



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

## FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

## ÚSTAV ELEKTROENERGETIKY

DEPARTMENT OF ELECTRICAL POWER ENGINEERING

## SVODIČE PŘEPĚTÍ, JEJICH KONSTRUKCE A POUŽITÍ V ELEKTRIZAČNÍ SOUSTAVĚ

SURGE ARRESTERS, THEIR CONSTRUCTION AND USE IN POWER SYSTEM

### BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

### AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Marek Novický

### VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Jaroslava Orságová, Ph.D.

BRNO 2020

# Bakalářská práce

bakalářský studijní program **Silnoproudá elektrotechnika a elektroenergetika**

Ústav elektroenergetiky

**Student:** Marek Novický

**ID:** 203307

**Ročník:** 3

**Akademický rok:** 2019/20

## NÁZEV TÉMATU:

**Svodiče přepětí, jejich konstrukce a použití v elektrizační soustavě**

## POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

1. Prostředky k ochraně před přepětím používané na jednotlivých napěťových úrovních distribuční sítě
2. Zjišťování parametrů svodičů laboratorními zkouškami
3. Realizace měření na vybraných vzorcích svodičů v laboratoři vn
4. Vyhodnocení měření a možnosti využití naměřených dat při návrhu a dimenzování přepětových ochran

## DOPORUČENÁ LITERATURA:

podle pokynů vedoucího práce

**Termín zadání:** 3.2.2020

**Termín odevzdání:** 10.6.2020

**Vedoucí práce:** doc. Ing. Jaroslava Orságová, Ph.D.

**doc. Ing. Petr Toman, Ph.D.**  
předseda rady studijního programu

## UPOZORNĚNÍ:

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

Bibliografická citace práce:

NOVICKÝ, Marek. *Svodiče přepětí, jejich konstrukce a použití v elektrizační soustavě* [online]. Brno, 2020 [cit. 2020-06-03]. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/127262>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav elektroenergetiky. Vedoucí práce Jaroslava Orságová.

## VYHLÁSENIE

„Vyhlasujem, že svoju bakalársku prácu na tému „svodiče přepětí, jejich konstrukce a použití v elektrizační soustavě“ som vypracoval samostatne pod vedením vedúceho bakalárskej práce, s využitím odbornej literatúry a ďalších informačných zdrojov, ktoré sú všetky citované v práci a uvedené v zozname literatúry na konci práce.

Ako autor uvedenej bakalárskej práce ďalej vyhlasujem, že v súvislosti s vytvorením tejto bakalárskej práce som neporušil autorské práva tretích osôb, najmä som nezasiahol nedovoleným spôsobom do cudzích autorských práv osobnostných a/alebo majetkových a som si plne vedomý následkov porušenia ustanovenia § 11 a nasledujúcich autorského zákona Českej republiky č. 121/2000 Sb., o práve autorskom, o právach súvisiacich s právom autorským a o zmene niektorých zákonov (autorský zákon), v znení neskorších predpisov, vrátane možných trestnoprávných dôsledkov vyplývajúcich z ustanovenia časti druhej, hlavy VI. diel 4 Trestného zákonníka Českej republiky č. 40/2009 Sb.“

V Brne dňa: 10.06.2020

.....

## **ABSTRAKT**

Bakalárska práca sa zaoberá prostriedkami slúžiacimi k ochrane zariadení pred účinkami prepätia. Na začiatku práci sú základné informácie týkajúce sa používaných prepätových ochrán v distribučnej sústave. Práca ďalej prevedie čitateľa praktickou stránkou v podobe aplikovaných meraní na zvodíči prepätia. Posledná kapitola sa venuje dimenzovaniu zvodíča prepätia v distribučnej sústave vysokého napätia.

**KLÚČOVÉ SLOVA:** zvodíč prepätia, prepätie, meranie, voltampérová charakteristika, impulz.

## **ABSTRACT**

The bachelor thesis deals with the means used to protect the equipment from the effects of overvoltage. The first of the thesis outlines basic information regarding the used overvoltage protections in the distribution system. The thesis also features the practical part outlining measurements carried out on the surge arrester. The last chapter deals with the dimensioning of the surge arrester in the high voltage distribution system.

**KEY WORDS:** surge arrester, overvoltage, measurement, voltage-current characteristic, impulse.

## **POĎAKOVANIE**

Ďakujem vedúcemu bakalárskej práce doc. Ing. Jaroslave Orságovej, Ph.D. za odbornú pomoc a cenné rady počas spracovávania mojej práce. Ďakujem aj Ing. Michalovi Krbalovi, Ph.D za odbornú pomoc a cenné rady pri uskutočnení praktickej časti bakalárskej práce.

## OBSAH

<b>ZOZNAM OBRÁZKOV.....</b>	<b>8</b>
<b>ZOZNAM TABULIEK A GRAFOV.....</b>	<b>9</b>
<b>ZOZNAM SYMBOLOV A SKRATIEK.....</b>	<b>10</b>
<b>1 ÚVOD.....</b>	<b>12</b>
<b>2 PROSTRIEDKY K OCHRANE PRED PREPÄTÍM POUŽÍVANÉ NA JEDNOTLIVÝCH NAPÄŤOVÝCH ÚROVNIACH DISTRIBUČNÝCH SIETÍ.....</b>	<b>13</b>
<b>2.1 NN SIEŤ.....</b>	<b>13</b>
<b>2.2 VN A 110 kV SIEŤ.....</b>	<b>13</b>
2.2.1 ZVODIČE PREPÄTIA V PORCELÁNOVOM PLÁŠTI.....	13
2.2.2 ZVODIČE V POLYMÉROVOM PLÁŠTI.....	14
<b>3 VOLTAMPÉROVÁ CHARAKTERISTIKA.....</b>	<b>15</b>
<b>3.1 OBLASŤ PRED OTVORENÍM (PÔSOBNÍM) ZVODIČA (PRE-BREAKDOWN REGION).....</b>	<b>15</b>
<b>3.2 OBLASŤ OTVORENIA (ČINNOSTI) ZVODIČA (BREAKDOWN REGION).....</b>	<b>16</b>
3.2.1 REFERENČNÁ OBLASŤ VACH.....	16
<b>3.3 OBLASŤ VYSOKÝCH PRÚDOV (HIGH CURRENT REGION).....</b>	<b>16</b>
<b>4 ZVYŠKOVÉ NAPÄTIE ZVODIČA PREPÄTIA.....</b>	<b>17</b>
4.1.1 ZISŤOVANIE ZVYŠKOVÉHO NAPÄTIA.....	17
<b>5 MERANIE NA ZVODIČI PREPÄTIA.....</b>	<b>19</b>
<b>5.1 APLIKOVANIE ATMOSFÉRICKEHO IMPULZU (LI) NA ZVODIČ PREPÄTIA.....</b>	<b>19</b>
5.1.1 GENERÁTOR IMPULZNÉHO NAPÄTIA.....	19
5.1.2 ATMOSFÉRICKY IMPULZ.....	20
5.1.3 MERANIE.....	20
5.1.4 NAMERANÉ HODNOTY.....	21
5.1.5 ZHODNOTENIE MERANIA.....	21
<b>5.2 MERANIE ZVYŠKOVÉHO NAPÄTIA.....</b>	<b>21</b>
5.2.1 PRÚDOVÝ IMPULZ.....	21
5.2.2 MERANIE.....	22
5.2.3 NAMERANÉ HODNOTY.....	24
5.2.4 GRAFICKÉ ZÁVISLOSTI.....	25
5.2.5 ZHODNOTENIE MERANIA.....	26
<b>5.3 MERANIE VACH A REFERENČNÉHO NAPÄTIA.....</b>	<b>26</b>
5.3.1 MERANIE.....	26
5.3.2 NAMERANÉ HODNOTY.....	27
5.3.3 GRAFICKÉ ZÁVISLOSTI A ZHODNOTENIE MERANIA.....	27
5.3.4 ZHODNOTENIE MERANIA.....	29
<b>6 MOŽNOSTI VYUŽITIA NAMERANÝCH DÁT.....</b>	<b>30</b>
<b>6.1 VZŤAH VACH ZVODIČA PREPÄTIA A DOČASNÉ PREPÄTIE (TOV).....</b>	<b>30</b>

6.1.1 VOĽBA PARAMETRA $U_c$ V SIETI VN.....	30
<b>7 ZÁVER.....</b>	<b>36</b>
<b>POUŽITÁ LITERATÚRA .....</b>	<b>37</b>

**ZOZNAM OBRÁZKOV**

<i>Obr. 2-1 Konštrukcia zvodiča prepätia v porcelánovom plášti (prevzaté z [27]) .....</i>	<i>14</i>
<i>Obr. 2-2 Konštrukcia zvodiča prepätia v polymérovom plášti (prevzaté z [23]) .....</i>	<i>14</i>
<i>Obr. 3-1 Príklad VACH zvodiča prepätia (prevzaté z [10]) .....</i>	<i>15</i>
<i>Obr. 4-1 Princíp ochranej úrovni zvodiča prepätia (prevzaté z [17]) .....</i>	<i>17</i>
<i>Obr. 5-1 Náhradná schéma generátora impulzného napätia (prevzaté z [25]) .....</i>	<i>19</i>
<i>Obr. 5-2 Impulzný generátor SSG-ZUS prevzaté z [11] .....</i>	<i>20</i>
<i>Obr. 5-3 Plný atmosféricky impulz (prevzaté z [21]) .....</i>	<i>20</i>
<i>Obr. 5-4 Exponenciálny prúdový impulz (prevzaté z [25]) .....</i>	<i>22</i>
<i>Obr. 5-5 Principiálna schéma skúšky zvyškových napätí zvodiča prepätia .....</i>	<i>23</i>
<i>Obr. 6-1 Závislosť dočasného prepätia na dobe jeho pôsobenia (prevzaté z [26]) .....</i>	<i>31</i>



**ZOZNAM TABULIEK A GRAFOV**

<i>Tab. 5-1 Namerané hodnoty pri aplikovaní atmosférického impulzu .....</i>	<i>21</i>
<i>Tab. 5-2 Hodnoty zvyškových napätí udané výrobcom .....</i>	<i>23</i>
<i>Tab. 5-3 Zvolená konfigurácia razového generátora pre meranie zvyškových napätí zvodica .....</i>	<i>23</i>
<i>Tab. 5-4 Namerané hodnoty pri skúške zvyškových napätí.....</i>	<i>24</i>
<i>Tab. 5-5 Porovnanie nameraných a výrobcom udaných hodnôt zvyškových napätí.....</i>	<i>25</i>
<i>Tab. 5-6 Porovnanie hodnôt zvyškových napätí pri menovitom výbojovom prúde.....</i>	<i>25</i>
<i>Tab. 5-7 Namerané hodnoty VACH zvodica č.1 .....</i>	<i>27</i>
<i>Tab. 5-8 Namerané hodnoty VACH zvodica č.2 .....</i>	<i>27</i>
<i>Graf 5-1 VACH zvodica zo skúšky zvyškových napätí .....</i>	<i>25</i>
<i>Graf 5-2 VACH zvodica č.1.....</i>	<i>27</i>
<i>Graf 5-3 VACH zvodica č.2.....</i>	<i>28</i>
<i>Graf 5-4 Porovnanie VACH zvodičov č.1 a č.2 .....</i>	<i>28</i>
<i>Graf 6-1 VACH zvodica s oblasťou pred otvorením a s oblasťou vysokých prúdov.....</i>	<i>35</i>

**ZOZNAM SYMBOLOV A SKRATIEK**

<i>A</i>	Ampér
<i>C<sub>1</sub></i>	Činná kapacita
<i>C<sub>2</sub></i>	Zat'azovací kondenzátor
<i>C'<sub>s</sub></i>	Resulting Impulse capacitance – Činná kapacita
<i>DUT</i>	Device under test – Testované zariadenie (z vodič prepätia)
<i>ECI</i>	Exponenciálny impulz
<i>ES</i>	Elektrizačná sústava
<i>GIN</i>	Generátor impulzného napätia
<i>hPA</i>	Hektopascal
<i>I</i>	Elektrický prúd
<i>I<sub>pk</sub></i>	Špičková hodnota výbojového prúdu
<i>I<sub>pkmax</sub>, I<sub>pkmin</sub></i>	Špičková hodnota striedavého prúdu
<i>I<sub>n</sub></i>	Menovitý výbojový prúd z vodiča prepätia
<i>KJ</i>	Iskrište
<i>L<sub>dut</sub></i>	Parazitná indukčnosť testovaného zariadenia (z vodiča prepätia)
<i>LI</i>	Lightning impulse – Atmosférický impulz
<i>L<sub>tot</sub></i>	Celková sériová indukčnosť
<i>L<sub>loop</sub></i>	Inductance of the test circuit – Indukčnosť skúšobného obvodu
<i>mA</i>	Miliampér
<i>MO</i>	Oxid kovu
<i>ms</i>	Milisekunda
<i>NN</i>	Nízke napätie
<i>O</i>	Počiatok
<i>O<sub>1</sub></i>	Zdanlivý počiatok
<i>PZS</i>	Prerušované zemné spojenie
<i>R<sub>dyn</sub></i>	Dynamický odpor
<i>R<sub>p</sub></i>	Tail (parallel) resistor – Paralelný rezistor
<i>R<sub>shunt</sub></i>	Current shunt for current measurement – Rezistor používaný na meranie prúdu
<i>R<sub>tot</sub></i>	Celkový sériový odpor
<i>R<sub>1</sub></i>	Čelný rezistor
<i>R<sub>2</sub></i>	Tylni rezistor
<i>SiC</i>	Karbid kremníka

---

<i>SG</i>	Spark gap – Iskrište
<i>TOV</i>	Temporary overvoltage – Dočasné prepätie
$\mu A$	Mikroampér
$U_c$	Maximálne trvalé prevádzkové napätie z vodiča prepätia
$U_c'$	Napájacie napätie
$U_m$	Maximálna hodnota prevádzkového napätia
$U_{pk}$	Špičková hodnota striedavého napätia
$U_p$	Napät'ová ochranná úroveň z vodiča prepätia
$U_r$	Menovité napätie z vodiča prepätia
$U_{res}$	Zvyškové (reziduálne) napätie z vodiča prepätia
<i>T1</i>	Doba čela
<i>T2</i>	Doba poltylu
<i>T'</i>	Doba počiatku
<i>V</i>	Volt
<i>VACH</i>	Voltampérová charakteristika
<i>VN</i>	Vysoké napätie
<i>ZnO</i>	Oxid zinočnatý
<i>ZS</i>	Zemné spojenie
$^{\circ}C$	Stupeň Celzia

# 1 ÚVOD

V elektrizačnej sústave (ES) dochádza k prechodu z jedného ustáleného stavu do nového prevádzkového stavu ES. Pri tejto zmene môže dôjsť k prechodnému javu, ktorý súvisí so zmenami energií akumulovaných v jeho rozličných častiach. V ES sa nachádza značné množstvo prvkov, medzi ktorými dochádza pri prechodnom deji k výmene akumulovanej energie. Z tohto hľadiska je ES značne zložitým systémom.

