

# **VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ**

**BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY**

**FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ  
ÚSTAV ELEKTROENERGETIKY**

**FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION  
DEPARTMENT OF ELECTRICAL POWER ENGINEERING**

## **METODIKA NÁVRHU SVODIČŮ PŘEPĚTÍ VN PRO VZDUCHEM IZOLOVANÉ ROZVÁDĚČE**

**DIPLOMOVÁ PRÁCE  
MASTER'S THESIS**

**AUTOR PRÁCE  
AUTHOR**

**BC.ONDŘEJ NĚMEC**

**BRNO 2013**



VYSOKÉ UČENÍ  
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky  
a komunikačních technologií

Ústav elektroenergetiky

# Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor  
**Elektroenergetika**

**Student:** Bc. Ondřej Němec

**ID:** 115244

**Ročník:** 2

**Akademický rok:** 2012/2013

## NÁZEV TÉMATU:

**Metodika návrhu svodičů přepětí VN pro vzduchem izolované rozváděče**

## POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

1. Návrh omezovačů přepětí vzhledem k vypínanému výkonu kapacitní zátěže.
2. Návrh omezovačů přepětí vzhledem k vypínanému výkonu induktivní zátěže.
3. Návrh omezovačů přepětí při atmosférických vlivech v různých vzdálenostech.
4. Návrh omezovačů přepětí při zemním spojení.

## DOPORUČENÁ LITERATURA:

podle pokynů vedoucího práce

**Termín zadání:** 11.2.2013

**Termín odevzdání:** 24.5.2013

**Vedoucí práce:** doc. Ing. Jiří Drápela, Ph.D.

**Konzultanti diplomové práce:**

**doc. Ing. Petr Toman, Ph.D.**

*Předseda oborové rady*

## UPOZORNĚNÍ:

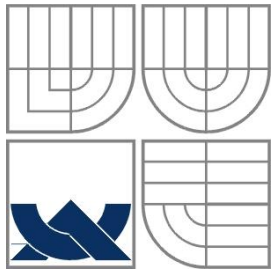
Autor diplomové práce nesmí při vytváření diplomové práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných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

Bibliografická citace práce:

NĚMEC, O. Metodika návrhu svodičů přepětí VN pro vzduchem izolované rozváděče. Diplomová práce. Brno: Ústav elektroenergetiky FEKT VUT v Brně, 2012, 66 stran.

Jako autor uvedené diplomové práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této diplomové práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si 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.

.....



**VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ**



**Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií**  
**Ústav elektroenergetiky**

**Diplomová práce**

# **Metodika návrhu svodičů přepětí VN pro vzduchem izolované rozváděče**

**Ondřej Němec**

**vedoucí: doc. Ing. Jiří Drápela, Ph.D.**

**Ústav elektroenergetiky, FEKT VUT v Brně, 2013**

**Brno**



**BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY**



**Faculty of Electrical Engineering and Communication  
Department of Electrical Power Engineering**



**Master's Thesis**

**Selection and Application of Surge  
Arresters for Middle-Voltage Air-  
Insulated Switchgears**

by

**Ondřej Němec**

**Supervisor: doc. Ing. Jiří Drápela, Ph.D.**

**Brno University of Technology, 2013**

**Brno**

**ABSTRAKT**

Cílem práce je seznámit čtenáře s návrhem omezovačů přepětí ve čtyřech různých kategoriích.

V první části práce je popsána teorie přepětí, omezovačů přepětí a jejich testování.

Druhá část práce je zaměřena na návrh omezovačů přepětí při spínání kapacitních zátěží.

Práce pokračuje návrhem omezovačů přepětí v různých typech VN sítí.

Další částí je návrh omezovačů přepětí při spínání indukčních zátěží.

Dalším bodem je stanovení ochranné vzdálenosti omezovače přepětí při různých atmosférických přepětích.

Závěrem práce je zhodnocení problematiky.

**KLÍČOVÁ SLOVA:** omezovač přepětí; svodič přepětí; spínání kapacitních zátěží; spínání indukčních zátěží; ochranná vzdálenost při úderu blesku; přepětí při zemním spojení v sítích VN

**ABSTRACT**

The purpose of this thesis is to introduce readers with design of a surge arresters in four different categories.

In the first part of this thesis is described theory of overvoltage, surge arresters and testing.

The second part of this thesis is focused on design of surge arresters to protect from overvoltage due switching capacitive loads.

The thesis continued with design of surge arresters in medium voltage network.

The next part is design of surge arresters to protect from overvoltage due switching inductive loads.

The next point is protective distance of surge arresters in different lightning overvoltages.

In the conclusion of this thesis is the appreciation of whole problems about surge arresters.

**KEY WORDS:**

surge arresters; switching of capacitave loads, switching inductive loads; protective distance; overvoltage due earth fault in medium voltage networks

## OBSAH

<b>SEZNAM OBRÁZKŮ.....</b>	<b>10</b>
<b>SEZNAM TABULEK .....</b>	<b>12</b>
<b>SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK.....</b>	<b>13</b>
<b>1 ÚVOD .....</b>	<b>15</b>
<b>2 PŘEPĚTÍ.....</b>	<b>16</b>
<b>2.1 DĚLENÍ PŘEPĚTÍ.....</b>	<b>16</b>
2.1.1 ATMOSFÉRICKÁ PŘEPĚTÍ.....	16
2.1.2 PROVOZNÍ PŘEPĚTÍ.....	16
<b>3 SVODIČE PŘEPĚTÍ .....</b>	<b>24</b>
<b>3.1 OBECNĚ O SVODIČÍCH PŘEPĚTÍ.....</b>	<b>24</b>
<b>3.2 OCHRANNÁ VZDÁLENOST SVODIČE PŘEPĚTÍ .....</b>	<b>25</b>
3.2.1 TEORIE ŠÍŘENÍ VLN A ROZHRANÍ .....	25
3.2.2 ČINITEL ODRAZU NAPĚTÍ A PROUDU.....	26
3.2.3 ČINITEL PROSTUPU NAPĚTÍ A PROUDU.....	26
3.2.4 ROZHRANÍ VEDENÍ - KABEL .....	27
3.2.5 ODPOR NAPŘÍČ.....	28
3.2.6 VÝPOČET OCHRANNÉ VZDÁLENOSTI .....	29
<b>3.3 TECHNOLOGIE SVODIČŮ PŘEPĚTÍ.....</b>	<b>30</b>
3.3.1 BLESKOJISTKY .....	30
3.3.2 OMEZOVAČE PŘEPĚTÍ .....	31
<b>3.4 KONSTRUKCE SVODIČŮ PŘEPĚTÍ ABB .....</b>	<b>32</b>
3.4.1 AKTIVNÍ ČÁST .....	33
3.4.2 PASIVNÍ ČÁST .....	34
<b>3.5 DOBA OCHLAZENÍ .....</b>	<b>35</b>
<b>3.6 STABILITA SVODIČŮ PŘEPĚTÍ.....</b>	<b>35</b>
<b>3.7 DOČASNÉ PŘEPĚTÍ .....</b>	<b>35</b>
<b>3.8 SERVISNÍ PODMÍNKY .....</b>	<b>36</b>
<b>3.9 VÝHODY A NEVÝHODY OMEZOVAČŮ PŘEPĚTÍ A BLESKOJISTEK .....</b>	<b>37</b>
<b>4 TESTOVÁNÍ .....</b>	<b>38</b>
<b>4.1 TESTY TYPOVÉ .....</b>	<b>38</b>
<b>4.2 TESTY KUSOVÉ .....</b>	<b>38</b>
<b>4.3 TESTY PŘEJÍMACÍ .....</b>	<b>39</b>
<b>4.4 TESTY SPECIÁLNÍ .....</b>	<b>39</b>
<b>5 ROZVÁDĚČE ABB .....</b>	<b>40</b>
<b>5.1 UNIgear ZS1.....</b>	<b>40</b>
<b>6 NÁVRH OMEZOVAČŮ PŘEPĚTÍ PŘI SPÍNÁNÍ KAPACITNÍCH ZÁTĚŽÍ .....</b>	<b>43</b>
<b>6.1 ZAPÍNÁNÍ KAPACITNÍCH ZÁTĚŽÍ.....</b>	<b>43</b>



---

<b>6.2 VYPÍNÁNÍ KAPACITNÍCH ZÁTĚŽÍ .....</b>	<b>44</b>
6.2.1 VYPÍNÁNÍ KONDENZÁTOROVÝCH BATERÍ .....	44
<b>6.3 VYPÍNÁNÍ VEDENÍ NAPRÁZDNO .....</b>	<b>47</b>
<b>7 NÁVRH OMEZOVAČŮ PŘEPĚTÍ PŘI ZEMNÍCH SPOJENÍCH .....</b>	<b>48</b>
<b>7.1 SÍŤE IZOLOVANÉ .....</b>	<b>48</b>
7.1.1 PŘEPĚTÍ PŘI VZNIKU ZEMNÍHO SPOJENÍ .....	49
7.1.2 PŘEPĚTÍ PŘI VYPNUTÍ ZEMNÍHO SPOJENÍ.....	50
7.1.3 NÁVRH OMEZOVAČŮ PŘEPĚTÍ V IZOLOVANÉ SÍTI.....	50
<b>7.2 SÍŤE PŘÍMO UZEMNĚNÉ .....</b>	<b>51</b>
<b>7.3 SÍŤE KOMPENZOVANÉ.....</b>	<b>52</b>
7.3.1 NÁVRH OMEZOVAČŮ PŘEPĚTÍ V KOMPENZOVANÉ SÍTI.....	52
<b>7.4 DŮVODY POUŽITÍ OMEZOVAČŮ PŘEPĚTÍ V IZOLOVANÝCH, KOMPENZOVANÝCH A PŘÍMO     UZEMNĚNÝCH SÍŤÍCH.....</b>	<b>53</b>
<b>8 NÁVRH OMEZOVAČŮ PŘEPĚTÍ PŘI VYPÍNÁNÍ INDUKTIVNÍCH PROUDŮ.....</b>	<b>55</b>
<b>8.1 VELIKOST PŘEPĚTÍ PŘI VYPÍNÁNÍ TRANSFORMÁTORU NAPRÁZDNO.....</b>	<b>55</b>
<b>8.2 NÁVRH OMEZOVAČE PŘEPĚTÍ MWD .....</b>	<b>56</b>
<b>9 PŘEPĚTÍ ZPŮSOBENÁ ATMOSFÉRICKÝMI VLIVY .....</b>	<b>59</b>
<b>9.1 PŘÍKLAD INSTALACE OMEZOVAČE PŘEPĚTÍ NA KONEC VEDENÍ S UMÍSTĚNÝM     TRANSFORMÁTOREM.....</b>	<b>59</b>
<b>10 ZÁVĚR.....</b>	<b>65</b>
<b>POUŽITÁ LITERATURA .....</b>	<b>66</b>

