

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI  
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

**KATEDRA ELEKTROENERGETIKY A EKOLOGIE**

# **DIPLOMOVÁ PRÁCE**

**Reakce odrušovacích prvků na přepět'ové impulsy**

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI  
Fakulta elektrotechnická  
Akademický rok: 2015/2016

**ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE**  
(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Pavel ŠMOLÍK**  
Osobní číslo: **E14N0053P**  
Studijní program: **N2612 Elektrotechnika a informatika**  
Studijní obor: **Technická ekologie**  
Název tématu: **Reakce odrušovacích prvků na přepětové impulsy**  
Zadávající katedra: **Katedra elektroenergetiky a ekologie**

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

1. Popište způsoby šíření vysokofrekvenčních signálů.
2. Popište zařízení omezující vysokofrekvenční rušení.
3. Sledujte odezvu těchto zařízení na přepětové impulsy.
4. Zhodnoťte použitelnost odrušovacích prvků z hlediska ochrany před těmito impulsy.

Rozsah grafických prací: podle doporučení vedoucího  
Rozsah kvalifikační práce: 40 - 60 stran  
Forma zpracování diplomové práce: tištěná/elektronická  
Seznam odborné literatury:

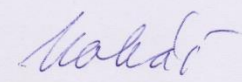
1. Svačina, J. : Encyklopedie EMC

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

Datum zadání diplomové práce: 15. října 2015  
Termín odevzdání diplomové práce: 16. května 2016

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



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

V Plzni dne 15. října 2015

## **Abstrakt**

Předkládaná diplomová práce je zaměřena na problematiku šíření rušivých vysokofrekvenčních signálů. Dále je uveden přehled prostředků používaných k odrušení těchto signálů. V další části je provedeno praktické měření schopností odrušovacích prostředků odrušovat tyto rušivé signály a jejich vyhodnocení.

## **Klíčová slova**

Elektromagnetická kompatibilita, rušivé signály, odrušovací prostředky, galvanická vazba, feristor, filtr

## **Abstract**

This thesis is focused on problemality of spreading interfering high frequency signals. Overview of tools used to supress these interfering signals is presented. Then measuring of these tools is provided with commented results.

## **Key words**

Electromagnetic compatibility, interfering signals, suppressors, galvanic coupling, feristor, filter

## **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 16.5.2016

Pavel Šmolík

## **Poděkování**

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

## Obsah

Obsah .....	8
Seznam symbolů a zkratk .....	1
Úvod .....	2
1 Elektromagnetická kompatibilita (EMC) .....	3
1.1 ELEKTROMAGNETICKÁ INTERFERENCE (EMI) .....	3
1.2 ČITLIVOST NA RUŠENÍ (EMS) .....	3
1.3 ROZDĚLENÍ ELEKTROMAGNETICKÉHO RUŠENÍ .....	4
1.4 ZDROJE ELEKTROMAGNETICKÉHO RUŠENÍ .....	5
1.5 DRUHY RUŠIVÝCH SIGNÁLŮ .....	6
2 Vazební mechanismy přenosu rušivých signálů .....	7
2.1 GALVANICKÁ VAZBA .....	7
2.2 INDUKTIVNÍ VAZBA .....	8
2.3 KAPACITNÍ VAZBA .....	9
2.4 VAZBA VYZAŘOVÁNÍM .....	9
3 Zařízení omezující rušení .....	10
3.1 ODRUŠOVACÍ TLUMIVKY .....	11
3.1.1 Jádra odrušovacích tlumivek .....	13
3.1.2 Feristory .....	14
3.2 ODRUŠOVACÍ KONDENZÁTORY .....	15
3.2.1 Typy kondenzátorů .....	18
3.2.2 Elektrolytické kondenzátory .....	18
3.2.3 Keramické kondenzátory .....	19
3.2.4 Plastové kondenzátory .....	20
3.2.5 Kondenzátory s papírovým a kombinovaným dielektrikem .....	20
3.3 ODRUŠOVACÍ FILTRY .....	20
4 Měření účinků odrušovacích prostředků .....	22
4.1 MĚŘENÍ TLUMENÍ VLNY RÁZOVÉHO IMPULSU .....	22
4.2 MĚŘENÍ TLUMENÍ BURST SIGNÁLŮ .....	23
4.3 PRŮBĚHY RÁZOVÝCH IMPULSŮ .....	24
4.4 PRŮBĚHY BURST SIGNÁLŮ .....	30
4.5 POUŽITÉ ODRUŠOVACÍ PRVKY A JEJICH PARAMETRY .....	34
Závěr .....	39
Seznam literatury a informačních zdrojů .....	40
Seznam obrázků .....	41
Seznam tabulek .....	42



## Seznam symbolů a zkratk

EMC.....	Elektromagnetická kompatibilita
EMI.....	Elektromagnetická interference
EMS.....	Elektromagnetická citlivost na rušení
$Z_s$ .....	Impedance sítě [ $\Omega$ ]
$Z_Z$ .....	Impedance zátěže [ $\Omega$ ]
I.....	Elektrický proud [A]
U.....	Elektrické napětí [V]
f.....	Frekvence [Hz]

## **Úvod**

Předkládaná práce je zaměřena na oblast elektromagnetické kompatibility, konkrétně na vazební mechanismy přenosu rušivých signálů, odrušovací prostředky a měření schopností těchto prostředků odrušovat rušivé signály. Diplomová práce je rozdělena na tři hlavní části. První část práce se zabývá nejdůležitějšími pojmy v oblasti elektromagnetické kompatibility, druhy elektromagnetického rušení a vazbami mezi přijímači a vysílači rušení. V druhé části je věnována pozornost jednotlivým druhům zařízení určených k odrušování. Ve třetí části je provedeno měření odrušovacích schopností těchto zařízení a jejich vyhodnocení.

# 1 Elektromagnetická kompatibilita (EMC)

Elektromagnetická kompatibilita je schopnost zařízení, systému nebo přístroje pracovat bez poruchy i v prostředí, kde působí jiné zdroje elektromagnetických signálů nebo rušení a zároveň neovlivňovat svým působením ostatní přístroje ve svém okolí. Zařízení by tedy nemělo vyzařovat signály, které by ovlivňovaly jiná zařízení a přístroje. EMC je zkratka pro anglické slovní spojení Electromagnetic Compatibility, které vyjadřuje koexistenci systémů nacházejících se ve stejném elektromagnetickém prostředí bez vzájemného ovlivňování svých normálních funkcí.[1] [2]

Elektromagnetickou kompatibilitu můžeme rozdělit na dvě hlavní části: elektromagnetickou interferenci (EMI) a elektromagnetickou citlivost (EMS).

## 1.1 Elektromagnetická interference (EMI)

Anglická zkratka EMI vyjadřuje Electromagnetic Interference. Jde tedy o elektromagnetické rušení, které svým působením zhoršuje provoz zařízení, přenosového kanálu nebo systému. Zabývá se zkoumáním příčin vzniku rušení a jeho působením. Dále se zabývá klasifikací zdrojů a přijímačů rušení, metodikou omezování rušení a ochrany před ním, využíváním kmitočtového spektra a působení elektromagnetického pole na živé organismy a přírodní prostředí. Tento jev můžeme obecně popsat jako ovlivňování normální funkce zařízení elektromagnetickou energií, která je vyzařována v kmitočtovém pásmu od 0 Hz až po desítky GHz. [1] [2]

## 1.2 Citlivost na rušení (EMS)

Elektromagnetická citlivost na rušení neboli odolnost proti rušení. Anglická zkratka EMS vyjadřuje Electromagnetic Susceptibility. Odolnost proti rušení se neměří, ale testována základě tzv. funkčních kritérií. Provádí se u testovaného zařízení, které je podrobené působení rušivých emisí, jejichž úroveň se měří a sleduje se, kdy který poruchový stav nastane. Na základě znalosti jeho funkce (včetně vnitřních stavů) se stanoví tzv. funkční kritéria:

- Funkční kritérium A - Zařízení musí během zkoušky pokračovat ve své činnosti dle svého určení. Není dovoleno žádné zhoršení činnosti zařízení či ztráta jeho funkce.
- Funkční kritérium B - Zařízení musí po skončení zkoušky pokračovat ve své činnosti dle svého určení. Během zkoušky je dovoleno zhoršení činnosti zařízení, není však dovolena změna aktuálního provozního stavu zařízení ani změna dat v paměti. Po skončení zkoušky není dovoleno žádné zhoršení činnosti zařízení či ztráta jeho funkce.
- Funkční kritérium C - Je dovolena výsledná dočasná ztráta funkce zařízení, za předpokladu, že se tato funkce po skončení zkoušky odolnosti obnoví sama, nebo může být obnovena činností řídicího systému, nebo zásahem operátora dle specifikace v návodu k použití zařízení.
- Funkční kritérium D - Toto kritérium není dovoleno v průběhu ani po skončení testu, jelikož dochází k trvalé nevratné ztrátě funkce (např. zničení nějaké součástky zařízení, která by se musela vyměnit) [1] [2]

### 1.3 Rozdělení elektromagnetického rušení

Rušení můžeme dle příčiny vzniku rozdělit na dvě skupiny:

- rušení vytvořené technickými prostředky
- rušení přirozené

Ze systémového hlediska můžeme rušení rozdělit na:

- vnější
- mezi-systémové
- vnitřní, vnitro-systémové

Podle časového průběhu:

- impulsní rušení
- spojitě rušení
- kvazi-impulsní (kombinací předchozích)

Podle šířky kmitočtového spektra:

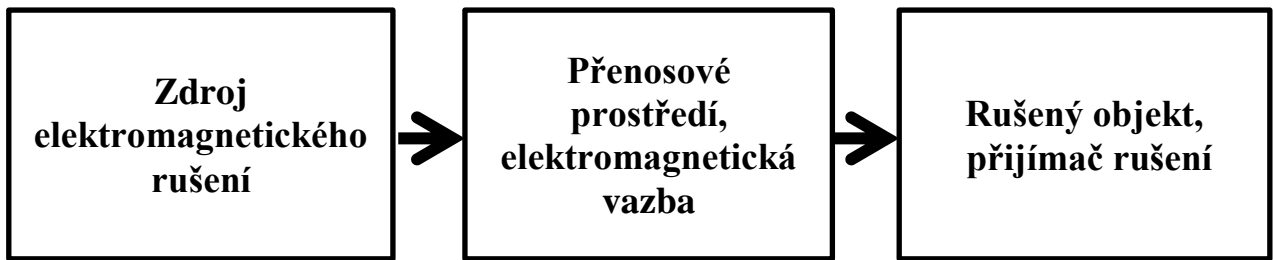
- úzkopásmové
- širokopásmové

Podle polohy v kmitočtovém spektru:

- nízkofrekvenční energetické: do 2 kHz
- nízkofrekvenční akustické: do 10 kHz

- vysokofrekvenční: od 10 kHz do 400 GHz

### Přenosová cesta elektromagnetického rušení



Obr.1. Základní řetězec přenosu EMC[2]

## 1.4 Zdroje elektromagnetického rušení

Zdroje působící na elektrorozvodné sítě:

- Výkonová zařízení nn a vn
  - generátory, transformátory, měniče -způsobují produkci harmonických signálů vyšších řádů
  - vypínače – při zapínání a vypínání vznikají přechodové děje
- Elektrické přístroje a zařízení nn
  - stykače, relé, jističe – vznik přechodových dějů vlivem spínání
  - měniče (např. tyristorové usměrňovače) - produkce periodických impulzů
  - spínané napájecí zdroje (domácí a kancelářské spotřebiče) - produkce harmonických signálů vyšších řádů
  - zářivky, výbojky – elektronické předřadníky

Lokální elektrostatické výboje:

- nevhodné oblečení a kancelářské zařízení, nízká vlhkost vzduchu

Atmosférické výboje-blesk:

- přímý úder - vznik rázového proudového impulsu a následných indukovaných napět'ových rázů
- nepřímý účinek - zavlčení napět'ových rázů z vnějšího vedení

Zdroje kontinuálního rušení:

- rozhlasové a televizní vysílače, mobilní telefony - generování rušivých signálů [2]

### Přenosové prostředí:

Vzdušný prostor, elektroenergetická soustava (kabely, venkovní vedení, zemnění stínění), parazitní elektromagnetické vazby (galvanická, indukční, kapacitní a vazba vyzařováním elektromagnetického pole).

## Rušené objekty

Počítače, číslicová technika, telekomunikační soustavy, automatizační prostředky, systémy přenosu dat, rozhlasové a televizní přijímače, živí tvorové, člověk.

## 1.5 Druhy rušivých signálů

Rušivé signály produkované technickými zdroji můžeme obecně rozdělit do tří základních skupin:

- Šum. Jsou to především změny projevující se změnou tvaru křivky napětí. Mezi zdroje šumu patří motory a klasické (rotační) svářečky. Šum má převážně periodický charakter (nesmí se plést s tepelným šumem).
- Impulsy. Jsou to signály charakterizované velkou amplitudou k době trvání. Tyto impulsy jsou superponovány na síťové napětí jako kladné nebo záporné špičky. Tyto impulsy jsou zpravidla způsobené spínacími pochody, které způsobují veškeré kontaktní spínací přístroje.
- Přejímové jevy. Jedná se o náhodné jednorázové děje, které se projevují na obálce křivky napětí. Tyto jevy trvají od několika period síťového napětí až po jednotky sekund. Přejímové jevy jsou způsobeny náhlou změnou zatížení při zapínání a vypínání napájecí sítě u spotřebičů velkých výkonů.[1][2]

### Způsoby šíření rušení

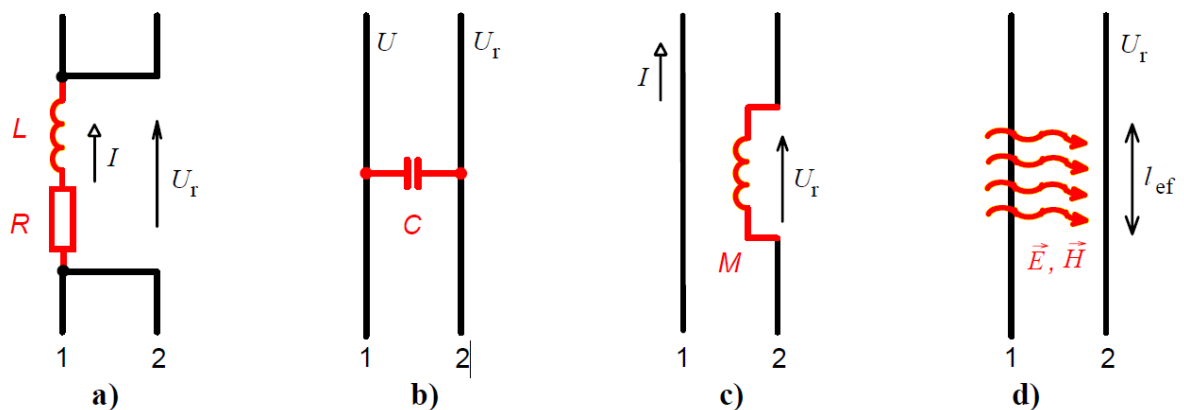
Rušivý signál může do přijímacího zařízení proniknout dvěma způsoby:

- po vedeních ve formě rušivých proudů, které vyvolají rušivá napětí na impedancích sítě a zátěže
- vyzařováním ve formě elektromagnetického pole

## 2 Vazební mechanismy přenosu rušivých signálů

Podle obr. 1 přenosového řetězce elektromagnetického rušení závisí přenos rušivých signálů rozhodující měrou na elektromagnetickém vazebním prostředí, tedy na vazbě mezi zdrojem a přijímačem rušení. Tyto vazby můžeme dělit podle různých hledisek. Např. podle technické realizace může být vazební prostředí tvořeno vzdušným prostorem, stínícími či absorpčními materiály, kmitočtovými filtry, signálovými či napájecími kabely, zemnicími systémy, elektroenergetickými soustavami.[2]

Z hlediska fyzikálního principu, který je většinou pro potlačení rušivých parazitních vazeb nejdůležitější, rozlišujeme čtyři druhy vazeb. Galvanická vazba - rušivé signály, které se šíří po vedení, kapacitní a induktivní vazba - rušivé signály šířící se blízkým elektromagnetickým polem a vazba vyzařováním - rušivé signály šířící se vzdáleným elektromagnetickým polem.[1] [3]



Obr.2. Druhy elektromagnetických vazeb a) galvanická, b) kapacitní, c) induktivní, d) vyzařováním [2]

### 2.1 Galvanická vazba

Galvanická vazba vzniká za předpokladu, že je mezi zdrojem a přijímačem rušení společná impedance, která mezi nimi tvoří vazební člen s výraznou galvanickou složkou, tj. složkou založenou hlavně na elektrické vodivosti.[1]

Společná impedance mezi zdrojem a přijímačem má nejčastěji charakter sériového obvodu RL. Vazba je nejčastěji tvořena vnitřní impedancí společného napájecího zdroje, společného přívodu řídicích obvodů nebo může být impedancí společného zemnicího systému.[2]

Vazba společnou impedancí napájecí sítě. Tato vazba vzniká na společném vedení, společném oddělovacím či napájecím transformátoru nebo napájecím zdroji, malou šířkou na desce plošných spojů, přepínači nebo konektoru. Vzniká tam, kde protékají pracovní proudy přijímače a vysílače v určité délce společným vedením a na tomto úseku vzniká úbytek napětí způsobený pracovním proudem zdroje rušení. Tento úbytek pak působí podobným způsobem jako modulační napětí u amplitudové modulace.[1][6]

