

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

Katedra aplikované elektroniky a telekomunikací

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Měření parametrů prvků přepět'ových ochran

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
Fakulta elektrotechnická
Akademický rok: 2016/2017

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Jan ZDEBOR**
Osobní číslo: **E13B0315P**
Studijní program: **B2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor: **Elektronika a telekomunikace**
Název tématu: **Měření parametrů prvků přepětových ochran**
Zadávající katedra: **Katedra aplikované elektroniky a telekomunikací**

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

1. Podrobně popište vlastnosti omezujících přepětových prvků typu transil a varistor.
2. Navrhněte a realizujte pracoviště pro zjišťování vlastností transilů a varistorů po určitém počtu svedených přepětí.
3. Změřte změny charakteristických hodnot transilů a varistorů po určitém počtu svedených přepětí.

Rozsah grafických prací: podle doporučení vedoucího

Rozsah kvalifikační práce: 30 - 40 stran

Forma zpracování bakalářské práce: tištěná/elektronická

Seznam odborné literatury:

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

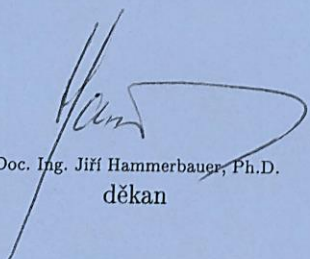
Vedoucí bakalářské práce:

Doc. Ing. Jiří Skála, Ph.D.

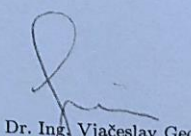
Katedra aplikované elektroniky a telekomunikací

Datum zadání bakalářské práce: 14. října 2016

Termín odevzdání bakalářské práce: 8. června 2017


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

L.S.


Doc. Dr. Ing. Vjačeslav Georgiev
vedoucí katedry

V Plzni dne 14. října 2016

Abstrakt

Předkládaná bakalářská práce popisuje základní vlastnosti prvků jemné ochrany proti přepětí. Pozoruje změny varistorového napětí a jmenovitého napětí transilu vlivem svodu přepětí a zabývá se myšlenkou, zda je možné v některých aplikacích nahradit varistory transily. Vzhledem k dosaženým výsledkům prokazující stálost parametrů transilu lze předpokládat možnost náhrady varistorů výkonovými transily v některých aplikacích.

Klíčová slova

Degradace, varistor, transil, přepětí, TVS, MOV, jmenovité napětí transilu, varistorové napětí, přepětová ochrana

Abstract

Bachelor thesis presents fundamental features of soft protection against overvoltage. It observes changes on varistor voltage and transil breakdown voltage due to surges and deals with possible replacement of varistor by transil in certain areas. According to achieved results, which are proving stability of transil parameters, transils can be assumed as a replacement of varistors in certain application.

Key words

Varistor, transil, degradation, overvoltage, protection, TVS, MOV, breakdown voltage, varistor voltage

Prohlášení

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

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

.....
podpis

V Plzni dne 7.6.2017

Jméno příjmení

Obsah

OBSAH	7
ÚVOD	9
SEZNAM ZKRATEK	10
1 PŘEPĚTÍ A PRINCIP OCHRANY	11
1.1 KASKÁDNÍ PŘEPĚŤOVÁ OCHRANA	12
1.2 PROPOJOVÁNÍ OCHRANNÝCH PRVKŮ	12
2 VARISTOR	13
2.1 ZÁKLADNÍ POJMY, V-A CHARAKTERISTIKA	13
2.2 STRUKTURA A MECHANISMUS PROMĚNNÉHO ODPORU	14
2.3 TOLERANČNÍ PÁSMO	15
2.4 NÁHRADNÍ SCHÉMA	16
2.4.1 Pracovní oblast.....	16
2.4.2 Vodivá oblast.....	17
2.4.3 Oblast vysokého proudu	17
2.5 KAPACITA	18
2.6 TEPLOTNÍ KOEFICIENT.....	18
2.7 POHLCENÍ ENERGIE	19
2.8 PRŮVODCE VÝBĚREM VARISTORU	20
2.8.1 Pracovní napětí	20
2.8.2 Výpočet absorbované energie.....	20
2.8.3 Příklad výpočtu absorbované energie při odpojení indukivní zátěže	22
2.9 PŘETĚŽOVÁNÍ A JEHO PROJEVY	23
2.10 REAKČNÍ DOBA	24
2.11 POUŽITÍ.....	24
3 OMEZOVACÍ PŘEPĚŤOVÉ DIODY	24
3.1 ZÁKLADNÍ POJMY, V-A CHARAKTERISTIKA	25
3.2 JEDNOSMĚRNÝ TRANSIL	26
3.3 OBOUSMĚRNÝ TRANSIL	26
3.4 ŠPIČKOVÝ ZTRÁTOVÝ VÝKON	27
3.5 PRŮVODCE VÝBĚREM TRANSILU.....	29
3.5.1 Příklad výpočtu pro neopakovatelné pulzy.....	29
3.5.2 Příklad výpočtu pro opakovatelné pulzy.....	31
3.6 KAPACITA	32
4 MĚŘENÍ	33
4.1 TESTOVÁNÍ ODOLNOSTI SYSTÉMŮ PROTI PŘEPĚTÍ.....	33
4.1.1 Zkouška odolnosti elektrostatickým výbojem ESD	34
4.1.2 Zkouška odolnosti rychlými přechodovými jvy	35
4.1.3 Zkouška odolnosti proti rázovým pulzům	35
4.2 MĚŘÍCÍ A TESTOVACÍ PRACOVNÍŠTĚ	36
4.2.1 Testovací rázový pulz.....	36
4.2.2 Zapojení měřicího pracoviště	36
4.2.3 Měřené součástky	37
4.3 MĚŘENÍ VLIVU PŘEPĚTÍ NA PRVKY JEMNÉ OCHRANY.....	38
4.3.1 Postup měření varistoru.	38
4.3.2 Naměřené výsledky varistorů.....	39
4.3.3 Postup měření transilů.....	42
4.3.4 Naměřené výsledky transilů.....	44
4.3.5 Zhodnocení měření pro varistory a transily	47

ZÁVĚR	48
SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ	50
PŘÍLOHY	1
V-A CHARAKTERISTIKY VARISTORŮ	1
GRAFY ZNÁZORŇUJÍCÍ ZMĚNU VARISTOROVÉHO NAPĚTÍ U_N	2
V-A CHARAKTERISTIKY PRO TRANSILY.....	4

Úvod

S pokrokem roste počet zařízení založených na polovodičových prvcích, které pracují v různorodých elektromagnetických prostředích. Jejich velkou slabinou je náchylnost k přepětí, která mohou dosahovat značných amplitud. Z tohoto důvodu je potřebné tyto zařízení obvykle chránit dodatečnými přepětovými ochranami. Jako ochrana před náhlým zvýšením napětí se používají hrubé a jemné přepětové ochrany. Jemnou přepětovou ochranu tvoří většinou varistory a supresorové diody.

Pro varistor bylo vypracováno několik prací zkoumající jeho degradaci po svodech určitého počtu přepětí. Ta se projevuje posuvem varistorového napětí. Pro supresorové diody však takovéto informace a měření chybí. Cílem této práce bylo změřit a ověřit změny varistorového napětí a určit, zda se podobné změny objevují u supresorových diod (transilů) a dochází ke změně jejich jmenovitého napětí. První část práce se věnuje analýze a popisu základních vlastností transilu a varistoru, základním informacím o přepětí a základním zkouškám odolnosti proti přepětí. Vzhledem k časové náročnosti byla zvolena pouze jedna metoda přepětového namáhání a to zkouška odolnosti proti rázovým pulzům. Tyto pulzy nesou vysokou energii a lze předpokládat, že změna parametrů testovaných varistorů a transilů se projeví nejrychleji.

Seznam zkratk

ESD..... Elektrostatický výboj

LEMP Elektrostatický impuls způsobený bleskovým výbojem

TVS diode..... Omezovací přepětová dioda

MOV Varistor z oxidu kovů

EFT Rychlé přechodové jevy

MATLAB Matrix laboratory

1 Přepětí a princip ochrany

Jako přepětí se označuje takové elektrické napětí, u kterého dosáhne amplituda vyšší hodnoty než je u povoleného provozního napětí. Vyskytuje se zde tolerance amplitudy $\pm 5\%$ nebo $\pm 10\%$. Pokud je amplituda napětí ve vymezeném pásmu, pak se hovoří o nadpětí či podpětí, nikoliv přepětí. Lze definovat dvě skupiny zdrojů napětového přepětí, přírodní zdroje a zdroje uměle vytvořené lidskou činností. S rostoucí hustotou součástek v elektrickém obvodu se snižuje odolnost zařízení proti přepětí. U integrovaných obvodů, které mají několik milionů součástek na čipu, stačí k destrukci výboj s velmi nízkou energií a napětím v řádech jednotek voltů. Konstrukce elektrických zařízení je navrhována pro zvládnutí elektrického přepětí po určitou dobu s určitou amplitudou. Pro ochranu zařízení se používají jemné a hrubé přepětové ochrany. [10]

Bleskový výboj je přírodní zdroj přepětí s největší energií v této skupině. Blesk neohrožuje jen ta zařízení, která jsou v přímém kontaktu. Výboj způsobuje vznik strmého elektromagnetického impulzu ohrožující zařízení do vzdálenosti až 4 km. Takový impulz je označován zkratkou LEMP (Lightning Electromagnetic Pulse), s amplitudou až 200kA a energií 10MJ. Následkem přímého úderu do budovy je rázový proudový impulz, který může protékat v blízkosti elektronických zařízení i přes instalovaný bleskosvod. Impulz se může uzavírat přes kovovou konstrukci budovy. Nepřímo může být napětový rázový impulz zavlečen do vnitřního silového rozvodu budovy pomocí vedení nízkého nebo vysokého napětí. Je proto důležité mít v takovém případě na vstupu budovy instalovanou primární přepětovou ochranu. Dalšími charakteristickými prvky všech napětových či proudových impulzů je strmost náběžné hrany v jednotkách μs a pomalejší pokles ve stovkách μs . [10]

Příkladem umělých zdrojů přepětí jsou všechna spínací zařízení. Velikost takto vzniklého přepětí je závislá na velikosti spínaného proudu a napětí, na kvalitě spínacích prvků a na rychlosti spínání. Všechna zařízení, v nichž dochází k elektrickému oblouku, jsou považována za nebezpečný zdroj přepětí. [10]

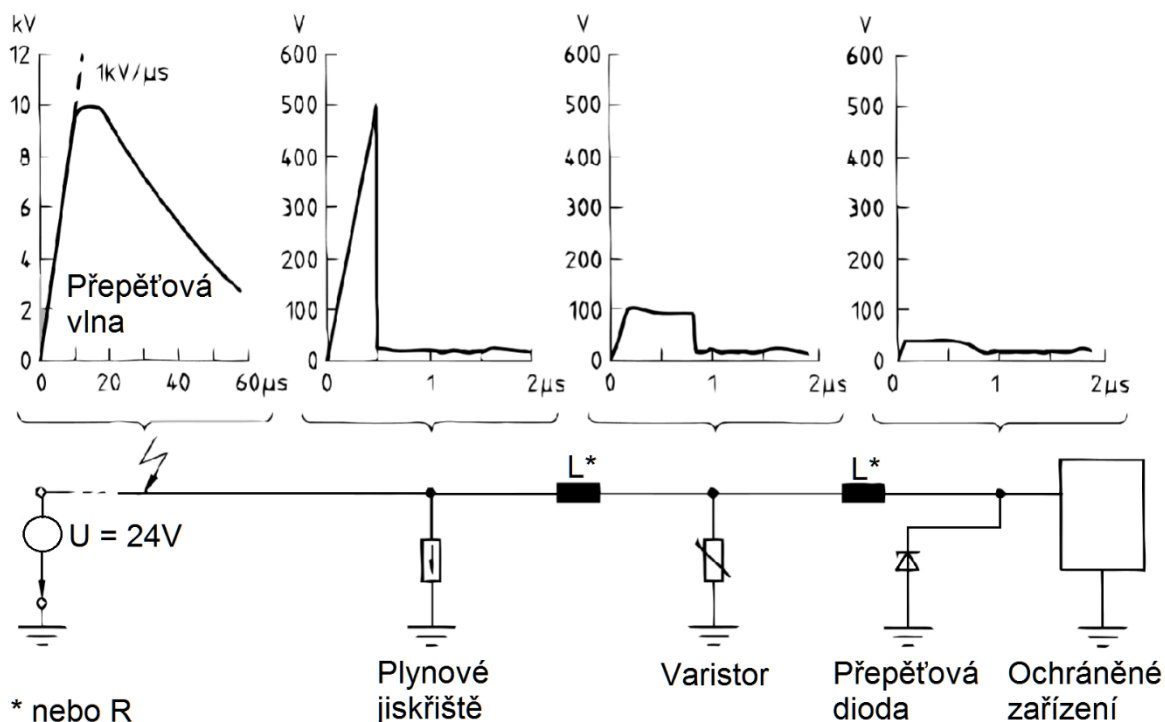
Lokální elektrostatické výboje (ESD – Electrostatic Discharge) patří také do skupiny umělých zdrojů přepětí. Vznikají především třením mechanických částí. Napětová úroveň ESD dosahuje desítek kV s velmi nízkou energií výbojů menší než 10mJ. Pro moderní elektronické součástky a integrované obvody pracující s nepatrnými proudy je velmi nebezpečný elektrostatický náboj vytvořený pohybem člověka. Rizikovými faktory pro

ESD je nízká vlhkost prostředí, nevhodné oblečení ze syntetických tkanin a povrchy stolů či podlahy s vysokým izolačním odporem. [10]

Na elektrické zařízení mohou během jeho života působit impulzy o různých tvarech, amplitudách a trvání. Je tedy nutné zmapovat náchylnost jednotlivých systémů na přepětí a dle toho pak zvolit vyhovující ochranný prvek. Návrh systémů je vždy rozdílný a je nutné počítat se nejhorsími možnostmi.

1.1 Kaskádní přepětová ochrana

V případě, že na omezení přepětí nestačí jen jedna součástka, lze zkombinovat prvky ochrany v zapojení do kaskády a využít jejich nejlepší vlastnosti. Na obrázku 1.1 je naznačen příklad víceúrovňové ochrany. Využívá hrubou ochranu (plynové jiskřiště) a jemné ochrany, která se skládá z napětově závislého prvku (varistoru) a (přepětové) diody. Obrázek zachycuje postupné omezení přepětí na jednotlivých prvcích. [10]



Obrázek 1.1 Schéma zapojení kaskádní ochrany a jeho reakce na přepětovou vlnu

1.2 Propojování ochranných prvků

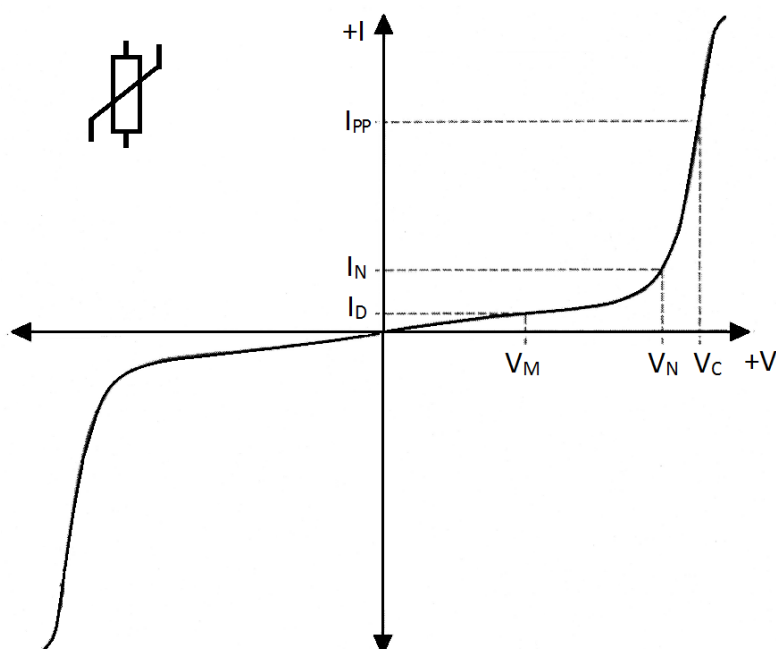
V některých případech lze dosáhnout lepší přepětové ochrany sériovým nebo paralelním řazením omezovacích součástek. Při sériovém zapojení se zvyšuje hodnota ochranného napětí. Při paralelním zapojení lze zvýšit hodnotu protékajícího proudu a schopnost absorpce energie. U paralelního zapojení je nutno zohlednit pracovní bod součástky, jinak dojde k nerovnoměrnému rozložení proudu. [10]

Další část práce se detailněji věnuje prvkům jemné ochrany, varistoru a transilu, a následně pak změnám na součástkách po svedení určitého počtu přepětí.

2 Varistor

Varistor je složeninou slov Variable Resistor, kterou lze přeložit jako proměnlivý odpor. Hodnota tohoto odporu je závislá na přiloženém napětí. Se zvyšujícím se napětím se varistoru zvyšuje vodivost. Výsledná V-A charakteristika má nelineární průběh. Používá se jako ochrana obvodu před přepětím. Může být použit samostatně, spolu s dalšími varistory či s dalšími přepětovými ochranami.

