

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

KATEDRA ELEKTROENERGETIKY

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Možnosti omezení přepět'ových impulzů

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta elektrotechnická
Akademický rok: 2020/2021

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

Jméno a příjmení: **Bc. Vít KUBIŠ**
Osobní číslo: **E19N0033P**
Studijní program: **N2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor: **Elektroenergetika**
Téma práce: **Možnosti omezení přepětových impulzů**
Zadávací katedra: **Katedra elektroenergetiky**

Zásady pro vypracování

1. Popište způsoby vzniku a šíření přepětových impulzů.
2. Popište zařízení omezující přepětové impulzy.
3. Sledujte odezvu těchto zařízení při aplikaci impulzů.
4. Zhodnoťte použitelnost otestovaných odrušovacích prvků.

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

Seznam doporučené literatury:

1. 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: **9. října 2020**
Termín odevzdání diplomové práce: **27. května 2021**



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



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

V Plzni dne 9. října 2020

Abstrakt

Předkládaná diplomová práce je zaměřena na vznik přepětových impulzů v síti a jejich omezení. Teoretická část se nejprve zabývá elektromagnetickou kompatibilitou, dále jsou uvedeny typy rušivých signálů, jejich vazební mechanismy a také přepětové ochrany, které slouží k omezení přepětových impulzů. V závěru teoretické části jsou popsány zkušební metody, kterými se ověřují funkce přepětových ochran. V praktické části jsou těmito metodami otestovány vybrané ochrany.

Klíčová slova

Přepětí, elektromagnetická kompatibilita, přepětová ochrana, impulz

Abstract

The presented diploma thesis is focused on the origin of overvoltage pulses in the electric network and their limitations. The theoretical part first deals with electromagnetic compatibility, then there are types of interfering signals, their coupling mechanisms and overvoltage protections, which are used to limit overvoltage pulses. At the end of the theoretical part, test methods are described, which verify the functions of surge protectors. In the practical part, selected methods are tested by these methods.

Key words

Overvoltage, electromagnetic compatibility, surge protection, impulse

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 26.5.2021

Vít Kubiš

Poděkování

V úvodu této práce bych rád poděkoval Ing. Miroslavu Hromádkovi, Ph.D. za cenné rady poskytnuté v rámci konzultací, připomínky a návrhy k úpravě a formě zpracování textu a v neposlední řadě také za spolupráci při měření praktické části diplomové práce.

Obsah

ÚVOD	9
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK	10
1 ELEKTROMAGNETICKÁ KOMPATIBILITA.....	11
1.1 EMC BIOLOGICKÝCH SYSTÉMŮ	11
1.2 EMC TECHNICKÝCH SYSTÉMŮ A ZAŘÍZENÍ	11
1.3 ZÁKLADNÍ POJMY EMC	13
2 RUŠIVÉ SIGNÁLY A JEJICH ZDROJE.....	15
2.1 ZDROJE NAPĚŤOVÉHO PŘEPĚTÍ	16
2.1.1 Atmosférická přepětí.....	16
2.1.2 Spínací přepětí.....	18
2.1.3 Přepětí vzniklá při výbojích statické elektřiny	19
2.1.4 Přepětí způsobená nukleárními výbuchy	19
3 VAZEBNÍ MECHANISMY	20
3.1 GALVANICKÁ VAZBA	20
3.2 KAPACITNÍ VAZBA	22
3.2.1 Kapacitní vazba galvanicky oddělených obvodů	22
3.2.2 Kapacitní vazba mezi obvody se společným vodičem	22
3.2.3 Kapacitní vazba vůči zemi	23
3.3 INDUKTIVNÍ VAZBA	24
3.4 VAZBA VYZAŘOVÁNÍM.....	24
4 OCHRANA PROTI PŘEPĚTÍ.....	26
4.1 SVODIČE PŘEPĚTÍ	26
4.1.1 Ochranná jiskřiště	26
4.1.2 Růžkové bleskojistky	27
4.1.3 Vyfukovací bleskojistky.....	27
4.1.4 Ventilové bleskojistky	28
4.1.5 Omezovače přepětí ZnO	30
4.2 KOORDINACE IZOLACE	31
4.3 NOVÉ TRENDY	32
5 ZKOUŠKY IMPULZNÍM NAPĚTÍM	33
5.1 RÁZOVÝ IMPULZ.....	33
5.2 BURST SIGNÁL.....	36
5.3 ELEKTROSTATICKÝ VÝBOJ	37
6 PRAKTICKÁ ČÁST	37
6.1 MĚŘENÉ OCHRANY.....	38
6.2 SURGE TEST.....	38
6.3 BURST TEST.....	41
6.4 ESD TEST	43
ZÁVĚR.....	47
SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ.....	49
PŘÍLOHA A: TABULKY	1
PŘÍLOHA B: GRAFY	1

Úvod

Přepětí je nežádoucí jev, který se náhodně vyskytuje ve všech elektrizačních soustavách. Vzniká například úderem blesku do vedení (atmosférické přepětí), ale také při zemním spojení, zkratu, nebo při spínání kapacitních a induktivních proudů (spínací přepětí). Jakýkoliv typ přepětí může způsobit vážné poškození částí elektrizační soustavy, s vysokými náklady na opravu. S rozvojem elektroniky v posledních letech se tento problém stává ještě výraznějším, neboť polovodičové součástky jsou obzvláště náchylné na přepětí. Proto je nutné vzniku přepětí zamezit nebo jej alespoň omezit na přípustnou mez. K tomu slouží přepětové ochrany, které se vyskytují ve všech napětových hladinách a svou funkcí zajišťují spolehlivý a bezpečný provoz soustavy. Přepětových ochran je celá řada a liší se svými vlastnostmi a použitím.

Cílem této práce bude popsat a vysvětlit vznik rušivých přepětových signálů vyskytujících se v energetické soustavě, jejich vazebních mechanismů a uvést přehled ochranných zařízení s vysvětlením principu jejich činnosti. V praktické části práce budou ověřeny reakce přepětových ochran na různé typy impulzních signálů, vyhodnoceno jejich působení a doporučeno jejich použití proti impulzním signálům.

Seznam symbolů a zkratek

f (Hz)	frekvence
I_{peak} (A).....	hodnota maximálního špičkového proudu
I_{pp} (A).....	maximální provozní proud
U_{r} (V).....	rušivé napětí
U_{z} (V).....	rušivé zemní napětí
E ($\text{N}\cdot\text{C}^{-1}$).....	intenzita elektrického pole
SiC	karbid křemíku
ZnO.....	oxid zinečnatý
GSM	globální systém pro mobilní komunikaci (Groupe Spécial Mobile)
LCD	displej z tekutých krystalů (Liquid Crystal Display)
ČSN	česká technická norma
EN.....	evropská norma
IEC.....	mezinárodní elektrotechnická komise (International Electrotechnical Commission)

1 Elektromagnetická kompatibilita

Elektromagnetická kompatibilita (z angl. „Electromagnetic Compatibility“ – EMC) je definována jako schopnost zařízení, systému či přístroje vykazovat správnou činnost i v prostředí, v němž působí jiné zdroje elektromagnetických signálů (přírodní či umělé), a naopak svou vlastní „elektromagnetickou činností“ nepřipustně neovlivňovat své okolí, tj. nevyzařovat signály, jež by byly rušivé pro jiná zařízení.

Elektromagnetická kompatibilita vznikla jako samostatná vědecko-technická disciplína v šedesátých letech 20. století v USA a poměrně dlouhou dobu 10 až 15 let byla předmětem zájmu jen úzkého okruhu odborníků v elektronice, pracujících ve vojenském a kosmickém průmyslu. S prudkým rozvojem elektroniky, zejména mikroprocesorové a komunikační techniky v posledních desetiletích a jejím pronikáním do všech oblastí každodenního života ztratila EMC svoji exkluzivnost a stále více se dotýká nás všech.[1]

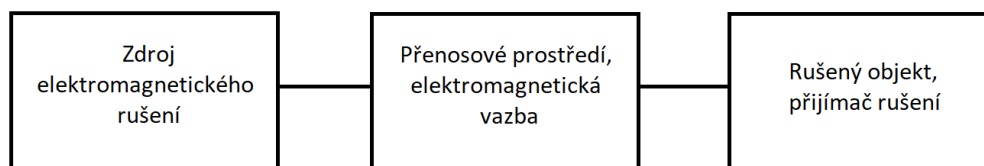
Problematiku elektromagnetické kompatibility můžeme zkoumat z hlediska EMC biologických systémů a z hlediska EMC technických systémů a zařízení.

1.1 EMC biologických systémů

Zabývá se vlivem užitečných i rušivých elektromagnetických signálů na životní prostředí. Díky tomu, že biologické účinky elektromagnetických polí závisí na jejich charakteru, době působení i na vlastnostech živých organismů, je velmi obtížné provést analýzy vlivů a dopadů na živé organismy a následně zobecnit platné závěry.[2]

1.2 EMC technických systémů a zařízení

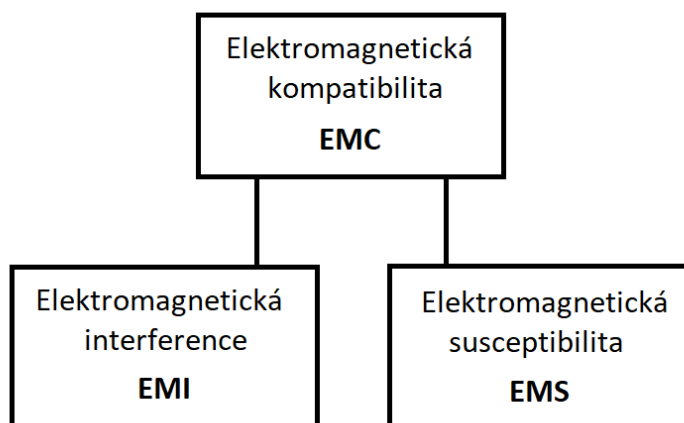
Elektromagnetická kompatibilita technických systémů a zařízení se zabývá vzájemným působením a koexistencí technických prostředků, zejména elektrotechnických a elektronických přístrojů a zařízení. Při zkoumání EMC daného zařízení či systému (jak technického, tak biologického) se vychází z tzv. základního řetězce uvedeného na *Obr. 1*. Tento řetězec zdůrazňuje již zmíněný systémový charakter EMC a v obecném případě vždy vyšetřujeme všechny tři jeho složky.[1]



Obr. 1 Základní řetězec EMC a příklady jednotlivých oblastí

Pro identifikaci zdroje rušení je důležitý nejen samotný mechanismus vzniku rušení, ale také jeho charakter a intenzita. Patří sem jednak tzv. přírodní (přirozené) zdroje rušivých signálů (Slunce, kosmos, elektrické procesy v atmosféře apod.), jednak tzv. umělé zdroje rušení, tj. zdroje vytvořené lidskou činností („man made noise“), k nimž patří nejrůznější technická zařízení – zapalovací systémy, elektrické motory, výroba, přenos a distribuce elektrické energie, elektronická zařízení, elektronické sdělovací prostředky, tepelné a světelné spotřebiče apod. Druhá část řetězce EMC se zabývá elektromagnetickým přenosovým prostředím a vazbami, tj. způsoby a cestami, kterými se energie ze zdroje dostává do objektů – přijímačů rušení. Třetí část se zabývá problematikou objektu či přijímačů rušení, klasifikací typů a podrobnou specifikací rušivých účinků na základě analýzy konstrukčních a technologických parametrů zařízení a z toho plynoucí jejich elektromagnetickou odolností.[1][3]

Problematiku EMC můžeme rozdělit do dvou základních skupin. Jedná se o elektromagnetickou interferenci a elektromagnetickou susceptibilitu. Elektromagnetická interference (z angl. „Electromagnetic Interference“ – EMI) neboli elektromagnetické rušení je proces, při kterém se signál generovaný zdrojem rušení přenáší prostřednictvím elektromagnetické vazby do rušených systémů. EMI se tedy zabývá příčinami rušení a jejich odstraňováním. Elektromagnetická susceptibilita (z angl. „Electromagnetic Susceptibility“ – EMS) neboli elektromagnetická odolnost vyjadřuje schopnost zařízení či systému pracovat bez poruch nebo s přesně definovaným přípustným vlivem v prostředí, v němž se vyskytuje elektromagnetické rušení. EMS se tedy zabývá odstraňováním důsledků rušení, bez odstraňování jejich příčin.[2]



Obr. 2 Základní dělení problematiky EMC

1.3 Základní pojmy EMC

Definice a základní pojmy použité v této kapitole jsou převzaty z mezinárodního elektrotechnického slovníku, kapitola 161: Elektromagnetická kompatibilita, norma ČSN IEC 50 (161).

Elektromagnetické rušení – jakýkoliv elektromagnetický jev, který může zhoršit činnost přístroje, zařízení nebo systému, případně nepříznivě ovlivnit živou nebo neživou hmotu. (Může se jednat o elektromagnetický šum, nežádoucí signál nebo změnu v přenosovém prostředí.)

Elektromagnetické vyzařování – jev, při němž elektromagnetická energie vychází ze zdroje.

Odolnost (proti rušení) – schopnost přístroje, zařízení nebo systému být v provozu bez zhoršení charakteristik za přítomnosti elektromagnetického rušení.

Úroveň vyzařování – úroveň elektromagnetického rušení vyzařovaného konkrétním přístrojem, zařízením nebo systémem, měřená určeným způsobem.

Mez vyzařování – maximální dovolená úroveň vyzařování.

Úroveň odolnosti – maximální úroveň elektromagnetického rušení působícího na konkrétní přístroj, zařízení nebo systém, při kterém se nevyskytuje zhoršení provozu.

Mez odolnosti – nejnižší požadovaná úroveň odolnosti.

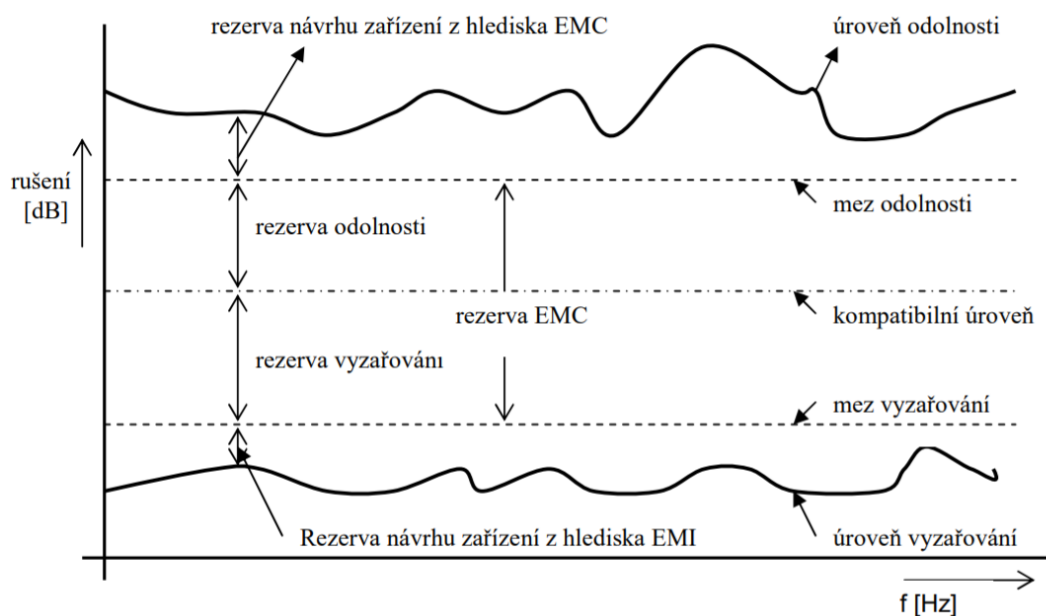
Kompatibilní úroveň – předepsaná úroveň rušení, při které by měla být přijatelně vysoká pravděpodobnost elektromagnetické kompatibility.

Rezerva vyzařování – poměr úrovně elektromagnetické kompatibility a meze vyzařování.

Rezerva odolnosti – poměr meze odolnosti a úrovně elektromagnetické kompatibility.

Rezerva kompatibility – poměr meze odolnosti a meze vyzařování. (Rezerva kompatibility je součinem rezervy odolnosti a rezervy vyzařování.)

Potlačení rušení – opatření, které zmenšuje nebo odstraňuje elektromagnetické rušení.



Obr. 3 Definice úrovní a mezí vyzařování a odolnosti [1]

2 Rušivé signály a jejich zdroje

Elektromagnetickou odolnost systému můžeme rozdělit na vnější a vnitřní. Vnitřní odolnost systému určuje schopnost odolat rušivým zdrojům nacházejících se uvnitř zařízení, zatímco vnější odolnost určuje odolnost systému vůči externím vlivům působících na zařízení. Rozdělení na vnitřní a vnější zdroje rušení se v těchto definicích těžko určuje a závisí na vymezení zkoumaného systému. Často užívanou klasifikací umělých rušivých signálů je jejich rozdělení do tří základních skupin:

Šum – rušivý signál, který ovlivňuje především tvar užitečného signálu, což může být například napájecí napětí. Jde o náhodný signál provázející činnosti elektrických a elektronických součástí a obvodů.

Impulzy – rušivé signály, které mají impulzní charakter s velkým poměrem velikosti impulzů k době jejich trvání. Tyto pulzy se jako kladné či záporné „špičky“ superponují na signál, který je pro nás užitečný. Pulzy mohou vznikat zejména spínacími pochody, které vznikají při kontaktním spínání elektrických či energetických obvodů a soustav.

Přechodné jevy – náhodné jednorázové rušivé signály, které mají obvyklou dobu trvání od několika ms až do několika sekund. Typické příčiny vzniku přechodných jevů jsou náhlé změny zatížení rozvodné energetické sítě při zapínání a vypínání velkých výkonů.[1]

S časovým průběhem rušivého signálu je svázáno i spektrum tohoto signálu s jeho nejvýznamnějšími kmitočtovými složkami, které jsou často označovány jako špičky. Tyto údaje jsou důležité zejména pro volbu vhodných prostředků na potlačení rušivých signálů. Úzkopásmové rušení představují zejména „užitečné“ signály rozhlasových a televizních vysílačů, naopak charakter širokopásmového rušení má většina tzv. průmyslových rušivých signálů, ať již mají časový průběh spojitý, impulzní či kvazi-impulzní. Rovněž všechna přírodní rušení jsou svou podstatou širokopásmová.[4]

Rušení lze dále dělit z hlediska obsazení kmitočtového spektra a fyzikálního působení na nízkofrekvenční a vysokofrekvenční. Nízkofrekvenční rušení se projevuje dvěma způsoby. Energetické nízkofrekvenční rušení působí na napájecí energetickou soustavu v kmitočtovém pásmu 0 – 2 kHz. Způsobuje zejména deformaci napájecího napětí a odebíraného proudu energetických sítí. Akustické nízkofrekvenční rušení působí v kmitočtovém pásmu

do 10 kHz. Toto rušení negativně ovlivňuje funkci přenosových informačních systémů. Vysokofrekvenční neboli rádiové rušení působí v pásmu od 10 kHz, kde se projevují negativní vlivy na funkci přenosových informačních systémů, jako jsou telefony, rozhlas, řídicí a měřicí zařízení, komunikační a informační soustavy apod.[2]

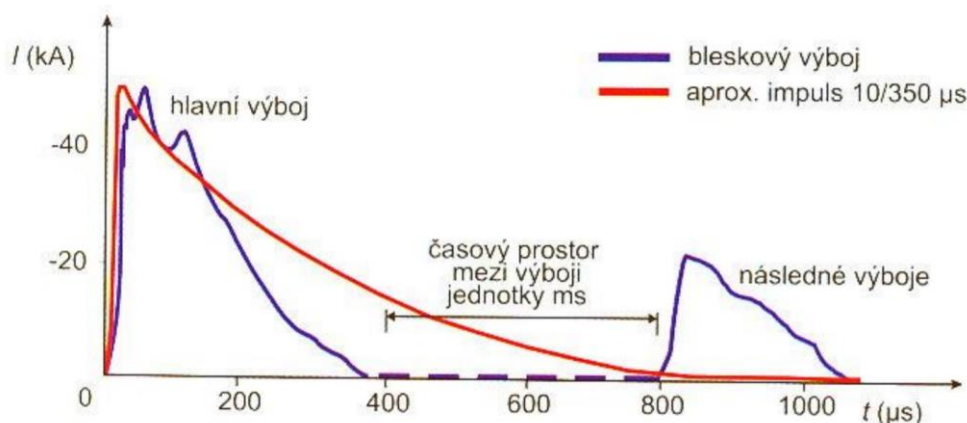
2.1 Zdroje přepětí

Zdroje přepětí lze podle jejich původu rozdělit na přírodní zdroje a zdroje uměle vytvořené lidskou činností. Základní příčinou neustále rostoucí poruchovosti a klesající odolnosti elektronických zařízení proti přepětí je rostoucí hustota součástek v elektronických obvodech. Zatímco zařízení s diskrétními součástkami snesla přepětí až několik kV, integrované obvody (s počtem součástek až několik miliónů na čipu) jsou poškozeny přepětím již od několika V. Dalším nepříznivým faktorem je stále vyšší rychlost polovodičových součástek, které tak reagují na stále kratší rušivé signály.[1]

2.1.1 Atmosférická přepětí

Atmosférické přepětí označované zkratkou LEMP (Lighting electromagnetic pulse) je přírodní povahy a vzniká v důsledku rozdílu potenciálů v atmosféře. Je způsobené především bouřkovou činností, konkrétně bleskovými výboji. Tento typ přepětí se nejčastěji projevuje na venkovních vedeních a v úsecích nestíněných kabelů.[5]

Pokud blesk zasáhne fázový vodič, dochází v čase několika milisekund k uvolnění energie v řádu až stovek MJ. Přepětí tohoto typu jsou nebezpečné hlavně proto, že mají velmi strmý nárůst napětí s nejvyšší hodnotou až několika megavoltů. Tato hodnota se však k zařízením na vedení nedostane díky instalovaným izolátorům, jež slouží jako přirozené chrániče proti přepětí. Přesto však dosahuje přepětí vysokých hodnot a je nutné proti němu soustavu chránit. Přepětěťová vlna se šíří po vedení na obě strany a při tom namáhá izolaci proti zemi. Současně přepětěťová vlna v jednom vodiči indukuje napětí ve vodičích sousedních. Často také dochází k situaci, kdy blesk nezasáhne přímo fázový vodič, ale udeří například do zemního lana, kovového stožáru, nebo jiného blízkého objektu. V tomto případě se do vedení indukuje přepětí vlivem elektromagnetické indukce.[6]



Obr. 4 Srovnání bleskového výboje a aproximačního impulsu tvaru 10/350 μ s [7]