Vazba společnou impedancí mezi zdrojem a přijímačem rušení vzniká v obvodech pro zpracování signálů. Například pronikáním rušení z napájecích vedení do řídicích obvodů.[1]

Vazba společnou impedancí zemnicího systému je nebezpečná tím, že zemnicí vodič pracuje zvláště při poruchových stavech. Napětí, které na zemnicím vodiči vzniká, je rozvedeno do všech připojených zařízení a porucha se může lavinově rozšířit.[1]

Rušení přenášená galvanickou vazbou se dělí na symetrické a nesymetrické rušení. Symetrická složka rušení se šíří po fázových vodičích případně po fázovém a nulovém vodiči a uzavírá se přes náhradní impedanci vedení. Nesymetrická složka rušení se šíří mezi fázovými vodiči a zemí.[1]

Pro minimalizaci galvanické vazby společnou impedancí napájecích, signálových nebo zemnicích obvodů je vhodné:

- dostatečně dimenzovat zemnicí vodič neboli zemní plochu a jednotlivé bloky k němu připojovat přímou cestou masivním vodičem
- u signálových vodičů neslučovat společný vodič
- elektronická zařízení různých technologií napájet samostatnými zdroji

Galvanickou vazbu potlačujeme mnoha způsoby: oddělovacím transformátorem, feritovými kroužky, feritovými perličkami, vedením s útlumovým pláštěm.[2]

## 2.2 Induktivní vazba

Induktivní vazba vzniká na principu elektromagnetické indukce mezi dvěma vodiči, protéká-li alespoň jedním elektrický proud. Tento druh vazby v podstatě odpovídá principu transformátoru. Induktivní vazba je závislá na mnoha faktorech. Například na velikosti vzájemné indukčnosti obvodů, vzdálenosti mezi obvody, délce souběhu vodičů, frekvenci rušivého proudu atd. Proto matematické vyjádření činitele vazby vyjadřující kvantitativně působení rušícího obvodu na obvod rušený, nemá smysl a pro každou konkrétní situaci musí



být určen zvláště. Tato vazba je přímým důsledkem působení magnetického pole rušícího zařízení na blízké obvody. Projevuje se hlavně mezi spojovacími vedeními těchto obvodů a vyskytuje se hlavně u nízkoimpedančních obvodů. Objevuje se nejen mezi sousedními vodiči, ale také mezi vedením, stínícími pláštěmi, uzemňovacími vodiči a konstrukčními částmi zařízení.[1] [6]

Pro minimalizaci indukční vazby je potřeba aby:

- délka souběžně vedených vodičů sousedních obvodů byla minimální
- vzdálenost sousedních obvodů byla co největší
- velikost proudové smyčky přijímače byla co nejmenší

Indukční vazbu potlačujeme například: zkroucením vodičů obvodu přijímače, minimalizací vazby kolmým natočením vazebních smyček, stíněním obvodu přijímače.[2]

### 2.3 Kapacitní vazba

Se zvyšující se impedancí obvodů, tedy se zvyšující se frekvencí, začíná se více uplatňovat vazba elektrickým polem neboli kapacitní vazba. Tato vazba vzniká přítomností parazitních kapacit mezi jednotlivými vodiči tak i mezi vodiči a zemí. Kapacita mezi vodiči a mezi vodiči a zemí se zmenšuje s logaritmem vzdálenosti vodičů, případně s výškou vodiče nad zemí, a zvětšuje se s průměrem vodiče. Proto je nutné stejně jako u indukční vazby, obvod zdroje rušení co nevíce vzdálit od ostatních vedení. Kapacitní vazba je dominantní vazbou u vysokoimpedančních obvodů. Kapacitní vazbu snižujeme například stíněním kabelů. [1] [2]

### 2.4 Vazba vyzařováním

Při větších vzdálenostech mezi zdrojem a přijímačem rušení, kdy je vyloučena činnost kapacitní nebo indukční vazby vzniká vazba vyzařených elektromagnetickým polem. Vazba vyzařováním je způsobují blízké vysílače, atmosférická rušení i řada druhů průmyslových poruch. Tato vazba se projevuje u rádiových přijímačů, do nichž se dostává pomocí antény případně jejím svodem. Působením elektromagnetické vlny se do přijímače indukuje rušivé napětí, které se sčítá s užitečným signálovým napětím nebo jej zcela překryje. Účinnou ochranu proti elektromagnetickému rušení vyzařováním lze realizovat pomocí stínícího krytu či přepážky umístěné mezi zdroj a přijímač rušení. [1] [2]

### 3 Zařízení omezující rušení

Z řetězce EMC plyne, že rušení můžeme omezovat přímo u zdroje rušení, na přenosové trase nebo na přijímači rušení. Nejlepší možnost, kde potlačujeme rušení, je na straně zdroje. Tím vyloučíme jak ovlivňování našeho vyšetřovaného přijímače, tak i ostatních zařízení, které by rušivý zdroj mohl rušit v budoucnu. V případě, že rušivý signál přichází na vstup přijímače společně s rušivým signálem, je potlačení rušivých signálů přímo na zdroji jediným řešením. V ostatních případech je důležité odstraňovat rušení nejen u zdroje, ale i na přenosové cestě a na přijímači rušivého signálu.[1] [2]

Potlačení rušivého signálu u zdroje můžeme naopak vyloučit, když je signál zdroje užitečný pro jiné zařízení. Technické prostředky, které používáme pro potlačení nežádoucích signálů, nazýváme odrušovací prostředky. Tyto odrušovací prostředky používáme jak pro potlačení rušivých signálů, tak i pro zvýšení odolnosti přijímacího zařízení.[1] [2] [5]

Mezi odrušovací prvky patří:

- odrušovací tlumivky a jednovrstvkové tlumivkové filtry, magnetické materiály (ferity)
- odrušovací kondenzátory a kondenzátorové filtry
- odrušovací filtry LC
- přepětové ochranné prvky (bleskojistky, plynové výbojky, varistory, omezovací diody)
- elektromagnetické, elektrické a magnetické stínění

Použití konkrétních odrušovacích zařízení závisí především na tom, jestli chceme odstranit rušení na vedení, nebo rušení vyzařováním. K omezení rušení na vedení se používají odrušovací tlumivky, kondenzátory, složitější filtry LC a omezovače přepětí. Omezení rušení způsobené vyzařováním nebo zvýšení odolnosti proti vyzařovaným elektromagnetickým polím se řeší pomocí stínění. Pokud zvolíme nesprávný odrušovací prostředek, ten nejen že nezpůsobí očekávané utlumení rušivých signálů, ale může zhoršit parametry odrušovaného zařízení, ohrožení bezpečnosti obsluhy nebo dokonce zesílit rušivé signály. A tím může způsobit, že „odrušené zařízení“ ruší nebo je rušeno více než zařízení neodrušené. [1] [6]

Podmínkou správné volby odrušovacích prostředků je znalost jejich vlastností a parametrů a současně znalost chráněných obvodů a vazeb v závislosti na kmitočtu.[1] [4]

Dosavadní zkušenosti z oblasti EMC u elektrických přístrojů a zařízení ukazuje, že na

parazitních přenosech a rušení dvou přístrojů, které mohou být i vzájemně vzdálené, má téměř vždy podíl rozvodná energetická síť. Vodiče energetické napájecí sítě vcházející do přístroje se nejruznějším způsobem ruší a parazitně se váží s vnitřními částmi přístroje. Vně přístroje se tyto napájecí vodiče rozdělují do mnoha jiných prostorů a přístrojů a realizují tak přímou vazbu mezi vnitřními částmi různých přístrojů. Dále se síťové vodiče váží na signály vysílané z blízkých vysílačů a rádiových přijímačů. Pomocí této vazby se do síťových vodičů indukují různá vf. napětí přenášená dovnitř přístroje. K odrušení tohoto rušení přenášeného sítí můžeme použít elektrické odstínění primárního vedení síťového transformátoru a zároveň umístit filtr do přívodu napájecí sítě.[1] [2]

### 3.1 Odrušovací tlumivky

Odrušovací tlumivky používáme buď samostatně nebo jako součásti složitějších filtrů. Tlumivky zapojujeme do proudových obvodů odrušovaného zařízení, proto jejich velikost závisí především na velikosti protékajícího pracovního proudu. Tlumivky zapojujeme mezi zdroj rušení, nejčastěji výstup energetické sítě a napájecí vstup přijímače rušení. Zapojujeme je tedy sériově mezi impedanci sítě  $Z_S$  a vstupní impedanci chráněného přístroje neboli impedanci zátěže  $Z_Z$ . Analýzou tohoto jednovrstvého filtru určíme jeho vložený útlum v [dB].[1] [3]

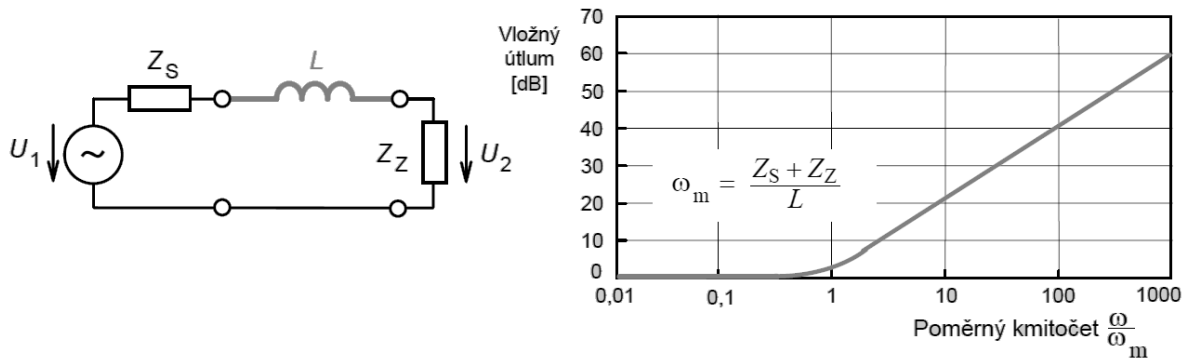
$$L = 20 \log \left| \frac{U_{20}}{U_2} \right| = 20 \log \left| 1 + j\omega C \cdot \frac{j\omega L}{Z_S + Z_Z} \right|$$

Kde  $U_2$  je napětí na výstupu se zapojenou tlumivkou na zátěži  $Z_Z$  a  $U_{20}$  je napětí bez zapojené tlumivky. Kmitočtový průběh útlumu má dvě oblasti:

$$L \approx 0 \quad [\text{dB}] \quad \text{pro} \quad \omega L \ll Z_S + Z_Z$$

$$L \approx 20 \log \frac{\omega L}{Z_S + Z_Z} \quad [\text{dB}] \quad \text{pro} \quad \omega C \gg Z_S + Z_Z$$

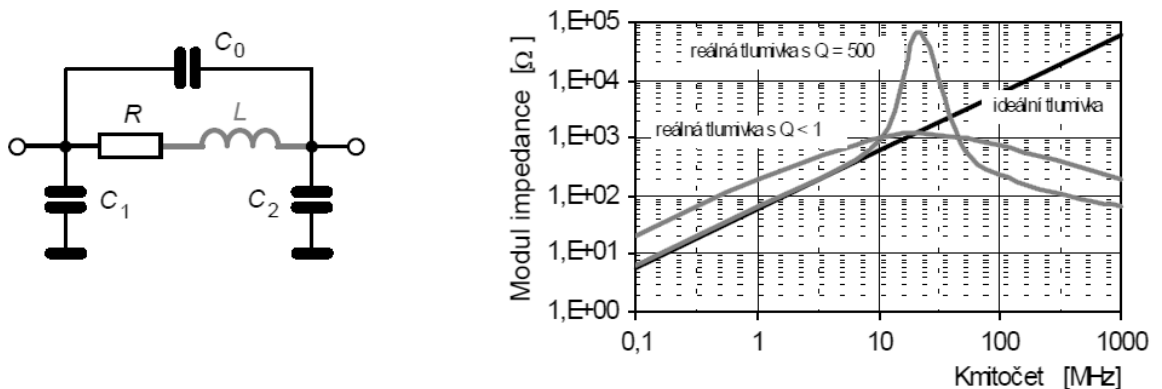
Ze vztahů je zřejmé, že tlumivky lze použít pouze v systémech s nízkou impedancí, ve kterých jsou impedance zdroje i přijímače rušení mnohem menší než reaktance tlumivky na kmitočtech odrušovaného pásma. [2] [4]



Obr.3. Zapojení odrušovací tlumivky do vedení a kmitočtový průběh jejího vložného útlumu[2]

Zásadní vliv na odrušovací vlastnosti tlumivky mají její parazitní parametry. Kromě vlastní indukčnosti  $L$ , která by měla být co největší, vykazuje každá reálná tlumivka ztrátový odpor vinutí  $R$  a parazitní kapacity  $C$ . Parazitní kapacita může být mezizávitová, proti jádru nebo proti zemi.[1]

Parazitní kapacity způsobují, že se tlumivka chová jako rezonanční obvod, který má nad svojí rezonanční frekvencí kapacitní charakter. S rostoucí frekvencí se tedy zhoršuje odrušení rušivých signálů a snižuje se vložný útlum. Pro útlumové vlastnosti hraje zásadní úlohu činitel jakosti  $Q$ , který je definován vztahem  $Q = \frac{\omega L}{R}$ . Mimo síťové frekvence musí mít tlumivka co největší činné ztráty, tedy co nejmenší činitel jakosti, nejlépe  $Q < 1$ . Tlumivka se poté nad svojí rezonanční frekvencí nechová jako čistá kapacita, ale spíše jako frekvenčně závislý odpor, který po přechodu bodem vlastní rezonance přebírá úlohu indukční složky. Pokles útlumu je pak méně strmý a tlumivka má pak širší pracovní šířku frekvenčního pásma viz obr 4. [1] [4]



Obr.4. Náhradní schéma odrušovací tlumivky a frekvenční závislost velikosti její impedance [2]

Tlumivka by tedy měla splňovat tyto parametry: velká indukčnost při malých rozměrech, nízkém počtu závitů a nízké hmotnosti, vysoká rezonanční frekvence, tj. nízké hodnoty parazitních kapacit, co největší činné ztráty (mimo oblast síťových frekvencí). Tlumivky se nesmí přesycovat pro proudy, na které jsou určeny. Tlumivky musejí být navrženy tak, aby umožňovaly dosáhnout maximální indukčnosti při minimálním počtu závitů tlumivky.[1] [5]

Tlumivky rozdělujeme podle účelu použití na dvě skupiny: tlumivky pro potlačení symetrické složky rušení a tlumivky pro potlačení nesymetrické složky rušení.

Tlumivky pro potlačení symetrické složky rušení využíváme pro potlačení parazitních vazeb mezi signálovými a řídicími obvody. Tyto tlumivky se zapojují běžným způsobem podélně do proudových vodičů, pracovní proud jimi protéká stejným směrem jako rušivý proud. Tyto tlumivky se konstrukčně, tvarem a způsobem vinutí neliší od tlumivek používaných v ostatních oborech v elektrotechnice. Konstrukčně tyto tlumivky dělíme na tlumivky v uzavřeném jádru ve tvaru prstence, tlumivky na otevřeném jádru, případně jako vzduchové s nemagnetickým jádrem nebo bez jádra. Vzduchové cívky mají jednoduchou konstrukci, ale v odrušovací technice se používají jen výjimečně, např. když není k dispozici jiná vhodnější tlumivka. Jejich nevýhodou je činitel jakosti  $Q \gg 1$  a nižší dosažitelná indukčnost.[1] [2]

Tlumivky pro potlačení nesymetrické složky rušení, které můžeme také nazývat tlumivky s proudovou kompenzací. Konstrukce těchto tlumivek je založená na tom, že fázový a zpětný vodič jsou navinuty na společném jádru ve stejném smyslu tak, že pro pracovní proud s frekvencí 50 Hz a pro protifázové rušivé proudy mají jejich magnetické toky opačný směr. Tyto magnetické toky se vzájemně vyruší a výsledná indukčnost pro pracovní proud je téměř nulová. Pro soufázové rušivé proudy, tedy pro proudy protékající po vodičích ve stejném směru je indukčnost značná, protože magnetické toky mají souhlasný směr a sčítají se. Ale nedochází zde k přesycení jádra, ani k úbytku napětí v obvodu pracovního proudu.[1] [4]

### 3.1.1 Jádra odrušovacích tlumivek

Jádrem se nazývá magnetický obvod tlumivky, který je tvořen magnetickým materiálem. Magnetické parametry jádra tlumivky jsou určena magnetickými vlastnosti materiálu, tvarem a rozměry.[1]

Rozlišují se tři základní druhy jader magnetických materiálů:

- otevřená jádra, kde je magnetický obvod zcela otevřen, např. jádra válečková, trubičková
- uzavřená jádra se vzduchovou mezerou
- úplně uzavřená jádra, např. toroidní jádra

Pro tlumivky určené pro symetrické odrušení se používají všechny tři druhy jader. Při výběru jádra pro tlumivku záleží především na velikosti pracovního proudu, velikosti indukčnosti, rozměrech, hmotnosti a umístění v odrušovaném obvodu.[2]

Pro tlumivky s proudovou kompenzací se používají uzavřená jádra bez vzduchové mezery. Kritéria pro výběr jádra jsou stejná jakou u tlumivek určených pro odrušení symetrické složky rušení. K běžným typům jader v technické praxi patří: toroidní, hrníčková, perličková (korálky), trubičková a závitová jádra lisovaná z feritů. Rozměry těchto jader jsou v normovaných velikostech.[2]