2.1 Základní pojmy, V-A charakteristika



Obrázek 2.1 V-A charakteristika varistoru a značka

- **Nejvyšší trvalé napětí V_M**
Efektivní hodnota sinusového střídavého napětí nebo stejnosměrné napětí, které může být přiloženo trvale při definované teplotě. Při tomto napětí prochází varistorem klidový proud I_D . Někdy označováno jako pracovní napětí. [2]
- **Jmenovité napětí varistoru V_N**
Při definovaném proudu I_N , který bývá definován výrobcem, nejčastěji však 1mA, lze na součástce naměřit právě napětí V_N . Měření by mělo být prováděno v čase kratším než 40ms, aby se předešlo změnám vlivem teploty. Často označováno jako varistorové napětí. [2]
- **Omezovací napětí V_C**

Hodnota vrcholového napětí při proudovém pulzu s vrcholovým proudem I_{pp} . [2]

2.2 Struktura a mechanismus proměnného odporu

Existují dva hlavní materiály pro výrobu varistorů. Prvním materiálem je oxid zinečnatý (ZnO), druhým je karbid křemíku (SiC). Každý z těchto materiálů má charakteristickou V-A charakteristiku, kterou lze vyjádřit pomocí rovnice 2.1

$$I = k \times U^\alpha, \quad 2.1$$

I – proud varistorem

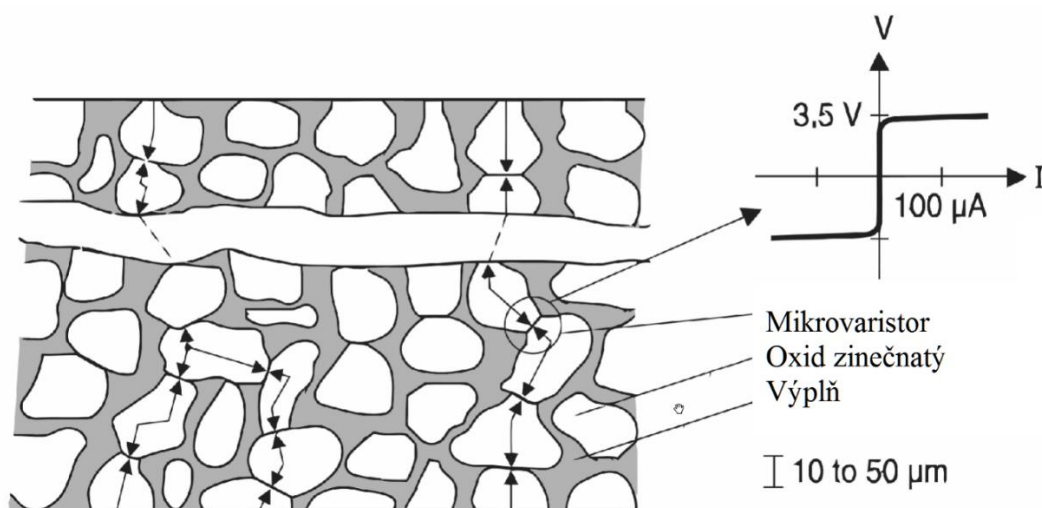
U – napětí na varistoru

k – konstanta závislá na geometrii varistoru

α – nelineární exponent - dán zejména použitým materiálem varistoru

Varistory z karbidu křemíku se vyrábějí s α od 3 do 7. Varistory z oxidu zinečnatého mají však α v rozmezí 20 – 50, což vede k mnohem ostřejší V-A charakteristice. [4][5]

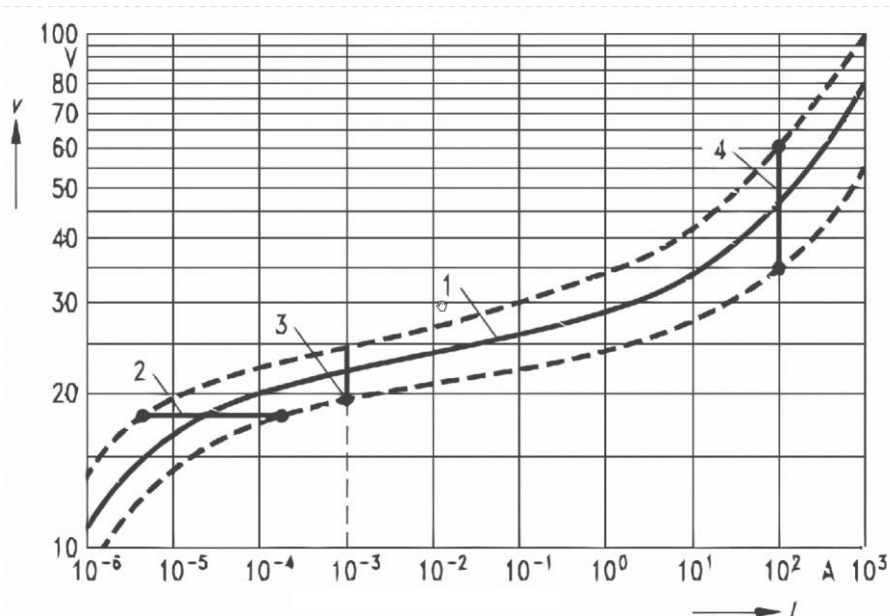
Oba materiály jsou ve formě keramického prášku stlačeny, obvykle do tvaru disku, a poté spečeny při teplotě dosahující 1200°C. Následně se připojí elektrody a vše se zapouzdří. Stlačený a spečený prášek vytvoří polykrystalickou keramiku s rezistivitou závislou na napětí, tento jev je známý jako varistorový efekt. Při pohledu na strukturu varistoru, *obrázek 2.2*, jsou patrná zrnka oxidu zinečnatého s výbornou vodivostí. Mezi zrny je však výplň vykazující naopak velmi vysokou rezistivitu. Spečením a stlačením se zrna varistoru spojí a vytvoří spojení zvaná mikrovaristory s vlastnostmi podobnými zenerovým diodám. Ve výsledku se varistor chová jako spojení velkého počtu PN přechodů, tato spojení mohou být paralelní i sériová. Při přiložení malého napětí jsou tyto PN přechody v závěrném směru a prochází pouze klidový proud I_D . Výsledné elektrické vlastnosti tedy záleží na tom, kolik zrn je spojeno. Výhodou oproti polovodičovým ochranám je rovnoměrné rozložení energie všemi mikrovaristorem, namísto soustředění veškeré energie do tenkého PN přechodu. [4][5]



Obrázek 2.2 Struktura varistoru

2.3 Toleranční pásmo

Reálná V-A charakteristika varistorů stejného typu podléhá určité odchylce. Ta je způsobená rozličnými podmínkami panujícími při výrobě a montáži součástek. U varistorů stejného typu musí křivky charakteristiky ležet v definovaném tolerančním pásmu, určeném při teplotě 25°C, zobrazeno na obrázku 2.3



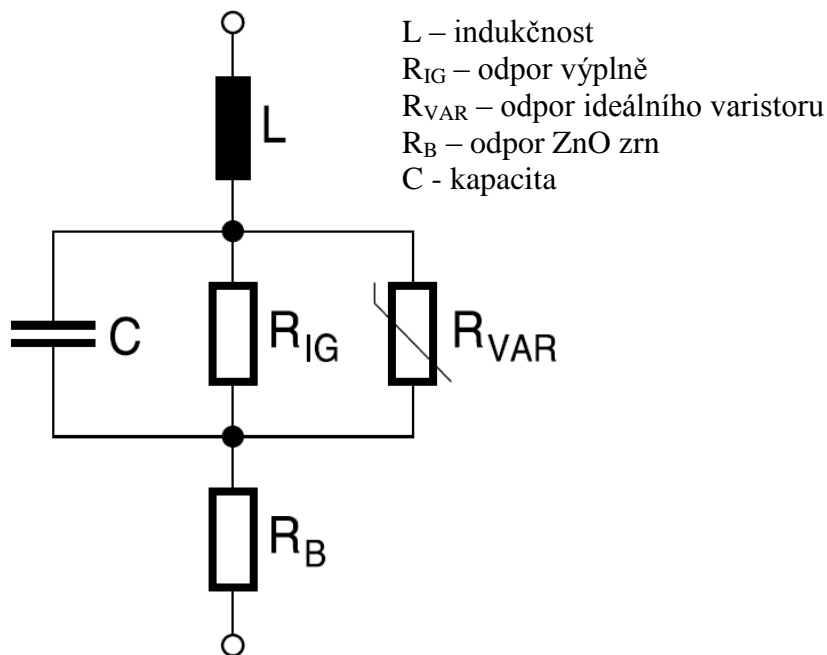
Obrázek 2.3 Toleranční pásmo varistoru [4]

Křivka číslo 1 v obrázku 2.3 je střední hodnota tolerančního pásma mezi limitami znázorněnými přerušovanou čarou. Znázorněná střední hodnota při 1 mA, bod 3, je varistorové napětí, v tomto případě 22V. Tolerance K je definována jako $\pm 10\%$, varistorové napětí je tedy v rozmezí 19,8V až 24,2V. Lze zde však vidět, že při stejném pracovním napětí 18V, bod 2, se klidový proud pohybuje v rozsahu od 6×10^{-6} A do $2 \times$

10^{-4} A. Stejně tak je možný rozptyl omezovacího napětí při proudu 100A od 35V do 60V, bod 4. [4]

2.4 Náhradní schéma

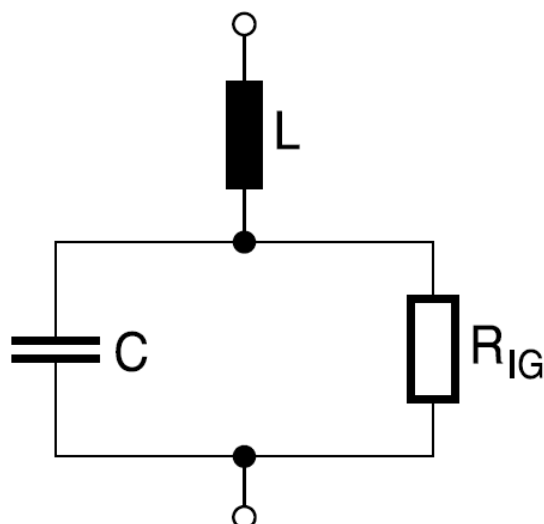
Elektrický model varistoru pomocí zjednodušeného ekvivalentního schématu je na obrázku 2.4. Pro každou pracovní oblast lze schéma ještě více zjednodušit.



Obrázek 2.4 Náhradní schéma varistoru

2.4.1 Pracovní oblast

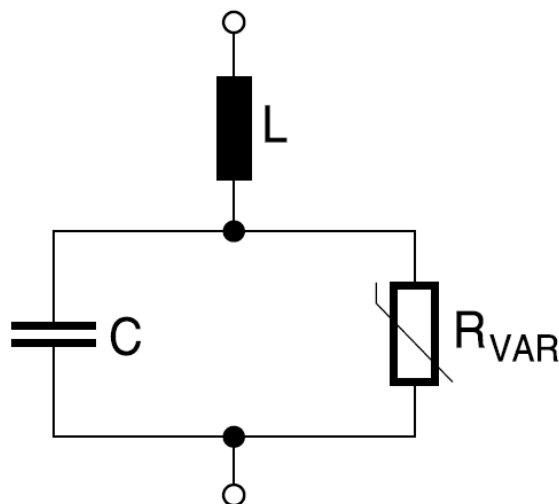
Při nízkých proudech se V-A křivka blíží lineární (ohmické) závislosti a vykazuje významnou teplotní závislost, viz kapitola 1.6. Varistor je ve stavu vysokého odporu (až $10^9 \Omega$), jeví se jako rozpojený obvod. Vzhledem k teoreticky nekonečně vysokému odporu R_{VAR} spojeného paralelně s R_{IG} lze R_{VAR} vyloučit. Také R_B bude zanedbatelné vzhledem k R_{IG} . Kapacita zůstává zachována napříč širokým spektrem napětí i frekvencí. Teplota od -40°C do 125°C ovlivní kapacitu o $\pm 10\%$. Náhradní schéma na obrázku 2.5. [7]



Obrázek 2.5 Náhradní schéma varistoru v pracovní oblasti

2.4.2 Vodivá oblast

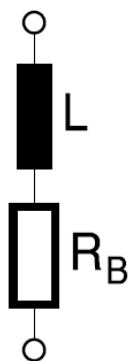
V této oblasti se řídí V-A křivka dle rovnice 2.1. Varistor lze označit za vodivý. Platí, že $R_B \ll R_{VAR} \ll R_{IG}$. Chování obvodu tedy záleží na R_{VAR} . Napětí na varistoru se téměř nemění, naopak změna velikosti proudu se pohybuje v několika řádech (10^{-4} až 10^3). Velikost R_{VAR} se tedy musí měnit jako odezva na změnu proudu. Náhradní schéma na obrázku 2.6. [7]



Obrázek 2.6 Náhradní schéma varistoru ve vodivé oblasti

2.4.3 Oblast vysokého proudu

Při vysokých proudech dosahujících maximální přípustné proudy deklarované výrobcem se varistor přibližuje k chování podobnému zkratu. Křivka se odchyluje od nelineárního průběhu. Celkový odpor je roven odporu zrn ZnO ($1\Omega - 10\Omega$), ten je ve schématu reprezentován R_B . Procházející proud může být 50A – 50kA, záleží na velikosti varistoru. Náhradní schéma na obrázku 2.7. [7]



Obrázek 2.7 Náhradní schéma varistoru v oblasti vysokého proudu

2.5 Kapacita

Kapacita varistoru je závislá na ploše a tloušťce součástky, jako u kondenzátoru, rovnice 2.2. Kapacita roste s plochou a klesá se zvětšující se tloušťkou dielektrika. U střídavého napětí může kapacitu ovlivnit paralelní odpor. Kapacita se obvykle udává při 1 kHz nebo 10 kHz. Úroveň ochrany roste se snižující se kapacitou. [6]

$$C = \varepsilon_0 \times \varepsilon_r \times \frac{S}{d} \quad 2.2$$

C – kapacita

S – plocha elektrod

d – vzdálenost elektrod

ε_0 – permitivita vakua

ε_r – relativní permitivita

Pomocí zjednodušeného modelu, který lze nalézt v dokumentu [14], se kapacita C_0 vyjádří pomocí rovnice 2.3. Vztahuje se ke keramickému tělesu o ploše S a tloušťky t.

$$C_0 = \frac{\varepsilon_0 \times \varepsilon_L \times S \times d}{t \times L} \quad 2.3$$

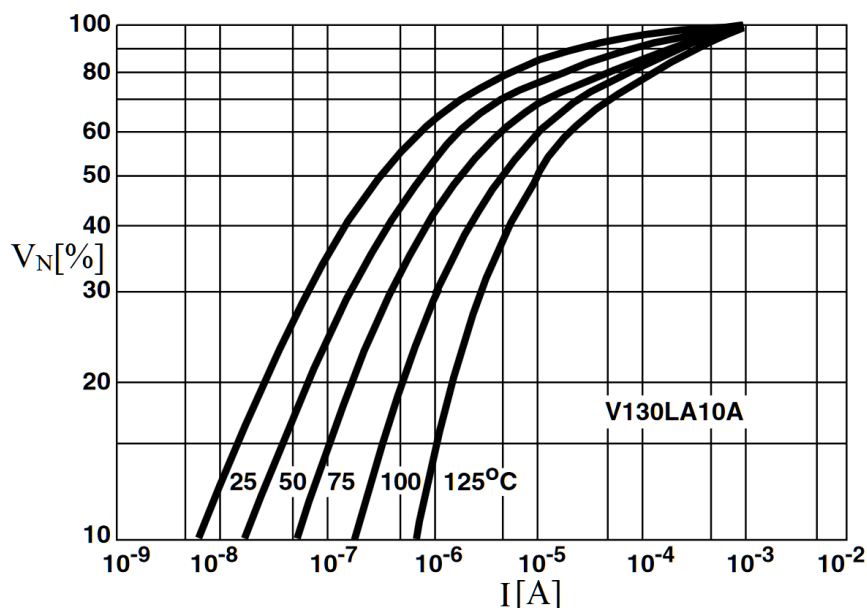
d – tloušťka jednotlivých zrn

ε_L – permitivita mezi zrnové vrstvy

L – vzdálenost mezi zrny

2.6 Teplotní koeficient

U varistorů lze pozorovat negativní teplotní koeficient napětí. Jeho hodnota výrazně klesá s rostoucím proudem a zhruba od 1 mA a výše je jeho velikost zcela zanedbatelná. Při vyšších teplotách lze pozorovat změny na klidovém proudu, tedy v oblasti proudů řádově μA . Při přiložení na varistor 20% jmenovitého napětí lze dle obrázku 2.8 pozorovat změny proudu o téměř dva řády při rozdílu teplot 100°C . [7]



Obrázek 2.8 Změny V-A charakteristiky podléhající teplotnímu koeficientu

2.7 Pohlcení energie

Absorpce energie varistorem úzce souvisí s přepětím. Lze ji vyjádřit pomocí rovnice

2.4

$$W = \int_{t_0}^{t_1} u(t)i(t)dt \quad 2.4$$

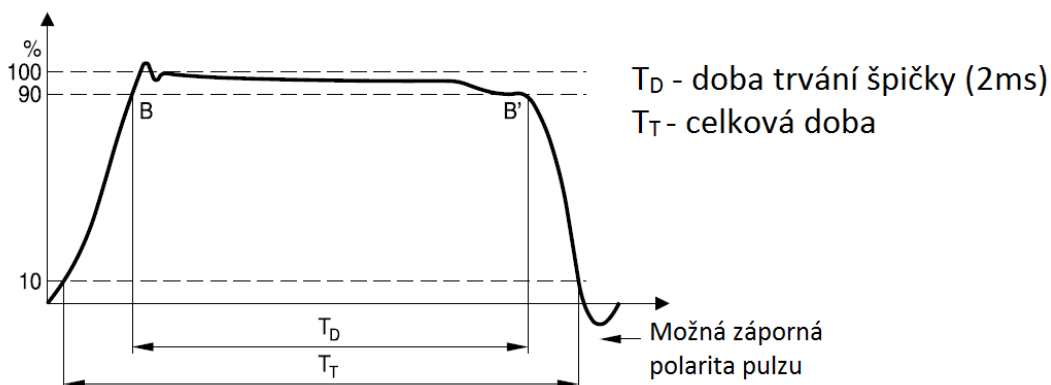
W – energie

i(t) – proud varistorem časově proměnný

u(t) – napětí na varistoru v čase proměnné

t₁ - t₀ – doba trvání pulzu

Pro testování maximální pohlcené energie jsou vyžadovány pulzy o poměrně dlouhé době trvání. Používá se obdélníková vlna o šířce 2ms dle standartu ČSN EN 60060-1, *obrázek 2.9*. Ve většině dokumentů k produktům je maximální hodnota energie, kterou lze pojmout, podmíněna právě touto vlnou. [4]



Obrázek 2.9 Měřící standardizovaný pulz

2.8 Průvodce výběrem varistoru

Většina výrobců varistorů má katalogové listy popisující správný výběr varistoru. V následující kapitole jsou použity dva dokumenty od výrobce Epcos [12][13]. Výběr varistoru zahrnuje 3 hlavní kroky. Prvním je výběr takového varistoru, který má vhodné provozní napětí. Zadruhé je nutné rozhodnout, jakou specifickou funkci má varistor splňovat, a to:

- a) Svod vysokých proudů
- b) Absorpce energie
- c) Průměrný ztrátový výkon

(pro bod a) a b) je nutné počítat také s počtem opakování)

Třetím krokem je určit maximální možný nárůst napětí na vybraném varistoru v případě přepětí a porovnat ho s elektrickou pevností chráněné součástky či obvodu. Pro zajištění správného označení se zpravidla maximální možné hodnoty veličin, které mohou vzniknout na varistoru, označují hvězdičkou (například i^*). Maximální dovolené parametry varistoru dle katalogového listu se označují max (například i_{max}). Musí tedy platit následující rovnice 2.5, 2.6 a 2.7.

$$i^* \leq i_{max} \quad 2.5$$

$$W^* \leq W_{max} \quad 2.6$$

$$P^* \leq P_{max} \quad 2.7$$

2.8.1 Pracovní napětí

Pro všechny varistory je v katalogových listech udáváno maximální povolené stejnosměrné i střídavé napětí. K dosažení co nejnižší nutné ochrany musí být vybrán varistor s takovým maximálním dovoleným pracovním napětím, které se rovná nebo mírně přesahuje napětí v zařízení. V případě nesinusového střídavého napětí nesmí maximální amplituda přesahovat maximální povolené stejnosměrné napětí. Pokud chceme extrémně nízký klidový proud, lze vybrat takový varistor, který má vysoké pracovní napětí. Tím je zvýšena životnost. Zvedne se tím však nejnižší nutná ochrana.

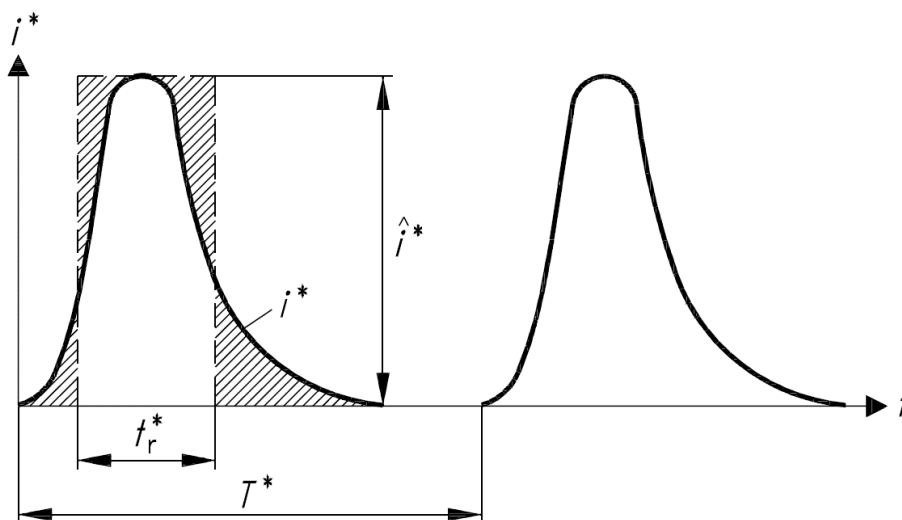
2.8.2 Výpočet absorbované energie

K absorbování energie dojde vždy při průchodu svodového proudu varistorem. Ke zjištění výsledné pohlcené energie existuje několik metod.