Jedným z druhov prechodného javu je prepätie. Prvky ES sú konštruované tak, aby zvládli určitú hladinu prepätia po určitú dobu. Zničenie prvkov ES prepätím predstavuje veľké ekonomické škody a ohrozenie života zamestnancov obsluhujúcich elektrické zariadenia. Tieto fakty nás privádzajú k tomu, aby sme sa vedeli chrániť pred účinkami prepätia. K tomuto účelu slúžia prepäťové ochrany.

K najstarším a najjednoduchším prepäťovým ochranám patria iskrišťa. Pozostávajú z dvoch elektród vzdialených od seba v definovanej vzdialenosti. Vývojom sa pridávali odporové prvky z karbidu kremíka v sérii s medzerou. Vznikali zvodiče prepätia z karbidu kremíka (*SiC*) s aktívnymi medzerami pre *SiC* zvodiče. Ich nevýhodou bola veľkosť a neschopnosť vybíjania energie. Prelom nastal v druhej polovici sedemdesiatych rokov, kedy sa vynasli zvodiče prepätia z oxidu kovu (MO). Rezistorové bloky MO majú nelineárnejšiu VACH a dokážu viesť menovité napätie pri prúde v miliampéroch. Tato technológia umožňovala navrhovať zvodiče na akékoľvek energetické požiadavky, čo nebolo možné u *SiC* zvodičov. V praxi sa stále nájdu v prevádzke *SiC* zvodiče.

S príchodom nových polymérových materiálov nastala zmena vyhotovenia plášťa zvodiča. V distribučnej sústave začali polymérové zvodiče postupne nahradzovať porcelánové. Dnes je ich možné použiť aj na hladinu ultra vysokého napätia. V minulosti to bolo nepredstaviteľné, pretože polymérové zvodiče sa dali umiestniť do sieťového napätia 145 kV.

V teoretickej časti práce sú uvedené informácie o používaných prepäťových ochranách v distribučnej sústave. Teória sa ďalej zaoberá základnými poznatkami o zvodiči prepätia a jeho dimenzovaním v distribučnej sústave vysokého napätia. Na záver sa konštatuje použitie konkrétneho zvodiča v sieti VN.

Praktická časť práce sa zaoberá základnými meraniami na zvodiči prepätia. Cieľom je zhodnotenie prevádzkového stavu zvodiča používaného na experimenty, ukážky a príslušné laboratórne úlohy v rámci vyučovania.

## **2 PROSTRIEDKY K OCHRANE PRED PREPÄTÍM POUŽÍVANÉ NA JEDNOTLIVÝCH NAPÄŤOVÝCH ÚROVNIACH DISTRIBUTIVNÝCH SIETÍ**

Zvodiče prepätia bez iskrišť patria k najpoužívanejším prepäťovým ochranám používaným v distribučných sieťach. Najväčšie zastúpenie majú zvodiče prepätia s polymérovým a porcelánovým plášťom [1].

### **2.1 NN sieť**

V sieťach NN sa ako ochrana proti prepätiu používajú beziskrišťové obmedzovače prepätia. Obsahujú bloky nelineárnych odporov z oxidu zinočnatého (ZnO). Bloky ZnO sa zatvárajú a otvárajú v závislosti od veľkosti napätia. Pri otvorení narastá prechádzajúci prúd exponenciálne oproti priloženému napätiu. Podľa kvality prevedenia blokov ZnO je závislý tvar krivky voltampérovej charakteristiky. Znamená to, že u rôznych druhov blokov je nelinearita blokov odlišná [3; 4].

Ochrana musí obsahovať odpojovač, ktorý je doplnený signalizáciou polohy, t.j. zopnutý alebo rozpojený. Dôvodom signalizácie je viditeľnosť stavu zariadenia pri údržbe [3].

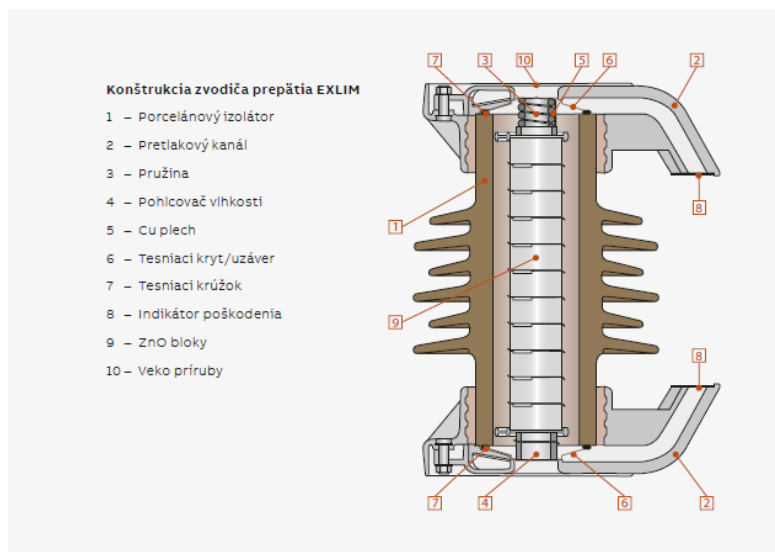
### **2.2 VN a 110 kV sieť**

V sieti VN a 110 kV majú najväčšie zastúpenie zvodiče s polymérovým plášťom. V energetickej sústave predstavuje plášť zvodiča prepätia najlepšiu chránenú izoláciu. Jednotlivé požiadavky na plášte zvodičov sú umiestnené v norme IEC 60099-4 [1]. Vyššia požiadavka na izolačnú pevnosť plášťa musí byť technicky odôvodnená, napr. umiestnením zvodiča vo vysokej inštaláčnej výške [6].

#### **2.2.1 Zvodiče prepätia v porcelánovom plášti**

Plášť chráni aktívnu časť zvodiča, ktorá sa skladá zo stĺpcov MO rezistorov. Paralelným prepojením stĺpcov sa zvyšuje schopnosť absorpcie energie. Dĺžka plášťa je maximálne 2 metre [1; 6].

Životnosť MO zvodičov ovplyvňuje prenikanie vlhkosti do zvodiča prepätia. Toto prenikanie vlhkosti spôsobuje u porcelánových zvodičov obmedzenie životnosti. V prípade zlyhania porcelánového zvodiča môže dôjsť k explózií a následnej expanzii úlomkov do prostredia. Zvodiče prepätia v porcelánovom plášti sa využívali do 80. rokov minulého storočia. Príklad porcelánového zvodiča je uvedený na Obr. 2-1 [1; 5; 22].



Obr. 2-1 Konštrukcia zvodica prepätia v porcelánovom plášti (prevzaté z [27])

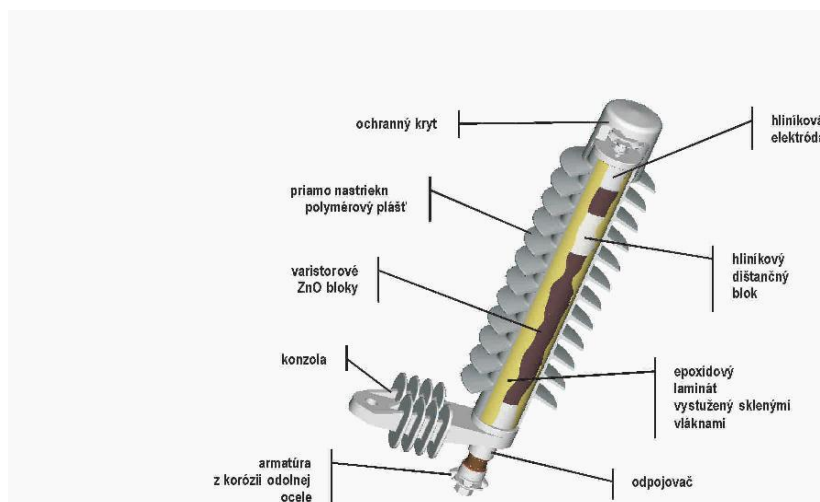
### 2.2.2 Zvodice v polymérovom plášti

Zvodice v polymérovom plášti sa na trh sa dostali v polovici 80. rokov minulého storočia a postupne nahrádzajú porcelánové zvodice. Plášť je vyrobený z týchto materiálov [1]:

- EPDM (etylén-polyen-dien-monomer)
- EVA (etylén-vinyl-acetát)
- SIR (silikónová guma)

Najpoužívanejším materiálom polymérového plášťa je SIR. SIR má vyššiu odolnosť voči podmienkam okolitého prostredia [1].

Výhodou polymérových zvodícov oproti porcelánovým je bezpečnosť pri zlyhaní zvodica, a to vďaka polyméru, ktorý bráni hromadeniu tlaku v plnom rozsahu. Ďalšou výhodou je nižšia hmotnosť a rýchlejší proces výroby. Nevýhodou je vyššia cena a nižšia mechanická pevnosť [1; 22]. Na Obr. 2-2 je zobrazená typická konštrukcia zvodica v polymérovom plášti.



Obr. 2-2 Konštrukcia zvodica prepätia v polymérovom plášti (prevzaté z [23])

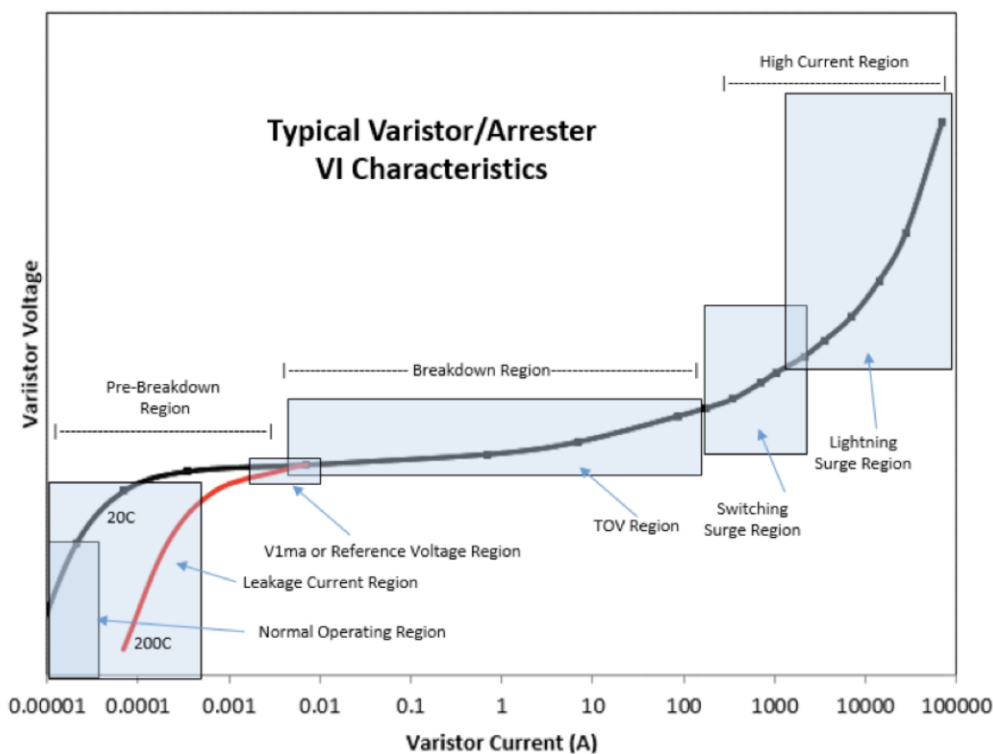
### 3 VOLTAMPÉROVÁ CHARAKTERISTIKA

Kapitola sa zaoberá teóriou VACH zvodíča prepätia. Tieto poznatky tvoria dôležitú úlohu pre realizáciu praktickej časti tejto bakalárskej práce. Pre predstavu čitateľa je na Obr. 3-1 zobrazený príklad VACH zvodíča prepätia.

VACH je charakteristickým parametrom každého zvodíča prepätia. Môžeme ju nájsť aj pod názvom krivka odporu zvodíča prepätia. Bežný užívateľ ju vidí v podobe hodnôt v tabuľkách, ktoré sú umiestnené v katalogovom liste konkrétneho zvodíča. VACH zvodíča je silno nelineárna, t.j. odpor zvodíča je závislý na priloženom napätí. So zvyšujúcim sa napätím odpor blokov zvodíča prepätia klesá [10; 13].