### 3.1.2 Feristory

Feristory jsou vhodné pro účinné a snadné omezení vf rušení, které se šíří převážně napájecím vedením a ohrožuje činnost elektronických obvodů. Toho lze dosáhnout jednoduchým navlečením feromagnetického jádra z feritů, práškového železa nebo amorfního kovu na vodič napájecího vedení. Případně jej můžeme použít na příklady k součástkám nebo k obvodům citlivých na rušení. Feromagnetické jádro feritu tvoří útlumový člen s indukčním charakterem, chování tohoto členu je totožné jako chování vysokofrekvenční tlumivky s jedním závitem.[1]

Feromagnetický materiál jádra útlumového členu feritu má velkou počáteční permeabilitu a velké ztráty, stejné vlastnosti jako materiál jádra odrušovací tlumivky. Ferity jsou v současné době běžným materiálem používaným pro výrobu indukčních útlumových členů a existují v mnoha tvarech a velikostech. Feritová jádra mají různé tvary – toroidy, trubičky, mnohovorová jádra, obdélníkové bloky z plochých feritů apod. Tato feritová jádra jsou navlečena na vodič nebo vodiče nebo vývody součástky a tvoří tak jednozávitovou nebo vícezávitovou tlumivku. Feristorem může být každé uzavřené feromagnetické jádro splňující určité specifické požadavky. Nesprávně volené nebo chybně instalované feristory naopak mohou být zdrojem dodatečného rušení. K volbě termínu feristor, přispěl fakt, že pro indukční útlumový článek volíme ztrátové feromagnetické materiály, které se v pásmu vysokých kmitočtů chovají jako kmitočtově závislé rezistory.[1]

Požadavky na vlastnosti feromagnetika: nejrozšířenějším materiálem používaným pro feristory jsou ferity. Ferity se vyrábí v nejrůznějších tvarech, velikostech a hmotách. V podstatě lze pro feristor použít i jádra používaná pro jiné účely. V současné době jsou k dispozici jádra speciálních tvarů konstrukčně i technologicky upravených tak, aby vyhovovaly specifickým funkcím a požadavkům kladeným na feristory, například možnost nasazení na vodič bez jeho odpojení, vypnutí obvodu nebo speciální povrchová úprava pro zajištění dostatečné elektrické izolace feristoru apod.[1]

Feritové hmoty podle složení mohou být buď nevodivé – materiály na bázi niklu a zinku s velkou měrnou rezistivitou kolem  $10^6 \Omega\text{cm}$  nebo polovodivé – materiály na bázi manganu a zinku s rezistivitou kolem  $100\Omega\text{cm}$ . V případě nevodivé hmoty není třeba přídavné izolace mezi feristorem a vodičem. U polovodičového provedení je třeba před navlečením feristoru dostatečně odizolovat vodič, aby nemohlo dojít k proražení izolace zkratem při provozu zařízení. Při volbě vhodného feromagnetického materiálu pro feristor platí stejné požadavky jako při volbě jádra pro odrušovací tlumivku, tj. v požadovaném kmitočtovém pásmu materiál musí mít co nejvyšší permeabilitu a co nejvyšší ztráty.

Feristory se používají k potlačení symetrické i nesymetrické složky rušení. V případě potlačování symetrické složky se navlékají na samostatné napájecí nebo signálové vodiče obvodu a fungují jako klasické podélně zapojené tlumivky. Důležitá je kontrola tlumivek pro možnost jejich přesycování. Když se nejedná o napájecí vedení, ale o vedení signálové, užitečný i rušivý signál jsou potlačeny stejným dílem.[1]

Pro potlačení nesymetrické složky rušení se feristory navlékají na více žilové nebo dvou žilové napájecí nebo signálové vodiče. Vzniká tak vlastně kompenzovaná tlumivka s jedním nebo více závity vytvořenými více žilovými vodiči.[1]

Útlum feristoru lze zvýšit paralelním připojením kondenzátoru k zátěži. Tím se sníží impedance zátěže a feristor se lépe uplatní. Toto zapojení se používá hlavně tam, kde je třeba chránit zátěž před vf rušením z napájení. Nejlepší pro toto zapojení jsou průchodkové kondenzátory. Na velmi vysokých kmitočtech vyvolává zhoršení útlumu mezizávitová kapacita v případě, že počet závitů je větší než jeden.[1]

### 3.2 Odrušovací kondenzátory

Kondenzátory používáme k potlačení rušení, která vznikají při provozu elektrických zařízení. Kondenzátory používáme buď samostatně, když vnitřní impedance zdroje rušení a napájecí sítě jsou vysoké, nebo v kombinaci s tlumivkami (filtry LC) nebo v kombinaci

s rezistory (filtry RC). Odrušovací kondenzátor se zapojuje paralelně k vnitřní impedanci sítě  $Z_S$  a vstupní impedance napájecího vstupu odrušovaného objektu  $Z_Z$ . Vložný útlum je tedy roven

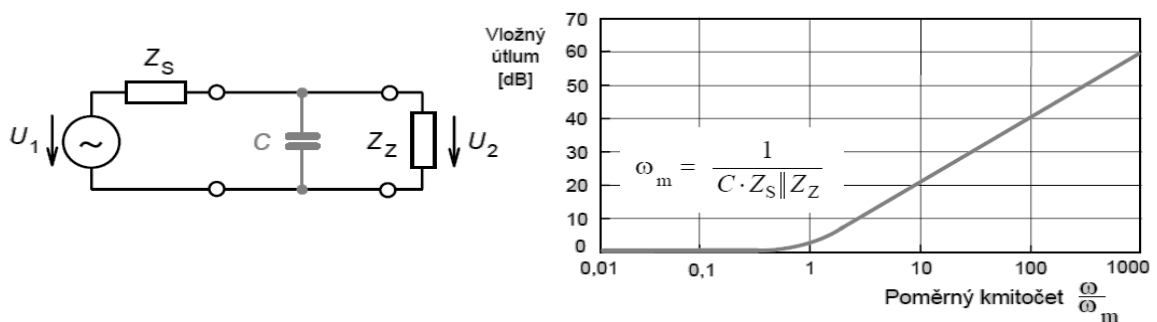
$$L = 20 \log \left| \frac{U_{20}}{U_2} \right| = 20 \log \left| 1 + j\omega C \cdot \frac{Z_S \cdot Z_Z}{Z_S + Z_Z} \right|$$

kde  $U_2$  je napětí na výstupu se zapojeným kondenzátorem na zátěži  $Z_Z$  a  $U_{20}$  je napětí bez zapojeného kondenzátoru. Kmitočtový průběh útlumu má dvě oblasti:

$$L \approx 0 \quad [\text{dB}] \quad \text{pro} \quad \omega C \ll 1/(Z_S \parallel Z_Z)$$

$$L \approx 20 \log \left( \omega C \cdot \frac{Z_S \cdot Z_Z}{Z_S + Z_Z} \right) \quad [\text{dB}] \quad \text{pro} \quad \omega C \gg 1/(Z_S \parallel Z_Z)$$

Použití odrušovacích kondenzátorů je účinné tehdy, je-li reaktance kondenzátorů mnohem menší než vnitřní impedance zdroje rušení a impedance napájecí sítě. Odrušovací schopnost kondenzátorů je tedy vysoká u vysokoimpedančních systémů. V případě nízké impedance zdroje a přijímače rušení odrušovací schopnost kondenzátorů klesá.[2] [5]



Obr.5. Zapojení odrušovacího kondenzátoru do vedení a kmitočtový průběh jeho vloženého útlumu[2]

Odrušovací účinek kondenzátorů je tedy založen na základní vlastnosti kondenzátorů a to, že kondenzátor má tím menší impedanci, čím vyšší je frekvence proudu, který kondenzátorem protéká.[1]

Podobně jako u tlumivek tak i kondenzátor není ideální součástka, která by byla charakterizována pouze svojí kapacitou a proto se i u kondenzátorů uplatňují jejich parazitní parametry, z nichž nejdůležitější je parazitní indukčnost přívodů kondenzátorů a svodový odpor. Parazitní indukčnost spolu s kapacitou kondenzátoru vytváří parazitní rezonanční obvod, nad nímž má kondenzátor induktivní charakter a jeho vložený útlum s rostoucím kmitočtem klesá.[1]

Svodový nebo izolační odpor charakterizuje izolační vlastnosti použitého dielektrika a určuje hodnotu unikajícího proudu. Proto je tento parametr důležitý z hlediska bezpečnosti.



Tento odpor musí mít velmi vysokou hodnotu. Řádově **1 MΩ** a více. Čím větší je hodnota kapacity kondenzátoru, tím menší je svodový odpor. Také vyšší provozní frekvence snižuje hodnotu svodového odporu.[1]

U kondenzátorů záleží také na délce přívodů. Čím delší přívody, tím nižší je maximální frekvence, kterou je kondenzátor schopen utlumit. Proto musí být délky přívodů co nejkratší. Z tohoto hlediska představují nejlepší volbu průchodkové nebo koaxiální průchodkové kondenzátory a to zejména při odrušování kmitočtů vyšších než přibližně 1MHz.[1]

Velikost kapacity odrušovacího kondenzátoru volíme v závislosti na očekávané frekvenci rušení. Čím nižší je dolní kmitočet pásma které chceme potlačovat, tím větší kapacitu volíme. Nejčastějším typem rušení je širokopásmové rušení, které obsahuje více řádů frekvencí. Toto rušení rušíme pomocí více kondenzátorů menších hodnot, které řadíme paralelně za sebou.[1] [2]

Odrušované kmitočtové pásmo	Doporučené hodnoty odrušovacích kondenzátorů
10 kHz – 0,5 MHz	5- 4- 2 -1- 0,5 $\mu$ F
0,5 – 6 MHz	0,5 – 0,25 – 0,1 $\mu$ F
6 – 30 MHz	100 nF až 1000 pF
Nad 300 MHz	méně než 1000pF

Tab.1. Doporučené kapacity k odrušení v různých kmitočtových pásmech[2]

Pokud chceme použít k odrušování běžný kondenzátor pro obecné použití, musíme uvážit frekvenční závislost jeho dielektrika a volit kondenzátor s vhodným dielektrikem pro dané pásmo.[1] [2]

Protože kondenzátory v podstatě zkratují rušivé napětí k zemi nebo ke kostře odrušovaného zařízení, jsou z hlediska bezpečnosti průrazu elektrickým proudem důležité i jejich průrazné parametry. Odrušovací kondenzátory tedy dělíme na kondenzátory třídy X a Y (tzv. bezpečnostní). Kondenzátory třídy X používáme tam, kde jejich porucha nebo průraz nemůže ohrozit lidské zdraví. Jejich velikost proto není omezena a volí se podle konkrétní potřeby velikosti odrušení. Kondenzátory typu X dále dělíme na podtřídy X1 a X2. Kondenzátory X1 používáme k tlumení přepětových špiček větších než 1,2 kV. Pro menší hodnoty napětí volíme kondenzátory X2. Odrušovací kondenzátory třídy Y se zapojují mezi fázový a zemnicí vodič nebo uzemněný kryt přístroje, v místech kde je omezena přípustná

hodnota unikajícího neboli svodového proudu.[1] [2]

Dále kondenzátory dělíme podle počtu pólů. Existují kondenzátory dvojpólové, trojpólové, čtyřpólové nebo i vícepólové. Jejich použití závisí na tom, zda chceme kondenzátorem potlačit soufázovou nebo protifázovou složku proudu na vedení. Dvojpólové kondenzátory odstraní soufázové rušivé proudy z obou vodičů odrušovaného vedení v kombinaci s dalším kondenzátorem umístěným mezi vodiči, který potlačí protifázový rušivý proud a nepropustí jej na vstup chráněného zařízení. Trojpólové kondenzátory chrání obvod před soufázovými rušivými proudy. Naopak čtyřpólové kondenzátory chrání obvod proti protifázovým rušivým proudům. Při použití čtyřpólového kondenzátoru odstraníme soufázový i protifázový rušivý proud. [1] [2]

### 3.2.1 Typy kondenzátorů

Při výběru vhodného odrušovacího kondenzátoru nejvíce záleží na materiálu dielektrika, z něhož je kondenzátor vyroben. Pokud vybíráme z běžných kondenzátorů, znalost vlastností dielektrika nám zaručí, že při výběru ze dvou kondenzátorů stejných elektrických a mechanických vlastností vybereme ten správný. Dále záleží na průběhu impedanční nebo útlumové charakteristiky a rezonančním kmitočtu. Kondenzátory se podle materiálu dielektrika dělí na elektrolytické, keramické, plastové, papírové a slídivé.[1]

### 3.2.2 Elektrolytické kondenzátory

Vyznačují se vysokou hodnotou kapacity při velmi malých rozměrech. Jsou polarizovatelné, takže se používají hlavně v obvodech stejnosměrného napětí. Můžeme je použít i v obvodech střídavého napětí, ale špičková hodnota napětí nesmí převýšit 80% jmenovitého napětí kondenzátoru. Elektrolytické kondenzátory dělíme na hliníkové a tantalové.[1]

- **Hliníkové elektrolytické kondenzátory** – tyto kondenzátory se využívají v nízkofrekvenčních obvodech do frekvence 25 KHz jako filtrační, oddělovací a vazební. Jejich napětí může dosahovat 500 V střídavého napětí i více. Pokud chceme hliníkové kondenzátory použít pro vysoké kmitočty, připojuje se k nim paralelně kondenzátor malé kapacity s potlačenou indukčností. Tyto kondenzátory se používají

ve filtračních obvodech napájecích zdrojů s polovodičovými součástkami a jiných nízkofrekvenčních aplikacích.[1]

- **Tantalové elektrolytické kondenzátory** –pracovní napětí těchto kondenzátorů se pohybuje v rozmezí 50 – 300 V stejnosměrného napětí. Jejich rozměry jsou v porovnání s hliníkovými kondenzátory menší. Dosahují vyšší životnosti a pracují v širším frekvenčním rozsahu. Mají menší unikající proud zvláště při vysokých pracovních teplotách. Hodí se tam, kde je potřeba větší přesnost a stabilita parametrů a odolnost proti krátkodobému napěťovému přetížení. Používají se v nízkofrekvenčních i vysokofrekvenčních aplikacích jako filtrační, oddělovací a vazební. Elektrolytické kondenzátory se většinou v katalozích odrušovacích kondenzátorů nevyskytují, ale v případě vhodně zvoleného kondenzátoru se pro odrušování dají použít. Sleduje se především frekvenční závislost dielektrika kondenzátoru.[1]

### 3.2.3 Keramické kondenzátory

Vyrábí se v mnoha tvarech a velikostech. Mají velmi malé rozměry a vyznačují se vysokou spolehlivostí. Podle materiálu dielektrika dělíme keramické kondenzátory na nízkoztrátové a vysokoztrátové.[1]

Nízkoztrátové se vyznačují vysokou stabilitou kapacity a malými ztrátami i při vysokých kmitočtech. Mezi jejich další dobré vlastnosti patří vysoký izolační odpor a stabilita elektrických parametrů bez napěťové závislosti. Závislost kapacity keramických kondenzátorů je téměř ideální. Používají se k teplotní kompenzaci rezonančních obvodů. Dále se používají ve vysokofrekvenčních obvodech jako vazební a oddělovací kondenzátory a tam kde je potřeba teplotní stability, úzké tolerance kapacity a malé ztráty.[1]

Vysokoztrátové kondenzátory mají menší stabilitu kapacity, větší ztrátový činitel a nelineární závislost kapacity. Tyto kondenzátory jsou používané jako odrušovací, vazební a blokovací a jako bezpečnostní kondenzátory tříd Y při odrušení spotřebičů do 250 V. Především v aplikacích, kde není prioritní stabilita kapacity a nízké ztráty. Používají se také jako miniaturní vysazovací kondenzátory v integrovaných obvodech pro blokování parazitních vazeb, vzniklých přímo na vývodních kolících součástek. Kondenzátory s nízkými hodnotami kapacit, mohou mít rozsah frekvencí, kde je možnost je použít, větší než 200 MHz. Keramické kondenzátory se většinou v katalozích odrušovacích kondenzátorů nevyskytují, ale v případě vhodně zvoleného kondenzátoru se pro odrušování dají použít.[1]

### 3.2.4 Plastové kondenzátory

Spolu s kondenzátory z metalizovaného papíru tvoří převážnou část nabídky odrušovacích kondenzátorů. Dosahují nejširšího spektra mechanických a elektrických parametrů a tím je i oblast jejich použití široká. Jako dielektrikum těchto kondenzátorů se používají polystyrenové, polykarbonátové, polypropylenové a polyesterové fólie. Používají se pro účely blokování, potlačení vazby, filtrace, ochrany před přepětím, odrušení atd. Plastové kondenzátory dělíme na kondenzátory s pevnými polepy a s polepy metalizovanými. Rozdíl mezi nimi je, že když je v dielektriku překročena elektrická pevnost, která vede k průrazu kondenzátoru, pak u kondenzátorů s pevným dielektrikem průraz způsobí zkrat, zatímco u metalizovaných kondenzátorů je tento zkrat odstraněn díky procesu samo-regenerace. Kapacita plastových kondenzátorů závisí především na jejich rozměrech a regenerační schopnosti. Metalizované kondenzátory jsou vhodné pro provoz, kde se nevyskytují velké strmosti impulsů. Pro náročnější aplikace se používají kondenzátory s pevným dielektrikem, které navíc v dlouhodobém impulsním provozu mohou být teplotně přetíženy o 10 - 15 °C.[1]