- Obdélníková metoda

Proudovou vlnu libovolného tvaru lze převést na ekvivalentní obdélníkovou vlnu. Nejlépe pomocí grafické metody na *obrázku 2.10*. Se zachováním maximální amplitudy se vlna převede na obdélníkový tvar o době trvání t_r^* . Tuto dobu lze vypočítat dle rovnice 2.8 za předpokladu, že známe rovnici průběhu proudu $i(t)$.

$$t_r^* = \frac{\int i^* dt}{\hat{i}^*} \quad 2.8$$



Obrázek 2.10 Obdélníková metoda

- Početní metoda

Často lze spočítat energii na základě získaných dat z osciloskopu, nebo může být spočtena pomocí V-A charakteristik a určení pracovního bodu

- Simulace PSpice
- Grafická metoda

S využitím obdélníkové metody lze s dostatečnou přesností rovnici 2.4 transformovat do rovnice 2.9.

$$W = U \times I \times t_r \quad 2.9$$

U – maximální amplituda napětí na varistoru

I – maximální amplituda proudu

t_r – doba pulzu t_r^* dle *obrázku 2.10*

- Odpojování indukčních zátěží

Pokud jsou přepětí způsobena odpojováním indukční zátěže, energii lze spočítat pomocí nejhoršího možného případu, který může nastat. Energie absorbovaná ve varistoru

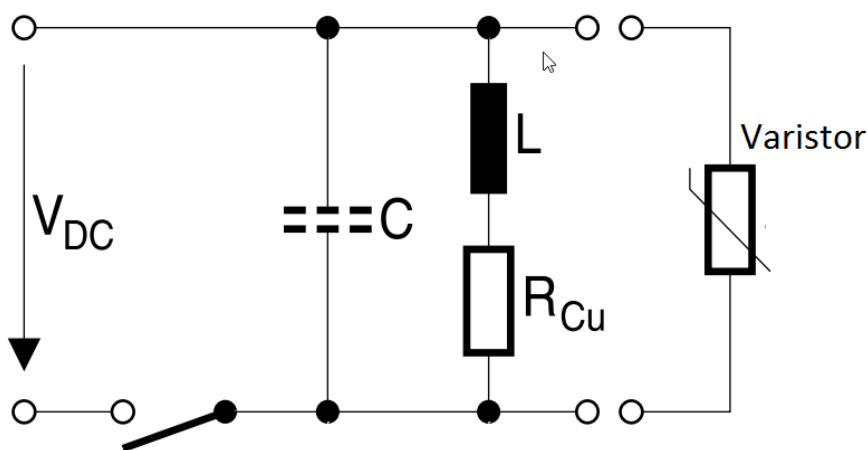
nesmí být větší než energie naakumulovaná v induktoru. Ta se vypočte pomocí rovnice 2.10.

$$W = \frac{1}{2} L \times I^2 \quad 2.10$$

Takový výpočet již zahrnuje bezpečnostní rezervu z důvodu dalších ztrát v obvodu. Musí platit rovnice 2.6.

2.8.3 Příklad výpočtu absorbované energie při odpojení indukční zátěže

Odpojením indukční zátěže vzniká vysoké napětí, které ohrožuje jak součástky v obvodu, tak samotný induktor. Odpojením indukčnosti se naakumulovanou energií nabije paralelně připojený kapacitor. Ilustrace problému je na obrázku 2.11. Platí tedy vztah v rovnici 2.11.



Obrázek 2.11 Příklad zapojení varistoru k potlačení přepětí
Hodnoty: $V_{DC} = 24V$, $L = 0,1H$, $R_{Cu} = 24\Omega$, $I = 1A$, $C = 250pF$

$$\frac{1}{2} L \times I^2 = \frac{1}{2} C \times U^2 \quad 2.11$$

Úpravou dostaneme následující:

$$U^* = I^* \times \sqrt{\frac{L}{C}} = 1 \times \sqrt{\frac{0,1}{250 \times 10^{-12}}} = 20kV \quad 2.12$$

Dalšími požadavky je opakované spínání každých 10s, ochranná úroveň $< 65V$ a celý cyklus se má opakovat až do 10^6 sepnutí. **Pracovní napětí** je dle zadání 24V. Za předpokladu, že se pracovní napětí nezmění o více jak 2V, lze vybrat varistor s maximálním stejnosměrným provozním napětím 26V pro co nejnižší nutnou ochranu. U SIOV varistorů je ideální zvolit řadu K20 například od výrobce Epcos. **Svodový proud** se nemění skokem vlivem indukčnosti. Po jejím odpojení tento proud musí téci varistorem a jeho hodnota je 1A. Jeho pokles je exponenciální. Z V-A charakteristiky daného varistoru

odpovídá 1A napětí 55V. Z těchto dvou veličin lze určit R_{Var} pro výpočet časové konstanty τ .

$$R_{Var} = \frac{U}{I} = \frac{55}{1} = 55\Omega \quad 2.13$$

Časová konstanta se potom rovná:

$$\tau = t_r^* = \frac{L}{R_{Cu} + R_{Var}} = \frac{0,1}{24 + 55} = 1,3ms \quad 2.14$$

Z převodní charakteristiky při $\tau = 1,3ms$ a 10^6 opakování vyhovují 2 typy splňující rovnici 2.5. S10K20 s maximální proudem 3A a S07K20 s maximálním proudem 1,4A. Nyní lze určit W_{MAX} :

$$W_{MAX} = U_{MAX} \times I_{MAX} \times t_{rMAX} = 60 * 1,4 + 0,0013 = 0,11J \quad 2.15$$

Energie akumulována v induktoru:

$$W^* = \frac{1}{2}L \times I^{*2} = \frac{1}{2} * 0,1 * 1^2 = 0,05W \quad 2.16$$

platí rovnice 2.6

Dalším parametrem, který lze nyní určit, je **průměrný ztrátový výkon**.

$$P^* = \frac{W^*}{T^*} = \frac{0,05}{10} = 0,005W \quad 2.17$$

Dle katalogového listu je maximální ztrátový výkon pro S07K20 0,02W. Platí rovnice 2.7. Pro úplnost lze spočítat **minimální možný čas mezi pulzy**:

$$T_{MIN} = \frac{W^*}{P_{MAX}} = \frac{0,05}{0,02} = 2,5s \quad 2.18$$

2.9 Přetěžování a jeho projevy

Vystavování varistoru proudovým pulzům nebo trvalému zatížení 1,5x přesahující maximální hodnoty dané výrobcem může vést k posunutí varistorového napětí o více než $\pm 10\%$. V takovýchto případech nedochází k destrukci varistoru, mohou však nastat změny v elektrických charakteristikách, které již nelze zvrátit. Takovéto přetížení lze klasifikovat jako **mírné přetěžování**. Například se může snížit omezovací napětí a vést k mnohem vyšším klidovým proudům. Pro ochranu obvodu a varistoru lze do série zapojit proudovou pojistku anebo teplotní pojistku, která musí být v přímém kontaktu s varistorem.[4]

Těžké přetěžování nastává, pokud je varistor vystaven hodnotám daleko za hranicemi doporučených hodnot. Dochází k průrazu P-N přechodů mikrovaristorů, tzv. „proděrování“. V krajních případech může dojít k prasknutí pouzdra varistoru. Nadměrné

soustavné přetěžování sloučí zrna oxidu zinečnatého do vodivých cest s rezistivitou rovnou samotnému oxidu. Ta je značně nižší než původní rezistivita varistoru. Přetížení dále způsobí přehřátí varistorové keramiky s následným odpájením keramiky od elektrod. [4]

Vzhledem k nepředvídatelné povaze přepětových pulzů může být varistor přetížen i přes pečlivý výběr. Přetížení může způsobit prasknutí pouzdra a vystavit okolí přehřátému materiálu. Proto by měl být varistor stíněn od přilehlých součástek. [4]

2.10 Reakční doba

Teoretická reakční doba varistorové keramiky je v řádech pikosekund, reálně se do reakční doby nepříznivě promítá sériová indukčnost, která čas prodlužuje přinejlepším na 500 ps až 1000 ps. Běžně se reakční doba pohybuje od 1 ns do 100 ns, záleží na výrobcí a ceně. Ve srovnání s polovodičovými ochranami jsou tyto časy o řád vyšší. Pro zvládnutí nárazových proudů s velmi strmými hranami by měl být obvod navrhován s co nejmenší indukčností. [4][6]

2.11 Použití

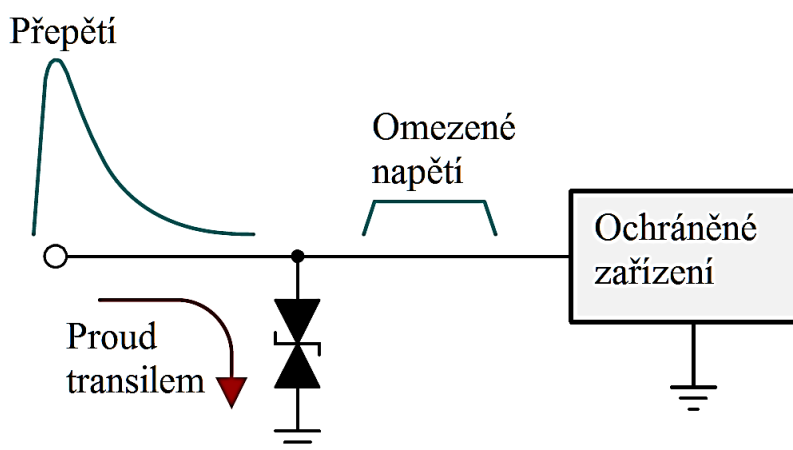
Varistory se používají v široké oblasti elektrických a elektronických zařízení vyžadujících přepětovou ochranu díky variabilitě jeho elektrických vlastností.

- Spotřební elektronika – pračky, ledničky, mrazáky, myčky nádobí, lampy, mixéry
- Multimediální systémy – televizory, DVD přehrávače, audio zesilovače
- Lékařské zařízení
- Dopravní osvětlení
- Autoelektronika
- Elektroenergetika
- Výkonová elektronika
- Telekomunikace

3 Omezovací přepětové diody

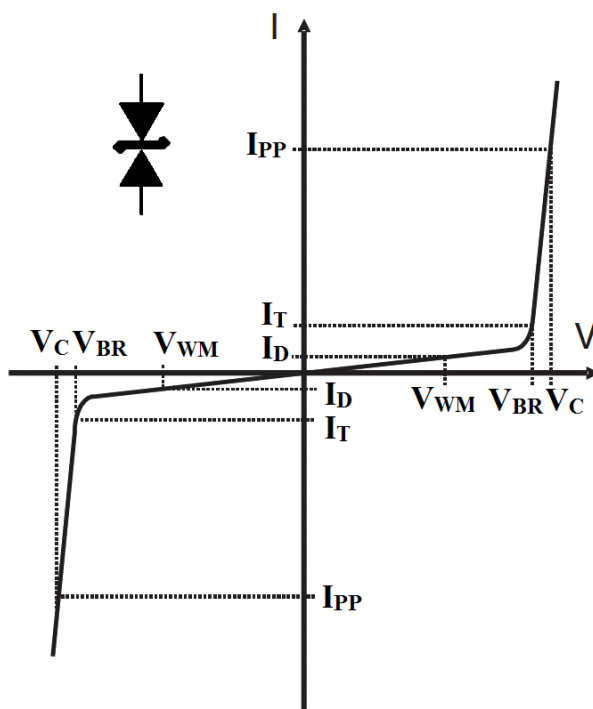
Základním zástupcem omezovacích přepětových diod neboli TVS (Transient Voltage Supression) je transil. Používá se jako další možnost ochrany obvodu před přepětím. Je to účelně navrhnutá lavinová průrazná dioda. Základem je PN přechod, který je využíván v závěrném směru. Za normálních okolností je součástka ve stavu vysoké impedance, prochází jen velmi nízký klidový proud. Během zvýšeného napětí dojde k lavinovému průrazu poskytující cestu s velmi nízkým odporem pro protékající proud. Tím je skokově zvýšený proud odveden prostřednictvím transilu ze zbytku obvodu a veden transilem do

země. Při napětovém impulzu je napětí omezeno na hodnotu napětí, určené vlastnostmi součástky, viz *obrázek 3.1*. Po odeznění pulzu se transil vrátí zpět do vysoko impedančního stavu. Pokud je přiložené napětí pod pracovním napětím, transilem prochází pouze klidový proud. Tento proud kolísá s teplotou přechodu. Pro ochranu obvodu před přepětím je nutné transil zapojit paralelně k obvodu. Jejich výhodou je nízké omezovací napětí, velmi krátká odezva a dlouhá životnost. Provedení transilů může být jednosměrné i obousměrné. [2]



Obrázek 3.1 Princip omezení přepětí transilem

3.1 Základní pojmy, V-A charakteristika



Obrázek 3.2 V-A charakteristika obousměrného transilu a značka

- **Nejvyšší trvalé napětí V_{WM}**

Stejnosemné napětí, efektivní hodnota sinusového střídavého napětí, či nejvyšší vrcholové pracovní napětí, které může být trvale přiloženo na součástce, bez efektu

degradace nebo destrukce. Někdy udáváno jako „Stand off voltage“. Při tomto napětí prochází klidový proud I_D . [3]

- **Jmenovité napětí transilu V_{BR}**

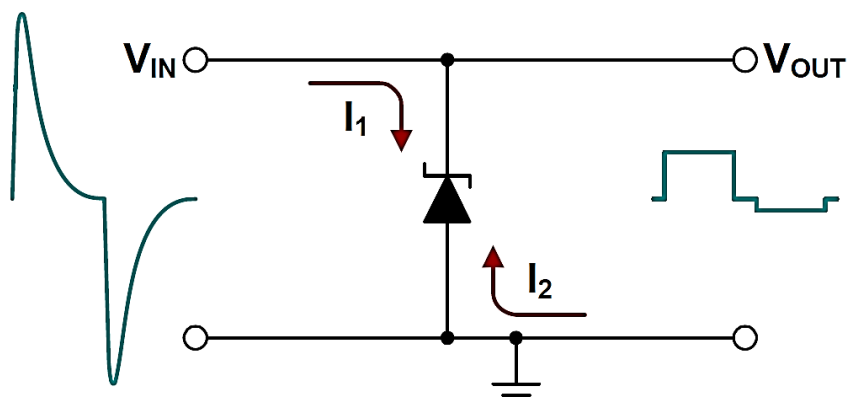
Při definovaném proudu I_T , který bývá definován výrobcem, nejčastěji však 1mA, lze na součástce naměřit právě napětí V_{BR} . Toto napětí je průrazné napětí nebo je mu velmi blízké. Zkušební proudový pulz by neměl být delší než 400ms, aby se předešlo změnám vlivem teploty.[3]

- **Omezovací napětí V_C**

Maximální možné napětí na transilu při procházejícím špičkovém pulzu I_{PP} pro specifikovaný tvar, jako například 8/20us nebo 10/1000us. [3]

3.2 Jednosměrný transil

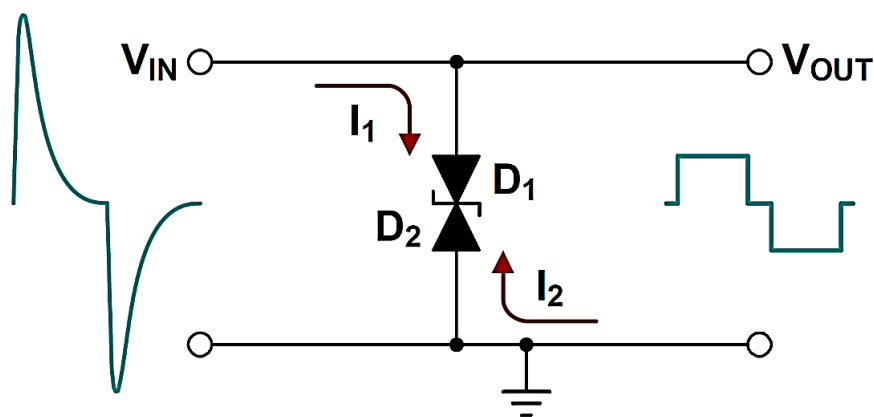
Nejjednodušší provedení je jednosměrný transil. Jeho způsob použití je na *obrázku 3.3*. Zde je transil v závěrném směru během kladného přepětí, protéká jím proud I_1 . Při kladném přepětí je omezena amplituda na hodnotu omezovacího napětí nebo nižší. Během záporného přepětí je transil v propustném směru, špička napětí je omezena na hodnotu napětí odpovídající úbytku napětí na transilu. [8]



Obrázek 3.3 Použití jednosměrného transilu

3.3 Obousměrný transil

Na *obrázku 3.4* je zobrazeno zapojení obousměrného transilu. Ten je v závěrném směru vzhledem k oběma typům přepětí, jak kladnému tak zápornému. Při přepětí tedy vždy dochází k lavinovému průrazu. Kladný nebo záporný přepětíový pulz je omezen na hodnotu omezovacího napětí nebo nižší. V-A charakteristika pro většinu obousměrných transilů je symetrická. [8]



Obrázek 3.4 Použití obousměrného transilu

3.4 Špičkový ztrátový výkon

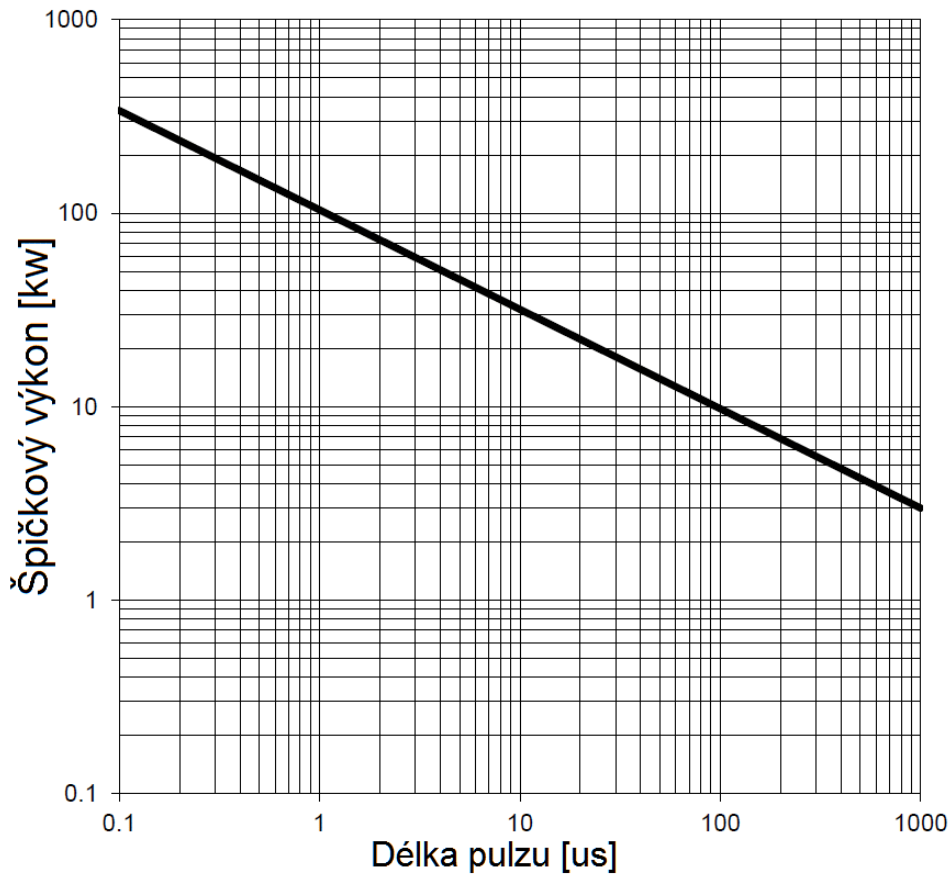
Základní úkol transilu je ochrana zařízení před přepětovým rušením. Délka těchto přepětových pulzů však není vždy stejná, ale váže se k aplikacím, kde je transil použit. Například elektrostatický výboj (ESD) může být v rozsahu 10ns, zatímco v průmyslových aplikacích jsou to jednotky μs , v telekomunikační sféře stovky μs a v automobilovém průmyslu desítky ms. Proto je nutné vybrat správné parametry součástky pro danou oblast použití. V katalogových dokumentech je udáváno omezovací napětí V_C a špičkový proud I_{PP} pro standardizované pulzy jako například 8/20 μs a 10/1000 μs . Další možností je graf závislosti špičkového výkonu na délce pulzu, podobnému jako na *obrázku 3.5*. Špičkový ztrátový výkon lze pak spočítat dle rovnice 3.1. [8][9]

$$P_{PP} = V_C \times I_{PP} \quad 3.1$$

P_{PP} – špičkový ztrátový výkon

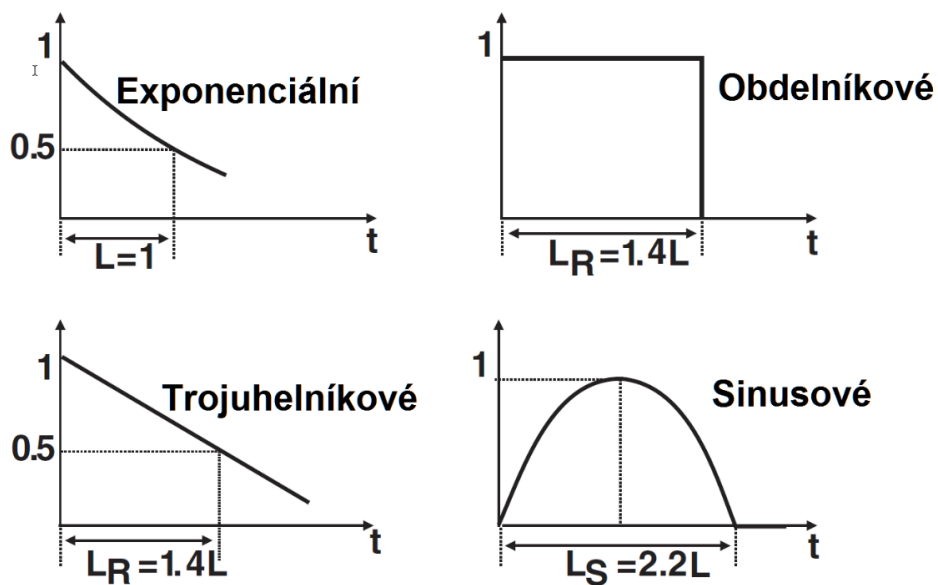
V_C – omezovací napětí

I_{PP} – maximální špičkový proud



Obrázek 3.5 Graf závislosti špičkového výkonu na délce pulzu

Lze se však také setkat s průběhy vln, které nejsou exponenciální. Je tedy nutný přepočet energie z exponenciální vlny na vlnu odlišnou. Na *obrázku 3.6* jsou zobrazeny ekvivalentní vlny. Například obdélníkový pulz musí mít 1,4x delší dobu trvání než exponenciální pro stejný ztrátový výkon. [9]