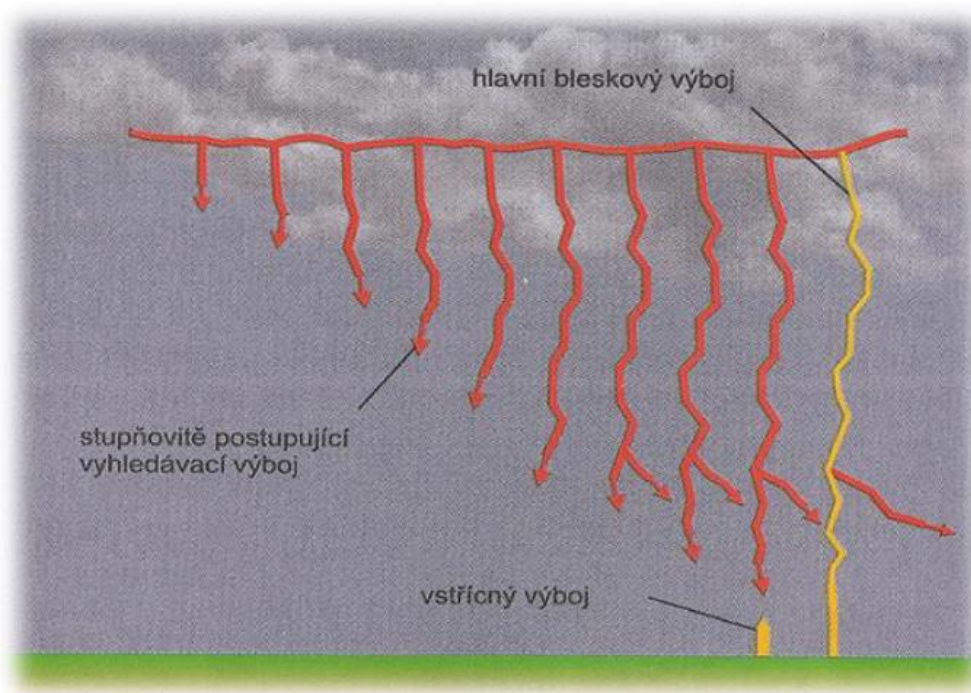
Vznik atmosférického výboje

V bouřkových mracích vznikají díky kosmickému záření a pohybu vzdušných hmot nabitě částice vzduchu, které se neustále spojují v neutrální částice. Některé částice se však nespojí a naopak dochází ke shromažďování kladných částic ve vyšších vrstvách a záporných částic v nižších vrstvách. Tím vznikne rovnovážný stav mezi oběma místy s intenzitou elektrického pole 100 – 200 V/m. Přiblíží-li se kladně nabitý mrak k záporně nabitému, vznikne mezi nimi elektrické napětí, které si při dosažení dostatečné velikosti vynutí vyrovnání potenciálů jiskrovým výbojem – bleskem. Elektrické napětí musí být tak velké, aby překonalo elektrickou pevnost vzduchu. Existují i mraky, u nichž se opačné náboje vytvoří na jejich protilehlých koncích a blesk tak přeskóčí uvnitř. Při přiblížení nabitého mraku k zemi se v důsledku elektrické indukce vytvoří náboj opačné polarity a tím pak může dojít k výboji buď od země, nebo k zemi.[8]

Rozvoj atmosférického výboje

Dojde-li k dosažení intenzity elektrického pole asi na 100 kV/m, začne vznikat vyhledávací vůdčí výboj. Výboj hledá cestu s nejlepší vodivostí, pro další směr rozvoje blesku. Při dosažení vzdálenosti několika desítek metrů od země dojde v místě s vyšší intenzitou elektrického pole k překročení elektrické pevnosti vzduchu a od povrchu země začne stoupat tzv. vstřícný výboj Obr. 5. Po jejich spojení vzniká ionizovaný vodivý kanál o průměru přibližně 5 cm, ve kterém dochází k extrémnímu nárůstu proudové hustoty a teploty, která může dosáhnout až 30 000 °C. Proud může v tomto okamžiku dosahovat hodnoty desítek až stovek kiloampér, přenášený náboj pak jednotek až desítek coulombů. Jedním kanálem často proběhne několik dílčích výbojů postupně vybíjejících další nabitě oblasti mraku. Dílčích výbojů může

být několik desítek. V takovém případě může trvání jednoho blesku překročit i dobu jedné sekundy. Oproti hlavnímu výboji mají však mnohem menší amplitudu a kratší dobu trvání.[7][8]



Obr. 5 Rozvoj atmosférického výboje [8]

2.1.2 Spínací přepětí

Spínací přepětí označovaná zkratkou SEMP (Switching electromagnetic pulse) jsou velmi četná přepětí, která se vyskytují v nízkonapětových i vysokonapětových rozvodných sítích. Obvykle jsou způsobena zkraty v rozvodné síti nebo spínacími operacemi, např. při zapínání a vypínání velkých zátěží, zejména induktivních, popř. i malých domácích spotřebičů, např. chladniček, mrazniček.[9] Spínací přepětí bývají zpravidla utlumena a trvají pouze krátkou dobu. Spínací přepětí nejčastěji vzniká v těchto případech:

Přepětí při zkratu

Děje vznikající při vypínání zkratových proudů výrazně ovlivňují jak samotnou síť, tak i vypínač (tvar a rychlost odskoku elektrod). Při vypínání se kontakty vypínače začnou oddalovat a začne mezi nimi hořet oblouk udržovaný zdrojem proudu. Oblouk přestává hořet až po dostatečném oddálení kontaktů, kdy dojde k přerušení toku proudu.[6]

Přepětí při vypínání kapacitních proudů

Přepětí vzniká, pokud kapacitní zdroj vypneme v okamžiku, kdy proud prochází nulou. V tomto okamžiku je napětí maximální. Na straně zdroje se napětí projeví tlumeným zakmitáním a poté pokračuje sinusovým průběhem. Napětí na baterii zůstává na hodnotě, kterou mělo v okamžiku vypnutí. Díky této situaci vzniká na kontaktech vypínače mezi těmito napětími rozdíl a může tak dojít k průrazu dráhy vypínače. Dojde ke vzniku oscilací, které však jsou brzy utlumeny. Přepětí se může opakovat, čemuž se předchází především volbou vhodného vypínače.[6]

Přepětí při vypínání malých induktivních proudů

Toto přepětí vzniká nejčastěji při vypínání transformátorů v chodu naprázdno a při vypínání asynchronních motorů s kotvou nakrátko za rozběhu. Vzniklé přepětí namáhá kontakty vypínače. Vypínací dráha se obvykle vlivem přepětí prorazí, a tak dochází k tzv. opětovnému zápalu. Tento jev se opakuje do té doby, dokud vzdálenost kontaktů není tak velká, aby nedošlo k opětovnému přeskočení mezi kontakty v daném prostředí vlivem nárůstu zotaveného napětí. Pokud není možné zabránit vzniku přepětí vhodně uzpůsobeným vypínačem či paralelními odpory u vypínače, přidávají se na svorky transformátoru ventilové bleskojistky.[10]

2.1.3 Přepětí vzniklá při výbojích statické elektřiny

Elektrostatický výboj označovaný zkratkou ESD (z angl. „ElectroStatic Discharge“) vzniká, dojde-li k postupnému vytvoření elektrostatického napětí mezi předmětem a jeho okolím a poté k spontánnímu výboji elektrického proudu. Obecně se rozeznávají dva způsoby vzniku elektrostatického výboje. ESD vzniká mezi nabitým předmětem a uzemněným obvodem, nebo mezi nabitým obvodem a uzemněným zařízením. V praxi je elektrostatický výboj většinou spojen s lidskou interakcí.[11]

2.1.4 Přepětí způsobená nukleárními výbuchy

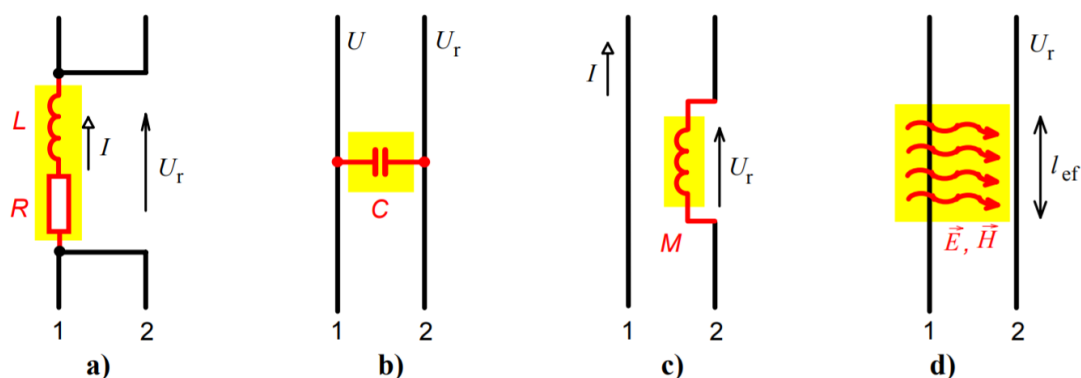
Při nukleárním výbuchu vzniká elektromagnetický impuls označovaný zkratkou NEMP (Nuclear electromagnetic pulse). Záření gama uvolněné při výbuchu vyrazí elektrony z molekul vzduchu (Comptonův jev). Tyto se zrychlují radiálním směrem a tím se oddělují

od naionizovaných molekul vzduchu. V několika ns pak vznikne silné elektrické pole. Následkem rychle se měnícího transportu náboje je vyzařován krátký elektromagnetický impuls.

Na ochranu proti přepětí indukovaných NEMP se používají obdobné ochranné prvky, jako proti atmosférickému přepětí. Vzhledem k velkému podílu vysokých kmitočtů jsou na tyto prvky kladeny nejvyšší požadavky. Bleskojistky vhodné pro NEMP by měly mít kromě krátké doby reakce pokud možno co nejmenší vlastní indukčnost.[12]

3 Vazební mechanismy

Přenos interferenčních signálů ze zdroje do přijímače závisí zejména na elektromagnetickém vazebním prostředí, tedy na druhu a způsobu vazby mezi zdrojem a přijímačem rušení. Tyto vazby můžeme dělit podle různých hledisek. Podle technické realizace může být vazební prostředí tvořeno vzdušným prostorem, stínícími či absorpčními materiály, kmitočtovými filtry, signálovými či napájecími kabely, zemnicími systémy, elektroenergetickými soustavami a dalšími druhy mezisystémových vazeb. Z hlediska fyzikálního principu rozlišujeme vazbu galvanickou, kapacitní, induktivní a vazbu vyzařováním.[1] Základní princip vazebního působení je schematicky znázorněn na Obr. 6.

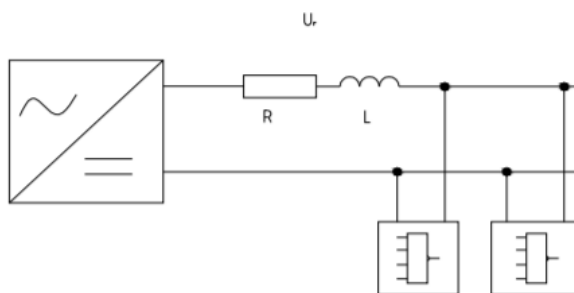


Obr. 6 Druhy elektromagnetických vazeb: a) galvanická, b) kapacitní, c) induktivní, d) vyzařováním [1]

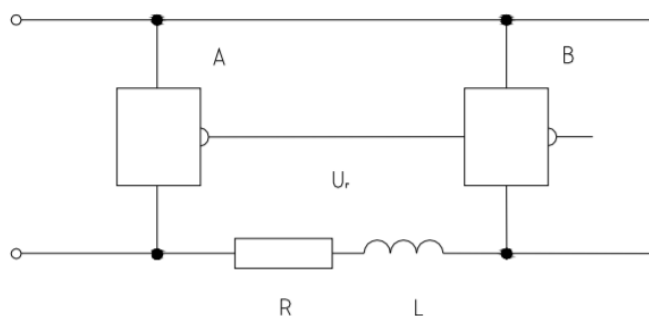
3.1 Galvanická vazba

Jedná se o vazbu dvou elektrických systémů, či bloků, jejichž jejichž proudové smyčky se uzavírají společnými úseky spojovacích vedení, tedy přes společnou impedanci. Tato impedance, která má nejčastěji charakter sériového obvodu RL, může být tvořena např. vnitřní impedancí společného napájecího zdroje Obr. 7, společného přívodu řídicích obvodů Obr. 8, nebo impedancí společného zemnicího systému Obr. 9. Společnou impedancí tečou

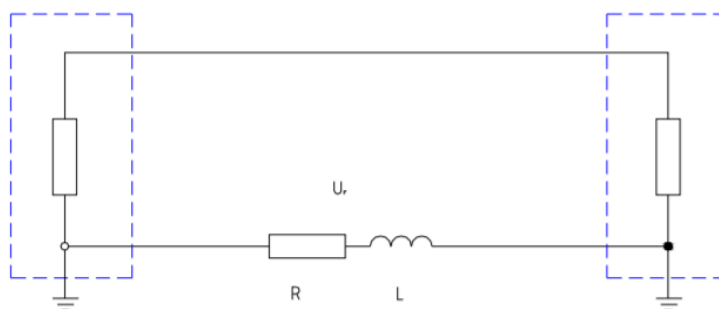
proudy obou bloků, takže napětí U_r vznikající na této impedanci průtokem proudu prvního bloku představuje pro druhý blok rušivé napětí. Na nízkých kmitočtech (v pásmu kHz) je rozhodující část společné impedance tvořena odporovou složkou R . V oblasti vyšších kmitočtů se uplatňuje především induktivní složka, na níž i poměrně malý proud prvního bloku může při rychlé časové změně vyvolat velké napětí, které je rušivé pro druhý blok zařízení.[1]



Obr. 7 Galvanická vazba společným napájecím zdrojem [2]



Obr. 8 Galvanická vazba společným přívodem řídicích obvodů [2]



Obr. 9 Galvanická vazba společným zemnicím systémem [2]

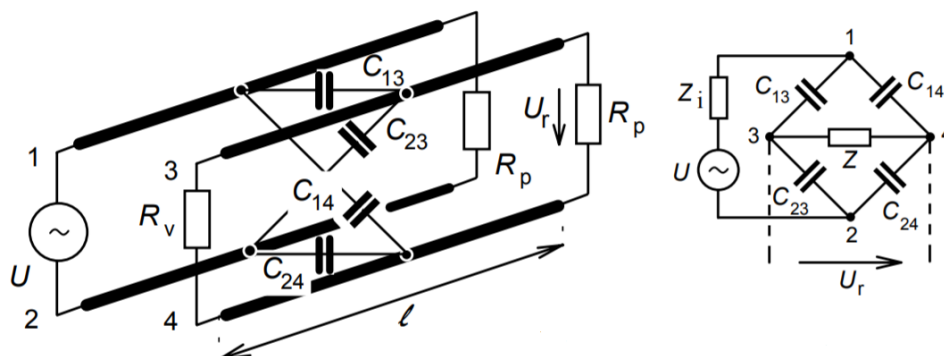
Častým případem parazitní galvanické vazby je tzv. zemní smyčka, která vzniká při-
zemněním dvou systémů v různých bodech zemnicí soustavy. Vlivem nahodilých (blud-
ných) zemních proudů vzniká mezi těmito body nahodilé rušivé zemní napětí U_z . Toto rušivé
napětí lze snížit zvýšením celkové impedance zemní smyčky, zvětšením útlumu zemní
smyčky nebo rozpojením zemní smyčky.[4][13]

3.2 Kapacitní vazba

Kapacitní vazba je způsobena existencí parazitních kapacit, které se vyskytují mezi vodiči a jednotlivými částmi obvodů a konstrukcí zařízení. V technické praxi existuje velké množství různých variant parazitních kapacitních vazeb mezi různými typy obvodů. Prakticky jsou zajímavé zejména následující tři případy.

3.2.1 Kapacitní vazba galvanicky oddělených obvodů

Model této kapacitní vazby je naznačen na *Obr. 10*. Vodiče 1 a 2 zde představují rušící obvod a vodiče 3 a 4 představují rušený obvod. Pokud je délka obou vedení l výrazně kratší než vlnová délka rušivého signálu o nejvyšším uvažovaném kmitočtu, můžeme odvod nahradit schématem uvedeným na *Obr. 10* vpravo. V něm je náhradní impedance Z_i závislá na impedančních parametrech rušícího obvodu a náhradní impedance Z je závislá na parametrech rušeného obvodu. Výstupní rušivé napětí U_r je nejmenší při vyvážení kapacitního můstku. Toho lze docílit zkroucením obou párů vodičů, případně alespoň zkroucením rušeného vedení. Další možností pro snížení kapacitní vazby je použití stíněných vodičů.[3]



Obr. 10 Kapacitní vazba galvanicky oddělených obvodů [1]

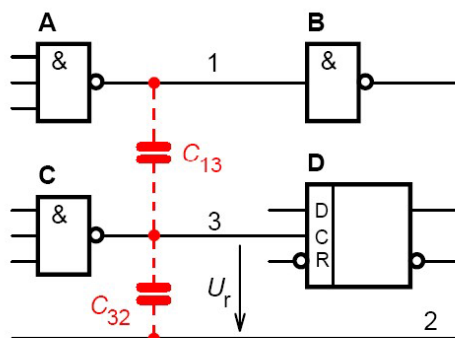
3.2.2 Kapacitní vazba mezi obvody se společným vodičem

Tato parazitní vazba se často vyskytuje v analogových a číslicových obvodech. Příklad takové vazby vidíme na *Obr. 11*. Signálový výstup obvodu A ovlivňuje díky parazitní vazební kapacitě C_{13} stav na vstupu klopného obvodu D. Oba tyto obvody mají společný vztažný vodič 2. Velikost přeneseného rušivého napětí s rostoucí frekvencí nejprve roste a až na vysokých frekvencích zůstává konstantně na maximální hodnotě podle rovnice (3.1). Stejný typ vazby může nastat i u vícežilového kabelu.

$$U_{rmax} = U_1 \cdot \frac{C_{13}}{C_{13} + C_{32}} \quad (3.1)$$

Pro snížení tohoto druhu kapacitní vazby můžeme:

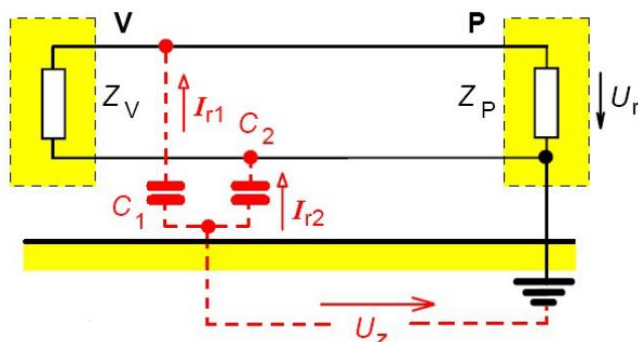
- Zmenšit vazební kapacitu C_{13} – např. maximálním oddálením vodičů 1 a 3, zamezením jejich souběžného vedení nebo volbou co nejmenších průřezů vodičů
- Realizovat co největší kapacitu C_{32} – např. těsným přiblížením či zkroutením vodiče 3 se vztažným vodičem 2
- Elektricky odstínit oba vodiče, které se ovlivňují. Například stíněním vodiče 3 nebo zavedením pomocného „stínícího“ spoje s nulovým potenciálem na desce plošného spoje mezi vodiče 1 a 3 [3]



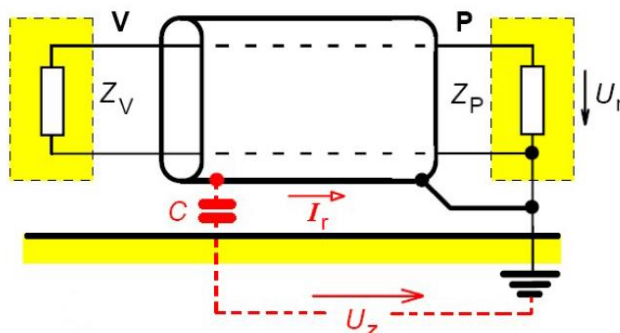
Obr. 11 Kapacitní vazba mezi obvody se společným vodičem [4]

3.2.3 Kapacitní vazba vůči zemi

Jedná se o kapacitní vazbu, která může být vyvolána velkou kapacitou přívodů obvodu vůči zemi jako na Obr. 12. Rušivé napětí v zemi U_Z se průtokem rušivých proudů I_{r1} a I_{r2} parazitními vazebními kapacitami C_1 a C_2 přenáší jako rušivé napětí U_r na vstupní svorky obvodu P (přijímače rušení). Tuto kapacitní vazbu lze odstranit pomocí stíněného přívodu, dle Obr. 13.