Vo vedeckej obci sa VACH rozdeľuje do troch častí [10; 13]:

- oblasť pred otvorením (pôsobením) zvodíča (Pre-breakdown region or Operating Range of arrester),
- oblasť otvorenia (činnosti) zvodíča (Breakdown region or TOV Region),
- oblasť vysokých prúdov (High current region or Switching and lightning Surge Region).



Obr. 3-1 Príklad VACH zvodíča prepätia (prevzaté z [10])

#### 3.1 Oblasť pred otvorením (pôsobením) zvodíča (Pre-breakdown region)

Väčšina prevádzkového života zvodíča prepätia sa odohráva práve v časti VACH, predovšetkým v oblasti normálnej prevádzky (Normal Operating Region). Teoreticky zvodíč môže fungovať v tejto oblasti neobmedzene a prechádzajú ním  $\mu\text{A}$  až  $\text{mA}$  prúdy. Ak nastane malá zmena teploty a telo zvodíča sa ohreje, rezistory prudko menia svoj odpor. Následne sa môžeme z oblasti pre-

breakdown region ocitnúť v oblasti, kedy z vodič zvädza prúd. Navyše oblasť pre-breakdown region je citlivý na prúdové impulzy, vďaka ktorým môže dôjsť k nekontrolovateľnému zlyhaniu ochrany [10; 13].

Zatiaľ čo pod kolenom krivky je charakteristický prúd kapacitného charakteru, nad kolenom krivky je to prúd odporového charakteru. Zapríčinené je to referenčnou oblasťou [10; 13].

Podľa Obr. 3-1 – v kolene krivky sa nachádza bod charakterizujúci maximálne prevádzkové napätie z vodiča prepätia, toto napätie dosahuje z vodič počas bežnej prevádzky [10; 13].

V rámci praktickej časti bakalárskej práce sa zmeralo pre-breakdown region.

### 3.2 Oblasť otvorenia (činnosti) z vodiča (Breakdown region)

V tejto oblasti VACH sa nachádza významný úsek, tzv. úsek referenčného napätia. Nachádza sa tesne za kolenom krivky VACH. Referenčné napätie sa tiež označuje ako prahové napätie. Pri dosiahnutí tohto bodu sa odpor z vodiča znižuje a vodivosť stúpa. Následne môže teplota prekročiť dovolenú teplotu zariadenia a tým spôsobiť jeho zlyhanie až zničenie. Preto sa z vodič nemôže dlho zdržiavať v tejto oblasti [10; 11; 13].

V oblasti breakdown region sa vyznačuje nelinearita VACH, resp. nelinearita odporov je najvyššia. Oblasť odzrkadľuje, či je z vodič prepätia schopný vydržať dočasné prepätie pre konkrétne umiestenie v elektrizačnej sústave. Túto oblasť pokrývajú dočasné prepätia [10; 13].

Referenčnej oblasti sa bližšie venuje kapitola 3.2.1. Referenčná oblasť VACH

#### 3.2.1 Referenčná oblasť VACH

Ako sa spomína v kapitole 3.2, referenčná oblasť sa nachádza v Breakdown region. Charakterizuje ju parameter referenčné napätie, ktorému odpovedá referenčný prúd [12].

Referenčný prúd je definovaný ako „vrcholová hodnota striedavého napätí dělená  $\sqrt{2}$ , která je na omezovači, protéká-li jím referenční proud“ [1,s.23]. Referenčný prúd z vodiča môžeme nájsť v katalógovom liste z vodiča a je daný výrobcom [14].

Referenčné napätie je definované ako „vrcholová hodnota (vyšší vrcholová hodnota ze dvou polarit, jestliže je proud nesymetrický) činné složky striedavého proudu, která se používá k určení referenčního napětí omezovače přepětí“ [1,s.23].

Tieto parametre sa nachádzajú nad kolenom krivky VACH. V bode na krivke kde sa pretína referenčný prúd a referenčné napätie začína z vodič zvädzať prúd. Od tohto bodu môžeme predpokladať vývoj VACH až po High current region. Je to zapríčinené tým, že pri veľkej zmene prúdu sa napätie mení v malých rozmedziach [14; 15; 16].

Napätie referenčné a prevádzkové spolu úzko súvisia. Ich vzájomný pomer je ukazovateľom odolnosti z vodiča voči dočasnému prepätiu. Čím je pomer vyšší, tým je z vodič schopnejší zvládať dočasné prepätie [12; 14; 16].

### 3.3 Oblasť vysokých prúdov (High current region)

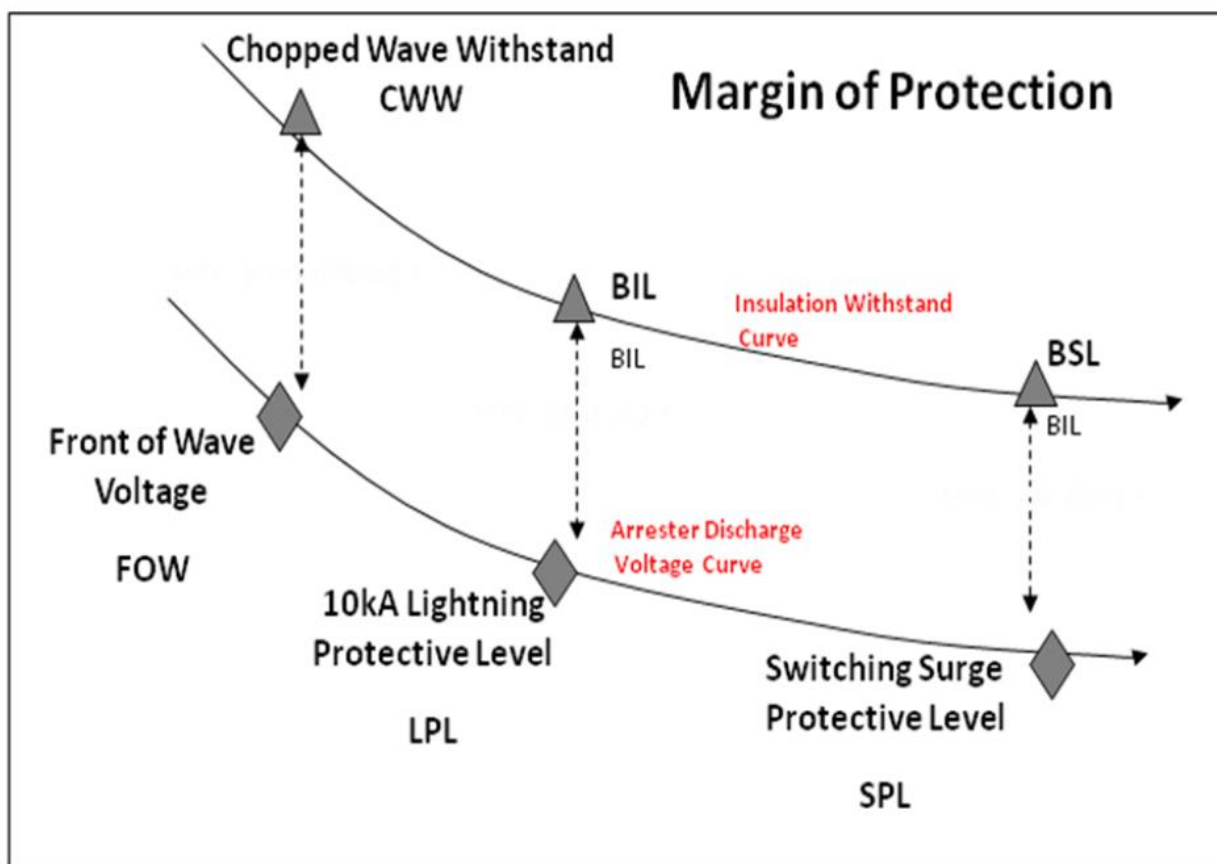
Oblasť High current region pokrývajú spínacie a atmosférické prepätia. Z vodičom prechádzajú veľmi vysoké prúdy, na ktorých je nepriamo závislá dĺžka prepätia. Čas prepätia je v  $\mu\text{s}$  až  $\text{ms}$ . V oblasti atmosférického prepätia môžeme nájsť jeden zo základných parametrov z vodiča prepätia – zvyškové napätie  $U_{res}$  [10; 13].



## 4 ZVYŠKOVÉ NAPÄTIE ZVODIČA PREPÄTIA

Kapitola obsahuje základné informácie týkajúce sa zvyškového napätia zvodiča prepätia. Ďalšou úlohou praktickej časti bakalárskej práce je zrealizovanie skúšky zvyškových napätí zvodiča prepätia.

Zvyškové (reziduálne) napätie je definované ako „vrcholová hodnota napätí, ktorá sa objaví medzi svorkami omezovače prepätí, když jím prochází výbojový proud“ [1,s.24]. Patrí k základným parametrom zvodiča prepätia a charakterizuje jeho ochrannú úroveň. Ochranná úroveň sa skladá z troch častí, z ktorých každú charakterizuje hodnota zvyškového napätia. Pre predstavu čitateľa je na Obr. 4-1 vyobrazený principiálny obrázok ochrannej úrovni zvodiča [17; 18].



Obr. 4-1 Princíp ochrannej úrovni zvodiča prepätia (prevzaté z [17])

Medzi hornou a dolnou krivkou sa nachádza tzv. rezerva ochrany. Pri výpočte rezervy ochrany sa práve využívajú spomínané zvyškové napätia jednotlivých ochranných úrovni [5].

### 4.1.1 Zisťovanie zvyškového napätia

Zvyškové napätie zvodiča prepätia sa získava laboratórnymi skúškami. Prvý test prebiehal pred viac ako polstoročím. Paradoxom je, že vtedajší aplikovaný impulz na zvodič prepätia je zároveň dnešným normalizovaným impulzom pre túto skúšku [17; 19].

Normalizovaným impulzom prúdu pre testovanie zvyškového napätia je prúdový exponenciálny impulz 8/20  $\mu$ s. Samozrejme, tento impulz nezachycuje všetky vlnové tvary blesku. Preto sú zavedené ďalšie tvary vln pre testovanie zvodičov [17; 18].

Údaj o zvyškovom napätí sa nachádza v katalógovom liste zvodiča prepätia. Skladá sa zo zvyškového napätia pre zvolený impulz a pre konkrétny výbojový prúd [19].

## 5 MERANIE NA ZVODIČI PREPÄTIA

Pre meranie na zvodiči prepätia bol použitý firmy Siemens 3EK7 315 -2CH4. Parametre zvodiča sú [26]:

- $I_n = 10 \text{ kA}$
- $U_c = 25,2 \text{ kV}$
- $U_r = 31,5 \text{ kV}$

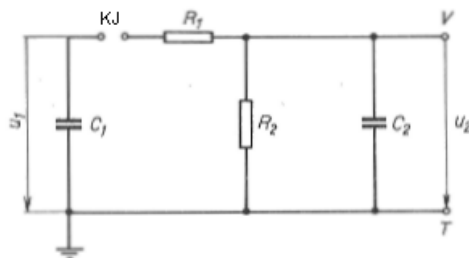
Všetky merania prebehli vo VN laboratóriu našej školy. Aplikovali sa atmosférické impulzy na zvodič prepätia, prebehla skúška zvyškových napätí a ako posledná sa merala časť VACH a referenčné napätie.

### 5.1 Aplikovanie atmosférického impulzu (LI) na zvodič prepätia

Prvou úlohou praktickej časti tejto bakalárskej práce je sledovanie reakcií zvodiča prepätia na aplikované atmosférické impulzy vygenerované razovým generátorom.

#### 5.1.1 Generátor impulzného napätia

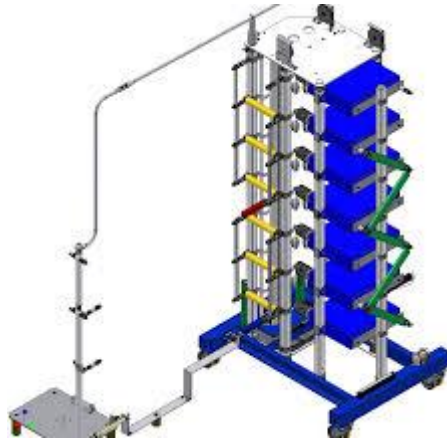
V laboratóriu VN sa nachádza generátor impulzného napätia (GIN) – SSG-ZUS. Jeho náhradná schéma je zobrazená na Obr. 5-1.



Obr. 5-1 Náhradná schéma generátora impulzného napätia (prevzaté z [25])

#### Princíp generátora impulzného napätia

GIN je napájaný jednosmerným zdrojom, ktorý nabije kondenzátor  $C_1$  na požadovanú úroveň. Po dosiahnutí nabitia  $C_1$  sa zaktivuje iskrište, cez ktoré putuje energia z  $C_1$ . Energia pokračuje ďalej do rezistorov  $R_1$  a  $R_2$  a zároveň do kondenzátora  $C_2$ . Kapacita zaťažovacieho kondenzátora a testovaného objektu je nabíjaná cez čelný rezistor  $R_1$  pomocou činnej kapacity. Od čelného rezistora a zaťažovacieho kondenzátora závisí tvar čela impulzu. U tvaru tylu impulzu je to dané napätím na tylnom rezistore. Čas trvania tylu impulzu je závislý na vybití kapacity zaťažovacieho kondenzátora a testovaného objektu, ktoré sa uskutočňuje cez obe rezistory. Kapacita testovaného objektu má byť najviac 10 % hodnoty činnej kapacity [25].



