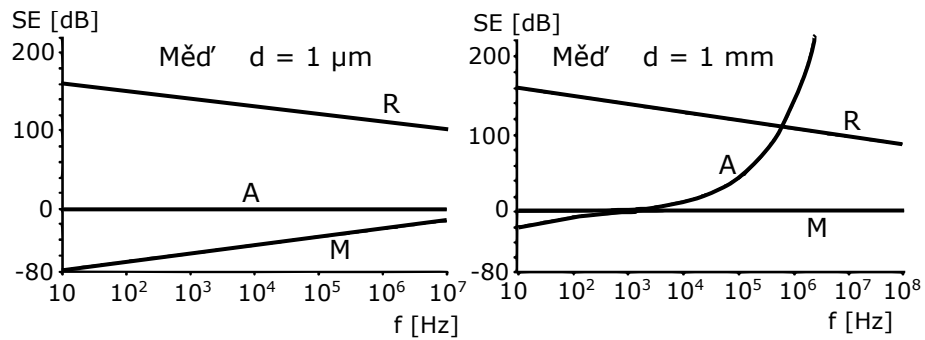
K útlumu odrazem dojde vždy, když elektromagnetická vlna prochází hranicí s dvěma rozdílnými impedancemi, tento útlum s rostoucí frekvencí klesá. Útlum absorbcí vzniká průchodem vlny skrz stínící kryt, kde se část energie vlny přemění na tepelné ztráty. Útlum vlivem mnohonásobných odrazů nastává při průchodu stíněním, kde se část vlny na rozhraní opakovaně odraží. Vliv opakovaných odrazů může být záporný a tím zhoršovat účinnost stínění (viz. obrázek 3.15).

Pokud je hloubka vniku menší než tloušťka stínícího krytu a kryt je konstruován z

dobře vodivého materiálu, tak je vliv mnohonásobných odrazů zanedbatelný. Z tohoto důvodu lze zjednodušit vzorec 3.7 na:

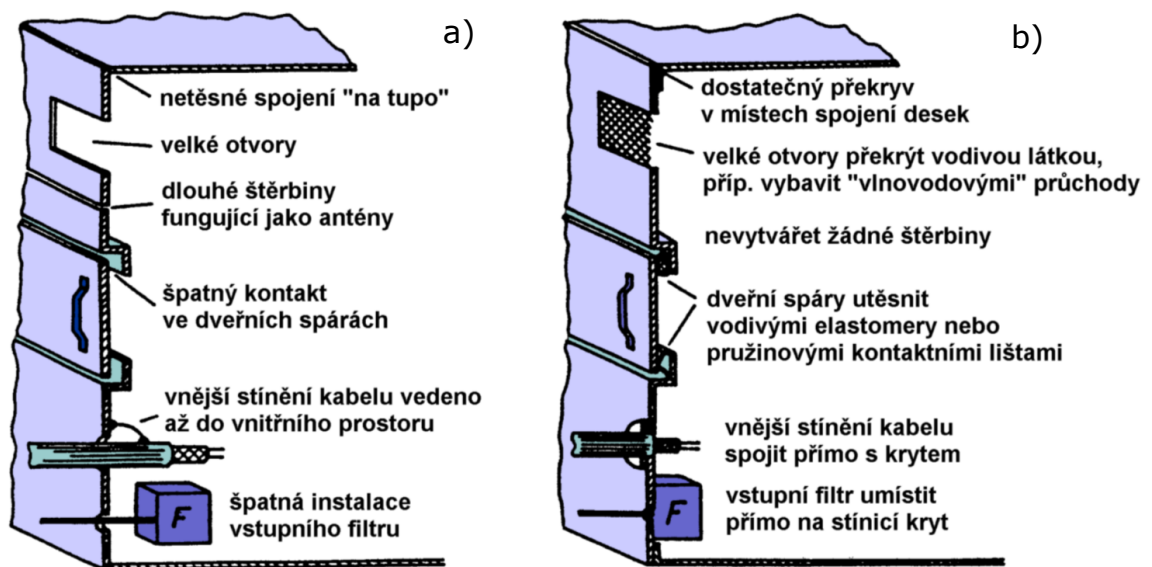
$$SE \text{ [dB]} \approx R \text{ [dB]} + A \text{ [dB]}. \quad (3.8)$$

Pro správnou funkci stínění je žádoucí, aby se stínění správně navrhlo, vypočetlo anebo proměřilo na prototypu.



Obrázek 3.15: Velikost jednotlivých složek stínění v závislosti na frekvenci [8]

Při navrhování krytu je důležité uvažovat kryt s různými otvory a nedokonalostmi. Otvory slouží například pro připojení zařízení k elektrické energii, větrací otvory, netěsnosti atd. Jako nedokonalosti lze považovat vodivá nedokonalá spojení jednotlivých částí nebo skleněné, nedokonale vodivé plochy pro kontrolu vnitřního zařízení. Reálně získané hodnoty stínění jsou oproti teoretickým hodnotám výrazně nižší. Dlouhodobé zkušenosti s elektromagnetickým stíněním vedly k rozdělení stínění podle jejich účinnosti. To je uvedeno v tabulce 3.2. Pro zlepšení účinnosti stínění je na obrázku 3.16 znázorněno, jak upravit špatně realizovaný kryt tak, aby byla zlepšena účinnost stínění. [8] [9]



Obrázek 3.16: a) chybná konstrukce z hlediska EMC b) vylepšená konstrukce pro lepší účinnost stínění [5]

Tabulka 3.2: Hodnocení elektromagnetického stínění dle orientačních hodnot jejich účinnosti [9]

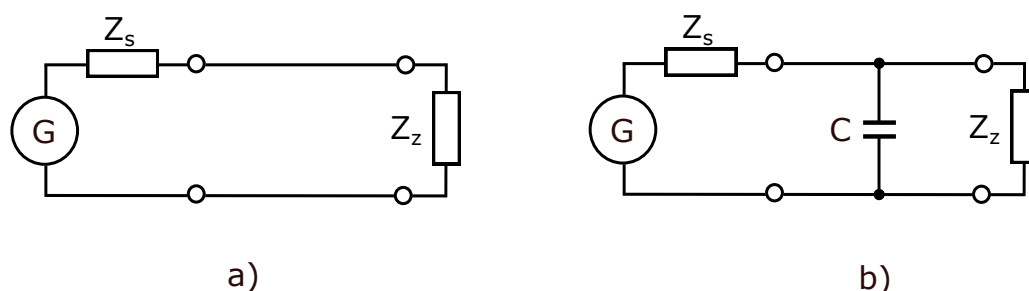
kategorie hodnocení	účinnost stínění [dB]
nedostatečné stínění	0 ÷ 10
stínění pro minimální požadavky	10 ÷ 30
stínění dostačující pro většinu běžných požadavků	30 ÷ 60
velmi dobré stínění	60 ÷ 90
vysoce kvalitní stínění	90 ÷ 120

4 Praktická část a zhodnocení výsledků

Praktická část práce probíhala na Západočeské Univerzitě v laboratořích elektrotechnické fakulty. Prvky byly vybrány podle aktuální dostupnosti v univerzitních laboratořích. Měřené odrušovací prvky jsou specifikovány na začátku jednotlivých částí kapitoly. Přístroje, kterými jsem měřil, jsou: spektrální analyzátor Rigol DSA815 a digitální osciloskop LeCroy wave pro 7300 A. V příloze jsou uvedena data, která jsem naměřil a z nich vynesené grafy. Typická charakteristika je název pro ideální průběh uvedený v katalogovém listu pro daný typ součástky, pokud byl k dispozici.

4.1 Měření odrušovacích kondenzátorů

Měření odrušovacích kondenzátorů bylo realizováno na těchto typech kondenzátorů: Fóliový kondenzátor CFAC 330n/275VAC/M RM22,5 MKP62 (330 nF), Fóliový kondenzátor CFAC 220n/275VAC/M RM22,5 MKP62 (220 nF), Fóliový kondenzátor CFAC 470n/275VAC/M RM22,5 MKP62 (470 nF), Fóliový kondenzátor CFAC 680n/275VAC/M RM27,5 MKP62 (680 nF) a R46KR410000M1K KEMET (1 μ F). Dále byly využity SMD a keramické kondenzátory o hodnotách 1 nF, 10 nF, 100 nF s různými délkami a typy připojení do obvodu. Jako poslední byl měřen fóliový kondenzátor s kapacitou 100 nF a rozdílnou délkou připojovací cesty. Druhá část měření proběhla na paralelních kombinacích vybraných kondenzátorů.



Obrázek 4.1: Schéma zapojení a) bez připojeného kondenzátoru, b) s připojeným kondenzátorem

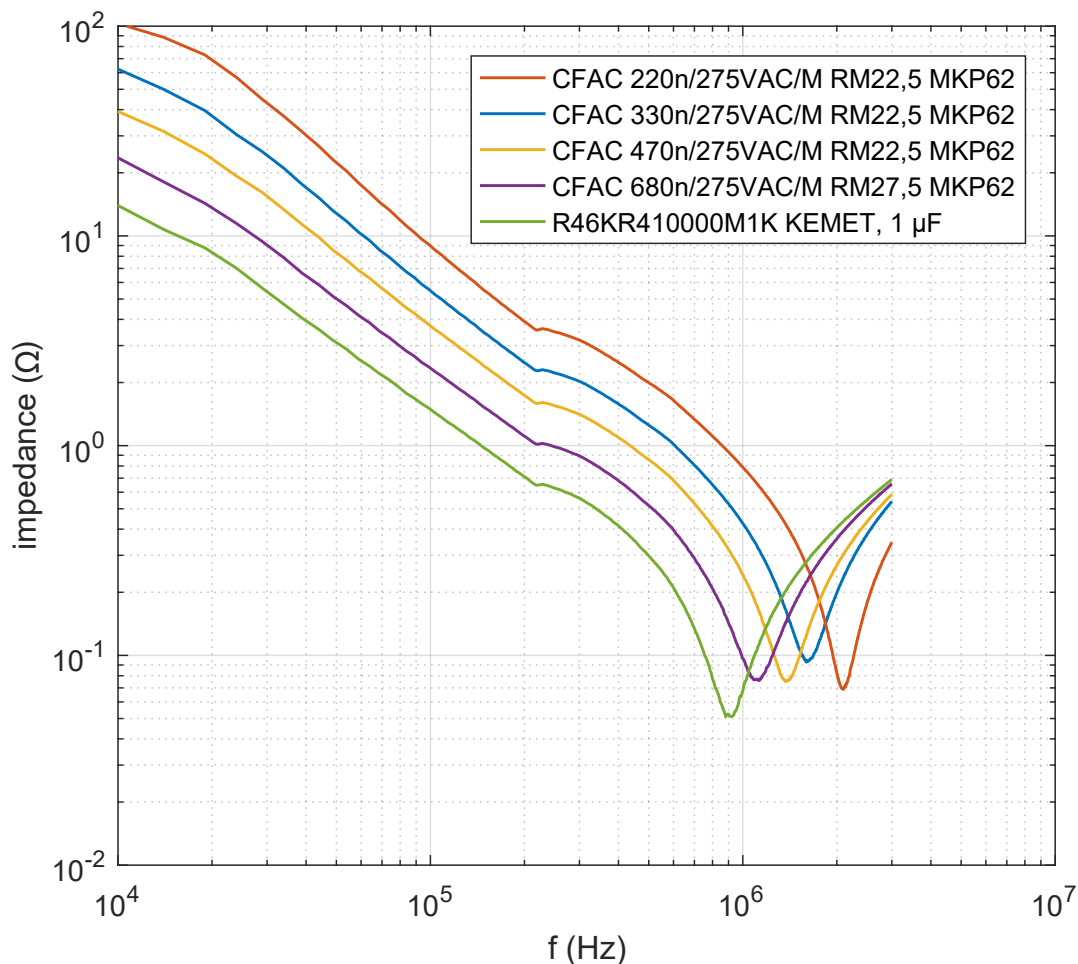
Pro porovnání s typickým průběhem z katalogového listu je nutné získat závislost impedance na frekvenci. To lze udělat tak, že upravíme vzorec pro výpočet přenosu. Při známých parametrech: přenos, zapojení obvodu a hodnoty vstupní a výstupní impedance, lze z přenosu odvodit vzorec pro impedanci kondenzátoru:

$$L = 20 \cdot \log \left(1 + j\omega C \frac{Z_S \cdot Z_Z}{Z_S + Z_Z} \right) \Rightarrow \frac{1}{\omega C} = X_c = \frac{\frac{Z_S \cdot Z_Z}{Z_S + Z_Z}}{10^{\frac{L}{20}} - 1}, \quad (4.1)$$

kde Z_s a Z_z se podle katalogového listu spektrálního analyzátoru Rigol DSA815 rovná 50Ω [18].

Výsledky první části měření jsou na obrázku 4.2. Zde jsou zřetelné průběhy prvních pěti zmíněných fóliových kondenzátorů, které byly postupně zapojeny do obvodu (viz. obrázek 4.1). Kondenzátory jsou stejného typu a podobné konstrukce, hlavním rozdílem je zde kapacita měřených kondenzátorů. Spektrální analyzátor udává hodnoty zisku a tak bylo nutné pro správnou interpretaci výsledků hodnoty vynásobit -1 . Měření je realizováno v širokém frekvenčním spektru a při vstupní a výstupní impedanci 50Ω .

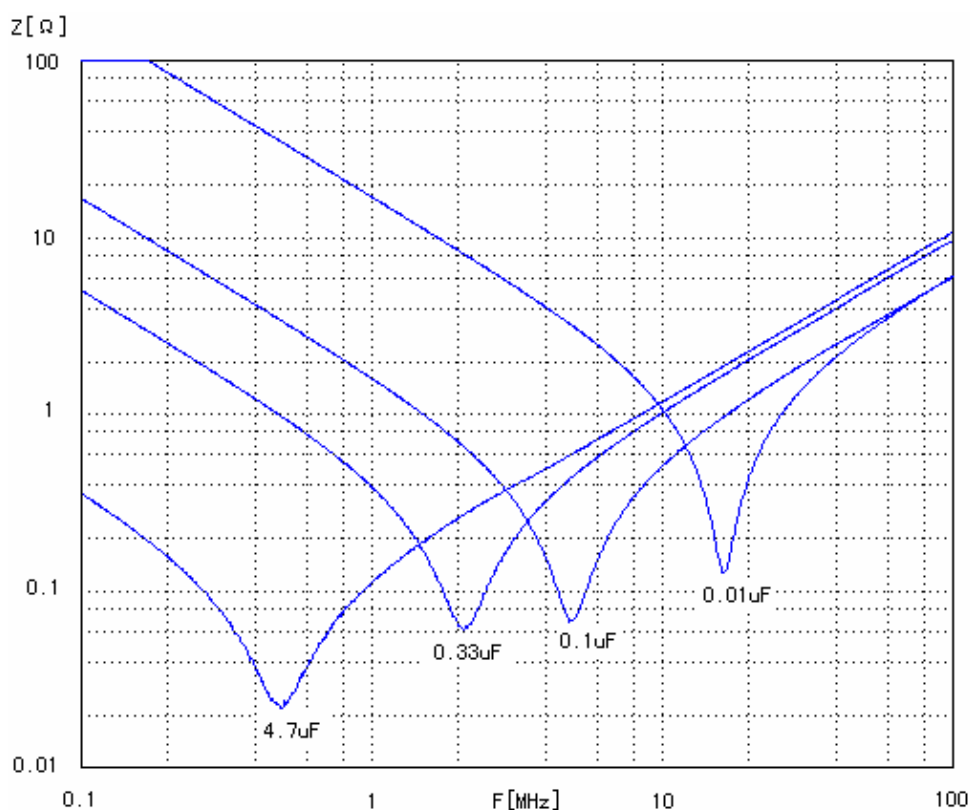
V katalogových listech měřených kondenzátorů nejsou impedanční charakteristiky znázorněny, ale pro kondenzátory podobného typu (MKP62) jsou průběhy znázorněny na obrázku 4.3, který jsem převzal z literatury [19]. Významný průběh pro porovnání výsledků je na obrázku 4.3, průběh s hodnotou $0,33 \mu\text{F}$, jelikož kondenzátor se stejnou kapacitou jsem měřil (typ CFAC 330n).



Obrázek 4.2: Impedanční charakteristika kondenzátorů o hodnotách: 220 nF, 330 nF, 470 nF, 680 nF a $1 \mu\text{F}$

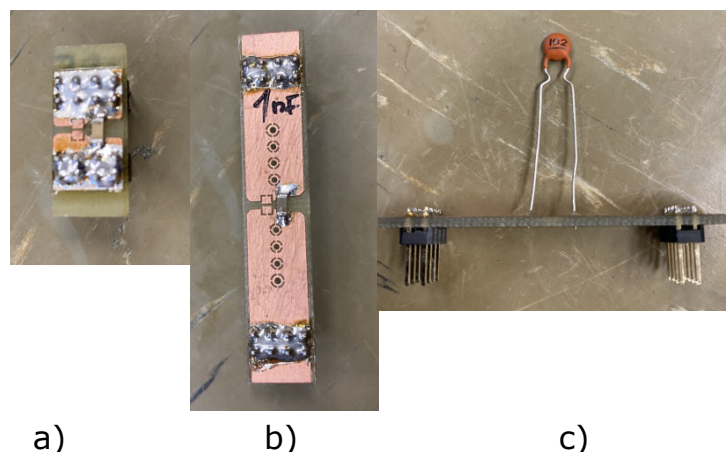
Z tohoto měření je zřejmé, že kapacita odrušovacího kondenzátoru ovlivňuje rezonanční frekvenci a to tak, že s rostoucí kapacitou rezonanční frekvence klesá. Při porovnání grafic-

kých výsledků lze pozorovat, že tvar naměřených charakteristik odpovídá tvaru typických impedančních charakteristik. Drobné difference ve výsledných průbězích mohl způsobit pokles kapacity z důvodu stárnutí součátek nebo tolerance kapacity, která může být až 20 % z udávané kapacity. Vliv na naměřené hodnoty mohou mít parazitní jevy v přípravku, na kterém bylo měření provedeno anebo fakt, že impedanční charakteristiky pro konkrétní součástky nejsou uvedeny v katalogovém listu výrobce. Měřené průběhy tedy porovnávám s průběhy kondenzátorů, které jsou velmi podobné, ale nemusí být totožné. Dále není v katalogovém listu uvedeno, při jaké vstupní a výstupní impedanci bylo měření provedeno. Pokud by impedance byly rozdílné od 50Ω , tak to může být další důvod, proč nejsou charakteristiky více podobné. Průběh kondenzátoru s kapacitou 330 nF je i přes tyto zmíněné vlivy velmi podobný typickému průběhu v katalogovém listu [19] (průběhu s hodnotou 0,33 μF). Z těchto výsledků lze soudit, že konkrétně tento kondenzátor je v poměrně dobré kondici. V katalogovém listu [24] je impedanční charakteristika pro kondenzátor typu R46KR410000M1K KEMET(1 μF). Zde už není naměřená charakteristika tak podobná katalogové, to může být způsobeno již zmíněnými důvody. Obrázek s typickým průběhem je umístěn v příloze 1.



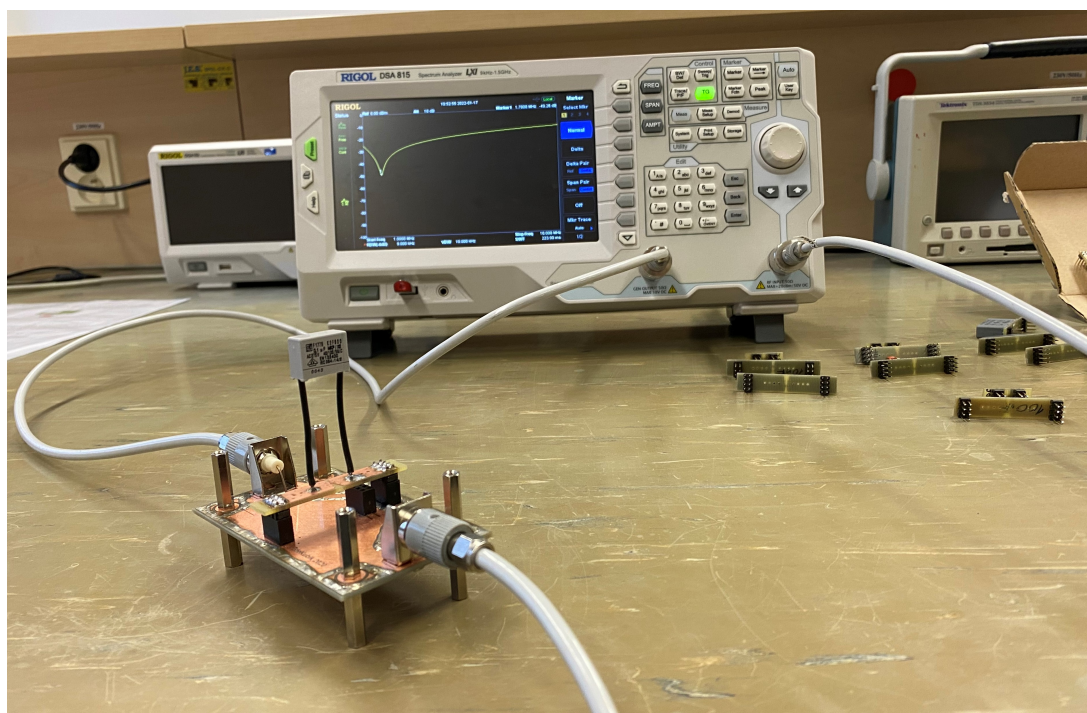
Obrázek 4.3: Typická impedanční charakteristika dle katalogového listu [19]

Při měření v nižších frekvencích byl vliv přípravku zanedbatelný, ale při vyšších frekvencích už přípravek pro měření ovlivňoval výsledky. Tento problém je možné zmírnit normalizací přípravku před vložením měřené součástky. Zmíněný problém platí jak u měření odrušovacích kondenzátorů, tak i u měření odrušovacích tlumivek a odrušovacích filtrů.