### 3.2.5 Kondenzátory s papírovým a kombinovaným dielektrikem

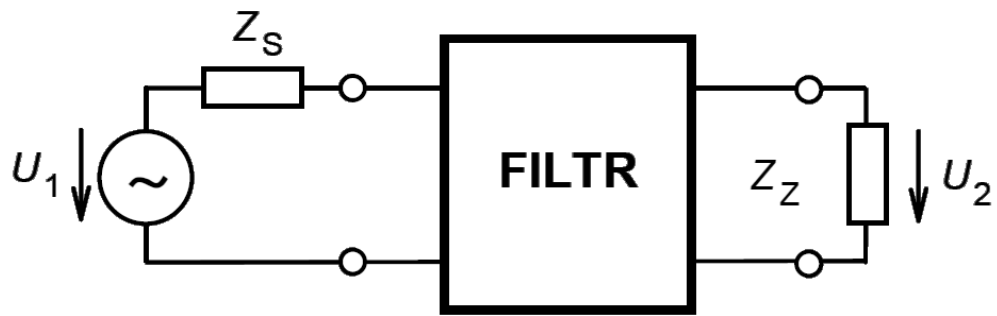
Spolu s plastovými kondenzátory patří v odrušovací technice k nepoužívanějším. Dielektrikum je tvořeno kondenzátorovým metalizovaným papírem, který je napuštěn impregnační hmotou. Někdy je papír kombinován s plastovým dielektrikem, nejčastěji PET nebo PP. Vlastnosti papírového dielektrika v kondenzátoru se zlepšují pomocí impregnačních látek, které vyplňují póry v papíru. Vhodně zvolený impregnant zvýší průrazné napětí a umožní širokou možnost změny parametrů kondenzátoru pro nejrůznější účely. Kondenzátory s papírovým dielektrikem jsou často nahrazovány kondenzátory plastovými, které mají jednodušší technologii výroby a menší rozměry. Papírové kondenzátory se však stále využívají u vyšších napětí a výkonů.[1] [2]

## 3.3 Odrušovací filtry

K sofistikovanější ochraně před vysokofrekvenčními rušivými signály, které se šíří po vedení používáme odrušovací filtry. Tyto odrušovací filtry se skládají z kombinací tlumivek, kondenzátorů a rezistorů. Nejčastěji se používají LC filtry zapojené jako dolní propust. Které propouštějí nižší frekvence s užitečnými signály a odfiltrují rušivou vysokofrekvenční složku. [2] [3]

Nejčastějším typem filtru je síťový odrušovací filtr, zapojený do napájecí sítě či do

napájecího vstupu přístroje. Principiální zapojení filtru je uvedeno na obr.[2]



Obr.6. Zapojení filtru v obvodu[2]

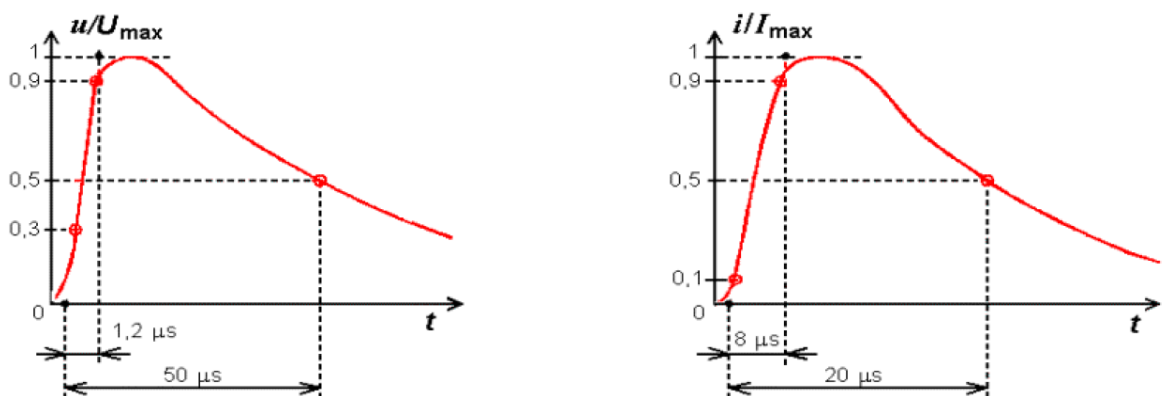
Síťový odrušovací filtr se připojuje ke zdroji rušení obvykle, tak že jeho síťové svorky představují zároveň i vstup do chráněného zařízení. Z toho plyne, že pro správnou činnost filtru je důležitá i jeho konstrukce včetně správného umístění na odrušovaný objekt. Filtry jsou zabudovány v kovových stínících krytech ve tvaru krabic nebo válců. Kryt je vždy spojen s ochranným vodičem sítě. Správné zapojení filtru musí být takové, aby rušivé signály mohli vstupovat do odrušovaného zařízení pouze prostřednictvím ochranného filtru a nikoliv parazitními cestami kolem filtru. [1] [3]

## 4 Měření účinků odrušovacích prostředků

V tomto měření jsme se zaměřili na rušení šíření po vedení. Tedy na rušení přenášené galvanickou vazbou. Měřili jsme reakce odrušovacích prostředků na vysokoenergetický rázový impuls a na rychlé elektrické přechodové jevy / skupiny impulsů také nazývané burst signály vedených po kabelu s průřezem 0,75 mm. Na tyto signály jsme testovali tři typy feritových jader, tři typy LC filtrů, tři odrušovací kondenzátory o hodnotách kapacity 0,047, 0,22, 0,47  $\mu\text{F}$  a dvě cívky o hodnotách indukčnosti 100 a 130  $\mu\text{H}$ .

### 4.1 Měření tlumení vlny rázového impulsu

Rázové impulsy vznikají, buď v přírodě formou blesku nebo při spínacích pochodech či poruchách energetické vysokonapěťové sítě a pronikají do rozvodů nízkého napětí, kde způsobují rázy. S energií až 50 J, mohou se tak projevit i tepelně. Jejich kmitočtové spektrum sahá až do 1MHz. Tyto rázové impulsy se projevují různě podle velikosti impedance zdroje a odrušovaného zařízení. Je-li vstupní impedance na napájecích svorkách zkoušeného zařízení velká ve srovnání s výstupní impedancí zdroje, vytváří rázový impuls na svorkách zařízení impuls napětí. Je-li příslušná vstupní impedance relativně malá, vytváří rázový impuls na svorkách zkoušeného zařízení impuls proudu. Pro testování elektrotechnických zařízení existují normované impulsy proudu a napětí.[2] [10]



Obr. 7. Zkušební signál vlny napětí naprázdno a rázové vlny proudu nakrátko a normované časové intervaly náběhu a poklesu vlny[2]

Tyto signály jsme generovali pomocí generátoru kombinované vlny. Na generátoru jsme nastavili nižší hodnotu napětí 200 V, abychom nepřetěžovali proudovou sondu a aby nedocházelo k nasycení feritů a tlumivek. Napětí jsme sledovali pomocí napěťové sondy a proud pomocí proudové sondy. Probíhající signály jsme zobrazovali na osciloskopu.

Proudový průběh rázového impulsu nakrátko jsme testovali na feritech (které můžeme brát jako jednozávitovou tlumivku) a tlumivkách. Při tomto měření jsme zaznamenávali i napětové špičky na těchto odrušovacích prvcích. U feritů jsme ještě zkoušeli vliv více průvleků vodiče feritem. U kondenzátorů jsme zaznamenávali průběh rázové napětové vlny naprázdno a také proud tekoucí do země. U filtrů jsme měřili napětí naprázdno na výstupu filtru (měřeno na fázovém vodiči) a proud tekoucí do země (proudová sonda umístěná na zemnicím vodiči).

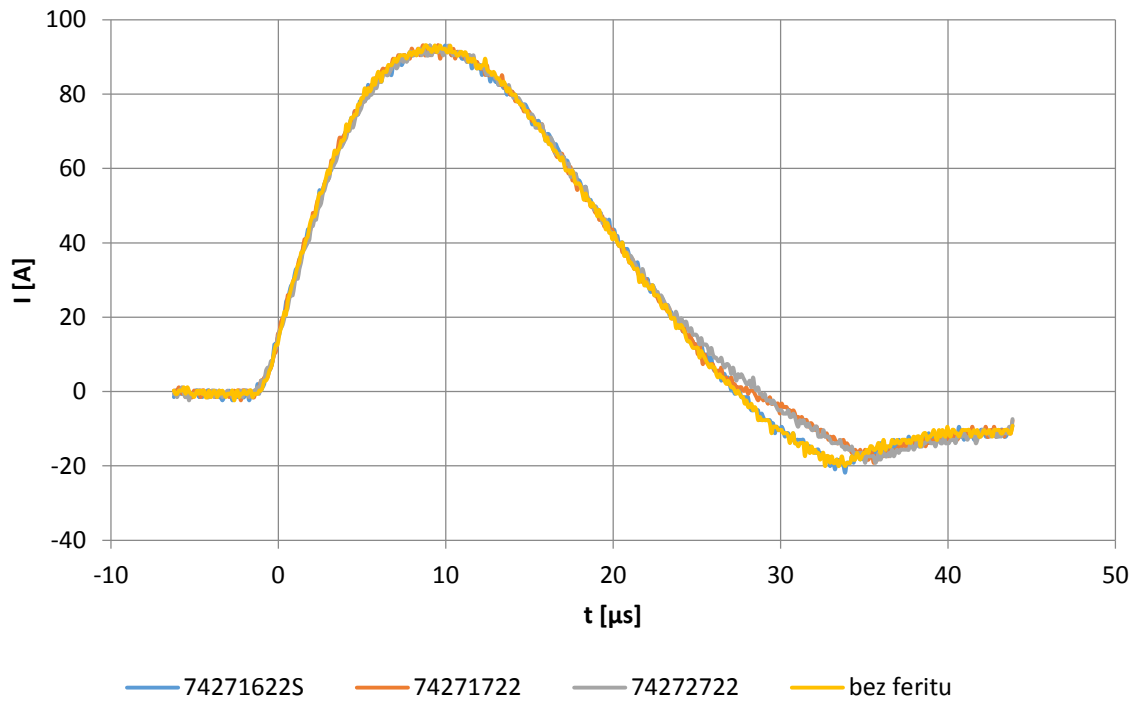
Dále jsme ještě měnili zapojení vazeb. Zapojené vazby: vazba  $9 \mu\text{F} + 12 \Omega$  - vazba mezi živým vodičem a zemí, vazba  $18 \mu\text{F} + 2 \Omega$  - vazba mezi živými vodiči a vazba  $0,5 \mu\text{F} + 42 \Omega$ .

#### 4.2 Měření tlumení burst signálů

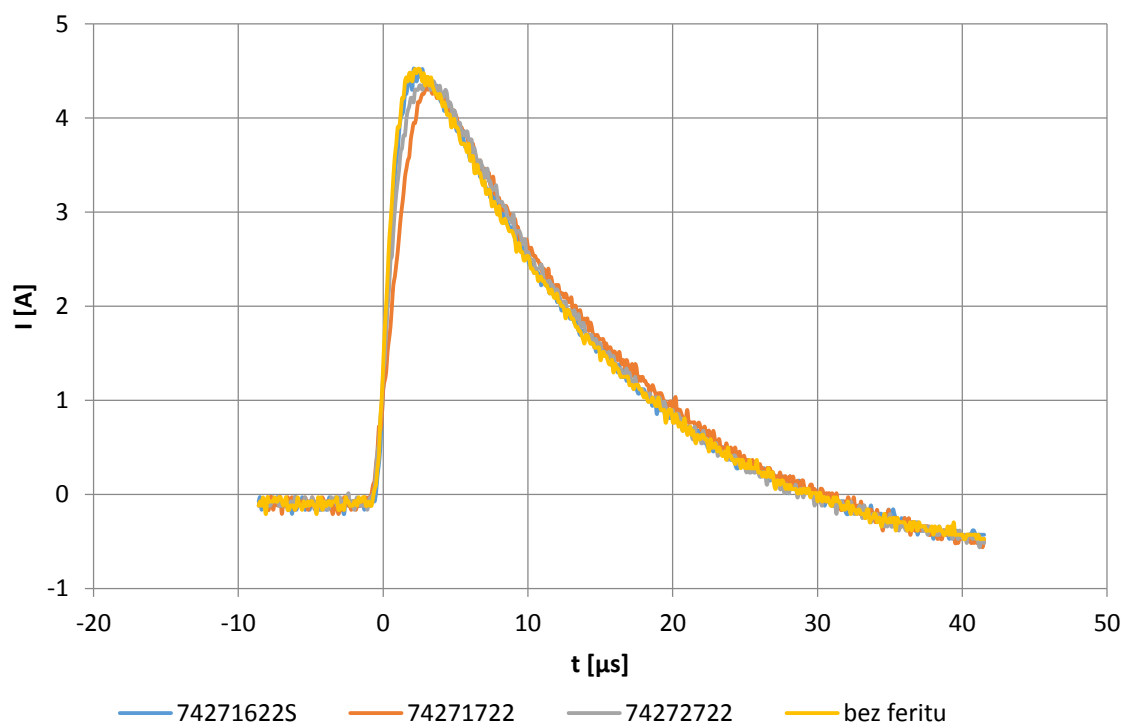
Burst signály jsou nízkenergetické širokopásmové impulsy. Jsou to impulsy s malou energií ve formě krátkých přechodových jevů vznikající obvykle vlivem indukčností při spínacích pochodech v napájecích či signálových sítích, vlivem odskakování kontaktů elektromechanických relé, případně při spínání vysokonapětových spínačů. Typickými vlastnostmi jsou krátká náběžná hrana, krátké trvání a celkově malá energie avšak vysoká četnost opakování. Tyto pulsy většinou nezpůsobí poškození zařízení, ale svým širokým frekvenčním rozsahem až do 200 MHz vyvolávají významné vysokofrekvenční rušení.[2] [9]

Tyto signály jsme opět generovali pomocí generátoru kombinované vlny, tentokrát jsme nastavili, aby generoval burst signály. Na generátoru jsme opět nastavili 200 V a do zařízení pouštěli impulsy o normované časové úrovni  $5 \text{ ns} \pm 30\%$ . Vazební kapacita generátoru byla 33 nF. Na osciloskopu jsme si nejdříve zobrazili skupinu pulsů, poté přiblížili jeden puls samostatně.

### 4.3 Průběhy rázových impulsů

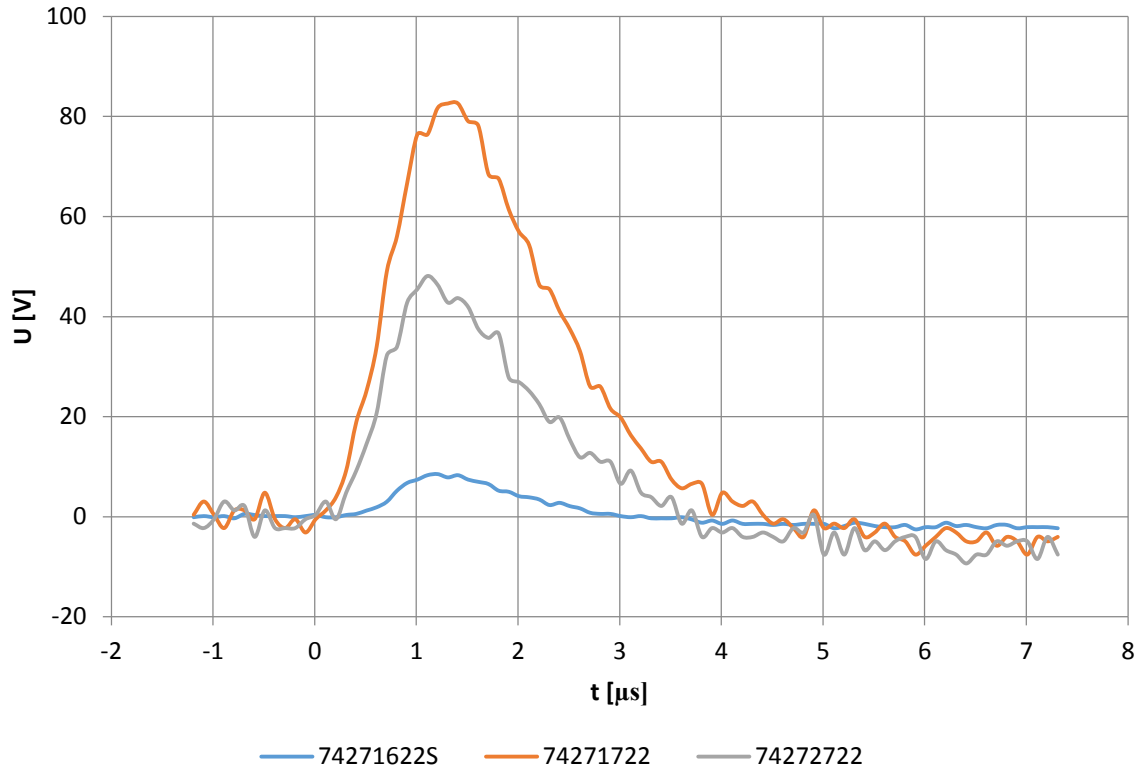


Obr.7. Ferity rázový impuls vazba 18  $\mu$ F + 2  $\Omega$ , 1 - průvlek feritem