**SEZNAM OBRÁZKŮ**

<i>Obrázek 1 Schéma přerušení oblouku a vznik zotaveného napětí.....</i>	<i>17</i>
<i>Obrázek 2 Průběh zotaveného napětí.....</i>	<i>18</i>
<i>Obrázek 3 Přepětí při vypínání zkratových proudů .....</i>	<i>18</i>
<i>Obrázek 4 Oscilace při nestabilním hoření oblouku.....</i>	<i>20</i>
<i>Obrázek 5 Průběh zotaveného napětí při vypínání malých induktivních proudů .....</i>	<i>20</i>
<i>Obrázek 6 Obvod transformátoru .....</i>	<i>21</i>
<i>Obrázek 7 Obvod znázorňující spínání kapacitních proudů .....</i>	<i>22</i>
<i>Obrázek 8 Princip činnosti svodiče přepětí .....</i>	<i>24</i>
<i>Obrázek 9 Rozhraní vedení - kabel .....</i>	<i>27</i>
<i>Obrázek 10 Rozhraní kabel - vedení .....</i>	<i>28</i>
<i>Obrázek 11 Odpor napříč.....</i>	<i>28</i>
<i>Obrázek 12 Schéma ochranné vzdálenosti svodiče přepětí.....</i>	<i>29</i>
<i>Obrázek 13 Konstrukce ventilové bleskojistky .....</i>	<i>31</i>
<i>Obrázek 14 Charakteristika omezovače přepětí .....</i>	<i>32</i>
<i>Obrázek 15 Odporové bloky.....</i>	<i>33</i>
<i>Obrázek 16 Aktivní část omezovače přepětí.....</i>	<i>34</i>
<i>Obrázek 17 Omezovače přepětí MWK a MWD.....</i>	<i>34</i>
<i>Obrázek 18 Stabilita omezovače přepětí .....</i>	<i>35</i>
<i>Obrázek 19 Ochranné charakteristiky omezovače přepětí.....</i>	<i>36</i>
<i>Obrázek 20 Pole rozváděčů UniGear ZSI .....</i>	<i>40</i>
<i>Obrázek 21 Části rozváděče.....</i>	<i>42</i>
<i>Obrázek 22 Obvod zapínání kapacitní baterie.....</i>	<i>43</i>
<i>Obrázek 23 Obvod vypínání kondenzátorové baterie .....</i>	<i>45</i>
<i>Obrázek 24 Rozložení napětí při spojení jedné fáze se zemí.....</i>	<i>48</i>
<i>Obrázek 25 Izolovaná síť.....</i>	<i>49</i>
<i>Obrázek 26 Přímou uzemněná síť .....</i>	<i>51</i>
<i>Obrázek 27 Kompenzovaná síť.....</i>	<i>52</i>
<i>Obrázek 28 Obvod transformátoru naprázdno .....</i>	<i>55</i>
<i>Obrázek 29 Stožár VN.....</i>	<i>59</i>
<i>Obrázek 30 Omezovač přepětí MWD vhodný pro konkrétní aplikaci.....</i>	<i>61</i>
<i>Obrázek 31 Závislost strmosti na ochranné vzdálenosti .....</i>	<i>63</i>
<i>Obrázek 32 Úder blesku do vedení.....</i>	<i>64</i>

*Obrázek 33 Ochranná vzdálenost omezovače přepětí .....64*

**SEZNAM TABULEK**

<i>Tabulka 1 Parametry rozváděčů ZSI .....</i>	<i>41</i>
<i>Tabulka 2 Energetická absorpční schopnost jednotlivých omezovačů přepětí.....</i>	<i>46</i>
<i>Tabulka 3 Šítkové parametry transformátoru 22/0,4 kV.....</i>	<i>55</i>
<i>Tabulka 4 Velikost přepětí při různých hodnotách proudu při sepnutí.....</i>	<i>56</i>
<i>Tabulka 5 Normalizované hodnoty základních izolačních hladin.....</i>	<i>57</i>
<i>Tabulka 6 Šítkové parametry dalších transformátorů 22/0,4 kV .....</i>	<i>57</i>
<i>Tabulka 7 Hodnoty přepětí vzniklé při spínání maximální velikosti proudu u jednotlivých transformátorů pro kapacitu 10 nF.....</i>	<i>57</i>
<i>Tabulka 8 Hodnoty přepětí vzniklé při spínání maximální velikosti proudu u jednotlivých transformátorů pro kapacitu 9 a 8 nF.....</i>	<i>58</i>
<i>Tabulka 9 Hodnoty přepětí vzniklé při spínání maximální velikosti proudu u jednotlivých transformátorů pro kapacitu 11 a 12 nF.....</i>	<i>58</i>
<i>Tabulka 10 Parametry stožáru.....</i>	<i>59</i>
<i>Tabulka 11 Parametry lana.....</i>	<i>60</i>
<i>Tabulka 12 Vzdálenosti úderů blesků do vedení a tomu odpovídající strmost a ochranná vzdálenost.....</i>	<i>63</i>

**SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK**

BIL	Izolační výdržná schopnost omezovače přepětí	V
C	Kapacita obvodu	F
$C_T$	Kapacita transformátoru	F
L	Indukčnost obvodu	H
$L_T$	Indukčnost transformátoru	H
$E_C$	Energie pohlcená omezovačem přepětí	J
$f_T$	Frekvence obvodu transformátoru	Hz
i	Proud obvodem	A
$I_C$	Proud kapacitou	A
$I_N$	Jmenovitý vybíjecí proud omezovače přepětí	A
$I_P$	Proud omezovačem přepětí	A
$I_{US}$	Usekнутý proud vypínačem	A
l	Povrchová vzdálenost	m
L	Ochranná vzdálenost	m
S	Strmost přepět'ové vlny	V/s
$S_0$	Strmost přepět'ové vlny v místě úderu blesku	V/s
T	Doba vypnutí	s
$u_C$	Zotavené napětí	V
$u_P$	Odražená napět'ová vlna	V
$u_R$	Pohlcená napět'ová vlna	V
$u_t$	Prostupná napět'ová vlna	V
U	Napětí zdroje	V
$U_C$	Napětí trvale připojené na omezovače přepětí	V
$U_f$	Fázové napětí	V
$U_m$	Napětí sítě	V
$U_P$	Ochranná hladina omezovače přepětí	V
$U_S$	Sdružené napětí	V
$U_{RES}$	Zbytkové napětí na omezovači přepětí	V
v	Rychlost přepět'ové vlny	m/s
$W_T$	Energie tlumivky	J
$W_C$	Energie kondenzátoru	J

---

$X$	Reaktance kondenzátorové baterie	$\Omega$
$Z_1$	Impedance přívodního kabelu	$\Omega$
$Z_2$	Impedance spotřebiče	$\Omega$
$Z_P$	Impedance omezovače přepětí	$\Omega$
$Z_T$	Impedance transformátoru	$\Omega$
$\omega_0$	Vlastní kmitočet obvodu	Rad/s

# 1 ÚVOD

Elektrická energie hraje v našich životech nezastupitelnou roli. Bez elektrické energie si nedovedeme představit spoustu činností. Málokdo si uvědomuje, jak je na této komoditě závislý.

V dnešní době je energetická infrastruktura víceméně vybudovaná a našim úkolem je ji vhodně rozšiřovat a v neposlední řadě také chránit. Doba dřívější nehleděla na vhodnost investice, často se tak stávalo, že prvky elektroenergetické soustavy byly předimenzované. V dnešní době se v první řadě řeší ekonomický přínos. Výsledkem je tedy projektování zařízení, která jsou vhodná do dané aplikace, avšak jsou také ekonomicky udržitelná. Velkou roli v tomto případě hrají ochrany, které mají za úkol tyto velké energetické celky chránit a nedopustit tak jejich likvidaci v době jejich životnosti.

Důležitým prvkem ochrany jsou ochrany před přepětím. Jak bleskové výboje, tak i spínací operace se na vedeních vyskytují vcelku často. Jsou častým zdrojem přepětí a tím i poškození izolace, v nejhorším případě zničením zařízení. Pro ochranu před tímto s úspěchem montujeme svodiče přepětí, které jsou dále popisovány.

Druhá kapitola stručně pojednává o atmosférickém přepětí a více se zaměřuje na spínací přepětí. Jsou zde teoreticky analyzovány situace vypínání zkratů, malého induktivního proudu a zapínání a vypínání kapacitního proudu. Třetí kapitola si klade za cíl seznámit čtenáře se svodiči přepětí, a to jak s jejich variantou bleskojistek, tak i omezovačů přepětí. Dále jsou rozebírány především již zmiňované omezovače přepětí, jejich stabilita, konstrukce, doba ochlazení, parametry apod. Třetí kapitola je o testování svodičů přepětí. Typy zkoušek, které se provádí jen na vybraných kusech nebo také zkoušky, kterými projdou všechny kusy, či některé speciální testy. Pátá kapitola je zaměřena na rozváděče, jejich popis, charakteristiky a konstrukci.

## 2 PŘEPĚTÍ

Přepětí je taková hodnota napětí, která svou velikostí překračuje pro danou hladinu stanovenou mez. Mezi se zpravidla rozumí amplituda takového napětí.

### 2.1 Dělení přepětí

Přepětí můžeme dělit podle několika kritérií. Podle časového průběhu rozeznáváme přepětí trvalá, dočasná, přechodná a kombinovaná. Podle principu samotného vzniku rozeznáváme přepětí atmosférická a provozní.

#### 2.1.1 Atmosférická přepětí

Atmosférická přepětí vznikají vlivem úderu blesku do vedení. Už ze samotné podstaty tohoto tvrzení vyplývá, že zpravidla nejde určit jeho velikost. Jeho velikost nezávisí na hladině napětí, nýbrž na blízkost úderu blesku apod. V nedávné minulosti se prakticky všechny ochrany (izolace, izolační hladiny) proti zvýšeným hodnotám napětí dimenzovaly právě s ohledem na atmosférické přepětí. Často se stávalo, že zařízení byla z hlediska ochrany silně předimenzovaná. Nemělo tak smysl se dále zabývat provozními přepětími, které měly vzhledem k atmosférickým minimální velikost. S postupným zvyšováním napět'ových hladin a délek vedení se muselo začít řešit nejen přepětí atmosférické, ale i provozní.

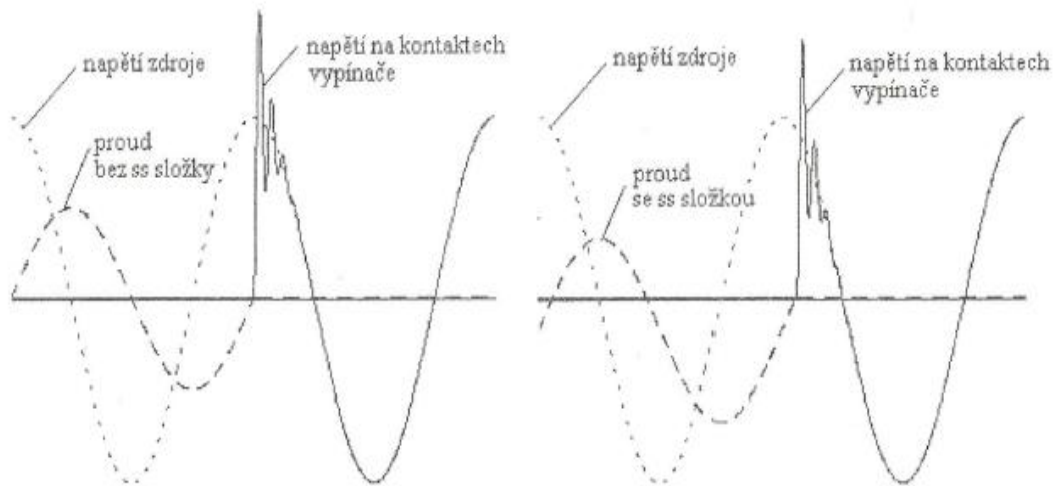
#### 2.1.2 Provozní přepětí

Provozní přepětí je způsobeno pochody uvnitř sítě a jeho velikost se odvíjí od napět'ové hladiny dané sítě. Mezi tyto pochody patří například spínací pochody při zapínání a vypínání kapacitních i indukčních zátěží, pochody při ztrátě zatížení, při vypnutí zkratu apod.