Obr. 12 Kapacitní vazba vůči zemi [4]



Obr. 13 Odstranění kapacitní vazby pomocí stínění [4]

3.3 Induktivní vazba

Prochází-li obvodem elektrický proud, vzniká v jeho okolí magnetické pole, které může být konstantní nebo proměnné (v závislosti na časovém průběhu proudu). Ve vodičích, které jsou v časově proměnném magnetickém poli se indukuje napětí, jehož velikost roste se zvyšováním kmitočtu, příp. s rostoucí rychlostí časových změn proudu v primárním obvodu.[1] Při časové změně magnetického toku se v obvodu indukuje rušivé napětí podle Faradayova indukčního zákona:

$$U_r = -\frac{d\phi}{dt} \approx -\frac{\Delta\phi}{\Delta t} = -S \cdot \frac{\Delta B}{\Delta t} = -\mu_0 \cdot S \cdot \frac{\Delta H}{\Delta t} \quad (3.2)$$

Tato parazitní vazba je nebezpečná zejména v případech rychlých změn proudu velké velikosti. Pro minimalizaci induktivních vazeb je zapotřebí, aby:

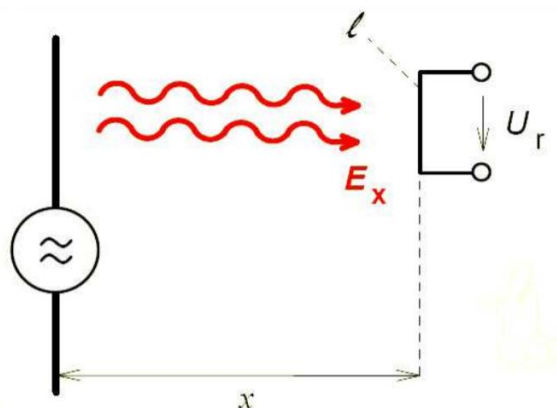
- Délka souběžně probíhajících vodičů obou obvodů byla minimální
- Vzdálenost obou obvodů byla co největší
- Velikost proudové smyčky rušeného obvodu byla co nejmenší

K významným induktivním, ale i kapacitním vazbám dochází zejména při souběžném vedení energetických silových kabelů s datovými a signálovými kabely či s kabely řídicích obvodů a systémů. Proto je nutné tyto kabely rozdělit do samostatných elektromagneticky stíněných sekcí.[3]

3.4 Vazba vyzařováním

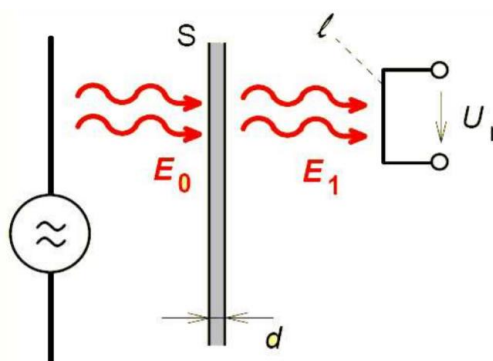
Při větších vzdálenostech mezi zdrojem a přijímačem rušení může vzniknout vzájemná vazba dvou objektů vyzařeným elektromagnetickým polem. Mezi tyto rušení lze za-

řadit rušení blízkými vysílači, atmosférická rušení, ale i řadu průmyslových poruch. Působením elektromagnetické vlny se ve vodičích přijímače indukuje rušivé napětí, které se v jeho obvodech sečítá s užitečným signálovým napětím nebo jej dokonce zcela překryje. Situace vazby vyřazováním je zobrazena na Obr. 14, kde x je vzdálenost zdroje a přijímače rušení. Zdroj vysílá signál s výkonem P . [4]



Obr. 14 Princip vazby elektromagnetickým vyzařováním [3]

Proti elektromagnetickému rušení vyzařováním lze zařízení chránit pomocí stínícího krytu nebo přepážky, která se umístí mezi zdroj a přijímač rušení Obr. 15. Touto přepážkou je vyzařovaná intenzita E_0 zeslabena na hodnotu E_1 . K zeslabení dochází jednak vlivem absorpce energie stínící přepážkou, jednak vlivem odrazu elektromagnetické vlny od přepážky zpět směrem ke zdroji záření. Velikost zeslabení je závislá na tloušťce přepážky d , na její vodivosti a permeabilitě a také na velikosti frekvence signálu. [3]



Obr. 15 Elektromagnetické vyzařování s vloženou stínící vložkou [3]

4 Ochrana proti přepětí

Zařízení sloužící k ochraně proti účinkům přepětí se nazývají přepětové ochrany. Jejich úkolem je zajistit, aby se na chráněné zařízení nedostalo napětí vyšší než dovolené. V principu tyto ochrany využívají změnu impedance v závislosti na napětí, avšak podle konstrukce jednotlivých ochran se jejich vlastnosti mohou vzájemně lišit. Pro spolehlivou funkci přepětové ochrany je důležité, aby zvolená ochranná hladina byla v jistém odstupu pod úrovní elektrické pevnosti chráněného zařízení.[6]

Přepětové ochrany by měly splňovat několik kritérií:

- Za normálních podmínek musí mít ochrana takovou impedanci, aby místem, kde je připojena, neprocházel žádný nebo pouze minimální proud v řádu miliampér
- Ochranné zařízení by mělo odvést energii, aniž by se poškodilo
- Snížit svoji impedanci při nárůstu hladiny napětí a tím odvést poruchový proud do země
- Po odvedení poruchového proudu do země opět zvýšit svoji impedanci a tak vrátit systém do standardních podmínek

Ochrany se také rozdělují do několika tříd rozlišených podle umístění v rozvodné síti a velikosti přepětí, na které jsou nastaveny:

- Ochrana typu 1 – hrubá ochrana. Přepětová ochrana musí být konstruována tak, aby odvedla impulsní proud 50kA.
- Ochrana typu 2 – střední třída ochrany. Přepětová ochrana musí být schopná odvést proud 15 kA opakovaně a 40 kA jednorázově
- Ochrana typu 3 – Jemná ochrana, která se obvykle instaluje do okruhů s citlivými zařízeními jako je např. výpočetní technika

4.1 Svodiče přepětí

Nejvhodnějším způsobem, jak ochránit elektrická zařízení před přepětím, je instalace svodičů přepětí s dalšími vhodně kombinovanými ochrannými opatřeními. Aplikace svodičů přepětí jako místní ochrana zařízení je nejúčinnějším způsobem k zajištění nízké poruchovosti zařízení sítí s nevelkým negativním vlivem na počet přerušení dodávky elektřiny.[7]

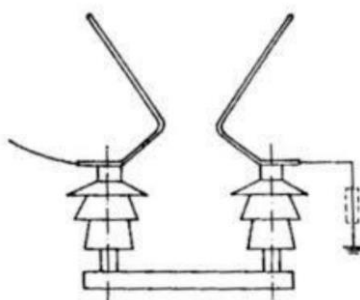
4.1.1 Ochranná jiskřiště

Ochranné nebo též koordinační jiskřiště je nejstarším a nejjednodušším typem přepětové ochrany. Jedná se o vzduchové jiskřiště s nastavenou doskokovou vzdáleností. Jedna

elektroda je připojena k zemi a druhá k fázovému vodiči. Při zapůsobení ochrany dojde k zapálení oblouku mezi elektrodami jiskřiště. Po odeznění přepětí má jiskřiště stále malou impedanci a hořící oblouk je udržován jmenovitým napětím dané soustavy a jiskřištěm prochází tzv. následný proud. K uhašení oblouku mezi elektrodami je nutné danou část sítě vypnout.[14]

4.1.2 Růžkové bleskojistky

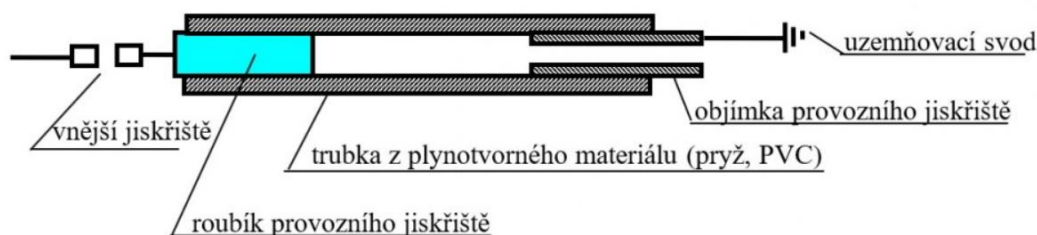
Růžková bleskojistka je tvořena dvěma kovovými růžky tvarovanými do písmene V. Jeden je připojen na vedení, zatímco druhý je uzemněný. Po zapálení oblouku dochází díky elektromagnetickým silám a teplotnímu vztlaku k posouvání oblouku vzhůru a tím i prodloužení jeho dráhy do doby, než se samovolně uhasí. Nevýhodou těchto bleskojistek je závislost elektrické pevnosti na počasí a nízká vypínací schopnost. Z toho důvodu se využívají na málo významných vedeních, nebo jako záložní ochrana s použitím dokonalejšího svodiče přepětí.[6]



Obr. 16 Růžková bleskojistka [14]

4.1.3 Vyfukovací bleskojistky

Vyfukovací bleskojistka nebo též Torokova trubice je tvořena sériovým spojením jiskřiště uzavřeném v trubce ze speciální směsi tvrzené pryže nebo fibru a tyčového jiskřiště umístěného ve vzduchu. Po vzniku přepětí se zapálí obě jiskřiště. Hořící oblouk na jiskřišti v uzavřené trubce žářem odpaří část obalu jiskřiště. Vzniklý plyn tvořený neionizovanou vodou a materiálem trubky ochlazuje oblouk a deionizuje jeho okolí. Oblouk tak ztratí energii na udržení a při průchodu harmonického průběhu nulou zhasne. Nevýhodou vyfukovacích bleskojistek je jejich rychlé opotřebení (vydrží 20 – 30 výbojů), proto se již v současnosti nepoužívají.[10]

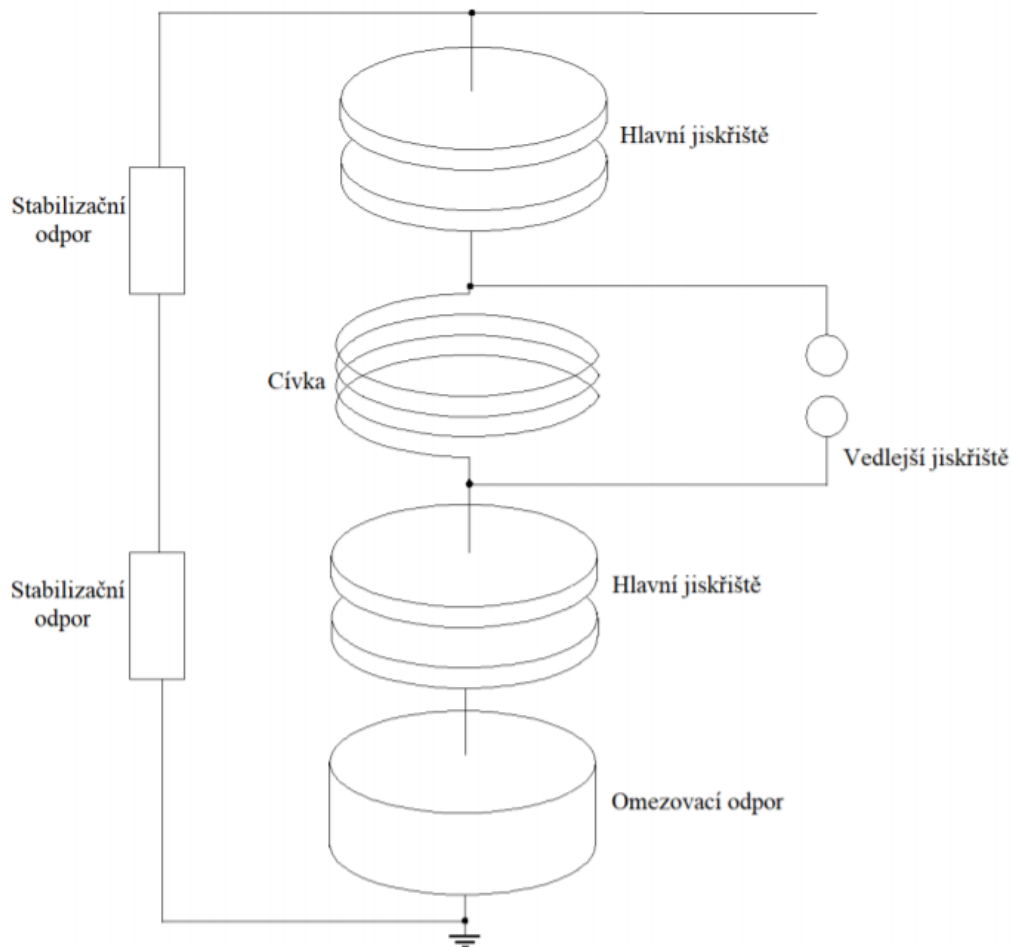


Obr. 17 Schéma vyfukovací bleskojistky [15]

4.1.4 Ventilové bleskojistky

Ventilová bleskojistka se skládá z jiskřiště a odporu zapojených do série. Pro vyšší napěťové hladiny je použito vícenásobné sériové řazení. Jiskřiště jsou uzavřena v neprodyšném porcelánovém válci, který je naplněn tzv. suchým vzduchem. Tím je jiskřiště chráněno před vzdušnou vlhkostí a dochází pouze k malým změnám velikosti zapalovacího napětí (například teplotou). Omezovací odpor bleskojistky nejčastěji tvoří SiC. Od 50. let do 70 let minulého století byly bleskojistky na bázi SiC standardem přepětových ochran v distribučních a přenosových sítích. Od sedmdesátých let jsou postupně nahrazovány omezovači přepětí na bázi ZnO, nicméně velké množství SiC svodičů je stále v provozu.[14]

Konstrukce ventilové bleskojistky je znázorněna na *Obr. 18*. Při přepětí na svorkách bleskojistky dojde k zapálení obou do série spojených hlavních jiskřišť. Nárůst proudu způsobí, že se na cívce naindukují napětí, díky čemuž dojde k zapálení pomocného jiskřiště a k vyrazení cívky. V tuto chvíli je impedance bleskojistky dána pouze omezovacím odporem. Po svedení přepětí poklesne impedance cívky, což způsobí uhasnutí pomocného jiskřiště a opětovné zařazení cívky do obvodu. Průchodem proudu začne cívka vytvářet magnetické pole, které následně vytlačuje oblouky hořící na hlavních jiskřištích do zhašecích komor. Stabilizační odpory slouží k rovnoměrnému rozložení potenciálu podél bleskojistky.[14]

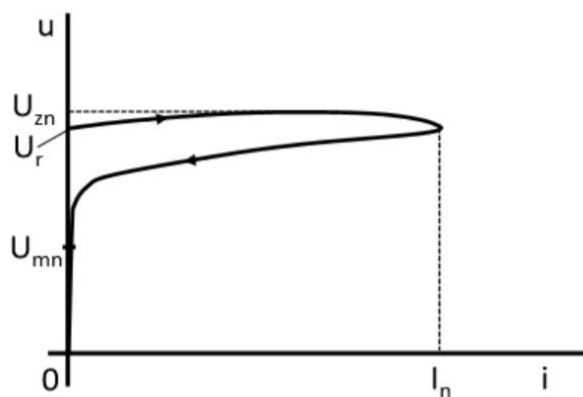


Obr. 18 Konstrukce ventilové bleskojistky [14]

Mezi nevýhody ventilových bleskojistik patří:

- Zapalovací napětí jiskřiště je značně závislé na strmosti přepětí
- Vzhledem ke složité vnitřní struktuře jsou bleskojistky náchylné k poškození při přepravě
- Jiskřiště jsou náchylná ke korozi v případě proniknutí vlhkosti

Vzhledem k uvedeným nevýhodám jsou ventilové bleskojistky postupně nahrazovány omezovači přepětí na bázi ZnO. Na *Obr. 19* je znázorněna V–A charakteristika ventilové bleskojistky s některými význačnými hodnotami.[14]



Obr. 19 V–A charakteristika ventilové bleskojistky [14]

U_r rázové zapalovací napětí

I_n jmenovitý výbojový proud

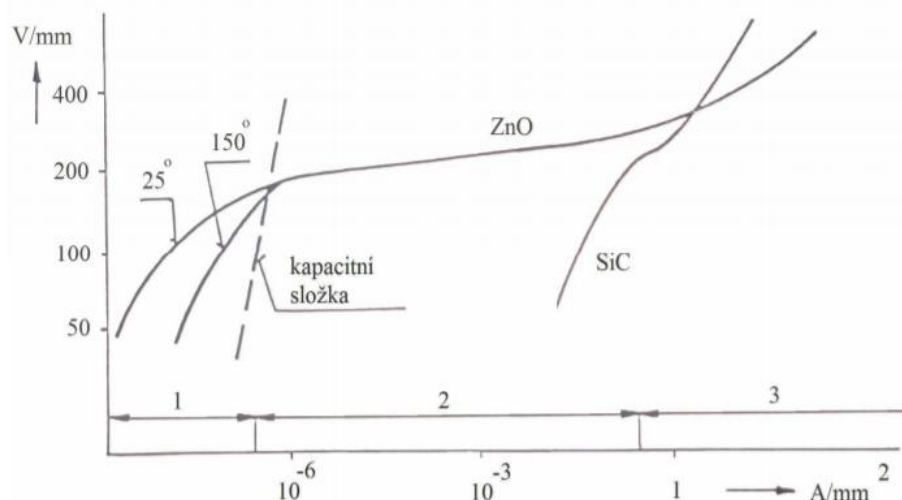
U_{zn} jmenovité zbytkové napětí

U_{mn} jmenovité napětí (špičková hodnota)

4.1.5 Omezovače přepětí ZnO

Tyto bezjiskřišťové omezovače přepětí jsou složeny ze sloupců nelineárních odporů (varistorů). K výrobě se využívá spékaný granulovaný ZnO, obsahující ale i další příměsi. Mezi zrnky granulátu se vytvoří polovodivý přechod. Pokud je materiál jádra správně nakonfigurován, dojde k vytvoření charakteristiky s ostrým přechodem mezi pásmem, kde je odpor vysoký, tudíž špatně vodivým a pásmem, kde naopak odpor klesne a vodivost se výrazně zvýší. Po stranách granulátu ZnO jsou napájeny elektrody obvykle vyráběné z mědi. Jejich tvar je volen tak, aby docházelo k rovnoměrnému rozložení proudu a tím i celkové zatížení součástky. V ideálním případě by měla být využita celková kapacita varistoru.[14]

Svodič ZnO je vyráběn dvěma způsoby. Při prvním způsobu se celý svodič umístí do celistvé kazety, zatímco u druhého způsobu je svodič skládán ze dvou částí. Výměnná část obsahuje varistor, odpojovač, signalizační prvky, především pak pevně přednastavené jmenovité napětí, pro které se svodič využívá. Tento modul se připojuje do základní části, jenž se připojuje do obvodu. Nevýhodou varistoru je, že jím po připojení do chráněného protéká tzv. zbytkový proud. Má převážně kapacitní charakter o hodnotě přibližně 0,2 mA při provozním napětí. Průchod proudu má špatný vliv na polovodivé přechody, tvořené zrnky granulátu.[7]



Obr. 20 Porovnání svodičů SiC a omezovačů ZnO [10]

V grafu na Obr. 20 je znázorněna poměrně velká závislost proudu na teplotě v oblasti malých provozních proudů. Zvyšuje-li se napětí, začne se blok (polovodič) otevírat a proud tekoucí omezovačem narůstá mnohem rychleji než přiložené napětí. Ve střední části lze nelinearitu V–A charakteristiky vyjádřit vztahem mezi napětím a proudem $I = A \cdot U^B$, kde exponent B u kvalitních bloků je vyšší než 50, typicky $B = 51$. Při proudech nad 1 kA se nelinearita otevírání bloků omezovače zmenšuje a proud již neroste tak rychle s rostoucím napětím. Největší využití omezovače k ochraně proti přepětí je ve střední části V–A charakteristiky s proudy od 1 A do 10 kA, kde je nelinearita největší.[16]

4.2 Koordinace izolace

Cílem koordinace izolace je zmenšit míru pravděpodobnosti, že vzniklé přepětí poškodí izolaci zařízení nebo ovlivní jeho provoz. Nejčastěji se vytváří tři izolační hladiny. Vychází se ze statického charakteru přepětí a z výpočtů četnosti výskytu parametrů přepětí vzhledem k izolačním hladinám zařízení. Hodnoty nejvyšších přepětí jsou uvedeny v normě ČSN 33 2000–4–443.

Elektrická pevnost daného zařízení se volí podle provozních podmínek vzhledem k napětovým namáháním, kterými může být zařízení zatěžováno.[6]

- Atmosférická přepětí
- Dočasná přepětí
- Spínací přepětí
- Střídavá napětí za normálních podmínek s průmyslovým kmitočtem

Izolační hladiny jsou odstupňovány následovně:

Nejnižší izolační hladina

V této hladině se nachází svodiče přepětí. Jejich úkolem je snížit přepětí na dovolenou hodnotu. Hodnota napětí, na kterou svodiče reagují, musí být vyšší, než je hodnota nejvyššího provozního napětí.

Střední izolační hladina

Zde se nachází izolátory s koordinačními jiskřišti a průchodky. Pokud by na nežádoucí přepětí nezareagovaly svodiče, došlo by na izolátorech ke svedení nežádoucího proudu do země.

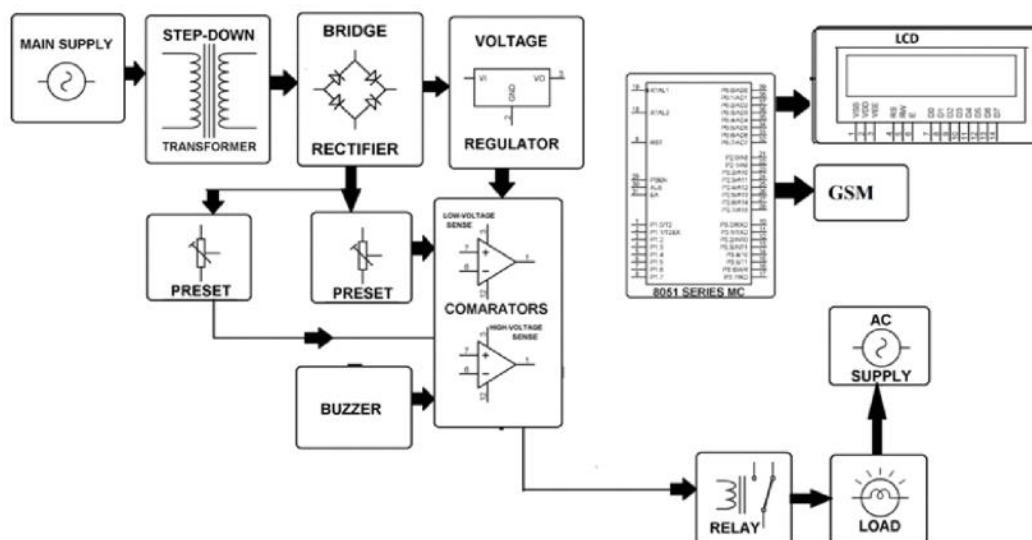
Nejvyšší izolační hladina

V této izolační hladině jsou již umístěny stroje a přístroje. Jejich poškození a následná oprava by vyžadovala vysoké finanční náklady, a proto by se v této hladině již nemělo přepětí vyskytovat.

4.3 Nové trendy

V současné době dochází k rozvoji systémů, které umožňují monitorovat chráněné zařízení a v případě vzniku přepětí odpojí zátěž od zdroje a zároveň odešlou textovou zprávu (SMS), která uživatele upozorní, že došlo k poruše.