Obrázek 4.4: Kondenzátory s různě dlouhými připojovacími cestami: a) krátký přívod b) delší přívod c) nejdelší přívod

Důležitá pro správnou funkci odrušovacího kondenzátoru je i délka připojovací cesty, jak již bylo zmíněno v kapitole 3.2. Na obrázku 4.6 jsou vykreslené průběhy několika typů kondenzátorů s různě dlouhými připojovacími cestami a kapacitami. Pro ilustraci délky připojení přikládám fotky třech kondenzátorů o kapacitě 1 nF na obrázku 4.4.

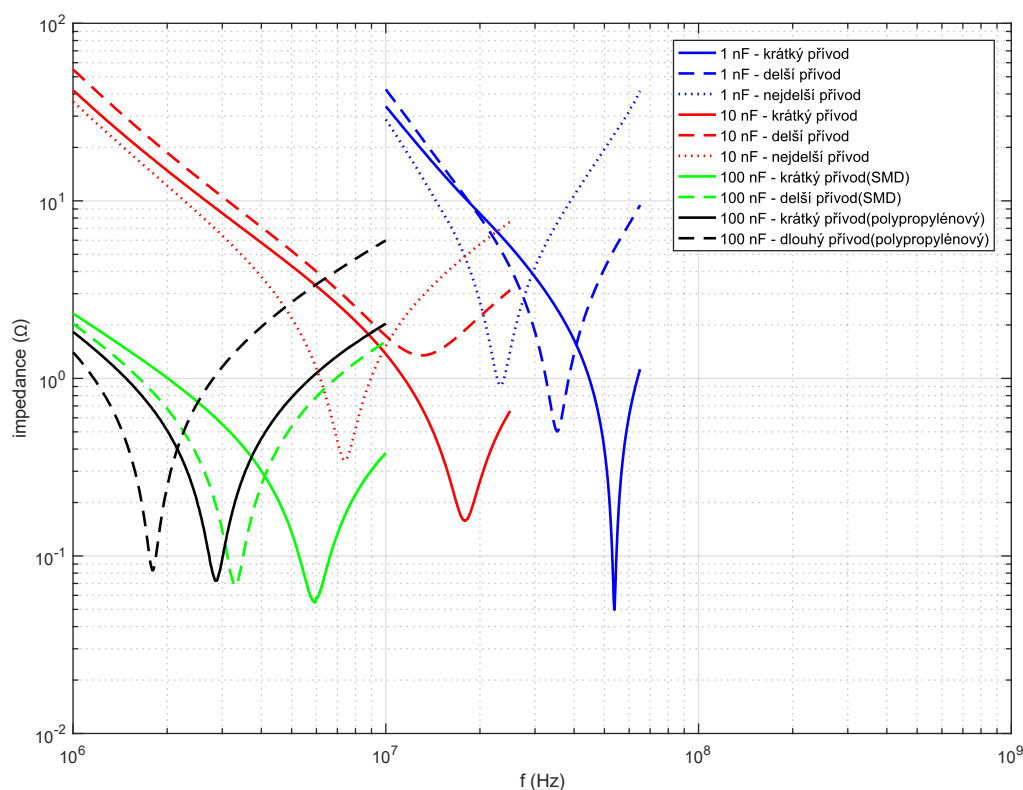


Obrázek 4.5: Měření kondenzátorů na spektrálním analyzátoru RIGOL [19]

Pro měření paralelních kombinací kondenzátorů byl opět využit spektrální analyzátor RIGOL, kterým se měřil útlum odrušovacího kondenzátoru. Útlum byl následně využit pro přepočítání na impedanci podle vzorce 4.1, jako v předchozím případě.

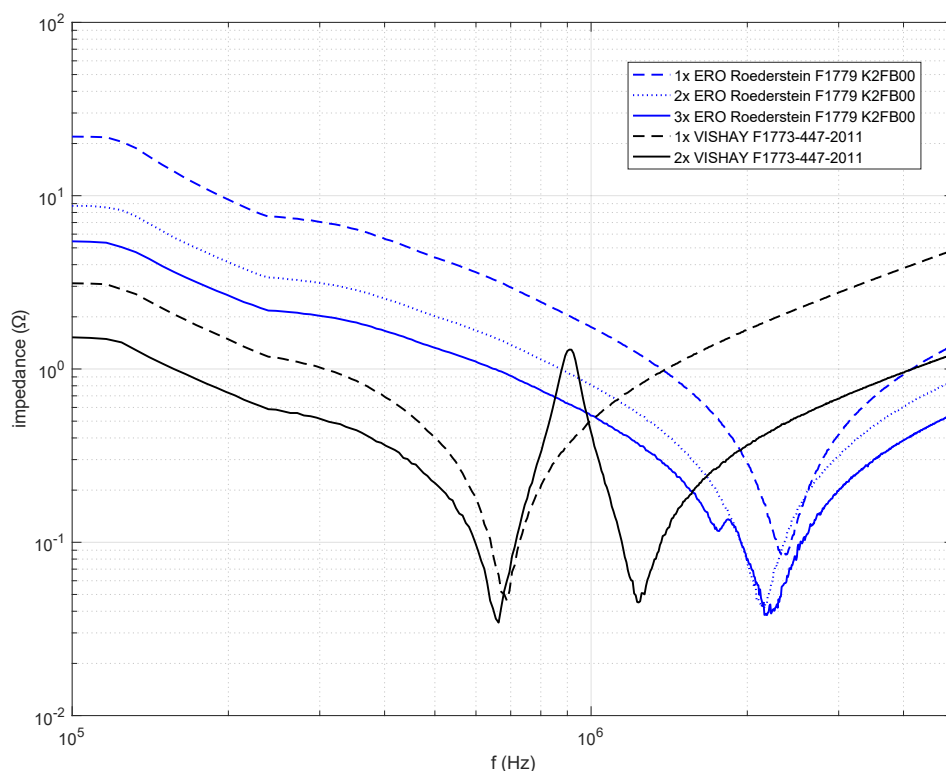
Z výsledků, které jsou na obrázku 4.6, je opět patrné, že se stoupající kapacitou klesá rezonanční frekvence, tj. frekvence, při které je útlum nejvyšší. Hlavním závěrem tohoto měření je, že délka připojení ovlivňuje parazitní prvky a s tím se mění hodnota útlumu

a rezonanční frekvence. Podle naměřených hodnot je kondenzátor 10 nF, připojený delší cestou, pravděpodobně v horší stavu a už není tak účinný, jelikož jeho útlum je nižší, než by podle předpokladů měl být. Další zajímavé porovnání je u kondenzátorů s hodnotou 100 nF (zelené a černé průběhy). Zde je zřejmé, že SMD kondenzátor je účinnější oproti obyčejnému kondenzátoru. To je způsobeno kratší cestou připojení. Nejvýraznější rozdíl je mezi kondenzátory o hodnotě 1 nF (modré průběhy). Zde jsou rozdíly výraznější díky vyšší frekvenci. To lze také pozorovat na obrázku 4.6, že s klesající rezonanční frekvencí se rozdíly ve velikosti impedance mezi jednotlivými kondenzátory, s jinou délkou připojení, zmenšují.



Obrázek 4.6: Impedanční charakteristika kondenzátorů o hodnotách: 1 nF, 10 nF a 100 nF s různě dlouhými připojovacími cestami

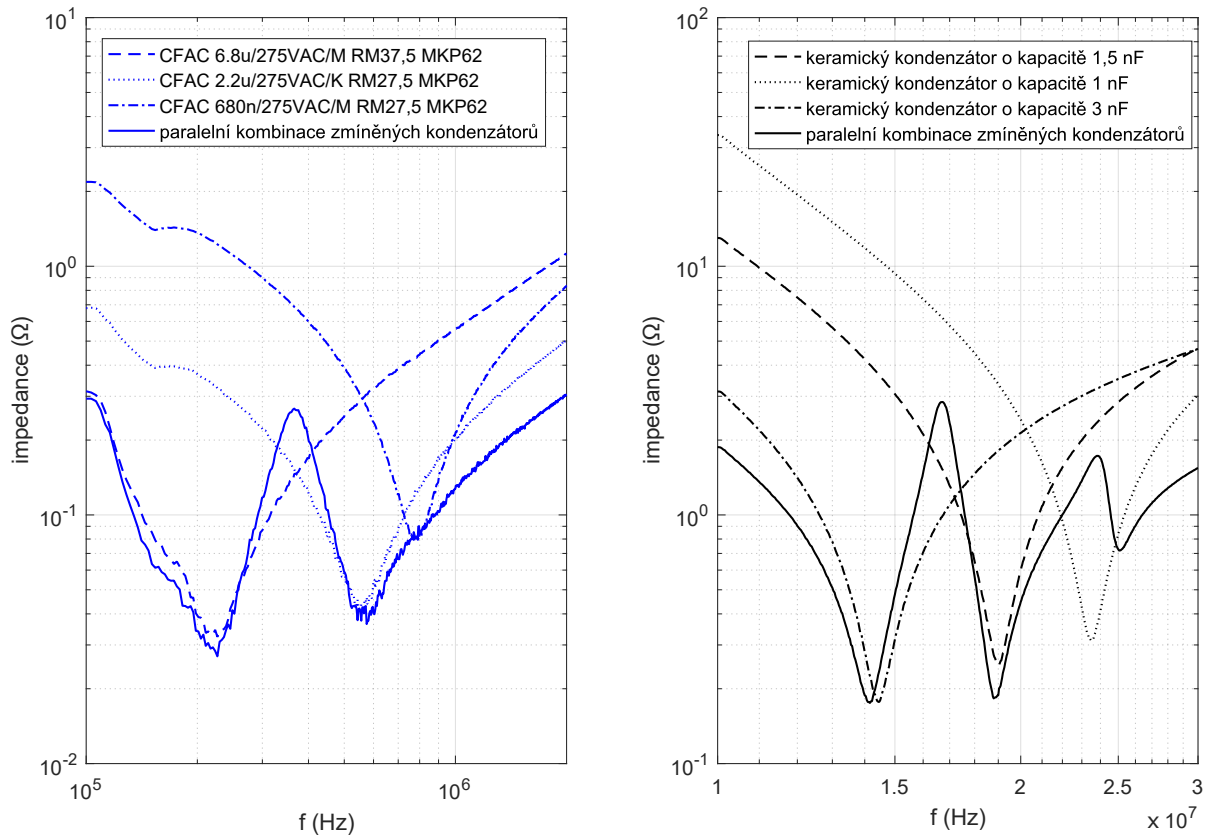
Druhá část tohoto měření proběhla na paralelních kombinacích vybraných kondenzátorů. Z výsledků je možné ověřit, že s více kondenzátory se rozšíří frekvenční odrušovací pásmo, jak bylo zmíněno v teoretické části. Pro paralelní spojení byly v prvním případě vybrány kondenzátory stejného typu a kapacity (obrázek 4.7) a v druhém případě stejného typu, ale různých kapacit (obrázek 4.8). Typy kondenzátorů využité při paralelním měření byly: ERO Roederstein F 1779 K2FB00, Vishay F1773-447-2011, CFAC 6.8u/275/VAC/M RM37,5 MKP62, CFAC 2.2u/275/VAC/M RM27,5 MKP62, CFAC 680n/275/VAC/M RM27,5 MKP62 a keramické kondenzátory o kapacitě 1, 1,5 a 3 nF.



Obrázek 4.7: Impedanční charakteristika kondenzátorů dle legendy

Výsledné průběhy pro kondenzátory stejného typu a kapacity na obrázku 4.7 jsou pro typ kondenzátoru F1779 K2FB00 podle očekávání. Při paralelním spojení dvou stejných kondenzátorů se rezonanční frekvence téměř nemění, ale impedance na této frekvenci klesá a tak se zvyšuje účinnost odrušení. Zároveň se zde rozšiřuje pásmo tlumení. U kondenzátorů typu F1773-447-2011 se vytvořily dva rezonanční vrcholy. Kondenzátory sice byly stejného typu, ale připojovací vývody byly rozdílně dlouhé. Pravděpodobně z tohoto důvodu zde vznikl další rezonanční vrchol a mezi těmito frekvencemi útlum kondenzátoru poklesl. Při návrhu je tedy opět nutné si dát pozor na délku připojení obou kondenzátorů. Připojovací vývody by měly být co nejkratší a v tomto případě i stejně dlouhé. Pokud tyto podmínky splníme a použijeme i stejné typy kondenzátorů, tak se zvýší útlum na frekvenci, kterou jsme chtěli potlačit, omezené pásmo se mírně rozšíří a nevzniknou zde jiné rezonanční vrcholy.

Výsledky u paralelních spojení kondenzátorů s různými kapacitami jsou znázorněny na obrázku 4.8. V obou případech jsou zde zakresleny jednotlivé průběhy samostatných kondenzátorů a pak je zakreslen průběh, kde jsou tyto kondenzátory zapojeny paralelně. V obou grafech je patrné, že průběh při paralelním zapojení se v částech podobá samostatnému kondenzátoru s nejvyšším útlumem.



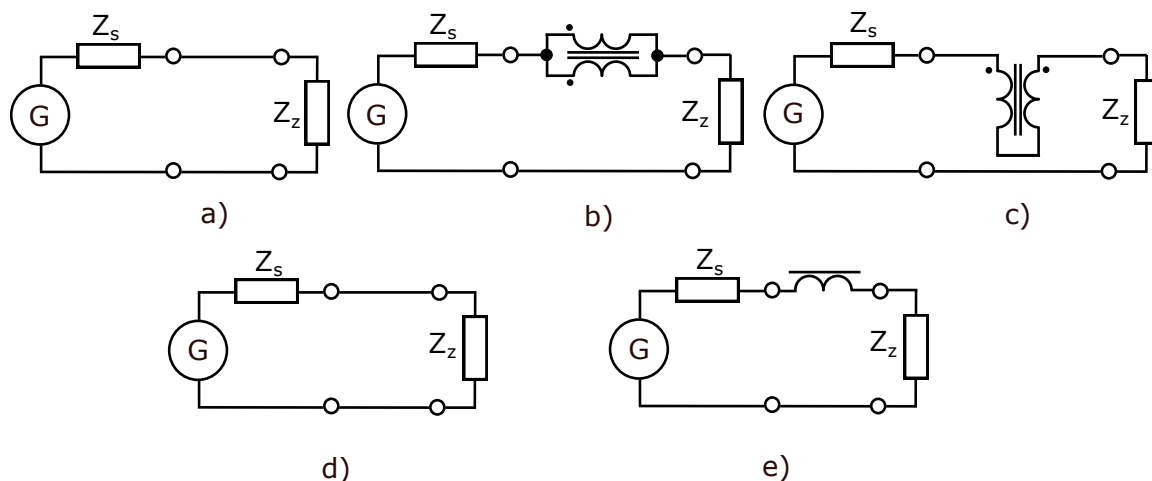
Obrázek 4.8: Impedanční charakteristika kondenzátorů dle legendy

4.2 Měření odrušovacích tlumivek

Měření odrušovacích tlumivek probíhalo na těchto typech: WE-CMB Common Mode Power Line Choke 744821240, WE-CMB HC Common Mode Power Line Choke 7448227005 a WE-CMB NiZn Common Mode Power Line Choke 744842932. Tlumivky byly měřeny jak v symetrickém režimu(comm), tak i v nesymetrickém(diff). Další měření probíhalo na fázových feristorech typu: WE-CBF SMT EMI Suppression Ferrite Bead 742792112, WE-MPSB EMI Multilayer Power Suppression Bead 74279224101, WE-MPSB EMI Multilayer Power Suppression Bead 74279224551 a na navlékacích tlumivkách WE Snap Ferrite with safety key technology 74272132, WE Snap Ferrite with optical closing control mechanism 74275813, WE Snap Ferrite for RF applications 74271633, WE Snap Ferrite with safety key technology 74271132, Vacuumschmelze T60006-L2030-W423, MAGNETEC M-070-02 YM a WE TOROIDAL FERRITE 74270103. Všechny měřené tlumivky jsou zobrazeny na obrázku 4.12 a 4.19. Měření opět probíhalo na spektrálním analyzátoru RIGOL a měřil se útlum tlumivek. Pro feristory bylo nutné přepočítat přenos na impedanci a to jako v předešlém případě, tedy ze znalosti zapojení a vstupní a výstupní impedance ($Z_s = Z_z = 50 \Omega$).

$$L = 20 \cdot \log \left(\frac{Z_s \cdot Z_z + X_L}{Z_s + Z_z} \right) \Rightarrow X_L = 10^{(2 + \frac{L}{20})} - 100 \quad (4.2)$$

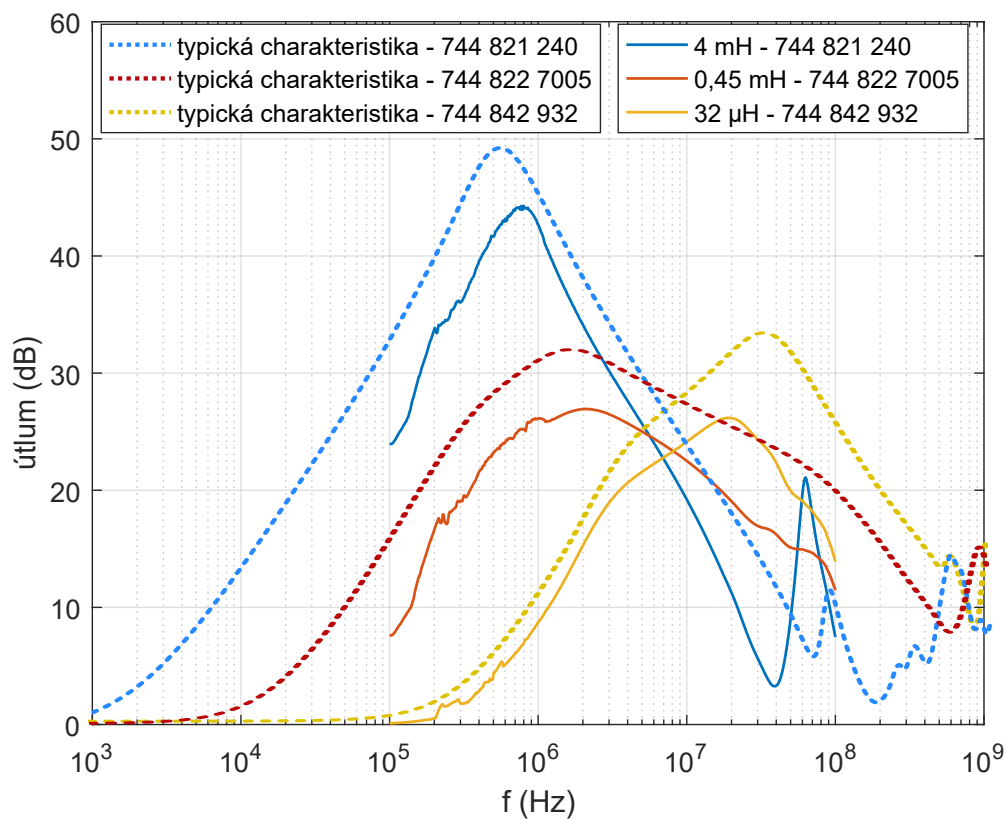
První měření tlumivek bylo realizováno dle zapojení na obrázku 4.9b a 4.9c. Výsledky jsou zobrazeny na obrázku 4.10 pro symetrický režim a na obrázku 4.11 pro nesymetrický režim. Na těchto obrázcích jsou zobrazeny jak výsledky měření, tak typické průběh z katalogových listů.



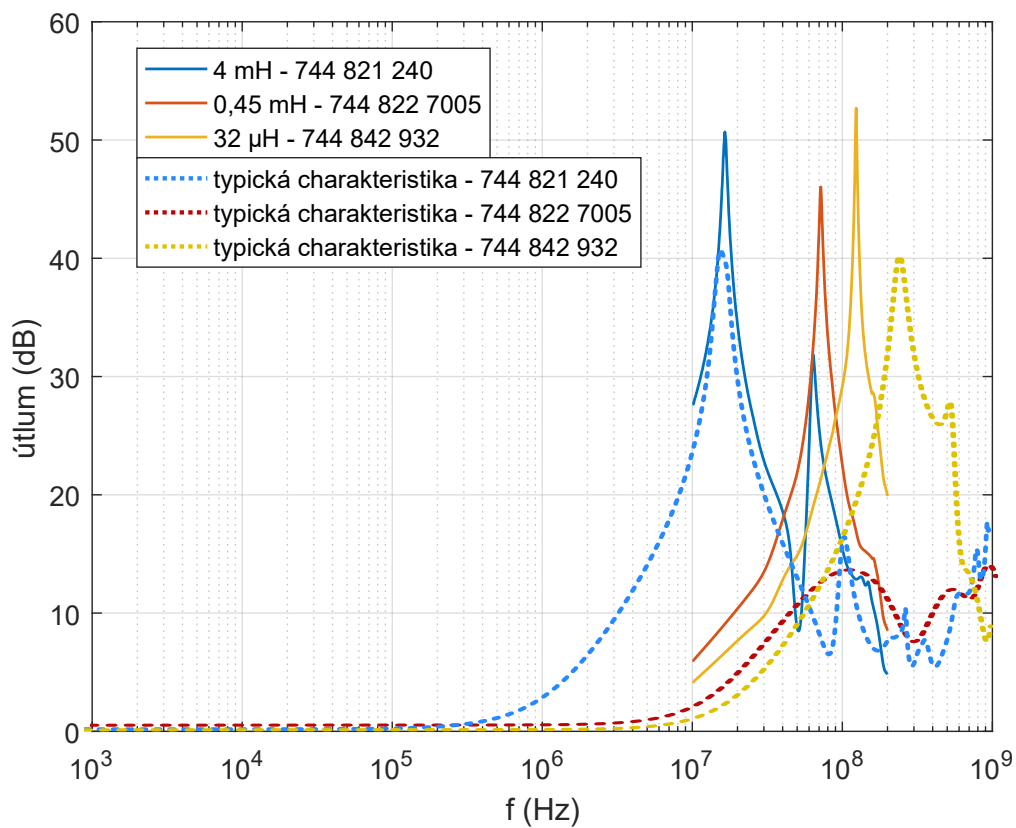
Obrázek 4.9: Schéma zapojení tlumivek: a) bez připojené tlumivky, b) s připojenou tlumivkou v symetrickém režimu, c) s připojenou tlumivkou v nesymetrickém režimu, d) bez připojeného feristoru, e) s připojeným feristorem

Z výsledků na obrázku 4.10 je zřejmé, že při měření v symetrickém režimu je útlumová charakteristika tlumivek položena výše než naměřená charakteristika, tedy útlum naměřených součástek je nižší než v typické charakteristice. Při pohledu na charakteristiky lze pozorovat, že je tvar ideální a naměřené charakteristiky velmi podobný a i jejich maxima jsou v blízkých frekvencích. Rozdíl mezi charakteristikami je pravděpodobně dán parametry přípravku, na kterém byly tyto tlumivky měřeny. Při využití v praxi je tedy nutné uvážit i parametry pouzdra, přes které se tlumivka připojí do zařízení, aby to, jak se odrušovací tlumivka připojí, nijak zásadně nesnížilo útlum nežádoucích signálů anebo nezměnilo jeho frekvenci s maximálním útlumem.

