

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI  
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

**KATEDRA TECHNOLOGIÍ A MĚŘENÍ**

# **DIPLOMOVÁ PRÁCE**

**Analýza působení přepět'ových ochran**

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI  
Fakulta elektrotechnická  
Akademický rok: 2013/2014

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

Jméno a příjmení: **Bc. Tomáš BYSTRICKÝ**  
Osobní číslo: **E12N0003P**  
Studijní program: **N2612 Elektrotechnika a informatika**  
Studijní obor: **Komerční elektrotechnika**  
Název tématu: **Analyza působení přepětových ochran**  
Zadávací katedra: **Katedra technologií a měření**

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

1. Rozdělte přepětí v sítích vn a vvn podle příčiny vzniku.
2. Popište způsoby ochrany proti přepětím.
3. Měření v laboratoři ověřte vlastnosti vybraných ochranných prvků proti různým přepětovým signálům.
4. Zhodnoťte dosažené výsledky a vypracujte doporučení pro používání těchto ochran.

Rozsah grafických prací: podle doporučení vedoucího  
Rozsah pracovní zprávy: 30 - 40 stran  
Forma zpracování diplomové práce: tištěná/elektronická  
Seznam odborné literatury:


1. Hasman: Přepětí v elektroenergetických soustavách
2. Paul: Introduction to electromagnetic compatibility

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

Datum zadání diplomové práce: 14. října 2013  
Termín odevzdání diplomové práce: 12. května 2014

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



  
Doc. Ing. Vlastimil Škočil, CSc.  
vedoucí katedry

V Plzni dne 14. října 2013

## **Anotace**

Tématem předkládané diplomové práce je analýza působení přepětových ochran, tedy rozbor jejich reakce na přepětové signály. V první polovině teoretické části jsou stručně popsány běžně vznikající druhy přepětí v přenosové soustavě, které ovlivňují dodávku elektrické energie a tím i chod zařízení na ní závislých. Ve druhé části pak typy používaných ochran. V poledních kapitolách jsou popsány testovací signály Surge, Bursts a ESD, kterými byly vybrané ochrany namáhány a vyhodnocení výsledků této analýzy. Příloha práce je rozdělena na část A obsahující změřené hodnoty a část B, kde jsou uvedeny grafy.

## **Klíčová slova**

Přepětí, přepětová ochrana, ochrana, varistor, jiskřiště, analýza, blesk, spínací přepětí, atmosférický výboj, Surge, rázový impulz, elektrostatický výboj

## **Abstract**

The subject of submitted diploma thesis is to analyze the effect of surge protection device and analysis of their reaction to overvoltage signals. In the first part of theoretical section are briefly describes commonly generated types of overvoltage in the transmission system that influence the supply of electrical energy and thus operation of electrical devices. In the second part of theory are described frequently used types of protection devices. The last chapters are describes test signals Surge, Burst and ESD, which were selected protections stressed and evaluation of this analysis. Annex of this thesis contains the measured values and graphs.

## **Key words**

Overvoltage, overvoltage protection, protection, varistor, gap, analysis, lightning, switching overload, atmospheric discharge, surge, electrostatic discharge

## **Prohlášení**

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

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.

V Plzni dne 12.5.2014

Tomáš Bystřický

.....

## **Poděkování**

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

# Obsah

<b>OBSAH</b> .....	<b>8</b>
<b>ÚVOD</b> .....	<b>9</b>
<b>SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK</b> .....	<b>10</b>
<b>1 PŘEPĚTÍ</b> .....	<b>11</b>
1.1 PŘEPĚTÍ OBECNĚ .....	11
1.2 PRŮBĚH .....	11
<b>2 DRUHY PŘEPĚTÍ</b> .....	<b>12</b>
2.1 ATMOSFÉRICKÝ VÝBOJ .....	12
2.1.1 Průběh výboje .....	12
2.1.2 Přímý úder do vedení .....	13
2.1.3 Přímý úder do zemnicího lana a stožáru .....	13
2.1.4 Přepětí indukovaná bleskem .....	14
2.2 PRŮMYSLOVÁ PŘEPĚTÍ .....	15
2.2.1 Vypínání střídavých zkratových proudů .....	15
2.2.2 Vypínání induktivních proudů .....	15
2.2.3 Spínání kapacitních proudů .....	16
2.2.4 Přepětí vzniklá vzájemným působením .....	17
2.3 ELEKTROSTATICKÉ PŘEPĚTÍ .....	17
<b>3 OCHRANY PROTI PŘEPĚTÍ</b> .....	<b>18</b>
3.1 JISKŘIŠTĚ .....	18
3.2 BLESKOJISTKY .....	19
3.3 OMEZOVAČE .....	20
3.4 VARISTOR .....	21
<b>4 ZKUŠEBNÍ IMPULZY A POSTUPY</b> .....	<b>22</b>
4.1 RÁZOVÝ IMPULZ „SURGE“ .....	22
4.2 BURST SIGNÁL .....	23
4.3 ELEKTROSTATICKÝ VÝBOJ .....	24
<b>5 VYHODNOCENÍ</b> .....	<b>25</b>
5.1 MĚŘENÉ OCHRANY .....	25
5.2 SURGE TEST .....	26
5.3 BURST TEST .....	29
5.4 ESD TEST .....	31
5.4.1 Přímé výboje .....	32
5.4.2 Nepřímý výboj .....	33
5.5 SURGE TEST DOMÁCÍHO PRODLUŽOVACÍHO PŘÍVODU .....	35
<b>6 ZÁVĚR</b> .....	<b>36</b>
<b>POUŽITÁ LITERATURA</b> .....	<b>38</b>
<b>PŘÍLOHA A TABULKY:</b> .....	<b>1</b>
<b>PŘÍLOHA B GRAFY:</b> .....	<b>1</b>



## Úvod

Chránění proti přepětí je dnes nezbytnou součástí provozování energetické soustavy. Minimalizovat následky přepětových jevů je nutné jak z hlediska ohrožení zdraví osob, tak i finančních nákladů na zničené zařízení a opravy. Proti těmto nežádoucím jevům se energetická soustava, budovy a zařízení vybavují přepětovými ochranami. Tato práce se zabývá analýzou jejich působení.

V první, teoretické části, jsou popsány nejčastější příčiny přepětí a jejich následků. Ty jsou rozděleny do dvou hlavních kapitol: Atmosférické výboje, které se dále dělí podle místa úderu blesku a Průmyslová přepětí, které se také dále dělí na jednotlivé typy. V další kapitole jsou uvedeny často používané typy přepětových ochran jak v distribuční soustavě, tak domovních instalacích. Následují způsoby testování přepětových ochran a jejich popis. Tato kapitola je věnována popisu zkoušky rázovým impulzem, elektrostatickým výbojem a signálem Burst, simulující spínací přepětí.

Poslední částí je popis testovaných ochran, postupu měření a vyhodnocení naměřených výsledků. Testoval jsem vzduchové uzavřené jiskřiště a varistor, obojí určené pro nízké napětí. Jiskřiště jako zástupce ochrany, která svede přepětí za cenu zkratování obvodu a varistor jako ochranu využívající materiál s proměnlivým odporem. Posledním, spíše informativním měřením, byl surge test prodlužovacího přívodu s ochranou, který lze běžně zakoupit pro zvýšení ochrany připojeného zařízení. Použil jsem ten, který používám sám několik let, Ben Electronic LFT2001, abych ověřil jeho funkčnost vzhledem ke slabému chránění našeho domovního rozvodu.

V příloze práce jsou uvedeny všechny zaznamenané hodnoty a grafy, jejichž výběr je použit v kapitole vyhodnocení výsledků.

## Seznam symbolů a zkratk

SEMP	Switching Electromagnetic Pulse	Spínací přepětí
LEMP	Lighting Electromagnetic Pulse	Atmosférická přepětí
ESD	Electrostatic Discharge	Elektrostatický výboj
EFT	Electrical Fast Transients	Rychlé přechodové jevy

# 1 Přepětí

## 1.1 Přepětí obecně

Přepětí je stav, kdy je napětí v síti nebo soustavě vyšší než jmenovité provozní napětí a to o více než 10%. Tedy ve chvíli, kdy se úroveň zvýší nad dovolené provozní napětí sítě, jedná se o přepětí. Pro hladinu 400kV je dovolené provozní napětí  $U_n + 5\%$  a pro 220kV a ostatní nižší  $U_n + 10\%$ . Přepětí se mohou lišit svou velikostí, časovým průběhem, příčinou a frekvencí vzniku. Tento jev může vznikat uvnitř samotné soustavy v důsledku provozních změn, jako je spínání, nebo v důsledku vnějších příčin, jako jsou atmosférické výboje. Přepětí se po vedení šíří oběma směry a současně ho provází zvýšená hodnota proudu, která namáhá zařízení včetně vodičů a jejich izolací tepelnými a dynamickými účinky, s nimiž je nutné počítat. Izolace se navrhuje na působení určité úrovně napětí po stanovenou dobu. Před vyšším přepětím, nebo delší dobou působení je třeba zařízení chránit vhodným ochranným prvkem.

## 1.2 Průběh

Přechodné přepětové jevy se na vedení projevují jako vlny napětí a proudu. Doba trvání se pohybuje v řádu mikrosekund až milisekund a označuje se také jako transientní nebo impulzní. Při atmosférických výbojích vlna prudce vzrůstá na nejvyšší hodnotu bez kmitání a poté pomaleji klesá. Při provozních a spínacích procesech se šíří tzv. spínací vlny, jejichž amplitudy jsou výrazně nižší než amplitudy vln atmosférických vlivů. Jejich doba trvání je ale podstatně delší a energií, která je úměrná ploše pod křivkou, více zatěžují zařízení a vedení.

Trvalá (více než 1 hodina) a dočasná (méně než 1 hodina) přepětí se projevují sítovou frekvencí a konstantně zvýšenou efektivní hodnotou. Kombinované přepětí může vzniknout kombinací některých dvou druhů přepětí. Toto rozdělení do 4 kategorií je dáno mezinárodní normou IEC 71-1. [1]

## 2 Druhy přepětí

Jak bylo zmíněno výše, můžeme transientní přepětí rozdělit do dvou kategorií podle příčiny vzniku. Větší zatížení a nebezpečí pro zařízení představují přírodní zdroje, tedy atmosférické výboje reprezentované bleskem. Častěji se však vyskytují méně náročná průmyslová přepětí, která vznikají uvnitř soustavy při běžném nebo poruchovém provozu.

### 2.1 Atmosférický výboj

Tyto výboje vznikají navzájem mezi mraky nebo mezi mrakem a zemí. Pohyby velkých vzdušných mas s rozdílnou teplotou či vlhkostí způsobují tvorbu oddělených elektrických nábojů a míst s velkým rozdílem potenciálů. Po dosažení kritické intenzity elektrického pole mezi těmito místy dojde k průrazu výbojem – bleskem. Důležitý je pro nás zejména případ, kdy blesky zasahují do rozvodných soustav, zařízení a budov a je potřeba se před jejich účinky chránit. Blesky lze rozlišit na pozitivní a negativní podle polaritý bouřkového mraku a směru šíření mrak - zem nebo zem - mrak. V krajině typické pro Českou republiku bez výrazně členitého povrchu a s běžně vysokými stavbami se setkáváme pouze s výbojem typu mrak - zem a podle statistického měření značně převažují negativní výboje. Zkratkou pro označování atmosférických výbojů je LEMP, neboli Lighting Electromagnetic Pulse. [1]

#### 2.1.1 Průběh výboje

V případě častějšího negativního výboje se ve výšce 2 - 5 km nad zemí tvoří bouřkový mrak o velikosti několika km<sup>2</sup>. Rozložení potenciálu je následující: v horní části se pohybují lehčí sněhové vločky s kladným nábojem, a těžší kousky ledu (kroupy), nesoucí záporný náboj, se hromadí ve spodní části mraku. Kritickou hodnotu intenzity elektrického pole mezi mrakem a zemí, potřebnou k proražení elektrické pevnosti prostředí a k vytvoření výboje, ovlivňují místní a aktuální podmínky ovzduší, pohybuje se ale mezi 0,5 - 10kV/cm.

Od záporně nabitých částic mraku se tvoří kanál blesku s vodivým jádrem a stupňovitě se přibližuje k zemskému povrchu. Po přiblížení na několik desítek metrů dojde v místech s vyšší intenzitou elektrického pole k překročení elektrické pevnosti a od povrchu se začíná šířit vstřícný výboj. Po spojení s kanálem blesku vzniká celistvá vodivá cesta a dochází k obrovskému nárůstu proudové hustoty a teploty až na 30 000°C. Rozvíjí se hlavní bleskový výboj, který dosahuje proudového maxima řádově desítek až stovek kA po cca 50μs a s celkovou dobrou trvání okolo 250μs.