Takovým systémem je například GSM modem SMS Alert. Ten se skládá z vypínacího mechanismu, který sleduje vstupní napětí a vypíná podle stanovených limitů. Využívá 8bitový mikrokontrolér ATmega328 s GSM modemem a externě k němu připojený LCD displej, na kterém se zobrazují stavy systému. V případě, že dojde k poruše, mikrokontrolér odešle zprávu do GSM modemu a ten pak odešle SMS zprávu uživateli.[17]



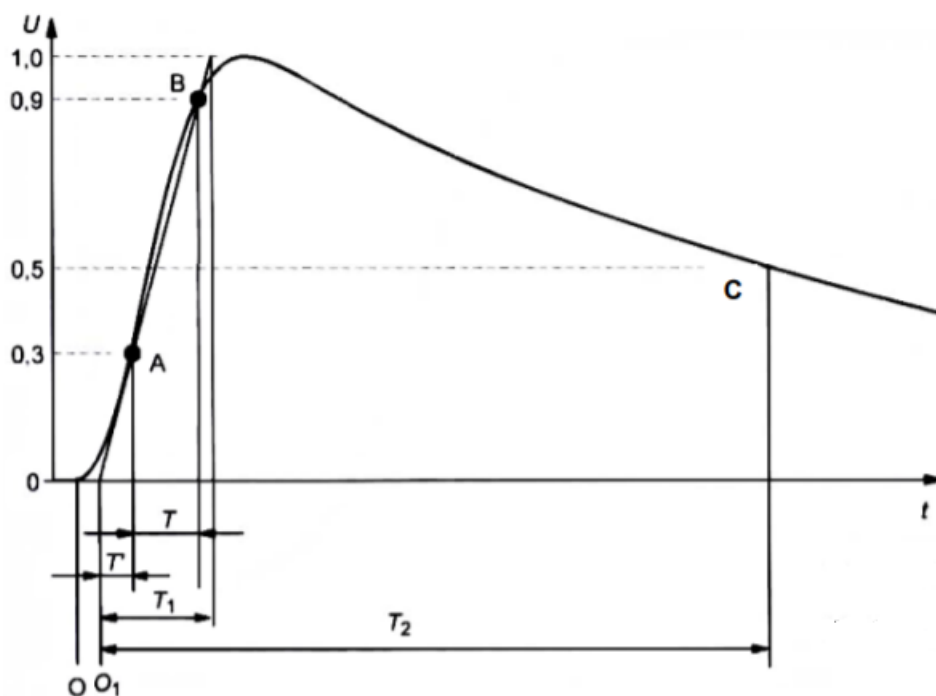
Obr. 21 Blokové schéma GSM modemu SMS Alert [17]

5 Zkoušky impulzním napětím

Postup měření zkušebními napětími je uveden v normě ČSN 60060–1. Ta také specifikuje velikost, přesnost a tvar zkušebního napětí. Veškeré přístroje, včetně softwaru, pro provádění zkoušek vysokým napětím musí odpovídat normě IEC 60060–2:2010.[18]

5.1 Rázový impulz

Rázový impulz, označovaný také „Surge“, je popsán normou ČSN EN 61000–4–5, která pro atmosférické přepětové jevy definuje normalizovaný průběh pro testování přepětových ochran. Jedná se o hladký plný impulz, jehož časový průběh je zobrazen na Obr. 22. Obecně bývá označován jako impulz 1,2/50, což vyjadřuje dobu trvání 1,2 μ s čela impulzu T_1 a dobu 50 μ s pŕltýlu impulzu T_2 . [18]



Obr. 22 Časový průběh atmosférického impulzu [19]

O_1 zdánlivý počátek – Tento bod se získá promítnutím přímky spojující body A a B v čele impulzu do časové osy, kde bod A odpovídá 30 % vrcholové hodnoty napětí plného impulzu a bod B 90 %.

T doba, za kterou impulz přejde z bodu A do bodu B

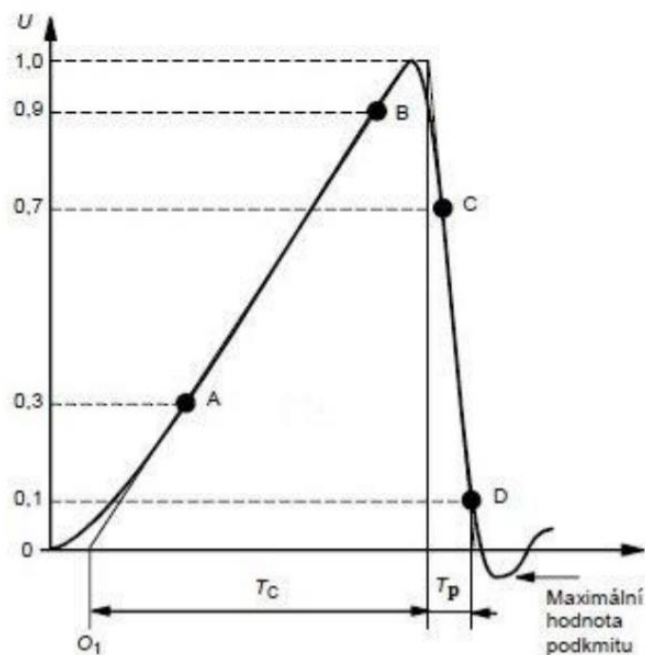
T_1 doba čela – časový interval, jehož doba trvání je $1/0,6$ násobek intervalu T

T_2 doba půltýlu – časový interval, začínající v bodě O_1 a končící v bodě C

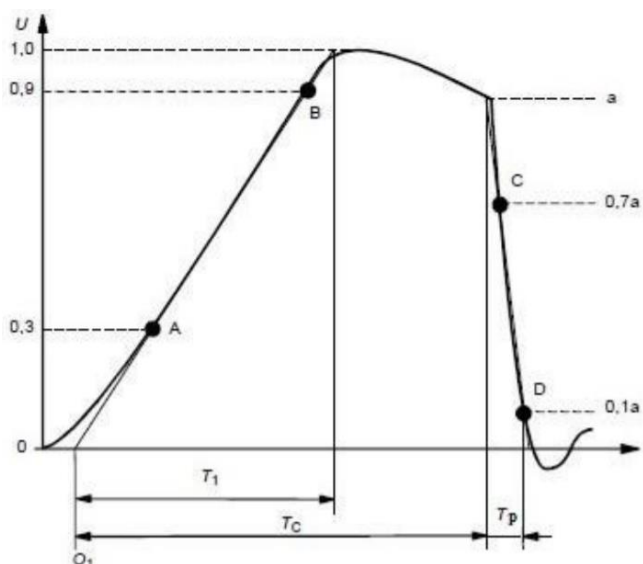
Za správně provedenou zkoušku se považují následující rozdíly mezi stanovenými hodnotami pro normalizovaný impulz:

- Hodnota zkušební napětí: $\pm 3\%$
- Doba čela: $\pm 30\%$
- Doba půltýlu: $\pm 20\%$
- Relativní velikost překmitu normalizovaného impulzu nesmí překročit 10% .

V praxi však můžeme dojít k případům, kdy je průběh atmosférického impulzu přerušen přeskokem či průrazem. V tom okamžiku poklesne napětí vlny téměř na nulovou hodnotu a jedná se o tzv. useknutý atmosférický impulz. Ten lze rozdělit podle okamžiku zhroucení napětí na impulzní napětí useknuté v čele anebo useknuté v týle. Časové průběhy těchto impulzů můžeme vidět na Obr. 23 a Obr. 24. [20]



Obr. 23 Atmosférické impulzní přepětí useknuté v čele [18]



Obr. 24 Atmosférické impulzní přepětí useknuté v týlu [18]

Časové průběhy useknutých atmosférických impulzů lze popsat obdobně jako plný atmosférický impulz, avšak zde se navíc vyskytují další doplňující parametry.

T_c doba do useknutí – celková délka useknutého impulzu, kterou lze vymezit časovým intervalem mezi bodem O_1 a okamžikem useknutí.

T_p doba poklesu napětí – odpovídá $1/0,6$ násobku časového intervalu mezi body C a D. Bod C dosahuje hodnoty 70 % a bod D 10 % napětí v části charakteristiky, ve které došlo ke zhroucení napětí.

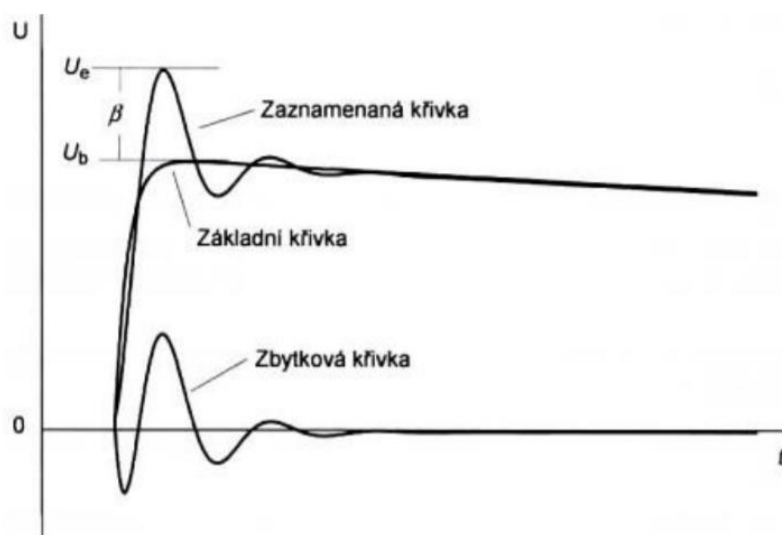
U zkoušek prováděných atmosférickým impulzem je také důležitý překmit β , který podstatně ovlivňuje velikost průrazného napětí izolačních materiálů. Překmit totiž svými účinky tlumených oscilací způsobuje u impulzního napětí nárůst amplitudy.

Velikost překmitu je dána vztahem:

$$\beta = U_e - U_b \quad (5.3)$$

U_e krajní hodnota vyjadřující maximální hodnotu zaznamenané křivky

U_b maximální hodnota základní křivky



Obr. 25 Vyznačení překmitu pomocí základní a zaznamenané křivky [19]

Velikost překmitu lze též vyjádřit procentuálně prostřednictvím veličiny známé jako relativní velikost překmitu β' , která se získá poměrem velikosti překmitu k maximální hodnotě.[18]

$$\beta = \frac{U_e - U_b}{U_e} \cdot 100 \quad (5.4)$$

5.2 Burst signál

Tento průběh napětí definuje norma ČSN EN 61000-4-4 a slouží pro simulaci spínacích přepětových jevů. Měřicí signál se skládá z opakujících se skupin rychlých napětových impulzů. Tyto krátké impulzy jsou označovány jako rychlé přechodové jevy EFT – Electrical Fast Transients. Skupiny se periodicky opakují po 300 ms a délka jedné z nich je 15 ms.

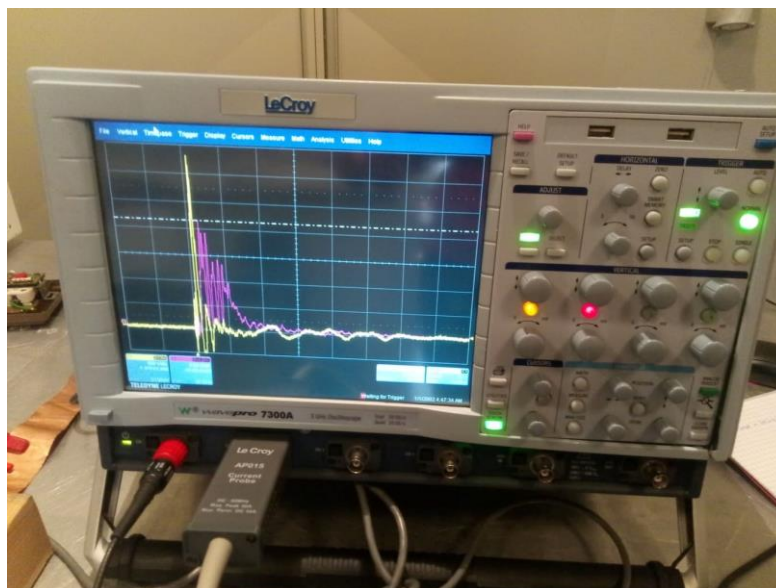
Po tuto dobu jsou generovány impulzy průběhem podobné rázovému impulzu, ale s podstatně kratší dobou čela a půltýlu. Jeden impulz má tvar impulzu 5/50 ns a v jedné skupině se opakují s frekvencí 5 nebo 100 kHz. Elektromagnetická rušení simulovaná tímto signálem jsou nebezpečná zejména pro elektronické integrované a číslicové obvody. Proto se průběh Burst signálu podobá právě diskretním signálům, které zpracovávají digitální zařízení.[21]

5.3 Elektrostatický výboj

Elektrostatický výboj (ESD) nepřenáší velkou energii, ale přesto ohrožuje funkci a životnost elektronických obvodů. Testování zařízení a ochran proti ESD se zabývá norma ČSN EN 61000-4-2. Zkoušky se provádí speciálním ESD generátorem a náboj se na testované zařízení dostává pomocí vybíjecí pistole. V praxi se používají tři typy výbojů. Vzduchový výboj se přivádí přiblížením již nabitého kulatého hrotu pistole k povrchu, až dojde k přeskoku a vybití náboje přes vzduchovou mezeru. Při nepřímém výboji se přivede náboj na vazební rovinu, kterou je svislá kovová deska nebo podložka pod zařízením, oddělená izolační deskou. Při kontaktním výboji se hrot pistole přiloží přímo ke zkoušenému zařízení a poté se na něj aplikuje výboj. Používá se napětí od 1 kV do 8 kV, pro vzdušný výboj pak až do 15 kV.[21]

6 Praktická část

Praktické měření probíhalo v univerzitní laboratoři pro práci s vysokým napětím pod dohledem vedoucího práce. Při testování ochran jsem využil všechny tři metody uvedené v kapitole 5. Z výsledků měření je patrné, jak která ochrana reaguje na daný typ přepětí. Všechny veličiny byly měřeny na digitálním osciloskopu LeCroy wave pro 7300 A. Naměřená data a grafy jsou uvedeny v příloze.



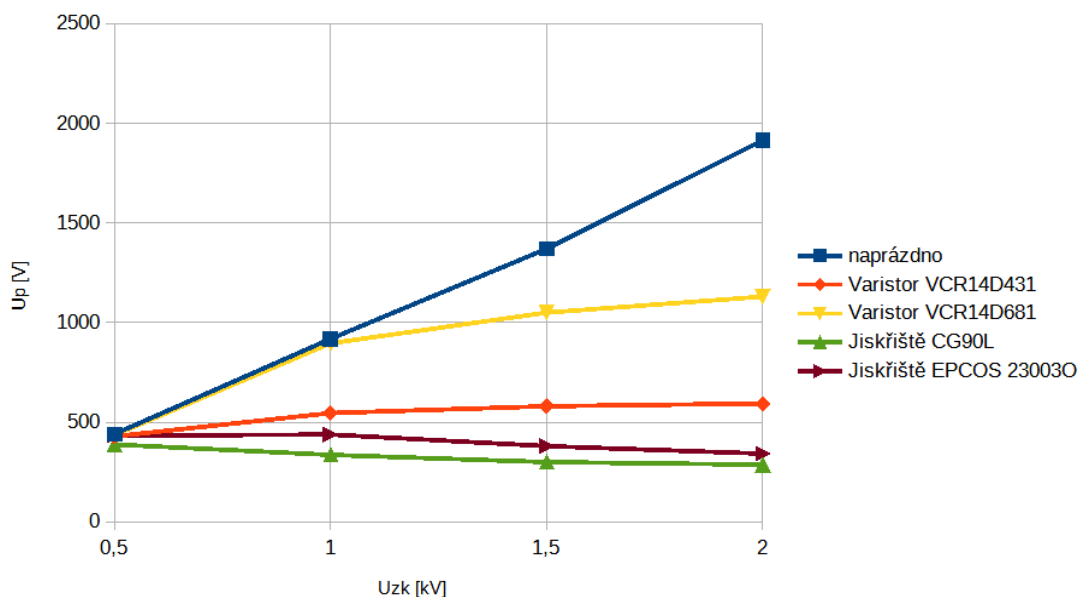
Obr. 26 digitální osciloskop LeCroy wave pro 7300A

6.1 Měření ochrany

Pro měření byly vybrány ochrany, které byly v danou dobu dostupné v univerzitní laboratoři. Od každého typu ochrany byly vybrány dva kusy s různými parametry. Jednalo se o tranzistory 1,5KE33CA a 1,5KE68CA od výrobce Semtech Electronics LTD, varistory VCR14D431 a VCR14D681 od výrobce Hitano, jiskřiště CG90L od výrobce Littelfuse a EPCOS 230030 od výrobce TDK a dále dva feritové návleky 742 711 32 a 742 750 4 od firmy Würth elektronik, které byly testovány pouze při ESD testu.

6.2 Surge test

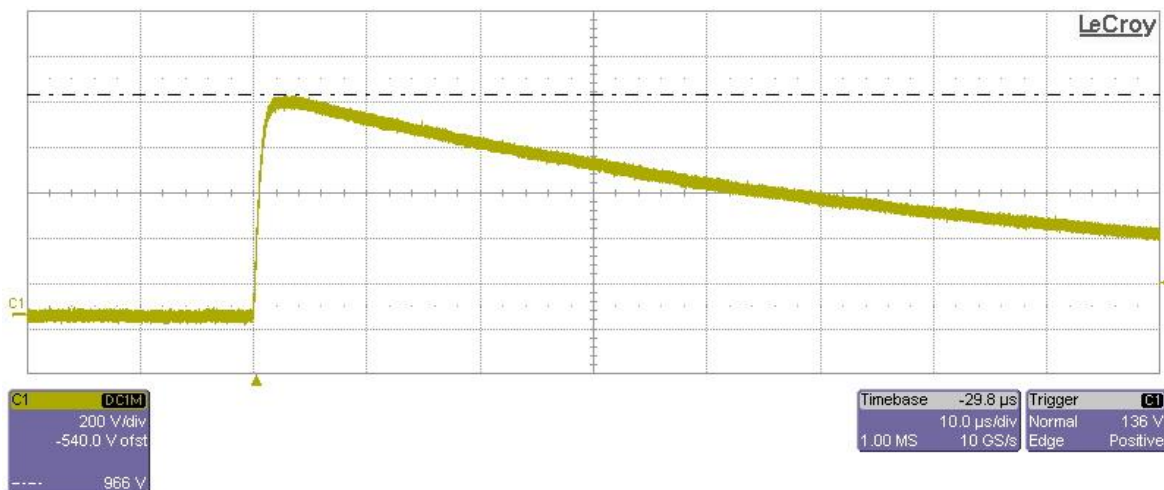
Jedná se o klasický test rázovým impulzem, který simuluje atmosférický přepětový impulz. Jako zdroj impulzů byl použit univerzální generátor EM TEST UCS500–M s vnitřním odporem $R_i = 2 \Omega$ a maximálním napětím impulzu 4 kV. Proud svedený ochranou do země jsem měřil sondou LeCroy CP500, která má proudové omezení $I_{peak} = 700 \text{ A}$. Z toho důvodu jsem měřil pouze impulzy do 2 kV tak, abych tento maximální proud nepřekročil. U tranzistorů jsem pak měřil pouze do 0,3 kV, aby nedošlo k jejich proudovému přetížení. Tranzistor 1,5KE33CA má podle datasheetu dovolený proud $I_{pp} = 33 \text{ A}$ a tranzistor 1,5KE68CA má $I_{pp} = 16,3 \text{ A}$. Při měření jsem odečítal hodnoty maximálního napětí a proudu. U tranzistorů a varistorů jsem pak ještě odečítal hodnotu ustáleného omezeného napětí po odeznění největších kmitů v $t = 40 \text{ ns}$. U jiskřišť jsem odečítal pouze maximální hodnoty, protože ihned po zapálení oblouku klesne napětí k 0.



Obr. 27 Omezené napětí Surge signálu na jednotlivých ochranách

U_p naměřená hodnota napětí omezeného impulsu

U_{zk} zkušební napět'ový impuls

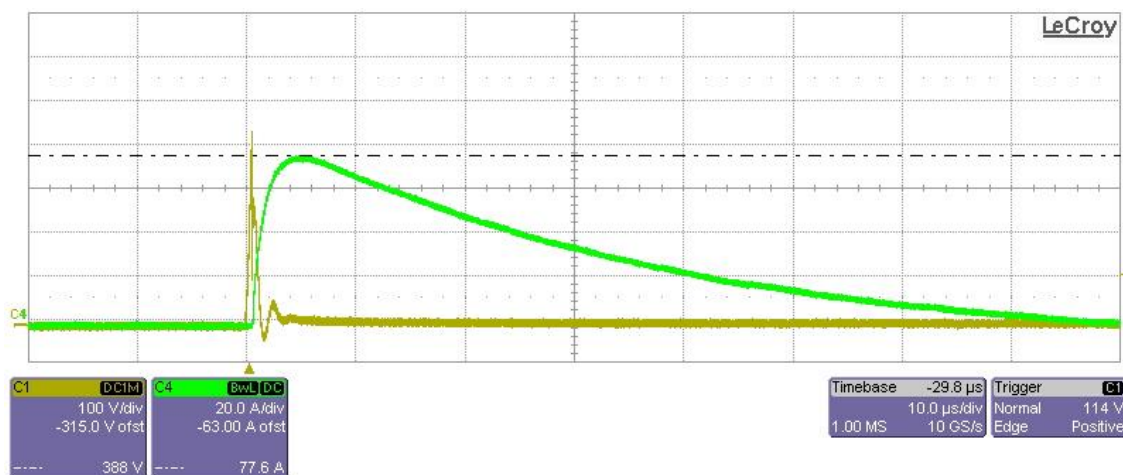


Obr. 28 Surge test – impuls 1 kV naprázdno

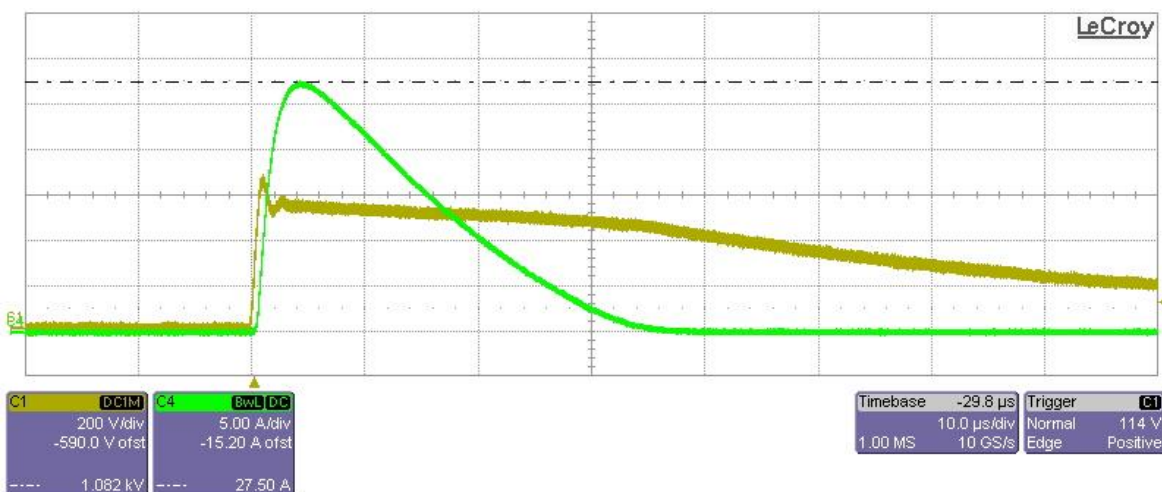
U jiskřišť docházelo ihned po zareagování k poklesu napětí na 0 V. Čím větší byl napět'ový impuls, tím rychleji docházelo k zapálení oblouku a useknutí rázového impulsu. Podle datasheetu bylo zápalné napětí (hranice, od které začíná jiskřiště reagovat) pro jiskřiště CG90L = 600 V a pro jiskřiště EPCOS 230030 = 700 V, avšak při měření reagovala obě jiskřiště již na impuls 500 V a odváděla většinu proudu do země.