##### 2.1.2.1 Zotavené napětí

Zotavené napětí je napětí, které je spojovacím článkem mezi sítí a vypínačem. Objeví se po přerušení proudu mezi kontakty vypínače. Velikost tohoto napětí závisí na druhu a velikosti vypínaného proudu. Obecně lze říci, že nejvyšší mohou vzniknout při spínání malých a středních proudů kapacitního a induktivního charakteru a všech zkratových proudů. Naopak spínání proudů procházejícími odporovými zátěžemi je z hlediska přechodných jevů bezvýznamné.



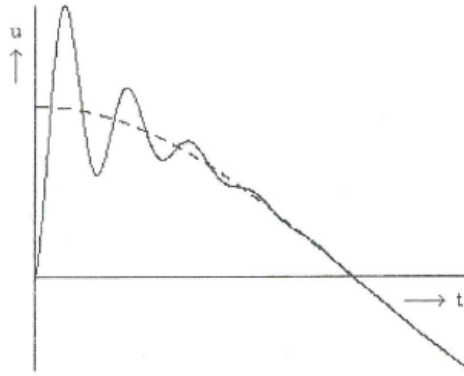


Obrázek 1 Schéma přerušování oblouku a vznik zotaveného napětí

Vypínač na základě povelu od ochrany vypíná. Kontakty se začínají oddalovat a vzniká mezi nimi oblouk. Existenci oblouku udržuje procházející proud. Při každém průchodu proudu nulou může dojít k uhasnutí oblouku. Vodivost vypínací dráhy se zmenšuje a vzrůstá napětí oblouku. Napětí oblouku je ve fázi s procházejícím vypínaným proudem, vzhledem k napětí zdroje je však posunuto o 90 stupňů.

Vliv oblouku na zotavené napětí, resp. jeho velikost je dána polaritou obloukového napětí vzhledem k napětí zdroje těsně před průchodem proudu nulou. Pokud jsou tyto polarities opačné, pak dochází ke zvětšení amplitudy zotaveného napětí. Přitom je ale potřeba vzít v potaz, že záporná charakteristika obloukového napětí naopak způsobí dřívější průchod proudu nulou. Mluvíme o tzv. jevu vnučené nuly. Tento jev pak vede ke snížení hodnoty zotaveného napětí. Konečný vliv obloukového napětí na zotavené napětí závisí na poměru těchto dvou jevů.

To, kolik cyklů bude trvat uhašení oblouku, závisí nejen na velikosti vypínaného proudu, ale také na konstrukci vypínače, na druhu zhášedla, rychlosti pohybu kontaktů apod. Obecně lze říci, že zotavené napětí je závislé také na samotném umístění vypínače v elektrizační soustavě. Záleží na parametrech sítě, a to její kapacitě a indukčnosti. Při malých hodnotách je rychlost vzrůstu napětí oblouku velmi velká. V případě, že je elektrická pevnost vypínací dráhy mezi kontakty vypínače menší, než je samotné napětí, není vypínač schopen zotavené napětí udržet a dojde k opětovnému vzniku oblouku. Napětí, které se objeví po přerušování oblouku na kontaktech vypínače, je dle Obrázku 1 [1] již zmiňované zotavené napětí. V levé části je zobrazeno vzniklé zotavené napětí při vypínání obvodu bez stejnosměrné složky, v pravé části pak je vypnutí obvodu se stejnosměrnou složkou. Z těchto dvou průběhů je patrné, že stejnosměrná složka je pro velikost zotaveného napětí výhodná, přispívá totiž k jeho zmenšení. Samotný průběh zotaveného napětí je na Obrázku 2 [1].



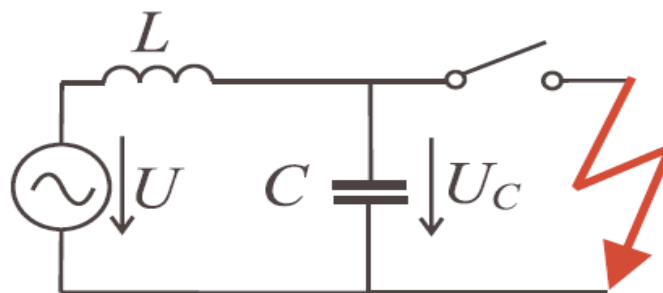
Obrázek 2 Průběh zotaveného napětí

Zotavené napětí se skládá ze složky přechodné a složky o průmyslovém kmitočtu. Složka přechodná je výsledkem vyrovnávání energie kondenzátoru a tlumivky, díky činnému odporu se velmi rychle utlumí.

### 2.1.2.2 Přepětí při vypínání zkratů

Zkrat je přechodný jev, na který musí být každý prvek elektrizační soustavy dimenzován, nejméně pak samotný vypínač. Zkrat dosahuje až několikanásobných hodnot oproti jmenovité hodnotě proudu.

Zkrat v obvodu je prakticky omezen jen indukčnostmi a kapacitami zdrojů a přívodů. Ochrany by v případě vzniku zkratu měly správně reagovat a dát povel k vypnutí vypínače. Kontakty vypínače se začnou oddalovat, ale to samo o sobě nestačí, aby došlo k přerušení zkratového proudu. Mezi kontakty vznikne oblouk. Ten se může přerušit dvakrát za periodu, při nulové hodnotě procházejícího zkratového proudu. Při každém průchodu proudu nulou roste napětí oblouku, které je vzhledem k odporové povaze ve fázi s procházejícím proudem, vytváří zhasínací špičku a má tendenci překmitnout na hodnotu napětí zdroje. Po odeznění oblouku bude tedy mezi kontakty vypínače napětí zdroje. Překmitávací pochod sebou přináší přechodný děj ve formě zvýšeného napětí. Toto napětí nazýváme dle předchozí kapitoly Zotavené napětí a jeho amplituda, při vypnutí v přirozené nule, může být až dvojnásobkem fázového napětí. Pokud bychom chtěli tento děj vyjádřit matematicky, pak vycházíme z následujícího Obrázku 3 [3].



Obrázek 3 Přepětí při vypínání zkratových proudů

Z druhého Kirchofova zákonu podle [3] plyne:

$$L \cdot \frac{di}{dt} + u_C = U \cdot (\sin \omega t + \varphi) \quad (2.1)$$

$$i = C \cdot \frac{du_C}{dt} \quad (2.2)$$

kde:  $u_C$  je napětí na kontaktech vypínače, které hledáme (zotavené napětí).

Dosadíme –li rovnici 2.2 do rovnice 2.1, dostaneme:

$$\frac{d^2 u_C}{dt^2} + \frac{1}{LC} \cdot u_C = \frac{U}{LC} \cdot \sin(\omega t + \varphi). \quad (2.3)$$

Platí:

$$\frac{1}{LC} = \omega_0^2. \quad (2.4)$$

Potom tedy:

$$\frac{d^2 \cdot u_C}{dt^2} + \omega_0^2 u_C = \omega_0^2 \cdot U \cdot \cos \omega t \quad (2.5)$$

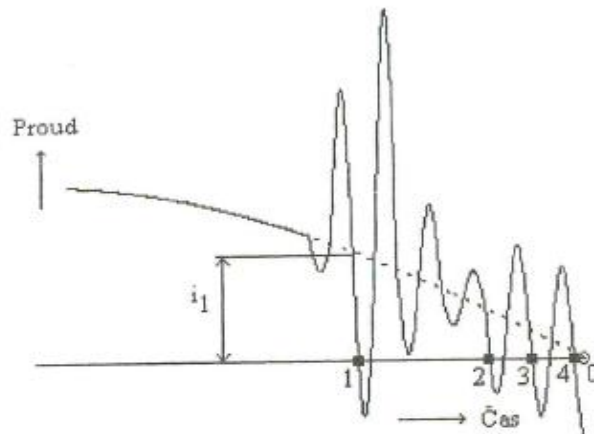
Řešení této rovnice je podle [3] následující:

$$u_C = U \cdot [\cos(\omega t + \varphi) - \cos(\omega_0 t + \varphi)] \quad (2.6)$$

### 2.1.2.3 Přepětí při vypínání malých induktivních proudů

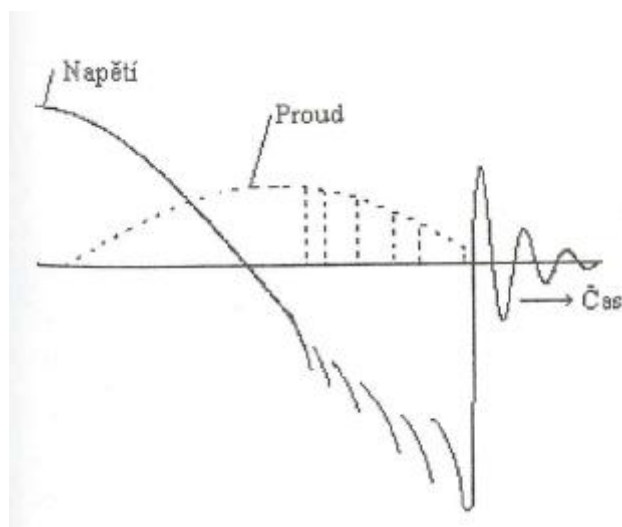
Malé induktivní proudy jsou proudy, s jejichž vypínáním se v elektrizační soustavě setkáváme poměrně často. Je to proud naprázdno, který prochází motorem s kotvou nakrátko nebo třeba transformátorem v režimu naprázdno. Napětí na těchto prvcích předbíhá proud o devadesát stupňů. Oproti zkratovým proudům, které jsou násobkem jmenovitého proudu, jsou malé induktivní proudy spíše jeho zlomkem.

Problémem u vypínání malých induktivních proudů je na rozdíl od vypínání zkratových proudů problematika tzv. vnucené nuly blíže popsána v kapitole 2.1.2.1. Tento jev způsobuje nestabilní hoření oblouku vlivem oscilací, díky kterým vypínače, dimenzované na vypínání mnohem větších proudů, často selhávají a vypínají dříve. Problémy nestabilního hoření oblouku a oscilací je znázorněn na Obrázku 4 [1]. Jsou zde znázorněny složky, které se superponují na proud základní harmonické. Díky těmto složkám proud prochází nulou dříve, než je jeho skutečná přirozená nula. Vypínač proto může nesprávně vypnout už v bodech znázorněných na obrázku arabskými číslicemi. Každé takové nesprávné vypnutí je však zdrojem přepětí vznikajících vlivem přelévání magnetické a elektrické energie.



Obrázek 4 Oscilace při nestabilním hoření oblouku

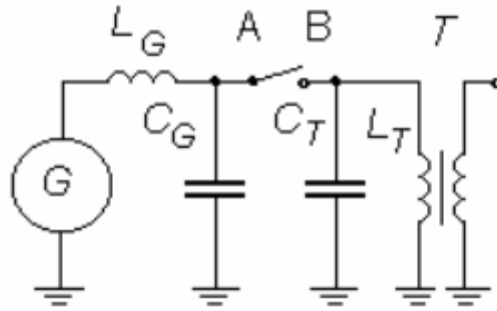
Vypnutí majoritně závisí na elektrické pevnosti vypínací dráhy. Zotavené napětí má charakteristický průběh zobrazený na Obrázku 5 [1]. Pilovitý průběh je dán opětnými zápaly.



Obrázek 5 Průběh zotaveného napětí při vypínání malých induktivních proudů

Podle [1] v reálných aplikacích nepřekračuje hodnota přepětí při vypínání malých induktivních proudů hodnotu 2 – 2,5 násobku amplitudy napájecího napětí.

Na Obrázku 6 [4] je znázorněn obvod transformátoru. Transformátor  $T$  s indukčností  $L_T$ , vypínač s kontakty  $A$  a  $B$ , kapacita transformátoru  $C_T$  a kapacita generátoru  $L_G$  a  $C_G$ .