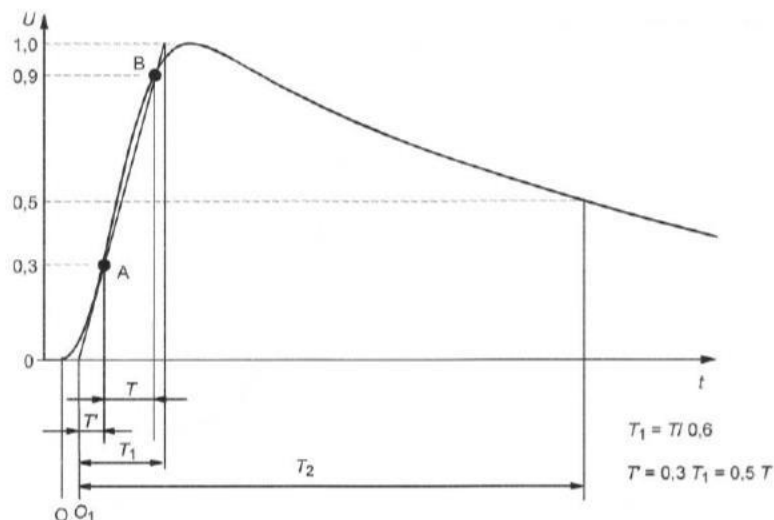
Obr. 5-2 Impulzný generátor SSG-ZUS prevzaté z [11]

### 5.1.2 Atmosféricky impulz

Atmosférické impulzy sú spájané s testovaním odolnosti izolácie krytu zvodíča prepätia. Patria sem napr. plný atmosférický impulz (viz. Obr. 5-3) a atmosférické impulzy useknuté vo vrchole a tyle [25; 20].

Použitým impulzom pre meranie na zvodíči prepätia bol normalizovaný atmosférický impulz, taktiež označovaný ako impulz 1,2/50. Doba čela je 1,2  $\mu$ s a doba poltyla 50  $\mu$ s [25; 21]. Tolerancie medzi normalizovaným a reálne zmeraným impulzom sú podľa [25] nasledovne:

- vrcholová hodnota:  $\pm 3 \%$ ,
- doba čela:  $\pm 30 \%$ ,
- doba poltyla:  $\pm 20 \%$ .



Obr. 5-3 Plný atmosférický impulz (prevzaté z [21])

### 5.1.3 Meranie

Po manuálnom nastavení konfigurácie rázového generátora sa skúšobný obvod skontroluje. Po skontrolovaní skúšobného obvodu sa odstráni uzemňovacia tyč a miestnosť sa uzavrie. V riadiacom programe sa nastaví potrebné parametre, napr. amplitúda napätia a prúdu a trigrovanie od napäťového impulzu. Spustí sa meranie.

Meranie začína nabíjacím napätím 40 kV a končí hodnotou 75 kV. Zvolený krok je 5 kV. V programe sa zaznamenávajú priebehy atmosférických impulzov a prúdov. Prúd a napätia sa merajú na dvoch samostatných kanáloch. Po dosiahnutí poslednej hodnoty sa meranie ukončí.

### 5.1.4 Namerané hodnoty

V Tab. 5-1 Namerané hodnoty pri aplikovaní atmosférického impulzu Tab. 5-1 sú uložené zaznamenané hodnoty z merania.

Tab. 5-1 Namerané hodnoty pri aplikovaní atmosférického impulzu

Označenie	$U_{pk}$ [kV]	$T1$ [ $\mu$ s]	$T2$ [ $\mu$ s]	Označenie	$I_{pkmax}$ [mA]	$I_{pkmin}$ [mA]
9743	40,731	1,081	49,341	9744	53,5	40,125
9745	44,996	1,081	49,378	9746	46,813	43,469
9747	49,770	1,066	49,71	9748	53,5	43,469
9749	53,36	1,021	51,2	9750	50,157	43,469
Označenie	$U_{pk}$ [kV]	$T1$ [ns]	$T2$ [ $\mu$ s]	Označenie	$I_{pkmax}$ [mA]	$I_{pkmin}$ [mA]
9751	55,624	918,357	54,491	9752	46,813	43,469
9753	46,679	861,665	56,441	9754	46,813	40,125
9755	57,634	805,711	58,953	9756	56,844	50,157
9757	58,478	749,94	61,165	9758	46,813	43,469

Podmienky prostredia:

- Tlak vzduchu: 980 hPA
- Vlhkosť vzduchu: 68,5 %
- Teplota okolia: 22,9 °C

### 5.1.5 Zhodnotenie merania

Meraním sa sledovala reakcia zvodiča prepätia a zároveň odolnosť izolácii na LI impulzy. Vplyvom aplikovaných impulzov sa teplota zvodiča zvýšila a na dotyk bola rapídne vysoká. Medzi jednotlivými impulzmi sa nečakalo pokiaľ sa zvodič ochladil na teplotu okolia. Napriek tomu zvodič prepätia absolvoval meranie bez mechanického poškodenia a odolnosť izolácii bola preukázaná.

Získané priebehy sú uložené v prílohe.

## 5.2 Meranie zvyškového napätia

Druhou úlohou praktickej časti bakalárskej práce je uskutočnenie skúšky zvyškových napätí.

### 5.2.1 Prúdový impulz

Pre meranie zvyškových napätí sa používa exponenciálny prúdový impulz (ECI) zobrazený na Obr. 5-4. Označuje sa pomerom  $T1/T2$ , napr. 30/80  $\mu$ s.  $T1$  sa nazýva doba čela a  $T2$  doba poltyla

[25].  $T_1$  je pre prúdový impulz definovaný nasledovne: „Doba čela  $T_1$  prúdového impulsu je skutočný parameter definovaný jako 1,25 násobek intervalu  $T$  mezi okamžiky, kdy hodnoty proudu jsou 10 % a 90 % vrcholové hodnoty“ [25,s.22 ].

$T_2$  je pre prúdový impulz definovaný nasledovne: „Doba pôľtýlu  $T_2$  prúdového impulsu je skutočný parameter definovaný jako časový interval mezi skutečným počátkem  $O_1$  a okamžikem, kdy proud poklesne na polovinu vrcholové hodnoty“ [25,s.23].

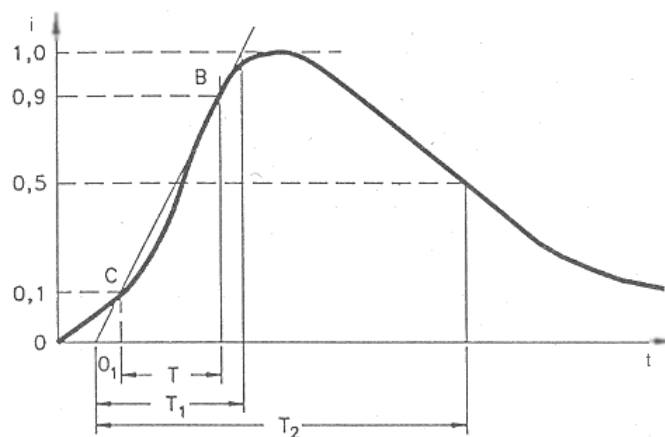
Doba čela a poltyla je u exponenciálneho prúdového impulsu rôzna. Patria sem tieto normalizované tvary impulzov [25]:

- impulz 1/20  $\mu\text{s}$ ,
- impulz 4/10  $\mu\text{s}$ ,
- impulz 8/20  $\mu\text{s}$ ,
- impulz 30/80  $\mu\text{s}$ .

Medzi týmito normalizovanými a reálne zmeranými prúdovými impulzmi existujú podľa [25] nasledujúce tolerancie:

- vrcholová hodnota:  $\pm 10\%$ ,
- doba čela:  $\pm 10\%$ ,
- doba poltyla:  $\pm 10\%$ .

Pri skúške zvyškových napätí zvodíča prepätia sa najčastejšie používa exponenciálny prúdový impulz 8/20  $\mu\text{s}$ . V katalógovom liste zvodíča sa okrem informácie o tvare prúdového impulsu dozvieme aj hodnotu výbojového prúdu, ktorý sprevádzal tento impulz. Výrobca udáva niekedy namiesto prúdového impulsu 8/20  $\mu\text{s}$  impulz 4/10  $\mu\text{s}$  [17].

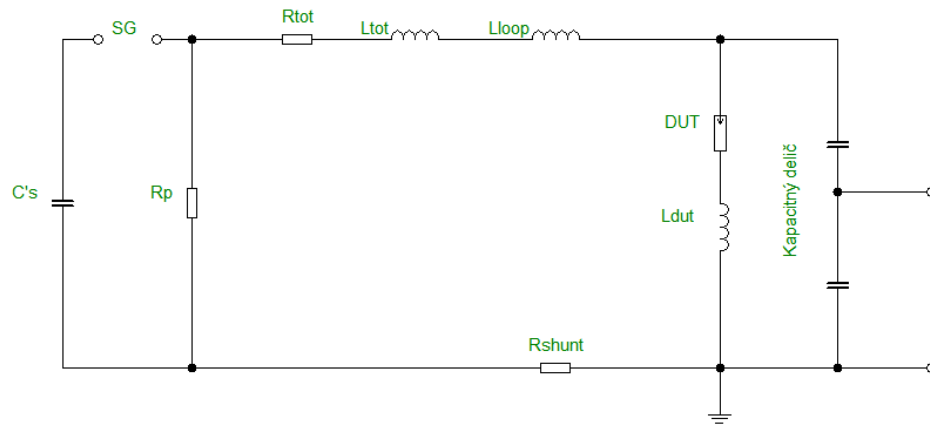


Obr. 5-4 Exponenciálny prúdový impulz (prevzaté z [25])

Pri mojej skúške zvyškových napätí sa aplikoval normalizovaný exponenciálny prúdový impulz 8/20  $\mu\text{s}$ .

## 5.2.2 Meranie

### Principiálna schéma



Obr. 5-5 Principiálna schéma skúšky zvyškových napätí zvodíča prepätia

### Hodnoty získané z katalógového listu zvodíča prepätia

V nasledujúcej tabuľke sú údaje o zvyškovom napätí zvodíča prepätia udané výrobcom.

Tab. 5-2 Hodnoty zvyškových napätí udané výrobcom

	ECI 8/20 $\mu$ s [kA]			
$I$ [kA]	1	3	5	10
$U_{res}$ [kV]	67,9	73,7	77,9	83,8

### Postup

Meranie prebieha v dvoch miestnostiach – v prvej sa nachádza laboratórium so skúšobným obvodom pozostávajúcim z razového generátora, zvodíča prepätia, stojana slúžiaceho pre umiestnenie a uzemnenie testovaného objektu, uzemňovacích pásov a prístrojov pre meranie parametrov. V druhej miestnosti sa nachádza terminál slúžiaci pre riadenie laboratória. Skúška prebieha za sucha a zvodíč prepätia je vyčistený od prípadných nečistôt na povrchu plášťa.

V katalógovom liste zvodíča prepätia sa vyhľadajú údaje o zvyškovom napätí ECI impulzu pri výbojovom prúde. Následne sa zvolí vhodná konfigurácia rázového generátora. V mojom prípade:

Tab. 5-3 Zvolená konfigurácia rázového generátora pre meranie zvyškových napätí zvodíča

Konfigurácia generátora	2sp2
Nabíjacie napätie stupňa	60 kV – 80 kV
Current measuring shunt	SH-Q-0.1

V laboratóriu sa podľa príslušnej konfigurácie upraví rázový generátor. Pri konfigurácii generátora 2s2p parameter  $s$  znamená – počet paralelne zapojených stupňov a parameter  $p$  – počet paralelne spojených skupín zapojených do série. Uzemní sa spodok zvodíča prepätia. Po skontrolovaní skúšobného obvodu sa odstráni uzemňovacia tyč a miestnosť sa uzavrie.

V riadiacom programe sa nastavujú potrebné parametre, ako napr. typ impulzu, limitujúce hodnoty meraných prúdov a napätí a vhodné trigrovanie. Prúd a napätie sa merajú na dvoch samostatných kanáloch, pričom napätie sa odčítava kapacitným deličom a prúd Shunt-om. Meranie začína na 50 kV. Po aplikovaní impulzu na zvodíč prepätia sa zaznamenávajú hodnoty do programu v počítači. Zároveň sa vykreslia a zaznamenávajú charakteristiky prúdu a napätia na čase v programe. Vhodnou hodnotou nabíjacieho napätia sa dosiahnu požadované hodnoty zvyškového napätia pri výbojovom prúde uvedenom v katalógovom liste. Meranie prebieha do hodnoty menovitého výbojového prúdu zvodíča. V mojom prípade 10 kA. Po dosiahnutí menovitej hodnoty sa meranie ukončí.

### 5.2.3 Namerané hodnoty

Namerané a vypočítané hodnoty sú uložené v Tab. 5-4. Z nameraných hodnôt prúdov a napätí sa vypočíta dynamický odpor zvodíča prepätia. Vzorec pre výpočet odporu je nasledovný:

$$R_{dyn} = \frac{U_{res}}{I_{pk}} (\Omega; V, A) \quad (5.1)$$

Príklad výpočtu dynamického odporu pre hodnoty z Tab. 5-4 (označené červenou):

$$R_{dyn} = \frac{U_{res}}{I_{pk}} = \frac{57,206 \cdot 10^3 V}{240,846 A} (\Omega; V, A) \quad (5.2)$$

Tab. 5-4 Namerané hodnoty pri skúške zvyškových napätí

$U_{res}$ [kV]	$I_{pk}$ [A]	$R_{dyn}$ [ $\Omega$ ]	$U_{res}$ [kV]	$I_{pk}$ [A]	$R_{dyn}$ [ $\Omega$ ]	$U_{res}$ [kV]	$I_{pk}$ [A]	$R_{dyn}$ [ $\Omega$ ]
57,206	240,846	237,52	69,682	3527	19,76	80,477	10055	8,00
59,236	286,45	206,79	71,538	4510	15,86			
60,686	347,65	174,56	72,109	4811	14,99			
61,857	788,995	78,40	72,466	4967	14,59			
62,657	1009	62,10	72,868	5351	13,62			
63,999	1368	46,78	74,296	6177	12,03			
66,326	2041	32,50	75,635	7080	10,68			
68,111	2757	24,70	76,929	7975	9,65			
68,575	2994	22,90	78,133	8866	8,81			

Podmienky prostredia:

- Tlak vzduchu: 980 hPA
- Vlhkosť vzduchu: 68,5 %
- Teplota okolia: 22,9 °C

**Porovnanie tabuľkových hodnôt**



V nasledujúcich tabuľkách sa nachádza porovnanie medzi hodnotami udanými výrobcom a hodnotami získanými skúškou.