Obrázek 3.6 Ekvivalentní vlny k exponenciální vlně

Může nastat případ, kdy neproběhne jen jeden pulz, ale pulzy se opakují. Je tedy nutné nepřesáhnout jak maximální špičkový ztrátový výkon, tak maximální teplotu přechodu. Ta je spočtena z jeho termálního odporu, rovnice 3.2 a rovnice 3.3, jako pro diodu. [9]

$$P_{AV} = f \times W \quad 3.2$$

P_{AV} – průměrný ztrátový výkon

f – frekvence

W – energie jednoho pulzu

$$T_j = T_{amb} + R_{th(j-a)} \times P_{AV} \quad 3.3$$

T_j – teplota přechodu

T_j – teplota okolí

$R_{th(j-a)}$ – tepelný odpor

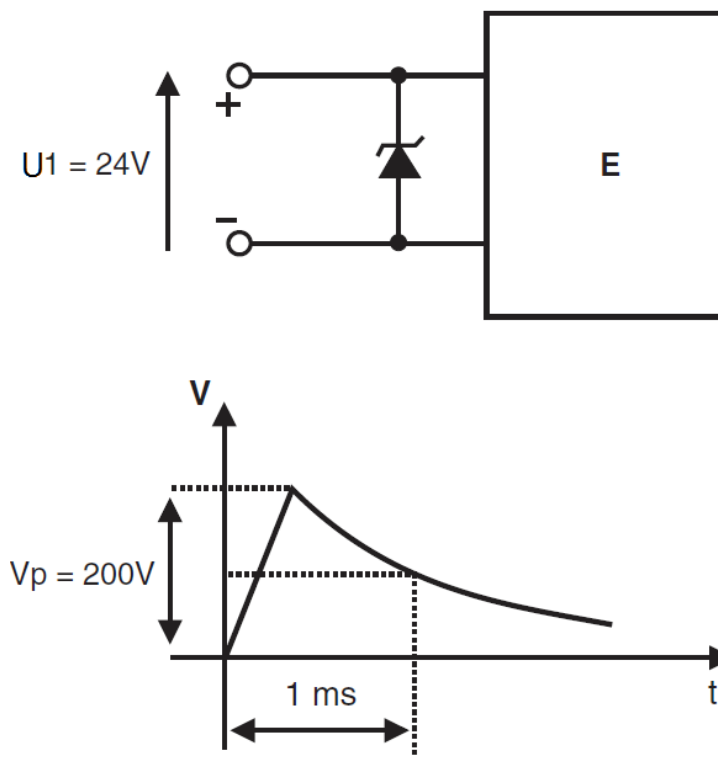
P_{AV} – průměrný ztrátový výkon

3.5 Průvodce výběrem transilu

Většina výrobců transilů má katalogové listy popisující správný výběr transilu. V následujících kapitolách je využíván dokument od firmy ST [9].

3.5.1 Příklad výpočtu pro neopakovatelné pulzy

Na obrázku 3.7 je zdroj U_1 s deklarovaným napětím 24V, který napájí zařízení E. To musí být chráněno proti přepětí. Na svorkách zdroje může vzniknout náhodné přepětí o amplitudě 200V s definovanou vlnou 10/1000 μ s. Předpokládaná vnitřní impedance zdroje Z s ohledem na vlnu 10/1000 μ s je 13 Ω . Maximální pokojová teplota je 75°C a za žádných okolností nesmí být zařízení E vystaveno napětí vyššímu 50V.



Obrázek 3.7 Příklad zapojení ochrany a ukázka přepětové vlny

Prvním krokem je určit nejvyšší trvalé napětí V_{WM} . Předpokládaná odchylka zdroje V_1 je $\pm 20\%$, tzn. $20V - 29V$. Nejvyšší trvalé napětí V_{WM} tedy musí být rovné nebo větší než $29V$.

Dalším krokem je určení špičkového ztrátového výkonu P_{PP} . Zařízení E nesmí být vystaveno napětí převyšující $50V$, tudíž jmenovité napětí transilu V_C musí být menší nebo rovno $50V$. S těmito informacemi lze určit špičkový proud a špičkový ztrátový výkon.

$$I_{PP} = \frac{V_P - V_C}{Z} = \frac{200 - 50}{13} = 11,5A \quad 3.4$$

$$P_{PP} = V_C \times I_{PP} = 50 \times 11,5 = 575W \quad 3.5$$

Tento špičkový výkon odpovídá provozní teplotě $75^\circ C$. V katalogových listech se však špičkový výkon uvádí pro teplotu $25^\circ C$ a je proto nutné jej upravit podle odpovídající charakteristiky, uvedené na obrázku 3.8

$$P_{PP}(25^\circ C) = \frac{P_{PP}(75^\circ C)}{0,8} = \frac{575}{0,8} = 719W \quad 3.6$$

Nyní je dostatek informací k určení typu transilu. $V_{WM} \geq 29V$, $V_{WM} \leq 50V$ pro $I_{PP} = 11,5A$, $P_{PP}(25^\circ C) = 719W/1ms$. Výše uvedeným charakteristikám odpovídá například transil typu SMCJ30A od firmy ST. Jeho $V_{WM} = 30V$, $V_{BR} = 33,3V$, $V_{CLmax} = 48,4$ pro $I_{PP} = 32A$ a $P_{PP} = 1500W$ pro impuls délky $1ms$.

K určení omezovacího napětí V_C při 11,5A je potřeba nahlédnout do katalogového listu na závislost V_C na I_{PP} .

$$V_{Cmax}(při I_P) \approx V_{BRtyp} + R_D \times I_P \quad 3.7$$

$$R_D \leq \frac{V_C - V_{BR}}{I_{PP}} \quad 3.8$$

$$V_C(při 11,5A) \approx 35,05 + \frac{48,4 - 35,05}{32} \times 11,5 = 39,84V \quad 3.9$$

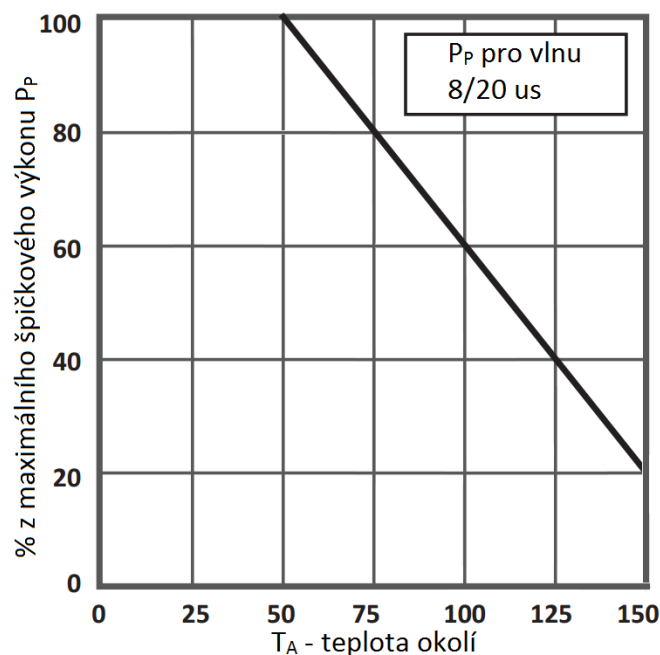
Kde $V_{BRtyp} = V_{BRmin}/0,95 = 35,05V$

Opět je nutná teplotní korekce. Napětí při 75°C je:

$$V_C(T_j) = V_C(25^\circ C) \times [1 + \alpha T \times (T_j - 25^\circ C)] \quad 3.10$$

$$V_C(75^\circ C) = 39,84 \times [1 + 9,9 \times 10^{-4} \times (75^\circ C - 25^\circ C)] = 41,81V \quad 3.11$$

Hodnota omezovacího napětí při 75°C je pod limitem 50V. Tento transil zajišťuje vyhovující ochranu.

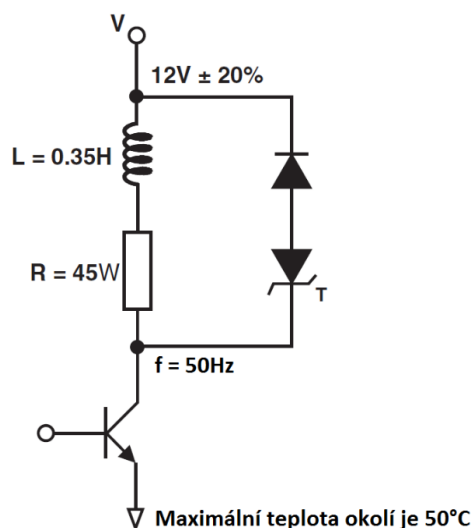


Obrázek 3.8 Závislost špičkového výkonu na teplotě okolí

3.5.2 Příklad výpočtu pro opakovatelné pulzy

Na obrázku 3.9 je potřeba chránit tranzistor transilem, jehož omezovací napětí V_C nesmí překročit 85V. U opakovatelných přepětí lze provést zjednodušení a předpokládat, že $V_C \approx V_{BR}$. Zkušenosti tuto hypotézu potvrzují, a proto by měl být transil vybírán se zaměřením na jeho teplotní charakteristiky. Pro správný výběr transilu je třeba určit v

případě opakovaných impulzů průměrný ztrátový výkon P_{AV} . V následujícím případě musí transil absorbovat energii, která se naakumulovala v cívce.



Obrázek 3.9 Schéma zapojení transilu jako ochrana tranzistoru

$$P_{AV} = \frac{1}{2} \times L \times I^2 \times f = \frac{1}{2} \times 0,35 \times \left(\frac{12 + 2,4}{45} \right)^2 \times 50 = 0,9W \quad 3.12$$

Nyní lze pokračovat k výběru transilu. Jeho omezovací napětí V_{CL} musí být nižší než 85V. Z řady SMCJ od výrobce ST odpovídá typ SMCJ58A. Jeho $V_{BRmax} = 70,84V$, $R_{th} = 75^\circ C/W$ a $\alpha_T = 10,4 \cdot 10^{-4}/^\circ C$. Pro odpovídající omezovací napětí V_{CL} je nutná znalost teploty přechodu T_j při teplotě okolí 50°C.

$$T_j = T_{amb} + P_{av} \times R_{th} = 50 + 67,5 = 117,5^\circ C \quad 3.13$$

Teplota přechodu T_j bude při maximální možné teplotě okolí 117,5°C. V katalogovém listu je maximální provozní teplota $T_{jmax} = 150^\circ C$, tedy transil splňuje tyto kritéria. Nyní lze spočítat omezovací napětí při teplotě přechodu 117,5°C. Pro tak malé proudy, které potečou transilem, lze předpokládat $V_C \approx V_{BRmax}$. Následující výpočet je dosazením do výše zmíněného vzorce 3.10

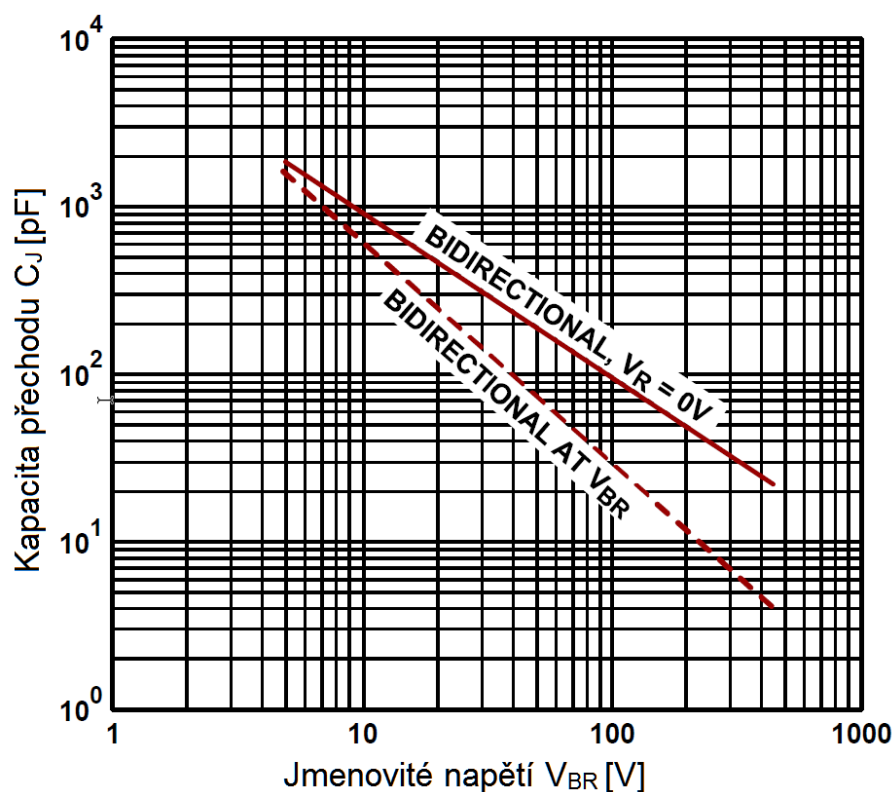
$$V_C(117,5^\circ C) = 70,84 \times [1 + 10,4 \times 10^{-4} \times (117,5^\circ C - 25^\circ C)] = 77,65V \quad 3.14$$

Za maximální teploty okolí je stále zachován požadavek na $V_C < 85V$. Tento transil je tedy možné použít.

3.6 Kapacita

Kapacita transilu na přechodu je způsobena pohyby děr a elektronů na opačných stranách P-N přechodu a vyčerpané oblasti. Ekvivalentem jsou rovnoběžné desky s dielektrikem mezi nimi, princip běžného kondenzátoru. V závěrném směru se zvyšujícím se napětím se vyčerpaná oblast rozšiřuje a kapacita se snižuje.

Nízkonapěťové transily s vysokou koncentrací dotujících prvků mají úzkou vyčerpanou oblast vedoucí k vyšší kapacitě. S vyšším omezovacím napětím součástek klesá koncentrace dotujících prvků exponenciálně a rozšiřuje se vyčerpaná oblast, kapacita tedy klesá. Na obrázku 3.10 je znázorněna osa x s rostoucím jmenovitým napětím transilu pro sérii SMAJ od výrobce Intersil. Spojitá přímka je pro nulové přiložené napětí, přerušovaná přímka je pro přiložené napětí o velikosti jmenovitého napětí. Obě přímky jsou pro obousměrné transily, které mají dva P-N přechody v sérii, což vede ke snížení kapacity. [8]



Obrázek 3.10 Graf znázorňující změnu kapacity přechodu s rostoucím jmenovitým napětím obousměrného transilu série SMAJ

Kapacita transilu pracujícím se stejnosměrnými napětími a nízkými frekvencemi neovlivňuje jeho činnost. Při vyšších frekvencích dochází k útlumu signálu. [8]

4 Měření

Následující kapitola popisuje měření změny vlastností prvků jemné ochrany varistoru a transilu v závislosti na počtu přiložených přepětí. Předkládá charakteristiku testovacího přepětí, testovací a měřicí sestavu a vyhodnocení měření.

4.1 Testování odolnosti systémů proti přepětí

Testování odolnosti systému proti přepětí se řídí souborem standardů ČSN EN 61000-4-X. Návrhy systémů uvádí jeden či více testů podléhajícím ČSN EN 61000-4-X pro

získání osvědčení o shodě. Podle dokumentu [10][11] jsou dále přiblíženy nejběžnější testovací metody a to zkouška odolnosti elektrostatickým výbojem ESD, zkouška odolnosti rychlými přechodovými jevy/skupinou impulzů a zkouška odolnosti rázovým impulzem.

Důležitým prvkem pro výběr vhodné úrovně zkušebního napětí je charakter prostředí, ve kterém má být zkoušené zařízení provozováno. Normy rozdělují tato prostředí do jednotlivých úrovní odolnosti.

- Úroveň odolnosti 1 je vyžadována u zařízení pracujících v prostředí s nízkou, příp. velmi nízkou úrovní elmag. rušení. Jde o tzv. dobře chráněná prostředí.
- Úroveň odolnosti 2 popisuje odolnost zařízení, které má pracovat v prostředí s mírnou úrovní elmag. rušení. Jde o běžná, tj. mírně chráněná, příp. nechráněná pracovní prostředí.
- Úroveň odolnosti 3 je požadována pro zařízení určená pro tzv. náročná prostředí s vysokou úrovní elmag. rušení. Jde o typická průmyslová prostředí.
- Úroveň odolnosti 4, příp. X musí mít zařízení určená pro prostředí s velmi vysokou úrovní předpokládaného rušení. Jde o nechráněná silně rušená průmyslová prostředí.

4.1.1 Zkouška odolnosti elektrostatickým výbojem ESD

Standart ČSN EN 61000-4-2 pokrývá testování systému elektrostatickými výboji. Elektrostatický výboj může být velmi nebezpečný a i při velmi nízké amplitudě může poškodit komponenty. Mnoho systémů vyžaduje ochranu proti takovýmto výbojům, jelikož většina uživatelsky přístupných oblastí může být vystavena ESD. Odolnost systému je rozdělena do několika úrovní a testují se dva případy, kontaktní výboj a výboj přes vzduchovou mezeru, viz tabulka 1.