Dalším důsledkem skokového zvýšení teploty je rozpínání ohřátého vzduchu a následné tlakové vlny, které se projevují akusticky jako hromový zvuk. [1] [2]

### 2.1.2 Přímý úder do vedení

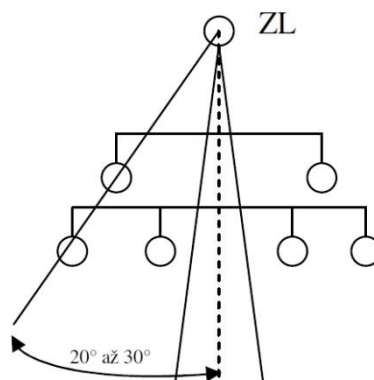
V případě úderu do nadzemního vedení nn mají účinky přepětové vlny největší dopad na koncového spotřebitele. Hrozí zavlečení části proudových rázů do domovních přípojek a k nim připojených elektrospotřebičů. Zejména dnešní elektronika je velmi citlivá. Chránit se lze jen kvalitním uzemňovacím systémem a svodiči bleskových proudů. Zásah blesku do nadzemního vedení vn nebo vvn je pro koncového spotřebitele šetrnější z hlediska přenesení většiny přepětí. Velká část bleskových proudů je redukována ochranami sítě a oddělení vn/nn transformátorem. Přesto se mohou vyskytovat přepětové impulzy přenesené indukčními a kapacitními vazbami mezi vinutími a vývody transformátorů. Vlny napětového a proudového rázu se šíří oběma směry po vedení a všude, kde dochází ke změně vlnové impedance, dochází k odrazům.

Přibližnou hodnotu velikosti napětí v místě zásahu můžeme vypočítat podle vztahu 2.1, kde za charakteristickou impedanci  $Z_0$  dosadíme  $Z_0 = 300$  až  $500\Omega$  a průměrný bleskový proud  $I=20\text{kA}$ . V takovém případě vychází hodnota přepětí 3-5MV. [2]

$$U = Z_0 * \frac{I}{2} \quad (2.1)$$

### 2.1.3 Přímý úder do zemnicího lana a stožáru

Pro ochranu vedení je použito zemnicí lano uchycené v nejvyšším bodě stožáru (mohou být i dvě) a nad všemi ostatními vodiči. Jeho úkolem je tedy ochránit ostatní fázové vodiče a svést většinu atmosférických výbojů. Může také sloužit pro datový přenos ve svém jádru. Zemnicí lano je na každém, nebo nejvýše na každém druhém stožáru uzemněno. Přímý úder do zemnicího lana vyvolá přepětovou vlnu, která se šíří na obě strany od místa úderu a dochází k odrazům v místě uchycení lana ke stožáru, protože se jedná o rozhraní vlnových impedancí. Dále elektromagnetická vazba mezi ostatními vodiči způsobuje indukování napětí na fázových vodičích. Pokud je rozdíl napětí mezi zemnicím a fázovým vodičem větší než elektrická pevnost vzduchu v daný okamžik, může dojít k přeskoku. Nejlepší efekt má zemnicí lano, pokud je dodržen tzv. ochranný úhel. Tedy pokud spojnice mezi zemnicím lanem a nejvzdálenějším fázovým vodičem svírá úhel  $20^\circ - 30^\circ$  se svislicí od zemního lana viz obr 2-1. [1] [3]



Obr. 2-1: Ochranný úhel převzato z [5]

V důsledku zasažení zemnicího lana, nebo v horším případě přímo stožáru elektrického vedení, v horní části stožáru vznikne napětí proti zemi. Jeho velikost je v prvním okamžiku dána úbytkem napětí na paralelní kombinaci vlnové impedance stožáru a obou směrů zemních lan. Nejméně na jedné fázi je pak taková okamžitá hodnota napětí, že namáhání daného izolátoru je dáno součtem okamžitou hodnotou napětí fáze a napětí stožáru. Takové namáhání izolátoru bývá řádově vyšší než jeho elektrická pevnost a může dojít ke zpětnému přeskočení a zapálení oblouku mezi vodičem a stožárem, tedy ke zkratu vedení. Pokud nedojde k zapálení oblouku, jsou fázové vodiče namáhány napětím, které se do nich indukuje přes elektromagnetickou vazbu mezi vedením a stožárem.

#### 2.1.4 Přepětí indukovaná bleskem

Prudké změny elektromagnetického pole provázejí atmosférický výboj a tyto změny mohou vyvolávat vznik indukovaných napětí v elektrických obvodech. Zejména jsou k tomuto jevu náchylná venkovní vedení. Takto vzniklá přepětí mohou způsobit poškození izolací a poruchy na elektronických zařízeních i když dojde k úderu blesku ve vzdálenosti 5 a více km od vedení. Vznik indukovaných přepětí je častější, než výskyt přímého zásahu blesku do vedení. Poměry ve vedení jsou ovlivněny jak elektrickou vazbou, kterou lze vyjádřit kapacitou mezi kanálem blesku či místem úderu a vedením, tak magnetickou vazbu, která je dána vzájemnou indukčností. Tato elektricky a magneticky indukovaná napětí se sčítají a vytváří různé hodnoty přepětí na začátku a konci postiženého vedení. [2]

## 2.2 Průmyslová přepětí

Průmyslovým přepětím lze označit ty změny parametrů na elektrických vedeních a zařízeních, které nejsou vyvolány atmosférickými vlivy, ale běžným a poruchovým provozem nebo vědomým vlivem člověka. Většina změn v provozu je provázána přechodovým dějem a tím i možností vzniku přepětí. Nazývá se proto také spínací přepětí a označuje zkratkou SEMP z anglického názvu Switching Electromagnetic Pulse. Tento druh přepětí není energeticky příliš náročný, ale vyznačuje se rychle se opakující vysokou amplitudou a širokým frekvenčním spektrem. Při spínacích procesech v sítích a obvodech vznikají tyto rušivé signály zejména vlivem indukčností ve formě krátkých skupin vlivem např. odskakování kontaktů, jiskřením.

### 2.2.1 Vypínání střídavých zkratových proudů

Zkrat v obvodu způsobuje vznik velkého střídavého proudu, jehož velikost je omezena pouze indukčností zdroje a přívodního vedení. V závislosti na fázi napájecího napětí v okamžiku vzniku může obsahovat i stejnosměrnou složku. Zkratový proud má induktivní charakter a proto je při jeho přerušení, tedy průchodu nulou, napětí zdroje maximální. Po uhašení oblouku se na kontaktech vypínače objeví zotavené napětí s kmitočtem 50Hz, okolo kterého kmitá přechodná složka s frekvencí odpovídající vlastní frekvenci obvodu zdroje  $\omega_0$ . Pokud je tato frekvence vysoká, je nárůst zotaveného napětí vyšší, než rychlost zotavování elektrické pevnosti dráhy mezi kontakty vypínače a může dojít k opětovnému zapálení oblouku, protože vypínač není schopen toto napětí udržet. Opětovný oblouk může být uhašen až při dalším průchodu nulou. V případě, že by nárůst elektrické pevnosti nebyl dostatečný vzhledem ke konfiguraci obvodu a vypínač neudrží zotavené napětí ani po několikanásobném průchodu nulou, může dojít k jeho zničení. Zkratový proud může být nesouměrný díky obsahu stejnosměrné složky. Ta způsobí, že proud prochází nulou při nižším napětí než maximálním a zotavené napětí tak nedosáhne tak velkých hodnot jako při souměrném zkratu.[2] [3]

### 2.2.2 Vypínání induktivních proudů

Malé induktivní proudy jsou jako zkratové proudy fázově zpožděné proti napětí o  $\pi/2$ . Liší se ale velikostí, jsou to zlomky jmenovitých hodnot. Příkladem těchto proudů je proud transformátoru naprázdno, proud motoru naprázdno s kotvou nakrátko, reaktoru nebo kompenzační tlumivky.

Tyto proudy jsou vypínány ve vypínačích, které jsou dimenzovány na podstatně větší hodnoty, a proto se zapálený oblouk při vypínání chová nestabilně. Vznikají přechodné děje a proud je vypnut v tzv. nucené nule, tedy dříve než by procházel nulou podle síťové frekvence. Přechodné děje vyvolávají oscilace s frekvencí v řádu jednotek až desítek kHz, které se superponují na proud síťové frekvence. Díky oscilacím tak proud projde nulou dříve, než při vlastním kmitočtu. Průběh napětí na kontaktech vypínače proti zemi je díky oscilacím rozdílný na straně vypínaného např. transformátoru a na straně sítě. Na straně transformátoru je amplituda vlastních oscilací větší, protože je změna provedena z maximální hodnoty na nulu. Na straně sítě dojde pouze k nárůstu napětí díky odlehčení od zatížení transformátorem naprázdno. Zotavené napětí na kontaktech vypínače má velkou strmost a protože k přerušení došlo v nuceném průchodu nulou, nejsou kontakty ještě dostatečně daleko, dojde obvykle k opětovnému zapálení oblouku a děj se opakuje, dokud není elektrická pevnost dráhy obnovena.

Hodnoty vzniklých přepětí při vypínání malých induktivních proudů většinou nepřesahují 2-2,5 násobek hodnoty napájecího napětí. V menším množství případů může ale dojít až k 6ti násobnému zvýšení amplitudy. [2]

### 2.2.3 Spínání kapacitních proudů

Kapacitní proudy jsou na rozdíl od induktivních ty střídavé proudy, které předbíhají napětí o  $\pi/2$ . Přepětí může v tomto případě vznikat nejen při vypínání, ale i zapínání. Typickou operací, kdy dochází k zapínání kapacitních proudů, je připojování kondenzátorové baterie. Takto vzniklé přepětí nepřesahuje 2,5 násobek napětí zdroje. Naopak větších hodnot dosahuje při jejich vypínání. Kontakty vypínače jsou namáhány rozdílem napětí, které na straně baterie uvažujeme konstantní v případě velkých vícestupňových baterií. Na straně sítě dojde ke změně vlastní frekvencí a možnou oscilací po odpojení zátěže. Proto vzniká rozdíl na kontaktech a může dojít k zapálení oblouku. Tento rozdíl lze snížit vybíjením odpojeného kondenzátoru přes paralelní odpor či tlumivku, nebo použitím odporového vypínače. Ten do obvodu nejdříve připojí odpor, který sníží napětí na kapacitě a poté rozezne pomocné kontakty, které ho zcela odpojí. Velikost připojeného odporu se volí tak, aby byla obě zhášedla namáhána rovnoměrně. [2]



#### 2.2.4 Přepětí vzniklá vzájemným působením

Mezi energetickými systémy vzniká několik typů vazeb, které mohou způsobovat šíření průmyslových přepětí. Příkladem může být indukční vazba, kdy bývá slaboproudé vedení ovlivňováno silnoproudým díky elektromagnetické indukci při jejich blízkém uložení. Takto vzniklá přepětí nenabývají vysokých hodnot a mohou způsobovat drobné poruchy při přenosu dat. V případě zkratu v silovém vedení se ale může prudce zvýšit hodnota indukovaného přepětí a způsobit poruchu elektronických zařízení. Další vazby jsou galvanické, kdy dojde k přímému kontaktu a kapacitní.[1]

### 2.3 Elektrostatické přepětí

ESD neboli elektrostatický výboj se může vyskytovat tam, kde vzniká tření kovových a dielektrických materiálů. K jejich vzniku přispívá nízká vlhkost vzduchu a syntetické materiály, ať už podlahové krytiny nebo oblečení osob. V zimním období vlhkost vzduchu obecně klesá a zvyšuje tak riziko výboje, naopak snižují ho antistatické a přírodní materiály. U oděvů např. vlna. Energie výbojů je velmi malá, řádově mJ, nicméně vrcholové hodnoty takového výboje dosahují až desítek kV a mohou mít vliv na citlivé elektronické zařízení. Typickým příkladem je styk osoby oděné do syntetických materiálů s kovovou kostrou nebo částí elektronického zařízení či jiným vhodným svodičem náboje, kdy dojde k vybití náboje nashromážděné na kapacitě člověka, která je 100 – 200 pF během několika jednotek ns. Energie takového výboje není velká, ale vzhledem k jemným elektronickým součástkám a zařízením může mít destruktivní účinky, případně zhoršení životnosti a rušení funkce. Ochrana zařízení před ESD je především záležitostí výrobců. Případně je možné se jim bránit při práci v upravených podmínkách, klimatizací s regulací vlhkosti, nebo v laboratořích uzemňováním pracovníků a pracovišť pro odvádění statického náboje. [1] [8]

### 3 Ochrany proti přepětí

Chránění proti následkům přepětí má jednoduché opodstatnění z ekonomického hlediska. Následky poruchových stavů jsou neplánované výpadky dodávky elektrické energie a poškozená zařízení, která s náklady na opravu představují značné finanční ztráty. Další problém představuje velké riziko ublížení na zdraví nebo ohrožení života osob.