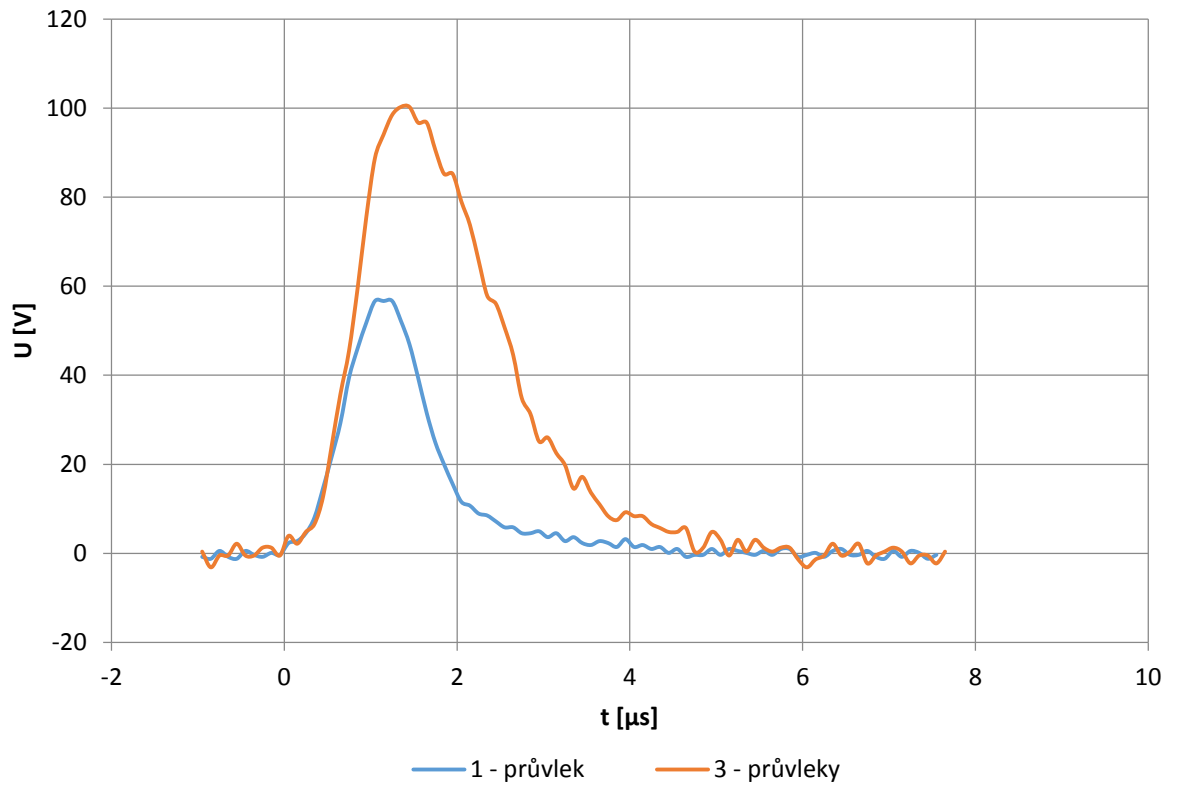


Obr.8. Ferity rázový impuls vazba 0,5  $\mu$ F + 42  $\Omega$  - 3 průvleky feritem

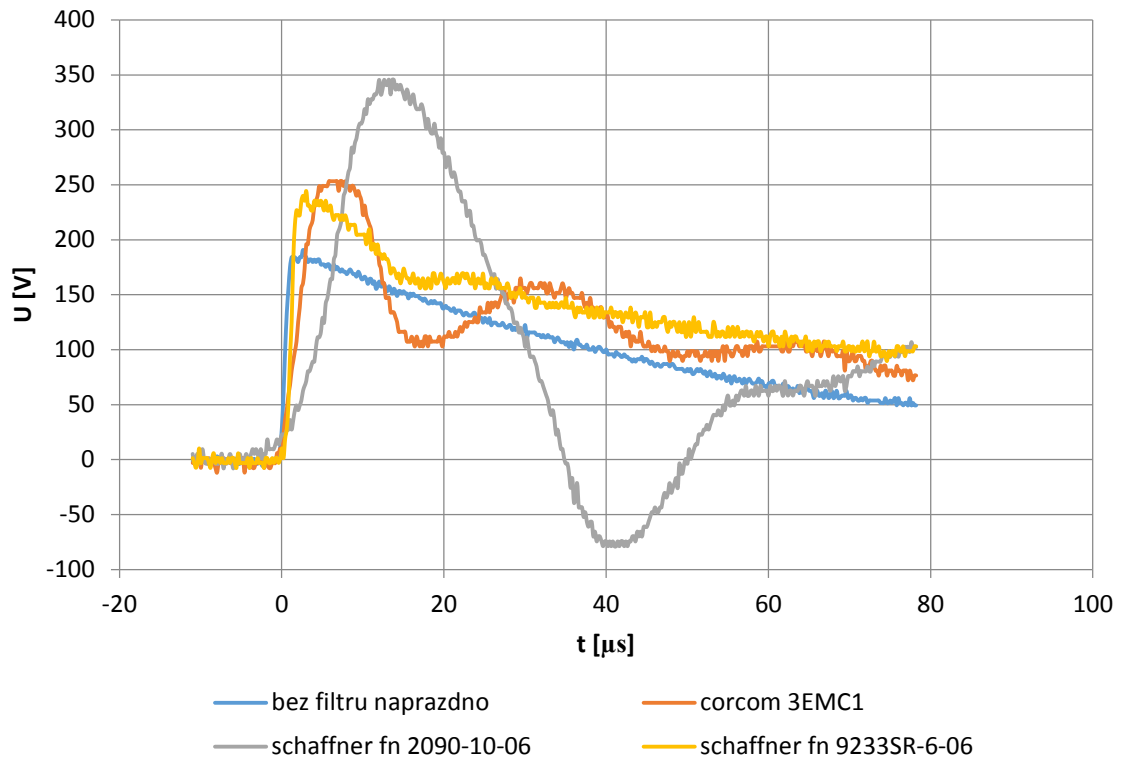




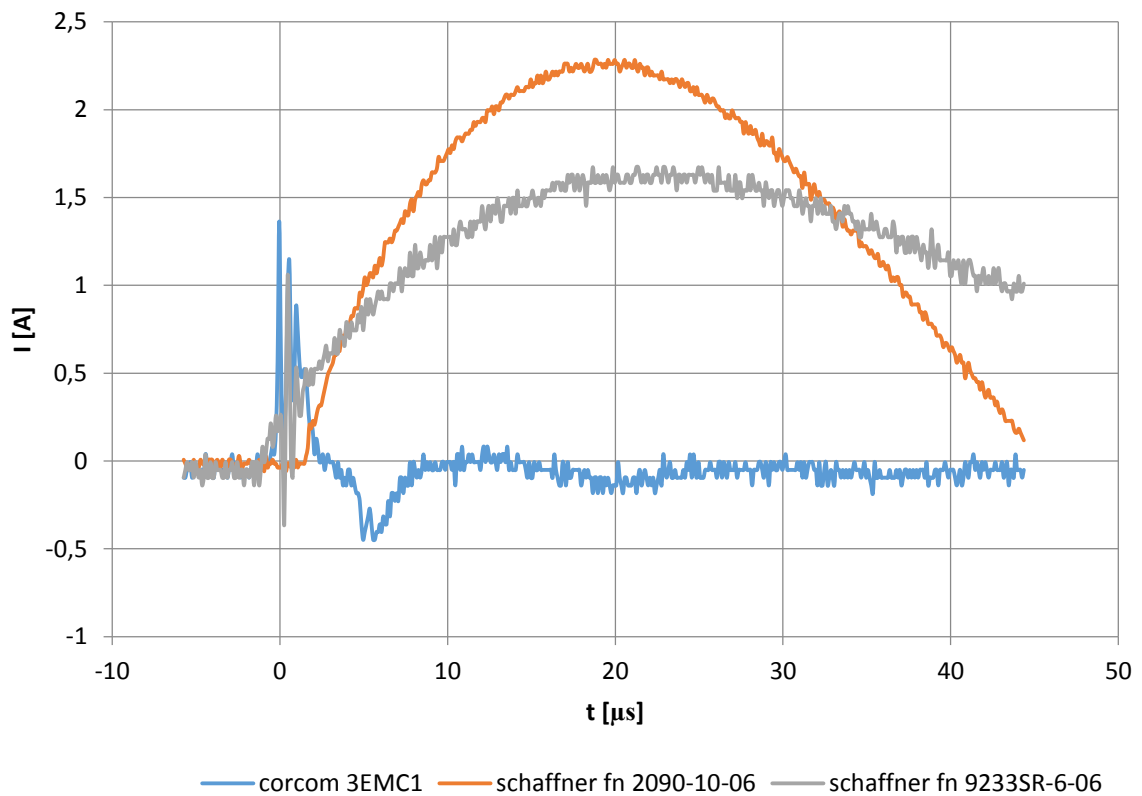
Obr. 9. Ferity rázový impuls, napětové špičky vazba  $0,5\mu\text{F} + 42\Omega$  - 3 průvleky feritem



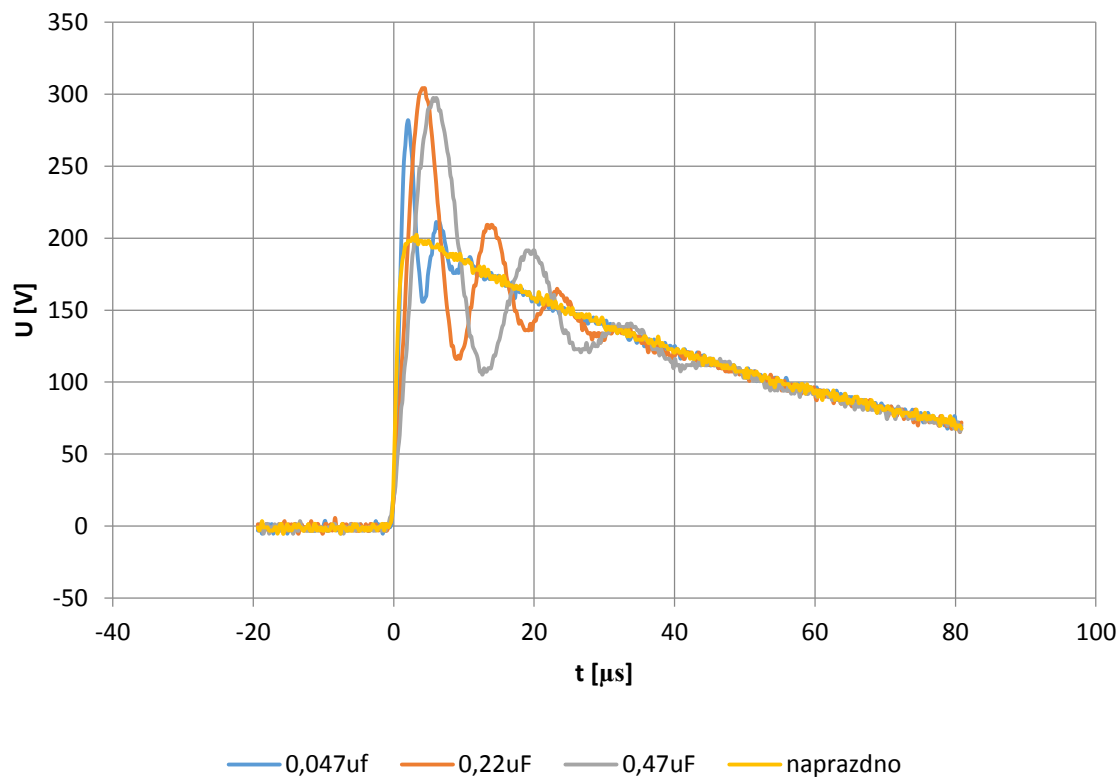
Obr.10. Ferit 74271722 rázový impuls, napětové špičky vazba  $18\mu\text{F} + 2\Omega$  - 3 průvleky feritem



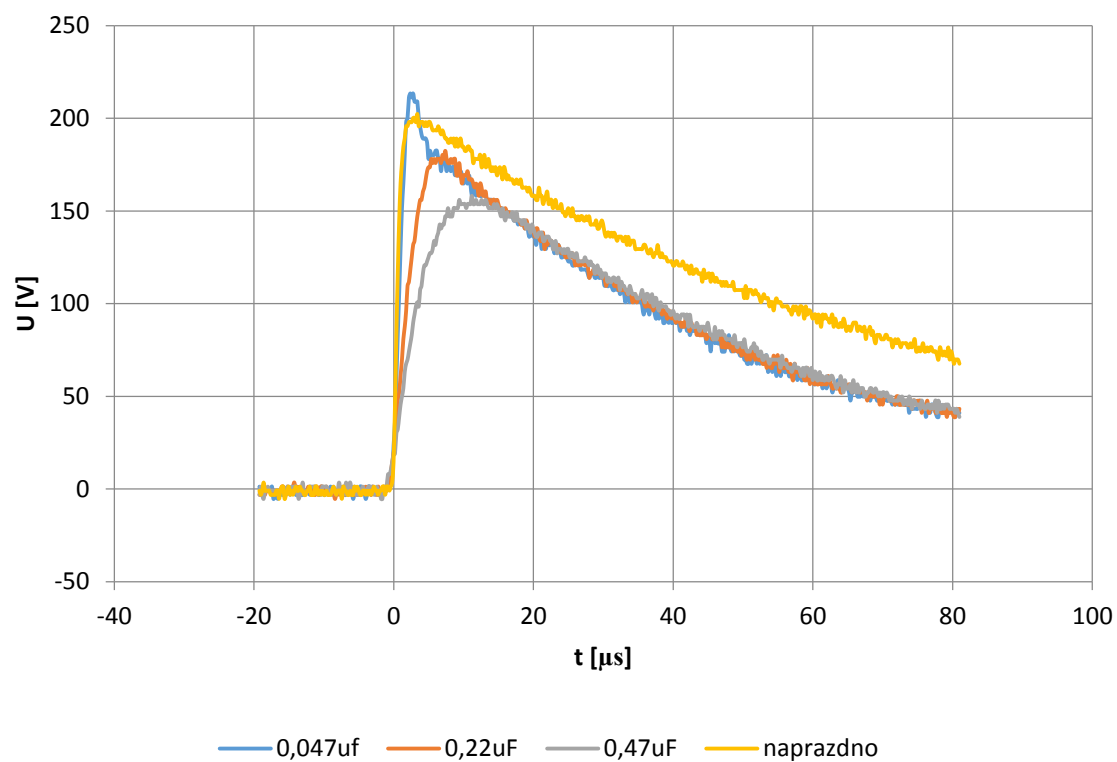
Obr.11 Filtry rázový impuls



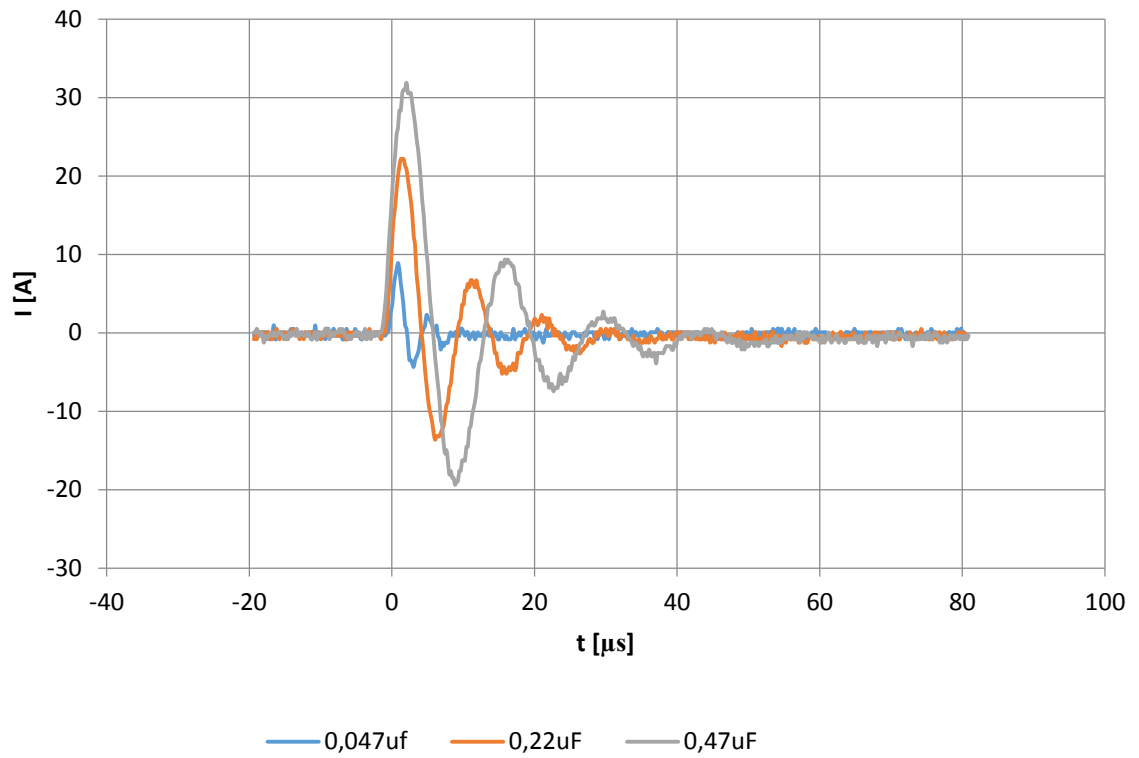
Obr.12 Filtry rázový impuls, svedený proud do země