Tabulka 1 Úrovně odolnosti systému a hodnoty zkušebního napětí ESD

Úroveň	Kontaktní výboj	Výboj přes vzduchovou mezeru
	Testovací napětí [kV]	Testovací napětí [kV]
1	2	2
2	4	4
3	6	8
4	8	15
X	Vlastní	Vlastní

Testování probíhá nabitím kapacitoru 150 pF a vybíjení skrze rezistor 330Ω. Kontaktní výboj je prováděn dotykem vybíjecího hrotu na příslušné místo a poté je spuštěn výboj. Naopak výboj přes vzduchovou mezeru je prováděn tak, že nabitý hrot s kuličkou ESD pistole je postupně přibližován k místu, dokud nedojde k výboji.

4.1.2 Zkouška odolnosti rychlými přechodovými jevy

Rychlé přechodové jevy (EFT – Electrical Fast Transient) od okolního prostředí, okolních napájecích nebo datových kabelů mohou narušit komunikaci vlivem existujících indukčních a kapacitních vazeb. Proto je důležitá ochrana proti těmto jevům. Pro testování odolnosti proti EFT je určena norma ČSN 61000-4-4. Obecně odolnost proti EFT vyžadují systémy připojené na napájecí síťové rozvody a další průmyslové aplikace. Testovací pulzy jsou dle ČSN EN 61000-4-4 opakovány po dobu 15ms, náběžná hrana každého impulzu je 5 ns a jeho délka (pro 50 % úroveň) činí 50 ns. Skupiny těchto impulzů se opakují po 300ms. Energie takových pulzů je v řádu stovek mJ. S tak malou energií nehrozí porucha systému, ale dochází k zarušení přenášeného signálu vlivem podobnosti s číslicovými signály. TVS diody jsou navrhovány k potlačení přechodových napětí s výkonem pohybujícím se od desítek mJ do stovek J. Dokáží tak zvládnout nejen ESD, ale i EFT a rázové pulzy. Velikosti zkušebních napětových impulzů znázorňuje tabulka 2. Opakovací kmitočet je 5 kHz nebo 100 kHz.

Tabulka 2 Úrovně odolnosti systému a hodnoty zkušebního napětí EFT

Úroveň	Napájecí a zemnicí svorky	Signálové, datové svorky
	Testovací napětí [kV]	Testovací napětí [kV]
1	0,5	0,25
2	1	0,5
3	2	1
4	4	2
x	Vlastní	Vlastní

4.1.3 Zkouška odolnosti proti rázovým pulzům

ČSN EN 61000-4-5 zahrnuje testování a měření odolnosti proti rázovým pulzům. Takovéto pulzy mají na rozdíl od ESD nebo EFT delší dobu trvání a nesou tedy daleko větší energii. K takovým pulzům dochází často v důsledku bleskového výboje nebo vysokonapětového spínání. ČSN EN 61000-4-5 definuje dva proudové pulzy 8/20 μs a 10/1000 μs a napětový pulz 1,2/50 μs. Vzhledem k následnému užití systému je několik úrovní ochrany, ukázáno v tabulce 3.

Tabulka 3 Úrovně odolnosti systému a hodnoty zkušebního napětí rázovými pulzy

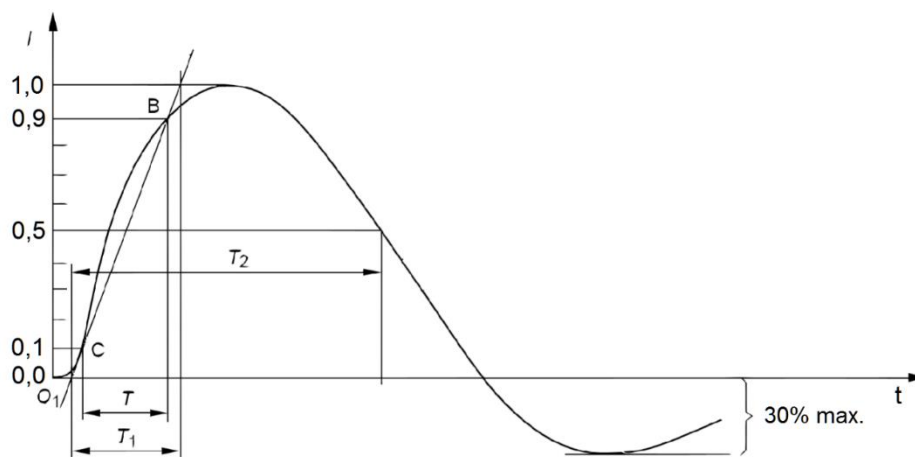
Úroveň	Testovací napětí v otevřeném obvodu ±10%
1	0,5
2	1,0

3	2,0
4	4,0
X	Vlastní

4.2 Měřicí a testovací pracoviště

4.2.1 Testovací rázový pulz

Zvolená vlna pro namáhání prvků přepětové ochrany odpovídá normě ČSN EN 61000-4-5. Jedná se o proudovou vlnu 8/20 μ s. 8 μ s je doba náběhu z 10% do 90% špičkové hodnoty, 20 μ s je doba, za kterou klesne amplituda na 50% své špičkové hodnoty. Průběh vlny znázorňuje *obrázek 4.1*



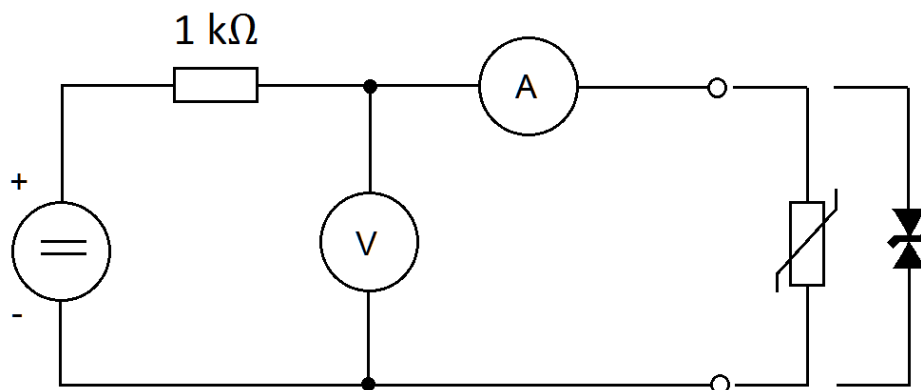
Doba náběhu : $T_1 = 1,25 \times T = 8 \mu\text{s} \pm 20\%$
Doba dosažení 50% hodnoty : $T_2 = 20 \mu\text{s} \pm 20\%$

Obrázek 4.1 Vlna proudu 8/20 μ s dle normy ČSN EN 61000-4-5

Vlna byla vybrána vzhledem k tomu, že výrobci přepětových ochran ji ve většině případů uvádí v katalogových listech jako vlnu testovací, ke které jsou vztaženy parametry součástek.

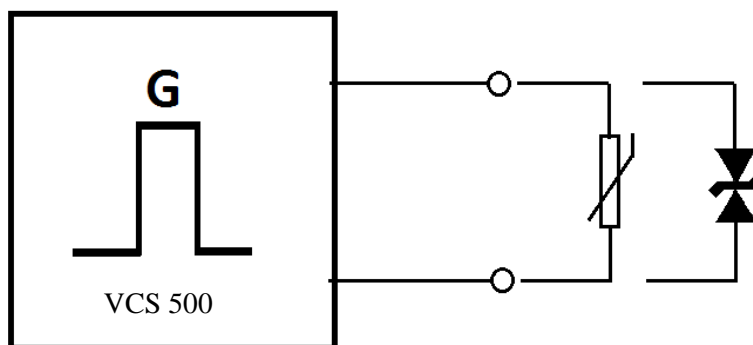
4.2.2 Zapojení měřícího pracoviště

Měřicí sestava využívala 2 zdroje stejnosměrného napětí Manson DPD-3030 a RFT 3218, dvou multimetrů Metex M-3860D a Metex M-4640A. Schéma zapojení pro měření V-A charakteristik varistorů a transilů bylo velice jednoduché a je zachyceno na *obrázku 4.2*



Obrázek 4.2 Schéma zapojení obvodu pro měření V-A charakteristik

Zapojení testovacího pracoviště obsahovalo měřicí generátor rázového pulzu VCS 500, ke kterému se přímo připojovala testovaná součástka, je na obrázku 4.3



Obrázek 4.3 Schéma zapojení testovacího okruhu s generátorem přepětových pulzů

Dále byl použit osciloskop Tektronix TDS 3012, proudová sonda Agilent 1146A a LCR měřič ESCORT ELC-3133A.

4.2.3 Měřené součástky

Tabulka 4 obsahuje součástky použité při měření vlivu přepětí na jemnou ochranu spolu s jejich základními vlastnostmi. Pro varistory uváděli výrobci neopakovatelnou maximální amplitudu proudu pro vlnu 8/20 μs . Pro transil se uváděla křivka závislosti špičkového výkonu na šířce pulzu, ale chyběla hodnota maximální amplitudy proudu pro vlnu 8/20 μs .

Tabulka 4 Použité součástky jemné ochrany s jejich základními parametry

	Varistorové napětí U_N [V]	Maximální proud I_{PP} [A] pro vlnu 8/20 μs

VCR 14D220K	22	1000
VCR 14D390K	39	1000
VCR10D470K	47	500
VCR 07D180K	18	250
VCR 07D330K	33	250
VE13 0300K	47	500

	Jmenovité napětí transilu V_{BR} [V]	Maximální špičkový výkon P_{PP} [kW] pro vlnu 8/20 μ s
1.5KE33CA	33	10
1.5KE47CA	47	10
824551331	39	21
824551581	68	21
LRJ	30	4

Transily AK6-058C a LTKAK6-058C mají shodně jmenovité napětí 67V pro 10mA. V katalogových listech se neudává maximální špičkový výkon P_{PP} , ale maximální hodnota amplitudy proudu pro vlnu 8/20 μ s, která činí 6 kA.

4.3 Měření vlivu přepětí na prvky jemné ochrany

4.3.1 Postup měření varistoru.

Pro měření vlivu počtu svedených přepětí na změně varistorového napětí byla zvolena proudová vlna 8/20 μ s (kap 4.2.1), dle normy ČSN EN 61000-4-5. Měření sledovalo posuv varistorového napětí U_N po svodu 200 přepětí uvedené vlny. V katalogových listech je uváděno varistorové napětí s tolerancí $\pm 10\%$, kterou by neměl varistor překročit.

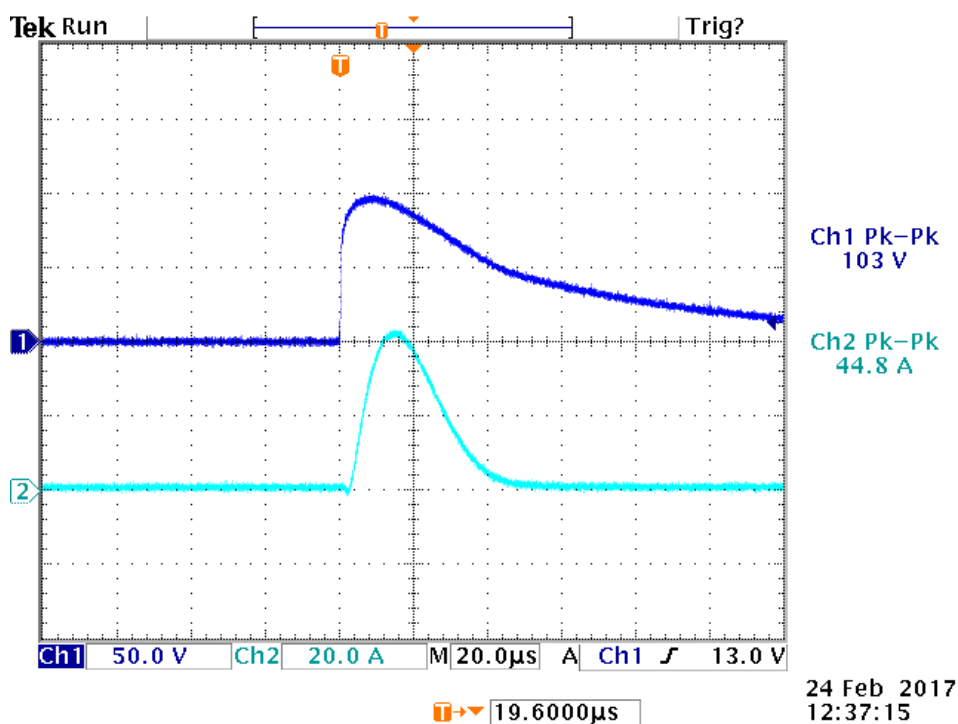
Maximální velikost testovacího proudu byla 50% udávané amplitudy neopakovatelného proudu pro součástku. U předchozích pokusů s vyššími hodnotami než 50% docházelo k elektrické i mechanické destrukci varistoru i při velmi dlouhé prodlevě mezi pulzy. Pro stanovenou velikost testovacího proudu byla zvolena prodleva mezi jednotlivými pulzy 60s.

Po určitém počtu svedených přepětí byl varistor podroben proměření jeho varistorového napětí. Při každém takovém proměření se varistorové napětí U_N porovnávalo s varistorovým napětím U_{N0} , které bylo změřeno před zahájením svodu pulzů a po proměření V-A charakteristiky. Výsledkem tedy byla poměrná změna v procentech $(U_N/U_{N0}) \times 100$.

Před svodem přepětí a po konečném svodu všech 200 přepětí byla změřena V-A charakteristika varistoru. Postupná změna U_N a V-A charakteristiky byly vynášeny do grafů. Pro pouzdra 07D byla V-A charakteristika měřena do 10 mA, 10D do 15mA a 14D do 20mA.

Velikost absorbované energie bylo možné určit metodami uvedenými v kapitole 2.8.2. Osciloskopem byl sledován průběh napětí a proudu na varistoru VCR 07D330K, oba průběhy jsou společně uvedeny na *obrázku 4.4*. Pomocí grafické metody je energie pohlcená varistorem rovna 92,29 mJ. Pro ověření přesnosti výsledku byla absorbovaná energie spočtena také pomocí programu Matlab. V tomto případě vyšla energie přesněji 81,3 mJ. Tento způsob vyhodnocení byl omezen možnostmi proudové sondy jejím $I_{MAX} = 100A$. Kód programu Matlab pro výpočet absorbované energie je v příloze.

Při měření vlivu přepětí na změnu varistorového napětí byla také pozorována kapacita součástky. Ta byla změřena před svodem přepětí ($n = 0$) a po svodu všech přepětí ($n = 200$) při frekvenci 10 kHz.



Obrázek 4.4 Průběh napětí a proudu varistorem VCR 07D330K

4.3.2 Naměřené výsledky varistorů

V následujících tabulkách jsou naměřené hodnoty varistorů. V-A charakteristiky byly měřeny před rázovými pulzy, tedy $n = 0$, a po svodění 200 pulzů, tedy $n = 200$. Hodnoty těchto křivek jsou v tabulce 5. Tabulka 6 obsahuje naměřené hodnoty varistorového napětí jednotlivých součástek po 200 svodech pulzů. V tabulce 7 jsou hodnoty kapacity varistorů při 10 kHz pro $n = 0$ a $n = 200$.

Tabulka 5 Hodnoty V-A charakteristiky varistorů před svodem pulzů a po svodu 200 pulzů.

VCR 14D390K				VCR 10D470K			
n = 0		n = 200		n = 0		n = 200	
U [V]	I [mA]	U2[V]	I2[mA]	U [V]	I [mA]	U2[V]	I2[mA]
10,00	0,000	10,00	0,003	12,00	0,000	12,00	0,000
20,00	0,001	20,00	0,001	24,00	0,000	24,00	0,000
30,00	0,002	30,00	0,008	36,04	0,000	36,00	0,001
39,00	0,163	39,00	0,068	47,00	0,014	47,00	0,011
44,90	1,000	44,40	0,508	52,10	0,498	56,60	0,507
45,90	1,960	45,80	1,026	53,30	1,039	58,20	1,027
46,80	3,941	46,80	2,055	54,70	2,003	59,50	2,112
47,90	8,077	48,00	4,103	56,00	3,947	60,90	4,133
48,30	10,050	49,10	8,170	58,60	8,063	62,50	8,052
49,10	15,020	49,60	10,039	59,50	10,185	63,20	10,204
49,60	20,200	50,40	15,148	60,80	15,625	64,40	15,430
		51,10	20,370				

VCR 14D220K				VCR 07D180K			
n = 0		n = 200		n = 0		n = 200	
U [V]	I [mA]	U2[V]	I2[mA]	U [V]	I [mA]	U2[V]	I2[mA]
5,00	0,000	5,00	0,000	4,00	0,000	4,00	0,000
10,00	0,000	10,00	0,001	8,00	0,000	8,00	0,000
15,01	0,000	15,00	0,006	12,00	0,000	12,00	0,001
21,03	0,538	22,83	0,517	16,00	0,010	16,00	0,026
21,83	1,016	23,75	1,034	19,45	0,512	19,82	0,520
22,60	1,992	24,42	2,061	20,06	1,064	20,69	1,039
23,60	4,130	25,23	4,124	20,50	2,075	21,24	2,045
25,00	8,460	26,15	8,114	21,10	4,133	21,88	4,140
25,35	10,084	26,48	10,060	21,60	8,046	22,62	8,202
26,00	15,090	27,05	15,052	21,85	10,170	23,00	10,208
26,26	20,400	27,35	20,400				

VCR 07D330K				VE13 0300K			
n = 0		n = 200		n = 0		n = 200	
U [V]	I [mA]	U2[V]	I2[mA]	U [V]	I [mA]	U2[V]	I2[mA]
8,00	0,000	8,00	0,000	12,00	0,000	12,00	0,000
16,00	0,000	16,00	0,000	24,00	0,000	24,00	0,000
24,00	0,001	24,00	0,002	36,00	0,002	36,00	0,006
32,27	0,505	36,12	0,515	47,60	0,526	50,10	0,497
33,10	1,008	36,91	1,012	49,30	1,039	51,50	1,014
34,42	2,007	37,60	2,021	50,80	2,085	52,80	2,078
35,60	3,964	38,40	4,022	52,40	4,027	54,10	4,014
37,10	8,077	39,42	7,951	54,20	8,093	55,80	8,028
37,70	10,055	40,00	10,074	55,10	10,245	56,50	10,018

Tabulka 6 Závislost varistorového napětí na počtu svedených pulzů

VCR 14D390K			VCR 10D470K			VCR 14D220K(F)		
I (8/20 μ s) = 500 [A]			I (8/20 μ s) = 250 [A]			I (8/20 μ s) = 500 [A]		
n	U _N [V]	U _N /U _{N0} [%]	n	U _N [V]	U _N /U _{N0} [%]	n	U _N [V]	U _N /U _{N0} [%]
0	45,5	100,0%	0	56,4	100,0%	0	23,16	100,0%
10	45,7	100,4%	10	57,0	101,1%	10	23,20	100,2%
30	45,9	100,9%	30	57,4	101,8%	30	23,43	101,2%
50	45,9	100,9%	50	57,6	102,1%	50	23,44	101,2%
70	45,9	100,9%	70	57,7	102,3%	70	23,55	101,7%
100	45,9	100,9%	100	57,8	102,5%	100	23,60	101,9%
130	45,7	100,4%	130	58,0	102,8%	130	23,68	102,2%
160	45,7	100,4%	160	58,0	102,8%	160	23,73	102,5%
200	45,8	100,7%	200	58,2	103,2%	200	23,75	102,5%