Na obrázku 4.11 jsou zobrazeny charakteristiky stejných tlumivek, ale v jiném zapojení. Zde jsou naměřené výsledky opět podobné těm z katalogových listů. U tlumivky WE 7448227005 je rozdíl výrazný. Na této tlumivce vychází naměřený útlum výrazně vyšší, než v katalogovém listu. V případě tlumivky WE 744842932 už není tak velký rozdíl v hodnotě útlumu, ale větší rozdíl je ve frekvenci, kde nastává maximální útlum. Tato hodnota se liší přibližně o 100 MHz. U tlumivky WE 744821240 je naměřený průběh nejbližší katalogovému průběhu. Tyto výsledky jsou pravděpodobně opět ovlivněny přípravkem, přes který se tlumivka vkládá do obvodu. Na přípravku pravděpodobně nastala rezonance a s rostoucí frekvencí se zde parazitní prvky projeví větší mírou a výsledky jsou více zkreslené.

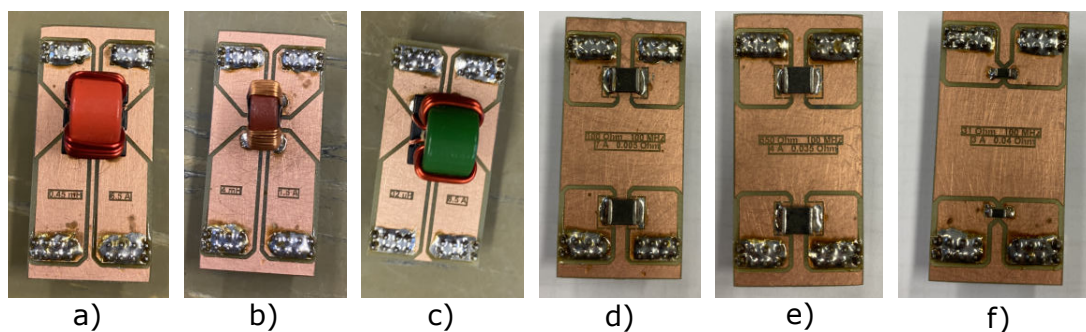


Obrázek 4.10: Závislost útlumu na frekvenci v symetrickém režimu tlumivek

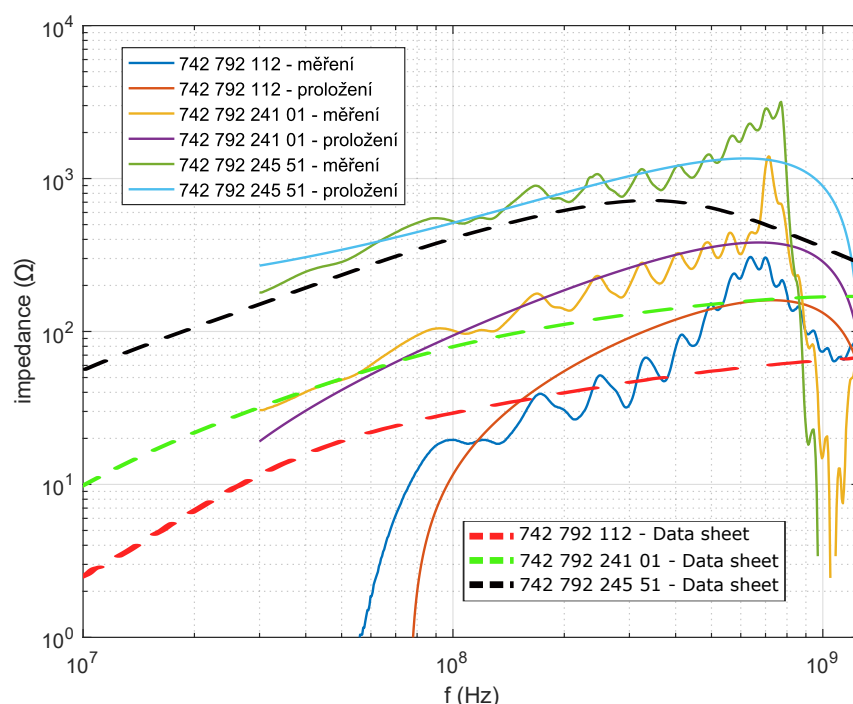


Obrázek 4.11: Závislost útlumu na frekvenci v nesymetrickém režimu tlumivek

Další měření probíhalo na fázových tlumivkách podle zapojení na obrázku 4.9e. Výsledky jsou na obrázku 4.13. Zde jsou zakreslené výsledky z laboratorního měření a typické průběhy impedance z katalogových listů. Výsledky měření se na první pohled vůbec neshodují s typickými průběhy. Při proložení těchto průběhů polynomem druhého řádu lze najít podobnost v průbězích z katalogového listu. Průběhy se nachází ve vyšších frekvencích a z tohoto důvodu přípravek pravděpodobně ovlivňuje výsledky měření.



Obrázek 4.12: Foto měřených tlumivek: a) WE-CMB HC Common Mode Power Line Choke 7448227005 b) WE-CMB Common Mode Power Line Choke 744821240 c) WE-CMB NiZn Common Mode Power Line Choke 744842932 d) WE-MPSB EMI Multilayer Power Suppression Bead 74279224101 e) WE-MPSB EMI Multilayer Power Suppression Bead 74279224551 f) WE-CBF SMT EMI Suppression Ferrite Bead 742792112



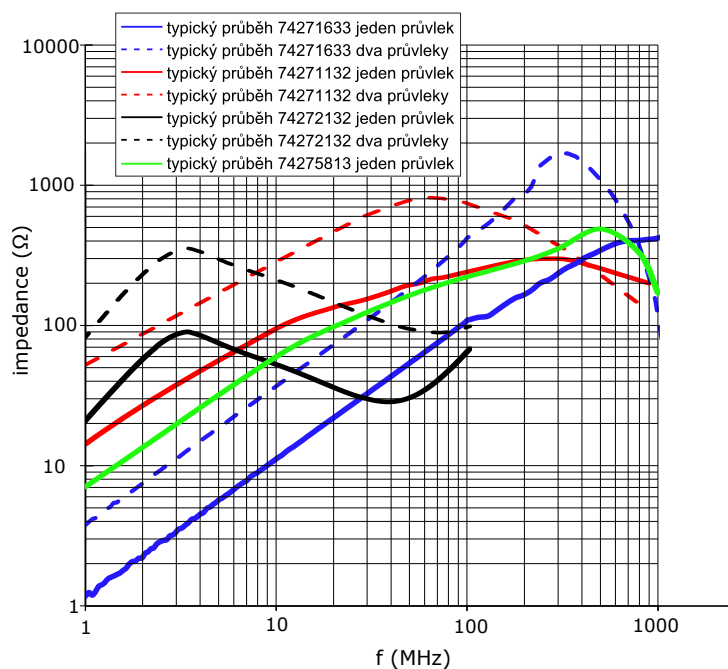
Obrázek 4.13: Impedance feristoru v závislost na frekvenci

Poslední měření tlumivek v této práci proběhlo na feristorech, kterými se provléká vedení, aby se utlumily rušivé signály. Obrázek 4.21 naznačuje, jak lze využít tyto tlumivky. Měření bylo rozděleno na dvě části. V první části byly měřeny tlumivky, kterými

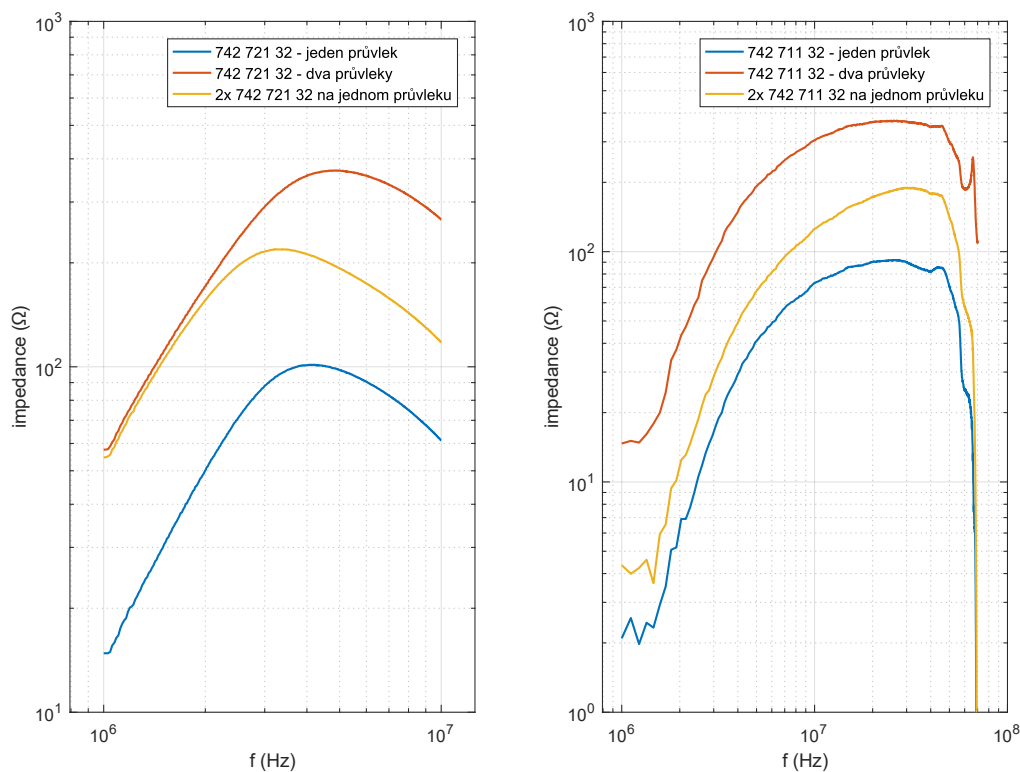
se provlékne jedna smyčka vedení, následně dvě smyčky vedení a naposledy jedna smyčka vedení, která prochází skrz dvě totožné tlumivky. V druhé části tohoto měření je k tlumivce připojen zdroj se stejnosměrným proudem, u kterého lze měnit amplitudu proudu. Tímto proudem je syceno magnetické jádro tlumivky a při různých velikostech sycení jsem měřil velikost útlumu tlumivky.

Výsledky z měření na průvlecích jsou znázorněny na obrázcích 4.15 a 4.16. Znovu je útlum přepočítán na impedanci podle vzorce 4.2, aby bylo možné porovnat výsledky s typickými průběhy na obrázku 4.14.

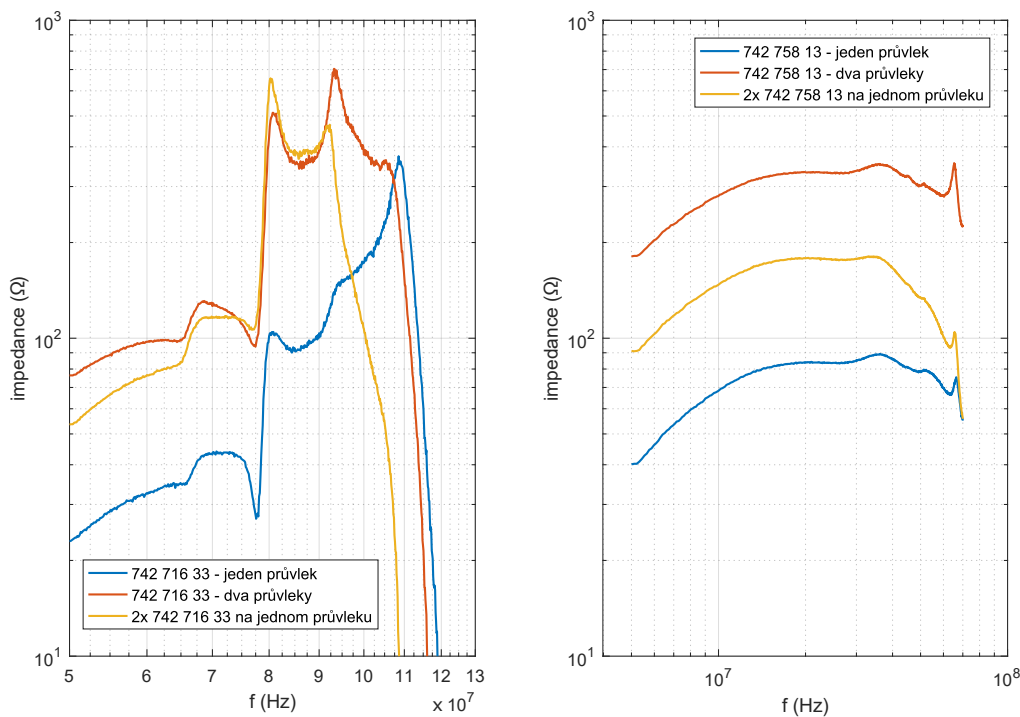
Ve všech čtyřech průbězích lze pozorovat, že dva průvleky tlumivkou jsou neefektivnější v útlumu rušivých signálů. Následují dvě tlumivky na jednom průvleku, které se používají pokud konstrukce chráněného zařízení nedovoluje využít dvojitý průvlek a nejnižší útlum má dle předpokladů jedna tlumivka na jednom průvleku. Pouze u typu WE 74271633 se průběhy pro jeden průvlek se dvěma tlumivkami a jednou tlumivkou se dvěma průvleky v části grafu téměř překrývají. Při měření tohoto typu se měřená charakteristika měnila i při pouhém pohnutí ruky v blízkosti obvodu a při ukládání hodnot na spektrálním analyzátoru. Tyto výsledky jsou tedy zkreslené kvůli rozdílným parazitním vazbám při zaznamenávání hodnot. Naměřené výsledky u tlumivky WE 74272132 jsou téměř shodné s typickými charakteristikami z katalogového listu. Pro tlumivku WE 74272132 je to podobné, ale s rostoucí frekvencí nad 30 MHz jsou hodnoty zkreslené parazitními vazbami. To stejné platí i pro tlumivku WE 742758813, kde se naměřené výsledky začínají výrazněji lišit přibližně od hodnoty 30 MHz. U tlumivky WE 74272132 je startovací frekvence měření 50 MHz, protože je tato tlumivka určena pro VF použití. Už v této oblasti je rozptyl od katalogových hodnot značný a to zásluhou vlivu parazitních vazeb a tedy měření na tomto typu tlumivky bylo spíše orientační.



Obrázek 4.14: Typické charakteristiky navlékacích tlumivek dle katalogových listů



Obrázek 4.15: Impedance navlékacích tlumivek 74272132 (vlevo) a 74271132 (vpravo) v závislosti na frekvenci a počtu průvleků

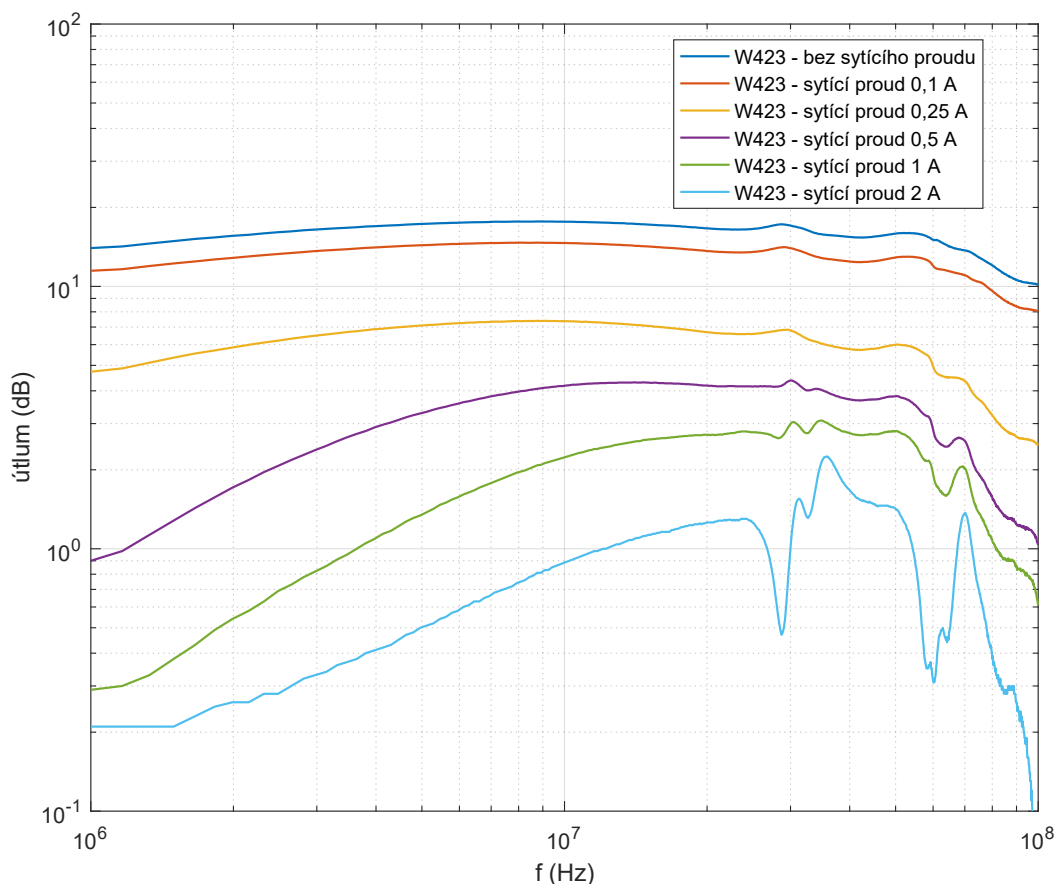


Obrázek 4.16: Impedance navlékacích tlumivek 74271633 (vlevo) a 74275813 (vpravo) v závislosti na frekvenci a počtu průvleků

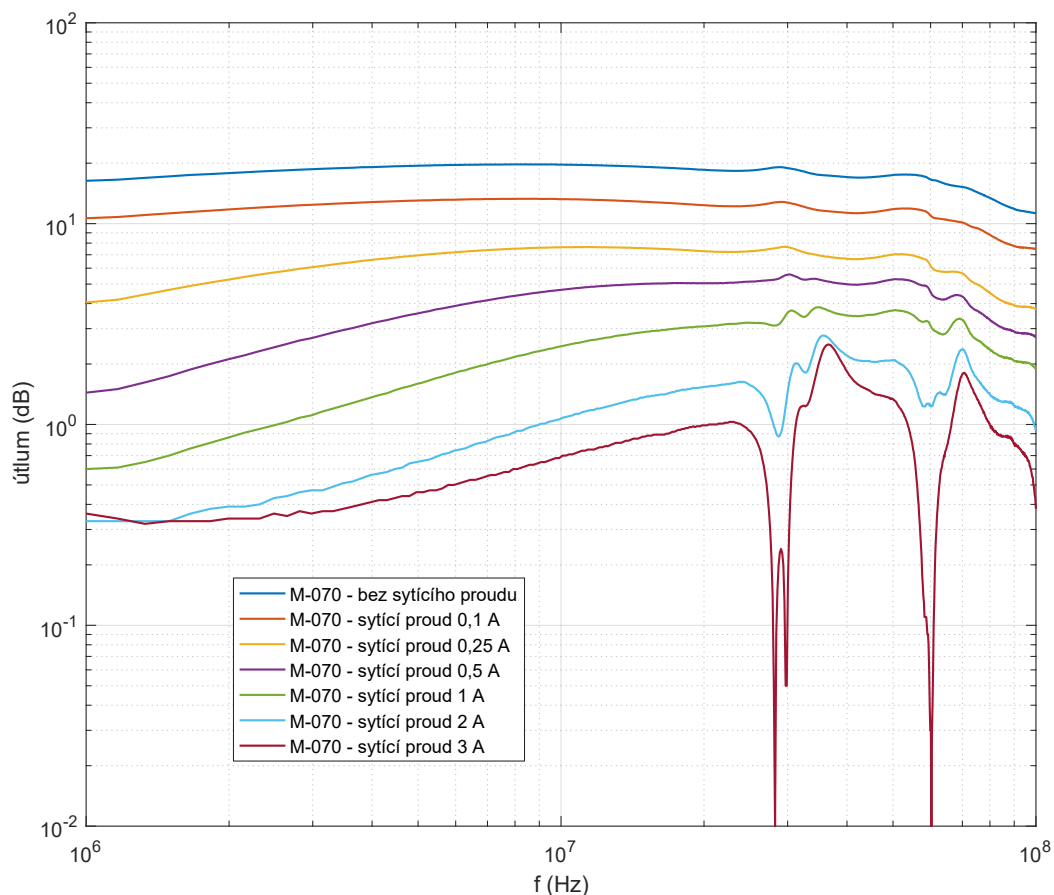
V druhé části tohoto měření tlumivkami protékal stejnosměrný sytící proud a byl pozorován vliv sytícího proudu na útlum tlumivky. Sytící proud byl v rozmezí od 0 A do 3 A. Tomuto měření byly podrobeny všechny tlumivky z obrázku 4.19. Pro tlumivky *a*, *b*, *c*, *d*, ze zmíněného obrázku nejsou zobrazeny výsledky měření, jelikož sytění nemělo téměř žádný vliv na maximum útlumu. Pouze se útlum mírně deformoval na určitých frekvencích (maximálně však klesl o 1,5 dB při sytícím proudu 3 A).