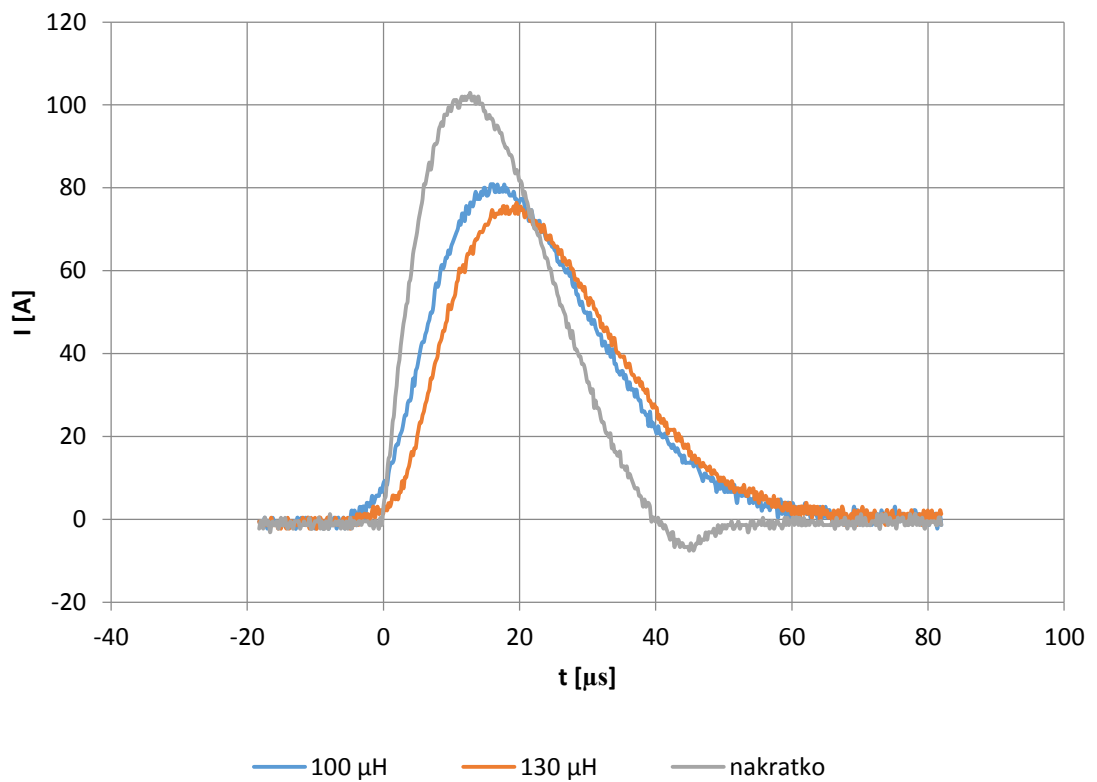
Obr.13. Kondenzátory rázový impuls vazba  $18 \mu F + 2 \Omega$



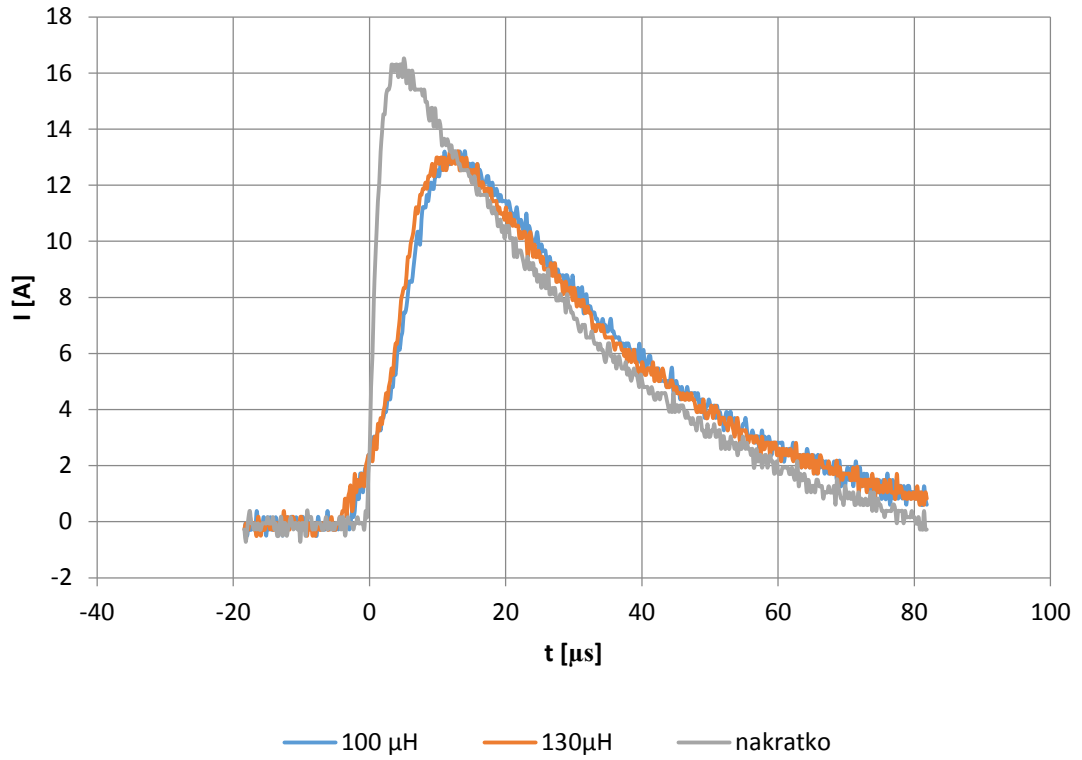
Obr.13. Kondenzátory rázový impuls vazba  $0,5 \mu F + 42 \Omega$



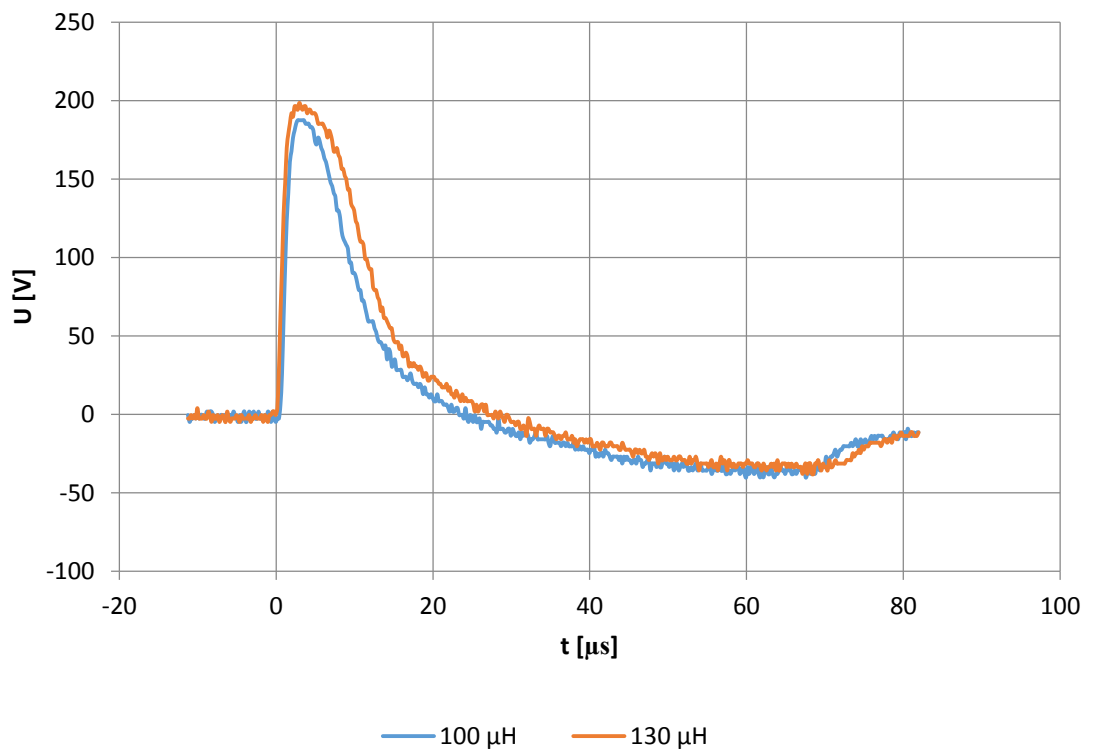
Obr.14. Kondenzátory rázový impuls, proud do země vazba  $18 \mu F + 2 \Omega$



Obr.15. Tlumivky rázový impuls, vazba generátoru  $18 \mu F + 2 \Omega$

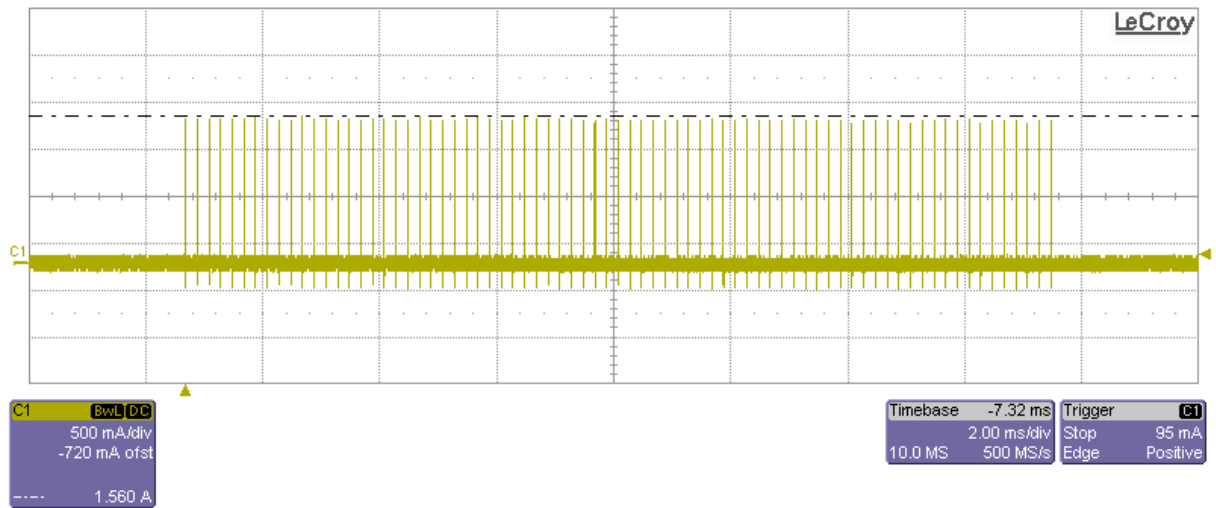


Obr.16. Tlumivky rázový impuls, vazba  $0,5\ \mu\text{F} + 42\ \Omega$

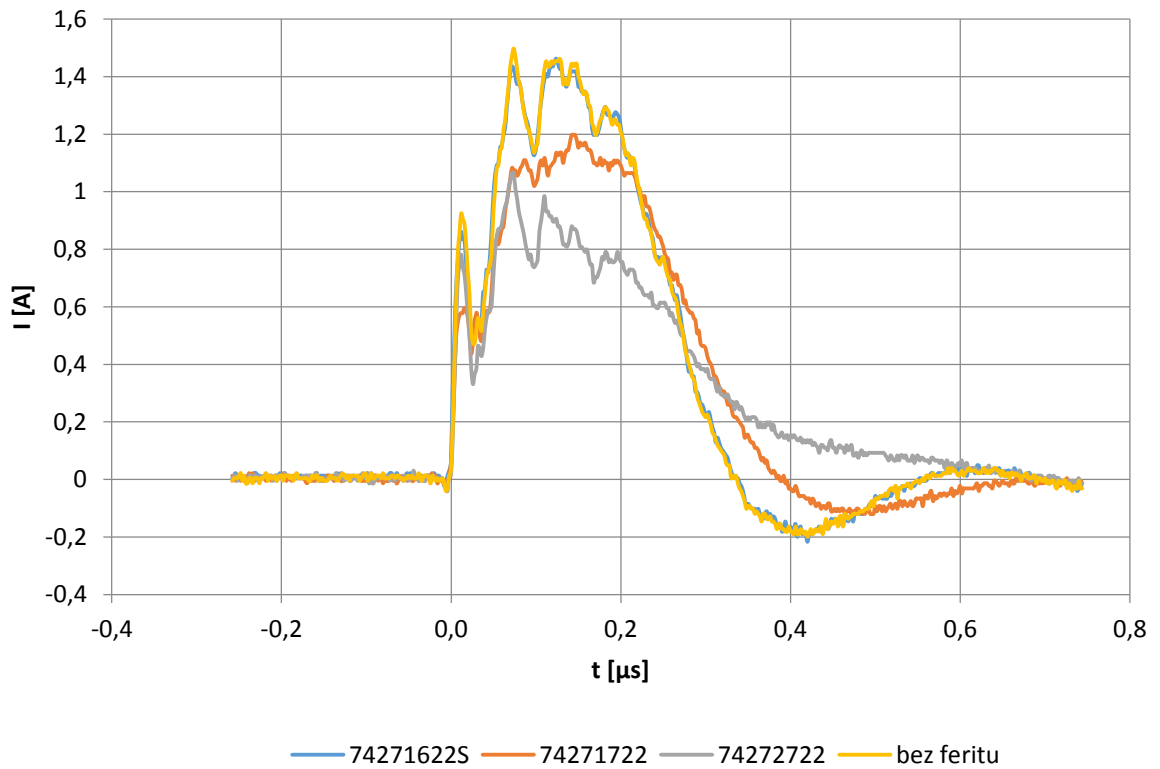


Obr.17. Tlumivky rázový impuls, špičky napětí vazba  $18\ \mu\text{F} + 2\ \Omega$

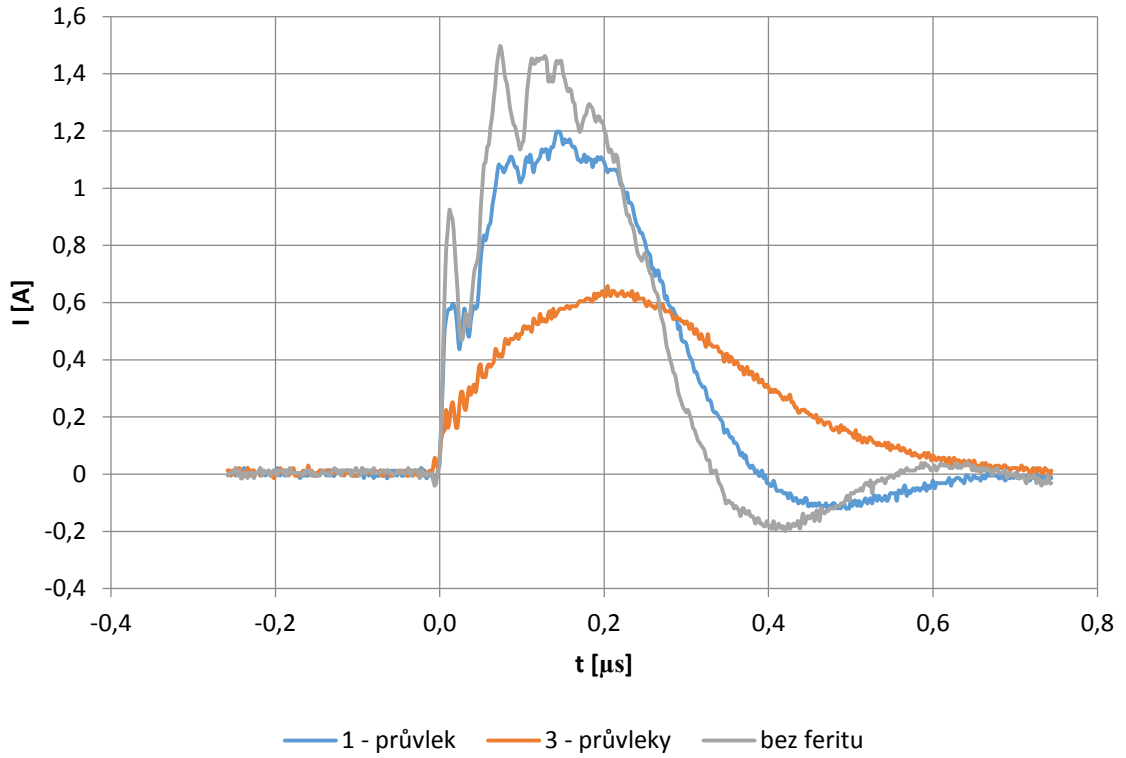
### 4.4 Průběhy burst signálů



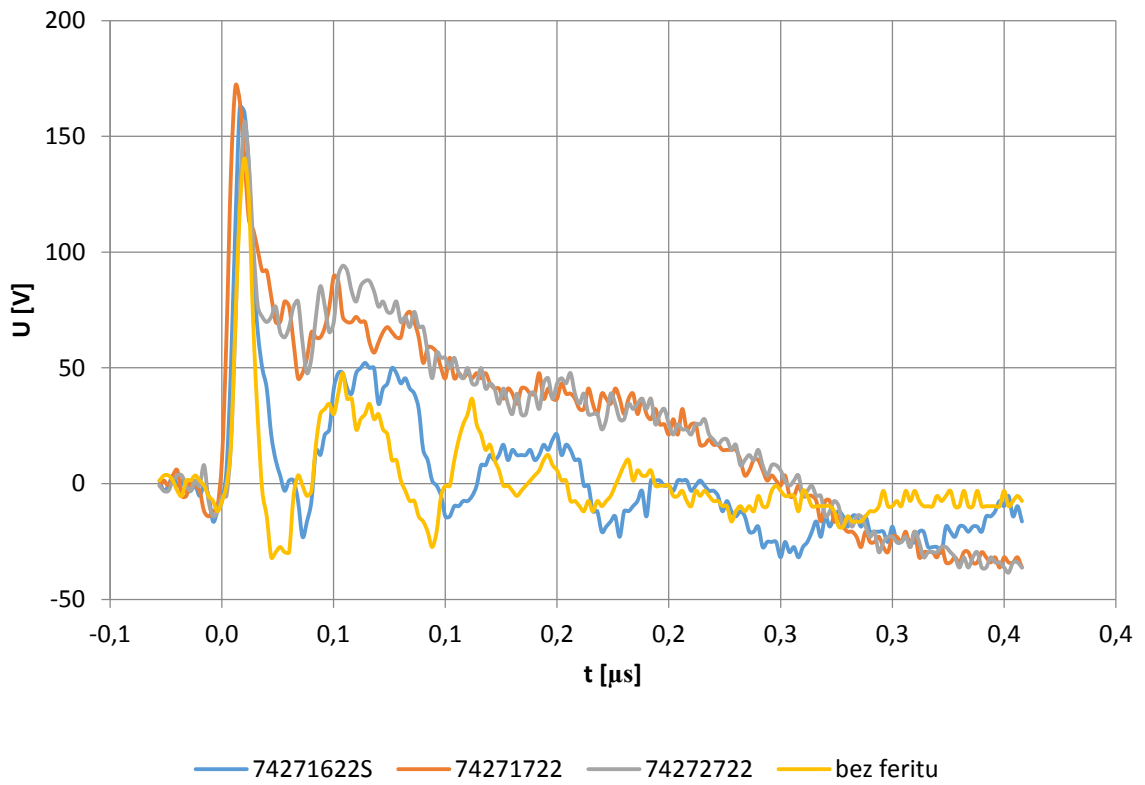
Obr.18. Burst signál, zobrazení skupiny impulsů