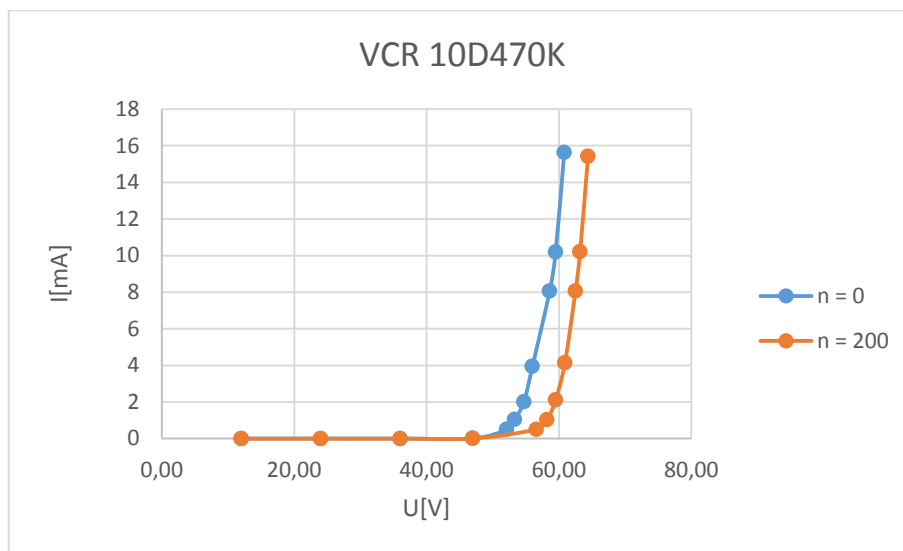
VCR 07D180K			VCR 07D330K			VE13 0300K		
I (8/20 μ s) = 120 [A]			I (8/20 μ s) = 120 [A]			I (8/20 μ s) = 250 [A]		
n	U _N [V]	U _N /U _{N0} [%]	n	U _N [V]	U _N /U _{N0} [%]	n	U _N [V]	U _N /U _{N0} [%]
0	20,26	100,0%	0	35,58	100,0%	0	50,8	100,0%
10	20,36	100,5%	10	35,86	100,8%	10	50,9	100,2%
30	20,46	101,0%	30	36,15	101,6%	30	50,9	100,2%
50	20,58	101,6%	50	36,4	102,3%	50	51	100,4%
70	20,61	101,7%	70	36,52	102,6%	70	51,2	100,8%
100	20,63	101,8%	100	36,64	103,0%	100	51,3	101,0%
130	20,67	102,0%	130	36,78	103,4%	130	51,4	101,2%
160	20,68	102,1%	160	36,86	103,6%	160	51,5	101,4%
200	20,69	102,1%	200	36,91	103,7%	200	51,5	101,4%

Tabulka 7 Kapacita varistorů před svodem přepětí a po 200 svodech přepětí

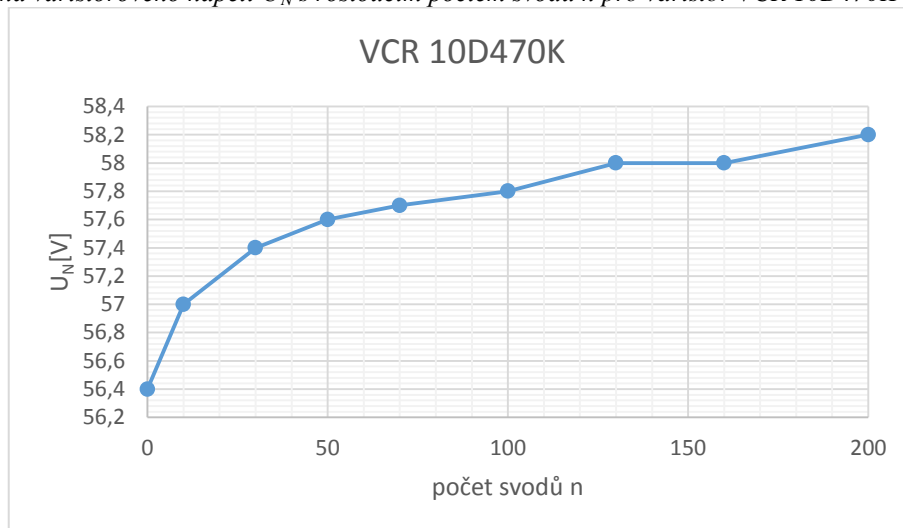
	C pro n = 0 při 10 kHz [nF]	C pro n = 200 při 10 kHz [nF]
VCR 14D390K	3,27	3,31
VCR 14D220KF	8,05	8,12
VCR 10D470K	1,66	1,66
VCR07D330K	1,12	1,21
VCR 07D180K	2,00	2,00
VE13 0300K	1,98	1,99

Dále je uveden příklad změny V-A charakteristiky a změna varistorového napětí U_N pro varistor VCR 10D470K. Ostatní grafy jsou obsaženy v příloze.

Graf 1 V-A charakteristiky varistoru VCR 10D470K



Graf 2 Změna varistorového napětí U_N s rostoucím počtem svodů n pro varistor VCR 10D470K



4.3.3 Postup měření transilů

Pro měření vlivu počtu svedených přepětí na změně jmenovitého napětí transilu byla opět zvolena proudová vlna 8/20 μ s (kap 4.2.1), dle normy ČSN EN 61000-4-5. Měření sledovalo posuv jmenovitého napětí transilu V_{BR} po svodu 200 přepětí. V katalogových listech je uváděno jmenovité napětí transilu s tolerancí $\pm 5\%$, kterou by neměl transil překročit.

Maximální velikost testovací amplitudy proudu byla určena s ohledem na nejednotné informace z katalogových listů více způsoby. Pro transily od firmy Littlefuse, AK6-058C a LTKAK6-058C, je v katalogových listech vrcholová hodnota impulzního proudu I_{PP} (pro 8/20 μ s) rovna 6kA. Generátor VCS 500 dodal do obvodu při maximálním výstupním napětí proud 2,5 kA. Maximální testovací amplituda proudu dosahovala 42% katalogové hodnoty I_{PP} . V tabulce 9 je pro tyto dva transily uváděn poměr testovací maximální

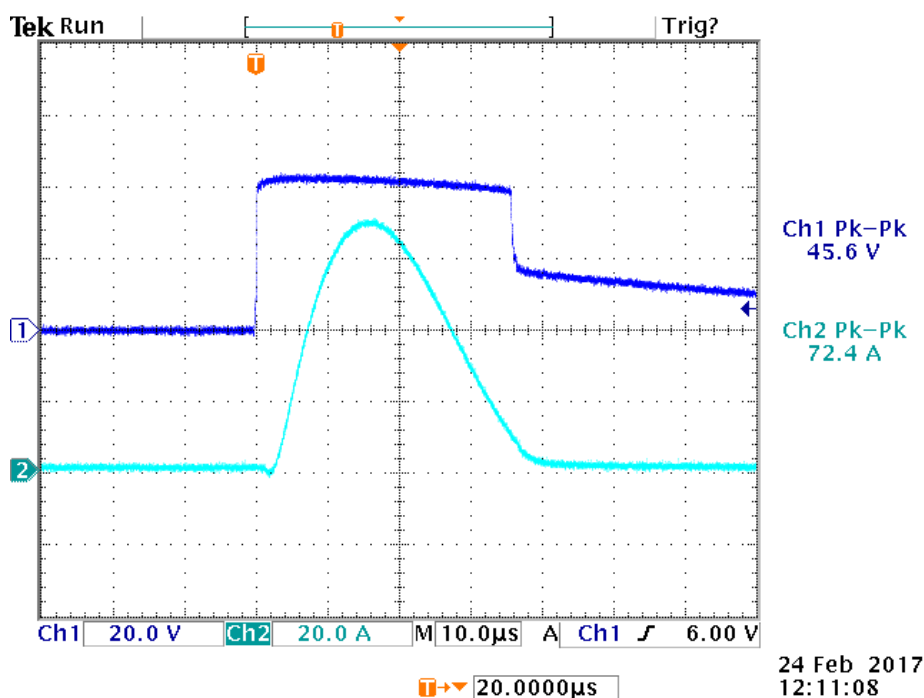
amplitudy proudu ku katalogové maximální amplitudě proudu v procentech (I_P/I_{PP}) x 100. U zbylých transilů bylo nutné maximální testovací amplitudu proudu dopočítat pomocí známého špičkového výkonu pro pulz o šířce 20 μ s (viz *obrázek 3.5*). Následující příklad výpočtu je pro transil 1.5KE33CA.

V katalogovém listě lze odečíst maximální špičkový výkon P_{PP} (pro 8/20 μ s) = 10kW. Protože u varistorů nebylo dosahováno maximálních katalogových hodnot amplitudy proudu, u transilů se v tomto trendu pokračovalo. Pro transil 1.5KE33CA se zvolil proud 130A. Pro tento proud se pomocí rovnice 3.7 a 3.8 dopočítá omezovací napětí V_C rovné 53V. Druhou možností je použití osciloskopu k určení omezovacího napětí V_C . Nyní lze spočítat testovací špičkový výkon $P_P = I_P \times V_C = 6890$ W. V tabulce 9 je tedy pro transily s chybějícími údaji o amplitudě proudu uváděn poměr testovacího špičkového výkonu ku katalogovému špičkovému výkonu v procentech (P_P/P_{PP}) x 100.

Po určitém počtu svedených přepětí byl transil vždy podroben proměření jeho jmenovitého napětí. Při každém takovém proměření se jmenovité napětí transilu V_{BR} porovnávalo se jmenovitým napětím transilu V_{BR0} , které bylo změřeno před zahájením svodu pulzů. Výsledkem tedy byla poměrná změna v procentech (V_{BR}/V_{BR0}) x 100. Před svodem přepětí a po konečném svodu všech 200 přepětí byla změřena V-A charakteristika transilu, která byla vynášena do grafu. Vzhledem k téměř nulové změně jmenovitého napětí transilu V_{BR} nebylo nutné vynášet data do grafu.

Podobně jako u varistoru se i u transilu snímal průběh napětí a proudu pomocí osciloskopu. Průběhy pro transil 1.5KE33CA jsou společně uvedeny na *obrázku 4.5*. Pomocí grafické metody se energie absorbovaná transilem rovná 66,03mJ. Výpočtem v programu Matlab vyjde energie 61,96 mJ.

Při měření vlivu přepětí na změnu jmenovitého napětí transilu byla také pozorována kapacita součástky. Ta byla změřena před svodem přepětí ($n = 0$) a po svodu všech přepětí ($n = 200$) při frekvenci 10 kHz.



Obrázek 4.5 Průběh napětí a proudu transilem 1.5KE33CA

4.3.4 Naměřené výsledky transilů

V následujících tabulkách jsou naměřené hodnoty transilů. V-A charakteristiky byly měřeny před rázovými pulzy, tedy $n = 0$, a po svedení 200 pulzů, tedy $n = 200$. Hodnoty těchto křivek jsou v tabulce 8. Tabulka 9 obsahuje naměřené konkrétní hodnoty jmenovitého napětí transilů po určitých svodech pulzů. V tabulce 10 jsou hodnoty kapacity transilů při 10 kHz pro $n = 0$ a $n = 200$.

Tabulka 8 Hodnoty V-A charakteristiky transilů před svodem pulzů a po svodu 200 pulzů

1.5KE33CA				1.5KE47CA			
n = 0		n = 200		n = 0		n = 200	
U [V]	I [mA]	U2[V]	I2[mA]	U [V]	I [mA]	U2[V]	I2[mA]
7,99	0,000	8,00	0,000	12,00	0,000	12,00	0,000
16,01	0,000	16,00	0,000	24,00	0,000	24,00	0,000
24,00	0,000	24,00	0,000	36,00	0,000	36,00	0,000
32,00	0,000	32,00	0,000	46,50	0,540	46,50	0,541
33,60	0,518	33,63	0,535	46,70	1,012	46,70	1,065
33,71	1,023	33,74	1,062	46,80	2,107	46,80	2,069
33,82	2,078	33,80	2,133	47,00	4,202	47,00	4,029
33,85	4,013	33,88	4,015	47,50	8,167	47,40	7,995
34,10	8,062	34,10	8,025	47,70	9,978	47,70	10,035
34,25	10,182	34,20	10,157	48,20	14,999	48,20	15,255
34,55	15,089	34,56	15,160	48,70	20,050	48,70	20,030
34,65	20,160	34,62	20,110				

824551581				824551331			
n = 0		n = 200		n = 0		n = 200	
U [V]	I [mA]	U2[V]	I2[mA]	U [V]	I [mA]	U2[V]	I2[mA]
15,00	0,000	15,00	0,000	10,00	0,000	10,00	0,000
30,00	0,000	30,00	0,000	20,00	0,000	20,00	0,000
45,00	0,001	45,00	0,000	30,00	0,000	30,00	0,000
65,00	0,001	65,00	0,001	37,01	0,086	37,00	0,080
66,40	0,554	66,30	0,550	37,15	0,520	37,15	0,522
66,60	1,077	66,50	1,082	37,27	1,064	37,25	1,058
66,70	2,085	66,70	2,115	37,28	2,096	37,28	2,170
67,00	3,980	67,00	4,038	37,42	4,048	37,39	4,057
67,70	8,103	67,70	8,010	37,65	8,025	37,65	8,234
68,10	10,133	68,10	9,991	37,85	10,101	37,75	10,051
68,70	15,150	68,80	15,275	38,13	15,217	38,08	15,216
69,30	20,250	69,00	20,300	38,26	20,170	38,22	20,530

AK6-058C				LTKAK6-058C			
n = 0		n = 200		n = 0		n = 200	
U [V]	I [mA]	U2[V]	I2[mA]	U [V]	I [mA]	U2[V]	I2[mA]
15,00	0,000	15,00	0,000	15,00	0,000	15,00	0,000
30,00	0,000	30,00	0,000	30,00	0,000	30,00	0,001
45,00	0,000	45,00	0,000	45,00	0,000	45,00	0,001
65,00	0,000	65,00	0,000	65,00	0,003	65,00	0,003
66,70	0,502	66,70	0,543	66,10	0,505	66,20	0,540
66,90	1,042	66,90	1,019	66,30	1,038	66,30	1,045
67,00	2,122	67,00	2,046	66,40	2,092	66,40	2,086
67,20	4,049	67,20	4,085	66,50	4,111	66,50	4,151
67,40	8,077	67,40	8,062	66,80	8,075	66,80	8,054
67,40	10,230	67,60	9,998	67,00	10,150	66,90	10,055
67,50	15,032	68,00	15,127	67,40	15,075	67,30	14,980
67,80	20,120	68,30	20,100	67,50	20,240	67,50	20,220

LRJ			
n = 0		n = 200	
U [V]	I [mA]	U2[V]	I2[mA]
7,00	0,000	7,00	0,000
14,00	0,000	14,00	0,000
21,00	0,000	21,00	0,000
28,00	0,000	28,00	0,000
29,88	0,505	29,90	0,534
30,01	1,074	30,01	1,027
30,03	1,957	30,02	2,185
30,12	4,052	30,14	4,085
30,36	8,204	30,45	8,196
30,56	12,134	30,55	12,073

Tabulka 9 Závislost jmenovitého napětí transilu na počtu svedených pulzů

1.5KE33CA			1.5KE47CA			824551581		
I (8/20μs) = 130 [A]			I (8/20μs) = 140 [A]			I (8/20μs) = 180 [A]		
P_p/P_{pp} [%] = 68,9%			P_p/P_{pp} [%] = 126,7%			P_p/P_{pp} [%] = 72,7%		
n	U_{BR} [V]	U_{BR}/U_{BR0} [%]	n	U_{BR} [V]	U_{BR}/U_{BR0} [%]	n	U_{BR} [V]	U_{BR}/U_{BR0} [%]
0	33,75	100,0%	0	46,7	100,0%	0	66,6	100,5%
10	33,76	100,0%	10	46,7	100,0%	20	66,5	100,3%
30	33,75	100,0%	30	46,7	100,0%	100	66,5	100,3%
50	33,75	100,0%	50	46,7	100,0%	200	66,5	100,3%
70	33,75	100,0%	70	46,7	100,0%			
100	33,75	100,0%	100	46,7	100,0%			
130	33,75	100,0%	130	46,7	100,0%			
160	33,75	100,0%	160	46,7	100,0%			
200	33,74	100,0%	200	46,7	100,0%			
824551331			AK6-058C			LTKAK6-058C		
I (8/20μs) = 210 [A]			I (8/20μs) = 2500 [A]			I (8/20μs) = 2500 [A]		
P_p/P_{pp} [%] = 77,3%			I_p/I_{pp} [%] = 42%			I_p/I_{pp} [%] = 42%		
n	U_{BR} [V]	U_{BR}/U_{BR0} [%]	n	U_{BR} [V]	U_{BR}/U_{BR0} [%]	n	U_{BR} [V]	U_{BR}/U_{BR0} [%]
0	37,27	100,0%	0	67,5	100,0%	0	66,3	100,0%
10	37,26	100,0%	10	67,5	100,0%	20	66,4	100,2%
40	37,26	100,0%	30	67,5	100,0%	100	66,4	100,2%
80	37,25	99,9%	50	67,5	100,0%	200	66,3	100,0%
130	37,25	99,9%	70	67,5	100,0%			
200	37,25	99,9%	150	67,5	100,0%			
			200	67,6	100,1%			

LRJ		
I (8/20μs) = 40 [A]		
P_p/P_{pp} [%] = 48%		
n	U_{BR} [V]	U_{BR}/U_{BR0} [%]
0	30,01	100,0%
10	30,01	100,0%
40	30,01	100,0%
80	30,00	100,0%
130	30,01	100,0%
200	30,01	100,0%

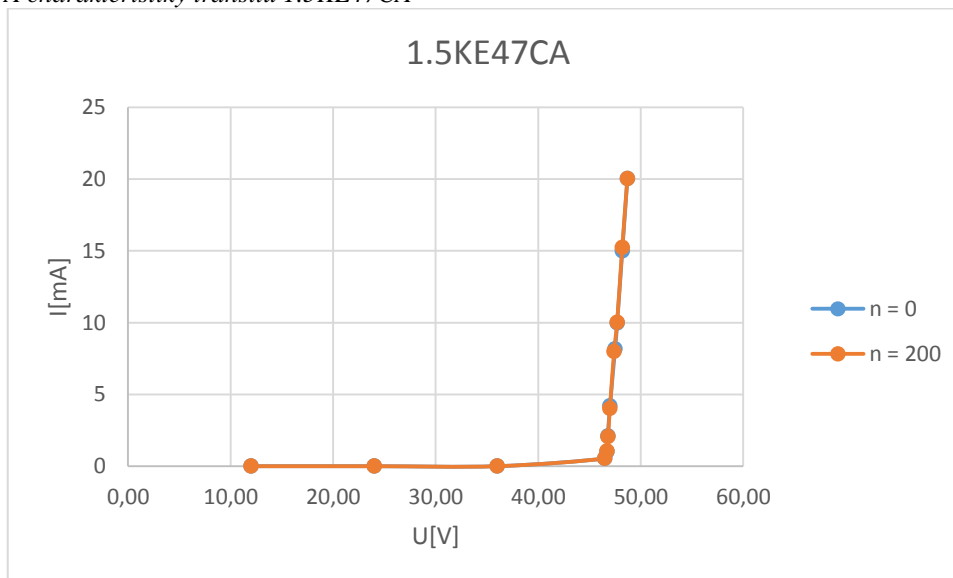
Tabulka 10 Kapacita transilů před svodem přepětí a po svodu 200 přepětí

	C pro n = 0 při 10 kHz [nF]	C pro n = 200 při 10 kHz [nF]
1.5KE33 CA	1,01	1,01
1.5KE47 CA	0,71	0,71
AK6 058C	5,31	5,31
LTA6 058C	6,09	6,09
824551581	1,15	1,15
824551331	1,85	1,83
LRJ B4	0,50	0,51

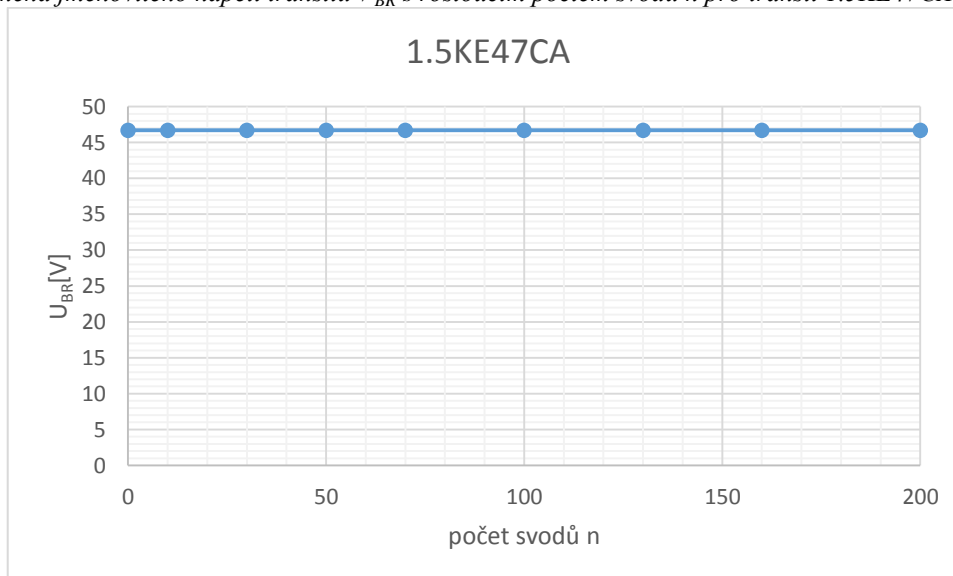
Dále je uveden příklad změny V-A charakteristiky a změna jmenovitého napětí transilu V_{BR} pro transil 1.5KE47CA. V-A charakteristiky pro ostatní transily jsou v příloze.