Tab. 5-5 Porovnanie nameraných a výrobcom udaných hodnôt zvyškových napätí

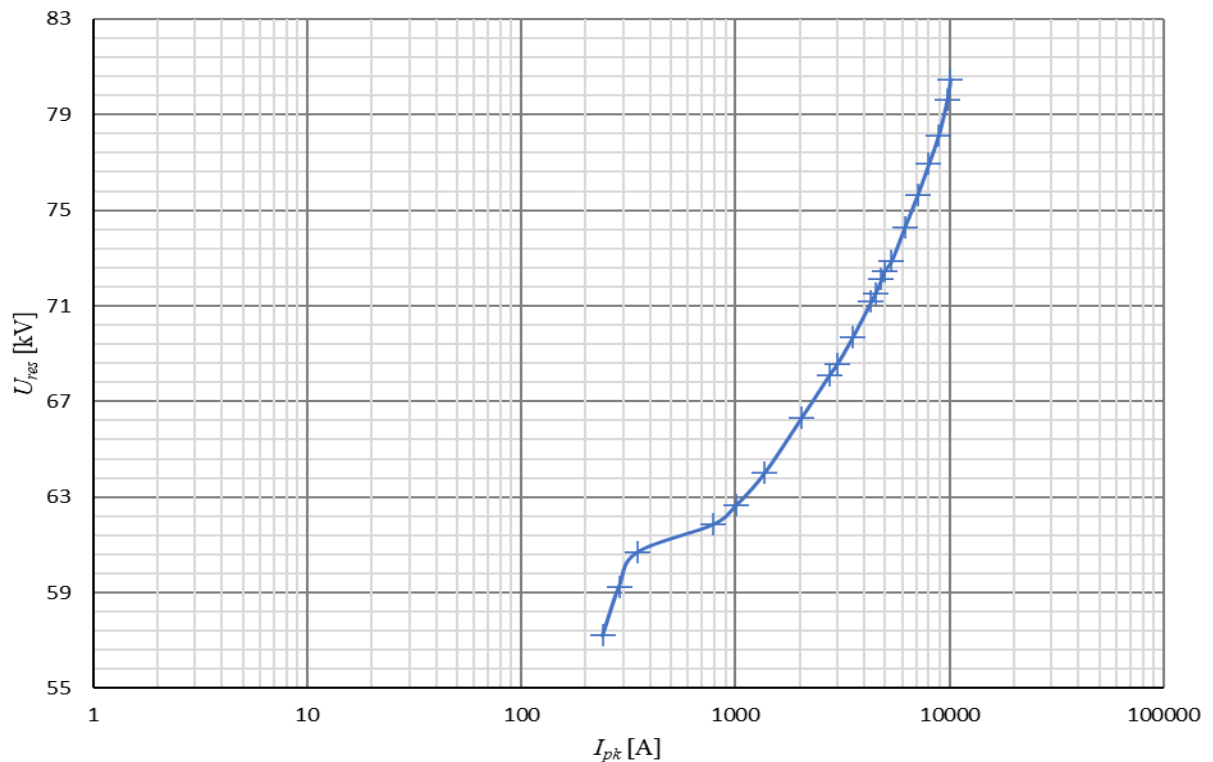
Hodnoty udané výrobcom	ECI 8/20 $\mu$ s [kA]		Hodnoty získané skúškou	ECI 8/20 $\mu$ s [kA]	
	$U_{res}$ [kV]	$I$ [kA]		$U_{res}$ [kV]	$I_{pk}$ [kA]
	67.9	1		62.657	1.009
	73.7	3		68.575	2.994
	77.9	5		72.466	4.967
83.8	10	80.477	10.055		

Tab. 5-6 Porovnanie hodnôt zvyškových napätí pri menovitom výbojovom prúde

Hodnoty udané výrobcom	ECI 8/20 $\mu$ s [kA]		Hodnoty získané skúškou	ECI 8/20 $\mu$ s [kA]		Opačná polarita	ECI 8/20 $\mu$ s [kA]	
	$U_{res}$ [kV]	$I$ [kA]		$U_{res}$ [kV]	$I_{pk}$ [kA]		$U_{res}$ [kV]	$I_{pk}$ [kA]
	83.8	10		80.477	10.055		80.648	9.992

## 5.2.4 Grafické závislosti

V prílohe sú uložené zaznamenané priebehy prúdov a napätí na čase zo skúšky zvyškových napätí. Z nameraných hodnôt z Tab. 5-4 som zostrojil Graf 5-1 – závislosť napätia na prúde.



Graf 5-1 VACH zvodíča zo skúšky zvyškových napätí

### 5.2.5 Zhodnotenie merania

Meraním som sa nachádzal v High current Region VACH. Presnejšie v jednej z jej častí – Lighting Surge region. Skúškou som simuloval správanie zvodiča prepätia pri ECI impulze. Pri porovnaní hodnôt zvyškových napätí z katalógu – merania sú zjavné odchýlky. Tieto rozdiely môžu byť zapríčinené starnutím zvodiča a postupnou degradáciou VACH impulzmi. Navyše teplota zvodiča má takisto vplyv na meranie a vzniknuté odchýlky. Medzi jednotlivými meraniami sa nečakalo, pokiaľ sa zvodič ochladil na teplotu okolia. Zároveň meranie ovplyvňujú parazitné indukčnosti obvodu. Tieto aspekty mali výrazný podiel na nepresnosti hodnôt zvyškových napätí.

Z Graf 5-1 môžeme vyčítať správanie zvodiča prepätia počas aplikovaných impulzov. S postupným narastaním nastaveného napätia na razovom generátore sa zvyšuje ako zvyškové napätie, tak výbojový prúd. Ďalej sa dá vyčítať, ako zvodič prepätia pracuje s nelineárnymi odpormi. Pri zvyškovom napätí 57,206 kV a prúde 240,846 A bol odpor zvodiča 237,52  $\Omega$ . Na postupné zvyšovanie hodnôt reagoval zvodič vo forme znižovania odporu. Pri poslednom aplikovanom impulze bola hodnota odporu iba 8  $\Omega$ .

V prílohe sa nachádzajú grafy prúdov a napätí na čase zo skúšky. Každému priebehu napätia na čase zodpovedá nasledujúci graf prúdu na čase. Na vzniknuté prekmity jednotlivých grafov má vplyv kapacita obvodu a parazitná indukčnosť. Je treba podotknúť, že zvodič prepätia sa so záťažou správa ako indukčnosť a preto má prúd opačnú polaritu ako napätie. Pri dosiahnutí výbojového prúdu 10 kA sa pre zaujímavosť aplikoval ešte jeden impulz s opačnou polaritou. Túto zmenu môžeme vidieť pri posledných dvoch grafoch. Ako napätia, tak aj prúd zmenili polaritu. Pri porovnaní hodnôt s predchádzajúcim impulzom sa napätie mierne zvýšilo a prúd mierne klesol. Táto odchýlka môže byť zapríčinená razovým generátorom, ktorému sa lepšie zapája záporná polarita než kladná a taktiež zvodič prepätia mal vysokú teplotu.

## 5.3 Meranie VACH a referenčného napätia

Poslednou úlohou praktickej časti bakalárskej práce je odmeranie Pre-breakdown region VACH a referenčného napätia. Keďže za oblasťou Pre-breakdown region sa nachádza referenčná oblasť, uskutočnilo sa popri meraní VACH meraní referenčného napätia.

Referenčné napätie je zadefinované v kapitole 3.2.1. Všeobecne existuje jednoduchšie vysvetlenie tohto pojmu – jednosmerné napätie, pri ktorom zvodič vedie 1 mA. Je potrebné si uvedomiť, že v princípe referenčné napätie pre jednosmerné a striedavé napätie je rovnaké, t.j. VACH je charakteristika absolútnych hodnôt [14; 15].

### 5.3.1 Meranie

Meranie prebiehalo postupne na dvoch rovnakých zvodičoch prepätia. Meranie sa radí medzi rutinné a prebieha za sucha [5]. Po skontrolovaní obvodu sa zapojí skúšobný zdroj. Zvolí sa krok – v mojom prípade 5 kV. Pri dosiahnutí potrebného napätia sa odčítava z multimetra prúd. Napätie sa zvyšuje až do prevádzkového napätia zvodiča. Po prekročení tohto napätia sa pokračuje ďalej s krokom 5 kV, až do dosiahnutia prúdu 1 mA. Avšak táto časť merania musí prebiehať čo najrýchlejšie, aby sa zvodič neohrial a nepoškodil. Po dosiahnutí prúdu 1 mA sa meranie ukončí. Podobne sa postupuje pri meraní zvodiča č.2. Po ukončení merania sa pracovisko upraví do pôvodného stavu.

### 5.3.2 Namerané hodnoty

Hodnoty získané meraním sú uložené v Tab. 5-7 a Tab. 5-8.

Tab. 5-7 Namerané hodnoty VACH zvodiča č.1

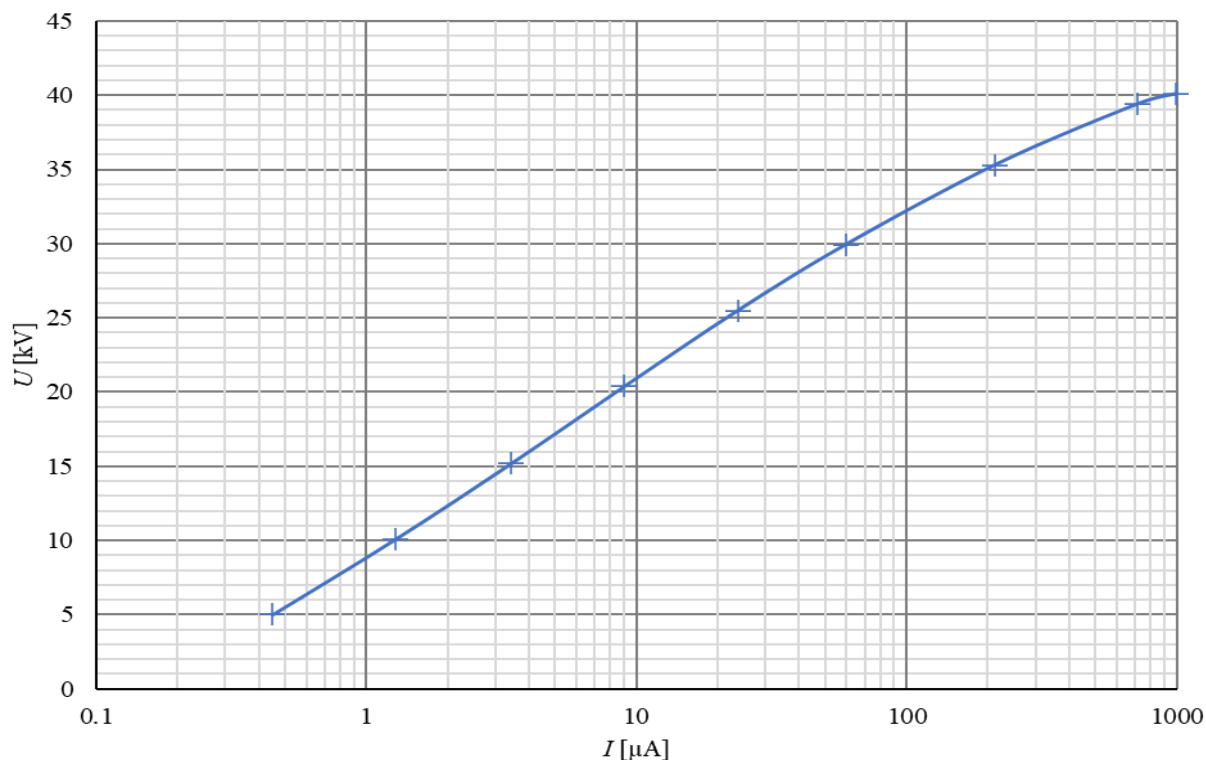
Zvodič č.1									
U [kV]	5	10,07	15,2	20,38	25,5	29,94	35,3	39,4	40,1
I [ $\mu$ A]	0,45	1,28	3,45	9,02	23,74	59,52	212,15	715,4	998,3