Principem všech typů ochran je změna impedance v závislosti na napětí. Konstrukce a vlastnosti se ale u jednotlivých typů liší. Za normálních podmínek nesmí místem připojení, neboli ochrannou protékat žádný nebo jen minimální proud. Dalším požadavkem je svést poruchový proud, aniž by se zařízení poškodilo a po jeho odvedení opět zvýšit svoji impedanci.

#### 3.1 Jiskřiště

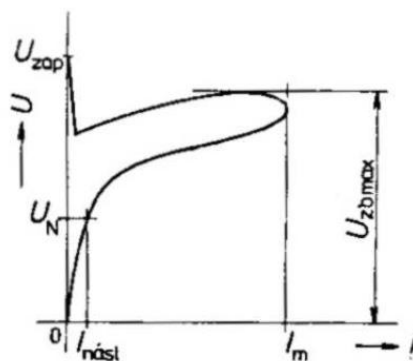


Obr. 3-1: Hrotové jiskřiště na venkovním vedení [4]

Ochranné jiskřiště je nejjednodušším svodičem přepětí, řadí se do třídy hrubých ochran a především venkovní otevřené má velký rozptyl zapalovacího napětí. Používá se jako doplňková ochrana proti přepětí nebo v kombinaci s jinými svodiči, např. jiskřiště + omezovač ZnO. Při napětí nižším než je zapalovací, má jiskřiště impedanci danou jeho svodem, který je zanedbatelný. Po překročení zápalného napětí dojde k výboji mezi elektrodami jiskřiště a impedance je dána malým oporem hořícího oblouku. Ten je ale udržován i po odeznění přepětí jmenovitým napětím soustavy a prochází jím následný proud ze soustavy a znamená pro ni zkrat. Zapůsobení ochranného jiskřiště je tedy za cenu vzniku zkratu, proto se používá v kombinaci s jinou ochranou, která má schopnost následný oblouk uhasit. Konstrukčně může být jiskřiště řešeno jako otevřené nebo uzavřené a mezi elektrodami je jako izolant vždy vzduch, který může funkci otevřeného jiskřiště ovlivňovat podle momentálních klimatických podmínek. Uzavřená jiskřiště malých konstrukčních rozměrů se používají i na hladinách nízkého napětí v kombinaci s jiným typem ochrany. Hladinu zápalného napětí tedy ovlivňuje vzdálenost elektrod a stav okolního prostředí. [2] [4]

### 3.2 Bleskojistky

Bleskojistky jsou dokonalejším typem jiskřiště a jsou používány pro vyšší spolehlivost a stabilitu zášvecního napětí. Jsou rychlejší a přesnější než vzduchové jiskřiště. Skládají se z jiskřiště a sériově zapojeného napětově závislého odporu z materiálu SiC (karbid křemíku), které jsou uzavřeny v porcelánovém válci. SiC má vhodné vlastnosti pro omezení přepětí, ale v normálním stavu je jeho odpor poměrně malý a procházel by jím ztrátový proud, proto je mu předřazeno jiskřiště. Jiskřiště je sestaveno z několika dílčích jiskřišť, které jsou tvořeny kovovými kotouči, umístěnými velmi blízko u sebe. Materiál je ionizován a je tak zvýšena koncentrace volných nosičů v prostoru jiskřiště, aby docházelo k co nejrychlejšímu zapůsobení. Při vzniku přepětí na kontaktech bleskojistky dojde k zapálení oblouku a rezistory s napětově závislým odporem prochází proud do země. Čím je přepětí větší, tím je odpor menší. Po svedení přepětí klesne napětí na provozní hodnotu a opět se zvýší odpor rezistorů a dojde k uhašení oblouku v jiskřišti při průchodu následného proudu nulou. Pokud nedojde k uhašení při prvním průchodu nulou, může dojít ke zničení bleskojistky. Tímto způsobem funguje ventilová bleskojistka, jejíž charakteristika je na obrázku 3-2. Parametry bleskojistky určuje rázová charakteristika jiskřiště, která se měří standardizovaným impulsem 1,2/50 $\mu$ s. Z průběhu této charakteristiky je odvozeno jmenovité zapalovací napětí  $U_{zap}$  [kV] bleskojistky při atmosférickém impulzu, při kterém vždy dojde k jejímu zapůsobení. Z dalšího testování průchodem vlny proudu ve tvaru impulsu 8/20 $\mu$ s po zapůsobení bleskojistky se určuje jmenovitý výbojový proud  $I_m$  [kA], ke kterému je výrobcem udáváno příslušné zbytkové napětí bleskojistky  $U_{zbmax}$  [kV], tedy napětí měřitelné mezi svorkou sítě a svorkou země bleskojistky vyvolané průchodem tohoto proudu. Jmenovité napětí  $U_N$  [kV] ventilové bleskojistky je napětí, na které může být trvale připojena bez vlivu na její vlastnosti a při kterém ještě nezapůsobí. [2] [5]



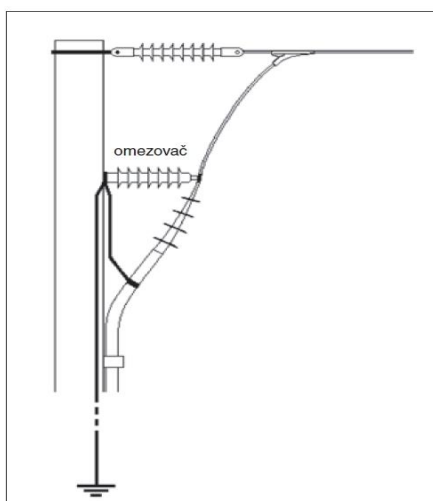
Obr. 3-2 VA Charakteristika bleskojistky převzata z [5]

### 3.3 Omezovače

Dokonalejším typem svodiče jsou omezovače přepětí ZnO. Toto označení je podle odporově závislého materiálu na bázi kysličníku zinečnatého. Výhodou tohoto materiálu je, že má téměř pravoúhlé koleno VA charakteristiky, tedy že do určitého napětí jím neprochází téměř žádný proud a je tak velmi rychlý přechod mezi vodivým a nevodivým stavem. VA charakteristiky materiálů SiC a ZnO je popsána vztahem 3.1.

$$I = k * U^\alpha \quad (3.1)$$

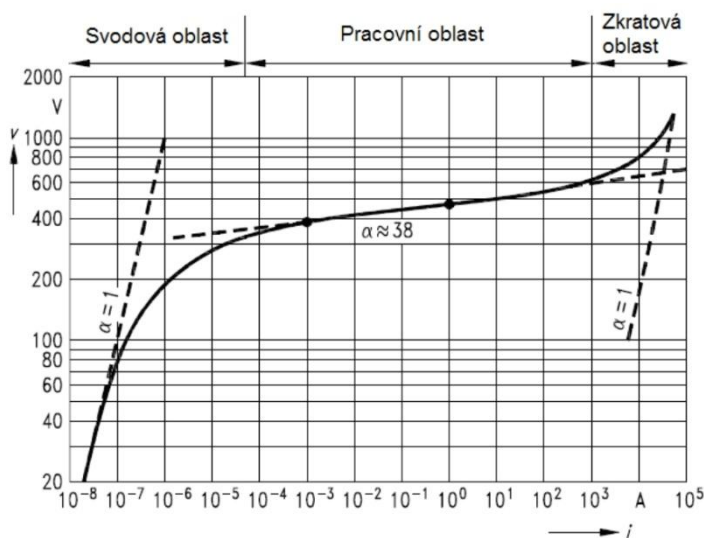
Pro materiál SiC je koeficient  $\alpha = 2-6$ , kdežto ZnO má koeficient  $\alpha = 20-50$  a z toho je patrné, že stejnou velikost proudu tekoucího přes napětově závislý odpor ZnO vyvolá řádově vyšší napětí než u karbidu křemíku SiC. Díky tomu lze používat odpory ZnO bez předřadného jiskřiště, aniž by jimi protékal ztrátový proud už při provozním napětí  $U_n$ . Nejvýznamnější rozdíl mezi bleskojistkou z materiálu SiC a omezovačem ZnO je v tom, že jmenovité napětí ventilových bleskojistek musí být vždy vyšší než velikost dočasných přepětí, jinak by se mohl zapálit oblouk v jiskřišti a bleskojistkou by tekla velký proud po dobu trvání přepětí, což by mělo za následek jejího zničení. Trvalé provozní napětí omezovačů může být nižší, protože při dočasném přepětí jím poteče menší proud než bleskojistkou a menší bude i oteplení. Po určitou dobu je to omezovač schopen vydržet a lze tu využívat snížené ochranné hladiny. Toho se využívá zejména v sítích s přímo uzemněným uzlem, kde je doba trvání přepětí jen několik sekund. Další výhodou omezovačů je vyšší spolehlivost díky jednodušší konstrukci a možnost kontroly stavu během provozu. Proto jsou dnes již omezovače více používané než bleskojistky. [2] [5]



Obr. 3-3: Zapojení omezovače v přechodu na kabelové vedení [4]

### 3.4 Varistor

Varistor je ochranná součástka používaná zejména u spotřebičů na síťové a nižší napětí, případně dle konstrukce až na napět'ové hladiny v jednotkách kV. Základní princip působení je stejný jako u omezovačů přepětí, tedy klesající odpor s rostoucím napětím, liší se jen konstrukčním provedením. Jsou schopné svést menší proudy, ale s kratší dobou odezvy kolem 20ns. (1) Jedná se o bipolární polovodičovou součástku, jejíž VA charakteristika je symetrická a nezáleží tedy na směru zapojení. Vyrábí se lisováním a spékáním prášku oxidu zinku ZnO a dalších příměsí. Dříve používaný karbid křemíku SiC byl nahrazen právě ZnO pro výhodnější charakteristiku. Takové varistory jsou označovány MOV (Metal Oxid Varistor). Na hranicích zrn se vytvoří polovodičové rozhraní a výsledná VA charakteristika varistoru je pak složená z příspěvků mnoha diodových přechodů, zapojených do série paralelně a antiparalelně. Vhodnou technologií výroby se dosáhne charakteristiky s velmi ostrým přechodem mezi nevodivým stavem (svodovou oblastí) a stavem, kdy odpor klesá a varistorem protéká proud (pracovní oblast). Při snížení napětí na svorkách varistoru dojde opět ke zvýšení vnitřního odporu součástky a snížení protékajícího proudu. Takovou závislost lze opět popsat rovnicí 3.1 jako u omezovačů napětí ZnO. Čím kvalitnější výroba, tím je charakteristika plošší a varistorem neprotéká téměř žádný ztrátový proud při provozním napětí. Výsledná součástka má jednoduché konstrukční provedení a drobné rozměry velmi podobné keramickým kondenzátorům.



Obr. 3-4 VA charakteristika varistoru B60K250 [6]

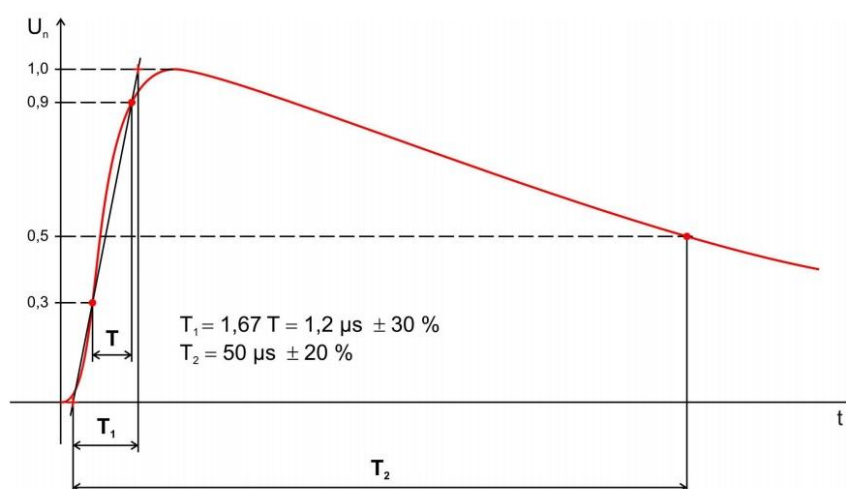
Na Obr.3-4 je znázorněna VA charakteristika varistoru B60K250, který má maximální provozní napětí 250V. Dále je vyznačena svodová a pracovní oblast a *Varistorové napětí*  $U_v=390$ V, tedy bod, kdy varistorem protéká proud 1mA.