Grafy pro změnu jmenovitého napětí transilu V_{BR} nejsou přiloženy z důvodu neměnných hodnot.

Graf 3 V-A charakteristiky transilu 1.5KE47CA



Graf 4 Změna jmenovitého napětí transilu V_{BR} s rostoucím počtem svodů n pro transil 1.5KE47CA



4.3.5 Zhodnocení měření pro varistory a transily

Naměřené výsledky odpovídají teoretickým předpokladům. Již při svodu malého počtu napětí lze pozorovat změnu varistorového napětí. U varistorů VCR 14D390K a VCR 14D220K bylo varistorové napětí mimo toleranci výrobce ještě před zahájením svodu přepětí. Zajímavým faktem také bylo, že varistorové napětí se zvyšovalo proměřováním V-A charakteristiky. Proto bylo nutné toto napětí po odměření V-A charakteristik znovu změřit pro výpočet poměrné změny pro $n = 0$, označované jako U_{N0} . U transilů nenastal

žádný z výše uvedených efektů. Ani při přetěžování transilu 1.5KE47CA o 26% nedošlo ke změně jmenovitého napětí transilu a nedošlo ani ke zvýšení klidového proudu.

Kapacita zůstala nezměněna pro transily i varistory.

Závěr

Cílem práce bylo zjistit, zda u transilů dochází vlivem svedených přepětí k posuvu jmenovitého napětí, podobně jako je tomu u varistorů a varistorového napětí. Zpočátku tato práce vysvětluje základní příčiny přepětí, co to vlastně přepětí je a proč je třeba před ním chránit náchylné systémy. Dále byly popsány základní vlastnosti varistorů a transilů společně s průvodcem správného výběru. Posledním krokem bylo samotné měření, prováděno dle normy ČSN EN 61000-4-5 a v souladu s ČSN EN 61643-331, respektive ČSN EN 61643-321. Pro měření byla vybrána proudová vlna 8/20 μ s, její amplituda proudu dosahovala polovičních hodnot udávaných výrobcem pro varistory, u transilů bylo nutné amplitudu proudové vlny dopočítat z maximálního výkonu uvedeného v katalogovém listě.

Naměřené výsledky potvrdily očekávaný posuv varistorového napětí. Dle tabulek a grafů jde pozorovat tento jev u všech měřených varistorů různých pouzder i napětí. U všech varistorů je posuv U_N přibližně exponenciální kromě varistoru VCR 14D390K. U tohoto varistoru nastal očekávaný nárůst varistorového napětí, poté napětí kleslo a opět stoupl. Všechny nárůsty varistorového napětí byly v rozmezí jednotek procent. Na co je však nutné brát zřetel je reálná hodnota varistorového napětí, která již před svodem u dvou vzorků neodpovídala toleranci výrobce. Toto zjištění by mělo být bráno v potaz a každý varistor by měl být před použitím přeměřen. Dalším závažným zjištěním je posuv varistorového napětí po proměření V-A charakteristiky. Proto muselo být varistorové napětí změřeno vždy znovu po proměření charakteristiky a před zahájením svádění pulzů pro správný výpočet poměru změny. Jeden varistor typu VCR 14D220K byl po dobu jednoho měsíce nadměrně soustavně přetěžován, jak bylo popsáno v kapitole 2.9. Výsledkem je zvýšení klidových proudů a snížení varistorového napětí o jednotky voltů ve směru zatěžování. Ve směru proti zatěžování nastal výrazný posuv varistorového napětí na polovinu původní hodnoty.

Měření transilů nevykazovalo žádné anomálie. Reálné hodnoty jmenovitého napětí transilu vždy odpovídaly katalogovým listům a měřením V-A charakteristik nedocházelo k žádnému ovlivnění parametrů transilu. Po prozkoumání naměřených dat několika transilů o různých pouzdech i napětích nelze dokázat významný posuv jmenovitého napětí transilu

u žádného z nich. Maximální posuv byl 0,3%, který mohl vzniknout spíše zvýšenou teplotou přechodu.

Pro ověření stálosti parametrů varistorů a transilů by bylo potřeba více času i prostředků. Z globálního hlediska lze počet vzorků a 200 svodů proudu považovat za velmi malý. Rovněž zatěžování jen proudovým pulzem 8/20 μs nemusí odpovídat reálnému prostředí. Zkoušku proudovým impulzem 10/1000 μs nebylo možné provést, vzhledem k nedostupnosti takového generátoru.

Z výsledků v této práci lze však vyvodit následující závěr. Již před namáháním vykazovaly varistory vyšší klidový proud než transily a s jejich postupnou degradací se rozdíl více prohluboval. Transily mají strmější V-A charakteristiku a lze předpokládat, že hodnota omezeného napětí bude nižší než u varistorů. Jak bylo zmíněno výše, u transilů nedochází k degradaci a posuvu jmenovitého napětí a je možné předpokládat, že v mnoha aplikacích mohou být varistory nahrazovány výkonovými transily.

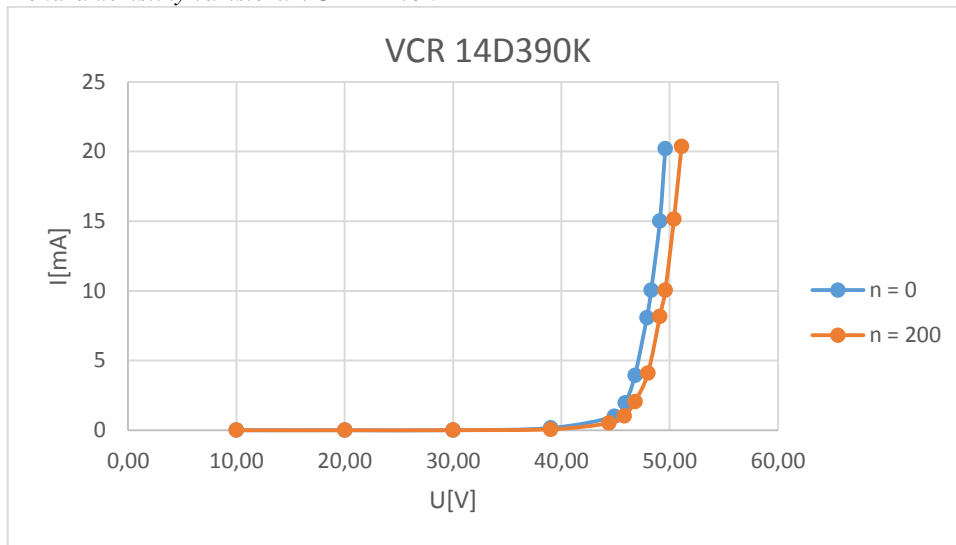
Seznam literatury a informačních zdrojů

- [1] ČSN EN 60617-1 až 13: Grafické značky pro schémata – část 1 až 13. Praha: Český normalizační institut, 2000.
- [2] ČSN EN 61643-331: Součástky nízkonapětových zařízení pro ochranu před přepětím - část 331: Specifikace varistoru z oxidů kovů. 1. Praha: Český normalizační institut, 2005.
- [3] ČSN EN 61643-321: Součástky nízkonapětových zařízení pro ochranu před přepětím - část 321: Specifikace pro lavinové průrazné diody (ABD). 1. Praha: Český normalizační institut, 2005.
- [4] SIOV metal oxide varistors: General technical information. TDK [online]. 2011 [cit. 2017-05-10]. Dostupné z: <https://de.tdk.eu/download/185716/f161044d6457589b36ad1cacfc0815e1/siov-general.pdf>
- [5] Varistor introduction: Technical note. VISHAY [online]. 2013 [cit. 2017-05-10]. Dostupné z: <https://www.vishay.com/docs/29079/varintro.pdf>
- [6] TRANSIENT PROTECTION SOLUTIONS: Transil™ diode versus Varistor: Application note AN1826. ST [online]. 2004 [cit. 2017-05-12]. Dostupné z: http://www.st.com/content/ccc/resource/technical/document/application_note/48/7d/82/2d/23/58/43/92/CD00005042.pdf/files/CD00005042.pdf/jcr:content/translations/en.CD00005042.pdf
- [7] Littelfuse Varistors - Basic Properties, Terminology and Theory: Application note AN9767.1. Littelfuse [online]. 1999 [cit. 2017-05-14]. Dostupné z: http://www.littelfuse.com/~media/electronics/product_catalogs/littelfuse_tvs_diode_catalog.pdf.pdf
- [8] Transient Voltage Suppressors: Operation and Features: Application Note 1977. Intersil [online]. 2016 [cit. 2017-05-18]. Dostupné z: <https://www.intersil.com/content/dam/Intersil/documents/an19/an1977.pdf>
- [9] Transil™ clamping protection mode: Application note AN316. ST [online]. 2014 [cit. 2017-05-20]. Dostupné z: http://www.st.com/content/ccc/resource/technical/document/application_note/30/f6/d4/72/7d/74/45/bc/CD00003857.pdf/files/CD00003857.pdf/jcr:content/translations/en.CD00003857.pdf
- [10] SVAČINA, Jiří. ELEKTROMAGNETICKÁ KOMPATIBILITA [online]. Brno: Vysoké učení technické v Brně, 2002 [cit. 2017-05-15]. Dostupné z: http://home.pilsfree.net/fantom/FEL/EMC/EMC_skripta.pdf
- [11] IEC 61000-4-x Tests for TI's Protection Devices: Application report SLVA711. TI [online]. 2015 [cit. 2017-05-24]. Dostupné z: <http://www.ti.com/lit/an/slva711/slva711.pdf>
- [12] SIOV metal oxide varistors: Calculation examples. Elimex [online]. 2011 [cit. 2017-05-26]. Dostupné z: <http://www.elimex.bg/userfiles/editor/file/techspecificationspdf/4/46377.pdf>
- [13] SIOV metal oxide varistors: Selection procedure. TDK [online]. 2011 [cit. 2017-05-26]. Dostupné z: <https://en.tdk.eu/download/531266/705a180727925b6c726f5f6b76d6c1fb/siov-selection.pdf>
- [14] Sledovanie zmien elektrických parametrov ZnO varistorov pre siete nízkeho napätia počas urýchleného starnutia. Fakulta elektrotechniky a informatiky [online]. Košice: Technická univerzita v Košiciach, 2010 [cit. 2017-05-30]. Dostupné z: <http://jeen.feit.tuke.sk/index.php/JSES/article/view/149/138>

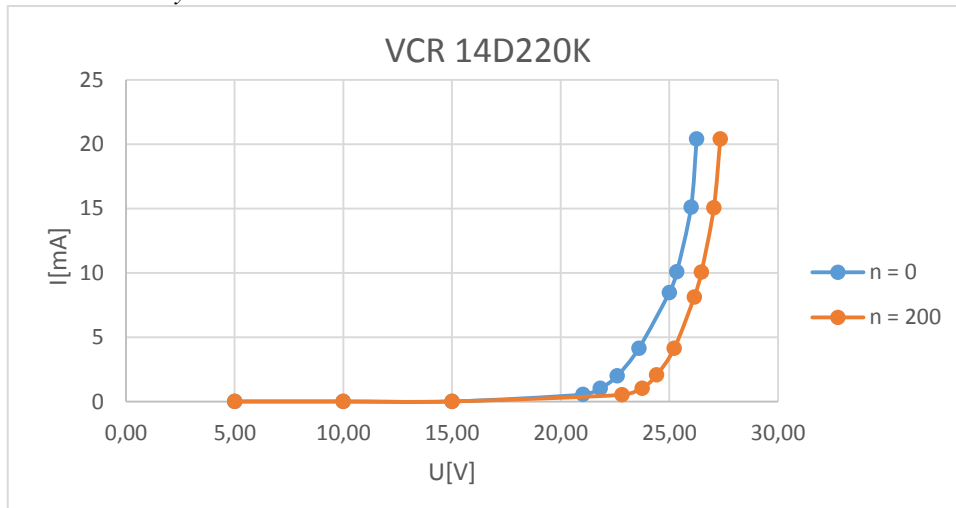
Přílohy

V-A charakteristiky varistorů

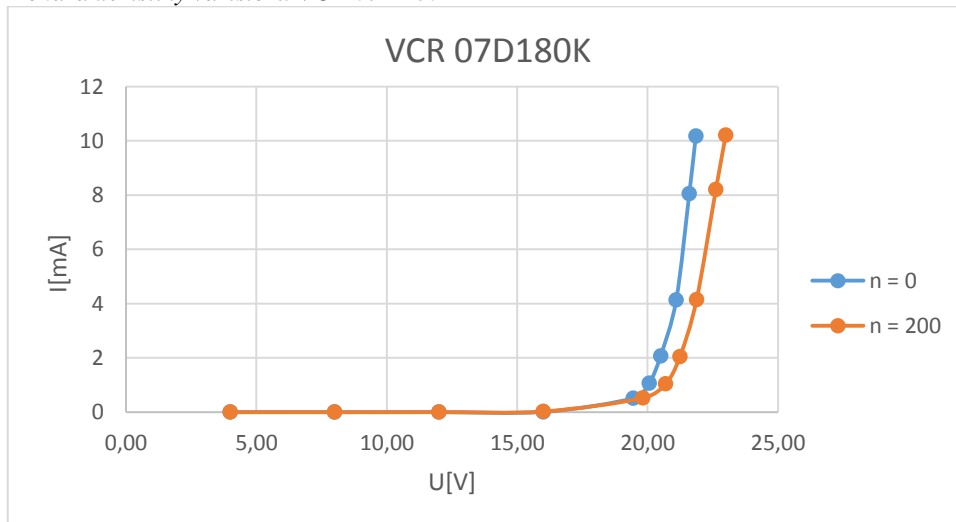
Graf 5 V-A charakteristiky varistoru VCR 14D390K



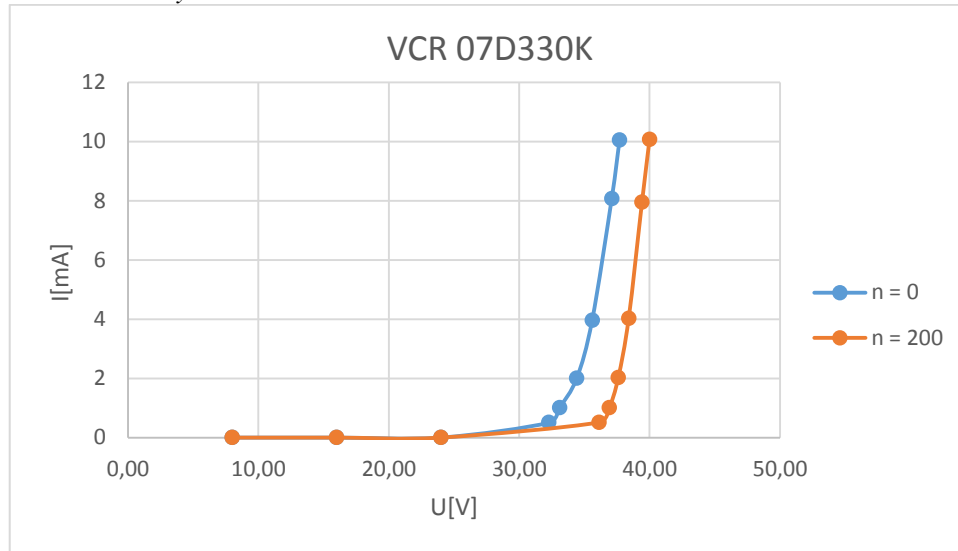
Graf 6 V-A charakteristiky varistoru VCR 14D220K



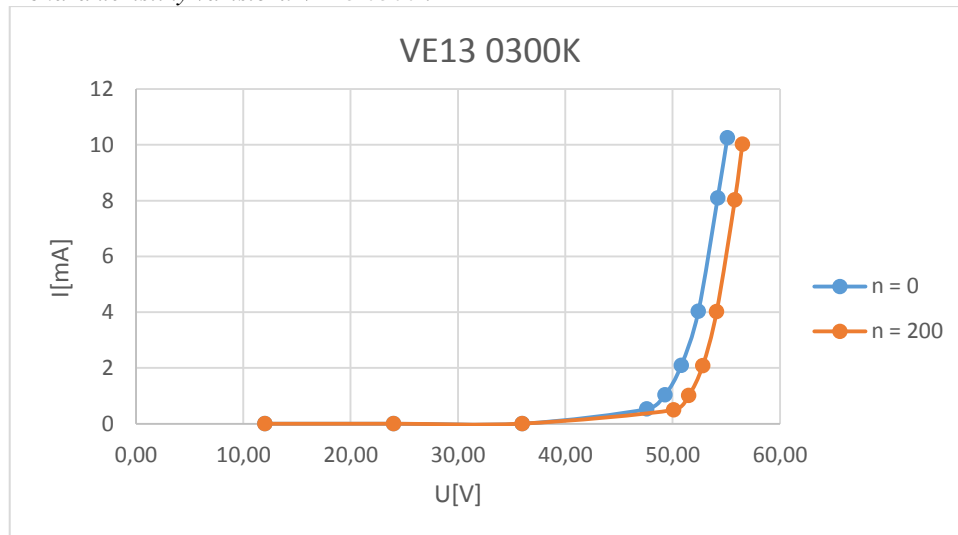
Graf 7 V-A charakteristiky varistoru VCR 07D180K



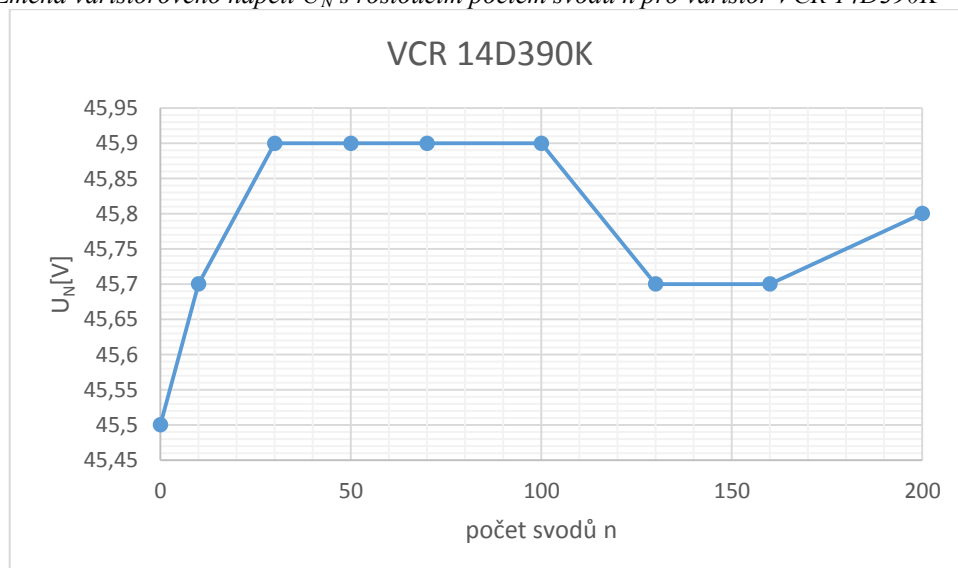
Graf 8 V-A charakteristiky varistoru VCR 07D330K