Obrázek 6 Obvod transformátoru

Mějme modelovou situaci, kdy vypínač vypne napětí v okamžiku nula. Na kontaktu A bude napětí, které bude ovlivněno generátorem. Napětí kontaktu B však bude záviset na kmitočtu vybíjení kapacity transformátoru přes jeho indukčnost. Tento kmitočet je dán podle [4]:

$$f_T = \frac{1}{2\pi \cdot \sqrt{LC}} \quad (2.7)$$

Další situací je vypnutí vypínače v nenulové hodnotě. Rozdíl je v energii tlumivky, která již nebude nenulová. Podle [4] můžeme tuto energii vyjádřit vztahem:

$$W_T = \frac{1}{2} \cdot L_T \cdot I_{us}^2, \quad (2.8)$$

proud  $I_{us}$  je proud protékající cívkou v době useknutí. energii kondenzátoru pak vztahem:

$$W_C = \frac{1}{2} \cdot C_T \cdot U_P^2. \quad (2.9)$$

Dojde k periodickému nabíjení a vybíjení kondenzátoru  $C_T$ . Vztah pak můžeme přepsat na:

$$\frac{1}{2} \cdot L_T \cdot I_{us}^2 = \frac{1}{2} \cdot C_T \cdot U_P^2. \quad (2.10)$$

Úpravou vztahu dostaneme vzorec pro hodnotu napětí  $U_P$ :

$$U_P = I_{us} \cdot \sqrt{\frac{L_T}{C_T}}, \quad (2.11)$$

při zavedení předpokladu maximální hodnoty useknutého proudu v tlumivce platí, že

$$I_{us} = \frac{U_C}{Z_T}, \quad (2.12)$$

pak bude napětí  $U_P$  rovno:

$$U_P = \frac{U_C}{\omega \cdot L_T} \cdot \sqrt{\frac{L_T}{C_T}}, \quad (2.13)$$

což můžeme přepsat jako:

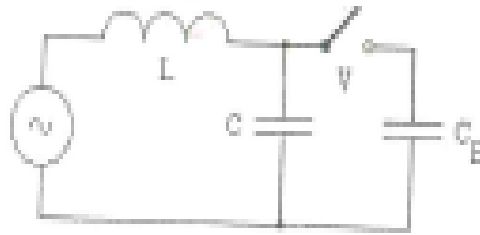
$$U_P = U_C \cdot \frac{f_T}{f}, \quad (2.14)$$

podle [4] dosahuje kmitočet  $f_T$  hodnot 300 až 600 Hz. Hodnota přepětí tedy může být v prvním okamžiku až 12–ti násobek napětí v ustáleném stavu.

#### 2.1.2.4 Přepětí při spínání kapacitních proudů

Kapacitní proudy jsou proudy, kde se napětí zpožďuje o devadesát stupňů za proudem. Přepětí se může objevit jak při vypínání, tak i zapínání kapacitních zátěží.

Problematika vzniku přepětí při zapínání kapacitních proudů je patrná z následujícího obrázku Obrázku 7 [1].



Obrázek 7 Obvod znázorňující spínání kapacitních proudů

Kapacitní zátěž zde tvoří kapacita  $C_B$ , která se připíná pomocí vypínače. Sepnutí vypínače má za následek proudový náraz, jehož velikost je omezena prakticky jen parametry zdroje. Dojde k oscilacím proudu daným velikostí indukčnosti zdroje a připínané kapacity. Možným řešením situace je instalace více kondenzátorů paralelně a postupným připínáním a odpínáním, popřípadě zařazení dalšího odporu nebo indukčnosti do série s vypínačem. Přepětí při připínání kapacitních zátěží nedosahuje zpravidla velikostí větší, než je dvojnásobek amplitudy napájecího napětí.

Přepětí při vypínání kapacitních proudů dosahuje větších hodnot. Pro vysvětlení bude sloužit opět Obrázku 8. Kapacita protékaná proudem je nabita na napětí, které je větší jak napětí zdroje o napětí vznikající na indukčnosti. Při vypnutí vypínače dojde ke vzniku oblouku, jehož trvání závisí na přerušení proudu vypínačem. Při uhasnutí se na levém kontaktu vypínače objeví napětí zdroje po odeznění přechodného děje mezi indukčností a kapacitou zdroje. Na pravém kontaktu zůstane napětí konstantní. Další průběh závisí na faktu, jestli dojde ke znovu zapálení oblouku. Pokud ano, pak je napětí na kapacitě opět sinusovka. Oscilace jsou však dány jen indukčností a kapacitou a jejich velikost dosahuje až trojnásobné velikosti napájecího napětí. Opět dochází k vypnutí a přerušení oblouku. Při dalším opětovném zápalu by pak velikost oscilace dosahovala až pěti násobku hodnoty napájecího napětí.

---

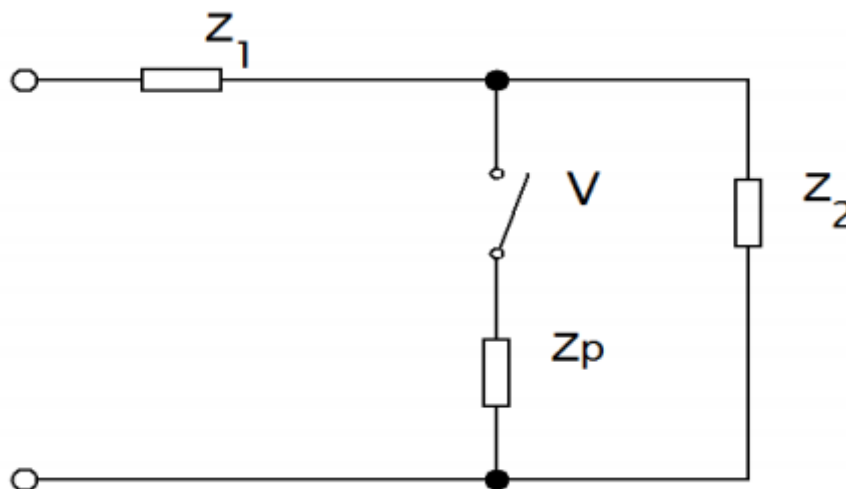
Velikost vzniklého přepětí se nedá přesně určit. Závisí na mnoha faktorech. Především na vlastnostech vypínače, na velikosti indukčnosti, vlastním kmitočtu obvodu apod. Amplitudy oscilací mohou být menší v případě použití více kapacit paralelně a jejich postupnému odpínání. Velikost napětí na kapacitě po vypnutí vypínače lze také snížit pomocí paralelně připojenému odporu nebo použitím odporového vypínače.

### 3 SVODIČE PŘEPĚTÍ

Svodiče přepětí slouží k ochraně zařízení, ke kterému jsou připojeny paralelně. V případě vzniku přepětí jsou schopny svést proud, který by mohl chráněné zařízení poškodit.

#### 3.1 Obecně o svodičích přepětí

Svodiče přepětí, jak již bylo řečeno v úvodu, slouží k ochraně zařízení před účinkem přepětí. Jejich princip je znázorněn na Obrázku 8. Impedance  $Z_2$  znázorňuje impedanci chráněného zařízení. Svodič přepětí reprezentuje vypínač  $V$  a impedance  $Z_p$ . V případě vzniku přepětí sepne spínač  $V$  a smyčka se stane vodivou, pokud zůstane rozepnut, pak má nekonečně velkou impedanci a tedy přepětí se nevyskytuje.



Obrázek 8 Princip činnosti svodiče přepětí

Proud, který poteče přes svodič přepětí, spočítáme podle 3.1 [1] vztahem:

$$I_p = \frac{U}{Z_p + (Z_1 \cdot Z_2) / (Z_1 + Z_2)} = \frac{Z_1 + Z_2}{Z_p \cdot Z_1 + Z_p \cdot Z_2 + Z_1 \cdot Z_2} \cdot U. \quad (3.1)$$

Napětí pak vypočteme podle vztahu 3.2 [1]:

$$U_p = I_p \cdot Z_p = \frac{Z_p \cdot (Z_1 + Z_2)}{Z_p \cdot Z_1 + Z_p \cdot Z_2 + Z_1 \cdot Z_2} \cdot U. \quad (3.2)$$

Hlavním činitelem umožňujícím omezovat proud je materiál odporů, z kterých je svodič vyroben. V dnešní době se můžeme setkat s karbidem křemíku nebo již častěji také s oxidem zinečnatým. Jejich volt – ampérové charakteristiky pak popisuje následující vztah podle 3.3 [1]:

$$I = k \cdot U^\alpha. \quad (3.3)$$



Exponent  $\alpha$  je materiálová konstanta nabývající různých hodnot. V případě karbidu křemíku je to rozpětí 2 až 6. U oxidu zinečnatého je to 20 až 50. Činitel  $k$  odpovídá napěťové úrovni, pro kterou je konkrétní svodič určen.

Pro návrh svodičů přepětí pro konkrétní napěťovou hladinu uvažujeme následující charakteristické parametry:

$U_C$  – napětí, které je trvale připojeno na svorky svodiče přepětí

$U_R$  – nejvyšší hodnota napětí, pro kterou je svodič konstruován nebo také napětí, které působí na svodič přepětí po dobu 10 s po předchozím namáhání

Platí, že:

$$\frac{U_C}{U_R} = 0,8. \quad (3.4)$$

$U_P$  – ochranná hladina svodiče přepětí, je charakterizována jako nejvyšší hodnota napětí při průtoku jmenovitého výbojového proudu.

Platí, že:

$$U_P = 3,33 \cdot U_C. \quad (3.5)$$

$BIL$  – základní izolační hladina, definované jako maximální napětí, kterému je zařízení schopno odolat.

$U_{RES}$  – zbytkové napětí vyvolané průchodem jmenovitého výbojového proudu

$I_N$  – jmenovitý výbojový proud, hodnota je 5, 10 nebo 20 kA

Třída vybití vedení – je schopnost omezovače svést energii výbojového proudu s příslušným tvarem a amplitudou.

## 3.2 Ochranná vzdálenost svodiče přepětí

### 3.2.1 Teorie šíření vln a rozhraní

Energie se po vedení šíří prostřednictvím proudových a napěťových vln, u bezztrátového vedení je energie vedena pouze prostřednictvím elektromagnetického pole indukčnosti a kapacity. Při prostupu vedením naráží postupná vlna ( $u_p, i_p$ ) na další zdroje, zátěže nebo prvky elektrizační soustavy, či uzly. Všechny tyto místa znamenají pro vlnu impedanční rozhraní a dochází zde ke změně amplitudy proudu nebo napětí ekvivalentně k velikosti vlnové impedance daného prvku. Při styku vlny s impedančním rozhraním dochází k jevu, kdy část vlny projde vedením dále, mluvíme o vlnách procházejících ( $u_t, i_t$ ) a část se odrazí, mluvíme o vlnách odražených ( $-u_r, -i_r$ ) nebo také zpětných. Celková hodnota energie vln je dána součtem energií vln postupných a odražených.