## 4 Zkušební impulzy a postupy

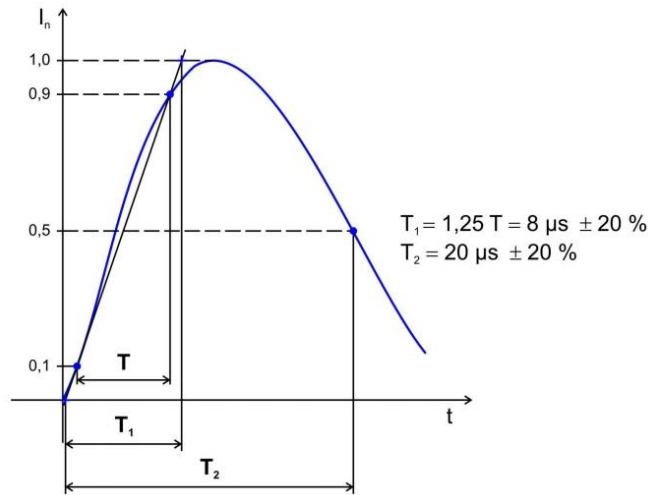
Pro analýzu působení přepětových ochran jsem zvolil tři druhy normalizovaných zkušebních impulzů: Surge, neboli rázový impulz sloužící pro vyšetřování následků atmosférických přepětí a poruch v napájecí síti. Dále Burst impulz pro simulaci spínacích přepětí s menší energetickou náročností, ale vysokou amplitudou a širokým frekvenčním spektrem. Posledním testem je elektrostatický výboj, který byl nejprve aplikován přímo na kontakty ochrany a poté jsme sledovali napětí a proud indukovaný do vodiče z kovového krytu zařízení a jak na toto napětí reaguje varistor.

### 4.1 Rázový impulz „Surge“

Je popsán normou ČSN EN 61000-4-5, která pro LEMP přepětové jevy definuje normalizovaný průběh pro testování přepětových ochran. Atmosférické přepětí má často stejnosměrný průběh s prudkým nárůstem napětí (čelo impulzu) a pozvolný pokles (těl impulzu). Lze je tedy popsat maximální hodnotou  $U_m$ , dobou čela  $T_1$  a dobou půltýlu  $T_2$  a v názvu se uvádí doba trvání čela/půltýlu, tedy  $T_1/T_2$ . Přepětová vlna je definována napětovým impulzem 1,2/50  $\mu s$  na obr. 4-1. Amplituda normalizované rázové vlny se může pohybovat až do 4kV. Průběh proudového impulzu 8/20  $\mu s$  na je znázorněn na obrázku 4-2 a jeho amplituda je závislá na vnitřní impedanci generátoru a zkoušeného rozhraní. Třetí typ, simulující přímý úder blesku, který má nejvyšší energetickou náročnost, je kombinovaná vlna 10/350  $\mu s$ .

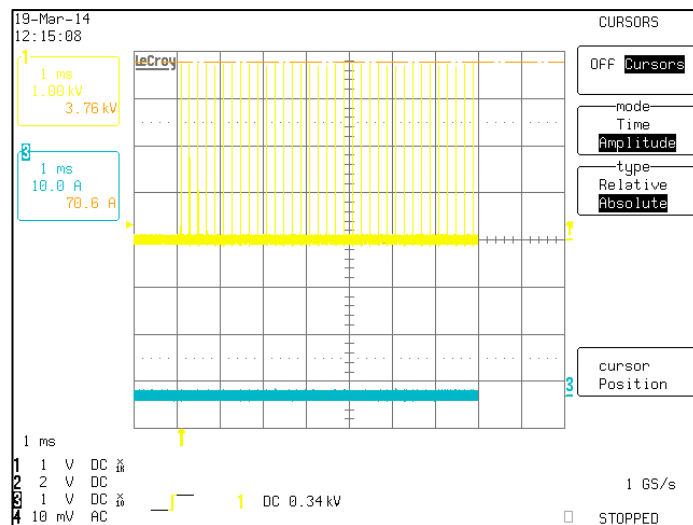


Obr. 4-1: Zkušební napětiová vlna 1,2/50 $\mu s$  převzato z [7]

Obr. 4-2: Zkušební proudová vlna 8/20 $\mu$ s převzato z [7]

## 4.2 Burst signál

Je průběh napětí, který definuje norma ČSN EN 61000-4-4 a slouží pro simulaci spínacích přepětových jevů. Tyto krátké impulzy jsou označovány rychlými přechodovými jevy EFT – Elctrical Fast Transients. Výstižný pro tento průběh je český překlad „dávka“ z anglického názvu Burst. Měřicí signál se skládá z opakujících se skupin rychlých napětových výbojů. Skupiny se periodicky opakují po 300ms a délka jedné z nich je 15ms. Po tuto dobu jsou generovány impulzy průběhem podobné Surge signálu, ale s podstatně kratší dobou čela a půltýlu. Jeden impulz má délku 5/50 ns a v jedné skupině se opakují s frekvencí 2,5 nebo 5 kHz.. [8]



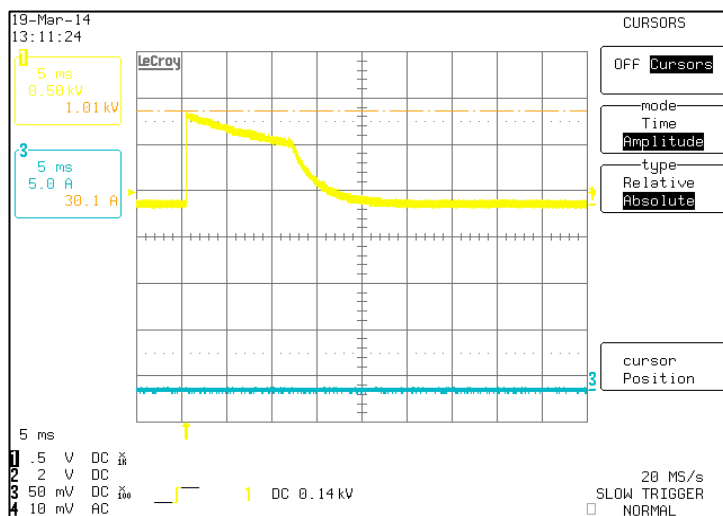
Obr. 4-3: Průběh jedné skupiny impulzů Burst signálu

Na obrázku 4-3 je zachycený průběh jedné skupiny rychlých impulzů s amplitudou 4kV ze signálu, který jsem používal při měření v laboratoři. 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.

### 4.3 Elektrostatický výboj

Jak je popsáno výše v kapitole 2.3, elektrostatický výboj nepřenáší velkou energii, ale přesto ohrožuje funkci a životnost elektronických obvodů. Norma ČSN EN 61000-4-2 popisuje testování ochran a zařízení proti ESD (ElectroStatic Discharge). Zkoušky se provádí jednoúčelovým ESD generátorem a náboj se na testovaná zařízení přivádí třemi způsoby pomocí vybíjecí pistole. Kontaktní výboj se přivádí pomocí pistole přímo na povrch zkoušeného zařízení, a to tak, že se nejprve přiloží hrot a poté se aplikuje výboj. Vzduchový výboj se přivádí přibližováním již nabitého kulatého hrotu pistole k povrchu, až dojde k přeskoku a vybití náboje přes vzduchovou mezeru. Nepřímé působení výboje se provádí přivedením náboje na vazební rovinu, kterou je svislá kovová deska nebo podložka pod zařízením, oddělená izolační podložkou. Při kontaktních výbojích je používáno napětí od 1kV až 8kV, pro vzdušný výboj pak až 15kV. [7] [8]

Při mém měření byly přímé výboje aplikovány rovnou na kontakty ochrany, takže se na ni dostalo největší možné množství energie a nepřímé přes stěny kovové odizolované krabíčky simulující kryt zařízení, v níž byla ochrana umístěna. Obecný průběh jednoho kontaktního výboje 1kV je zaznamenán na obrázku 4-4, který byl změřen přímo na hrotu kontaktní pistole.

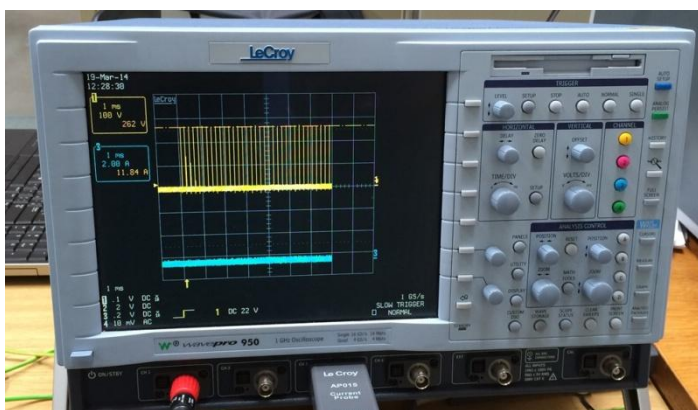


Obr. 4-4: Kontaktní elektrostatický výboj 1kV



## 5 Vyhodnocení

Měření probíhalo v univerzitní laboratoři pro práci s vysokým napětím, pod dohledem vedoucího práce. Ochrany, které byly k dispozici, jsem otestoval všemi třemi výše popsanými signály a výsledkem je srovnání, jak která z nich reaguje na daný typ přepětí. Všechny výsledky byly měřeny na digitálním osciloskopu LeCroy Wave pro 950 a většina průběhu zaznamenána i do obrázkového formátu tif. Tyto obrázky jsou v elektronické příloze této práce. Stejně tak změřená data jsou uvedena v tabulkách v příloze A.



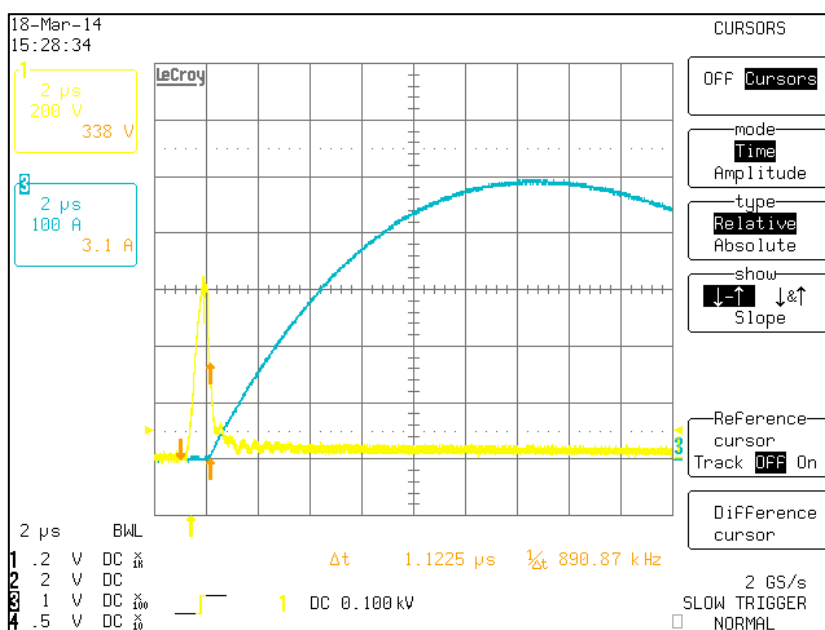
Obr. 5-1: Osciloskop LeCroy Wave pro 950

### 5.1 Měřené ochrany

Cílem měření bylo analyzovat působení ochran, tedy obecně reakce daného typu ochrany na testovací signál. Pro srovnání byly vybrány ochrany pro nízké napětí, které byly v danou dobu k dispozici v laboratoři. A to jiskřiště s označením CPC AL240L a varistor bez konkrétního označení. Níže uvedené charakteristiky odpovídají výsledkům měření jednoho kusu, ale jejich průběhy lze zobecnit pro daný typ, např. varistor. Charakteristiky, kde je srovnáváno jiskřiště s varistorem jsou výsledkem těchto konkrétních kusů. Jak bylo později zjištěno, podobné typy ochran jsou použity v reálném zapojení domácích ochran, jak v domovních elektroinstalacích, tak např. v prodlužovacím přívodu s přepětovou ochranou, který používám doma u PC. Ten byl v závěru měření testován surge signálem pro ověření jeho funkčnosti po cca 8 letech provozu. Obě samotné ochrany, tedy jiskřiště i varistor byly upevněny v plastovém těle bývalé ochrany na rozvaděčovou lištu a elektrody vyvedeny ven pro připojení generátoru a osciloskopu. Testovací signál byl přiváděn přímo na elektrodu ochrany. Za ní jsem měřil osciloskopem průběh omezeného napětí a proud svedený do země.