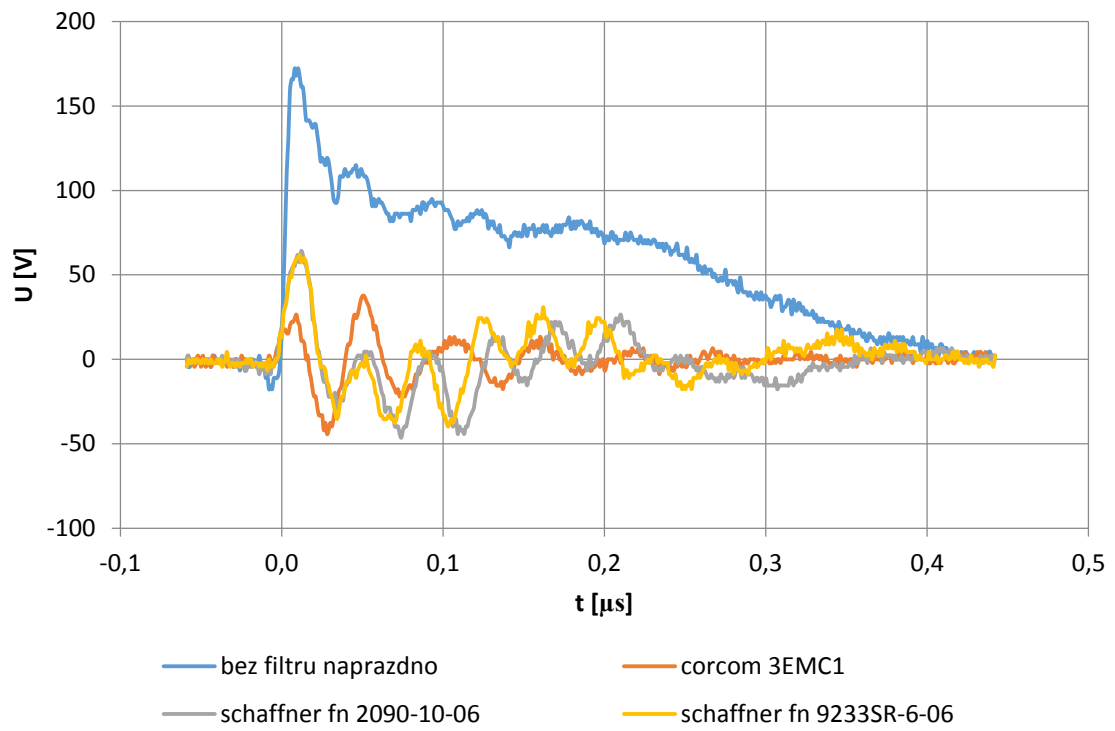
Obr. 19. Ferity jednotlivý burst signál - 1 průvlek feritem



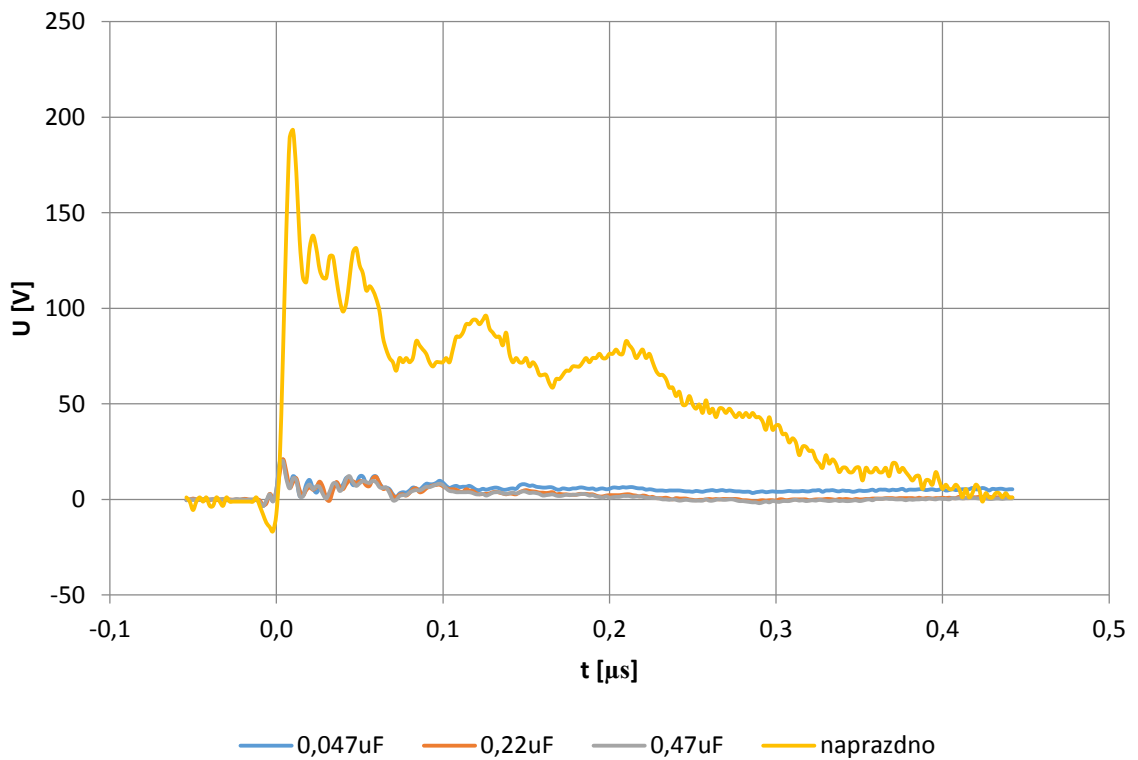
Obr. 20. Ferit 74271722 jednotlivý burst signál - 1 a 3 průvleky



Obr. 21. Ferity burst signál, napětové špičky

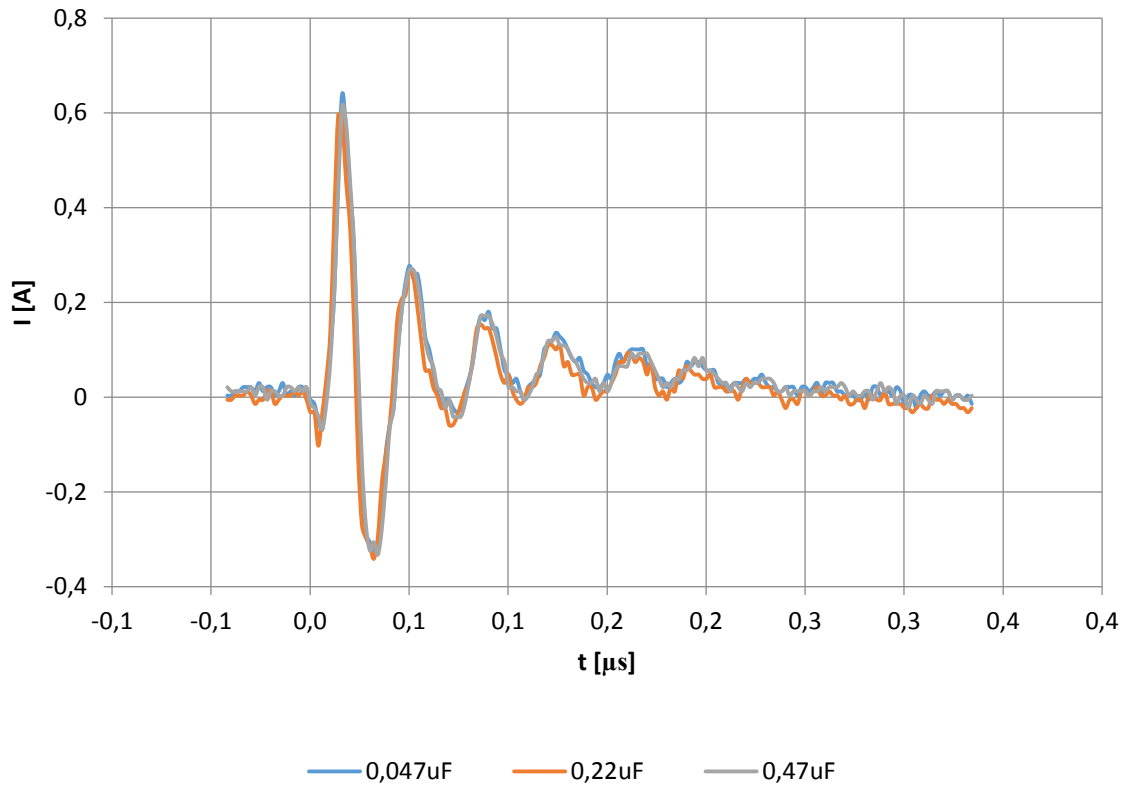


Obr. 22. Filtry jednotlivý burst signál

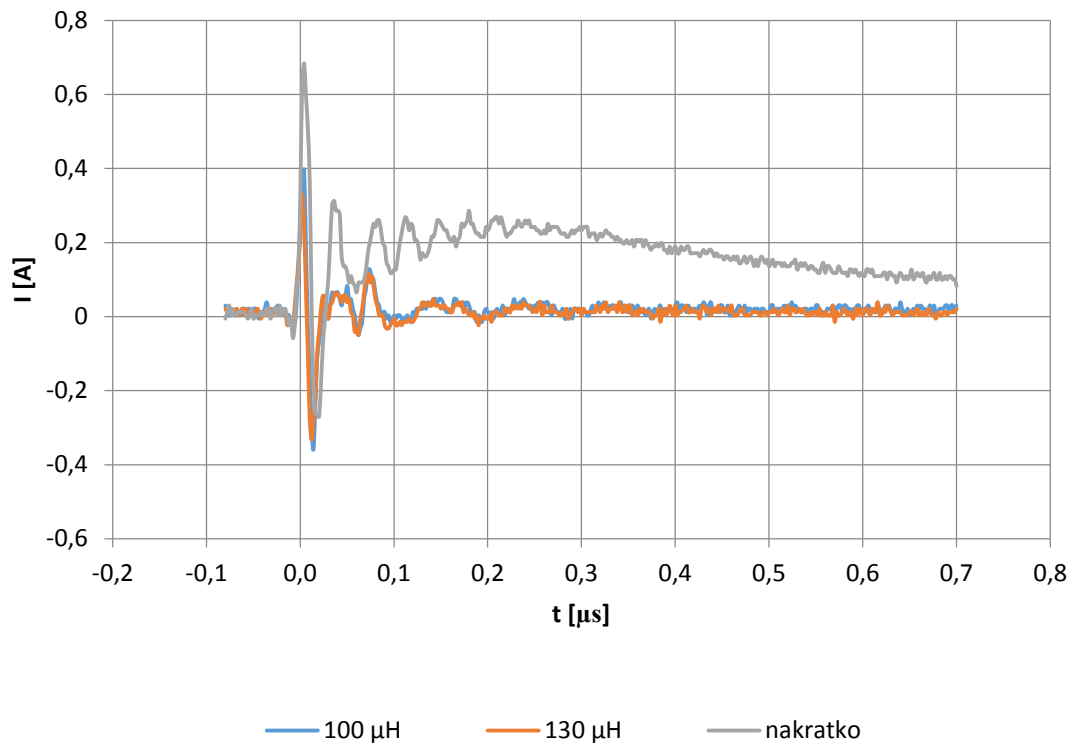


Obr. 23. Kondenzátory jednotlivý burst signál

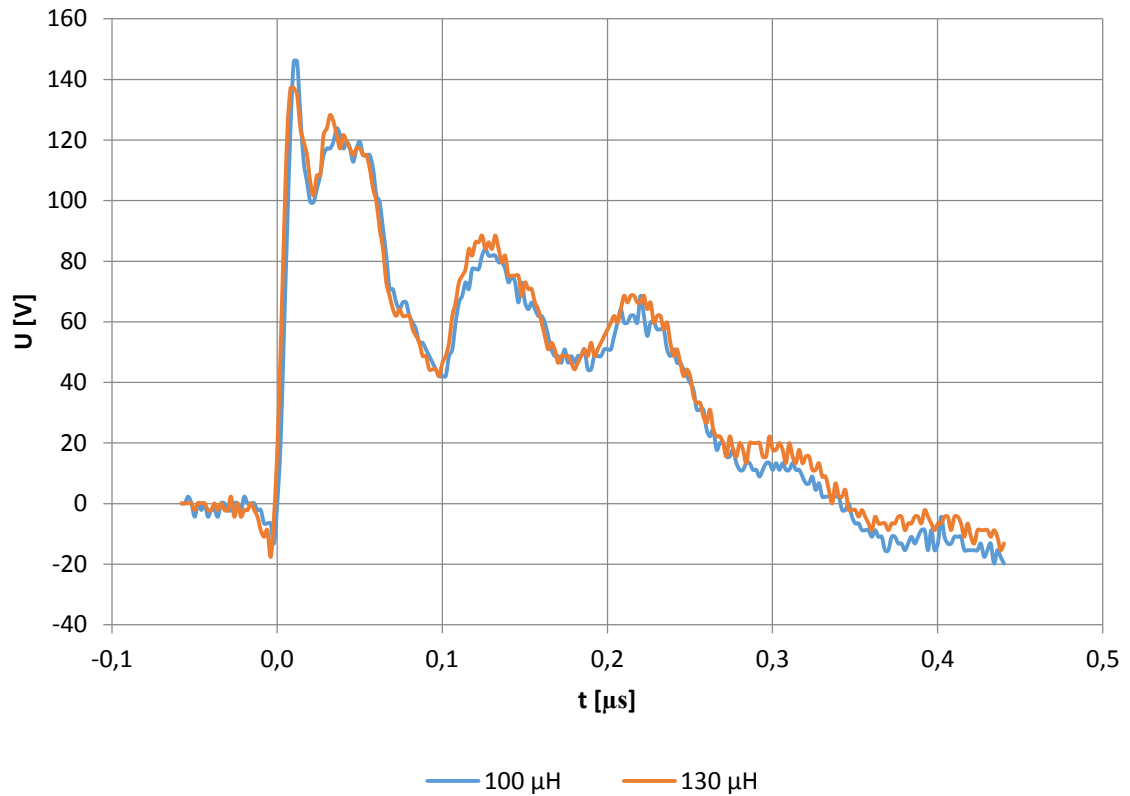




Obr. 24. Kondenzátory burst signál, proud do země



Obr. 25. Tlumivky jednotlivý burst signál



Obr. 26. Tlumivky busrt signál, napěťové špičky

## 4.5 Použité odrušovací prvky a jejich parametry

### Ferit 74271622S

Dělené feritové jádro Würth Elektronik 74271622S. Tato dělená feritová jádra slouží ke snížení elektromagnetického rušení, které je indukované nebo vyzařované z datových či napájecích kabelů. Nízké snížení impedance je zajištěno nízkou magnetickou saturací materiálu. Typickou aplikací pro tato dělená feritová jádra jsou vedení používaná v oblasti výpočetní techniky, terminály, průmyslové regulátory, zdravotnická technika a kancelářské přístroje. Tyto feritové kroužky jsou ideální pro vysokofrekvenční aplikace jako CAT5, sítě LAN. Jsou vhodné i pro problémy s EMI mezi 100 MHz až 2,5 GHz, a mohou snížit i rušení USB 2.0.[7]

### Ferit 74271722

Dělené feritové jádro Würth Elektronik 74271722.. Tyto feritové kroužky jsou vhodné pro potlačení elektromagnetického rušení v rozsahu frekvencí mezi 25 MHz až 100 MHz.[7]

### Ferit 74272722

Dělené feritové jádro Würth Elektronik 74272722. Materiál jádra je tvořen MnZn. Tyto feritové kroužky jsou vhodné pro potlačení elektromagnetického rušení v rozsahu nízkých frekvencí mezi 300 kHz až 30 MHz. Typickou aplikací je použití v rámci oboru

osvětlování. Například elektronické předřadníky neonových trubic.[7]

Ø kabelu (min.)	8.5 mm
Ø kabelu (max.)	12.5 mm
Rozměr, délka	35 mm
Rozměr, šířka	31.5 mm
Rozměr, výška	28.3 mm
Teplota (min.)	-25 °C
Teplota (max.)	100 °C
Váha	75 g

Tab.2. Technické parametry feritů

### **Odrušovací filtr Schaffner FN2090-10-06**

Filtr FN2090-10-06 je 1 fázový EMI filtr s velmi vysokým výkonem útlumu. Je určen pro rychlou a snadnou montáž. Poskytuje vysoký výkon útlumu, na základě tlumivky s vysoce propustným materiálem jádra a dobré tepelné vlastnosti. Filtr je určen pro aplikace s vysokým rušením, které potřebují vysoký výkon filtru.[8]

Typickými aplikacemi pro tento filtr jsou elektrické a elektronické zařízení, spotřební zboží, vybavení domácnosti, strojírenské aplikace, lékařské zařízení, elektronická zařízení pro zpracování dat, kancelářské přístroje a sdělovací technika.[8]

### **Odrušovací filtr schaffner FN 9233SR-6-06**

Filtr FN 9233SR-6-06: písmeno S v názvu filtru znamená, že se filtr připojuje přes snap-in konektor, písmeno R značí, že filtr obsahuje vybíjecí odpor zapojený paralelně ke kondenzátorům, jehož účelem je postupné vybití náboje, který zůstane na kondenzátorech po odpojení spotřebiče od zdroje napájení (od sítě) a tak zabránění případnému úrazu elektrickým proudem při manipulaci s vypnutým spotřebičem.[8]

Číslo 6 značí hodnotu jmenovitého proudu. Číslo 06 značí, že jde o konektor 6,3 x 0,8 mm.