Podle [3] platí, že:

$$u_p + u_r = u_t, \quad (3.6)$$

$$i_p + i_r = i_t. \quad (3.7)$$

S využitím ohmova zákona můžeme rovnici 3.7 dále upravit:

$$\frac{u_p}{Z_{v1}} - \frac{u_r}{Z_{v1}} = \frac{u_p + u_r}{Z_{v2}}, \quad (3.8)$$

$$\frac{u_p}{Z_{v1}} - \frac{u_p}{Z_{v2}} = \frac{u_r}{Z_{v1}} + \frac{u_r}{Z_{v2}}, \quad (3.9)$$

$$u_r = \frac{Z_{v1} - Z_{v2}}{Z_{v1} + Z_{v2}} \cdot u_p. \quad (3.10)$$

Podobně pak můžeme pro  $u_t$  podle [3] psát:

$$u_t = \frac{2 \cdot Z_{v2}}{Z_{v1} + Z_{v2}} \cdot u_p. \quad (3.11)$$

Na základě prostupnosti jednotlivých částí a prvku elektrizační soustavy se stanovují činitele charakterizující poměry vln prošlých, odražených a postupných.

### 3.2.2 Činitel odrazu napětí a proudu

Činitel odrazu napětí je poměr mezi vlnami odraženými a vlnami dopadajícími na rozhraní. S využitím vztahu 3.10 a 3.11 můžeme psát:

$$\rho_U = \frac{u_r}{u_p} = \frac{Z_{v1} - Z_{v2}}{Z_{v1} + Z_{v2}}, \quad (3.12)$$

$$\rho_I = \frac{i_r}{i_p} = \frac{Z_{v2} - Z_{v1}}{Z_{v1} + Z_{v2}}. \quad (3.13)$$

### 3.2.3 Činitel prostupu napětí a proudu

Činitel prostupu napětí je poměr mezi napětím vlny prošlé rozhraním a vlny, která dopadá na rozhraní.

$$\sigma_U = \frac{u_t}{u_p} = \frac{2 \cdot Z_{v2}}{Z_{v1} + Z_{v2}}, \quad (3.14)$$

$$\sigma_I = \frac{i_t}{i_p} = \frac{2 \cdot Z_{v1}}{Z_{v1} + Z_{v2}}. \quad (3.15)$$

Pomocí výše uvedených činitelů můžeme řešit různá rozhraní.

### 3.2.4 Rozhraní vedení - kabel

Rozhraní mezi kabelem a vedením jsou jedny z nejhorších rozhraní, které se mohou v elektrizační soustavě vyskytnout. V [3] se udává, že poměr impedance venkovního vedení a impedance kabelu je 9. To tedy znamená, že venkovní vedení má až 9-ti násobnou velikost impedance oproti kabelu. Vlna tedy prochází z prostředí o vyšší vlnové impedanci do prostředí o vlnové impedanci nižší. S pomocí 3.12 a 3.13. můžeme psát:

$$\rho_U = \frac{u_r}{u_p} = \frac{Z_{v2} - 9Z_{v2}}{9Z_{v2} + Z_{v2}} = -\frac{8}{10} = -\frac{4}{5}, \quad (3.16)$$

$$\rho_I = \frac{i_r}{i_p} = \frac{9Z_{v2} - Z_{v2}}{9Z_{v2} + Z_{v2}} = \frac{8}{10} = \frac{4}{5}. \quad (3.17)$$

A s pomocí 3.14 a 3.15 můžeme psát:

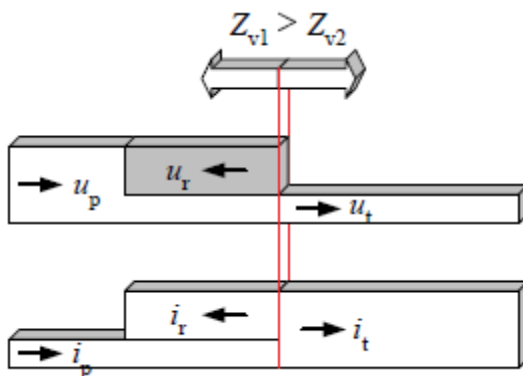
$$\sigma_U = \frac{u_t}{u_p} = \frac{2Z_{v2}}{9Z_{v2} + Z_{v2}} = \frac{2}{10} = \frac{1}{5}, \quad (3.18)$$

$$\sigma_I = \frac{i_t}{i_p} = \frac{2 \cdot 9Z_{v2}}{9Z_{v2} + Z_{v2}} = \frac{18}{10} = \frac{9}{5}. \quad (3.19)$$

Ze vztahů 3.16 až 3.19 vyplývá, že vlna napětí dopadající na toto rozhraní, se ze 4/5 odrazí zpět a dojde tak ke snížení napětí  $u$  a z 1/5 vlna prostupuje dále do kabelu.

Proudová vlna se odrazí se stejnou polaritou, a to ze 4/5, dojde tak k faktickému zvýšení  $i$ , ovšem 9/5 proudové vlny projde dále do kabelu.

Popisovanou situaci znázorňuje obrázek 9 [3].



Obrázek 9 Rozhraní vedení - kabel

U případu rozhraní mezi kabelem a vedením, kdy vlna prostupuje směrem od kabelu k vedení je situace přesně opačná. Vlna jde z prostředí o menší vlnové impedanci do prostředí o vyšší vlnové impedanci. Pro činitele odrazu napětí můžeme psát:

$$\rho_U = \frac{u_r}{u_p} = \frac{9Z_{v1} - Z_{v1}}{9Z_{v1} + Z_{v1}} = \frac{8}{10} = \frac{4}{5}, \quad (3.20)$$

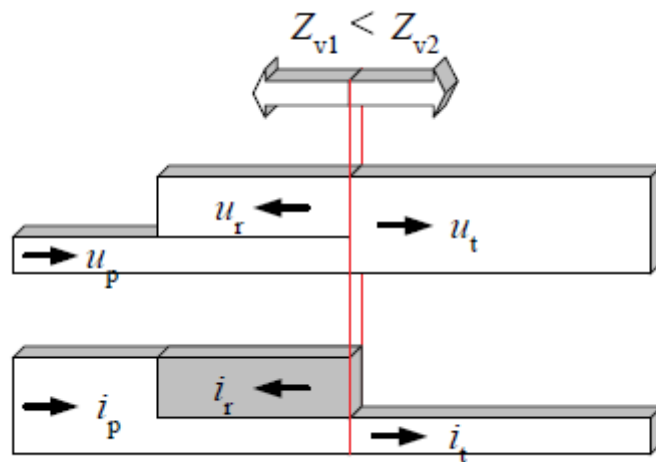
$$\rho_I = \frac{i_r}{i_p} = \frac{Z_{v1} - 9Z_{v1}}{9Z_{v1} + Z_{v1}} = -\frac{8}{10} = -\frac{4}{5}. \quad (3.21)$$

Pro činitele prostupu:

$$\sigma_U = \frac{u_t}{u_p} = \frac{2 \cdot 9Z_{v2}}{9Z_{v2} + Z_{v2}} = \frac{18}{10} = \frac{9}{5}, \quad (3.22)$$

$$\sigma_I = \frac{i_t}{i_p} = \frac{2 \cdot Z_{v2}}{9Z_{v2} + Z_{v2}} = \frac{2}{10} = \frac{1}{5}. \quad (3.23)$$

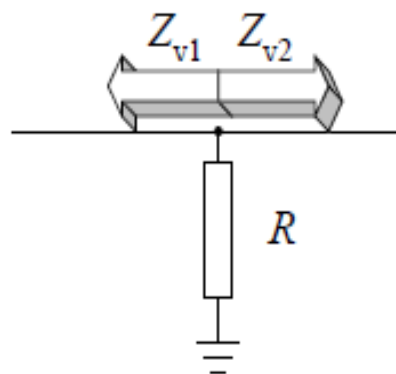
Na Obrázku 10 [3] je popisovaná situace znázorněna graficky:



Obrázek 10 Rozhraní kabel - vedení

### 3.2.5 Odpor napříč

Popisovaná situace odporu napříč je na Obrázku 11 [3].



Obrázek 11 Odpor napříč

Z Kirchoffových zákonů podle Obrázku 11 plyne:

$$i_p + i_r = i_t + i_R \quad (3.24)$$

Díky ohmovu zákonu můžeme psát:

$$\frac{u_p}{Z_{v1}} - \frac{u_r}{Z_{v1}} = \frac{u_t}{Z_{v2}} + \frac{u_t}{R} \quad (3.25)$$

Podle [3] bude činitel prostupu a odrazu pro napětí:

$$\sigma_U = \frac{u_t}{u_p} = \frac{\frac{2}{Z_{v1}}}{\frac{1}{Z_{v1}} + \frac{1}{Z_{v2}} + \frac{1}{R}}, \quad (3.26)$$

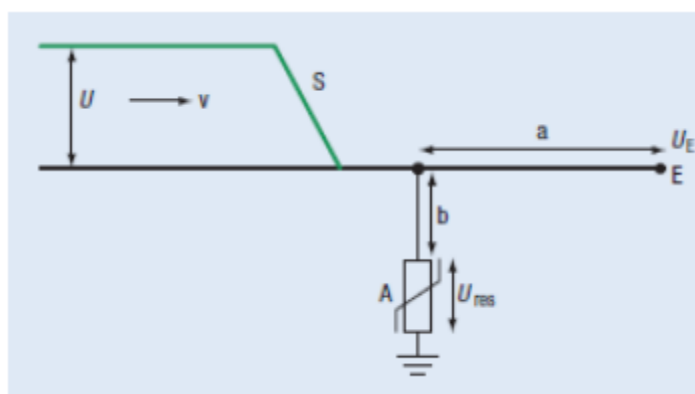
$$\rho_U = \frac{u_r}{u_p} = \frac{\frac{1}{Z_{v1}} - \frac{1}{Z_{v2}} - \frac{1}{R}}{\frac{1}{Z_{v1}} + \frac{1}{Z_{v2}} + \frac{1}{R}}, \quad (3.27)$$

z toho plyne, že napětí vlny prostupující do druhého prostředí je přímo úměrné velikosti odporu, tedy se snižováním hodnoty tohoto odporu klesá také velikost napětí prostupující do dalšího prostředí.

### 3.2.6 Výpočet ochranné vzdálenosti

Ochranná vzdálenost charakterizuje vzdálenost svodiče přepětí od chráněného zařízení, tak aby jeho funkce byla spolehlivá.

Na Obrázku 12 [2] je situace na vedení, ke kterému je připojen svodič přepětí A.