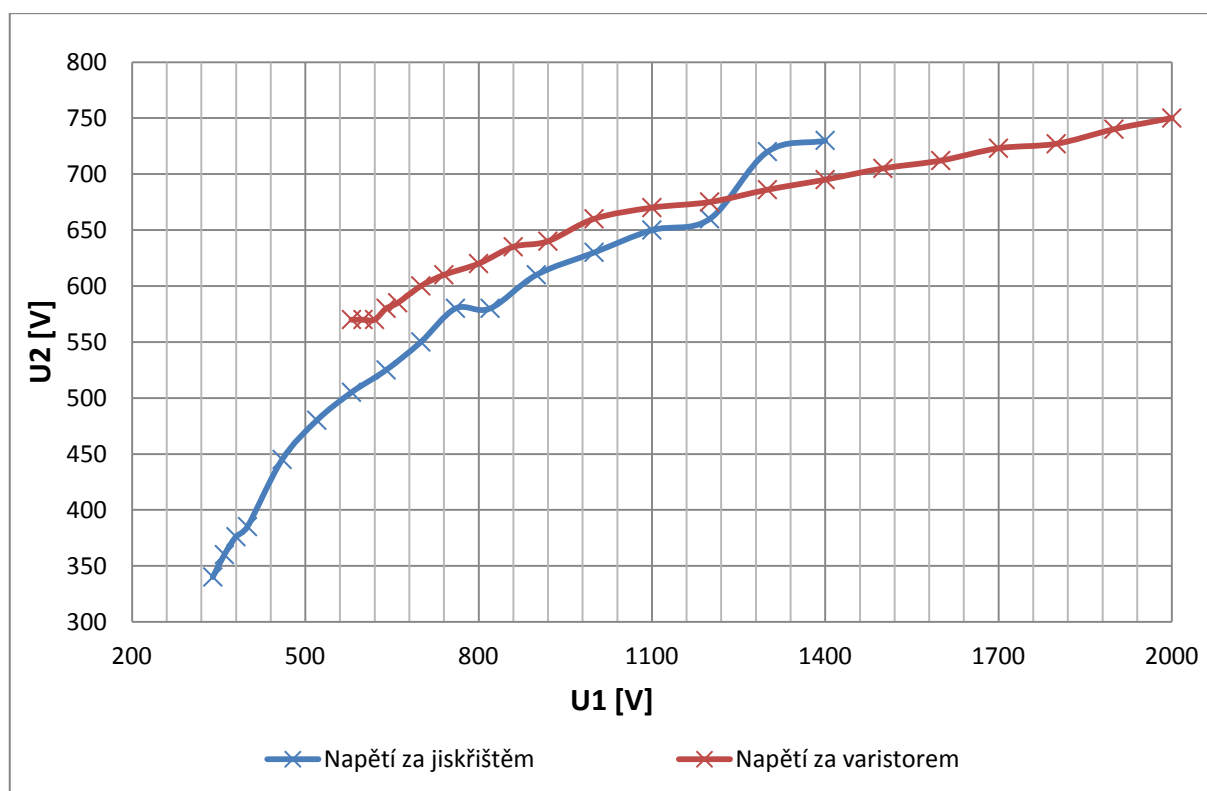
## 5.2 Surge test

Jde o klasický test rázovým impulzem, simulující LEMP přepětí. Jako zdroj impulzů byl použit univerzální generátor EM TEST UCS500 s vnitřním odporem  $R_i = 2\Omega$  a maximálním napětím impulsu 4kV. Proud svedený ochranou do země jsme měřili sondou LeCroy CP500, která má omezení  $I_{peak} = 700A$ , proto jsme napětí impulsu zvyšovali jen do dosažení této hodnoty. Při měření jiskřiště bylo podle předpokladu nalezeno zápalné napětí, tedy hranice, před kterou jiskřiště ještě neovlivňuje obvod, ani není schopno svést proud. Hodnotu zápalného napětí jsem určil na 380V, kdy došlo k výboji a svedení proudu velké hodnoty, tedy zkratu. Nicméně za jiskřiště projde ještě většina přepětí, než se zapálí oblouk a dojde k omezení. Tato doba trvala 12  $\mu s$ . Až od cca 600V začíná být rozdíl mezi napětím před a za jiskřištěm znatelný, impuls rychleji dosáhne zápalného napětí, tudíž je menší zpoždění svedení proudu (zapálení oblouku) a napětí je omezeno. Pro 1kV napětí rázového impulsu svádí proud 495A a omezuje napětí na 630V za ochranou se zpožděním 1,12  $\mu s$ . Tento průběh je zaznamenán na obrázku 5-2. Žlutou barvou je vyznačen průběh napětí a modrou průběh proudu. Celá časová závislost přepětí a odvedení proudu je vynesena v grafu na obr 5-5.

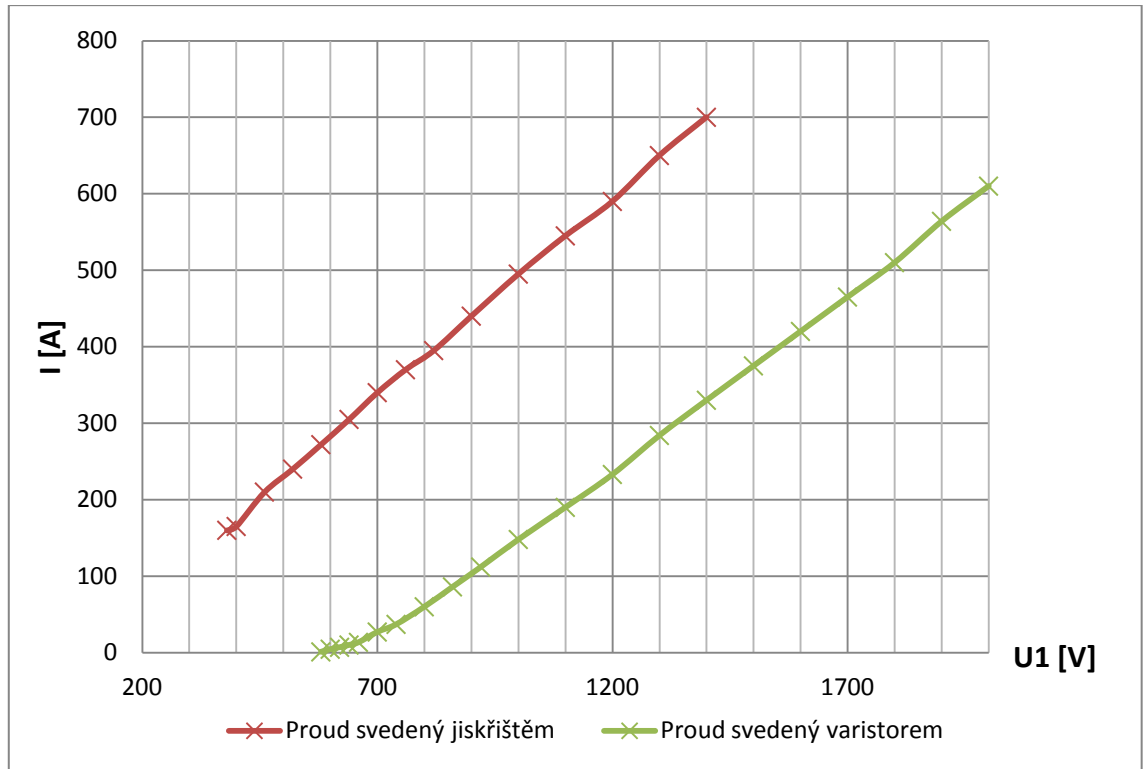


Obr. 5-2: Rázový impulz 1kV na jiskřišti

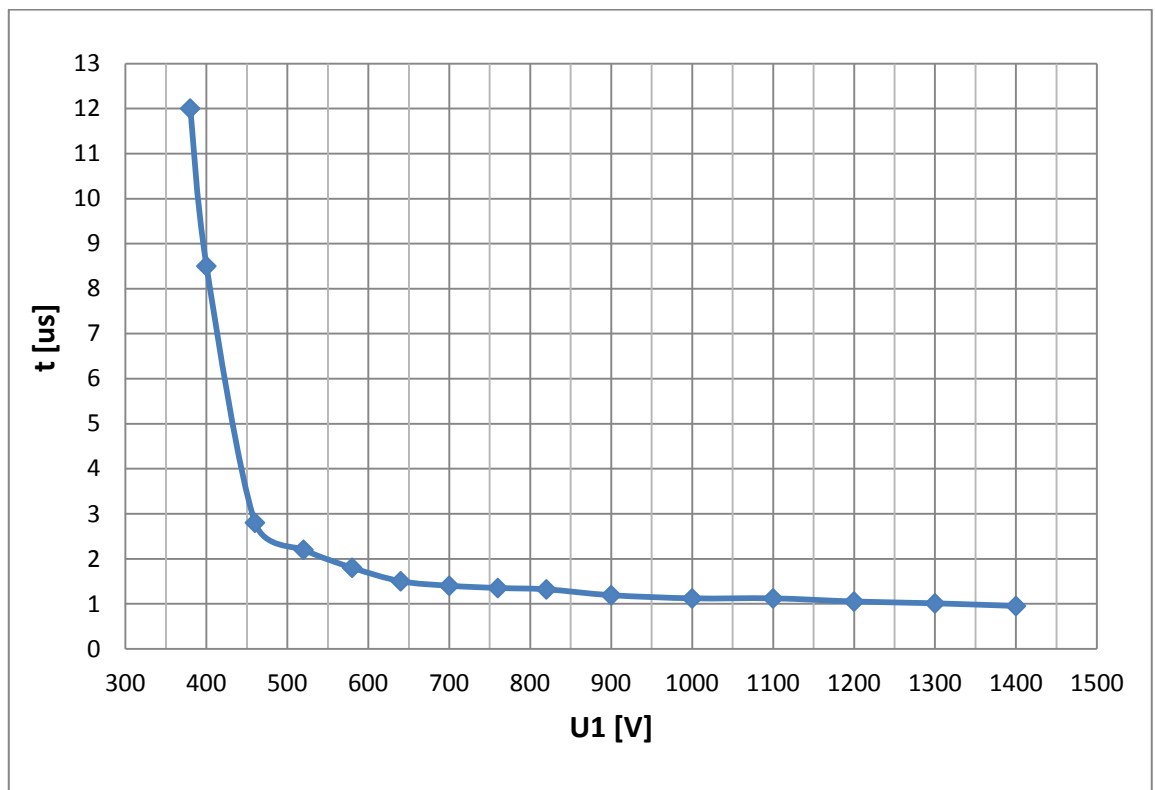
Varistor při hodnotách zápalného napětí jiskřiště ještě vůbec nereaguje, začíná otvírat až při 580V a svádí malou hodnotu proudu. Z počátku změřené charakteristiky na obrázku 5-3 omezuje napětí na mírně vyšší hodnotu než jiskřiště, reaguje ale rychleji a odvádí podstatně menší proud, tudíž je přepětí za ním pouze omezeno a trvá po celou dobu impulzu. Od cca 1,2kV se hodnoty napětí za ochranami vyrovnají a dále více omezuje varistor, přičemž hodnota proudu je v tomto bodě menší než polovina toho, co odvede jiskřiště. Mohl jsem tak s varistorem měřit do vyšších hodnot napětí impulzu, než odváděný proud dosáhl omezení sondy. Charakteristika jiskřiště je zvlněná, protože ne vždy byly stejné časové intervaly mezi jednotlivými impulzy a byly různé podmínky v dielektriku pro vznik oblouku. Napětově závislý odpor reagoval uceleně. V grafu na obrázku 5-4 je vynesena závislost odváděného proudu na napětí obou ochran. Je z něj patrné, že proud svedený jiskřištěm při zkratu je řádově vyšší, než proud svedený varistorem. Tudíž i napětí za ním rychle klesá po zapálení oblouku a má tvar impulzu, jak je vidět na obr 5-2, zatímco přepětí za varistorem trvá delší dobu a více zatěžuje zařízení za ochranou.