Naměřené výsledky z tlumivek *e*, *f*, *g* jsou postupně znázorněny na následujících obrázcích. Výsledky tlumivky typu W423 jsou na obrázku 4.17. Zde je patrné, že tlumivka je ovlivňována s rostoucím sytícím proudem velmi negativně a čím vyšší proud, tím více ji ovlivňuje. Z obrázku lze také vyčíst, že útlum tlumivky při sytícím proudu vyšším než 1 A je velmi malý. Úplné nasycení feritového jádra proběhlo kolem 2 A. Tlumivka je tedy velmi závislá na velikosti protékaného proudu, jelikož feritové jádro se poměrně rychle nasytí. Toto nasycení proběhne tím rychleji, čím je vyšší permeabilita jádra.

Výsledky tlumivky M-070 jsou znázorněny na obrázku 4.18. Zde je opět zřejmé, že s rostoucím proudem klesá útlum. Tento typ má velikost útlumu bez sytícího proudu přibližně 20 dB. Tento útlum klesne až na 2 dB pokud se proud zvýší na 3 A. Při pohledu na průběhy pro 2 A a 3 A je zřejmé, že feritové jádro už bylo téměř nasyceno u 2 A a následně už se útlum snížil minimálně. Tato tlumivka je také velmi závislá na protékaném proudu a její feritové jádro se opět nasytí poměrně brzy.



Obrázek 4.17: Útlum cívky W423 v závislosti na frekvenci a rozdílném sytícím proudu

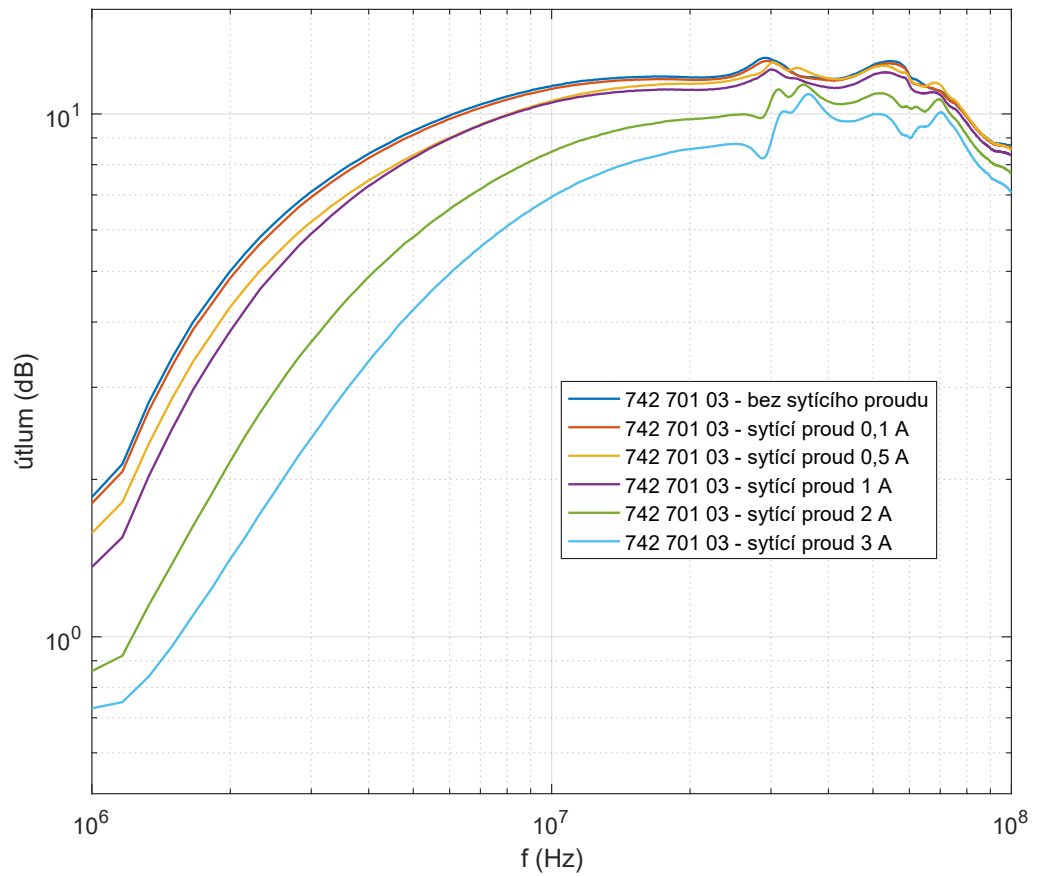


Obrázek 4.18: Útlum cívky M-070 v závislosti na frekvenci a rozdílném sytícím proudu

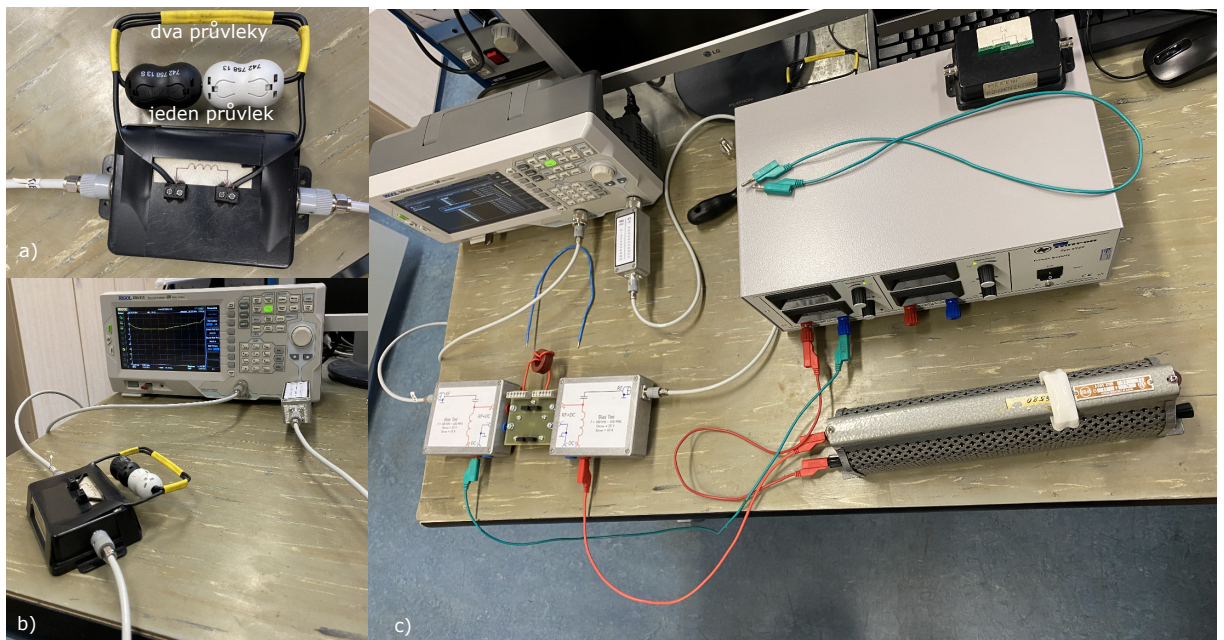
Výsledky tlumivky WE 74270103 jsou znázorněny na obrázku 4.20. Na těchto výsledcích lze pozorovat, že tento typ nejlépe reaguje na protékaný sytící proud. Průběhy pro různé velikosti proudu se odchyľují minimálně v porovnání s předchozími případy a průběhy s proudy do 1 A se téměř překrývají. Měření této tlumivky bylo provedeno do hodnoty proudu 3 A. Tento typ tlumivky je výrazně méně závislý na protékajícím proudu a je vhodné ho využít v obvodech s vyššími proudy, které by mohly nasycovat jádro. V obvodech bez sytících proudů má ale tento typ nižší útlum, a tak je v těchto případech vhodnější využít předchozí typy s vyšším útlumem.



Obrázek 4.19: Fotografie tlumivek: a) WE Snap Ferrite with safety key technology 74272132, b) WE Snap Ferrite with optical closing control mechanism 74275813, c) WE Snap Ferrite for RF applications 74271633, d) WE Snap Ferrite with safety key technology 74271132, e) Vacuumschmelze T60006-L2030-W423, f) MAGNETEC M-070-02 YM, g) WE TOROIDAL FERRITE 74270103



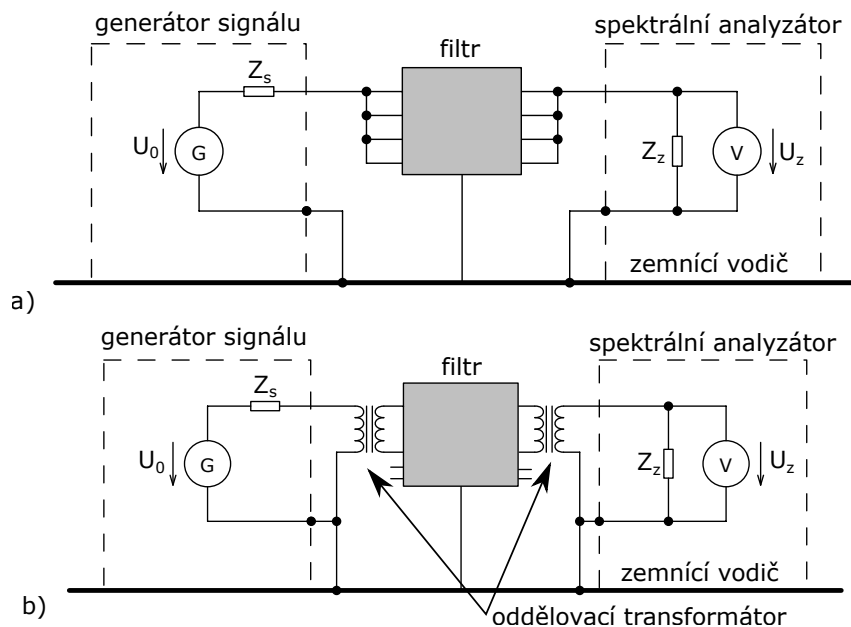
Obrázek 4.20: Útlum cívky WE 74270103 v závislosti na frekvenci a rozdílném sycícím proudu



Obrázek 4.21: Měření tlumivek: a) Přípravek pro měření navlékacích tlumivek b) Měření navlékacích tlumivek na spektrálním analyzátoru RIGOL c) Měření tlumivek s protékajícím sycícím proudu

4.3 Měření odrušovacích EMI filtrů

V této části jsem měřil na EMI filtrech typu: QLT POWER FYE05T1, QLT POWER FYC05T1, CORCOM 3EMC1, CORCOM 10VR1, SCHURTER 5500.2060 a SCHURTER 5500.2027. Pro měření útlumu jsem opět využil spektrální analyzátor RIGOL. Schéma zapojení je znázorněno na obrázku 4.22.

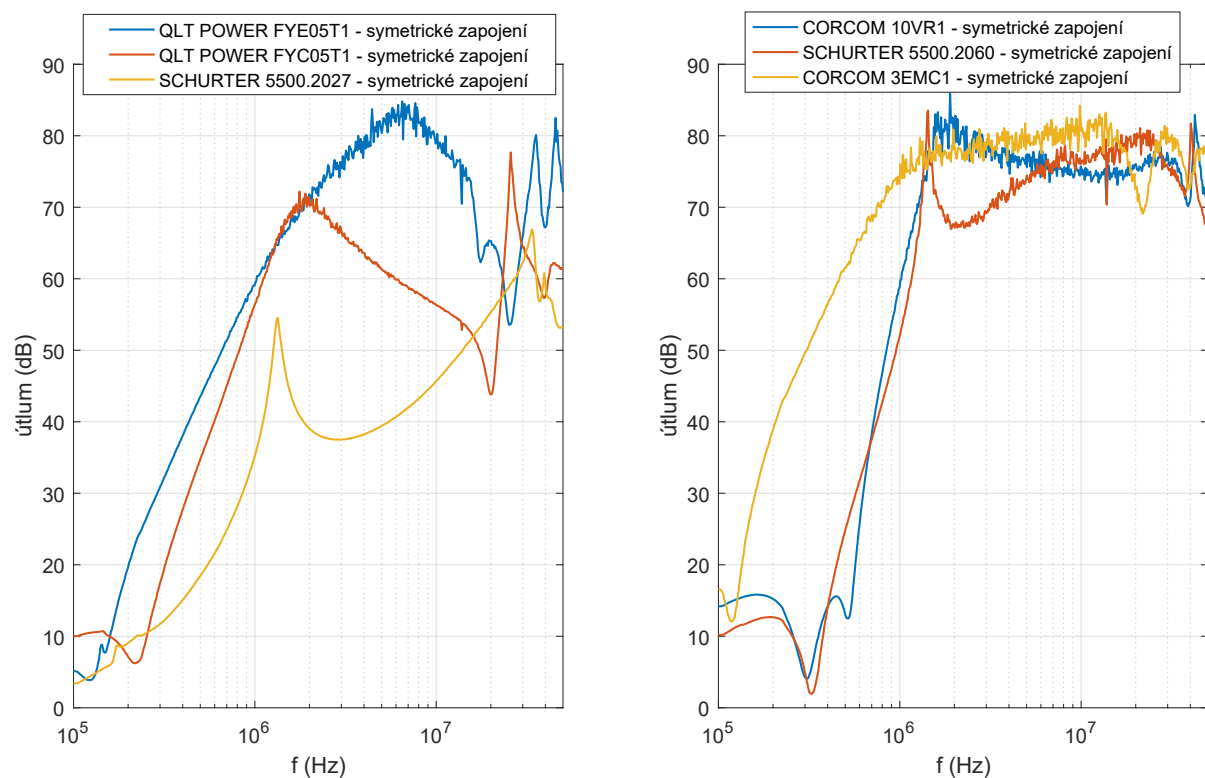


Obrázek 4.22: Schéma zapojení EMI filtrů: a) pro nesymetrické složky útlumu, b) symetrické složky útlumu (vlastní zpracování dle [38])

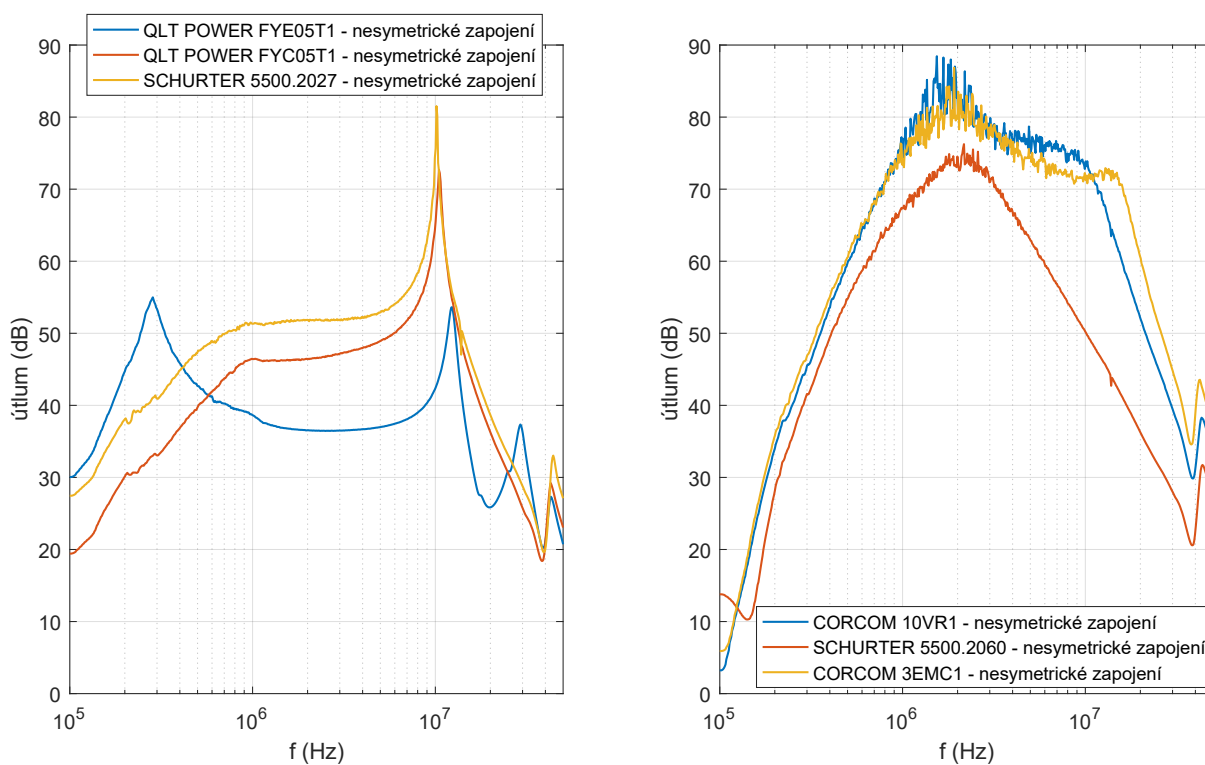
Výsledky měření v symetrickém režimu jsou na obrázku 4.23 a v nesymetrickém režimu na obrázku 4.24.

Z měřených jednoduchých filtrů má v symetrickém režimu největší útlum typ FYE05T1, který dosahuje hodnoty až 85 dB v okolí frekvence 6 MHz. V nesymetrickém režimu má naopak tento filtr nejnižší útlum. Filtr typu 5500.2027 má naopak nejvyšší útlum v nesymetrickém režimu a to 82 dB v okolí frekvence 10 MHz, ale naopak nejnižší útlum v symetrickém režimu. Filtr typu FYC05T1 se může jevit jako střední cesta mezi naměřenými jednoduchými filtry. V symetrickém režimu má útlum 71 dB v okolí frekvence 2 MHz a v nesymetrickém režimu je to 73 dB v okolí frekvence 10 MHz.

Výsledky měření na dvojitých filtrech jsou jak v symetrickém, tak i v nesymetrickém režimu velmi podobné. Typy 10VR1 a 5500.2060 se ve velké části charakteristiky pro symetrické složky útlumu chovají velmi podobně. Typ 3EMC1 začíná působit už při nižších frekvencích než předchozí typy. Maximální útlum u všech třech typů se pohybuje u hodnoty 80 dB. V nesymetrickém režimu u dvojitých filtrů se typy 10VR1 a 3EMC1 téměř shodují v celém naměřeném průběhu a jejich maximální útlum se blíží hodnotě 86 dB. Typ 5500.2060 má nižší maximální útlum, ale rámcově má také velmi podobný průběh s předchozími typy.



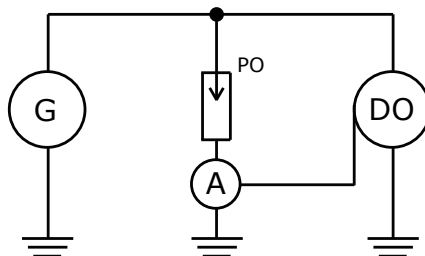
Obrázek 4.23: Útlumové charakteristiky pro symetrické složky útlumu, jednoduché filtry (vlevo), dvojitě filtry(vpravo)



Obrázek 4.24: Útlumové charakteristiky pro nesymetrické složky útlumu, jednoduché filtry (vlevo), dvojitě filtry(vpravo)

4.4 Měření přepětových ochran

Měření přepětových ochran bylo realizováno rázovým impulsem (surge) generovaným z univerzálního generátoru EM TEST UCS500-M. Rázový impuls je specifikován v normě ČSN EN 61000-4-5. Tento impuls má typické parametry: čelo impulsu $1,2 \mu\text{s}$ a doba půltýlu $50 \mu\text{s}$. Průběh zkušebního signálu je znázorněn v příloze 2. V naměřených výsledcích jsou pouze hodnoty do $8 \mu\text{s}$, jelikož tato část průběhu je podstatná pro vyhodnocení výsledků působení přepětových ochran. Pro měření odezvy byl využit digitální osciloskop LeCroy wave pro 7300A s proudovou sondou LeCroy CP500, která má omezení $I_{\text{peak}} = 700 \text{ A}$ a napěťovou sondou PPE6KV teledyne LeCroy. V měření jsem zaznamenával odezvu přepětové ochrany na přivedený impuls. Měřeny byly tyto ochrany: bleskojistka LITTELFUSE CG90L, bleskojistka TDK EPCOS 23003O, varistor VCR14D431, varistor VCR14D681 a transily 1,5KE33CA a 1,5KE68CA.