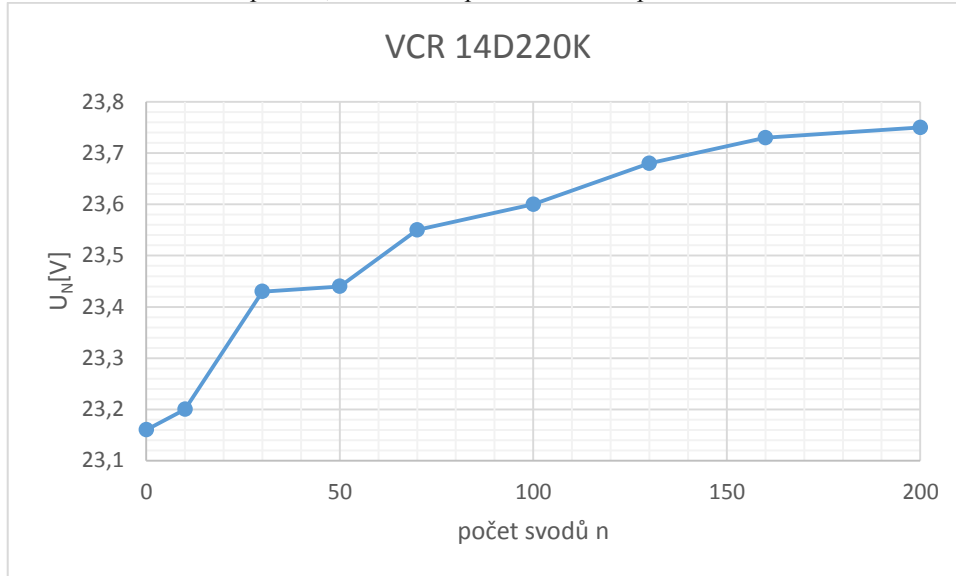
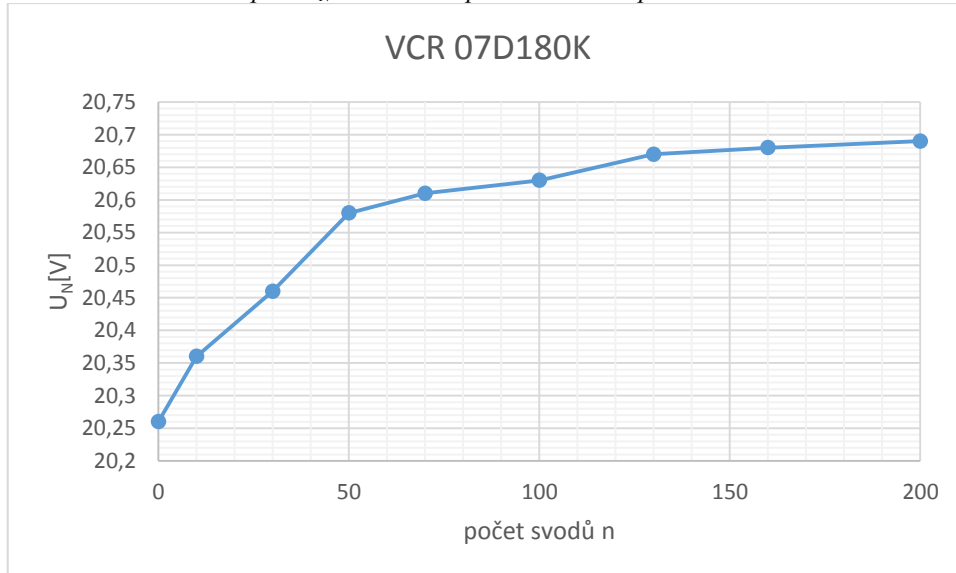
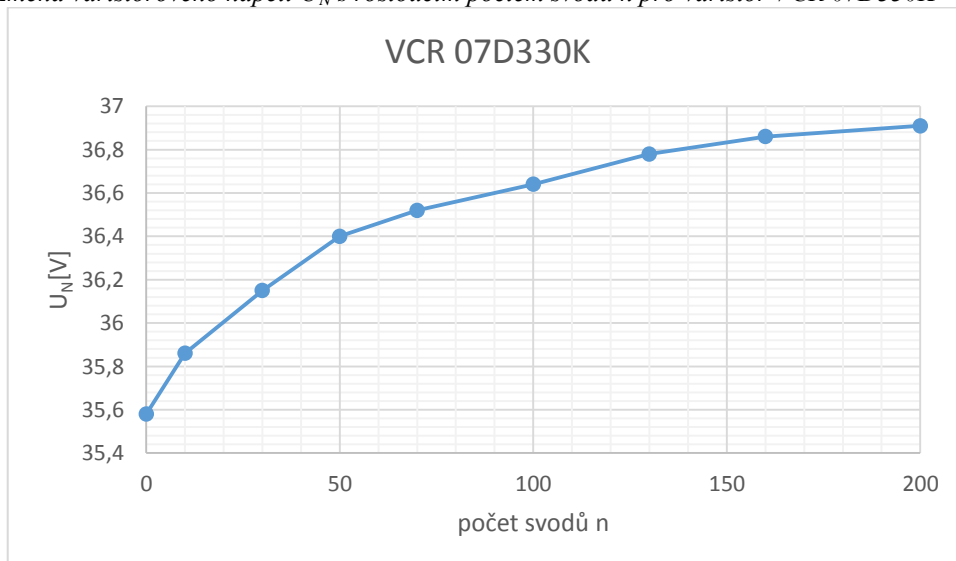


Graf 9 V-A charakteristiky varistoru VE13 0300K

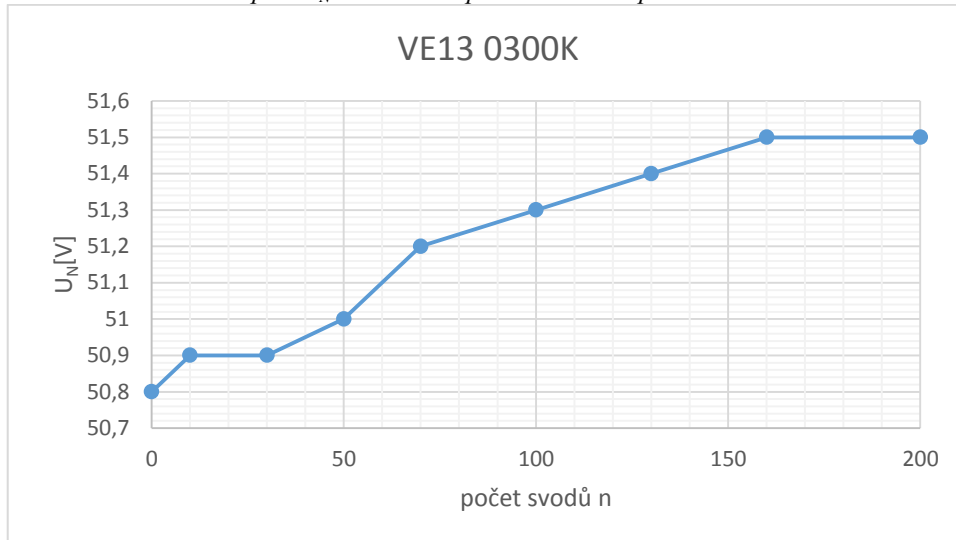


Grafy znázorňující změnu varistorového napětí U_N

Graf 10 Změna varistorového napětí U_N s rostoucím počtem svodů n pro varistor VCR 14D390K

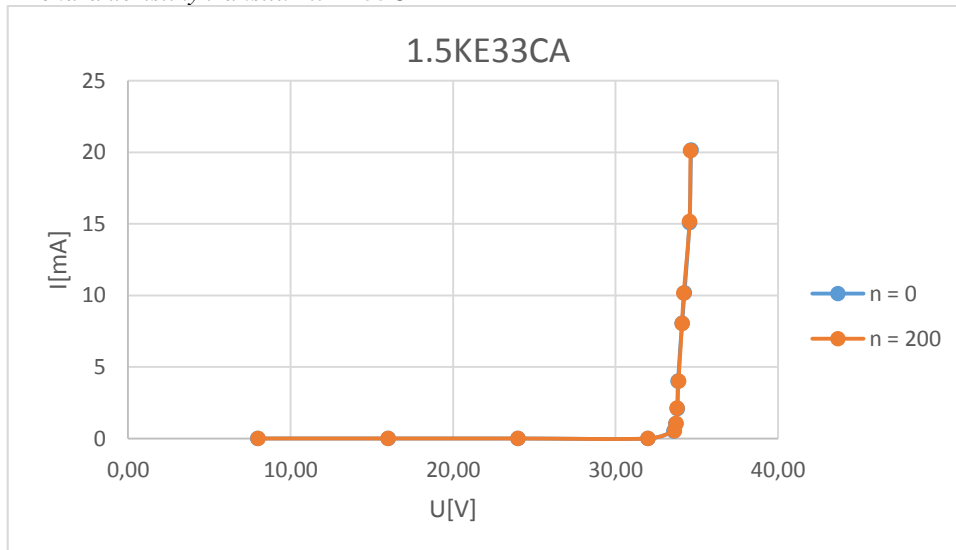
Graf 11 Změna varistorového napětí U_N s rostoucím počtem svodů n pro varistor VCR 14D220KGraf 12 Změna varistorového napětí U_N s rostoucím počtem svodů n pro varistor VCR 07D180KGraf 13 Změna varistorového napětí U_N s rostoucím počtem svodů n pro varistor VCR 07D330K

Graf 14 Změna varistorového napětí U_N s rostoucím počtem svodů n pro varistor VE13 0300K

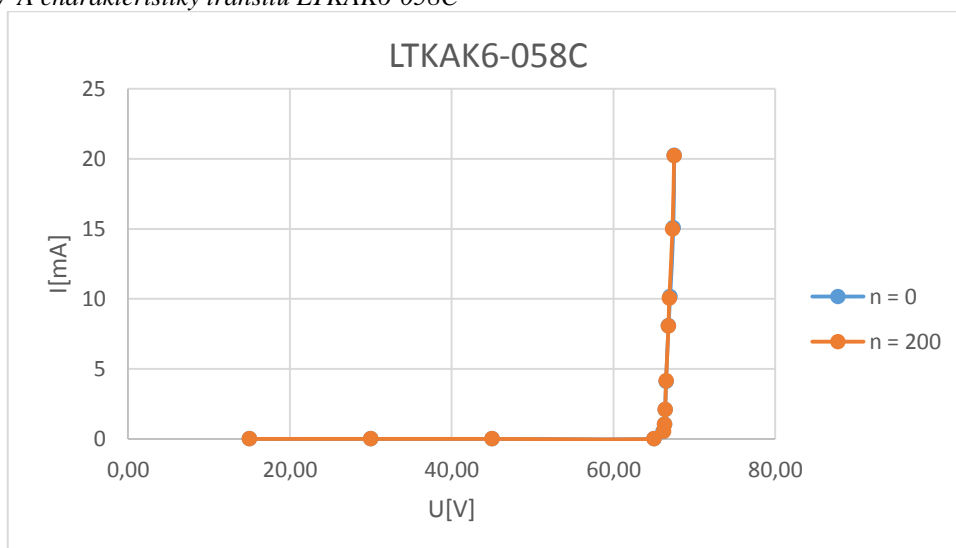


V-A charakteristiky pro transily

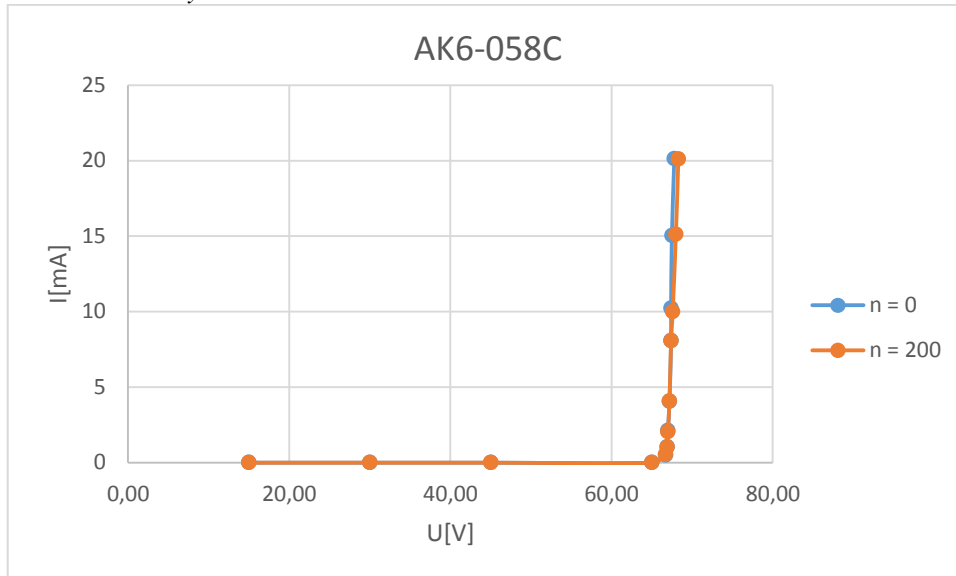
Graf 15 V-A charakteristiky transilu 1.5KE33CA



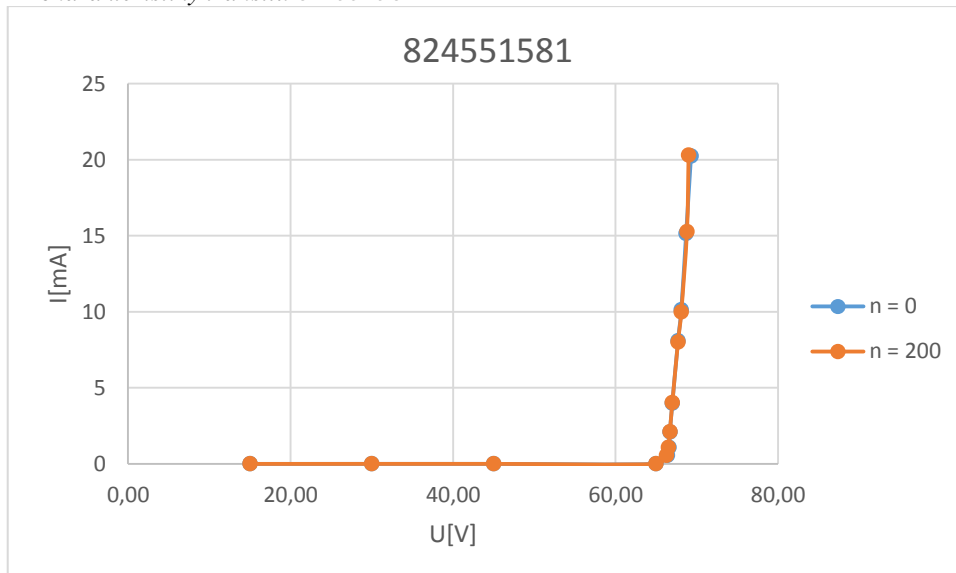
Graf 16 V-A charakteristiky transilu LTKAK6-058C



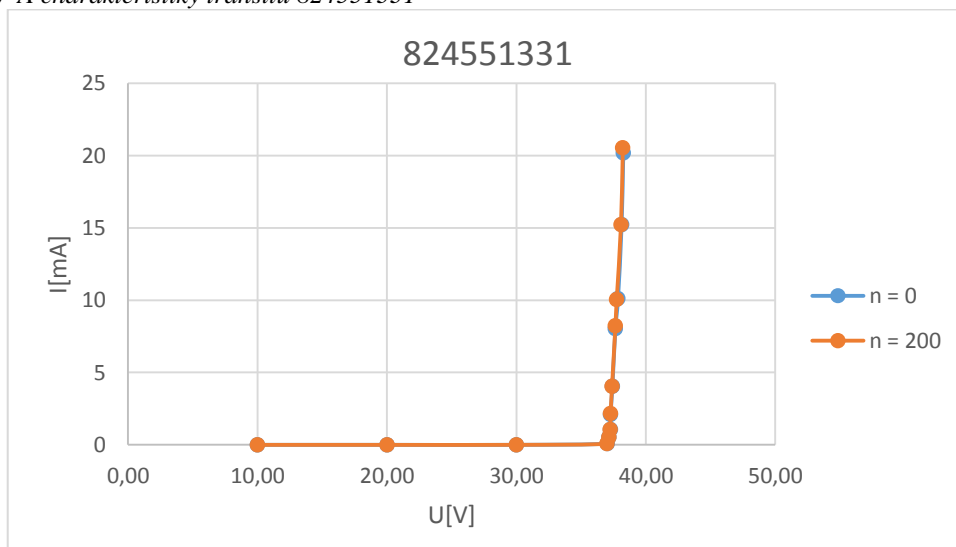
Graf 17 V-A charakteristiky tranzistoru AK6-058C



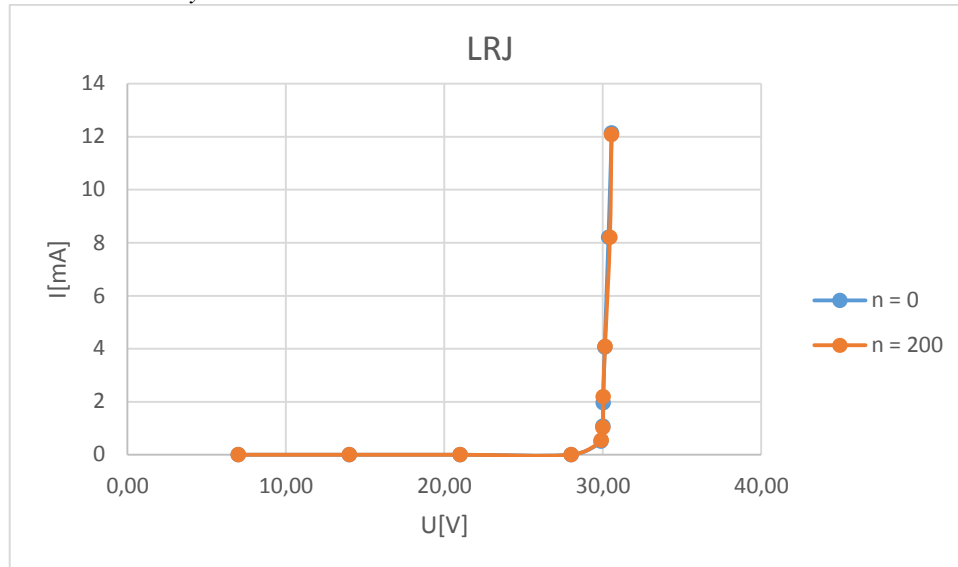
Graf 18 V-A charakteristiky tranzistoru 824551581



Graf 19 V-A charakteristiky tranzistoru 824551331



Graf 20 V-A charakteristiky transilu LRJ



Výpis příkazu pro výpočet absorbované energie v programu Matlab

```
%Matlab skript pro výpočet absorbované energie

close all;           %zavřít vše
clear all;          %smazat vše
clc;                %vyčistit Command Window
format long
filename = 'TEK2.csv'
u=csvread(filename) %načíst soubor do matice u
u(:,1)=[]           %smazat sloupec čas, zůstane vektor napětí
t=csvread(filename) %načíst soubor do t
t(:,2)=[]           %smazat sloupec napětí, zůstane vektor čas
filename='TEK1.csv'
i=csvread(filename) %načíst soubor do i
i(:,1)=[]           %smazat sloupec čas, zůstane vektor proud
p=u.*i              %výpočet okamžitého výkonu
w=trapz(t,p)        %výpočet energie - integrace p v čase t

%END
```