Obr. 5-3: Napětí za ochranami při surge testu



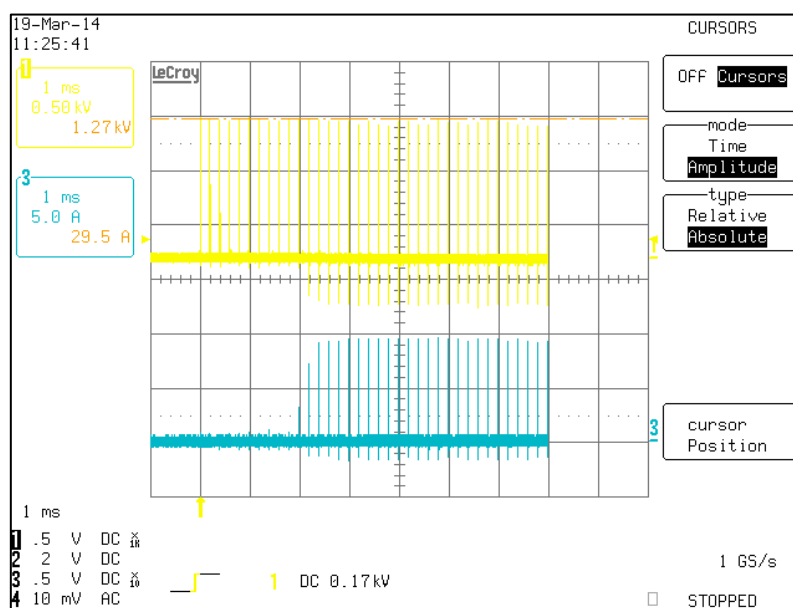
Obr. 5-4: Porovnání proudů svedených ochranami při Surge testu



Obr. 5-5: Časová prodleva odvedení proudu po přivedení rázového impulzu na jiskříště

### 5.3 Burst test

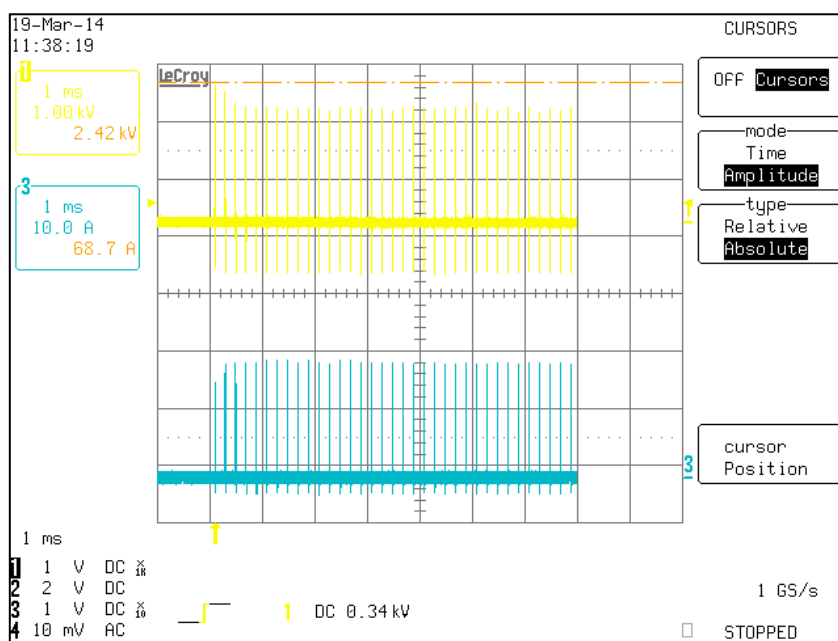
Stejně ochrany jsem testoval i Burst signálem a ověřoval tak jejich schopnost omezit SEMP přepětí. Tedy takové, které má menší energii, ale přesto svým průběhem může být likvidační pro jemnou elektroniku. Jako zdroj impulzů byl opět použit univerzální generátor EM TEST UCS500. Napětí impulzu bylo zvyšováno až do maximální hodnoty generátoru, tedy 4kV. Pro snímání odváděného proudu, který měl při tomto měření menší hodnoty, byla použita sonda LeCroy AP015 aby bylo dosaženo menšího rušení vlivem indukce. Přívodní vodiče a vodiče sondy bylo třeba uspořádat do co největší vzdálenosti od sebe a do pozice, kdy indukované rušení dosahovalo nejmenších hodnot. Tento indukovaný proud dosahoval 90mA při celém měření. V den testu probíhalo v laboratoři současně ještě jiné měření a tak mohlo být rušení způsobené chodem jiných vysokonapětových zařízení. Vzhledem k hodnotám měřeného proudu ale nemělo zásadní vliv na výsledné hodnoty.



Obr. 5-6: Reakce jiskřiště na Burst signál v momentu zapálení oblouku

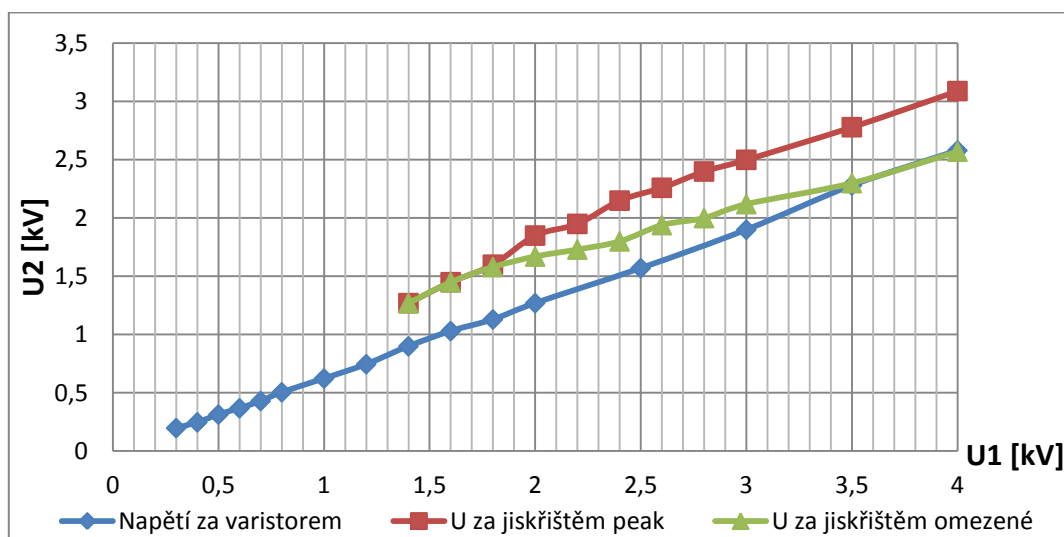
Zajímavým výsledkem tohoto testu je reakce jiskřiště na Burst signál. Dle předpokladu začíná reagovat až na vyšší hodnoty napětí než varistor. Zápalné napětí při tomto testu jsem stanovil na 1,4kV. Je to hranice, kdy jiskřiště ve většině případů opakovaní zareagovalo svedením proudu, ale ještě příliš neomezilo napětí. V tomto bodě při  $U_1 = 1,4\text{kV}$  se napětí za ochranou rovnalo 1,27kV a odvedený proud byl 9,2A. Tento průběh je zachycen na obrázku 5-6 z osciloskopu. Jak je vidět, jiskřiště reagovalo až po proběhnutí cca 1/3 impulzů ze skupiny, tedy poté, co se nashromáždil dostatečný náboj na elektrodách. Modrou barvou je v Obr. 5-6 vyznačen průběh proudu a žlutou barvou napětí.

Z toho plyne, že pro zapálení oblouku je potřeba více energie, než kolik obsahuje jeden impulz ze skupiny. Ten trvá příliš krátkou dobu a přepětí se dostane za ochranu. Při zvyšování napětí Burst signálu se tento nedostatek projevuje tak, že je proud sveden sice dříve než na hranici zapálení, ale několik prvních impulzů projde přes jiskřiště téměř bez omezení. Až po několika špičkách se nashromáždí na jiskřišti dostatečná energie, aby došlo k zapálení oblouku a omezení napětí. Tento průběh je zachycen na obrázku 5-7, kdy bylo napětí signálu 2,8kV a přes jiskřiště se v prvním okamžiku dostane špička napětí  $U_2 = 2,4\text{kV}$ . První impulz napětí, vyznačený v obr 5-7 žlutou barvou, dosahuje největší hodnot, zato proud (modrá barva), má při první špičce nižší hodnotu než ve zbytku. K ustálení hodnot dojde po několika impulzech vlivem zpoždění zapálení oblouku. Proto je ve výstupní charakteristice na obr 5-8 jiskřiště uvedeno napětí špičkové a napětí omezené. Hodnoty omezeného napětí jsou vyšší než hodnoty za varistorem.



Obr. 5-7: Rozdíl špičkového a omezeného napětí za jiskřištěm

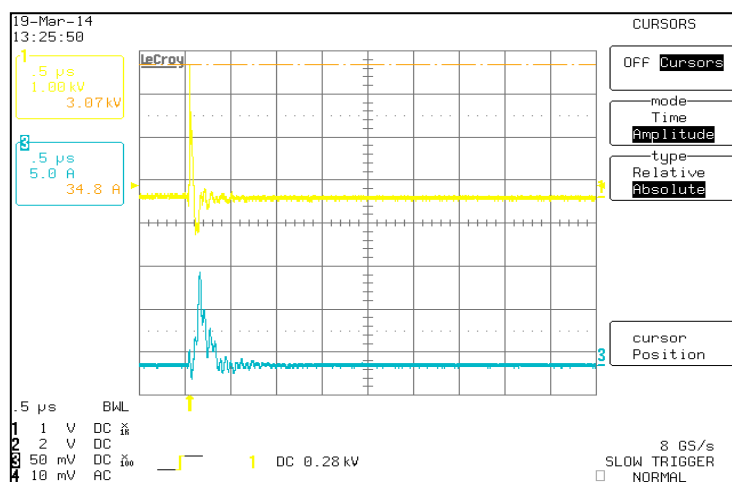
Reakce varistoru na tento typ přepětí je ucelená a lineární, už od nízkých hodnot přepětí omezuje a odvádí proud. Charakteristiku jsem začal měřit na hodnotě  $U_1 = 300\text{V}$ , kdy varistorem procházel proud přibližně 1A. V bodu, kdy jiskřiště začíná reagovat, už varistor omezuje napětí 500V, tedy z 1,4kV na 900V za ochranu. Srovnání působení obou ochran je v grafu na obrázku 5-8. Varistor při maximálním napětí testovacího signálu 4kV sváděl proud 19A, zatímco jiskřiště 30A. Charakteristiky odváděných proudů jsou uvedeny v příloze B na stranách 3 a 4.



Obr. 5-8: Reakce ochran na Burst signál

## 5.4 ESD test

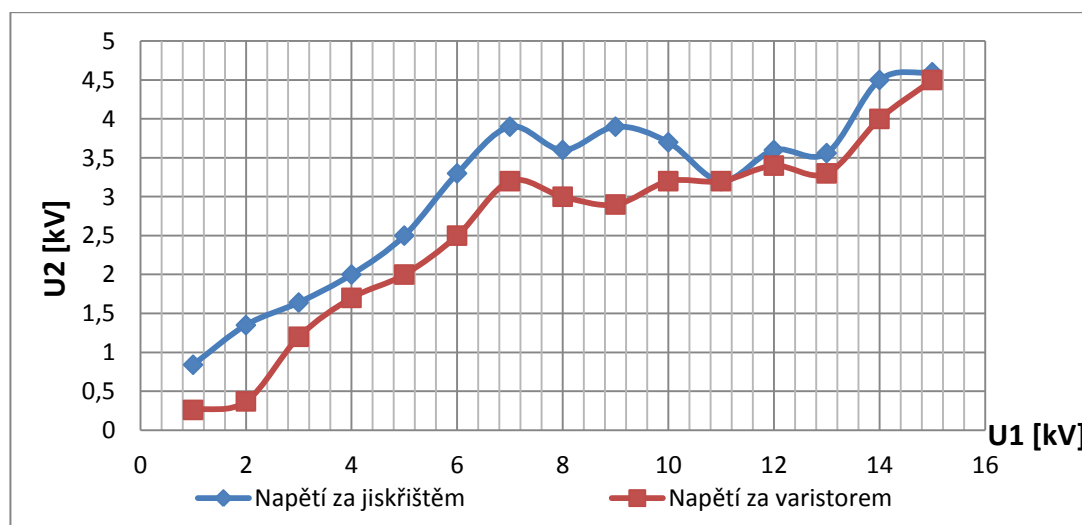
Tuto zkoušku jsem zařadil i přesto, že k výboji dochází často v místech, kde nemůže uškodit. Stejně tak může ale dojít k vybití náboje obsluhy v místech napájecí svorky při manipulaci se zařízením, které momentálně není v provozu, nebo indukci přes kryt zařízení do míst napájecího obvodu. Reakci ochran jsem měřil dvojím způsobem, a to přeskokem přes vzduchovou mezeru a kontaktním výbojem. Testování odolnosti zařízení a hotových spotřebičů proti ESD popisuje norma ČSN EN 61000-4-2, kdy měření probíhá na přesně specifikovaném pracovišti. Já jsem měřil pouze reakci samotné ochrany a tomu bylo přizpůsobené i pracoviště. Zdrojem výbojů byl jednoúčelový generátor EM TEST ESD 30 a pro kontaktní výboj byla použita pistole se špičatým hrotem a maximálním napětím 8kV, pro vzdušný výboj pak pistole s kulatým hrotem a napětím výboje až 15kV. Jak vypadá průběh jednoho elektrostatického výboje 1kV, je uvedeno výše v textu práce na obrázku 4-4.