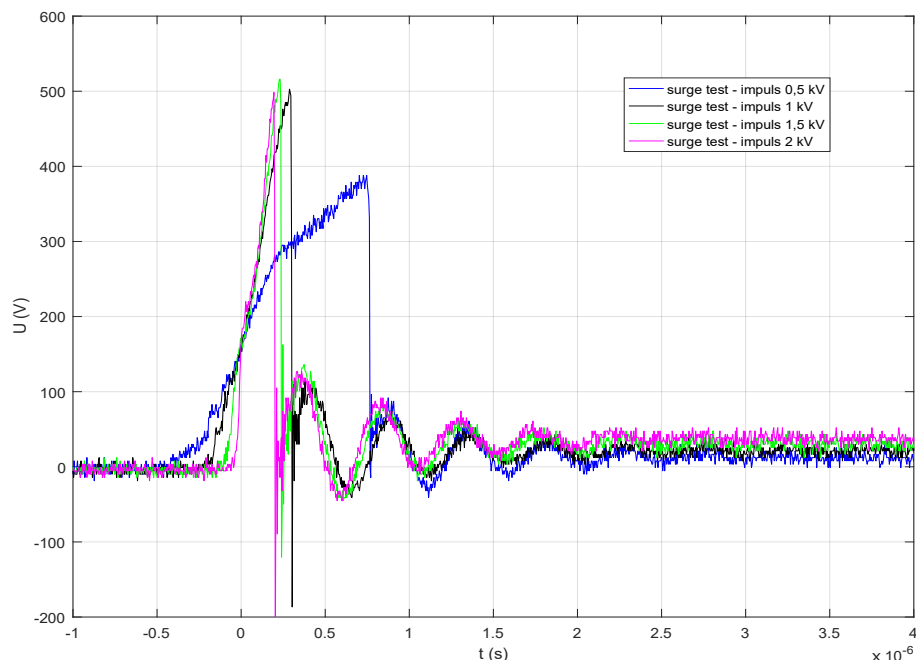
Obrázek 4.25: Schéma zapojení při měření přepětových ochran

U měření varistorů a jiskřišť byly přiváděny impulsy v rozsahu od $0,5$ až do 2 kV a u transilů od 160 do 280 V . Schéma zapojení je znázorněno na obrázku 4.25, kde G je generátor pulsů, DO je digitální osciloskop, A je proudová sonda a PO je přepětová ochrana.

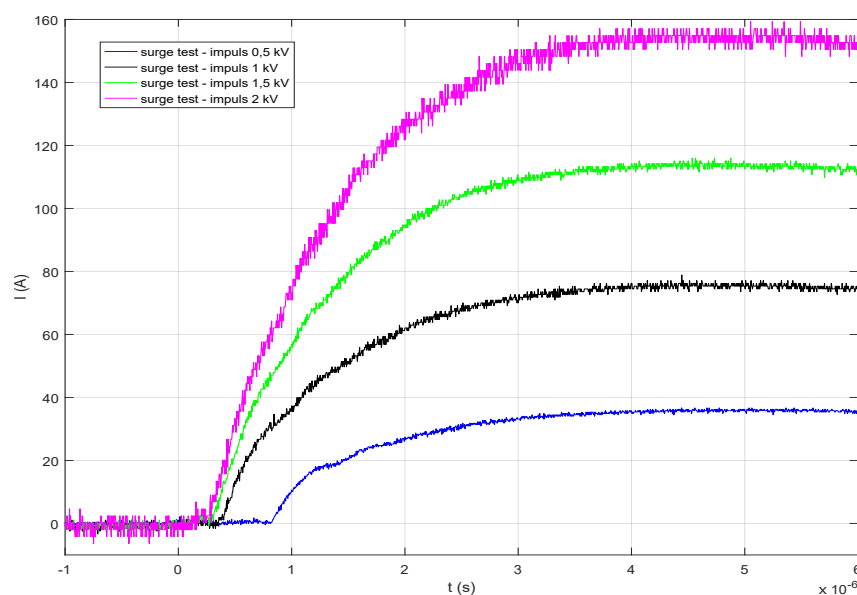
Při měření impulsů naprázdno se na osciloskopu vždy zobrazila špičková hodnota naměřeného průběhu menší než byla špičková hodnota impulsu zadaného na generátoru. To může být způsobeno útlumem vlastních obvodů osciloskopu a sondy. Naměřené hodnoty napěťových impulsů naprázdno jsou v příloze 3.

První měření přepětových ochran jsem realizoval na bleskojistkách, kde jsem měřil hodnoty svodového proudu a napětí na digitálním osciloskopu. Z výsledků, které jsou na obrázku 4.26 a 4.27 je zřejmé, že zapalovací napětí u typu bleskojistky CG90L se nachází v okolí hodnoty 500 V . Při porovnání s katalogovou hodnotou, která má hodnotu pro tento typ $U_z = 600 \text{ V}$, je zápalné napětí podstatně nižší. Bleskojistka reaguje i na impuls o reálné hodnotě 450 V (impuls na generátoru $0,5 \text{ kV}$), který je pod hodnotou zápalného napětí. Zde je reakce bleskojistky pomalejší a na nižší hodnotě napětí (přibližně 380 V). Proud této bleskojistky téměř dosahuje hodnoty 160 A při napěťovém impulsu 2 kV . To je v pořádku, jelikož v katalogovém listu je stanovena maximální hodnota vrcholového proudu 4 kA a k té se měření ani zdaleka nepřiblížilo. Bleskojistka typu EPCOS 23003O má podle výsledků zápalné napětí vyšší než předchozí typ a to přibližně 580 V a proud

znovu téměř dosahuje hodnoty 160 A. Pro lepší znázornění okamžiku zapálení oblouku v bleskojistce, jsem zobrazil naměřené hodnoty napětí a proudu v jednom grafu, který je umístěn v příloze 4. Tento graf je z důvodu přehlednosti pouze pro napěťový impuls 0,5 kV na bleskojistce typu CG90L, ale analogicky platí u všech bleskojistek, že proud začíná vzrůstat při zapálení výboje (pokles napětí).



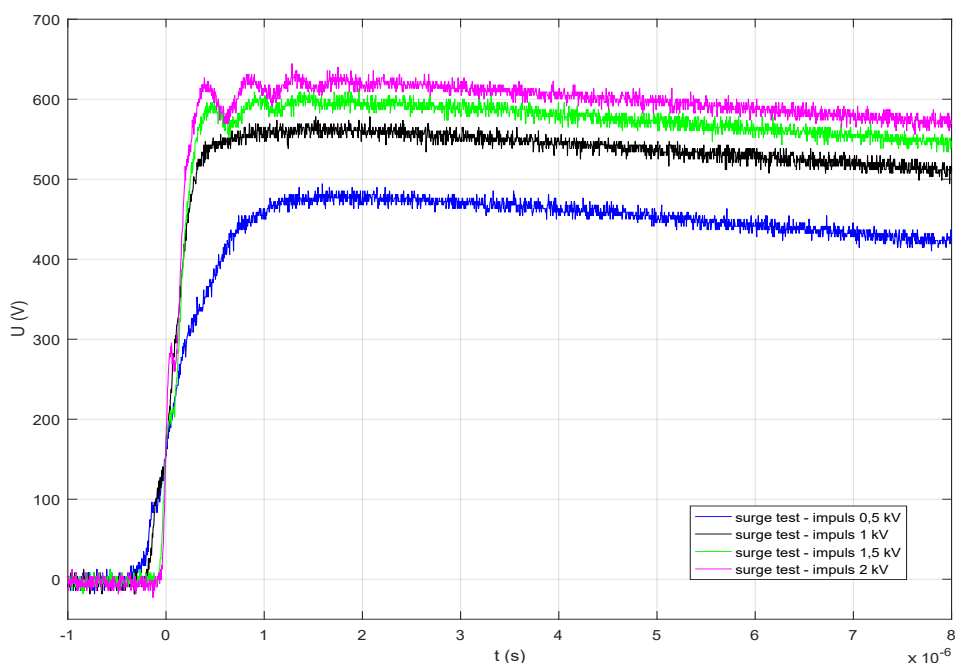
Obrázek 4.26: Velikost napětí rázového impulsu o hodnotách 500, 1000, 1500 a 2000 V na bleskojistce typu CG90L



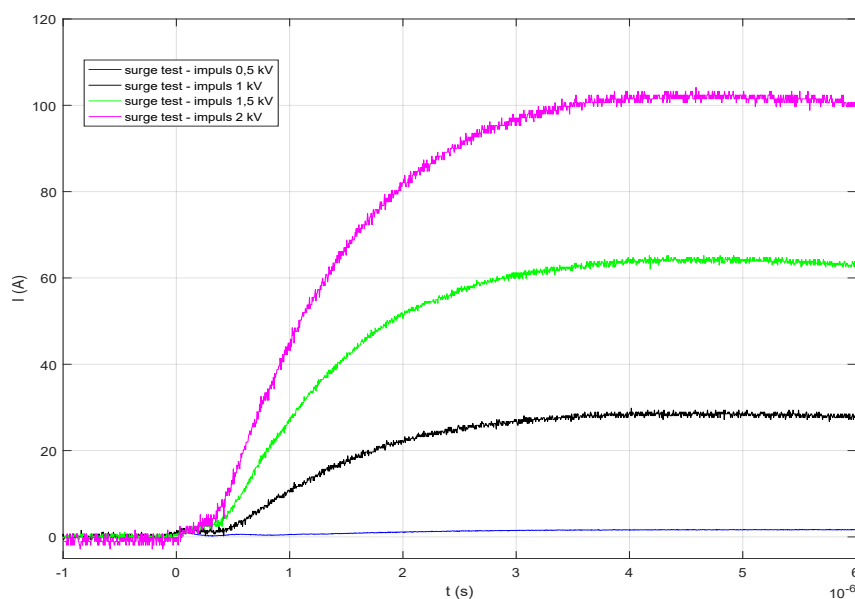
Obrázek 4.27: Velikost svodového proudu rázového impulsu o hodnotách 500, 1000, 1500 a 2000 V na bleskojistce typu CG90L

Druhá část měření proběhla na varistorech, které omezují napětí. Z výsledků, které

lze najít na obrázcích 4.28 a 4.29 je vidět, že varistory omezují napětí na určitou hodnotu, narozdíl od bleskojistek. V katalogovém listu jsou uvedena otevírací napětí. Pro typ VCR14D431 je to 430 V a pro typ VCR14D681 je to 680 V. V obou případech napětí překročilo otevírací napětí a následně začalo postupně klesat. S rostoucím napětím impulsů se také zvyšuje velikost napětí při kterém varistor začne omezovat. Tento jev u bleskojistek nenastává. U bleskojistek je při překročení zápalného napětí impuls omezen téměř na stejné hodnoty.

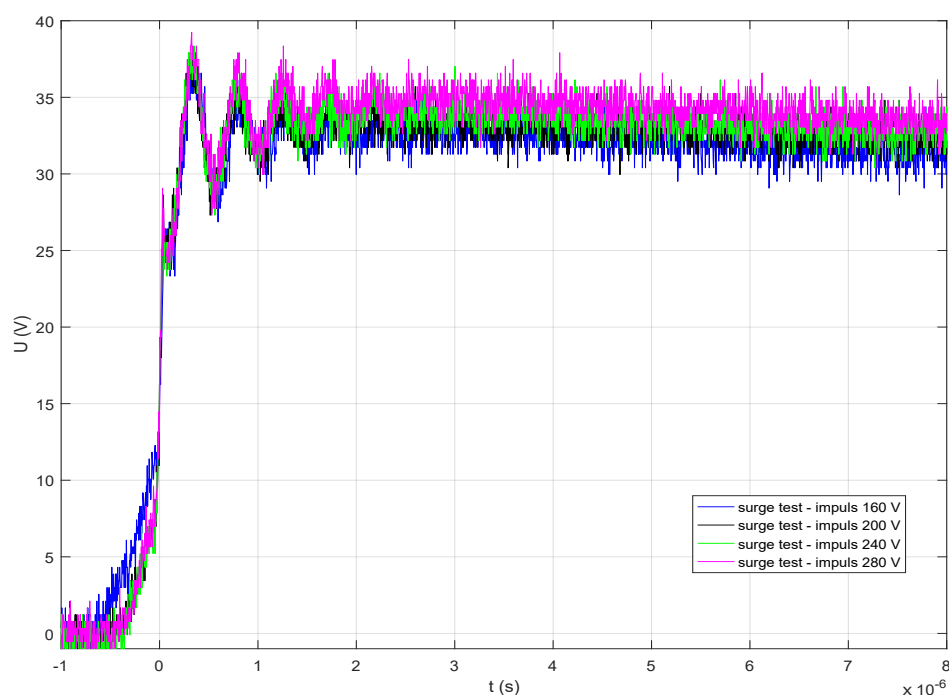


Obrázek 4.28: Velikost napětí rázového impulsu o hodnotách 500, 1000, 1500 a 2000 V na varistoru typu VCR14D431

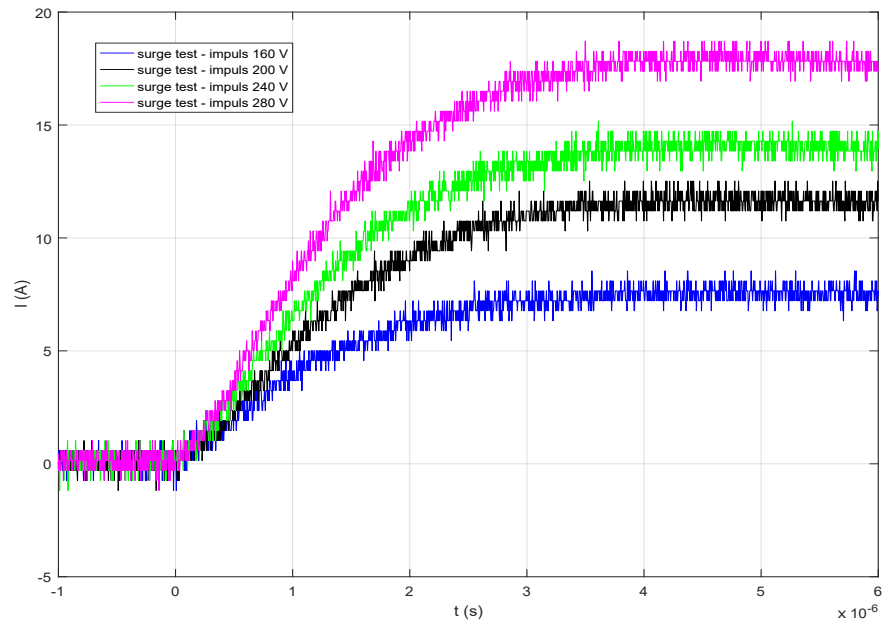


Obrázek 4.29: Velikost proudu rázového impulsu o hodnotách 500, 1000, 1500 a 2000 V na varistoru typu VCR14D431

Poslední část tohoto měření proběhla na transilech, tedy supresorových diodách, které jsou z měřených přepětových ochran nejjemnější. Transily omezují napětí na určitou hodnotu, podobně jako varistory. V katalogovém listu je vypsáno napětí, na které transily omezují a jejich maximální proud. Pro typ 1,5KE33CA je to 34,7 V a 32,8 A a u typu 1,5KE68CA je to 71,4 V a 16,3 A. Z výsledků měření je zřejmé, že naměřené výsledky obou součástek odpovídají hodnotám z katalogových listů. U typu 1,5KE68CA je proud procházející součástkou přibližně 17 A při rázovém impulsu 280 V a tak by tento typ pravděpodobně bez problémů zvládl omezit i vyšší napěťový impuls než 280 V. U typu 1,5KE33CA se proud při impulsu 280 V blíží svému maximálnímu proudu z katalogu a vyšší napěťové pulsy než 280 V by mohly součástku zničit.



Obrázek 4.30: Velikost napětí rázového impulsu o hodnotách 160, 200, 240 a 280 V na transilu 1,5KE33CA



Obrázek 4.31: Velikost proudu rázového impulsu o hodnotách 160, 200, 240 a 280 V na transilu 1,5KE33CA

5 Závěr

Účelem této diplomové práce byl popis vzniku rušivých signálů, odrušovacích prvků a analýza naměřených dat. Popsal jsem, jaké jsou rušivé signály a jaká zařízení způsobují konkrétní druh rušení. Dále jsem popsal, jak se rušivé signály šíří a jak lze správným uspořádáním omezit přenos rušivého signálu k chráněnému zařízení. V dalším bodu práce jsem rozebral přepětové ochrany a prvky omezující rušivé signály. V praktické části jsem analyzoval naměřená data z měření různých typů kondenzátorů, tlumivek, LC filtrů a přepětových ochran.

Kondenzátory byly měřeny jak samostatně, tak i v paralelní kombinaci. Výsledky u samostatných kondenzátorů vycházely dle předpokladu, a to že se zvyšující se kapacitou klesá rezonanční frekvence, konkrétně typ CFAC 330n se mírně odlišoval od katalogového průběhu rezonanční frekvencí, ale impedance v tomto bodě byla řádově stejná. V případě paralelní kombinace kondenzátorů je potřeba dávat pozor na typ, kapacitu a délku připojení kondenzátorů. Pokud je cílem utlumit jednu určitou frekvenci rušení, tak musí být tyto parametry velmi podobné (pokud je to možné, tak stejné). Je vhodné zdůraznit, že při paralelním spojení kondenzátorů se téměř nemění rezonanční frekvence, jak by tomu bylo při nahrazení jedním kondenzátorem se stejnou kapacitou, jakou má tato paralelní kombinace.

U měření tlumivek byly využity tři druhy tlumivek: fázové tlumivky, kompenzované tlumivky a tlumivky s feritovým jádrem navlečené na vodiči. Výsledky měření rámcově odpovídaly katalogovým průběhům a to zejména u symetrického režimu kompenzovaných tlumivek. V nesymetrickém režimu se při zvyšující se frekvenci naměřené průběhy začaly odlišovat od katalogových průběhů. Výsledky návlekových tlumivek jsou pro nižší frekvence podobné katalogovým průběhům, ale se zvyšující se frekvencí se začínají výrazně lišit. Rozdíl je pravděpodobně způsobený parazitními členy tlumivky. Nejvyšší útlum ze tří variant má ve většině případů dvojitý průvlek tlumivkou, následují dvě tlumivky na jednom průvleku a jako nejméně účinná se jeví jedna odrušovací tlumivka na jednom průvleku. Pro měření, při kterém skrz obvod protékal stejnosměrný proud a sytil feromagnetické jádro tlumivky, vyšel nejlépe typ WE 74270103. Zde klesl naměřený maximální útlum přibližně o 1,9 dB (mezi proudem 0 a 3 A). To je velmi dobrý výsledek v tomto ohledu, když např. u cívky typu W423 klesl maximální útlum při stejné změně proudu přibližně o 17 dB

Měření EMI filtrů bylo realizováno v symetrickém a nesymetrickém režimu. Měřil jsem tři jednoduché EMI filtry a tři dvojitě EMI filtry. U jednoduchých filtrů měl nejlepší vý-

sledky typ FYE05T1 pro symetrický režim (max. útlum 85 dB), ale pro nesymetrický režim měl tento typ nejhorší výsledky. Naopak typ 5500.2027 měl nejlepší výsledky pro nesymetrický režim (max. útlum 82 dB), ale nejhorší výsledky pro symetrický režim. Výsledky u dvojitých filtrů jsou velmi podobné. Hlavní odlišnost je u typu 3EMC1, který začíná tlumit v symetrickém režimu i nižší frekvence než zbylé dva typy.

Při měření přepětových ochran byly pro porovnání měřeny dvě bleskojistky, dva varistory a dva transily. Výsledky u bleskojistik se lehce odlišovaly od katalogových hodnot tak, že na měřené impulsy reagovaly už při nižších hodnotách než v katalogovém listu. Výsledky z měření na varistorech nevycházely tak přesně a jejich reakce byla na vyšších hodnotách než hodnoty v katalogu. Při návrhu elektronických zařízení je nutné počítat s tímto vyšším napětím, které se v počátku rázového impulsu může vyskytnout na zařízení. Varistor VCR14D431 měl v katalogovém listu otevírací napětí 430 V, ale naměřené napětí dosáhlo hodnoty vyšší než 600 V. Výsledky z měření transilů bezpečně odpovídaly katalogovým hodnotám. Například pro typ 1,5KE33CA je katalogová hodnota napětí 34,7 V. Transil zareaguje téměř ihned a omezí hodnotu na 39 V, která postupně se snižujícími kmity dosáhne na katalogem zmíněnou hodnotu přibližně po 6 μ s a to u napětových impulsů od 160 do 280 V.

Analýzou výsledků jsem přiblížil funkci odrušovacích prvků a závislost naměřených výsledků na parazitních vlivech. Jedním z hlavních poznatků je, že při navrhování odrušovacího zařízení nelze spoléhat na ideální průběhy jednotlivých odrušovacích prvků. V mnoha katalogových listech se často hodnoty razantně odlišují. Pro správný výběr je vhodné vybrané zařízení vyzkoušet na prototypu, aby odrušovací prvek splňoval požadované parametry.

Výsledky získané v této práci mohou být využity pro seznámení se s problematikou odrušovacích prvků a přepětových ochran. Naměřené výsledky je možné využít pro volbu vhodného odrušení na konkrétních případech. Při volbě tohoto odrušení je nutné uvažovat reálně nižší útlum způsobený parazitními prvky.