Tab. 5-8 Namerané hodnoty VACH zvodiča č.2

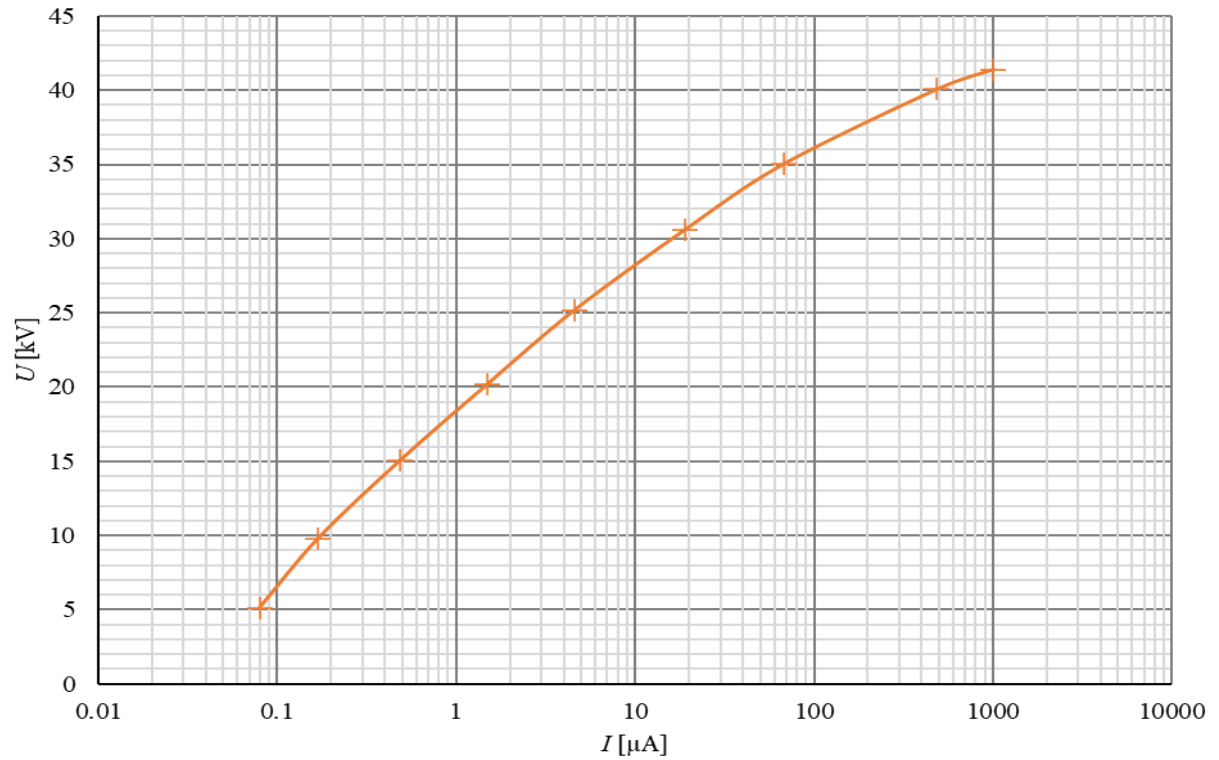
Zvodič č.2									
U [kV]	5,12	9,8	15,08	20,2	25,16	30,59	35,03	40,08	41,41
I [ $\mu$ A]	0,08	0,17	0,49	1,5	4,56	18,89	67,5	485,2	1004,1

### 5.3.3 Grafické závislosti a zhodnotenie merania

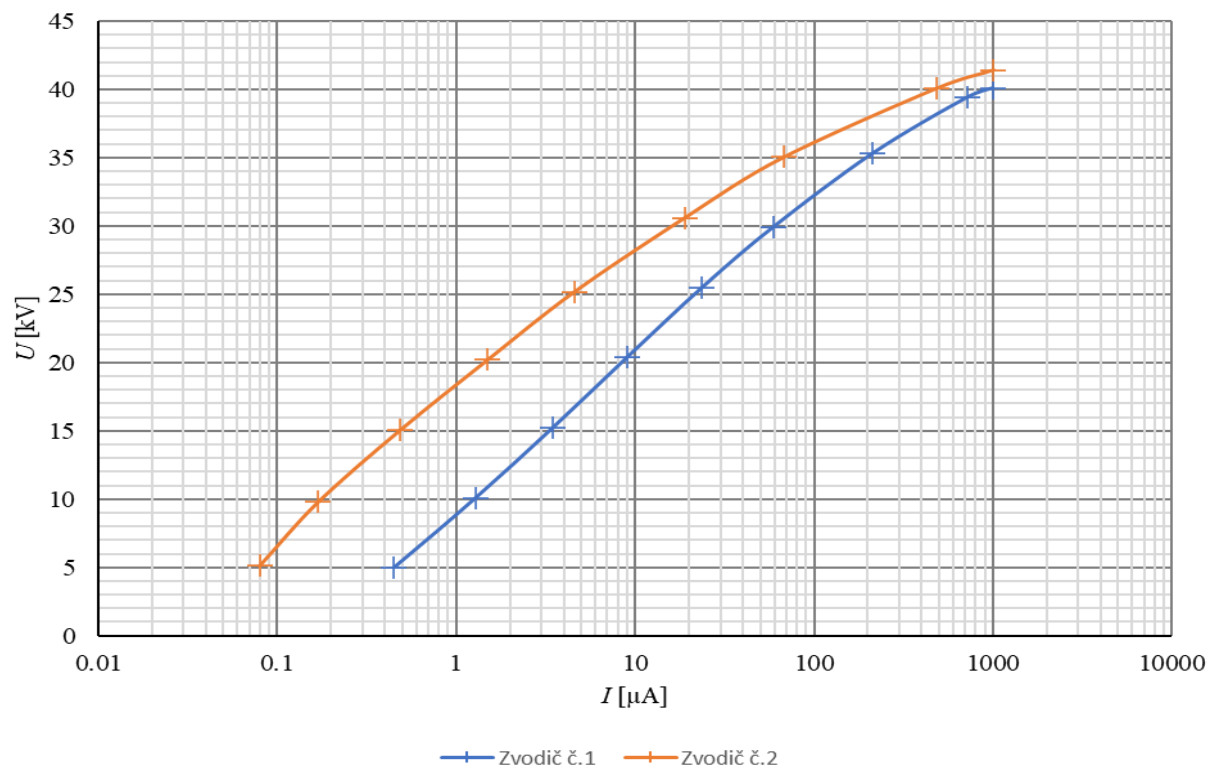
Z nameraných hodnôt som zostrojil tri VACH zvodiča. Posledný graf pozostáva z VACH obidvoch zvodičov.



Graf 5-2 VACH zvodiča č.1



Graf 5-3 VACH zvodíča č.2



Graf 5-4 Porovnanie VACH zvodíčov č.1 a č.2

### 5.3.4 Zhodnotenie merania

Graf 5-4 nám potvrdzuje teóriu. Zvodíč prepätia vplyvom predchádzajúcich meraní, počas ktorých boli aplikované impulzy zvýšil svoju teplotu a bol vystavený namáhaniu. Tieto aspekty sa prejavili v podobe posunutia VACH smerom dole a doprava. Teplota zvodíča od impulzu klesla, dokiaľ sa neuskutočnilo meranie VACH. Avšak oproti druhému zvodíču bola stále markantne vysoká. Navyše existuje teória – ak je zvodíč vyhriaty skratovým prúdom a je pripojený na sieťové napätie, bude dobre vodiť. Znamená to, že sa bude stále ohrievať a bude sa udržiavať zohriaty. Treba ešte poznamenať, že prvý zvodíč je oproti druhému vystavený väčšiemu namáhaniu. Používa sa v rámci vyučovania, ukážok a testovania.

Hodnotu referenčného napätia a prúdu je možné dohľadať v katalógovom liste zvodíča [14]. V mojom prípade tieto hodnoty absentovali, pretože v katalógovom liste zvodíča ich výrobca neuviedol, teda ich nemôžem porovnať. Pre zvodíč č.1 je hodnota referenčného prúdu a referenčného napätia rovná 998,3  $\mu\text{A}$  a 40,1 kV. Pre zvodíč č.2 je hodnota referenčného prúdu a referenčného napätia rovná 1004,1  $\mu\text{A}$  a 41,41 kV. Treba však povedať, že častým aplikovaním impulzov sa bod referenčného napätia a prúdu posúva. Môžeme to vidieť z hodnôt v Tab. 5-7 a Tab. 5-8. Tento jav je ďalším potvrdením teórie.

Celkovo môžeme z obidvoch častí tohto merania pozorovať postupnú degradáciu VACH zvodíča ovplyvnenú prechodnými javmi a životnosťou.

## 6 MOŽNOSTI VYUŽITIA NAMERANÝCH DÁT

Kapitola sa zaoberá zvodičom prepätia 3EK7 315 -2CH4 určeného pre distribučnú sieť. Rozoberá sa vzťah dočasných prepätí vznikajúcich na danej napäťovej úrovni k dimenzovaniu zvodiča.

Prepätie je definované ako: „*jako jakékoli napětí mezi fázemi nebo mezi fází a zemí, které svou velikostí překračuje amplitudu jmenovitého napětí*“ [4,s.185].

Dočasné prepätie (Temporary overvoltage – TOV) je definované nasledujúco: „*přepětí síťového kmitočtu poměrně dlouhého trvání*“ [4,s.185].

### 6.1 Vzťah VACH zvodiča prepätia a dočasné prepätie (TOV)

Ako je uvedené v kapitole 1.2.2, TOV pokrývajú vo VACH oblasť otvorenia (činnosti) zvodiča. Tieto TOV úzko súvisia s voľbou trvalého prevádzkového napätia ( $U_c$ ) zvodiča prepätia [5; 7]. Toto napätie je definované ako: „*stanovená přípustná efektivní hodnota střídavého napětí síťového kmitočtu, která může být trvale přiložena mezi svorkami omezovače přepětí*“ [1,s.19]. Problematika voľby parametru  $U_c$  je zahrnutá pri dimenzovaní zvodiča prepätia[2].

Všeobecne sa zvodiče dimenzujú v závislosti od ich umiestnenia, resp. podľa typu chráneného objektu. Pri každom chránenom objekte sa nachádzajú špecifické podmienky pre zvodič. Riešená problematika bakalárskej práce sa zaoberá iba jedným z parametrov celkového dimenzovania – voľba trvalého prevádzkového napätia  $U_c$  [2; 8].

#### 6.1.1 Voľba parametra $U_c$ v sieti VN

Systém voľby vhodného zvodiča prepätia je závislý od spôsobu uzemnenia systému a od hodnoty dočasného prepätia vyskytujúceho sa na zvodiči pripojeného medzi fázou a zemou pri poruche. Voľba parametra  $U_c$  je veľmi významná, pretože na základe zvolenej hodnoty sa odzrkadľujú ostatné zvolené parametre ako napr. ochranná hladina zvodiča prepätia  $U_p$ . Ochranná hladina sa volí na základe zvyškových napätí pri atmosférickom a spínacom impulze. Môžu nastať dve negatívne situácie zvolenia parametra  $U_c$  [2; 6; 7]:

- vysoká hodnota parametru  $U_c$ ,
- nízka hodnota parametru  $U_c$ .

Obidve vzniknuté situácie vplyvajú na funkciu a spoľahlivosť zvodiča prepätia. Pri nízkej hodnote  $U_c$  hrozí vyššia miera poruchovosti zvodiča prepätia spojená s tepelným namáhaním dočasným prepätím. Na druhej strane chránený objekt má malú pravdepodobnosť poruchy. Pri vysokej hodnote  $U_c$  nehrajú dočasné prepätia žiadnu úlohu z pohľadu poruchovosti zvodiča. Problém nastáva s chráneným objektom, ktorý bude mať vysokú poruchovosť [2].

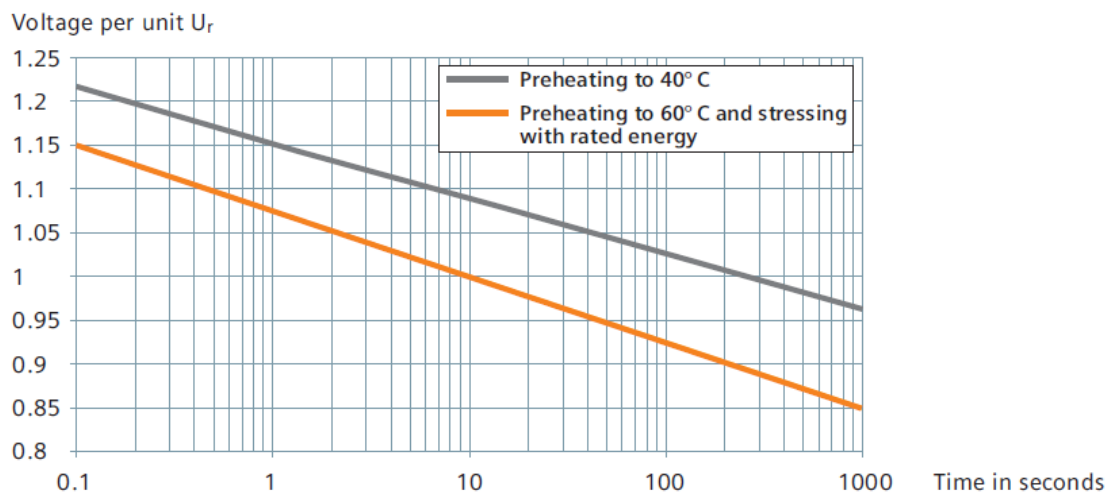
Veľkú úlohu pri voľbe  $U_c$  zohráva tepelné namáhanie zvodiča pri dočasných prepätiach. Z pohľadu distribučných sietí je najväčšie tepelné namáhanie zvodiča pri [2]:

- prerušovanom zemnom spojení (PZS),
- neprerušovanom jednofázovom zemnom spojení (NPZS).

Neprerušované zemné spojenie je definované ako: „*Trvalé propojení fázového vodiče se zemí v místě poruchy (někdy označované také jako kovové spojení). Napětí na zdravých fázích dosahuje hodnoty maximálního sdruženého napětí sítě  $U_m$* “ [2,s.11].

Pri prerušovanom zemnom spojení, ktoré nastáva opakovane dochádza k zničeniu a čiastočnému obnoveniu izolácie. Oproti neprerušovanému zemnému spojeniu je tepelné namáhanie u PZS vyššie. Vznikajú vyššie dočasné napät'ové zložky ako združené napätie [2]. Všeobecne sa zvodiče prepätia dimenzujú nasledovne: „pro nejhorší variantu jejich namáhání dočasnými přepětími, tj. pro dlouhodobě působící přerušované zemní spojení“ [2,s.12].