Obr. 5-9: ESD 5kV na jiskřičti

### 5.4.1 Přímé výboje

Při kontaktním výboji se přes jiskřiště, tak jako v předchozím testu, dostala větší část přepětí než přes varistor. Jakmile došlo k zapůsobení jiskřiště byl výboj okamžitě svedený do země a přepětí za jiskřištěm tak mělo tvar krátké špičky s dobou trvání  $1\mu\text{s}$  jak je vidět na obrázku 5-9. Na obrázku je zachycený průběh za jiskřištěm při kontaktním výboji 5kV, svedený proud má hodnotu 10,8A. Jiskřiště zapálením oblouku odvedlo veškerou energii výboje, zatímco na varistoru, zejména u nižších hodnot napětí, zůstávala část náboje na elektrodách. Špička přepětí byla více a rychleji omezena, ale po obnovení odporu varistoru zůstávala mírně zvýšená hladina napětí na varistoru. Tento zbytkový náboj byl odváděn uzemněním před každým dalším opakováním. Při testování vzdušným výbojem bylo napětí impulsu až 15kV. Výboj přes vzduchovou mezeru byl velmi nestálý a hodnoty napětí na ochranách se při každém pokusu na stejné úrovni lišily. I přes snahu přibližovat vybíjecí pistolí vždy pod stejným úhlem a konstantní rychlostí, nebyly podmínky pro přeskok totožné. Proto zaznamenané a do grafu vynesené hodnoty jsou spočteným průměrem z několika opakování. Dle předpokladu se vzdálenost, potřebná pro přeskok, s rostoucím napětím zvyšovala. Pro hodnoty nad 10kV byla delší než 1,5 cm. Hodnoty omezeného napětí za ochranami v případě vzdušného výboje s vyšším napětím nebyly vyšší, než při kontaktním výboji. Obě ochrany omezily výboj na podobné hodnoty cca 4,5kV za ochranou, větší odvedená energie je vidět na proudu svedeném do země, který byl 2x větší při vyšších hodnotách vzdušného výboje než kontaktního. V grafu na obrázku 5-10 je vynesena závislost velikosti napětí za ochranou na napětí vzdušného výboje. Další změřené charakteristiky kontaktního výboje a odvedených proudů jsou v příloze B na straně 5.

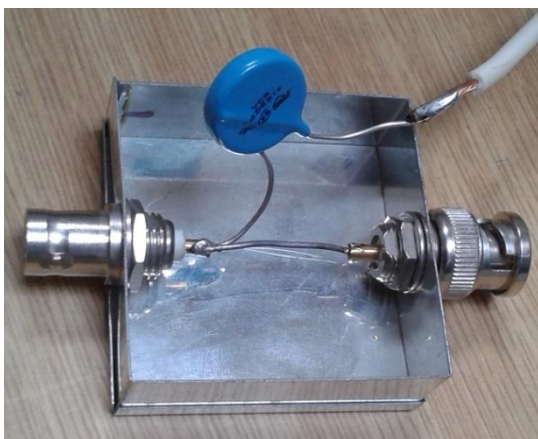


Obr. 5-10: Omezené napětí za jiskřištěm a varistorem při vzdušném výboji



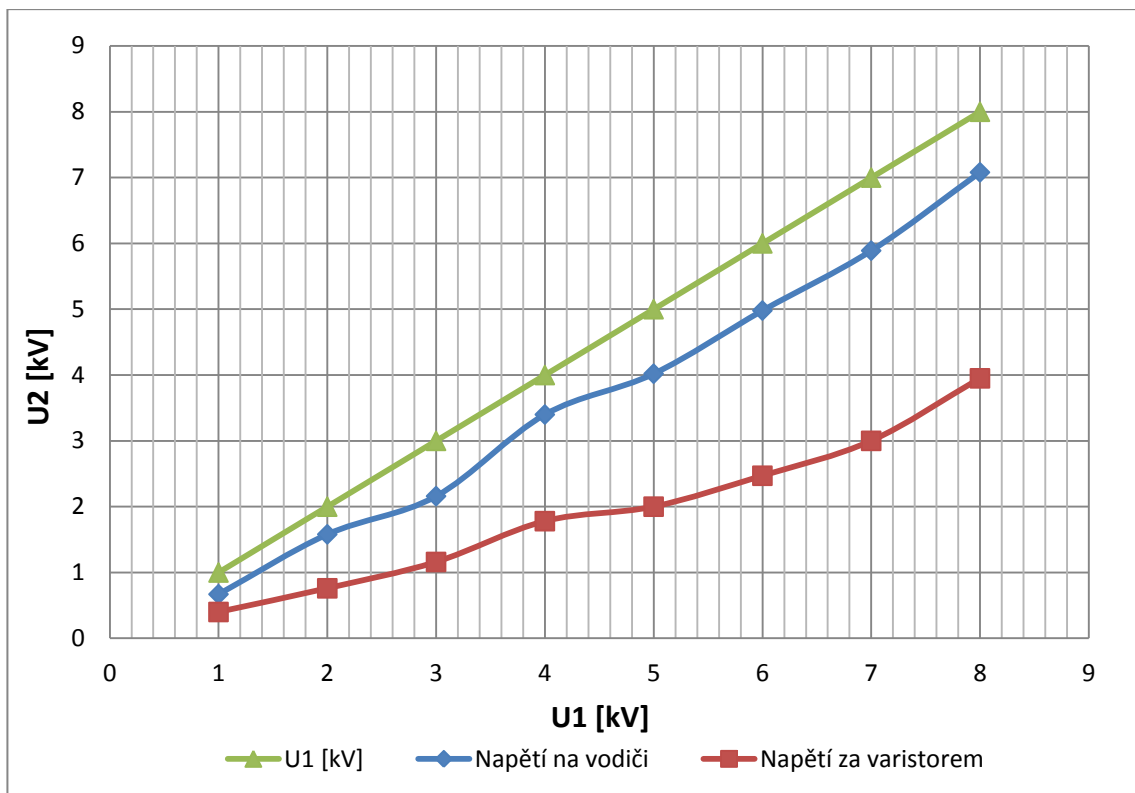
### 5.4.2 Nepřímý výboj

Nepřímým výbojem jsem testoval pouze varistor typ 14D681K, jehož varistorové napětí je na 680V. Kryt zařízení simulovala krabička z tenkého plechu, ve které byl dříve umístěn některý prvek anténní techniky (zesilovač impedanční přizpůsobení apod.). Rozměr krabičky byl čtvercový o délce strany 6 cm a výšce 2 cm, vzdálenost vodičů od víka krabičky byla tedy 1 cm a v místě konektorové průchodky BNC byla kruhová PU izolace o průměru 7 mm. Nejprve jsem do krabičky umístil běžný vodič s průřezem podobným elektrodám varistoru a na něm měřil velikost indukovaného napětí přes vzduchovou mezeru. Hrot vybíjecí pistole pro kontaktní výboje byl přikládán na víko krabičky přímo nad vodičem i varistorem, protože tak byla indukce nejvyšší, po přiložení hrotu do rohu krabičky docházelo jen k velmi malé indukci napětí a proto zde ani tyto hodnoty nejsou uvedeny. Po změření indukovaného napětí jsem jednou elektrodou k vodiči naletoval varistor a druhou uzemnil.

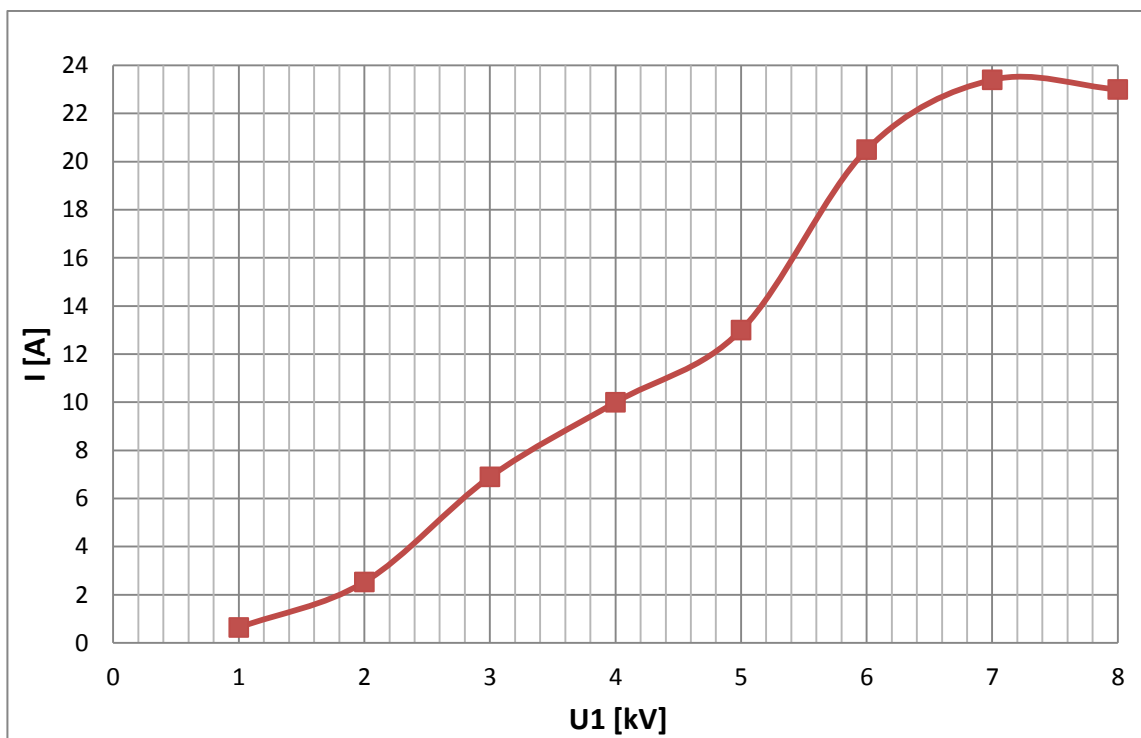


Obr. 5-11: Zapojení varistoru pro test nepřímým výbojem

Na samotném vodiči jsem změřil hodnoty indukovaného napětí a proud tekoucí do kapacitního děliče napěťové sondy. Hodnoty proudu jsou uvedené v tabulkách v příloze, ale pro srovnání slouží především hodnoty napěťové, tedy kolik napětí se indukuje do samotného vodiče a na kolik ho omezí varistor. Hodnoty změřených proudů nelze srovnávat jako stejnou veličinu, protože při zapojení varistoru jsem změřil proud odvedený do země. Při měření napětí na samotném vodiči se do něj indukovala velká část výboje, při maximálním napětí 8kV bylo napětí na vodiči 7,08kV. Varistor tento výboj omezil na 3,95 kV a svedl proud 23A, čili omezil výboj na polovinu. Takto reagoval, při měření celé charakteristiky, která je na obrázku 5-12, Oproti hodnotám při přímém výboji přes vzduchovou mezeru je toto napětí vyšší. Důvodem je větší plocha, do které se výboj rozloží a působí tak na celé tělo varistoru i vodiče a naindukuje se větší část napětí, než když je celý elektrostatický výboj přiveden na jedno místo.