Naopak varistory při těchto malých napět'ových impulsích vůbec nereagovaly. Podle datasheetu je otevírací napětí varistoru VCR14D431 = 430 V a varistoru VCR14D681 = 680 V. První zmiňovaný reagoval až při napět'ovém impulsu 600 V a druhý při impulsu 1 kV.

U varistoru VCR14D431 docházelo navíc k výrazným napěťovým překmitům – při impulsu 2 kV to bylo 208 V. Proudů svedených do země byly u varistorů menší než u jiskříšť, což je způsobeno tím, že na jiskřičce po otevření klesne napětí k 0, zatímco na varistoru se pouze sníží na určitou ustálenou hodnotu. Tento rozdíl je patrný z *Obr. 29* a *Obr. 30* (žlutou barvou je zobrazen průběh napětí a zelenou barvou průběh proudu).

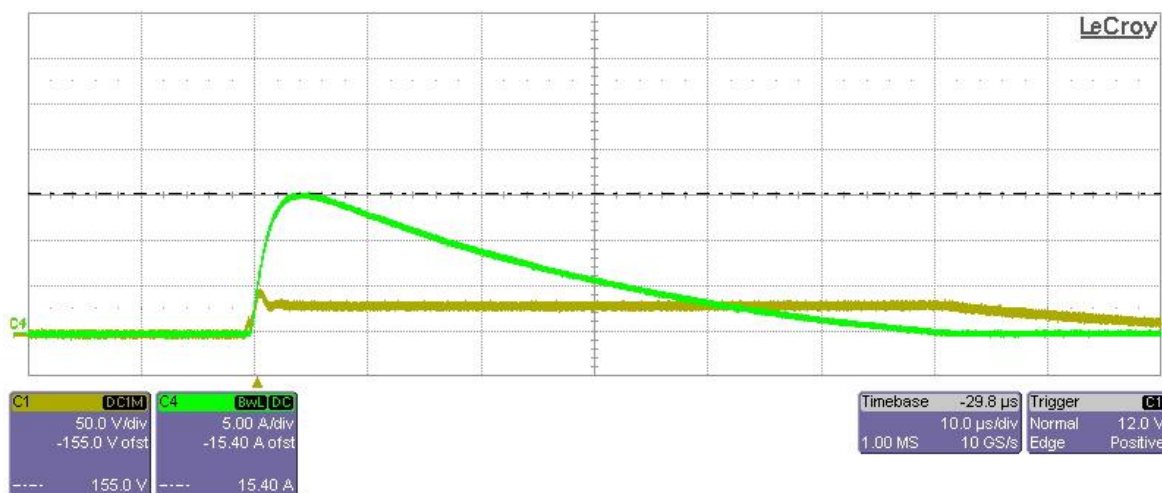


Obr. 29 Surge test – impuls 1 kV na jiskřičce EPCOS 230030

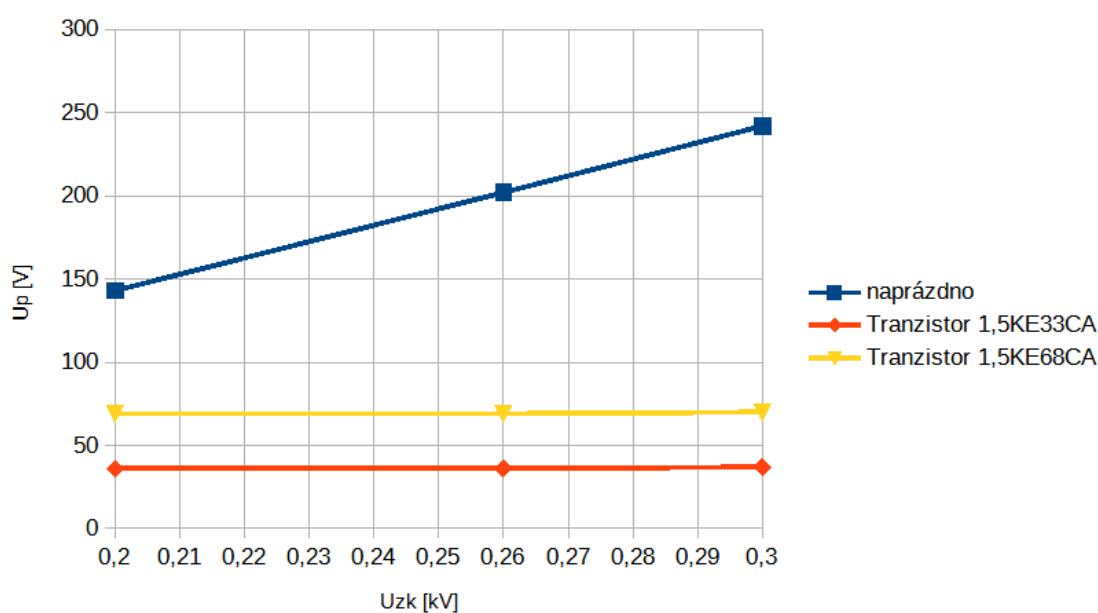


Obr. 30 Surge test – impuls 1 kV na varistoru VCR14D431

Tranzistory stejně jako varistory omezují přepětový impuls na určitou hodnotu ustáleného napětí. Na rozdíl od nich jsou však určeny pouze na nižší hodnoty přepětí. Podle data-sheetu omezuje tranzistor 1,5KE33CA napětí na hodnotu 35 V a tranzistor 1,5KE68CA na hodnotu 71 V, což se při měření potvrdilo a oba tranzistory omezovaly spolehlivě podle svých katalogových parametrů. Napěťový překmit u tranzistoru 1,5KE33CA při 260 V impulsu byl 12 V.



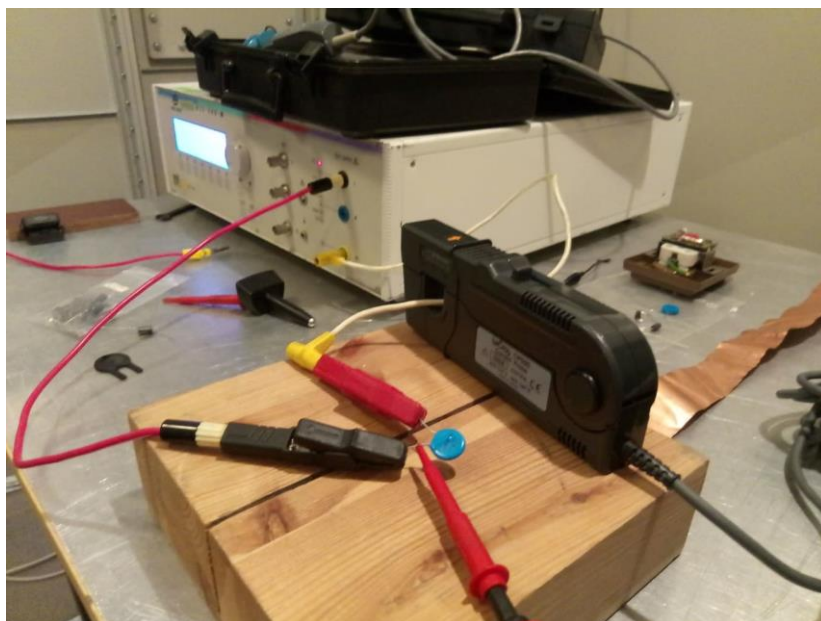
Obr. 31 Surge test – impulz 260 V na tranzistoru 1,5KE33CA



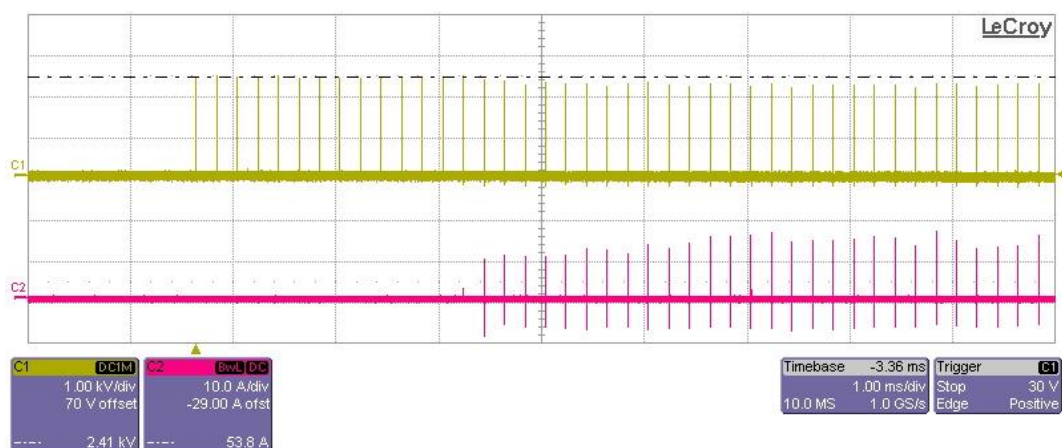
Obr. 32 Omezené napětí Surge signálu na tranzistorech

6.3 Burst test

Burst testem jsem ověřoval schopnost ochran omezit spínací přepětí. Toto přepětí má menší energii než atmosférický impulz, ale svým průběhem může rušit sdělovací nebo řídicí obvody nebo zničit jemnou elektroniku. Zdrojem impulzů byl opět univerzální generátor EM TEST UCS500–M. V tomto případě bylo napětí impulzů zvyšováno až do 4 kV, tedy maximálního napětí generátoru. Hodnoty odvedeného proudu byly menší než u Surge testu, apřo jsem použil proudovou sondu LeCroy AP015 s proudovým omezením $I_{\text{peak}} = 50$ A.

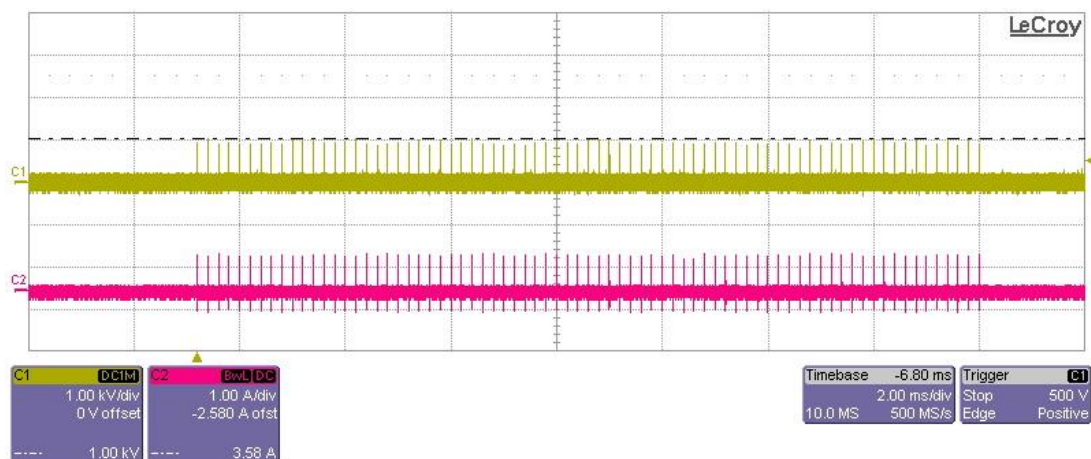


Obr. 33 Zapojení pro Burst test na varistoru

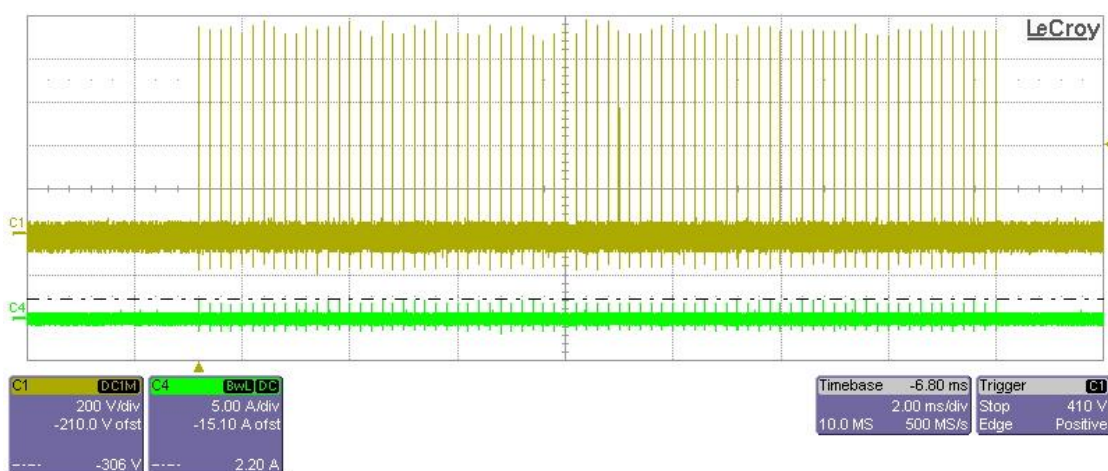


Obr. 34 Burst test na jiskřišti EPCOS 230030 při 1 kV impulzech – průběh napětí (žlutá) a proudu (růžová)

Z Obr. 34 je patrné, že jiskřiště reagovalo na Burst signál až po proběhnutí cca 1/3 impulzů ze skupiny. Pro zapálení oblouku je totiž zapotřebí větší množství energie, než kolik jí obsahuje jeden impulz. Až po průchodu několika impulzů dojde k nahromadění dostatečného množství energie pro zapálení oblouku a začne protékat proud do země. Z toho důvodu projdou první impulzy přes jiskřiště téměř bez omezení. Naopak reakce varistorů a tranzistorů na Burst signál je ucelená a lineární, už od nízkých hodnot přepětí omezují a odvádí proud viz. Obr. 35 a Obr. 36. Varistory však toto přepětí omezovaly pouze minimálně, což je vidět na průběhu proudu, který odpovídá množství energie odvedené do země.



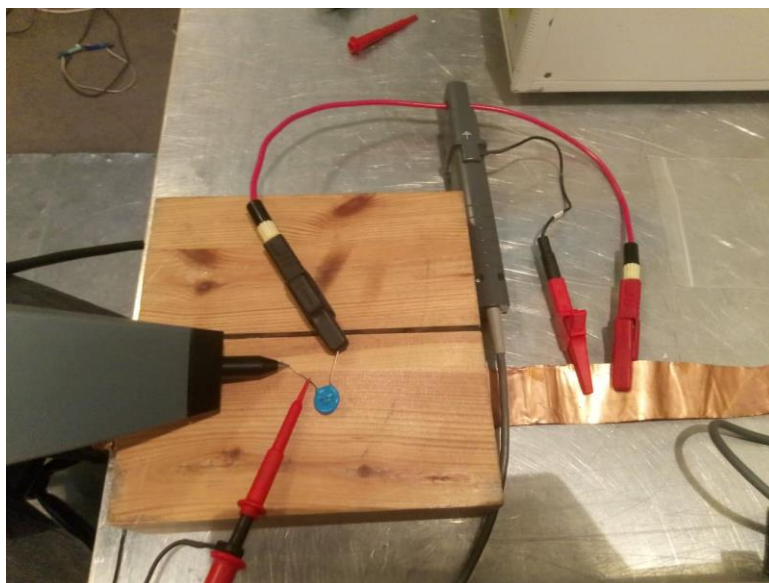
Obr. 35 Burst test na varistoru VCR14D681 při 1 kV impulzech – průběh napětí (žlutá) a proudu (ružová)



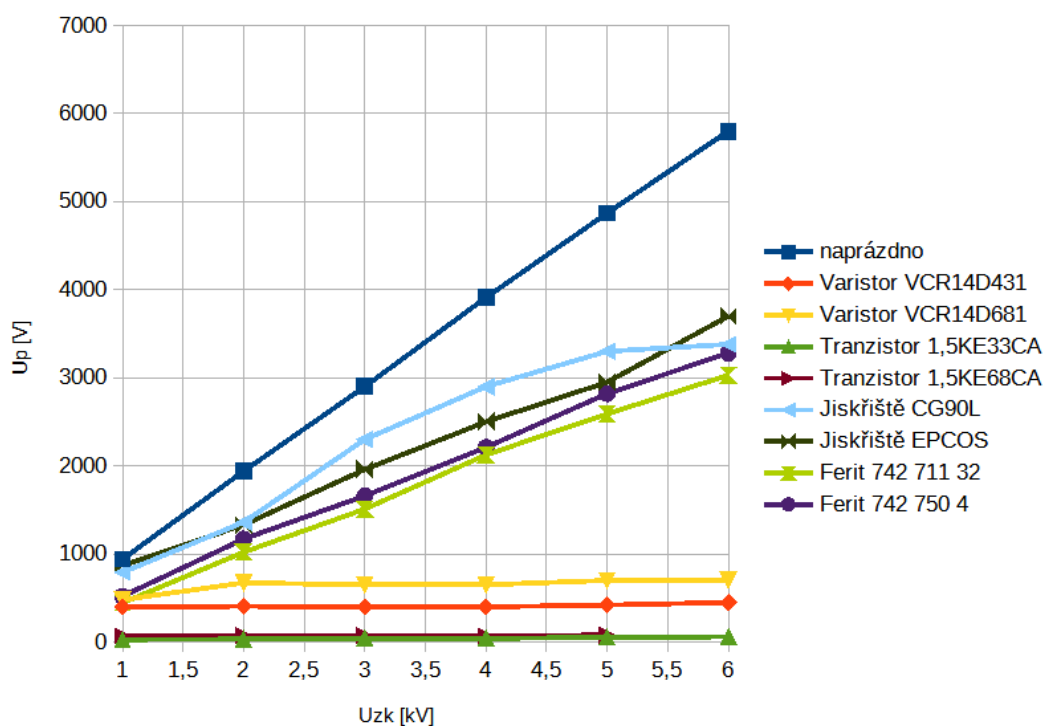
Obr. 36 Burst test na tranzistoru 1,5KE33CA při 1 kV impulzech – průběh napětí (žlutá) a proudu (zelená)

6.4 ESD test

Tento test jsem prováděl metodou kontaktního výboje. Zdrojem výbojů byl jednofázový generátor EM TEST ESD 30 a pro kontaktní výboj jsem použil pistoli se špičatým hrotem a maximálním napětím 8 kV. Měření jsem prováděl do 6 kV tak, aby nedošlo k poškození napěťové sondy LeCroy PPE 6 kV. U tranzistoru 1,5KE68CA jsem pak měřil pouze do 5 kV, abych nepřekročil maximální dovolený proud tranzistorem ($I_{pp} = 16,3 \text{ A}$). Při jeho měření jsem se dostal až na hodnotu 17,5 A, takže došlo ke krátkodobému přetížení, avšak neohrozilo funkčnost tranzistoru. V průběhu měření jsem opět odečítal hodnoty maximálního napětí a proudu, u varistorů a tranzistorů pak také navíc hodnotu ustáleného napětí po odeznění největších kmitů v $t = 40 \text{ ns}$.



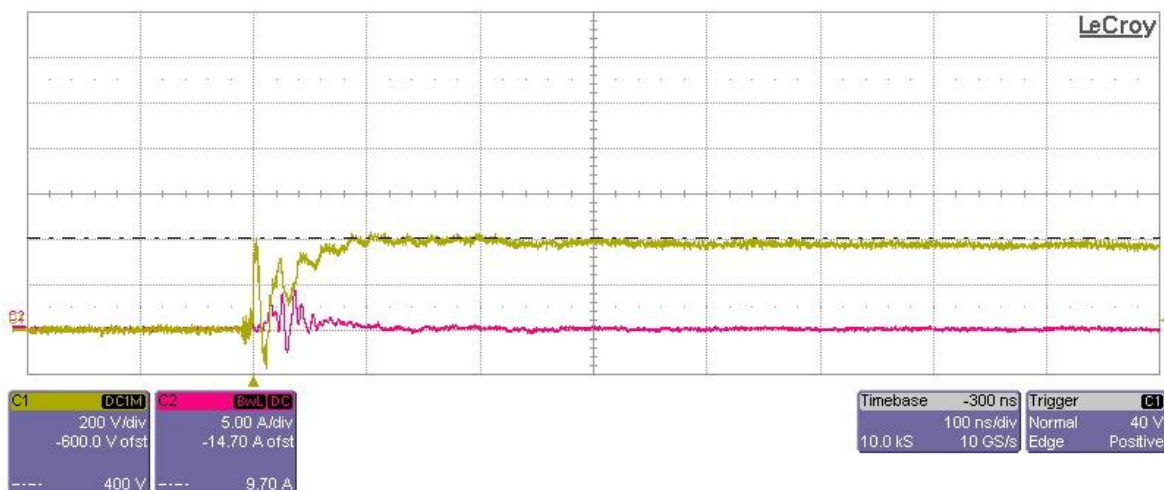
Obr. 37 měření ESD testu na varistoru



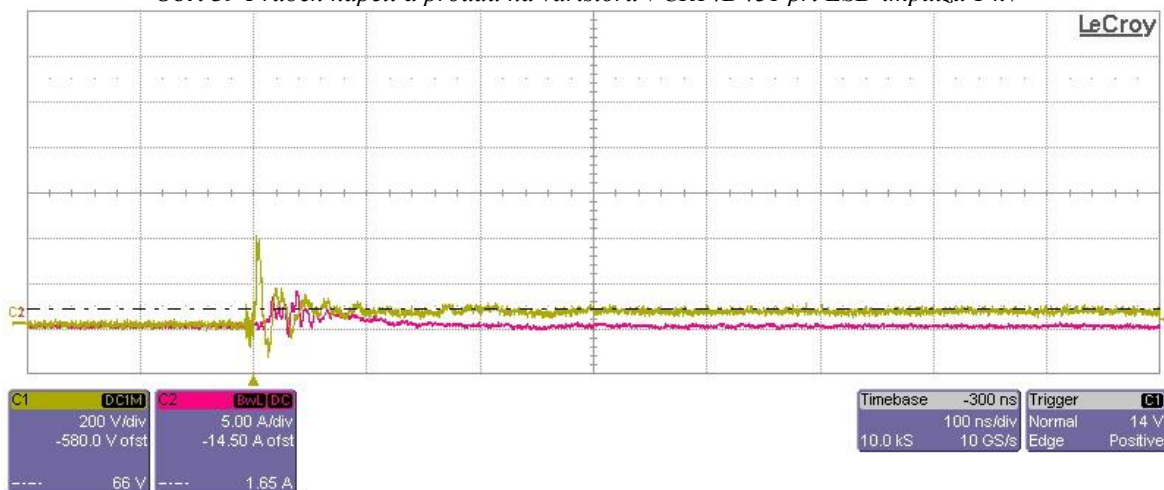
Obr. 38 Srovnání omezení napěťového impulsu jednotlivých ochran

K největšímu napěťovému omezení docházelo na tranzistoru 1,5KE33CA, což je patrné z Obr. 38. Při 5 kV impulsu byla naměřená hodnota napětí 55 V. Naopak k nejmenšímu omezení přepětí docházelo na jiskřišti CG90L, kde při 5 kV impulsu byla naměřená hodnota napětí 3300 V.