Seznam použité literatury

- [1] VACULÍKOVÁ, Polina a Emil VACULÍK. Elektromagnetická kompatibilita elektro-technických systémů: praktický průvodce techniky omezení elektromagnetického vřušení : ČSN-ČSN EN-ČSN IEC-ČSN CISPR-ČSN ETS. Praha: Grada, 1998. ISBN ISBN 80-7169-568-8.
- [2] PAUL, Clayton R. Introduction to electromagnetic compatibility. 2nd ed. Hoboken: John Wiley, 2006. ISBN 978-0-471-75500-5.
- [3] Základy elektromagnetické kompatibility Část 2 - Zdroje rušivých signálů a vazební mechanismy jejich přenosu. Elektrevue [online]. Ústav radioelektroniky FEI VUT v Brně, Purkyňova 118: SVAČINA, Jiří, 2000 [cit. 2021-10-1]. Dostupné z: <http://www.elektrevue.cz/clanky/00031/index.htm>
- [4] CHRISTOPOULOS, Christos. Principles and Techniques of Electromagnetic Compatibility. Second Edition. Boca Raton: CRC Press, 2007. ISBN 978-1-4200-0633-9.
- [5] LAURENC, Jiří. přednášky z předmětu Elektromagnetická kompatibilita zařízení. Plzeň, 2021.
- [6] QINGFENG, Fu, Duan YANTAO, Shi LIHUA, Chen HAILIN a Wang JIANBAO. Protection Performance Test of Power Line Filter by Pulsed Current Injection Method. IEEE Letters on Electromagnetic Compatibility Practice and Applications. 2020, 2(4), 115-118. Dostupné z: doi:10.1109/LEMCPA.2020.3021682
- [7] SVOBODA, Jaroslav, VACULÍKOVÁ, Polina, VONDRÁK, Miroslav, ZEMAN, Tomáš. Základy elektromagnetické kompatibility. Praha: Vydavatelství ČVUT, 1993. ISBN 80-01-00982-3
- [8] HROMÁDKA, Miroslav. Analýza účinnosti elektromagnetického stínění objektů malých rozměrů. Disertační práce. Západočeská univerzita v Plzni. 2012
- [9] Základy elektromagnetické kompatibility (EMC) Část 3: Způsoby omezování rušení - odrušovací prostředky a elektromagnetické stínění [online]. Ústav radioelektroniky FEI VUT v Brně, Purkyňova 118: SVAČINA, Jiří, 2000 [cit. 2021-10-1]. Dostupné z: <http://www.elektrevue.cz/clanky/00041/index.html>
- [10] MA, Ceyi, WEN, Yinghong, JIN, Shuntao. Influence of Multi-stage Choke Coupling on Insertion Loss and Optimization Design, 2020 6th Global Electromagnetic Compatibility Conference (GEMCCON). IEEE, 2020, 1-4. Dostupné z: doi: 10.1109/GEMCCON50979.2020.9456719

- [11] Ferrite Bead Inductors. Electronics notes [online]. [cit. 2021-11-03]. Dostupné z: https://www.electronics-notes.com/articles/electronic_components/inductors-transformers/ferrite-bead-chokes.php
- [12] DŘÍNOVSKÝ, Jiří, FRÝZA, Tomáš, RŮŽEK, Václav, ZACHAR Jiří. Elektromagnetická kompatibilita: Přednášky ver. 2017/10/06 [online]. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav radioelektroniky. [cit. 1.11.2021]. Dostupné z: <https://docplayer.cz/108196170-Elektromagneticka-kompatibilita.html>
- [13] KUBIŠ, Vít. Možnosti omezení přepětových impulzů. Diplomová práce. Západočeská univerzita v Plzni. 2021
- [14] CHROMEČEK, Ivan. Omezovače přepětí při nesinusovém napětovém namáhání. Bakalářská práce. České vysoké učení technické v Praze. 2019
- [15] MENG, Pengfei, ZHOU, Yao, WU, Jinbo, HU, Jun, HE, Jinliang. Novel ZnO Varistors for Dramatically Improving Protective Effect of Surge Arresters, 2018 34th International Conference on Lightning Protection (ICLP), 2018, 1-6. Dostupné z: doi: 10.1109/ICLP.2018.8503330
- [16] Základy elektromagnetické kompatibility (EMC) Část 5: Elektromagnetická odolnost a její testování [online]. Ústav radioelektroniky FEI VUT v Brně, Purkyňova 118: SVAČINA, Jiří, 2001 [cit. 2021-10-1]. Dostupné z: <http://www.elektrorevue.cz/clanky/01025/index.html>
- [17] KABELE, Roman. Analýza rušivých signálů elektrických zařízení a jejich eliminace. Diplomová práce. Západočeská univerzita v Plzni. 2019
- [18] RIGOL TECHNOLOGIES, INC. DSA800 Series Spectrum Analyzer Data sheet [online]. Germany, Lindbergh str. 4 82178 Puchheim, 2016 [cit. 2022-01-23]. Dostupné z: https://www.silcon.cz/download/DSA800_DataSheet_EN.pdf
- [19] XIAMEN FARATRONIC CO. LTD. Box-type Metallized Polypropylene Film Interference Suppression Capacitor (Class X2): C42(MKP62 Series) [online]. No.101 Jin Qiao Road, Xiamen, China, 2009 [cit. 2022-01-23]. Dostupné z: <https://datasheetspdf.com/pdf-file/692551/XiamenFaratronic/MKP62/1>
- [20] GM ELECTRONIC, SPOL. S. R.O. Box-type Metallized Polypropylene Film Interference Suppression Capacitor (X2 Class): C42(MKP62 Series) [online]. Křížkova 77, 186 00 Praha 8, 2008 [cit. 2022-01-23]. Dostupné z: <https://www.gme.cz/data/attachments/dsh.121-404.1.pdf>
- [21] GM ELECTRONIC, SPOL. S. R.O. Box-type Metallized Polypropylene Film Interference Suppression Capacitor (X2 Class): C42(MKP62 Series)

- [online]. Křižíkova 77, 186 00 Praha 8, 2008 [cit. 2022-01-23]. Dostupné z: <https://www.gme.cz/data/attachments/dsh.121-268.1.pdf>
- [22] GM ELECTRONIC, SPOL. S. R.O. Box-type Metallized Polypropylene Film Interference Suppression Capacitor (X2 Class): C42(MKP62 Series) [online]. Křižíkova 77, 186 00 Praha 8, 2008 [cit. 2022-01-23]. Dostupné z: <https://www.gme.cz/data/attachments/dsh.121-271.1.pdf>
- [23] GM ELECTRONIC, SPOL. S. R.O. Box-type Metallized Polypropylene Film Interference Suppression Capacitor (X2 Class): C42(MKP62 Series) [online]. Křižíkova 77, 186 00 Praha 8, 2008 [cit. 2022-01-23]. Dostupné z: <https://www.gme.cz/data/attachments/dsh.121-269.1.pdf>
- [24] ELECTRONIC COMPONENTS KEMET. Metallized Polypropylene Film EMI Suppression Capacitors R46 Series, Class X2, 275 VAC, 110°C [online]. Greenville, SC 29606 (864) 963-6300, 2016 [cit. 2022-01-23]. Dostupné z: https://www.tme.eu/Document/cdea93403c379fcb90fcfc161c7ae21/KEM_F3093_R46_X2_275_110C.pdf
- [25] WÜRTH ELEKTRONIK. WE-CMB Common Mode Power Line Choke 744821240 [online]. Max-Eyth-Str. 1, 74638 Waldenburg Germany, 2021 [cit. 2022-02-14]. Dostupné z: <https://eu.mouser.com/datasheet/2/445/744821240-1723009.pdf>
- [26] WÜRTH ELEKTRONIK. WE-CMB NiZn Common Mode Power Line Choke 744842932 [online]. Max-Eyth-Str. 1, 74638 Waldenburg Germany, 2021 [cit. 2022-02-14]. Dostupné z: <https://eu.mouser.com/datasheet/2/445/744842932-1723151.pdf>
- [27] WÜRTH ELEKTRONIK. WE-CMB HC Common Mode Power Line Choke 7448227005 [online]. Max-Eyth-Str. 1, 74638 Waldenburg Germany, 2021 [cit. 2022-02-14]. Dostupné z: <https://eu.mouser.com/datasheet/2/445/7448227005-1723120.pdf>
- [28] WÜRTH ELEKTRONIK. WE-MPSB EMI Multilayer Power Suppression Bead 74279224101 [online]. Max-Eyth-Str. 1, 74638 Waldenburg Germany, 2021 [cit. 2022-02-14]. Dostupné z: <https://cz.mouser.com/datasheet/2/445/74279224101-1720457.pdf>
- [29] WÜRTH ELEKTRONIK. WE-MPSB EMI Multilayer Power Suppression Bead 74279224551 [online]. Max-Eyth-Str. 1, 74638 Waldenburg Germany, 2021 [cit. 2022-02-14]. Dostupné z: <https://cz.mouser.com/datasheet/2/445/74279224551-1720589.pdf>
- [30] WÜRTH ELEKTRONIK. WE-CBF SMT EMI Suppression Ferrite Bead 742792112 [online]. Max-Eyth-Str. 1, 74638 Waldenburg Germany, 2020 [cit. 2022-02-14]. Dostupné z: <https://www.we-online.com/catalog/datasheet/742792112.pdf>

- [31] WÜRTH ELEKTRONIK. WE-STAR-TEC Snap Ferrite with safety key technology 74271132 [online]. Max-Eyth-Str. 1, 74638 Waldenburg Germany, 2021 [cit. 2022-02-14]. Dostupné z: <https://www.we-online.com/catalog/datasheet/74271132.pdf>
- [32] WÜRTH ELEKTRONIK. WE-STAR-BUENO Snap Ferrite with optical closing control mechanism 74275813 [online]. Max-Eyth-Str. 1, 74638 Waldenburg Germany, 2021 [cit. 2022-02-14]. Dostupné z: <https://www.we-online.com/catalog/datasheet/74275813.pdf>
- [33] WÜRTH ELEKTRONIK. WE-STAR-GAP Snap Ferrite for RF applications 74271633 [online]. Max-Eyth-Str. 1, 74638 Waldenburg Germany, 2020 [cit. 2022-02-14]. Dostupné z: <https://www.we-online.com/catalog/datasheet/74271633.pdf>
- [34] WÜRTH ELEKTRONIK. WE-STAR-TEC LFS Snap Ferrite with safety key technology 74272132 [online]. Max-Eyth-Str. 1, 74638 Waldenburg Germany, 2021 [cit. 2022-02-14]. Dostupné z: <https://www.we-online.com/catalog/datasheet/74272132.pdf>
- [35] WÜRTH ELEKTRONIK. TOROIDAL FERRITE 74270103 [online]. Max-Eyth-Str. 1, 74638 Waldenburg Germany, 2006 [cit. 2022-02-14]. Dostupné z: <https://media.digikey.com/pdf/Data%20Sheets/Wurth%20Electronics%20PDFs/74270103.pdf>
- [36] MAGNETEC GMBH. MAGNETEC M-070-02 YM [online]. Industriestrasse 7 D-63505 Langenselbold, Germany, 2011 [cit. 2022-02-14]. Dostupné z: <https://www.tme.eu/Document/a1c70a6f4336546f5df6ea54dbe9392b/m-070.pdf>
- [37] VACUUMSCHMELZE. T60006-L2030-W423 [online]. Grüner Weg 37, 63450 Hanau, Germany, 2017 [cit. 2022-02-14]. Dostupné z: <https://cz.mouser.com/datasheet/2/599/W423-237909.pdf>
- [38] LODR, Jakub. Měření útlumových charakteristik síťových filtrů. Bakalářská práce. Západočeská univerzita v Plzni. 2021
- [39] LITTELFUSE. Gas Plasma Arrester (GDT) Products CG/CG2 Series [online]. 8755 West Higgins Road, Suite 500 Chicago, Illinois 60631 United States, 2009 [cit. 2022-02-22]. Dostupné z: <https://www.tme.eu/Document/05f20814a2340ae42f42ea5efcf39b26/CG2250L-Littelfuse-datasheet-7160216.pdf>
- [40] HITANO. METAL OXIDE VARISTORS 14D series [online]. No. 3, Wuquan 1st Rd, Xinzhuang District, New Taipei City, Tchaj-wan 242 [cit. 2022-02-22]. Dostupné z: https://www.hitano.com.tw/wp-content/uploads/doc/14D_20180620.pdf
- [41] SEMTECH ELECTRONICS LTD. TRANSIENT VOLTAGE SUPPRESSOR 1.5KE Series [online]. Semtech Ltd Endeavour House 2nd Floor Coopers End Road

- Stansted CM24 1SJ, United Kingdom, 2006 [cit. 2022-02-22]. Dostupné z: <https://www.gme.cz/data/attachments/dsh.222-211.1.pdf>
- [42] CORCOM. Two-stage General Purpose RFI Power Line Filter R Series [online]. 9 Herbert St, Dublin, D02 V208, Ireland, 2011 [cit. 2022-03-01]. Dostupné z: https://www.te.com/commerce/DocumentDelivery/DDEController?Action=srchtrv&DocNm=1654001_CORCOM_PRODUCT_GUIDE_R_SERIES&DocType=CS&DocLang=English
- [43] SCHURTER. 1-Phase Line Filters (5500.2060) [online]. Lucern, Švýcarsko, 2022 [cit. 2022-03-01]. Dostupné z: https://cz.mouser.com/datasheet/2/358/typ_FSW-1275947.pdf
- [44] SCHURTER. 1-Phase Line Filters (5500.2027) [online]. Lucern, Švýcarsko, 2022 [cit. 2022-03-01]. Dostupné z: https://cz.mouser.com/datasheet/2/358/typ_FMLB_41-1275756.pdf
- [45] CORCOM. Compact and Cost-effective Dual Stage RFI Power Line Filters EMC Series [online]. 9 Herbert St, Dublin, D02 V208, Ireland, 2011 [cit. 2022-03-01]. Dostupné z: <https://www.farnell.com/datasheets/1830754.pdf>
- [46] QLT POWER. FYE05T1 [online]. [cit. 2022-03-01]. Dostupné z: <https://www.tme.eu/en/details/fye05t1/suppression-filters-others/qlt-power/>
- [47] QLT POWER. FYC05T1 [online]. [cit. 2022-03-01]. Dostupné z: <https://www.tme.eu/cz/details/fyc05t1/odrusovaci-filtry-ostatni/qlt-power/>

Seznam obrázků

1.1	Obecné schéma řetězce EMC [vlastní zpracování dle [2]]	2
1.2	Impulsní rušení	4
1.3	Oscilační rušení	4
1.4	Harmonické a mezipharmonické složky rušení	4
1.5	Periodické pulsní rušení	5
1.6	Šum	5
1.7	Přerušování napájecího napětí	6
1.8	Pokles napájecího napětí	6
1.9	Zvýšení napájecího napětí	7
1.10	Kolísání napájecího napětí	7
1.11	Nesymetrie trojfázového napětí	8
1.12	Změna kmitočtu napájecího napětí	8
1.13	Vysokofrekvenční oscilace napětí na kontaktech rozpojovaného relé	9
1.14	Deformace síťového napětí vlivem tyristorových měničů	9
1.15	Proudový impuls při úderu blesku	11
1.16	Proudový impuls při vybití elektrostatického náboje [3]	12
1.17	Ilustrace vzniku lokálního elektrostatického výboje	12
2.1	Základní druhy elektromagnetických vazeb: a) galvanická, b) kapacitní, c) induktivní, d) vyzařování, vlastní zpracování dle [9]	15
2.2	Galvanická vazba společnou impedancí napájecí sítě, vlastní zpracování dle [1]	16
2.3	Galvanická vazba společnou impedancí mezi zdrojem a přijímačem rušení, vlastní zpracování dle [1]	16
2.4	Galvanická vazba společnou impedancí zpětného vodiče, vlastní zpracování dle [1]	17
2.5	Galvanická vazba a) uzavřenou zemní smyčkou, b) rozpojenou zemní smyčkou	17
2.6	Zařízení připojená ke společnému zemnímu vodiči (vlevo - nevhodné řešení, vpravo - lepší řešení) [3]	18
2.7	Dostatečné dimenzování společného zemního vodiče (vlevo - nevhodné řešení, vpravo - lepší řešení) [3]	18
2.8	Připojená zařízení k napájecímu zdroji (vlevo - nevhodné řešení, vpravo - lepší řešení) [3]	18
2.9	Propojení zemních vodičů u signálových linek (vlevo - nevhodné řešení, vpravo - lepší řešení) [3]	19

2.10	Realizace napájení různých elektronických zařízení (vlevo - nevhodné řešení, vpravo - lepší řešení) [3]	19
2.11	Propojení výkonových a signálových obvodů (vlevo - nevhodné řešení, vpravo - lepší řešení) [3]	19
2.12	Způsoby omezení induktivní vazby: a) omezení induktivní vazby závitem K nakrátko; b) kompenzace induktivní vazby zkroucením vodičů odvodu přijímače; c) omezení induktivní vazby kolmým natočením vazebních smyček d) omezení induktivní vazby stíněním obvodu přijímače. [3]	20
2.13	Parazitní kapacitní vazba galvanicky oddělených obvodů (vlevo), náhradní schéma kapacitní vazby galvanicky oddělených obvodů (vpravo) [5]	21
2.14	Omezení parazitní kapacitní vazby galvanicky oddělených obvodů za pomoci stíněných vodičů [5]	22
2.15	Kapacitní vazba obvodů se společným vodičem [3]	22
2.16	a) Kapacitní vazba vůči zemi, b) eliminace kapacitní vazby vůči zemi [3]	23
2.17	Vazba elektromagnetickým polem (vlevo), omezení vazby elektromagnetickým polem (vpravo), vlastní zpracování dle [3]	24
3.1	Náhradní schéma reálné tlumivky	25
3.2	Bodeho diagram impedance a) amplituda b) fáze	26
3.3	Velikost impedance v závislosti na frekvenci: (1) indukčnost 10 mH; (2) indukčnost 6 μ H	26
3.4	a) Odrušovací tlumivka na otevřeném jádru, b) Odrušovací tlumivka na uzavřeném jádru	28
3.5	Odrušovací tlumivka s proudovou kompenzací	28
3.6	Typické provedení feristoru umístěného kolem vodiče [11]	29
3.7	Zapojení odrušovacího kondenzátoru na vedení	29
3.8	Náhradní schéma reálného kondenzátoru	29
3.9	Orientační velikost impedance v závislosti na délce vývodů a frekvenci: a) délka vývodů 100 mm b) délka vývodů 50 mm c) délka vývodů 10 mm d) ideální průběh	30
3.10	Způsoby použití různých typů odrušovacích kondenzátorů (protifázové, soufázové proudy) [12]	31
3.11	a) průběhy napětí v jednotlivých bodech kombinované přepětové ochrany b) Zapojení kombinované přepětové ochrany	34
3.12	a) Statická V-A charakteristika plynem plněné výbojky b) časový průběh strmého napěťového impulsu na výbojce [9]	35
3.13	Konstrukce a) rúžkové bleskojistky b) vyfukovací bleskojistky c) ventilové bleskojistky [14]	36
3.14	V-A charakteristika varistoru [9]	37
3.15	Velikost jednotlivých složek stínění v závislosti na frekvenci [8]	39

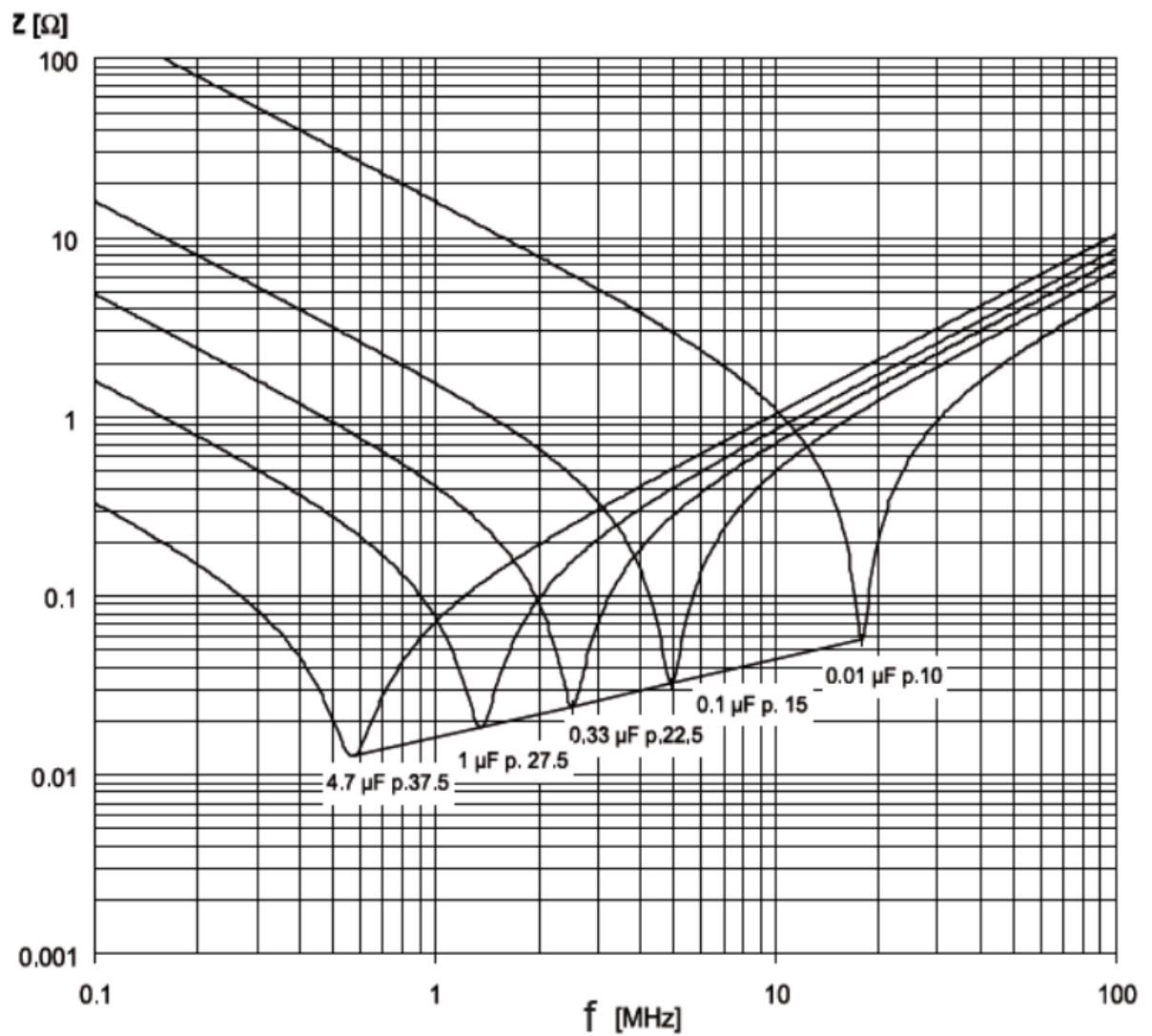
3.16 a) chybná konstrukce z hlediska EMC b) vylepšená konstrukce pro lepší účinnost stínění [5]	39
4.1 Schéma zapojení a) bez připojeného kondenzátoru, b) s připojeným kondenzátorem	41
4.2 Impedanční charakteristika kondenzátorů o hodnotách: 220 nF, 330 nF, 470 nF, 680 nF a 1 μ F	42
4.3 Typická impedanční charakteristika dle katalogového listu [19]	43
4.4 Kondenzátory s různě dlouhými připojovacími cestami: a) krátký přívod b) delší přívod c) nejdelší přívod	44
4.5 Měření kondenzátorů na spektrálním analyzátoru RIGOL [19]	44
4.6 Impedanční charakteristika kondenzátorů o hodnotách: 1 nF, 10 nF a 100 nF s různě dlouhými připojovacími cestami	45
4.7 Impedanční charakteristika kondenzátorů dle legendy	46
4.8 Impedanční charakteristika kondenzátorů dle legendy	47
4.9 Schéma zapojení tlumivek: a) bez připojené tlumivky, b) s připojenou tlumivkou v symetrickém režimu, c) s připojenou tlumivkou v nesymetrickém režimu, d) bez připojeného feristoru, e) s připojeným feristorem	48
4.10 Závislost útlumu na frekvenci v symetrickém režimu tlumivek	49
4.11 Závislost útlumu na frekvenci v nesymetrickém režimu tlumivek	49
4.12 Foto měřených tlumivek: a) WE-CMB HC Common Mode Power Line Choke 7448227005 b) WE-CMB Common Mode Power Line Choke 744821240 c) WE-CMB NiZn Common Mode Power Line Choke 744842932 d) WE-MPSB EMI Multilayer Power Suppression Bead 74279224101 e) WE-MPSB EMI Multilayer Power Suppression Bead 74279224551 f) WE-CBF SMT EMI Suppression Ferrite Bead 742792112	50
4.13 Impedance feristoru v závislosti na frekvenci	50
4.14 Typické charakteristiky navlékacích tlumivek dle katalogových listů	51
4.15 Impedance navlékacích tlumivek 74272132 (vlevo) a 74271132 (vpravo) v závislosti na frekvenci a počtu průvleků	52
4.16 Impedance navlékacích tlumivek 74271633 (vlevo) a 74275813 (vpravo) v závislosti na frekvenci a počtu průvleků	52
4.17 Útlum cívky W423 v závislosti na frekvenci a rozdílném sytícím proudu	53
4.18 Útlum cívky M-070 v závislosti na frekvenci a rozdílném sytícím proudu	54
4.19 Fotografie tlumivek: a) WE Snap Ferrite with safety key technology 74272132, b) WE Snap Ferrite with optical closing control mechanism 74275813, c) WE Snap Ferrite for RF applications 74271633, d) WE Snap Ferrite with safety key technology 74271132, e) Vacuumschmelze T60006-L2030-W423, f) MAGNETEC M-070-02 YM, g) WE TOROIDAL FERRITE 74270103	54