V konkrétnom umiestnení zvodiča sa najprv zistí veľkosť a doba dočasných prepätí. Potom sa zistí najhoršia kombinácia týchto prepätí. Nasleduje výpočet celkového tepelného účinku, ktorý pozostáva zo súčtu tepelných účinkov jednotlivých dočasných prepätí. Nakoniec sa určí napätie, ktoré charakterizuje celkový tepelný účinok za dobu 10 s. Toto napätie sa označuje ako  $U_{10s}$  a nachádza sa v katalógovom liste zvodiča prepätia v podobe číselnej hodnoty alebo grafickej závislosti dočasného prepätia na dobe jeho pôsobenia [2].



Obr. 6-1 Závislosť dočasného prepätia na dobe jeho pôsobenia (prevzaté z [26])

Na Obr. 6-1 sa nachádza graf závislosti dočasného prepätia na dobe jeho pôsobenia. Graf je zadaný výrobcom Siemens a nachádza sa v dokumentácii zvodiča prepätia 3EK7. Na zvislej osi sa nachádza dočasné prepätie vo forme násobku menovitého napätia zvodiča prepätia ( $U_r$ ) prípadne násobku  $U_c$  [5]. Menovité napätia zvodiča prepätia je definované ako: „Maximální možná efektivní hodnota střídavého napětí průmyslového kmitočtu mezi svorkami omezovače přepětí, pro kterou je konstruován, aby působil správně v podmínkách dočasného přepětí tak, jak je stanoveno ve zkoušce provozní funkce v čl. 7.5. ČSN EN 60099-4“ [2,s.4]. V grafe sa nachádzajú dve závislosti, ktoré charakterizujú prípustné prepätie v dvoch stavoch [2]:

- bez predchádzajúcej absorpcie energie impulzu (sivá),
- s predchádzajúcou absorpciou energie impulzu (oranžová).

Pri tepelnom namáhaní dočasnými prepätiami musí zvodič vyhovieť závislosti prípustného prepätia s predchádzajúcou absorpciou energie [2].

V súčasnosti sa uzemňuje uzol transformátora v sieťach VN ako [24]:

- izolovaný uzol,
- nepriamo uzemnený cez zhášaciu tlmivku,
- nepriamo uzemnený cez odporník.

Z pohľadu distribučnej sústavy vysokého napätia existujú rôzne podmienky pri voľbe parametra  $U_c$  v sieti [2]:

- kompenzovanej,
- izolovanej,
- uzemnenej cez odporník.

Pri týchto sieťach môžu dočasné prepätia dosahovať hodnoty [4]:

- do  $1,7U_c'$  v uzemnenej sieti cez odporník,
- do  $2U_c'$  v sieti kompenzovanej a izolovanej.

$U_c'$  – dohodnuté napájacie napätie

### Siete kompenzované tlmivkou

Sieť kompenzovaná sa vyznačuje pri zemnom spojení združeným napätím medzi zdravou fázou a zemou. Pretože sa z vodič pripája medzi fázou a zem musí platiť základná podmienka [2]:

$$U_c \geq U_m \text{ (kV; kV)} \quad (6.1)$$

- $U_m$  – trvalé združené napätie

Tlmivka sa umiestňuje medzi uzol transformátora a zem. Výhoda využitia tlmivky spočíva v obmedzení prúdu zemného spojenia. Na druhej strane – vzniká nestabilita nulovej zložky napätia čo môže vyústiť do nesymetrie fázových napätí. Pri PZS vzniká na zdravých fázach napätie 50 Hz prevyšujúce združené napätie. Tento stav sa opakuje. Pre z vodič to znamená, že absorbuje energiu aj špičiek prierazov zemného spojenia a aj energiu zákmitu napätia 50 Hz. Nastavenie tlmivky tu zohráva veľkú úlohu [2; 24].

Voľba  $U_c$  pri prevádzke siete kompenzovanej tlmivkou v ťažkých podmienkach je nasledovná [2]:

$$U_c \geq 1,06 U_m \text{ (kV; kV)} \quad (6.2)$$

Ak nastane vypnutie zemného spojenia do 30 min v sieti s trvalým napätím  $U_s$  nižším ako  $U_m$  ( $U_s \leq 0,95 U_m$ ), parameter  $U_c$  sa volí nasledovne [2]:

$$U_c \geq 0,95 U_m \text{ (kV; kV)} \quad (6.3)$$

Pre realizáciu tejto podmienky je potrebná najvyššia hodnota napätia objavujúca sa v mieste umiestnenia z vodiča. Navyše obidve požiadavky (vypnutie ZS a  $U_s \leq 0,95 U_m$ ) musia byť garantované. Takže podmienky znamenajú dlhodobé prevádzky vonkajších vedení s PZS [2].

### Siete s izolovaným stredom

Tieto siete sa vyznačujú spôsobom uzemnenia – uzol transformátora nie je galvanicky spojený so zemou. V bezporuchovom stave siete je napätie [24]:



- medzi fázou a zemou – fázové,
- medzi fázami – združené,
- medzi uzlom transformátora a zemou – nulové (pri rovnomernom zaťažení fáz).

U siete s izolovaným stredom platí rovnaká situácia so združenými napätiami medzi fázou a zemou ako u siete kompenzovanej, a tiež základná podmienka [2]:

$$U_c \geq U_m \text{ (kV; kV)} \quad (6.4)$$

Voľba  $U_c$  pri prevádzke sietí s izolovaným stredom v ťažkých podmienkach je nasledovná [2]:

$$U_c \geq 1,06 U_m \text{ (kV; kV)} \quad (6.5)$$

Zdravé fázy sú namáhané v ťažkých podmienkach impulzným napätím väčším ako združené napätie. Opäť sa potvrdzuje, že zvodič je pri PZS viac tepelne namáhaný ako pri NPZS. Pre zvodič to znamená, že absorbuje energiu špičiek prirazov poškodenej fázy zemným spojením [2].

Ak nastane vypnutie zemného spojenia do 30 min v sieti s trvalým napätím  $U_s$  nižším ako  $U_m$  ( $U_s \leq 0,95 U_m$ ), parameter  $U_c$  sa volí nasledovne [2]:

$$U_c \geq 0,95 U_m \text{ (kV; kV)} \quad (6.6)$$

Pre realizáciu tejto podmienky je potrebná najvyššia hodnota napätia objavujúca sa v mieste umiestenia zvodiča. Overuje sa meraním [2].

#### **Použitie zvodiča prepätia 3EK7 315 -2CH4 v sieti s izolovaným stredom a v sieti kompenzovanej tlmivkou**

Pri distribučnej sieti v napäťovej úrovni 22 kV je  $U_m = 24$  kV. Zvodič 3EK7 315 -2CH4 disponuje hodnotou  $U_c = 25,2$  kV. Podmienky voľby parametra  $U_c$  sú v sieti kompenzovanej a izolovanej rovnaké. Základná podmienka v týchto sieťach je [2]:

$$U_c \geq U_m \text{ (kV; kV)} \quad (6.7)$$

Po dosadení získaných hodnôt  $U_c$  a  $U_m$  vyplynie nasledujúca nerovnosť :

$$25,2 \geq 24 \text{ (kV; kV)} \quad (6.8)$$

Zvodič vyhovel základnej podmienke. V prípade prevádzky siete v ťažkých podmienkach, zvodič musí vyhovieť nasledujúcej podmienke [2]:

$$U_c \geq 1,06 U_m \text{ (kV; kV)} \quad (6.9)$$

Po dosadení získaných hodnôt  $U_c$  a  $U_m$  vyjde nasledujúca nerovnosť:

$$25,2 \geq 25,44 \text{ (kV; kV)} \quad (6.10)$$

Tento typ zvodíča umiestneného v sieti izolovanej alebo kompenzovanej, pri prevádzke v ťažkých podmienkach nevyhovel požadovanej napät'ovej podmienke. Požadovanú hodnotu parametra  $U_c$  nedosiahol o 240 V. Samozrejme bolo by na zvážení výrobcu a prevádzkovateľa sietí, či by zvodíč dokázal pokryť túto stratu v prevádzke. Ak by tieto siete spĺňali podmienku vypnutia zemného spojenia do 30 min a trvalé prevádzkové napätie sietí by bolo nižšie ako  $U_m$  a parameter  $U_c$  zvodíča by vyhovoval podmienke:

$$25,2 \geq 0,95 \cdot 24 \text{ (kV; kV)} \quad (6.11)$$

Okrem splnenia podmienok pri voľbe  $U_c$  je dôležité hľadisko výskytu dočasných prepätí v sieti kompenzovanej a izolovanej. V týchto sieťach sa môže vyskytnúť dočasné prepätie pri zemnom spojení až do hodnoty združeného napätia 24 kV. Z charakteristiky dočasného prepätia na dobu jeho trvania (viz Obr. 6-1) vyplýva, že zvodíč je schopný vydržať maximálne dočasné prepätie 36,225 kV. Z VACH (viz Graf 6-1) zvodíča získanej meraním sa dá odhadnúť veľkosť prúdov pri dočasných prepätiach. Odhadujem, že veľkosť prúdu pri dočasných prepätiach môže byť v rozsahu 0,01 A až stoviek ampérov.

Zo získaných odborných úvah vyplýva, že zvodíč 3EK7 315 -2CH4 sa dá použiť v sieti kompenzovanej a izolovanej s napät'ovou úrovňou 22 kV. Ďalej sa môže umiestniť pri prevádzke v ťažkých podmienkach, ak splnia dobu vypínania a hodnotu trvalého napätia. V opačnom prípade zvodíč nevydrží tepelné namáhanie dočasnými prepätiami.

### Siete so stredom uzemneným odporníkom

Z pohľadu porovnania sietí v rýchlosti vypnutia PZS je izolovaná sieť najúčinnějšía. Zároveň aj veľkosť prepätia pri tomto prechodnom jave je v izolovanej sieti menšía. Z týchto dvoch aspektov je možné parameter  $U_c$  voliť nasledovne [2]:

$$U_c = (0,87 \div 0,95) U_m \text{ (kV; kV)} \quad (6.12)$$

Interval umožňuje širšiu voľbu  $U_c$  v izolovanej sieti. V prípade pripojenia izolovanej siete k inej sieti by mohla nastavať fatálna situácia pre zvodíče v prípade zemného spojenia. Vychádza to zo skutočnosti, že zvodíče sú nastavené na rýchle vypínanie v izolovanej sieti a hodnota  $U_c$  je menšía ako  $U_m$ . Preto je potrebné brať tento fakt do úvahy v prípade dimenzovania zvodíčov [2].

### Použitie zvodíča prepätia 3EK7 315 -2CH4 v sieti so stredom uzemneným odporníkom

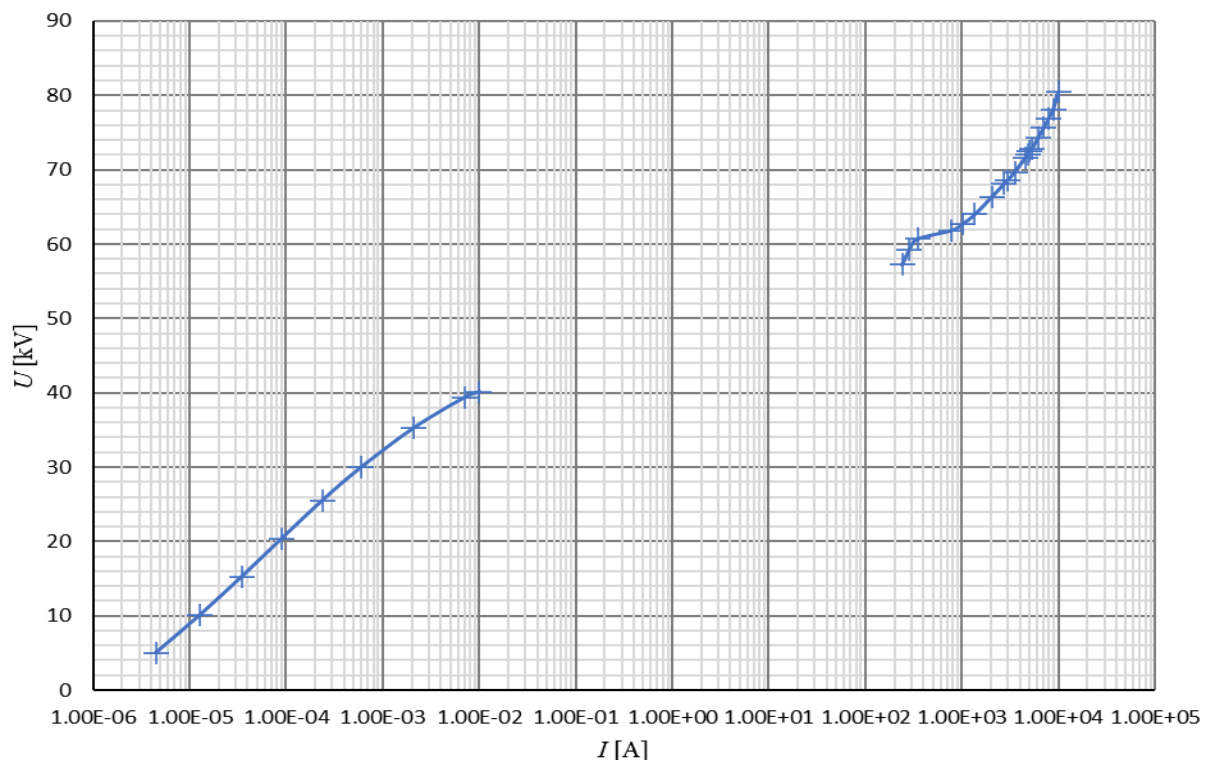
Pri distribučnej sieti v napät'ovej úrovni 22 kV je  $U_m = 24$  kV. Zvodíč 3EK7 315 -2CH4 disponuje hodnotou  $U_c = 25,2$  kV. Podmienka voľby parametra  $U_c$  je v sieti uzemnenej odporníkom nasledovná [2]:

$$U_c = (0,87 \div 0,95) U_m \text{ (kV; kV)} \quad (6.13)$$

Pretože  $U_c$  zvodiča je vyššie ako  $U_m$ , zvodič vyhovie základnej podmienke. V prípade prevádzky siete v ťažkých podmienkach, zvodič sa má dimenzovať na  $0,95U_m - 22,8$  kV.