Tranzistory i varistory omezovaly napětí po počátečním překmitu vždy na určitou ustálenou hodnotu, avšak u varistorů bylo toto napětí vždy vyšší, protože se varistor v tomto případě choval jako nabitý kapacitor, viz *Obr. 39* a *Obr. 40* (žlutou barvou je znázorněn průběh napětí a růžovou barvou průběh proudu).

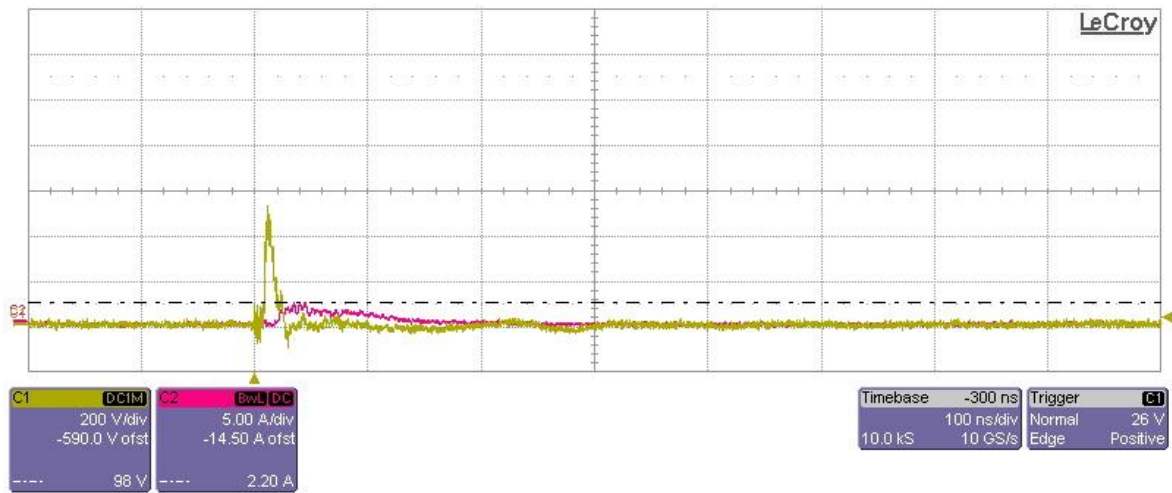


Obr. 39 Průběh napětí a proudu na varistoru VCRI4D431 při ESD impulzu 1 kV

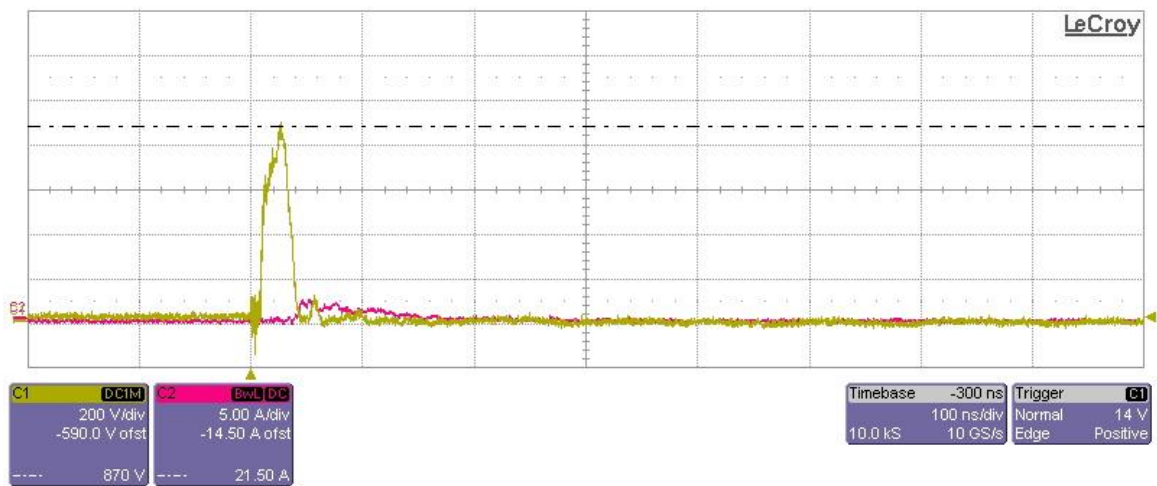


Obr. 40 Průběh napětí a proudu na tranzistoru 1,5KE68CA při ESD impulzu 1 kV

Naopak u feritových návleků a jiskřišť došlo ihned po jejich zapůsobení k rychlému poklesu napětí na 0, jak je patrné z *Obr. 41* a *Obr. 42*. Feritové návleky jsou narozdíl od ostatních ochran k chráněnému zařízení připojeny sériově. Neodvádí tedy procházející proud do země, ale omezují jej stejně jako napětí (v obvodu se chovají jako přídavná impedance). Na *Obr. 41* můžeme vidět omezení procházejícího proudu při 1 kV impulzu na 2,2 A, zatímco při spojení nakrátko byl změřen procházející proud 3,8 A.



Obr. 41 Průběh napětí a proudu na feritovém návleku 742 750 4 při ESD impulzu 1 kV



Obr. 42 Průběh napětí a proudu na jiskřišti EPCOS 230030 při ESD impulzu 1 kV

Závěr

V posledních letech je na kvalitu elektrické energie kladen velký důraz. Navíc se kvalita energie podílí na celkové stabilitě soustavy. Přepětí vznikající v elektrizační soustavě mohou tuto kvalitu výrazným způsobem snížit, a proto je důležité tato přepětí omezit na přípustnou mez.

Cílem této diplomové práce bylo popsat a vysvětlit vznik rušivých přepětových signálů vyskytujících se v energetické soustavě, uvést přehled používaných a také v současnosti se rozvíjejících ochranných zařízení s vysvětlením principu jejich činnosti. Dále byly popsány principy ověřování funkce elektrických ochranných prvků proti různým typům přepětí. V praktické části této práce jsem pak analyzoval reakce osmi ochranných prvků na různé typy přepětových signálů. Kromě rázového impulzu, na který jsou ochrany dimenzovány, jsem otestoval i Burst signál simulující spínací přepětí a také ESD impulz simulující přepětí statické elektriny. Pro srovnání reakcí jednotlivých ochranných prvků jsem testoval jiskřiště, varistory, tranzistory a u ESD signálu ještě navíc feritové návleky.

Na rázový impulz reagovala jiskřiště již od nižších přepětových impulzů (cca 500 V) a čím vyšší napětí měly impulzy, tím rychlejší bylo zapálení oblouku a „useknutí“ přepětového impulzu. Navíc po zareagování ochrany došlo k poklesu napětí k 0 a odvedení velké části proudu do země. Proto jsou jiskřiště vhodná jako přepětové ochrany 1. stupně. Naopak varistory otevíraly až při 600, resp. 1000 V, a také odváděly menší proud. To je způsobeno tím, že tyto ochrany přepětový impulz „oříznou“, a sníží tak napětí na určitou ustálenou hodnotu. Proto se varistory využívají jako přepětová ochrana 2. stupně. Tranzistory pak dokázaly omezit přepětový impulz až na hodnotu napětí 35, resp. 70 V, ale přivedený impulz nesměl překročit 0,3 kV, aby nedošlo k jejich zničení. Z toho důvodu jsou tranzistory vhodné jako 3. stupeň přepětové ochrany a využívají se zejména jako ochrana jemné elektroniky. Z hlediska rychlosti působení reagovaly nejdříve tranzistory, poté varistory a nejpomaleji na přepětový impulz reagovala jiskřiště.

U Burst signálu reagovalo jiskřiště až po proběhnutí cca 1/3 impulzů, kdy došlo k nahromadění dostatečného množství energie pro zapálení oblouku. Díky tomu se však velká část přepětí dostala až za ochranu. Naopak tranzistory v tomto případě reagovaly ihned a od počátku omezovaly napětí a odváděly proud do země. Varistory se ukázaly jako nevhodná ochrana na tento typ přepětí, protože odváděly pouze malou část energie.

Na ESD impulz reagovala jiskřiště opět rychlým zapálením oblouku a „useknutím“ impulzu, zatímco varistory snižovaly napětí na určitou ustálenou hodnotu. Nejlépe na tento impulz reagovaly tranzistory, které při 5 kV impulzu omezovaly napětí na 55, resp. 80 V. U tohoto testu jsem ještě navíc testoval dva feritové návleky, které jsou narozdíl od ostatních ochran připojeny k chráněnému zařízení sériově a neodvádí tedy proud do země, ale omezují jeho průchod obvodem. Průběh napětí na nich byl podobný jako na jiskřišti.

Analýzou působení jednotlivých ochran jsem prokázal, že jsou tyto ochrany schopné omezit nejen rázový impulz, ale také Burst signál a ESD impulz. Výsledky této práce mohou být využity pro seznámení se s danou problematikou, případně pro volbu vhodné přepětové ochrany na konkrétní aplikaci.

Seznam literatury a informačních zdrojů

- [1] SVAČINA, Jiří. *Elektromagnetická kompatibilita* [online]. 2002 [cit. 2020–11–14]. Dostupné z: https://home.pilsfree.net/fantom/FEL/EMC/EMC_skripta.pdf
- [2] KAZDEROVÁ, Jaroslava. *Elektromagnetická interference a její vyhodnocování*. B.m., 2010. Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně.
- [3] UZEL, Martin. *Elektromagnetická kompatibilita energetických zařízení*. 2012. Západočeská univerzita v Plzni.
- [4] DŘÍNOVSKÝ, Jiří, Tomáš FRÝZA, Václav RŮŽEK a Jiří ZACHAR. *Elektromagnetická kompatibilita*. 2017.
- [5] VEVERKA, Antonín. *Technika vysokých napětí*. Praha: Nakladatelství technické literatury, 1982.
- [6] BENETKA, Tomáš. *Ochrana sítí NN, VN, VVN proti přepětí*. 2013. Západočeská univerzita v Plzni.
- [7] EFFENBERK, Kryštof. *Přepětí v elektrických sítích a ochrana elektrických zařízení proti přepětí*. B.m., 2015. Jihočeská univerzita v Českých Budějovicích.
- [8] JÍCHA, Zdeněk. *Ochrana před bleskem*. 2011. Západočeská univerzita v Plzni.
- [9] *Definice přepětí* [online]. [cit. 2020–10–26]. Dostupné z: <https://www.acervoltage.cz/cs/aplikace-pro-dopravni-podniky-a-zeleznice.html>
- [10] MALÝ, Jiří. *Přepětí v sítích vysokého napětí*. 2012. Západočeská univerzita v Plzni.
- [11] HORSKÝ, Pavel. Elektrostatický výboj a jeho vliv na spolehlivost integrovaných obvodů [online]. 2009 [cit. 2020–12–06]. Dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz/res/pdf/39904.pdf>
- [12] HUDEC, Jaroslav. *Přepětí a elektromagnetická kompatibilita*. Hradec Králové: HAKEL, 1996. ISBN 80–902201–0–X.
- [13] CHROMÝ, Stanislav. *Vazební mechanismy přenosů rušivých signálů*. 2013. Vysoké učení technické v Brně.
- [14] CHROMEČEK, Ivan. *Omezovače přepětí při nesinusovém napětovém namáhání*. 2019. České vysoké učení technické v Praze.
- [15] MUDRUŇKOVÁ, Anna. *Elektroenergetika 4 – poruchové stavy* [online]. [cit. 2021–02–26]. Dostupné z: <https://www.vovcr.cz/odz/tech/285/page01.html>
- [16] ŠTASTNÝ, Vítězslav. *Ochranné vlastnosti různých typů svodičů přepětí* [online]. 2010 [cit. 2021–03–01]. Dostupné z: <https://www.energetikainfo.cz/33/ochranné-vlastnosti-různých-typů-svodice-prepeti-uniqueidmRRWSbk196FNf8-jVUh4EIDzobldhBp5IIC9ZoQivej2ZspOsA8wwA/>
- [17] SHRIVASTAVA, S., A. ARORA, V. VARSHNEY a S. SAVITA. *Přepětová a podpětová ochrana zátěže pomocí GSM modemu SMS Alert* [online]. 2018. Dostupné z: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8897428>
- [18] DUNOVSKÝ, Ondřej. *Vliv parametru napětového impulsu na průrazné chování izolace*. 2018. Západočeská univerzita v Plzni.
- [19] ZEMAN, Martin. *Reprodukovatelnost výsledků při měření průrazného napětí izolačního média*. 2015. Západočeská univerzita v Plzni.
- [20] BRÝDL, Ondřej. *Automatizovaný systém pro měření a vyhodnocení impulzních zkoušek*. 2013.
- [21] BYSTRICKÝ, Tomáš. *Analýza působení přepětových ochran*. 2014. Západočeská univerzita v Plzni.

Příloha A: Tabulky

Tabulka 1: Naměřené hodnoty Surge testu

	naprázdno	nakrátko	Varistor VCR14D431				Varistor VCR14D681				Jiskřiště CG90L		Jiskřiště EPCOS 230030	
Uzk(kV)	U _{max} (V)	I _{max} (A)	U _{max} (V)	U _p (V)	I _{max} (A)	β(V)	U _{max} (V)	U _p (V)	I _{max} (A)	β(V)	U _{max} (V)	I _{max} (A)	U _{max} (V)	I _{max} (A)
0,5	440	36,2	429	429	0	0	435	435	0	0	388	35,7	433	35,7
1	918	78,2	678	546	27,5	132	896	896	5,64	0	336	76	438	77,6
1,5	1370	117,5	744	580	64,2	164	1050	1050	37,7	0	300	116,8	380	116,8
2	1915	156,8	802	594	102,4	208	1130	1130	75	0	287	155	342	156

	naprázdno	nakrátko	Tranzistor 1,5KE33CA				Tranzistor 1,5KE68CA			
Uzk(kV)	U _{max} (V)	I _{max} (A)	U _{max} (V)	U _p (V)	I _{max} (A)	β(V)	U _{max} (V)	U _p (V)	I _{max} (A)	β(V)
0,2	143	14,75	47,5	36	11,68	11,5	85,5	69	8,5	16,5
0,26	202	18,12	48	36	15,4	12	90	69	12,5	21
0,3	242	22,2	54	37	19,3	17	91	70	16	21

Tabulka 2 Naměřené hodnoty Burst testu

	naprázdno	nakrátko	Varistor VCR14D431				Varistor VCR14D681			
Uzk(kV)	U _{max} (V)	I _{max} (A)	U _{max} (V)	U _{min} (V)	I _{max} (A)	I _{min} (A)	U _{max} (V)	U _{min} (V)	I _{max} (A)	I _{min} (A)
1	1	1,47	1	0,88	0,94	0,8	1	0,83	0,9	0,8
2	1,91	2,32	1,95	1,77	1,83	1,61	1,96	1,85	1,7	1,9
3	2,86	3,28	2,96	2,73	2,82	2,36	2,9	2,79	2,64	2,28
4	3,84	4,13	3,86	3,73	3,64	3,28	3,92	3,68	3,52	3,1

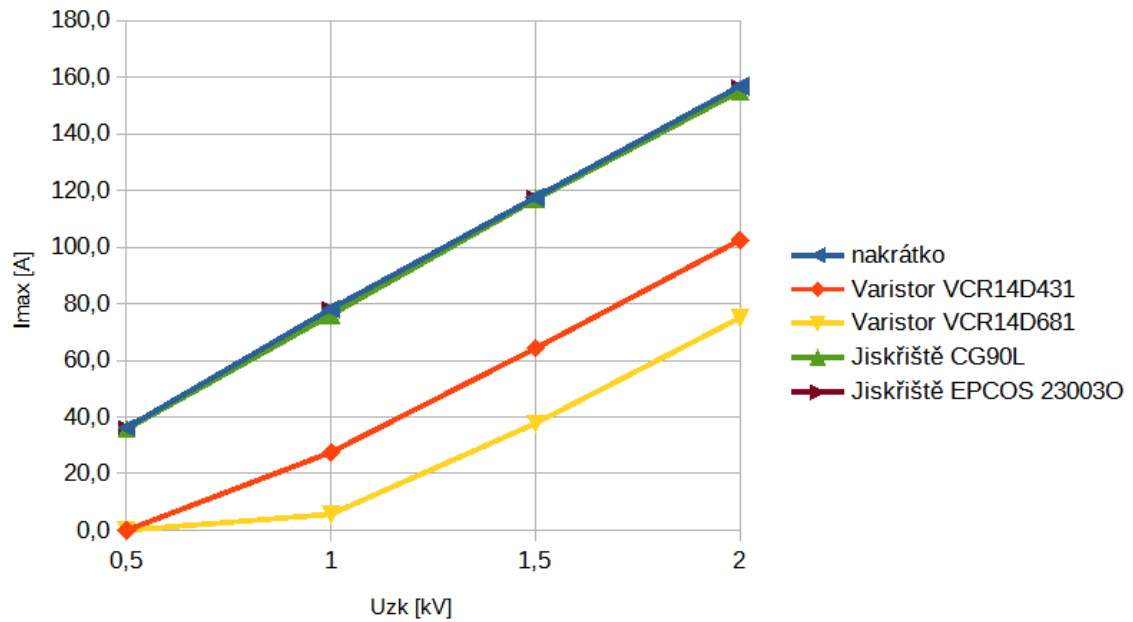
	Tranzistor 1,5KE33CA				Tranzistor 1,5KE68CA				Jiskřiště CG90L				Jiskřiště EPCOS 230030			
Uzk(kV)	U _{max} (V)	U _{min} (V)	I _{max} (A)	I _{min} (A)	U _{max} (V)	U _{min} (V)	I _{max} (A)	I _{min} (A)	U _{max} (V)	U _{min} (V)	I _{max} (A)	I _{min} (A)	U _{max} (V)	U _{min} (V)	I _{max} (A)	I _{min} (A)
1	0,98	0,91	2,2	1,8	1	0,91	1,95	1,72	1	0,89	1,31	1,05	1	0,85	0,8	0,69
2	1,94	1,84	4,2	3,75	1,95	1,86	3,66	3,48	1,95	1,82	2,62	2,38	1,92	1,74	1,76	1,24
3	3	2,8	5,6	5,25	2,95	2,8	5,6	5,1	2,89	2,66	4,1	3,78	2,89	2,68	2,8	2,05
4	3,93	3,77	7,1	6,75	3,96	3,75	6,95	6,5	3,85	3,6	5,35	4,8	3,8	3,5	3,3	3

Tabulka 3 Naměřené hodnoty ESD testu

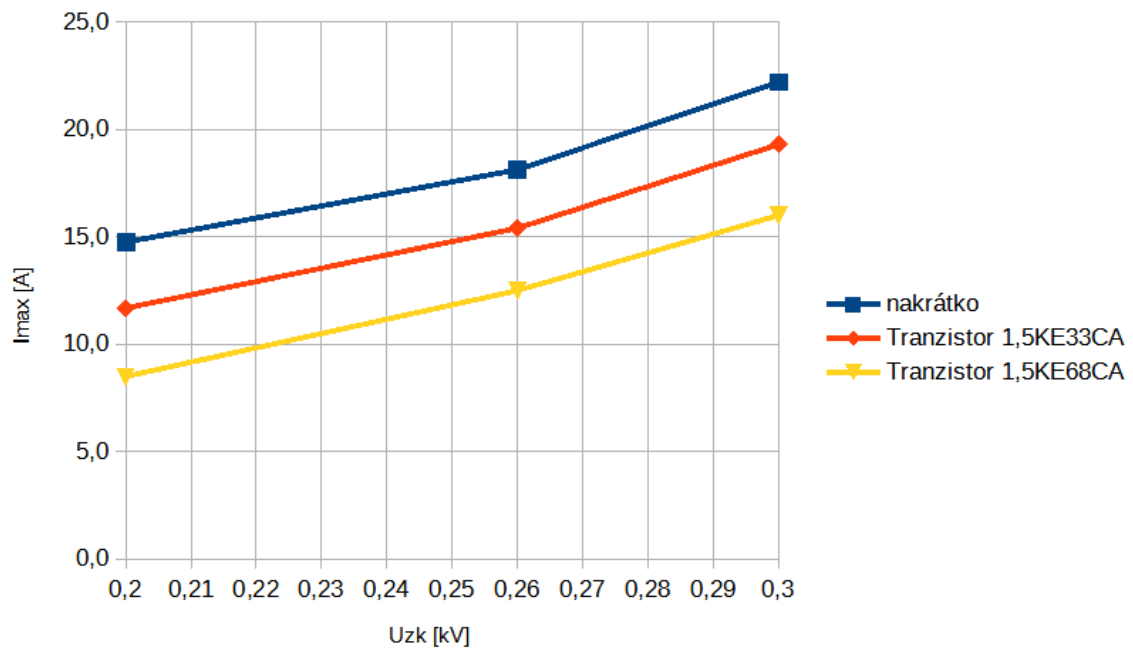
	naprázdno	nakrátko	Varistor VCR14D431			Varistor VCR14D681			Tranzistor 1,5KE33CA			Tranzistor 1,5KE68CA		
<i>Uzk(kV)</i>	<i>Umax(V)</i>	<i>Imax(A)</i>	<i>Umax(V)</i>	<i>Up(V)</i>	<i>Imax(A)</i>	<i>Umax(V)</i>	<i>Up(V)</i>	<i>Imax(A)</i>	<i>Umax(V)</i>	<i>Up(V)</i>	<i>Imax(A)</i>	<i>Umax(V)</i>	<i>Up(V)</i>	<i>Imax(A)</i>
1	940	3,8	400	400	3,8	480	480	2,6	360	28	3,2	380	66	3,5
2	1940	9,9	800	406	6,8	934	672	6,3	800	34	10	800	70	9,1
3	2900	14,3	1170	400	8,8	1170	650	10,9	1200	40	12,8	1140	72	12,1
4	3910	19,6	1500	400	13	1600	650	14,6	1550	40	13,5	1500	70	12,5
5	4870	26,9	2200	420	14,2	1910	700	15,4	1850	55	16,7	1890	80	17,5
6	5800	32	2450	450	20,6	2360	705	18,2	2300	60	24	–	–	–