4.20	Útlum cívky WE 74270103 v závislosti na frekvenci a rozdílném sytícím proudu	55
4.21	Měření tlumivek: a) Přípravek pro měření navlékacích tlumivek b) Měření navlékacích tlumivek na spektrálním analyzátoru RIGOL c) Měření tlumivky s protékajícím sytícím proudem	55
4.22	Schéma zapojení EMI filtrů: a) pro nesymetrické složky útlumu, b) symetrické složky útlumu (vlastní zpracování dle [38])	56
4.23	Útlumové charakteristiky pro symetrické složky útlumu, jednoduché filtry (vlevo), dvojitě filtry(vpravo)	57
4.24	Útlumové charakteristiky pro nesymetrické složky útlumu, jednoduché filtry (vlevo), dvojitě filtry(vpravo)	57
4.25	Schéma zapojení při měření přepětových ochran	58
4.26	Velikost napětí rázového impulsu o hodnotách 500, 1000, 1500 a 2000 V na bleskojistce typu CG90L	59
4.27	Velikost svodového proudu rázového impulsu o hodnotách 500, 1000, 1500 a 2000 V na bleskojistce typu CG90L	59
4.28	Velikost napětí rázového impulsu o hodnotách 500, 1000, 1500 a 2000 V na varistoru typu VCR14D431	60
4.29	Velikost proudu rázového impulsu o hodnotách 500, 1000, 1500 a 2000 V na varistoru typu VCR14D431	60
4.30	Velikost napětí rázového impulsu o hodnotách 160, 200, 240 a 280 V na transilu 1,5KE33CA	61
4.31	Velikost proudu rázového impulsu o hodnotách 160, 200, 240 a 280 V na transilu 1,5KE33CA	62

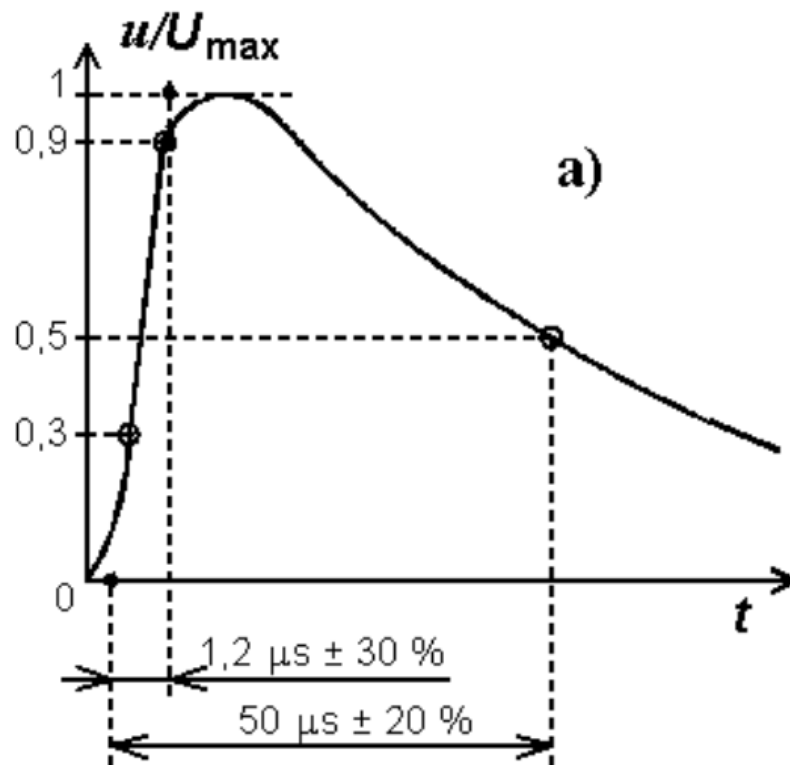
Přílohy

Seznam příloh

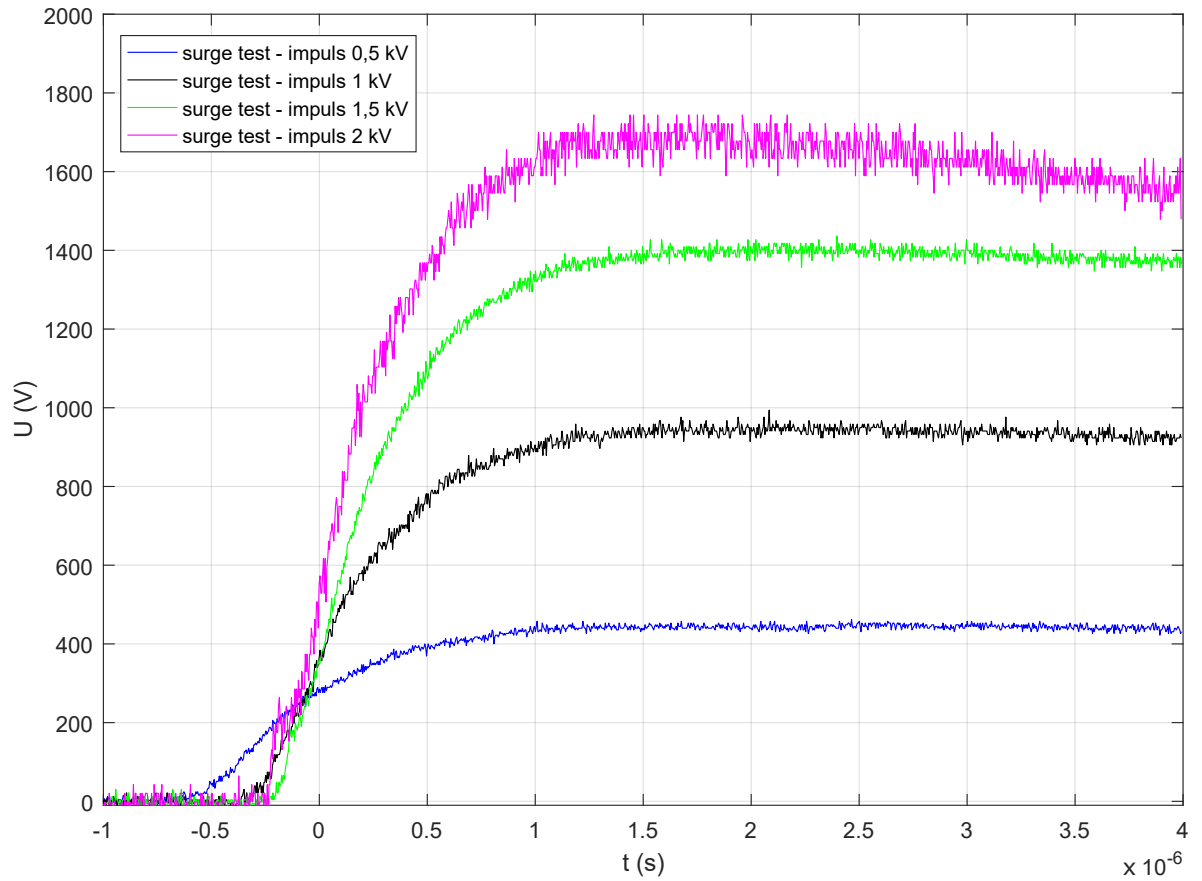
Příloha 1 - Typická impedanční charakteristika kondenzátoru R46KR410000M1K KEMET(1 μF) [24]



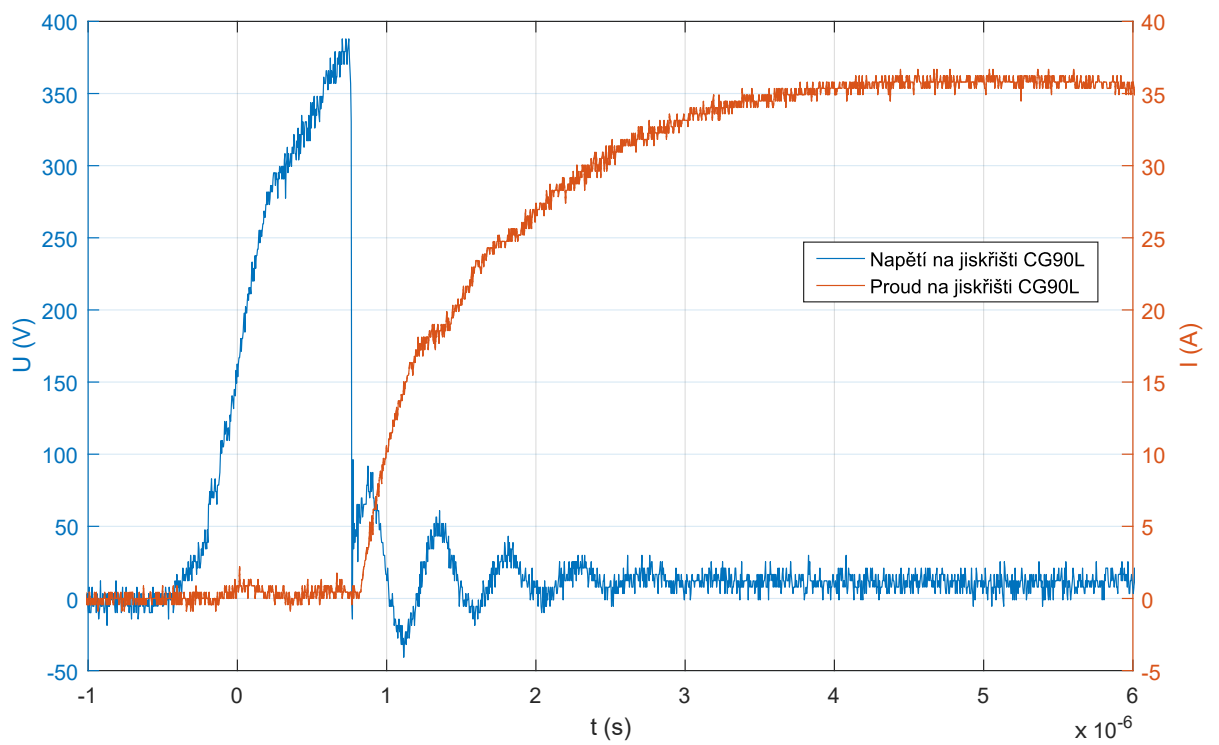
Příloha 2 - Zkušební signál rázové vlny - napětí naprázdno [16]



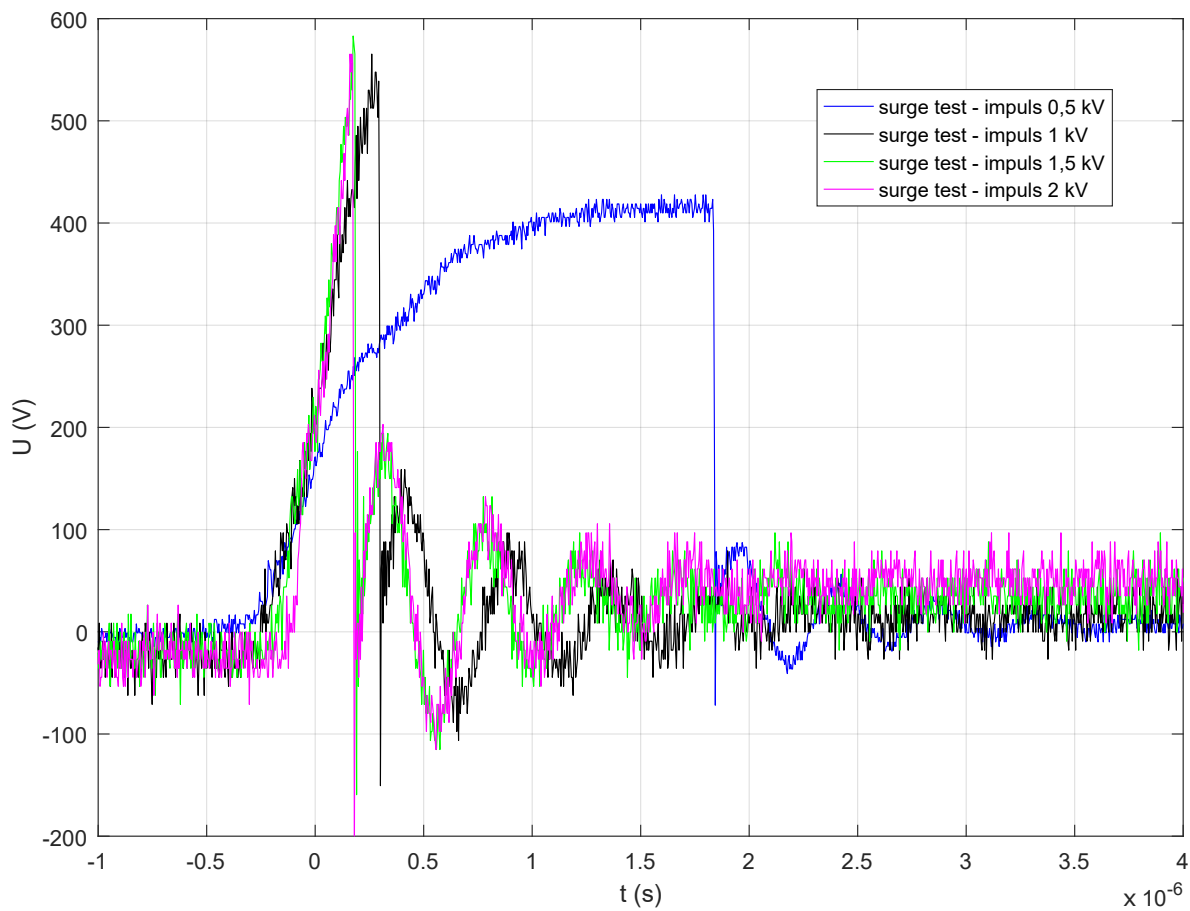
Příloha 3 - Naměřené hodnoty impulsů o hodnotě 500, 1000, 1500 a 2000 V naprázdno



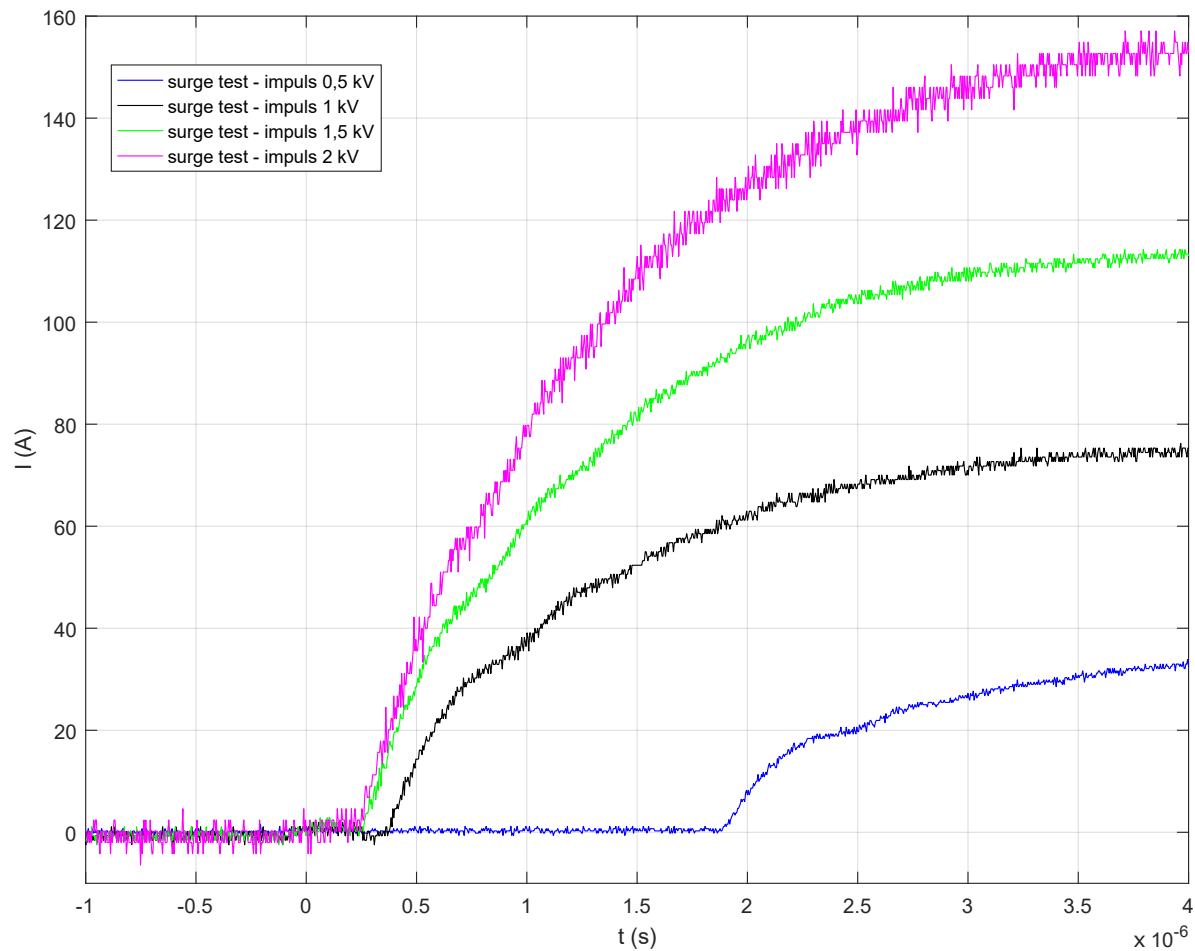
Příloha 4 - Velikost napětí a proudu rázového impulsu o hodnotě 500 V na bleskojistce typu CG90L



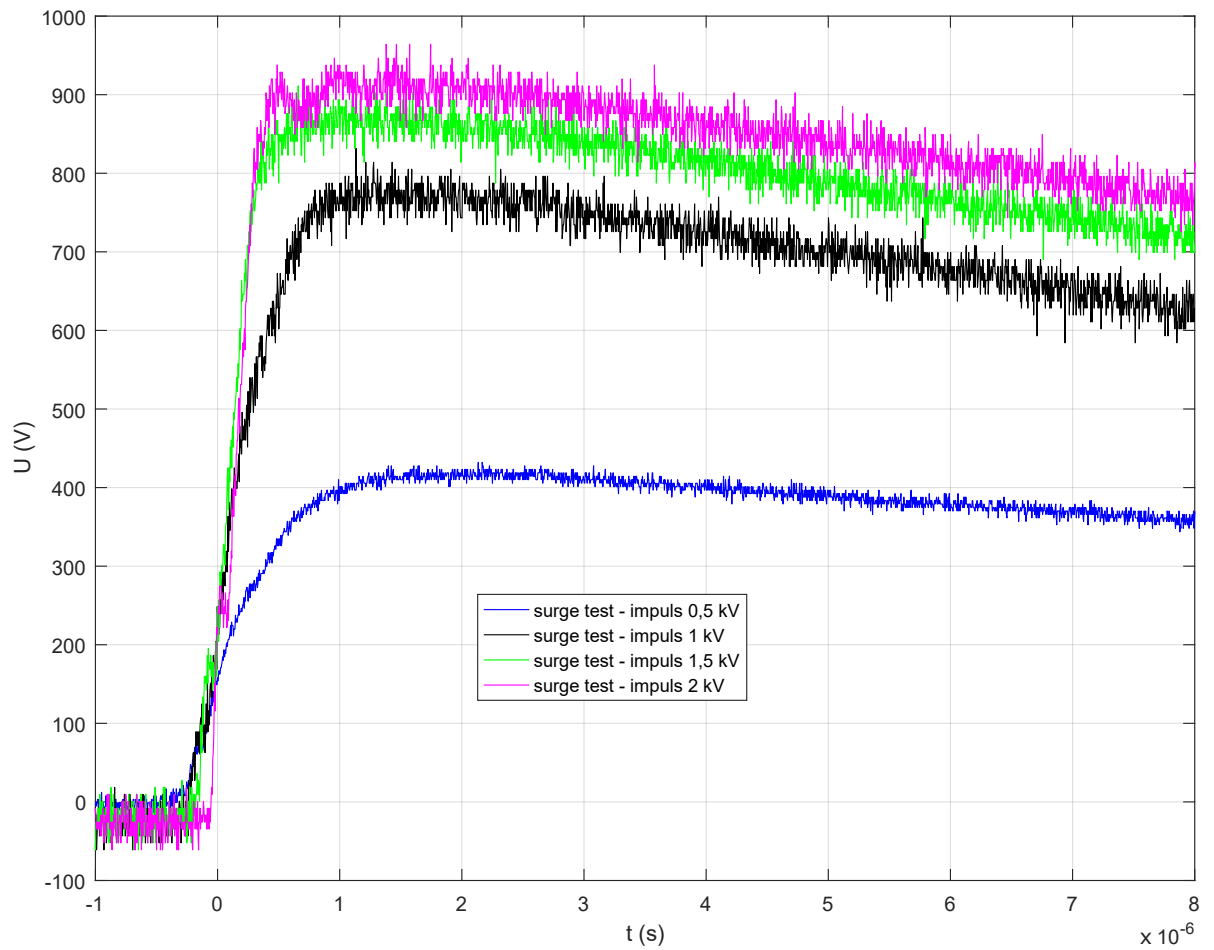
Příloha 5 - Velikost napětí rázového impulsu o hodnotách 500, 1000, 1500 a 2000 V na bleskojistce typu EPCOS 23003O