Tento typ zvodiča umiestený v sieti uzemnenej odporníkom pri prevádzke v normálnom stave a v ťažkých podmienkach vyhovel požadovanému dimenzovaniu. Ďalším dôležitým hľadiskom je výskyt dočasných prepätí v tejto sieti. Dočasné prepätia tu dosahujú menších hodnôt v porovnaní s predchádzajúcimi sieťami. Z charakteristiky dočasného prepätia na dobe jeho trvania (viz Obr. 6-1) vyplýva, že zvodič je schopný vydržať maximálne dočasné prepätie 36,225 kV. Z VACH (viz Graf 6-1) zvodiča získanej meraním sa dá odhadnúť veľkosť prúdov pri dočasných prepätiach. Odhadujem, že veľkosť prúdu pri dočasných prepätiach môže byť v rozsahu 0,01 A až stoviek ampérov.

Zo získaných odborných úvah vyplýva, že zvodič 3EK7 315 -2CH4 sa dá použiť v sieti s uzemneným stredom s napäťovou úrovňou 22 kV. Ďalej sa môže umiestniť pri prevádzke v ťažkých podmienkach. Avšak pred umiestnením zvodičov v tejto sieti je potrebné vyšetriť prípadne plánovanie pripojenia k inej sieti. Pri neoverení môže dôjsť k poddimenzovaniu zvodičov a ich následnému reťazovému zlyhaniu [2].



Graf 6-1 VACH zvodiča s oblasťou pred otvorením a s oblasťou vysokých prúdov

## 7 ZÁVER

Cieľom bakalárskej práce bolo oboznámenia čitateľa s využívanými ochranami proti prepätiu v distribučnej sieti. Čitateľ sa dozvedá konštrukčnú stavbu jednotlivých prepäťových ochrán. V práci sú popísané jednotlivé výhody a nevýhody polymérového a porcelánového plášťa, z ktorých sa dokázu odvodiť závery z pohľadu ekonomického a mechanického hľadiska.

Jednotlivé demonštrácie meraní prevedú čitateľa praktickou podobou. Uskutočnenými meraniami sa získala VACH zvodica s oblasťou pred otvorením a s časťou oblasti vysokých prúdov. Pri aplikovaní atmosférických impulzov sa preukázal stav odolnosti izolácie. Na druhej strane sa dokázala teória postupnej degradácie zvodica v dôsledku vystavenia impulzov počas prevádzkového života. Preukazuje to porovnanie stavu VACH zvodica č.2 oproti zvodici č.1., kde výsledkom je zreteľné posunutie krivky smerom nadol u zvodica č.1. Za následok to má zmenšenie oblasti pred otvorením zvodica.

Pre zvodice prepätia sa získali jedny z ich charakteristických parametrov – referenčné napätie a referenčný prúd. Tieto parametre nebolo možné porovnať s údajmi od výrobcu, ale aj napriek tomu sa overila vyplývajúca teória. Na základe porovnania stanovených referenčných hodnôt oboch zvodíc sa dokázalo posunutie hranice otvorenia u zvodica č.1. Získané referenčné údaje budú prínosom pre budúce zhodnocovanie zvodica pri opätovnom meraní VACH alebo referenčného napätia.

Posledná časť bakalárskej práce prevedie čitateľa praktickým využitím konkrétneho zvodica v distribučnej sústave VN. Z oblasti dimenzovania parametra maximálneho trvalého prevádzkového napätie zvodica sa oboznámilo so základnými napäťovými podmienkami. Zo získaných odborných úvah sa uplatnil zvodice prepätie 3EK7 315 -2CH4 v distribučnej sústave v napäťovej úrovni 22 kV. Z vyvodených úvah som usúdil využitie zvodica v sieti kompenzovanej, izolovanej a uzemnenej cez odporník za stanovených podmienok. Pri dimenzovaní zvodica bola využívaná podniková norma, ktorú používajú väčšina firiem na území Slovenskej a Českej republiky. Predstavený princíp dimenzovania zvodica sa realizuje v praxi.

Získané závery meraní preukázali, že bez potrebnej kontroly prevádzkového stavu zvodica, by sa v prípade jeho umiestnenia v distribučnej sústave znížila miera kvality dodavky elektrickej energie.

## POUŽITÁ LITERATÚRA

- [1] ČSN EN 60099-4. *Omezovače přepětí bez jiskřišť pro sítě střídavého napětí*. Ed.3. 2018.
- [2] PNE 33 0000-8. *Navrhování a umístování svodičů přepětí v distribučních sítích nad 1 kV do 45 kV: Podniková norma energetiky pro rozvod elektrické energie*. 2005.
- [3] PNE 33 0000-7. *Navrhování a umístování svodičů přepětí v distribučních sítích do 1 kV*. 2007.
- [4] TOMAN, Petr. *Provoz distribučních soustav*. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2011. ISBN 978-80-01-04935-8.
- [5] SHORT, Thomas Allen. *ELECTRIC POWER distribution handbook*. Florida: CRC Press, 2004. ISBN 0-8493-1791-6.
- [6] BURKE, James J. *Power Distribution Engineering: Fundamentals and Applications Electrical Engineering and Electronics*. CRC Press, 1994. ISBN 9780824792374.
- [7] HASE, Yoshihide, Tanuj KHANDELWAL a Kazuyuki KAMEDA. *Power System Dynamics with Computer-Based Modeling and Analysis*. India: John Wiley, 2020. ISBN 9781119487456.
- [8] GRIGSBY, Leonard L. *POWER SYSTEMS: The Electric Power Engineering Handbook*. Third Edition. CRC Press, 2019. ISBN 9780367381486.
- [9] NÉMETH, Bálint. *Proceedings of the 21st International Symposium on High Voltage Engineering: Volume 1*. Switzerland: Springer Nature Switzerland, 2020. ISBN 978-3-030-31675-4.
- [10] WOODWORTH, Jonathan. Understanding Arrester VI Characteristic Curves. *INMR* [online]. Zimmar Holdings, 26 october 2019 [cit. 2020-05-08]. Dostupné z: <https://www.inmr.com/understanding-arrester-characteristic-curves/>
- [11] Měření s impulzním generátorem proudu. In: *DSpace VŠB-TUO* [online]. [cit. 2020-05-30]. Dostupné z: [https://dspace.vsb.cz/bitstream/handle/10084/93131/BUC0013\\_FEI\\_B2649\\_3907R001\\_2012.pdf?sequence=1&isAllowed=n](https://dspace.vsb.cz/bitstream/handle/10084/93131/BUC0013_FEI_B2649_3907R001_2012.pdf?sequence=1&isAllowed=n)
- [12] WOODWORTH, Jonathan. Understanding Temporary Overvoltage Behavior of Arresters. *ArresterWorks* [online]. 2017 [cit. 2020-05-12]. Dostupné z: [http://www.arresterworks.com/arresterfacts/pdf\\_files/ArresterFacts\\_028\\_Understanding\\_Temporary\\_Overvoltage\\_Behavior\\_of\\_Arresters.pdf](http://www.arresterworks.com/arresterfacts/pdf_files/ArresterFacts_028_Understanding_Temporary_Overvoltage_Behavior_of_Arresters.pdf)
- [13] WOODWORTH, Jonathan. Understanding Arrester Voltage-Current Characteristic Curves. *ArresterWorks* [online]. 2017 [cit. 2020-05-16]. Dostupné z: [http://www.arresterworks.com/arresterfacts/pdf\\_files/ArresterFacts\\_003\\_Understanding\\_Arrester\\_Voltage-Current\\_Characteristic\\_Curves.pdf](http://www.arresterworks.com/arresterfacts/pdf_files/ArresterFacts_003_Understanding_Arrester_Voltage-Current_Characteristic_Curves.pdf)
- [14] WOODWORTH, Jonathan. Arrester Reference Voltage. *ArresterWorks* [online]. 2011 [cit. 2020-05-17]. Dostupné z: [http://www.arresterworks.com/arresterfacts/pdf\\_files/ArresterFacts\\_027\\_Arrester\\_Reference\\_Voltage.pdf](http://www.arresterworks.com/arresterfacts/pdf_files/ArresterFacts_027_Arrester_Reference_Voltage.pdf)
- [15] Overvoltage protection Metal oxide surge arresters in medium voltage systems. *AEIT* [online]. Wettingen, 2011 [cit. 2020-05-14]. Dostupné z: <http://www.aeit-taa.org/Documenti/ABB-Application-Guidelines-Medium-Voltage-Surge-Arresters.pdf>

- [16] Surge arresters: applications and selection. *Electrical Power Engineering Reference & Applications handbook* [online]. 2007 [cit. 2020-05-11]. ISBN ISBN 81-901642-5-2. Dostupné z: <https://www.electricalengineering-book.com/pdf/chapter-391027.pdf>
- [17] WOODWORTH, Jonathan. Understanding Arrester Discharge Voltage. *ArresterWorks* [online]. 2008 [cit. 2020-05-19]. Dostupné z: [http://www.arresterworks.com/arresterfacts/pdf\\_files/understanding\\_arrester\\_discharge\\_voltage.pdf](http://www.arresterworks.com/arresterfacts/pdf_files/understanding_arrester_discharge_voltage.pdf)
- [18] HINRICHSSEN, Volker. *Metal-Oxide Surge Arresters in High-Voltage Power Systems* [online]. Berlin, 2011 [cit. 2020-05-20]. Dostupné z: <https://assets.new.siemens.com/siemens/assets/public/0.64a37729c7408df1e15b39ca8c9cd8eb957a5463.e50001-g630-h197-x-4a00-ableiterhandbuch-teil-1-a4.pdf>
- [19] LAYTON, Lee. Electric System Overvoltage Protection. *PDHonline* [online]. 2012 [cit. 2020-05-16]. Dostupné z: <https://pdhonline.com/courses/e300/e300content.pdf>
- [20] HUSSAIN, Muthar. LIGHTNING IMPULSE TEST In -precise. *SlideShare* [online]. 2017 [cit. 2020-05-22]. Dostupné z: <https://www.slideshare.net/MutharHussain/lightning-impulse-test-in-precise>
- [21] VEISHEIPL, Karel. *Charakteristiky impulzného generátoru závislosti na typu zátěže* [online]. Západočeská univerzita v Plzni [cit. 2020-05-20]. Dostupné z: <https://dspace5.zcu.cz/bitstream/11025/26521/1/Veisheipl.pdf>. Západočeská univerzita v Plzni, Fakulta elektrotechnická.
- [22] Porcelain and polymeric insulators Analysis. *SlideShare* [online]. Germany: TE Connectivity, 2015 [cit. 2020-05-24]. Dostupné z: <https://www.slideshare.net/RathodNikunjsinh/epp-0731>
- [23] BAYER, Jiří a Jaroslav HLAVATÝ. Kritické miesta konštrukcie obmedzovačov prepätia a ich skúšky. In: *TechPark* [online]. 2008 [cit. 2020-05-24]. Dostupné z: <http://www.techpark.sk/technika-102010/kriticke-miesta-konstrukcie-obmedzovacov-prepatia-a-ich-skusky-.html>
- [24] SALÁT, Michal. *SPÔSOBY PREVÁDZKY A PORUCHY SIETÍ VYSOKÉHO NAPÄTIA* [online]. 2008 [cit. 2020-05-26]. Dostupné z: [http://www.kves.uniza.sk/kvesnew/dokumenty/Clanky\\_studentov/Sal%20A1t,%20M.%20Sp%20B4soby%20prev%20A1dzky%20a%20poruchy%20siet%20AD%20vyso%20k%20A9ho%20nap%20A4tia.pdf](http://www.kves.uniza.sk/kvesnew/dokumenty/Clanky_studentov/Sal%20A1t,%20M.%20Sp%20B4soby%20prev%20A1dzky%20a%20poruchy%20siet%20AD%20vyso%20k%20A9ho%20nap%20A4tia.pdf). Ročníkový projekt. Žilinská univerzita v Žiline, Elektrotechnická fakulta.
- [25] BLAŽEK, Vladimír. *Zkušební zdroje vysokého napětí*. 2013. VUT Brno, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií.
- [26] *3EK7 Medium Voltage Silicone Insulated Surge Arresters* [online]. Germany [cit. 2020-05-26]. Dostupné z: [https://castlepowersolutions.biz/components/Siemens/Arresters/3EK7\\_Arrester\\_Catalog.pdf](https://castlepowersolutions.biz/components/Siemens/Arresters/3EK7_Arrester_Catalog.pdf)
- [27] Spektrum. In: *ABB* [online]. 2017 [cit. 2020-05-28]. Dostupné z: [https://new.abb.com/docs/librariesprovider64/spektrum/spekt-2-17\\_lr.pdf?sfvrsn=2](https://new.abb.com/docs/librariesprovider64/spektrum/spekt-2-17_lr.pdf?sfvrsn=2)