	Jiskřiště CG90L		Jiskřiště EPCOS 230030		Ferit 742 711 32		Ferit 742 750 4	
<i>Uzk(kV)</i>	<i>Umax(V)</i>	<i>Imax(A)</i>	<i>Umax(V)</i>	<i>Imax(A)</i>	<i>Umax(V)</i>	<i>Imax(A)</i>	<i>Umax(V)</i>	<i>Imax(A)</i>
1	790	3,7	870	2,2	445	2,2	520	2,2
2	1360	8,4	1330	6,1	1020	5,5	1170	4,7
3	2300	10,8	1960	10,9	1510	9,4	1660	8,6
4	2900	12,8	2500	11,5	2125	13,4	2210	14,3
5	3300	16,9	2950	15,5	2590	16,9	2820	15,6
6	3380	20,8	3700	19,7	3030	20,1	3280	21,1

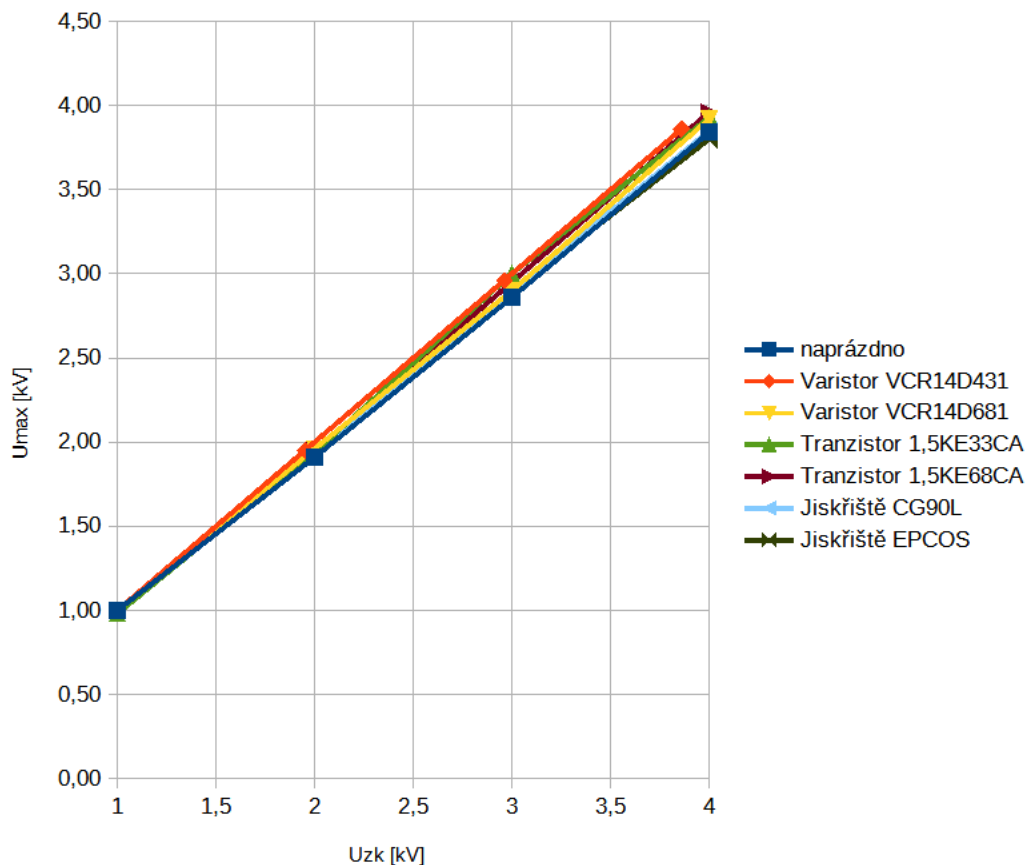
Příloha B: Grafy



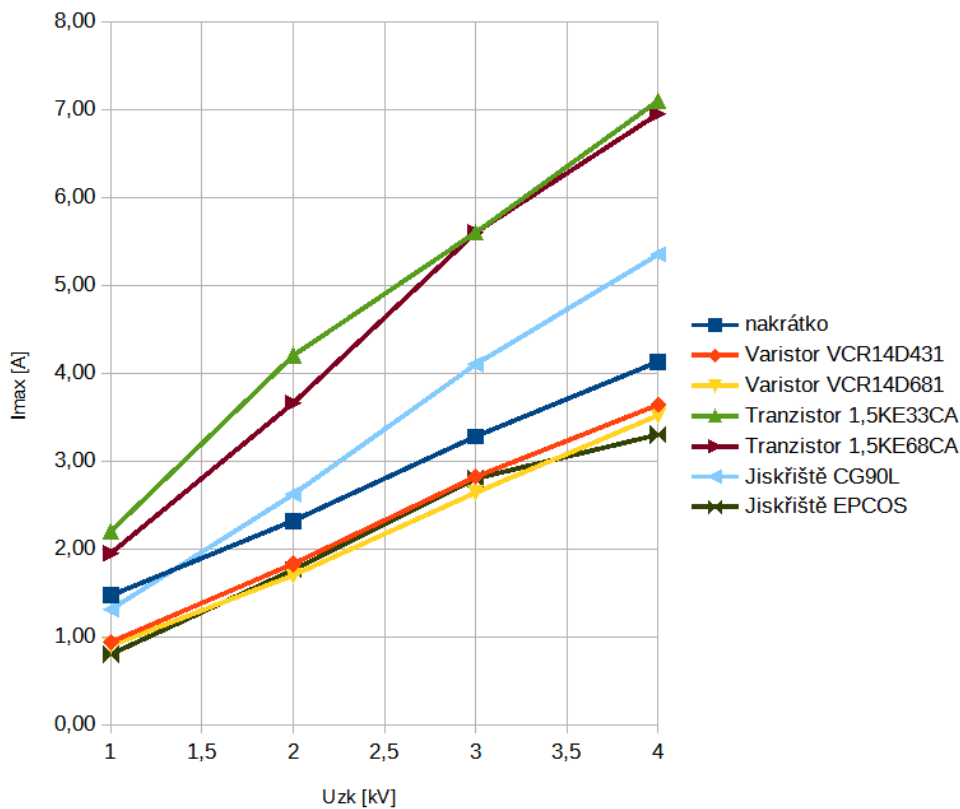
Obr. 43 Omezení proudu Surge signálu na jednotlivých ochranách



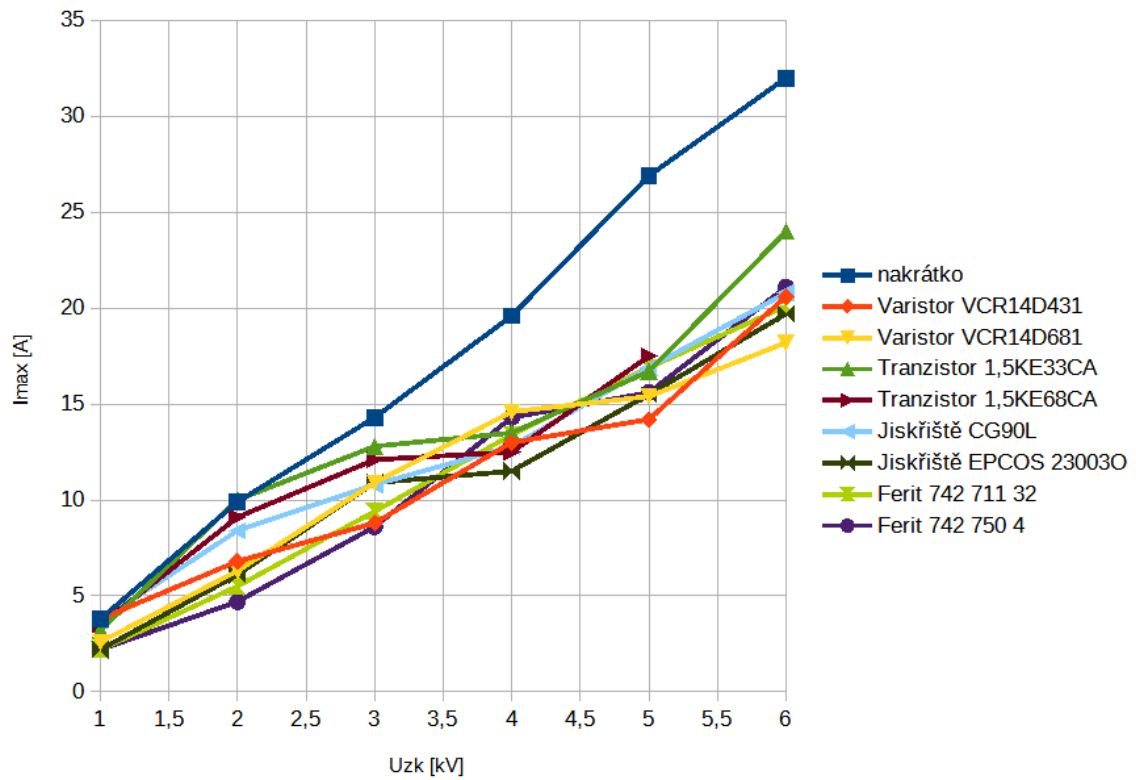
Obr. 44 Omezení proudu Surge signálu na tranzistorech



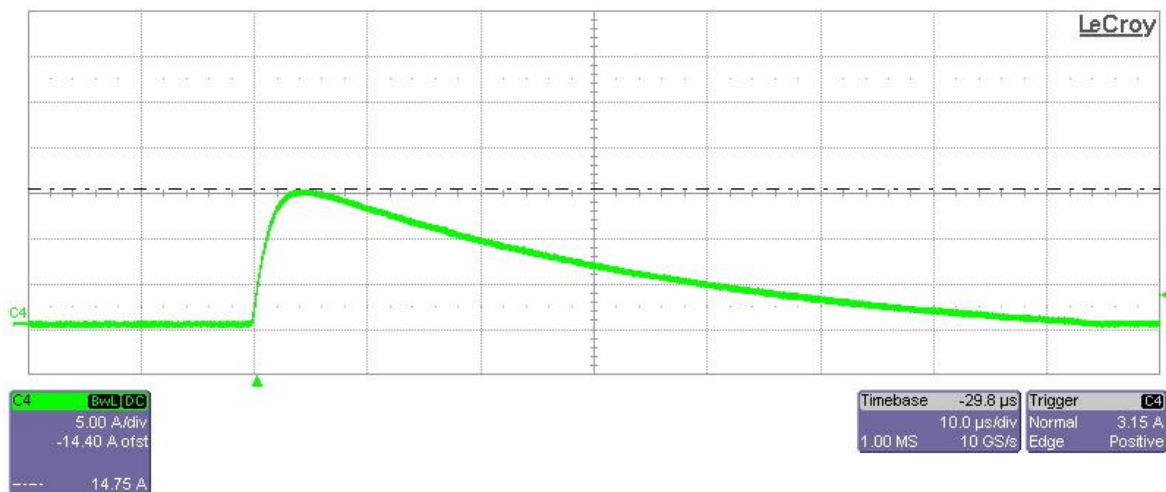
Obr. 45 Omezení napětí Burst signálu na jednotlivých ochranách



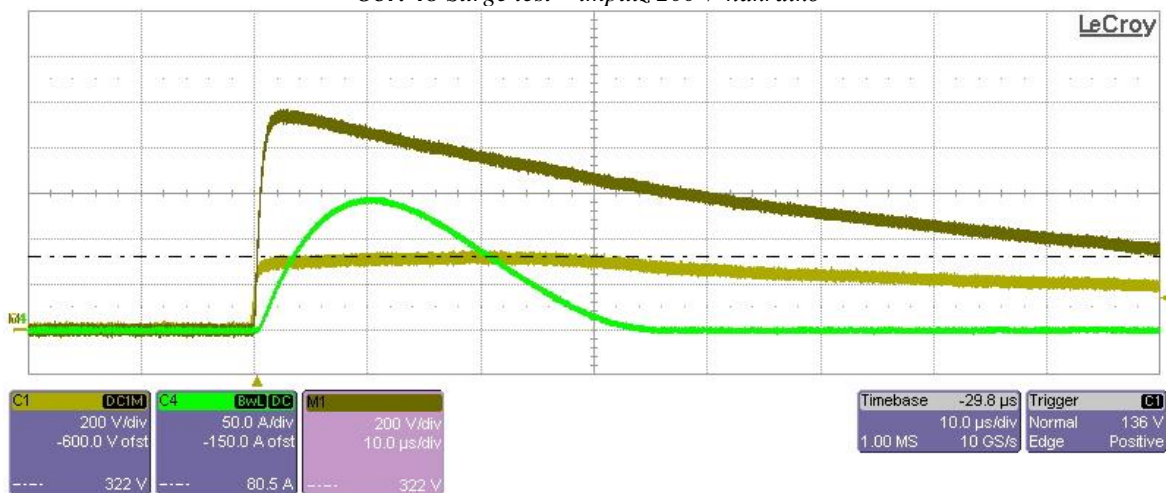
Obr. 46 Omezení proudu Burst signálu na jednotlivých ochranách



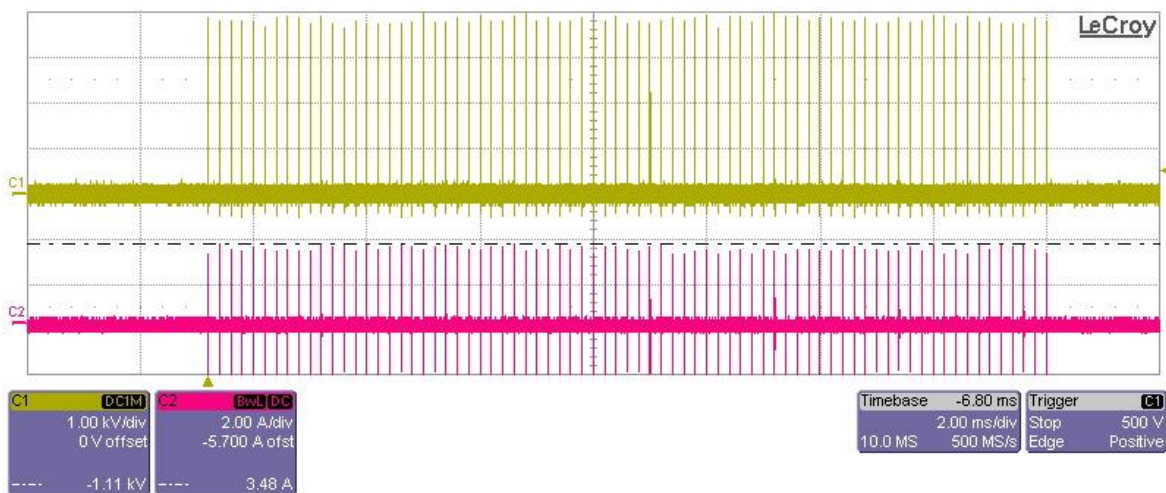
Obr. 47 Omezení proudu ESD impulzu na jednotlivých ochranách



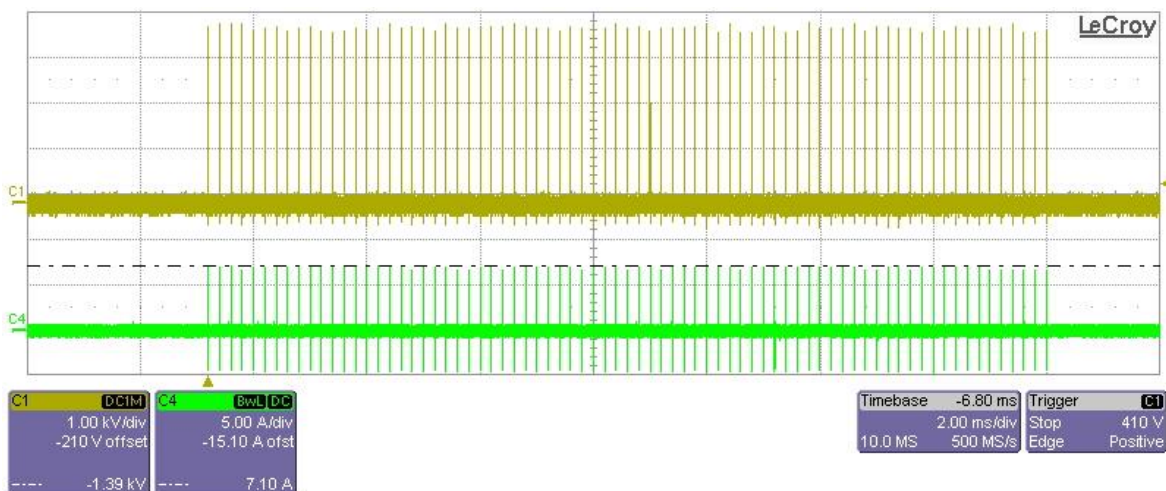
Obr. 48 Surge test – impulz 200 V nakrátko



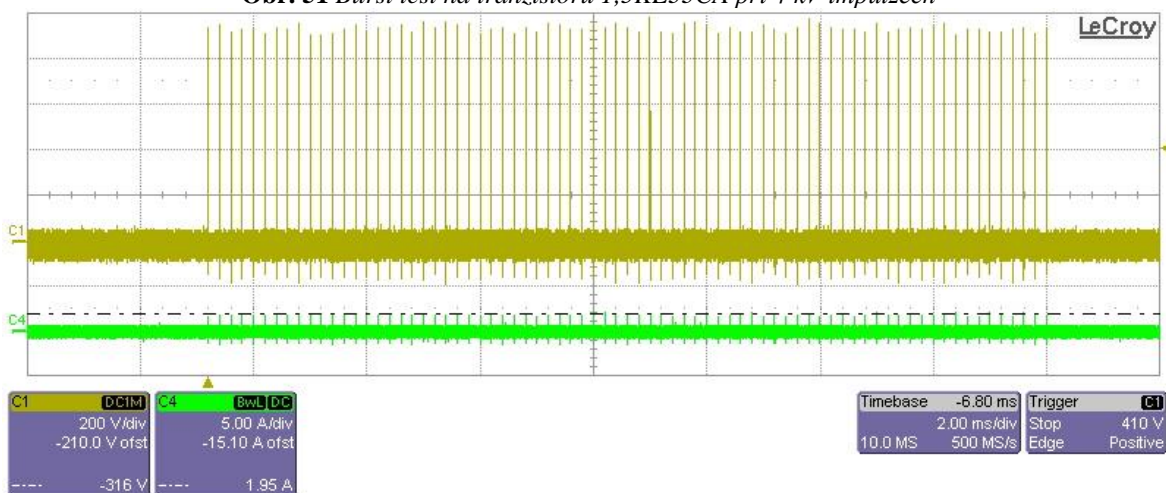
Obr. 49 Surge test – 1 kV srovnání varistoru VCRI4D431 s impulzem naprázdno



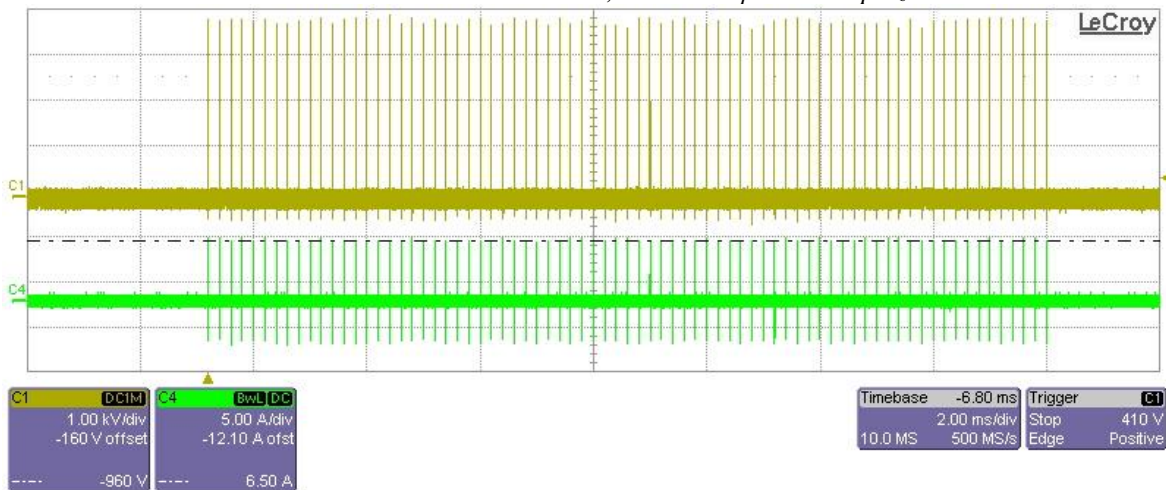
Obr. 50 Burst test na varistoru VCRI4D681 při 4 kV impulzech



Obr. 51 Burst test na tranzistoru 1,5KE33CA při 4 kV impulzech



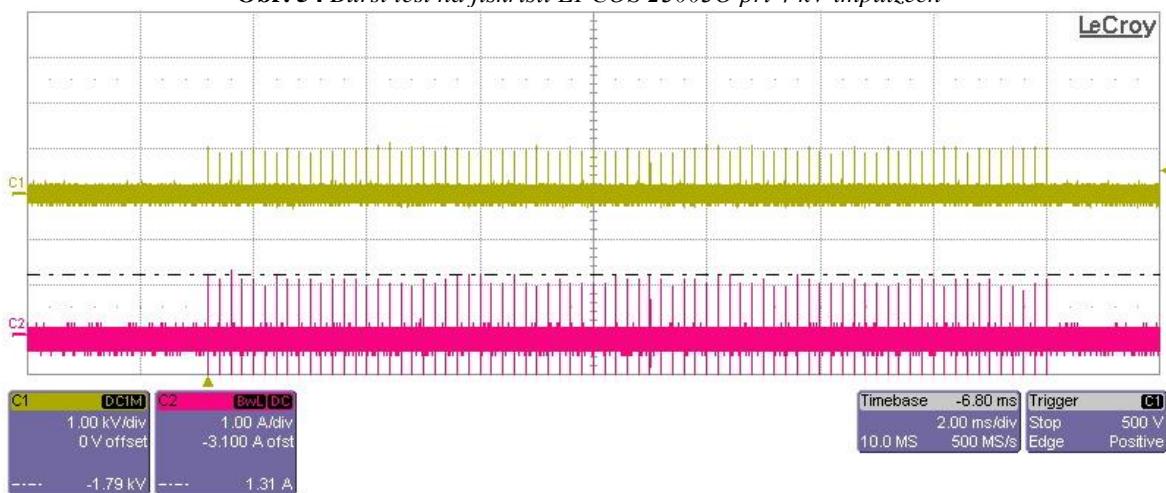
Obr. 52 Burst test na tranzistoru 1,5KE368CA při 1 kV impulzech