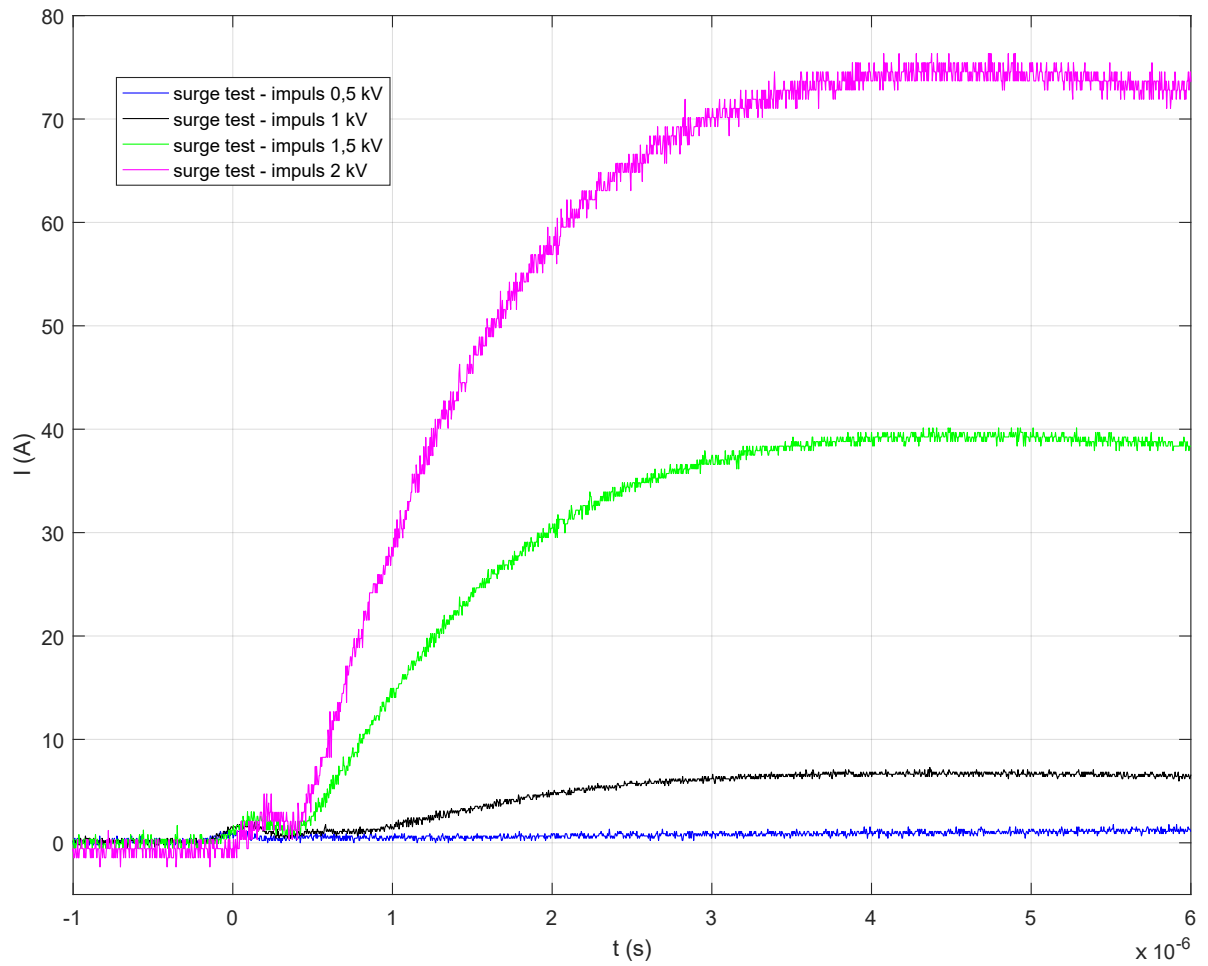
Příloha 6 - Velikost svodového proudu rázového impulsu o hodnotách 500, 1000, 1500 a 2000 V na bleskojistce typu EPCOS 230030



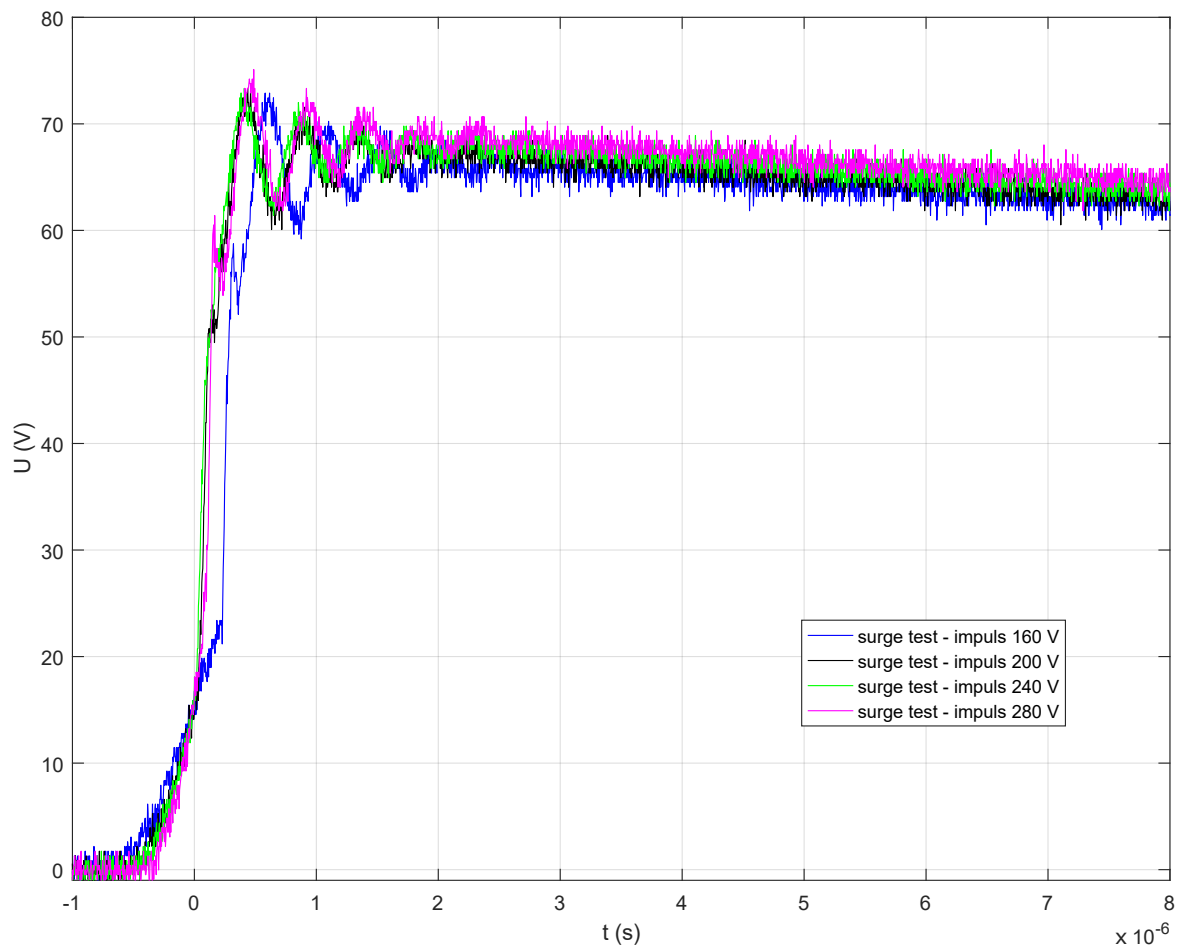
Příloha 7 - Velikost napětí rázového impulsu o hodnotách 500, 1000, 1500 a 2000 V na varistoru typu VCR14D681



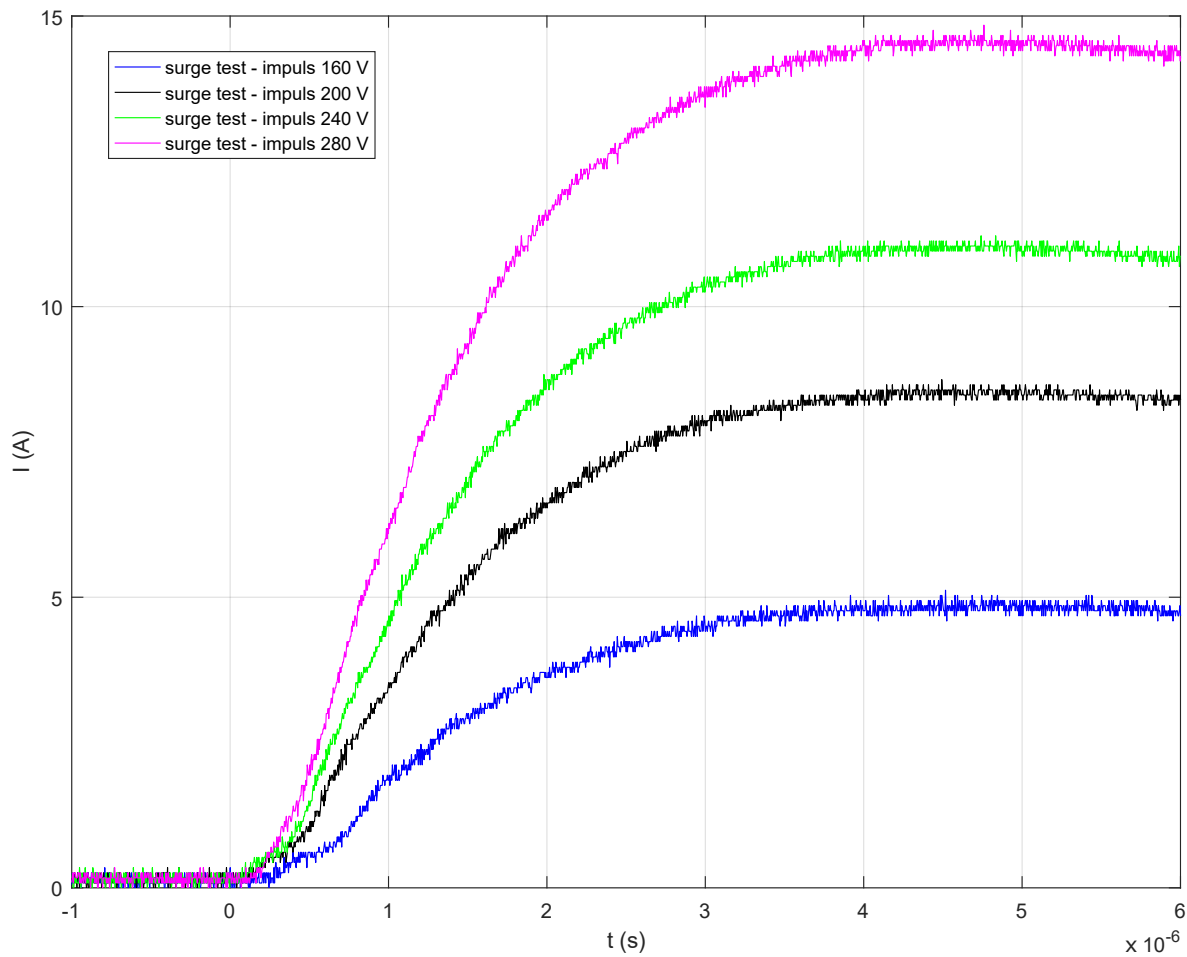
Příloha 8 - Velikost proudu rázového impulsu o hodnotách 500, 1000, 1500 a 2000 V na varistoru typu VCR14D681



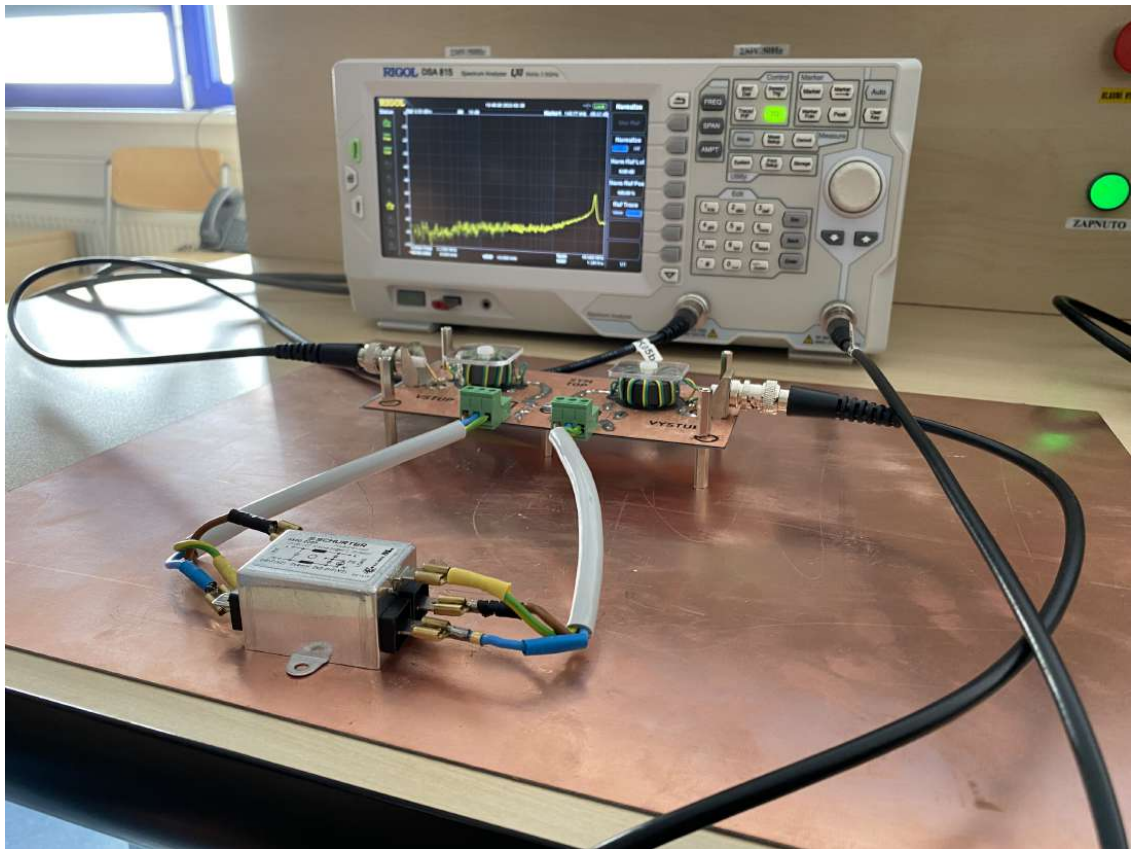
Příloha 9 - Velikost napětí rázového impulsu o hodnotách 160, 200, 240 a 280 V na transilu 1,5KE68CA



Příloha 10 - Velikost proudu rázového impulsu o hodnotách 160, 200, 240 a 280 V na transilu 1,5KE68CA



Příloha 11 - a) Fotografie měření na EMI filtrech b) Fotografie EMI filtrů

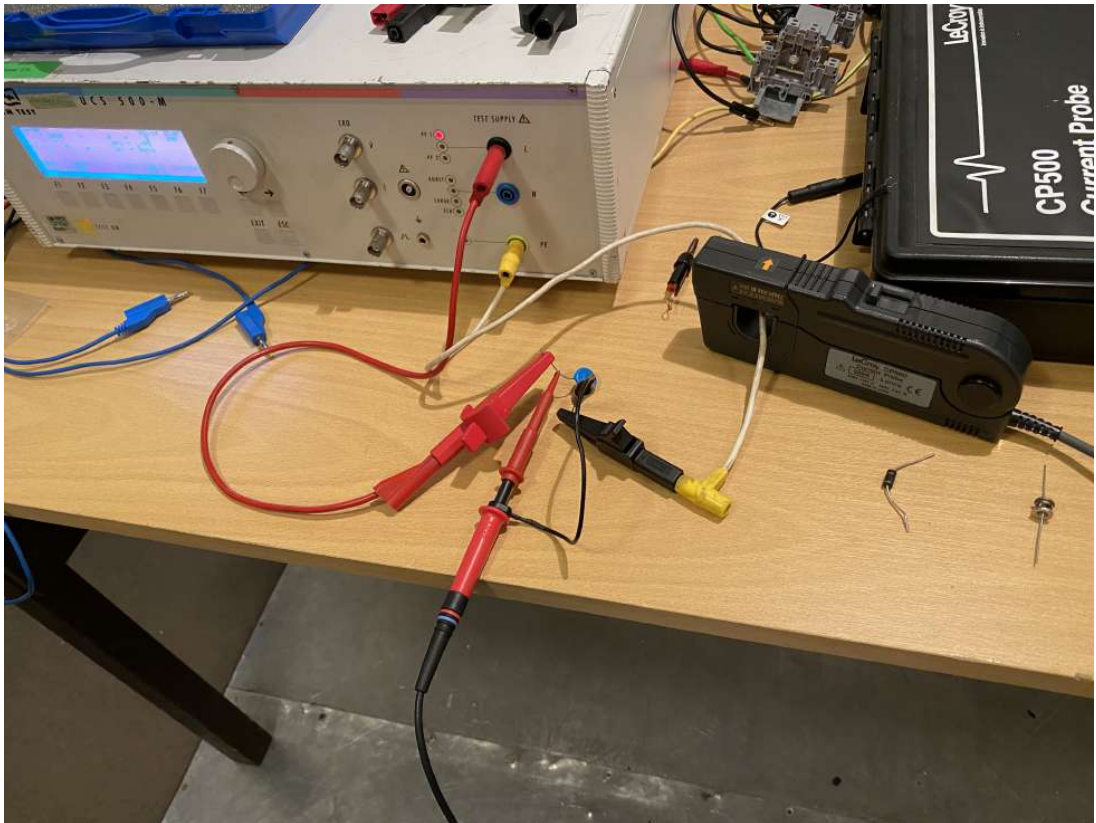


a)

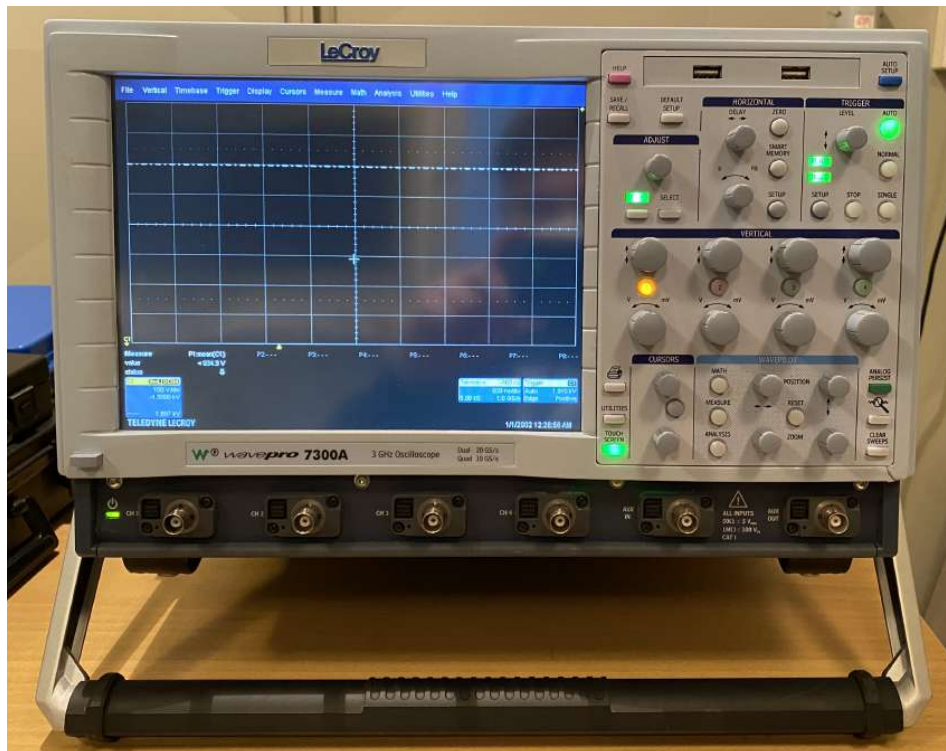


b)

Příloha 12 - a) Fotografie měření přepětových ochran b) Fotografie digitálního osciloskopu LeCroy 7300A



a)



b)