Obrázek 12 Schéma ochranné vzdálenosti svodiče přepětí

Tento svodič přepětí má definované napětí  $U_p$ . Po vedení jde napěťová vlna o velikosti napětí  $U$  o strmosti  $S$  a rychlosti  $v$ . V místě označeném jako  $E$  je definované chráněné zařízení. Úkolem je zjistit velikost vzdáleností  $a$  a  $b$ . Podle [2] lze pro napětí  $U_E$  psát:

$$U_E = U_P + \frac{2 \cdot S \cdot (a + b)}{v}. \quad (3.28)$$

Pokud zahrneme do úvahy také izolační hladinu svodiče přepětí *BIL* a činitel  $K_S$ , což je ochranný činitel beroucí do úvahy výdržné napětí izolace, tak platí, že:

$$\frac{BIL}{K_S} \geq U_E, \quad (3.29)$$

kde  $K_S$  může nabývat hodnot od 1 do 1,2 v souvislosti s místem použití. Vzdálenost  $L$  je prostým součtem dílčích vzdáleností:

$$L = a + b. \quad (3.30)$$

Úpravou vztahu 3.28 a dosazením hodnoty 1,2 za  $K_S$  dostaneme následující vztah:

$$L = \frac{v}{2 \cdot S} \cdot \left( \frac{BIL}{1,2} - U_P \right). \quad (3.31)$$

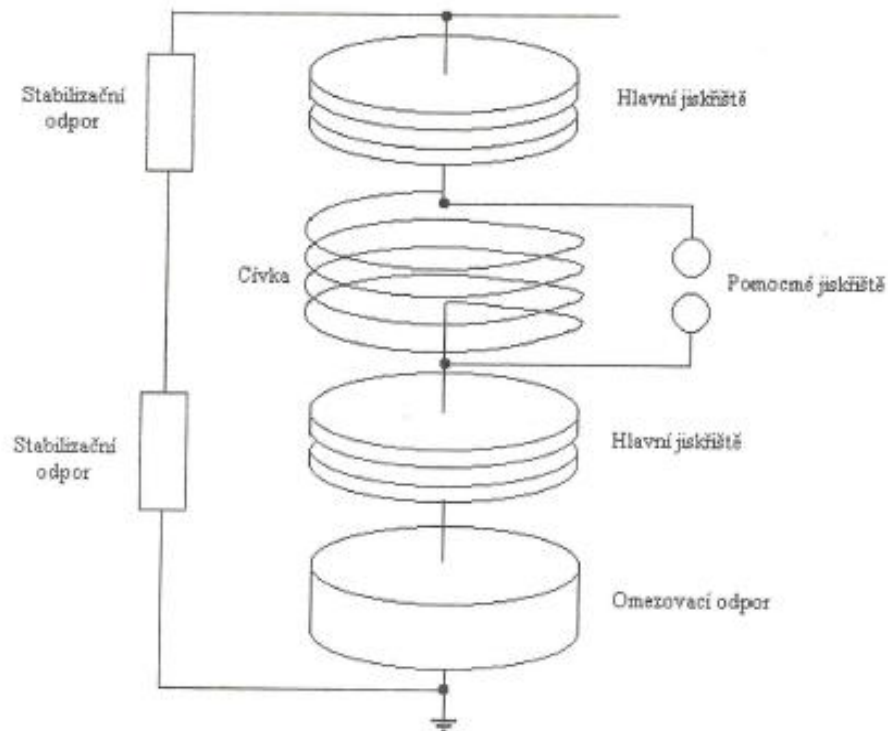
Vztah 3.31 můžeme prohlásit za vztah vedoucí k výpočtu ochranné vzdálenosti  $L$ .

### 3.3 Technologie svodičů přepětí

Svodiče přepětí můžeme dále dělit na bleskojistky a omezovače přepětí.

#### 3.3.1 Bleskojistky

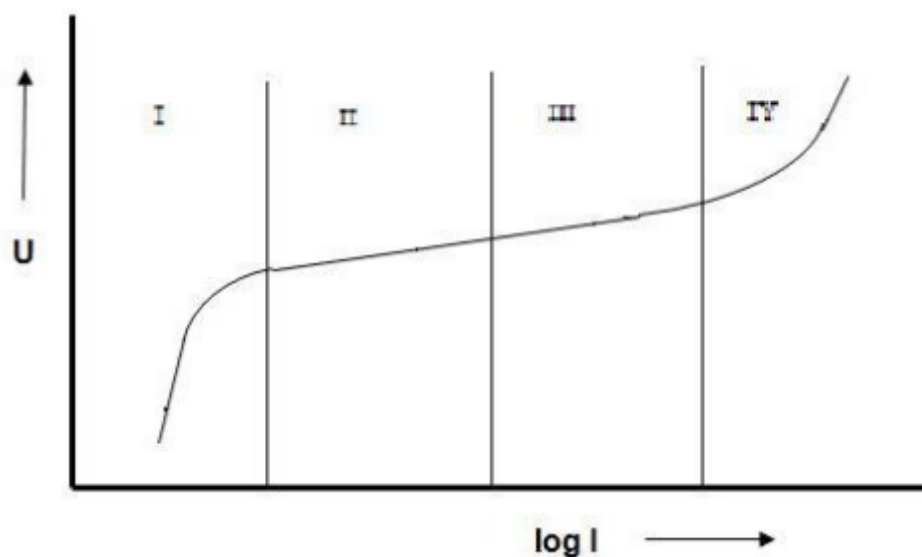
Bleskojistky firma ABB už od poloviny 80 – tých let do svých aplikací nemontuje. V mnoha případech je však ještě stále na mnoha místech najdeme. Fungují na principu jiskřiště. V mnoha ohledech prošly vývojem a v dnešních aplikacích prakticky potkáme jen jejich nejmodernější zástupce, a to ventilové bleskojistky. Základem ventilové bleskojistky je jiskřiště, které za neporuchového stavu slouží jako oddělovací prvek a jeho velká impedance zajistí dokonalé oddělení. V případě vzniku přepětí se jiskřiště zapálí a omezovací odpory se připojí. Právě vlastnosti jiskřiště předurčují, při jakém napětí začne bleskojistka pracovat. Bleskojistka se dále, kromě již zmíněného jiskřiště a omezovacích odporů, skládá ze stabilizačních odporů, cívky a pomocného jiskřiště. Příklad ventilové bleskojistky je na Obrázku 13 [1].



Obrázek 13 Konstrukce ventilové bleskojistky

### 3.3.2 Omezovače přepětí

Omezovače přepětí představují moderní variantu ochrany před přepětím. Místo jiskříště, které se využívá u bleskojistek, jsou opatřeny extrémně nelineárními odpory z oxidů kovů. Dnes již výhradně z oxidu zinečnatého. Při bezporuchovém provozu mají velmi velký odpor, při zvyšujícím se napětí na chráněné zátěži odpor klesá. Charakteristika je znázorněna na Obrázku 14 [1].



Obrázek 14 Charakteristika omezovače přepětí

Charakteristika je znázorněna do čtyř segmentů (pracovních oblastí). Každý segment znázorňuje oblast působení určitého druhu přepětí. Tvar charakteristiky se také v každé pracovní oblasti získává jiným druhem měření.

První oblast označená *I* je oblastí působení trvalého provozního přepětí, které bývá způsobeno nesprávným nastavením odboček. Je to přepětí síťové frekvence s konstantní efektivní hodnotou. Proud bývá kolem 2 mA a činitel  $\alpha$  dosahuje hodnoty 2 až 4. Pro měření použijeme střídavého i stejnosměrného napětí.

Druhá oblast označená *II* je oblast dočasných přepětí. Typickým příkladem je například zemní spojení. Doba trvání tohoto přepětí síťové frekvence se odhaduje od 0,03 až do 3600 s. Proud je do 2 A a činitel  $\alpha$  nabývá hodnot 15 až 20. Pro měření použijeme střídavého i stejnosměrného napětí, stejně jako u předchozího případu.

Třetí oblast *III* je oblast spínacích přepětí vzniklých při zapínání a vypínání zkratů, indukčních a kapacitních zátěží. Více se této problematice věnuje předchozí kapitola. Důležité je, že proudy dosahují hodnot až 2 kA a  $\alpha$  je 15 až 25. Křivka v této oblasti se měří pomocí impulsů.

Poslední oblastí je oblast *IV*. Jedná se o oblast výskytu atmosférických přepětí. Proudů jsou přes 2 kA a málokdy můžeme přesně určit, jak velké budou. Činitel  $\alpha$  bude 7 až 10, křivka se měří pomocí impulsů.

### 3.4 Konstrukce svodičů přepětí ABB

V předchozí kapitole byly teoreticky uvedeny základní poznatky týkající se problematiky svodičů přepětí. Byly uvedeny základní principy, podle kterých se zařízení chrání před účinky přepětí, charakteristiky omezovačů přepětí a základní materiály.



Omezovače firmy ABB jsou složeny z aktivní a pasivní části. Aktivní část je složena z několika odporových bloků, pasivní část je plášť zajišťující jak mechanickou, tak hlavně i izolační ochranu. Rozeznáváme tři odlišné druhy konstrukcí svodičů přepětí.

- Sklolaminátová trubka – musí být přítomen systém uvolnění vnitřního přetlaku.
- Aktivní část je obalena skelnou tkaninou, díky které je celá náplň tuhý blok. Na tomto systému je navlečen samotný plášť z polymeru. Nevýhodou jsou dva rozdílné materiály, tedy více stykových ploch a při přetížení se může roztrhnout.
- Aktivní část je k sobě mechanicky svázána pomocí smyček. Následně je na ni nalisována silikónová hmota. Velkou výhodou je nemožnost roztržení vlivem přetížení nebo nečistot díky řešení bez vzduchových mezer. Omezovače přepětí ABB jsou vyrobeny právě touto technologií.

### 3.4.1 Aktivní část

Na Obrázku 15 [2] jsou znázorněny odporové bloky tvořící v omezovači přepětí aktivní část. Jak již bylo uvedeno v předchozích kapitolách, odporové bloky se dnes dělají převážně z oxidu zinečnatého (ZnO).



Obrázek 15 Odporové bloky

Výška bloků určuje energetickou absorpci a velikost napětí  $U_C$ , na které může být omezovač připojen. Pohybuje se řádově mezi 23 mm až 46 mm. Průměr bloků zase velikost proudu, který může svést. Dosahují hodnot mezi 38 mm až 75 mm. Pozor je třeba dát na kapacitu každého jednotlivého odporového bloku k zemi. Tato rozptylová kapacita způsobuje nelinearitu v rozložení napětí  $U_C$ . U omezovačů s více odporovými bloky ve sloupci, tedy na vyšší napětí, typicky VVN, je pak nutné použít potenciální kruhy. Aktivní část omezovače přepětí je znázorněna na Obrázku 16 [2].

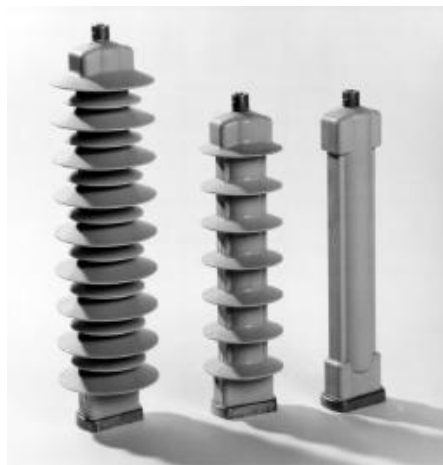


Obrázek 16 Aktivní část omezovače přepětí

### 3.4.2 Pasivní část

Pasivní částí omezovače přepětí rozumíme jeho obal (izolaci). Tato izolace má za úkol, kromě již evidentních izolačních vlastností, bránit omezovač přepětí také proti mechanickému poškození. Tento obal bývá zpravidla ze silikonu. Výhodou je jeho naprostá vodooodpudivost, zbytky kapek, které ulpí na povrchu, jsou pak odstraněny pomocí gravitace nebo síly větru. Další výhodou je nepřítomnost uhlovodíku a zamezení vzniku vodivých drah.

Díky výše zmíněným vlastnostem jsou povrchové svody omezovačů přepětí extrémně nízké. Z toho plyne také fakt, že je můžeme s dobrou spolehlivostí také použít jako podpěrné izolátory. Na Obrázku 17 [2] je znázorněn omezovač přepětí jako kompletní součást se silikonovou pasivní částí.



Obrázek 17 Omezovače přepětí MWK a MWD

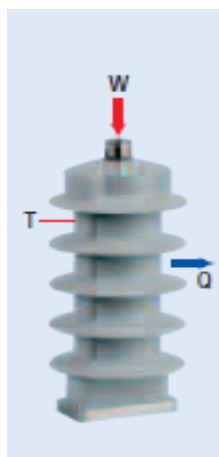
### 3.5 Doba ochlazení

Pro spolehlivou práci omezovače přepětí se zavádí podmínka, která stanoví, že absorpční schopnost omezovače přepětí musí být vyšší jak energetické namáhání, které se může v síti vyskytnout. Jsou případy, kdy však nelze dopředu předvídat velikost tohoto namáhání, je tomu tak například při úderu blesku. V těchto případech musí být mezi jednotlivými namáháními dostatečná časová prodleva. V případě úderu blesku by však tato podmínka měla být splněna, vzhledem k náhodnému výskytu bleskového výboje. Doba ochlazení také závisí na aktuální teplotě okolí a připojeném napětí. U obou těchto parametrů platí, že čím vyšší, tím horší negativnější dopad na dobu ochlazení. Garantované hodnoty pro  $U_C$  jsou platné až do teploty 45 stupňů.