Filtr FN 9233 kombinuje IEC vstup a síťový filtr s velkým útlumem filtru v malém provedení. Typickými aplikacemi pro tento filtr jsou přenosná elektrická a elektronická zařízení, malé až střední přístroje v domácnosti, testovací a měřicí zařízení, lékařské vybavení.[8]

### **Odrušovací filtr Corcom 3EMC1**

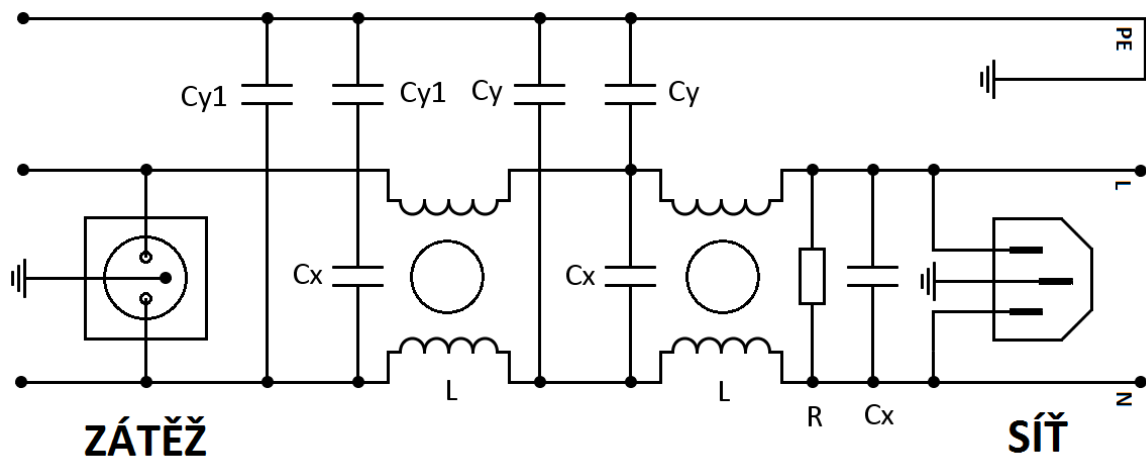
Filtr 3EMC1: číslo 3v názvu filtru označuje jmenovitý proud 3A, jedná se o EMC filtr určený pro elektromagnetickou kompatibilitu, číslo 1v názvu označuje, že se filtr se připojuje přes konektor 6,3. Filtr 3EMC1 je 1 fázový filtr s vysokou úrovní tlumení v dolním rozsahu

kmitočtů.[8]

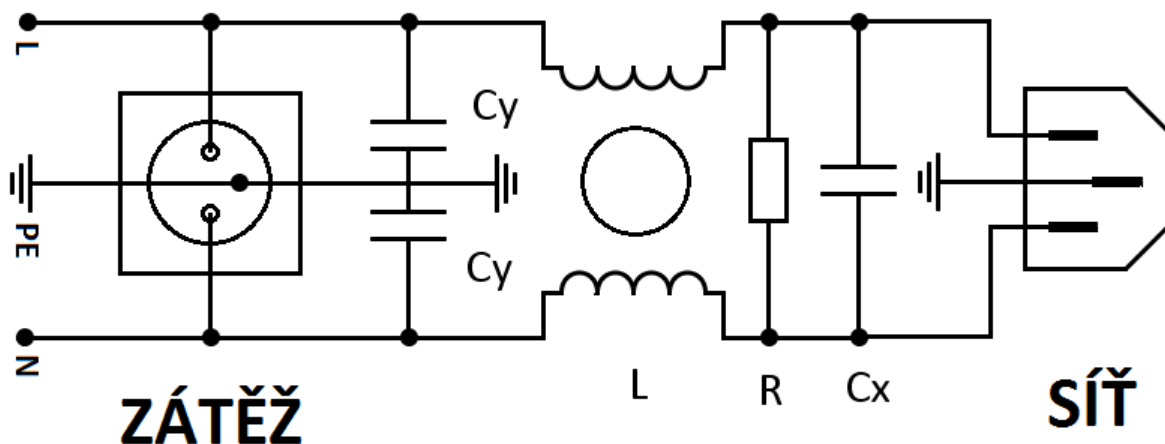
Typickými aplikacemi pro tento filtr je spotřební elektrotechnika, jednofázové průmyslové vybavení, měniče a spínané zdroje.[8]

Typ feritu	Schaffner FN2090	FN 9233SR	Corcom 3EMC1
Jmenovité napětí	250 V/AC	250 V/AC	250 V/AC
Jmenovitý proud	10 A	6 A	3 A
Zbytkový proud (max.)	0.67 mA	373 $\mu$ A	430 $\mu$ A
Vybíjecí odpor	330 k $\Omega$	1 M $\Omega$	680 k $\Omega$
Rozměr, délka	113.5 mm	29,9 mm	81,1 mm
Rozměr, šířka	57.5 mm	22,5 mm	46 mm
Rozměr, výška	45.4 mm	45.4 mm	29,5 mm
Teplota (min.)	-25 $^{\circ}$ C	-25 $^{\circ}$ C	-10 $^{\circ}$ C
Teplota (max.)	100 $^{\circ}$ C	85 $^{\circ}$ C	40 $^{\circ}$ C

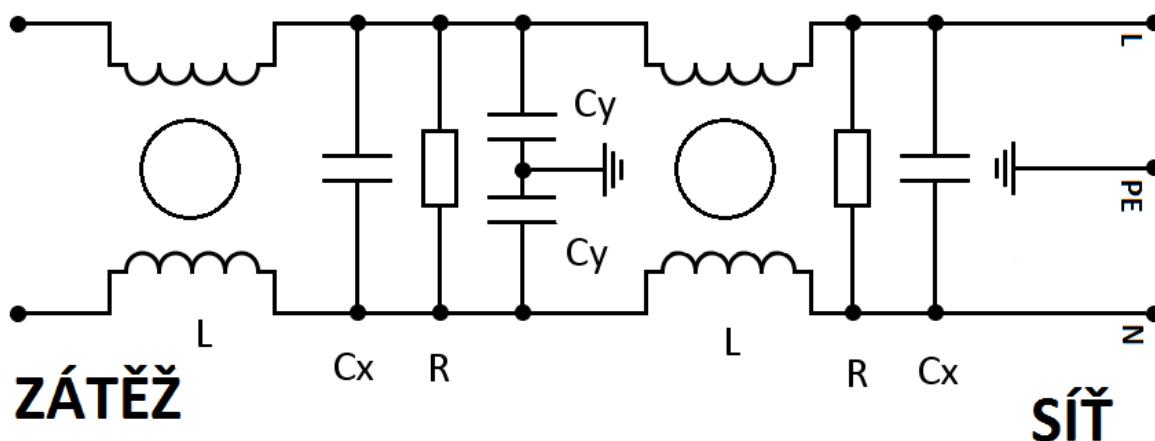
Tab.3. Technické parametry filtrů



Obr. 27. Schéma zapojení filtru Schaffner FN2090-10-06, hodnoty prvků  $C_x = 470$  nF,  $C_y = 3,3$  nF,  $C_{y1} = 1$  nF,  $L = 8$  mH,  $R = 330$  k $\Omega$



Obr. 28. Schéma zapojení filtru schaffner FN 9233SR-6-06, hodnoty prvků  $C_x = 100 \text{ nF}$ ,  $C_y = 2,2 \text{ nF}$ ,  $L = 1,6 \text{ mH}$ ,  $R = 1 \text{ M}\Omega$



Obr. 29. Schéma zapojení filtru Corcom 3EMC1, hodnoty prvků  $C_x = 680 \text{ nF}$ ,  $C_y = 2,8 \text{ nF}$ ,  $L = 0,78 \text{ mH}$ ,  $R = 680 \text{ k}\Omega$

#### Použité kondenzátory:

Typ kondenzátoru	WIMA Snubber capacitor	WIMA Snubber FKP	WIMA Snubber FKP
Hodnota kapacity	0,047 $\mu\text{F}$	0,022 $\mu\text{F}$	0,47 $\mu\text{F}$
Tolerance kapacity	10%	10%	10%
Jmenovité ss. napětí	4000 V	1000 V	1600 V
Jmenovité st. napětí	700 V	600 V	650 V
Rozměr, délka	17 mm	17 mm	31 mm
Rozměr, šířka	29 mm	29 mm	46 mm
Rozměr, výška	41,5 mm	41,5 mm	41,5 mm
Teplota (min.)	-55 $^{\circ}\text{C}$	-55 $^{\circ}\text{C}$	-55 $^{\circ}\text{C}$
Teplota (max.)	100 $^{\circ}\text{C}$	100 $^{\circ}\text{C}$	100 $^{\circ}\text{C}$
Izolační odpor	$1 \times 10^5 \text{ M}\Omega$	$1 \times 10^5 \text{ M}\Omega$	$1 \times 10^5 \text{ M}\Omega$

Tab.4. Technické parametry kondenzátorů

**Použité tlumivky:**

Typ tlumivky	WÜRTH ELEKTRIK 744 702 92	WÜRTH ELEKTRIK 744 707 0
Materiál	kompozitní železný prášek	kompozitní železný prášek
Indukčnost	130 $\mu$ H	100 $\mu$ H
Tolerance indukčnosti	20 %	20 %
Jmenovitý proud	2,9 A	6 A
Stejnoseměrný odpor	0,09 $\Omega$	0,035 $\Omega$
Průměr	17,5 mm	25 mm
Hloubka	13 mm	11 mm
Teplota (min.)	-40 °C	-40 °C
Teplota (max.)	105 °C	105 °C

Tab.5. Technické parametry tlumivek

## Závěr

V teoretické části práce jsou popsány základní pojmy v oblasti elektromagnetické kompatibility, rozdělení a typy elektromagnetického rušení. Dále vazební mechanismy přenosu rušivých signálů a odrušovací prostředky.

V části měření jsme měřili schopnost odrušovacích prvků odrušovat rušivé signály. Tyto prvky jsme testovali na rázový impuls a burst signály. V případě rázového impulsu jsme, zkoušeli více možných vazeb. Rázový impuls se nám nepodařil utlumit u feritů, kde neměl vliv ani počet průvleků feritem, u filtrů docházelo k překmitům, zřejmě vlivem indukčností filtru. U kondenzátorů docházelo také k překmitům, kromě vazby  $0,5 \mu\text{F} + 42\Omega$  kde jsme u dvou kondenzátorů dosáhli mírného utlumení. U tlumivek docházelo k utlumení při všech třech vazbách.

V případě burst signálu jsme dosáhli tlumení prakticky u všech odrušovacích zařízení, u feritů se projevil počet průvleků, kdy větší počet průvleků znamenal větší utlumení burst signálu.

## Seznam literatury a informačních zdrojů

- [1] Polina Vaculíková, Emil Vaculík a kolektiv, Elektromagnetická kompatibilita elektrotechnických systémů, Praha 1997.
- [2] Svačina, Jiří. Základy elektromagnetické kompatibility: přednášky. Vyd. 2. Brno: Vysoké učení technické, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav radioelektroniky, 2005.
- [3] [http://automa.cz/index.php?id\\_document=31272](http://automa.cz/index.php?id_document=31272)
- [4] EMC z hlediska teorie a aplikace, Dobroslav Kováč, Irena Kováčová, Ján Kaňuch, Praha 2006.
- [5] Kunzel, Karel a Žáček, Jaroslav. EMC v technické praxi II.: Rušivé signály, jejich zdroje a šíření.
- [6] PAUL, C. R. Introduction to Electromagnetic Compatibility. John Wiley, New York 1992.
- [7] Produktový katalog Würth Elektronik.  
Dostupné z [http://katalog.we-online.de/en/pbs/search/EMC\\_Components](http://katalog.we-online.de/en/pbs/search/EMC_Components)
- [8] <http://eu.mouser.com/schaffner>
- [9] ČSN EN 61000-4-4. Elektromagnetická kompatibilita – Část 4-4: Zkušební a měřicí technika – Rychlé elektrické přechodné jevy/skupiny impulzů – Zkouška odolnosti. CENELEC Evropský výbor pro normalizaci v elektrotechnice 2004.
- [10] ČSN EN 61000-4-5. Elektromagnetická kompatibilita – Část 4-5: Zkušební a měřicí technika – Rázový impuls – Zkouška odolnosti. Český normalizační institut Praha 1997



## Seznam obrázků

Obr.1. Základní řetězec přenosu EMC[2] .....	5
Obr.2. Druhy elektromagnetických vazeb a) galvanická, b) kapacitní, c) induktivní, .....	7
d) vyzařováním [2].....	7
Obr.3. Zapojení odrušovací tlumivky do vedení a kmitočtový průběh jejího vložného útlumu[2] .....	12
Obr.4. Náhradní schéma odrušovací tlumivky a frekvenční závislost velikosti její impedance [2] .....	12
Obr.5. Zapojení odrušovacího kondenzátoru do vedení a kmitočtový průběh jeho vložného útlumu[2] .....	16
Obr.6. Zapojení filtru v obvodu[2] .....	21
Obr.7. Zkušební signál vlny napětí naprázdno a rázové vlny proudu nakrátko a normované časové intervaly náběhu a poklesu vlny[2] .....	22
Obr.7. Ferity rázový impuls vazba $18 \mu\text{F} + 2\Omega$ , 1 - průvlek feritem .....	24
Obr.8. Ferity rázový impuls vazba $0,5 \mu\text{F} + 42 \Omega$ - 3 průvleky feritem .....	24
Obr. 9. Ferity rázový impuls, napěťové špičky vazba $0,5\mu\text{F} + 42\Omega$ - 3 průvleky feritem .....	25
Obr.10. Ferit 74271722 rázový impuls, napěťové špičky vazba $18 \mu\text{F} + 2\Omega$ - 3 průvleky feritem .....	25
Obr.11 Filtry rázový impuls.....	26
Obr.12 Filtry rázový impuls, svedený proud do země .....	26
Obr.13. Kondenzátory rázový impuls vazba $18 \mu\text{F} + 2\Omega$ .....	27
Obr.13. Kondenzátory rázový impuls vazba $0,5 \mu\text{F} + 42\Omega$ .....	27
Obr.14. Kondenzátory rázový impuls, proud do země vazba $18 \mu\text{F} + 2\Omega$ .....	28
Obr.15. Tlumivky rázový impuls, vazba generátoru $18 \mu\text{F} + 2\Omega$ .....	28
Obr.16. Tlumivky rázový impuls, vazba $0,5 \mu\text{F} + 42\Omega$ .....	29
Obr.17. Tlumivky rázový impuls, špičky napětí vazba $18 \mu\text{F} + 2\Omega$ .....	29
Obr.18. Burst signál, zobrazení skupiny impulsů .....	30
Obr. 19. Ferity jednotlivý burst signál - 1 průvlek feritem .....	30
Obr. 20. Ferit 74271722 jednotlivý burst signál - 1 a 3 průvleky .....	31
Obr. 21. Ferity burst signál, napěťové špičky .....	31
Obr. 22. Filtry jednotlivý burst signál.....	32
Obr. 23. Kondenzátory jednotlivý burst signál .....	32
Obr. 24. Kondenzátory burst signál, proud do země.....	33
Obr. 25. Tlumivky jednotlivý burst signál.....	33

Obr. 26. Tlumivky busrt signál, napěťové špičky.....	34
Obr. 27. Schéma zapojení filtru Schaffner FN2090-10-06, hodnoty prvků $C_x = 470 \text{ nF}$ , $C_y = 3,3 \text{ nF}$ , $C_{y1} = 1 \text{ nF}$ , $L = 8 \text{ mH}$ , $R = 330 \text{ k}\Omega$ .....	36
Obr. 28. Schéma zapojení filtru schaffner FN 9233SR-6-06, hodnoty prvků $C_x = 100 \text{ nF}$ , $C_y = 2,2 \text{ nF}$ , $L = 1,6 \text{ mH}$ , $R = 1 \text{ M}\Omega$ .....	37
Obr. 29. Schéma zapojení filtru Corcom 3EMC1, hodnoty prvků $C_x = 680 \text{ nF}$ , $C_y = 2,8 \text{ nF}$ , $L = 0,78 \text{ mH}$ , $R = 680 \text{ k}\Omega$ .....	37

## Seznam tabulek

Tab.1. Doporučené kapacity k odrušení v různých kmitočtových pásem[2] .....	17
Tab.2. Technické parametry feritů.....	35
Tab.3. Technické parametry filtrů .....	36
Tab.4. Technické parametry kondenzátorů.....	37
Tab.5. Technické parametry tlumivek .....	38