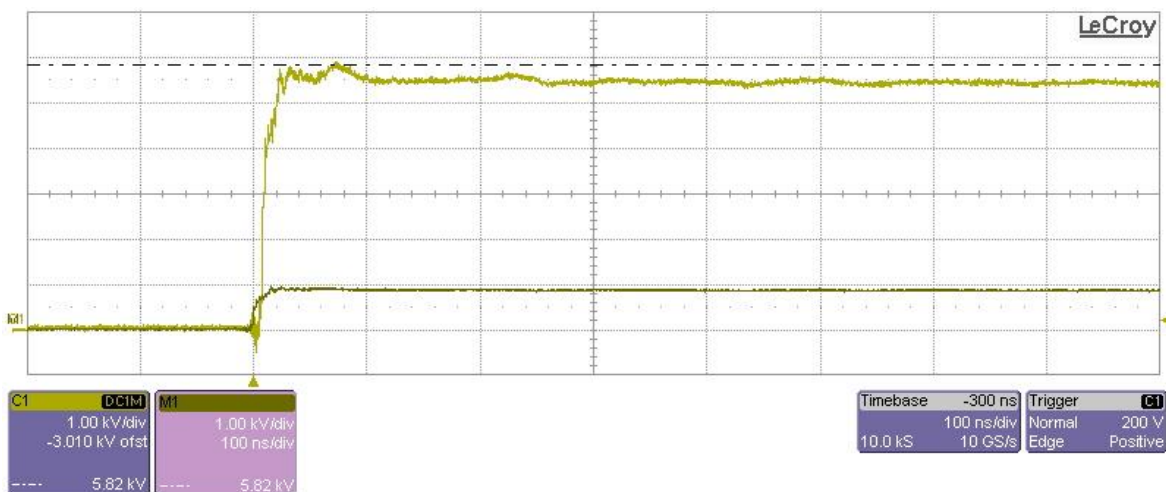
Obr. 53 Burst test na tranzistoru 1,5KE368CA při 4 kV impulzech



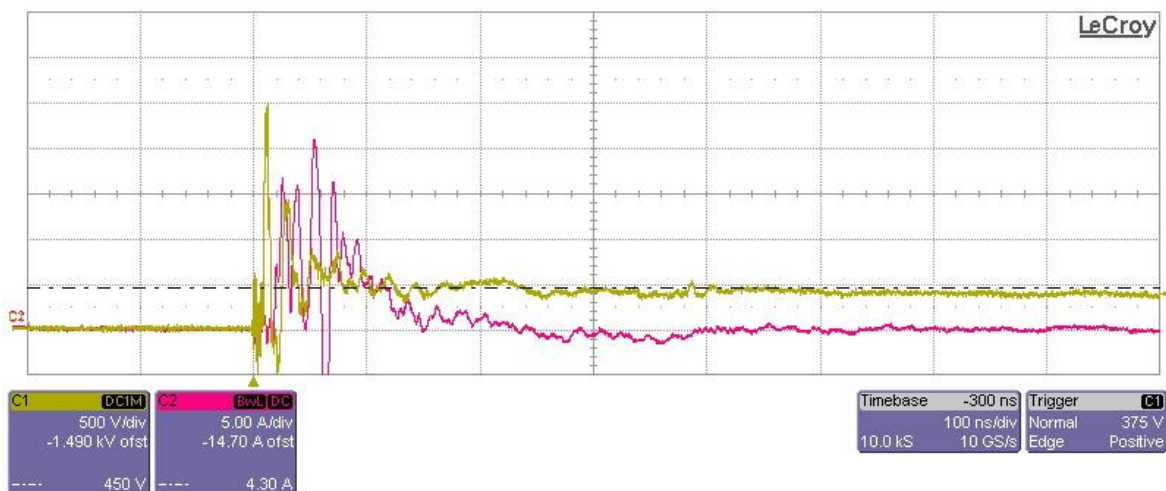
Obr. 54 Burst test na jiskřišti EPCOS 230030 při 4 kV impulzech



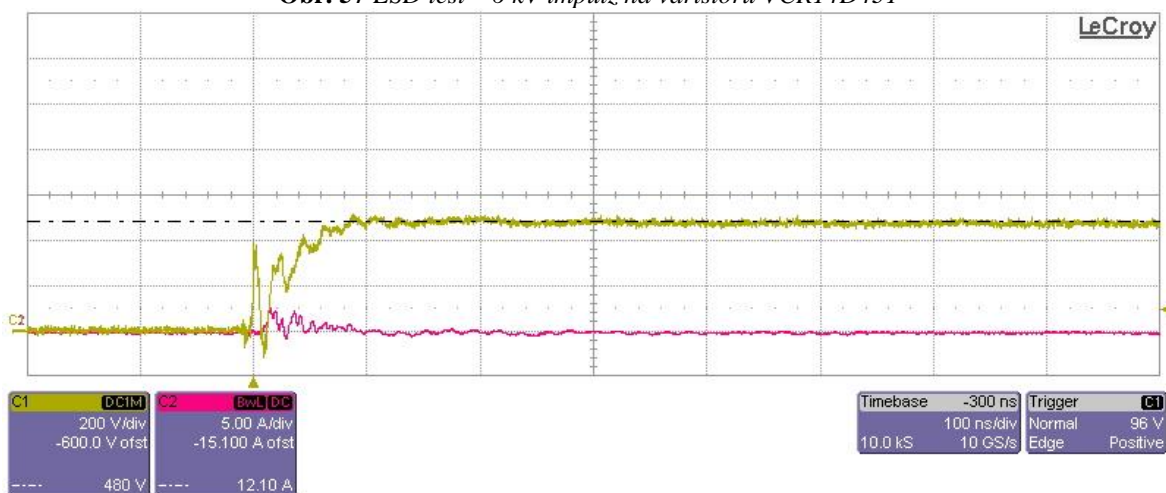
Obr. 55 Burst test na jiskřišti CG90L při 1 kV impulzech



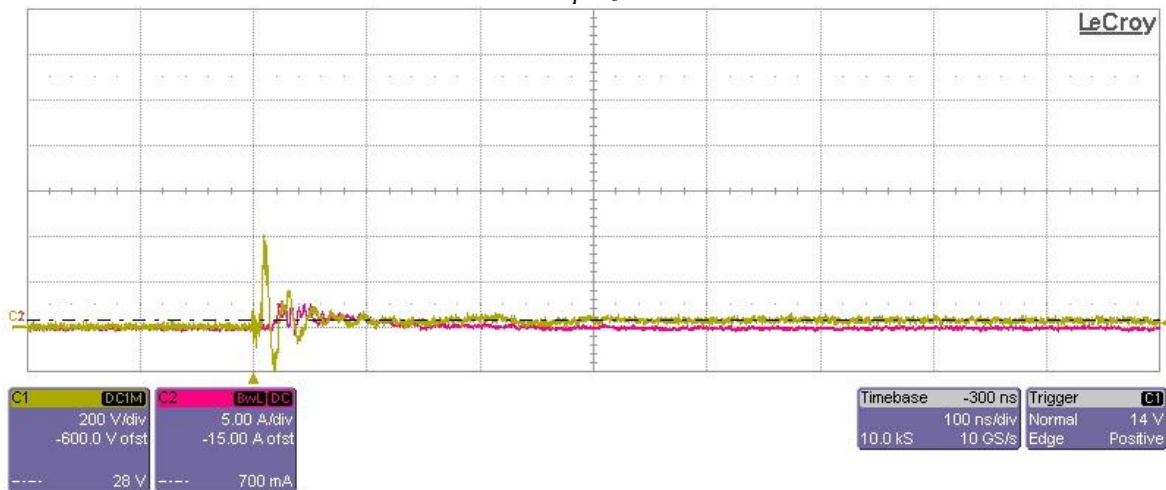
Obr. 56 ESD test – porovnání 1 kV a 6 kV impulzu naprázdno



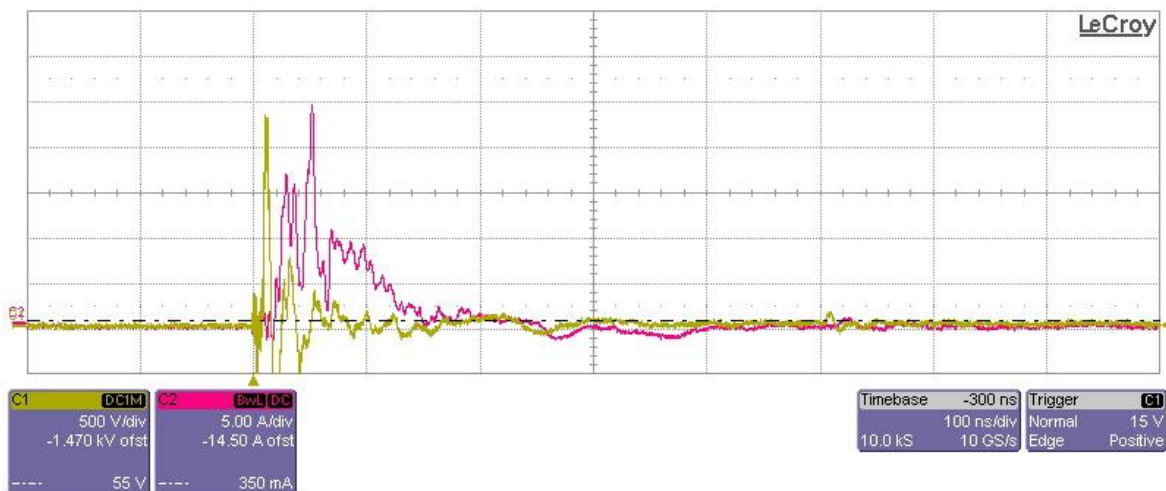
Obr. 57 ESD test – 6 kV impulz na varistoru VCR14D431



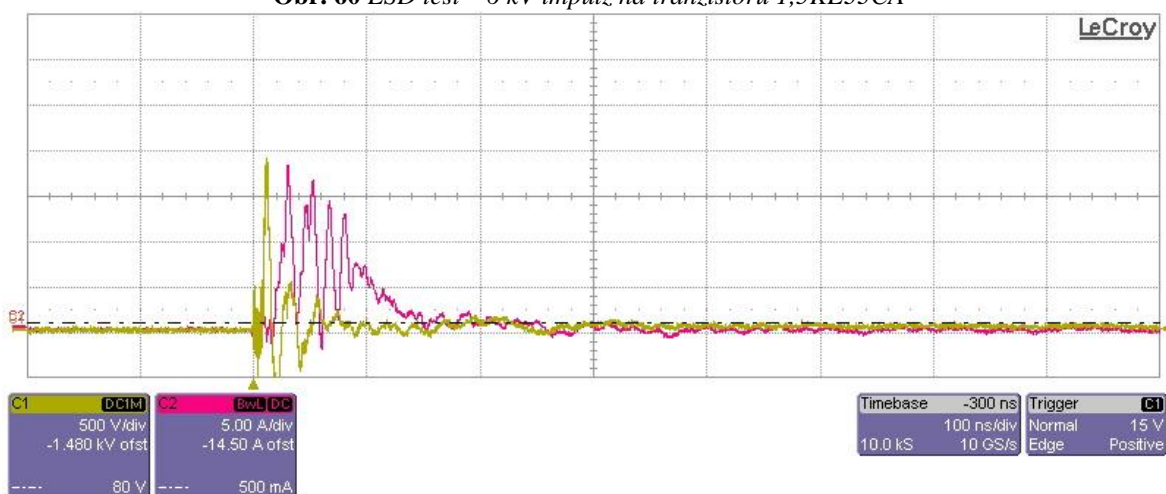
Obr. 58 ESD test – 1 kV impulz na varistoru VCR14D681



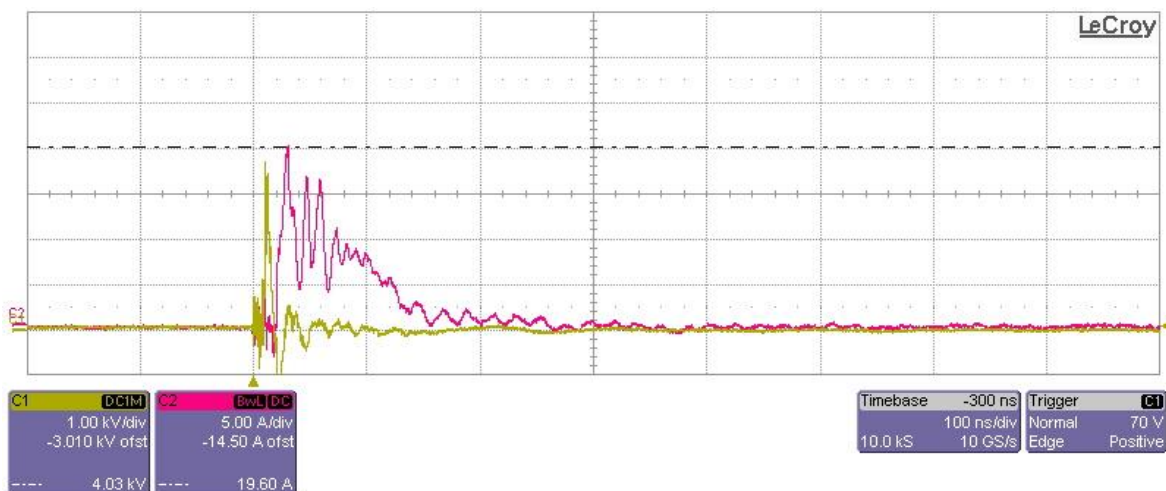
Obr. 59 ESD test – 1 kV impulz na tranzistoru 1,5KE33CA



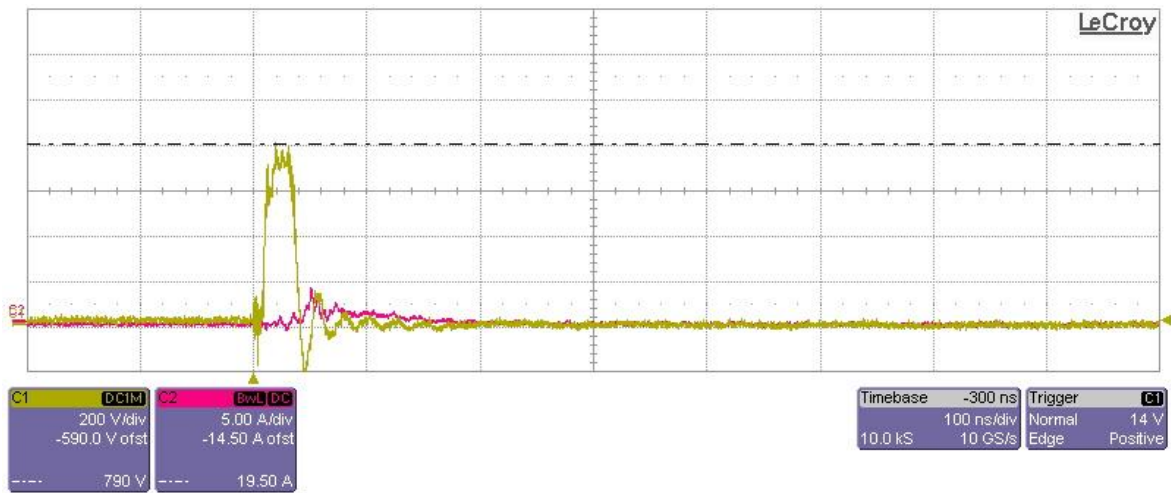
Obr. 60 ESD test – 6 kV impulz na tranzistoru 1,5KE33CA



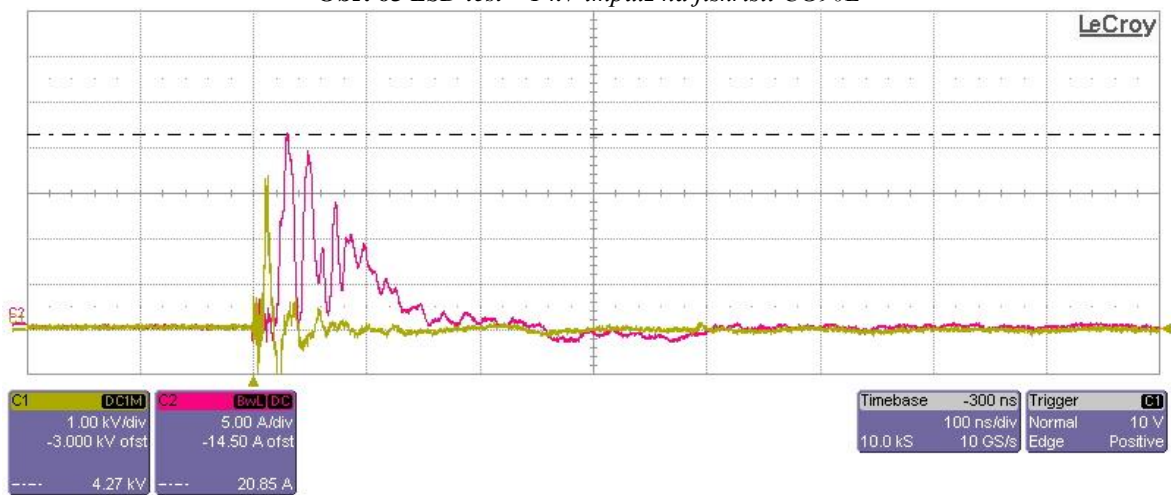
Obr. 61 ESD test – 5 kV impulz na tranzistoru 1,5KE68CA



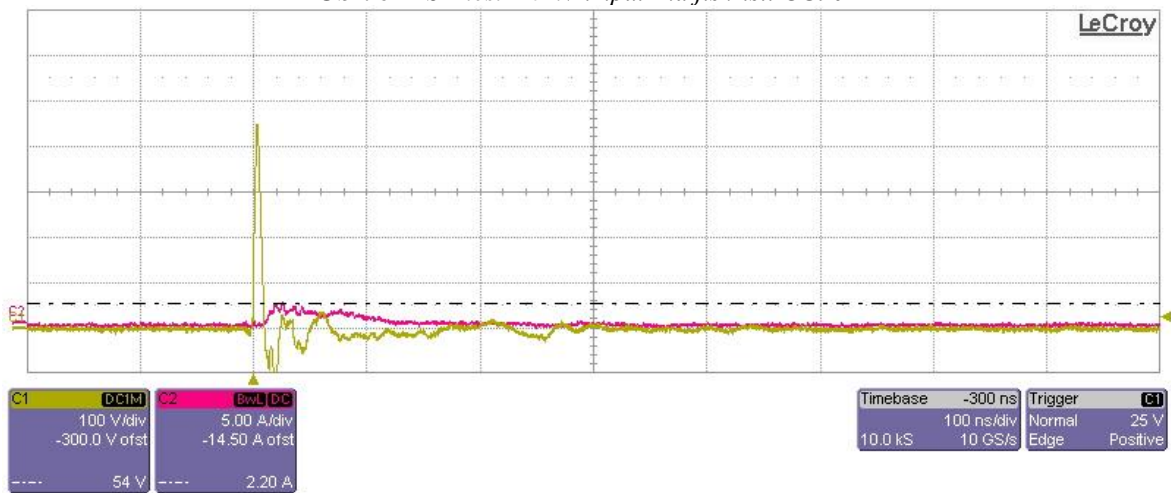
Obr. 62 ESD test – 6 kV impulz na jiskřišti EPCOS 230030



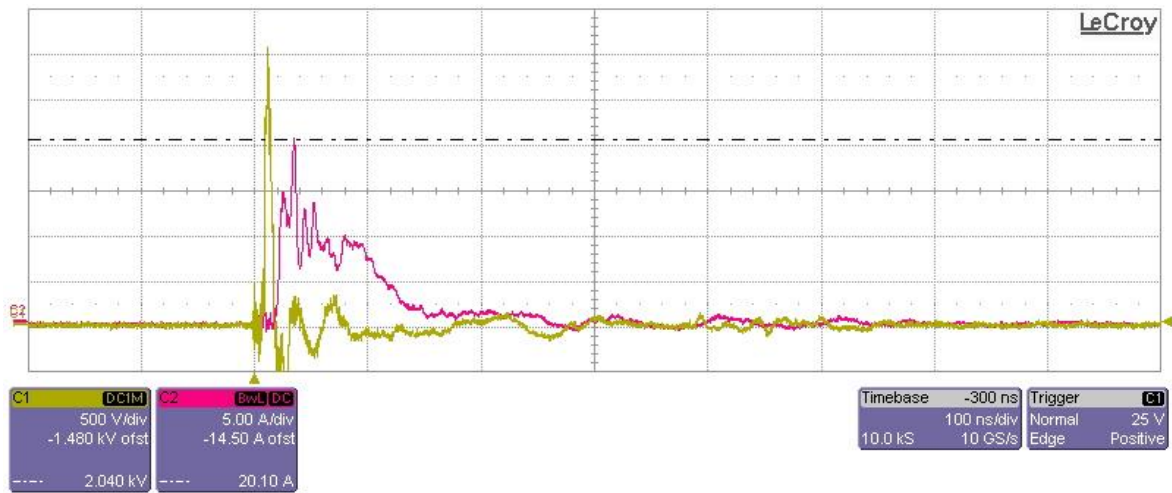
Obr. 63 ESD test – 1 kV impulz na jiskřišti CG90L



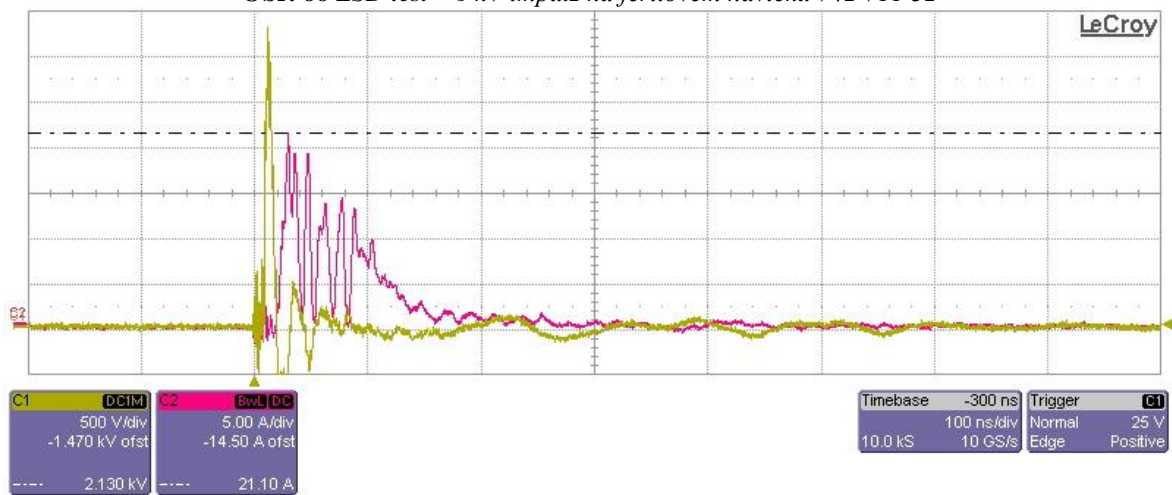
Obr. 64 ESD test – 6 kV impulz na jiskřišti CG90L



Obr. 65 ESD test – 1 kV impulz na feritovém návleku 742 711 32



Obr. 66 ESD test – 6 kV impulz na feritovém návleku 742 711 32



Obr. 67 ESD test – 6 kV impulz na feritovém návleku 742 711 4