Při překročení kritických parametrů je důležitý materiál, z kterého je omezovač vyroben. U porcelánových omezovačů může dojít v nejhorsím případě až k explozi vlivem přetlaku ve vzduchové mezeře. U omezovačů se silikonovým polymerovým pláštěm k explozi dojít nemůže. Nejsou zde totiž žádné vzduchové mezery, ve kterých by tlak nebezpečně stoupl. Dojde však k roztavení části pláště a ke vzniku sekundárních oblouků vně omezovače.

### 3.6 Stabilita svodičů přepětí

Na Obrázku 18 [2] jsou znázorněny základní veličiny důležité z hlediska stability svodiče přepětí. Parametr  $W$  znázorňuje energii vstupní, reprezentovanou mimo jiné také napětím, které je trvale připojeno na tento omezovač – napětí  $U_C$ . Dalším důležitým parametrem je teplota  $T$ , na které závisí ztráty. Je evidentní, že ztráty rostou exponenciálně se vzrůstající teplotou. Směrem z aktivní části se přes plášť dostává mimo samotný svodič energie  $Q$ , která reprezentuje ochlazování. Pokud je vstupní energie vyšší, než energie ochlazovací, pak se svodič dostává přes svůj kritický bod a může dojít až k jeho destrukci. V opačném případě, kdy ochlazování probíhá rychleji, než zahřívání, dochází po odeznění přechodného děje k mnohem rychlejšímu návratu svodiče přepětí do stabilního provozu.

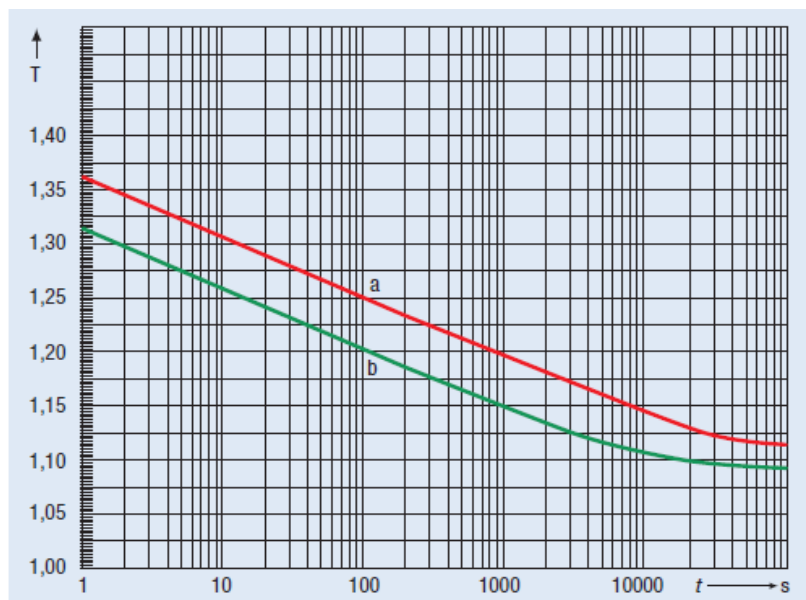


Obrázek 18 Stabilita omezovače přepětí

### 3.7 Dočasné přepětí

Dočasná přepětí jsou přepětí limitované délky. Objevují se během spínacích operací nebo zemních spojení. U sítí izolovaných a kompenzovaných se mohou objevovat až po několik hodin. Jejich velikost závisí na systémové konfiguraci. Omezovače přepětí jsou schopny snést toto

přetížení několikrát periodicky za sebou. Na Obrázku 19 [2] jsou ochranné charakteristiky svodiče přepětí. Je zde znázorněn parametr  $T$ , který je poměrem mezi dočasným napětím  $U_{TOV}$  a  $U_C$ . Na Křivce  $a$  je svodič přepětí bez předchozího zatížení, na křivce  $b$  omezovač zatížen definovanou energií.



Obrázek 19 Ochranné charakteristiky omezovače přepětí

### 3.8 Servisní podmínky

Životnost omezovače přepětí může být až 30 let. Negativně se však na délce životnosti může podepsat hned několik faktorů. Jsou to tzv. abnormální provozní podmínky. Mezi tyto podmínky podle [5] patří:

- Teplota nad 40 nebo naopak pod minus 40 stupňů.
- Nadmořská výška pod 1 metr nad mořem.
- Frekvence menší jak 48 Hz nebo naopak vyšší jak 62 Hz.
- Rychlost větru vyšší jak 24 m/s.
- Jiná než vertikální pozice.
- Velké znečištění prostředí.
- Vysoká vlhkost.
- Výbušné prostředí.
- Neobvyklé mechanické podmínky.

Svodiče přepětí jsou garantovány do hodnoty 40 stupňů, to zároveň zahrnuje maximální sluneční svit v hodnotě  $1,1 \text{ kW/m}^2$ . Pokud by se v blízkosti vyskytl zdroj tepla, muselo by se napětí  $U_C$  uvažovat o dvě procenta vyšší na každých  $5 \text{ }^\circ\text{C}$ . Toto pravidlo však platí jen do hodnoty  $80 \text{ }^\circ\text{C}$ .

V případě znečištěného prostředí a velké vzdušné vlhkosti jsou dnešní svodiče přepětí vybaveny mnohem lépe. Jejich silikonový plášť působí jako odpuzovač nečistot mnohem lépe než ten porcelánový.

### 3.9 Výhody a nevýhody omezovačů přepětí a bleskojistek

Mezi výhody omezovačů přepětí patří:

- Nepřítomnost jiskřiště, což má za následek odpadnutí poruch jím způsobených.
- Odporové bloky nepotřebují zapalovací napětí a tím také dochází k dřívějšímu omezení přepětí.
- Při kontrole stavu se nemusí odpojovat od sítě.
- Vyšší odolnost vůči znečištění.
- V případě paralelní spolupráce se jejich práce rovnoměrně rozdělí.

## 4 TESTOVÁNÍ

Omezovače přepětí jsou testovány vzhledem k platným standardům IEC a ANSI. Jsou prováděny 4 druhy testů. Jsou to:

- Testy typové.
- Testy kusové.
- Testy přejímací.
- Testy speciální.

### 4.1 Testy typové

Typové testy se zpravidla aplikují po ukončení vývoje svodiče. Jsou zárukou, že svodič bude správně pracovat na dané napěťové hladině nebo v dané aplikaci. Tyto testy se dále zařazují v případě změny konstrukce svodiče přepětí, která by zapříčinila změny vlastností.

Mezi typové zkoušky patří:

Klimatická zkouška stárnutí – test demonstruje schopnost svodičů zvládnout specifické klimatické podmínky. Provádějí při provozu po dobu jedné hodiny ve slaném prostředí, pod UV zářením, v prostředí s vysokou vlhkostí cyklicky po dobu 24 hodin. Test je prohlášen za uskutečněný, pokud se neobjeví žádné trhlinky na plášti nebo další defekty.

Zkouška vniknutí vlhkosti - test je zaměřen na odolnost proti vniknutí vlhkosti. Svodič je namáhán v různých směrech různou teplotou. Pak je omezovač ponořen do vařící vody na 42 hodin. Pak jsou parametry porovnány s referenčními.

Zkouška ohybu – test zkoumá schopnost svodičů přepětí odolat torznímu zatížení.

Zkouška zkratové odolnosti – test je zaměřen na odolnost svodiče přepětí proti zkratu a hlavně proti explozi. V provozu není žádoucí, aby k explozi došlo za jakýchkoliv podmínek.

Provozní zkouška – v provozu musí být svodič schopen odolávat různým vlivům. Tato zkouška má za úkol testovat svodiče přepětí vysokými proudovými impulsy. Pro úspěšné zvládnutí zkoušky musí být zachována teplotní stabilita svodiče přepětí; zbytkové napětí měřené před a po zkoušce by se nemělo změnit o více jak 5 procent.

Zrychlená zkouška stárnutí – tento test se provádí na odporových blocích. Bloky musí snést napětí vyšší jak napětí  $U_C$  a teplotu vyšší jak 115 °C po dobu 1000 hodin. Sleduje se přitom, jak vzrostou ztráty. Právě charakter ztrát naměřený na svodiči přepětí charakterizuje chování svodiče přepětí během celé jeho životnosti.

### 4.2 Testy kusové

Testy kusové jsou aplikovány na každý jednotlivý svodič přepětí nebo jeho část. Mezi testy kusové patří:

Měření referenčního napětí – referenční napětí je měřeno pomocí referenčního proudu specifikovaného výrobcem. Výsledné naměřené veličiny musí být v rozsahu, který dodává opět výrobce.

Zkouška zbytkového napětí – zbytkové napětí je měřeno na každém odporovém bloku proudem 10 kA po dobu 8 mikrosekund. Celkové zbytkové napětí je pak dáno součtem jednotlivých naměřených napětí na každém odporovém bloku ve svodiči přepětí.

Zkouška částečných výbojů – provádí se na každé jednotce. Při přiloženém napětí  $1,05 U_C$  nesmí být velikost vnitřních výbojů vyšší jak 10 pC. Toto stanovuje norma IEC.

Zkouška těsnosti – zkoumá těsnost. Neprovádí se však u silikonových svodičů přepětí.

Zkouška rozložení proudu – provádí se u svodičů přepětí, kde jsou odporové bloky paralelně.

### 4.3 Testy přejímací

Standartní přejímací testy zahrnují měření referenčního napětí, měření zbytkového napětí a test vnitřních výbojů.

### 4.4 Testy speciální

Tyto testy se provádí jako součást vývoje svodiče přepět v kooperaci s výzkumnou laboratoří a zákazníkem. Mají za úkol charakterizovat chování svodičů přepětí při speciálních podmínkách provozu.

Mezi jeden ze speciálních testů patří testování teploty. Tento test garantuje výdrž svodiče přepětí až do minus 60 stupňů, včetně extrémně rychlých změn teplot až o 40 stupňů. Zajištěna je stálá konstrukce a elektrické a mechanické vlastnosti. Povrch by také neměl být poškozen cyklickým zatěžováním mrazem.

Mezi další testy patří test vlhkosti nebo test chování v ohni.

## 5 ROZVÁDĚČE ABB

Rozváděče jsou dnes nedílnou součástí elektrizační soustavy. Nabízejí velmi dobrou alternativu ke kobkovým rozvodnám. Oproti těmto mají několik zásadních výhod. Jsou to především úspora místa a také bezpečnostní kritéria. V portfoliu firmy ABB se nachází několik jednotek rozváděčů. Za zmínku stojí především UniGear ZS1 a UniGear 550. První zmiňovaný bude v práci dále podrobněji rozebrán.

### 5.1 UniGear ZS1

UniGear ZS1 je rozváděč určen pro oblast VN. Je to vzduchem krytý izolovaný rozváděč. Použití má velmi široké, jak ve službách, tak i průmyslu. Na Obrázku 20 [5] je znázorněno pole těchto rozváděčů.