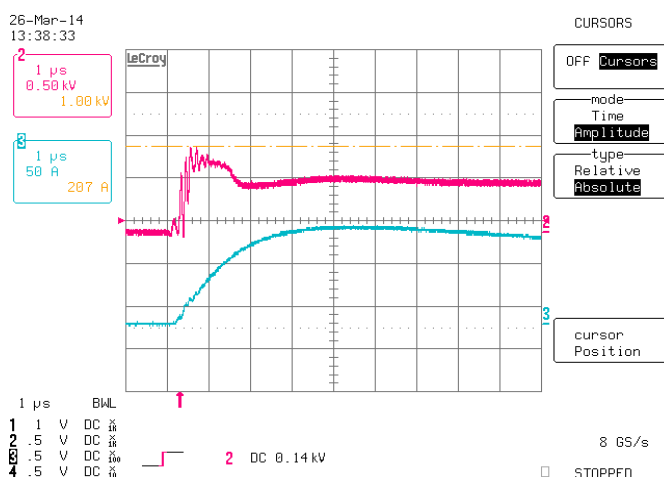


Obr. 5-12: Srovnání původního indukovaného napětí a omezeného varistorem



Obr. 5-13: Proud odváděný varistorem do země po nepřímém výboji

## 5.5 Surge test domácího prodlužovacího přívodu



Obr. 5-14: Reakce ochrany prodlužovacího přívodu na Surge 2kV

Prodlužovací přívodní kabel s označením Ben Electronic LFT2001 používám doma k PC bez problémů již řadu let. Do testu jsem jej vzal pouze pro informativní ověření jeho funkčnosti a analýzu funkce reálného zapojení přepětových ochran. Při měření byl zapojen přímo do výstupu generátoru EM TEST UCS500, pouze přes redukci od výrobce bez jiných propojovacích kabelů. Hodnoty napětí byly snímány z fázového vodiče, propojujícího zdířky zásuvek a proud z ochranného vodiče proudovou sondou LeCroy CP500. Změřil jsem pouze 3 hodnoty přepětí kombinovanou vlnou, a to 1, 1,5 a 2kV, ze kterých je patrná spolehlivá reakce ochrany. Na obr. 5-14 je zaznamenaný průběh napětí a proudu za ochranou při 2kV napětí vlny. Přes zapojení nejprve projde špička o maximální velikosti 1kV (červená barva) a po svedení proudu (modrá barva) klesne napětí na 660V. Tato reakce je velmi rychlá, proud vysoké hodnoty 114A je odveden do 4 $\mu$ s, během kterých napěťová špička rychle klesá na ustálenou hodnotu. Při nižších hodnotách byla reakce obdobná, kdy velmi krátká špička dosahovala cca 2/3 testovací vlny a ustálená hodnota pak 1/2 napětí. Norma ČSN EN 61000-6-1 stanovuje požadavek na zařízení v prostředí obytném, obchodním a lehkém průmyslu na odolnost proti Surge impulzu. V tomto prostředí musí zařízení odolat 2 kV Surge testu mezi napájecími vodiči a zemí. Stejným testem prošel tento prodlužovací kabel s ochranou a výsledkem je, že při jeho použití se téměř dvojnásobně zvyšuje ochranná úroveň připojeného spotřebiče, protože omezuje přepětový signál na polovinu.

Tab. 1: Hodnoty Surge testu prodlužovacího přívodu:

U1 [kV]		1	1,5	2
U2 [kV]	peak	0,715	0,887	1
	omezené	0,56	0,62	0,66
I [A]		35	73	114

## 6 Závěr

Cílem této práce bylo analyzovat reakci přepětových ochran na napětové impulzy různého průběhu, tedy i na takové, na které nejsou navrženy a zjistit, jak je lze využít k ochraně proti těmto nestandardním signálům. Přepětí, jejich účinky a druhy přepětových ochran jsou taktéž popsány v teoretické části, praktická se pak zabývá rozborem jejich působení. Pro každé z vybraných přepětí jsem ve čtvrté kapitole popsal normalizovaný testovací signál a pro účely testování a porovnání jednotlivých ochran jsem navrhl a provedl měření, která jsou popsána v 5. kapitole.

Přepětové ochrany pro test byly vybrány takové, které byly k dispozici v laboratoři pro celou dobu měření. Testoval jsem vzduchové uzavřené jiskřiště a varistor, obojí určené pro nízké napětí. Jiskřiště jako zástupce ochrany, která svede přepětí za cenu zkratování obvodu a varistor jako ochranu, využívající materiál s proměnlivým odporem. Hodnoty omezení nejsou směrodatné, platí konkrétně pro tyto kusy, ale výsledek tohoto srovnání lze zobecnit na tyto typy ochran.

Při Surge testu se na jiskřišti objevoval zkrat při podstatně nižších hodnotách napětí, než zareagoval varistor. Už od 380V impulzu svádí jiskřiště 160A, zatímco varistor se otevírá až kolem 600V a svádí menší proud. Se zvyšujícím se napětím impulzu se ale napětí za varistorem zvyšuje jen mírně oproti jiskřišti. Je tedy více omezeno, ale trvá, dokud se vybije impulz, zatímco jiskřiště ho zkratuje ihned po zapálení oblouku. Tato prodleva způsobí průnik vyššího napětí za ochranu. Zápalné napětí způsobovalo komplikace i u testu Burst signálem, jež se skládá se skupin rychlých výbojů. Při napětí 1,4kV začalo jiskřiště reagovat, ale ne spolehlivě a některé skupiny prošly celé. S vyšším napětím signálu reagovalo vždy, ale než se na jiskřišti nashromáždilo dostatečně množství energie pro zapálení, prošlo za něj několik impulzů ze skupiny bez omezení. Čili pro tento typ přepětí není jiskřiště jako jediná ochrana vhodná. Naopak varistor reaguje spolehlivě a nedochází k žádným překmitům. Na úrovni, kdy jiskřiště začíná reagovat, už omezuje na 900V za ochranou. Při ESD testu reagovaly obě ochrany rychle a spolehlivě. Jiskřiště zkratovalo výboj během jednotek  $\mu\text{s}$ , varistor ho pouze omezil na podobnou úroveň, ale přepětí trvalo delší dobu. Při vzdušném výboji s téměř dvojnásobným napětím než při kontaktním byla odváděna větší energie a omezené napětí dosáhlo stejných hodnot cca 4,5kV.

Nepřímé působení výboje jsem testoval uzavřením varistoru do plechové krabičky, která simulovala kryt zařízení. Výsledek srovnání napětí indukovaného do samotného vodiče a omezeného varistorem je, že při použití ochrany je přepětí ve všech úrovních omezeno na polovinu. Bez ochrany se do vodiče indukuje téměř celé napětí výboje.

Analýzou působení těchto ochran jsem prokázal, že ochrany jsou schopné působit na přepětí typu surge, ale i EFT a ESD. Jiskřiště je vhodné pro omezení vysokonapěťových impulzů zkratováním obvodu. Spolehlivě působí i při výbojích s nízkou energií. Špatně ale reaguje na rychlé přechody s nižším napětím, tedy spínací přepětí. Varistor naopak omezuje tyto Burst signály bez problému, stejně tak vysokonapěťové impulzy, odvádí ale menší proud a tak přepětí za ním trvá delší dobu než za jiskřištěm. Tato práce a její výsledky mohou být uplatněny například při návrhu napájecích obvodů, nebo konstrukci zařízení.

## Použitá literatura

- [1] BURANT, J.: *Blesk a přepětí, Systémová řešení ochran*. Praha: Vydavatelství FCC Public s.r.o., 2006, ISBN 80-86534-10-3, str.11-34
- [2] HASMAN, T.: *Přepětí v elektroenergetické soustavě*, Praha: Vydavatelství ČVUT, 1997, ISBN 80-01-01699-4
- [3] VEVERKA, A.: *Technika vysokých napětí*, Praha, Nakladatelství technické literatury, 1978, druhé přepracované vydání, 04-512-78, str. 199 - 205
- [4] MACHÁČEK V.: *Přístupy řešení ochrany před přepětím v distribučních sítích*. ELEKTRO 5/2007, str. 4. -10.
- [5] Studijní materiály k předmětu Elektroenergetika 2, Katedra elektroenergetiky a ekologie, ZČU Plzeň 2012
- [6] KUBÍK Z., SKÁLAJ.: *Měření a simulace odolnosti varistorů standardními a nestandardními testy*. Electroscope 3/2011 FEL/KAE ZČU Plzeň 2011.  
Dostupné z: <https://otik.uk.zcu.cz/bitstream/handle/11025/616/r5c2c3.pdf?sequence=1>
- [7] LAURENC J.: *Rázový impulz „Surge“*. ZČU Plzeň, Fakulta elektroenergetiky a ekologie. Studijní materiálu k předmětu Elektromagnetická kompatibilita.  
Dostupné z: <http://home.zcu.cz/~laurenc/emc.php>
- [8] SVAČINA J.: *Elektromagnetická kompatibilita*. Brno 2002. Učební text. VUT Brno, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií.

## Příloha A Tabulky:

Tabulka 1: Hodnoty napětí změřené při Surge testu

Napětí za varistorem	<b>U1 [V]</b>	580	600	620	640	660	700	740	800	860	920	1000	1100	1200	1300	1400	1500	1600	1700	1800	1900	2000
	<b>U2 [V]</b>	570	570	570	580	585	600	610	620	635	640	660	670	675	686	695	705	712	723	727	740	750
Napětí za jiskřištěm	<b>U1 [V]</b>	<b>340</b>	<b>360</b>	<b>380</b>	<b>400</b>	<b>460</b>	<b>520</b>	<b>580</b>	<b>640</b>	<b>700</b>	<b>760</b>	<b>820</b>	<b>900</b>	<b>1000</b>	<b>1100</b>	<b>1200</b>	<b>1300</b>	<b>1400</b>				
	<b>U2 [V]</b>	340	360	376	385	445	480	505	525	550	580	580	610	630	650	660	720	730				

Tabulka 2: Hodnoty proudu změřené při Surge testu

Proud svedený varistorem	<b>U1 [V]</b>	580	600	620	640	660	700	740	800	860	920	1000	1100	1200	1300	1400	1500	1600	1700	1800	1900	2000
	<b>I [A]</b>	1	4,5	7	10	13,5	27	37	60	86	112	148	190	233	284	330	375	420	465	510	564	610
Proud svedený jiskřištěm	<b>U1 [V]</b>	<b>340</b>	<b>360</b>	<b>380</b>	<b>400</b>	<b>460</b>	<b>520</b>	<b>580</b>	<b>640</b>	<b>700</b>	<b>760</b>	<b>820</b>	<b>900</b>	<b>1000</b>	<b>1100</b>	<b>1200</b>	<b>1300</b>	<b>1400</b>				
	<b>I [A]</b>			160	165	210	240	272	305	340	370	395	440	495	545	590	650	700				

Tabulka 3: Hodnoty změřené při Burst testu jiskřiště

<b>U1 [kV]</b>	1,4	1,6	1,8	2	2,2	2,4	2,6	2,8	3	3,5	4
<b>U2 max [kV]</b>	1,27	1,45	1,6	1,85	1,95	2,15	2,26	2,4	2,5	2,78	3,09
<b>U2 omezeno [kV]</b>	1,27	1,45	1,58	1,67	1,73	1,8	1,94	2	2,12	2,3	2,57
<b>I [A]</b>	9,5	10,6	12,4	14,2	15,8	17,2	19	20,6	22	25,8	30

Tabulka 4: Hodnoty změřené při Burst testu varistoru

<b>U1 [kV]</b>	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	1	1,2	1,4	1,6	1,8	2	2,5	3	3,5	4
<b>U2 [kV]</b>	0,198	0,247	0,314	0,368	0,43	0,505	0,623	0,746	0,9	1,03	1,13	1,27	1,57	1,9	2,28	2,58
<b>I [A]</b>	1,2	1,55	2	2,3	2,7	3,05	3,8	4,5	5,3	5,95	6,9	7,5	9,8	12,5	16	18,9

Tabulka 5: Hodnoty změřené při ESD testu přes vzduchovou mezeru

	<b>U1 [kV]</b>	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Jiskřiště	<b>U2 [kV]</b>	0,84	1,35	1,64	2	2,5	3,3	3,9	3,6	3,9	3,7	3,2	3,6	3,56	4,5	4,6
	<b>I [A]</b>	1,21	3,8	6	8,4	10,6	12	14,5	17,2	18,8	22	23,5	26,5	30,5	31	31
Varistor	<b>U2 [kV]</b>	0,26	0,37	1,2	1,7	2	2,5	3,2	3	2,9	3,2	3,2	3,4	3,3	4	4,5
	<b>I [A]</b>	1,8	3,8	5,6	7	11	12	11	15	18	20	20	21	23	24	27

Tabulka 6: Hodnoty změřené při ESD testu kontaktním kontaktem

	<b>U1 [kV]</b>	1	2	3	4	5	6	7	8
Jiskřiště	<b>U2 [kV]</b>	1	1,58	2	2,75	3,07	3,87	4,37	4,88
	<b>I [A]</b>	1,2	3,87	6,45	9,5	10,8	13	14,4	17,1
Varistor	<b>U2 [kV]</b>	0,5	0,98	1,55	1,98	2,48	2,89	3,37	4
	<b>I [A]</b>	2	4,3	5,46	7,33	9,9	10	12,3	15,4

Tabulka 7: Hodnoty změřené při ESD testu nepřímým výbojem přes kryt

	<b>U1 [kV]</b>	1	2	3	4	5	6	7	8
vodič	<b>U2 [kV]</b>	0,67	1,58	2,16	3,4	4,02	4,98	5,89	7,08
	<b>I [A]</b>	1,4	3,35	5,13	5,95	6,3	8,7	10,5	14,5
Varistor	<b>U2 [kV]</b>	0,4	0,76	1,16	1,78	2	2,47	3	3,95
	<b>I [A]</b>	0,64	2,53	6,9	10	13	20,5	23,4	23



**Příloha B grafy:**