*Obrázek 20 Pole rozváděčů UniGear ZS1*

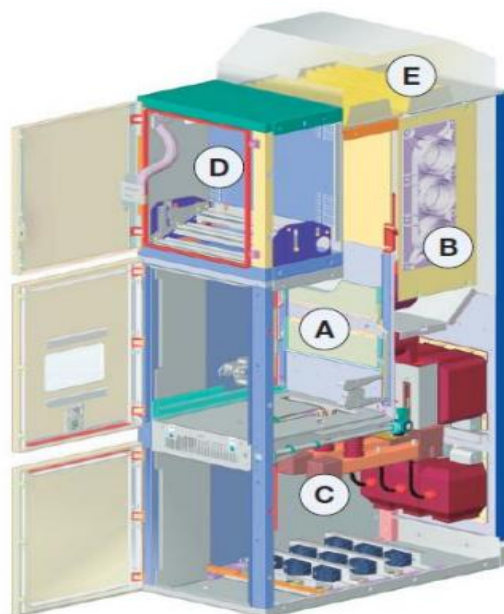
Pro bezchybnou funkci jsou pro tyto rozváděče definovány parametry podle Tab. 4-1 [4].



Tabulka 1 Parametry rozváděčů ZSI

Jmenovité izolační napětí	kV	7,2	12	17,5	24
Jmenovité krátkodobé výdržné st. napětí (1 min)	kV	20	28	38	50
Jmenovité výdržné nap. při atmos. impulsu	kV	60	75	95	125
Jmenovitý kmitočet	Hz	50-60	50-60	50-60	50-60
Jmenovitý krátkodobý výdržný proud (3s)	kA	50	50	50	31,5
Jmenovitý dynamický proud	kA	125	125	125	80
Výdržný proud při vnitřním obloukovém zkratu (1s)	kA	50	50	50	31,5
Jmenovitý proud hlavních přípojníc	kA	4000	4000	4000	3150
Jmenovitý proud připojení odbočky	kA	630	630	630	630
		1250	1250	1250	1250
		1600	1600	1600	1600
		2000	2000	2000	2000
		2500	2500	2500	2300
		3150	3150	3150	2500

Na Obrázku 21 [5] je znázorněn rozváděč ZS1 rozdělený do jednotlivých sekcí.



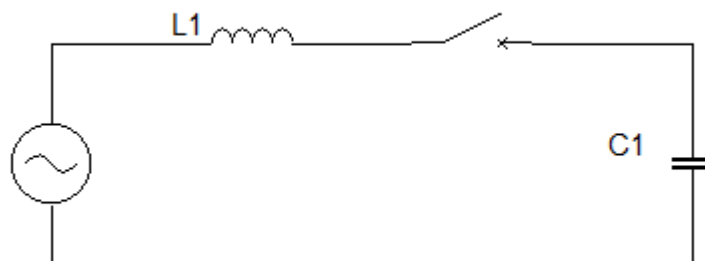
Obrázek 21 Části rozváděče

Část označená symbolem A je přístrojovou částí. Je zde vybavení pro provoz výsuvných částí a samotné skříňe. Část B je část propojení hlavních rozváděčových přípojníc s odpojovacími kontakty uloženými ve vrchní části. Přípojnice mají různý tvar podle jmenovitého proudu. Do 2500 A jsou použity klasické ploché vodiče, nad touto hodnotou se pak používají přípojnice se speciálním D profilem, podle dané konkrétní umístění se pak také rozhoduje o použití jednoduchého, popřípadě dvojitého systému přípojníc. Část C je místo připojení kabelových vývodů pod odpojovací kontakty. Kabely mohou být jak jednožilové, tak i třížilové. Maximální počet kabelů na fázi je stanoven na dvanáct. Jsou zde proudové i napěťové transformátory, popřípadě uzemňovače. Oddíl D je tzv. oddíl pomocný. V přístrojové skříňce jsou umístěny ovládací nebo řídicí systémy dle specifikace zákazníka. Poslední částí je část E, kde najdeme tzv. odfukový kanál sloužící pro odvod plynů ze vzniklého obloukového zkratu.

## 6 NÁVRH OMEZOVAČŮ PŘEPĚTÍ PŘI SPÍNÁNÍ KAPACITNÍCH ZÁTĚŽÍ

### 6.1 Zapínání kapacitních zátěží

Zapínání kapacitních zátěží není ve svém důsledku zdrojem přepětí. Jedná se zde spíše o velké nárazové proudy, které se v obvodu mohou jevit jako porucha nebo zkrat. Uvedme si jako příklad kapacitní zátěže kondenzátorovou baterii. V první chvíli po připojení do obvodu se nenabitá baterie jeví jako zkrat. Zkratový proud se s časem postupně zmenšuje, až se ustálí na hodnotu ustáleného nabíjecího proudu. Popsaná situace je znázorněna na Obrázku 22.



Obrázek 22 Obvod zapínání kapacitní baterie

Velikost nárazového zkratového proudu ( $I_N$ ) při připojení baterie je dána poměrem vlastního kmitočtu a průmyslového kmitočtu obvodu. Toto ilustruje vztah 6.1:

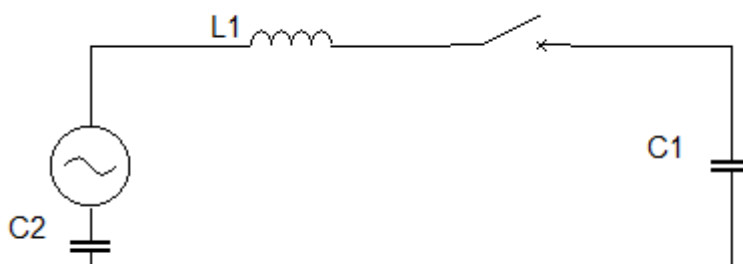
$$I_N = \frac{\omega_0}{\omega} \cdot I_C, \quad (6.1)$$

kde

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{L_1 \cdot C_1}}. \quad (6.2)$$

Lze tedy ve zkratce říci, že velikost jmenovitého nárazového proudu je závislá na velikosti kapacity baterie a indukčnosti obvodu.

Na Obrázku 23 je znázorněna jiná situace. Baterie  $C_2$  je nabitá, baterie  $C_1$  je nenabitá. Baterie  $C_2$  se začne vybíjet do baterie  $C_1$ . Nárazový proud bude v tomto případě ještě o něco větší, než v předchozím příkladu, protože je omezen jen indukčností spojovacího vedení mezi oběma kapacitami.



Výpočet může být naznačen jako:

$$I_N = \frac{\omega_1}{\omega} \cdot I_C, \quad (6.3)$$

kde

$$\omega_1 = \frac{1}{\sqrt{L \cdot \frac{C_1 \cdot C_2}{C_1 + C_2}}} \quad (6.4)$$

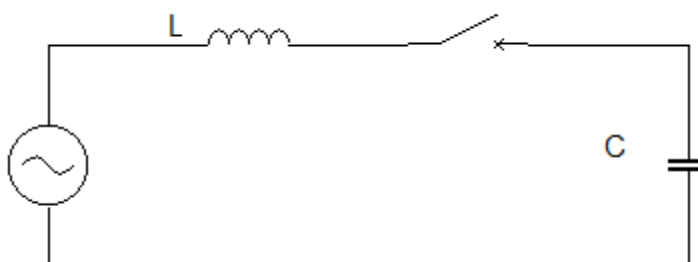
V některých citlivých aplikacích se může jevit veliký nárazový proud jako problém. Existují dva způsoby vedoucí ke zmenšení velikosti nárazového proudu. První způsob je zařazení tlumivky do série s kondenzátory. Tím se změní vlastní kmitočet obvodu a dojde ke zmenšení nárazového proudu. Druhým způsobem je pak zařazení odporu do obvodu. Tím se utlumí kmity a přechodný proud se zmenší.

## 6.2 Vypínání kapacitních zátěží

V této kapitole se budu zabývat především dvěma druhy kapacitních zátěží. Budou to kondenzátorové baterie a vedení naprázdno.

### 6.2.1 Vypínání kondenzátorových baterií

Na Obrázku 24 je znázorněn jednofázový obvod kondenzátorové baterie.



Obrázek 23 Obvod vypínání kondenzátorové baterie

Problémem při vypínání kapacitních zátěží jsou opětivé zápaly. Ty jsou zdrojem přechodného jevu, který nabíjí kondenzátor vyšším napětím. Výsledkem může být napětí na kondenzátoru až na hodnotě trojnásobku maximálního fázového napětí. Tyto přepětí jsou pak omezovačem přepětí postupně vybíjeny. Omezovač je schopen u kondenzátorové baterie, připojené trvale k napájení, omezit napětí až na hodnotu  $\sqrt{2} \cdot U_c$ . Při odpojení baterie se pak vybíjí napětí až na nulu. Ovšem tento proces je mnohem delší vzhledem k malé hodnotě vybíjecího proudu.

U spínacích přepětí obecně závisí schopnost omezovače přepětí omezovat vzniklý přechodný jev na jeho energetické absorpční schopnosti. Jak již bylo řečeno výše, vzhledem k teplotní stabilitě omezovače přepětí musí být po určitou dobu velikost energie dodávané do omezovače menší než velikost energie, kterou je schopný omezovač vyzářit. Při odpojení baterie to není problém. Omezovač přepětí dále vybíjí z hodnoty  $\sqrt{2} \cdot U_c$  na nulu, ovšem velikost energie dodávané je mnohem menší, než energie, kterou omezovač vyzáří. Teplotní stabilita je zde tedy zaručena. Horší situace nastává u baterie, která je kontinuálně vybíjena na hodnotu  $\sqrt{2} \cdot U_c$  při stálém připojení do sítě. Zpravidla jsou omezovače konstruovány tak, aby zvládly tento proces ochlazování třikrát po sobě. V případě vícenásobné vybíjecí fáze musí být zařazena ochlazovací fáze, jinak hrozí poškození. Měřením vznikl empirický vztah stanovující maximální velikost výkonu baterie vzhledem k energetické absorpční schopnosti [2]:

$$\frac{E_c}{U_c} \geq \frac{6 \cdot Q_K}{\omega \cdot U_m} \quad (6.5)$$

Ze vztahu plyne to, že energetická absorpční schopnost je přímo úměrná velikosti jalového výkonu baterie (úhlový kmitočet a napět'ovou hladinu považujeme za konstantní). Velikost energetické absorpce, kterou daný omezovač přepětí snese je dána napět'ovou hladinou (se zvětšující se napět'ovou hladinou roste i výkon baterie) a typem omezovače. V tabulce 2 jsou naznačeny velikosti energetické absorpce pro jednotlivé omezovače přepětí z portfolia ABB.

Tabulka 2 Energetická absorpční schopnost jednotlivých omezovačů přepětí

Typ omezovače	POLIM_D	MWD	POLIM_S	POLIM_H
E/U <sub>C</sub> [kJ/kV]	3,6	5,5	9	13,3

Na základě údajů z tabulky mohou být stanoveny pro různé napěťové hladiny hraniční velikosti baterií.

$$\frac{E_C}{U_C} \geq \frac{6 \cdot Q_K}{\omega \cdot U_m}, \quad (6.6)$$

do vzorce můžeme dosadit:

$$5,5 \geq \frac{6 \cdot Q_K}{2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot 24 \cdot 10^3} \quad (6.7)$$

a vyčíslit zdánlivý výkon baterie

$$Q_K = 6,9 \text{ MVar}. \quad (6.8)$$

V obvodu bez použití omezovače přepětí by platil empirický vztah stejný jako 6.5 s tím rozdílem, že za energetickou absorpční schopnost dosadíme hodnotu 0,5 kJ/kV, která odpovídá energetické výdržné schopnosti rozváděče VN dle testování v laboratorních podmínkách podle [2]:

$$\frac{E_C}{U_C} \geq \frac{6 \cdot Q_K}{\omega \cdot U_m}, \quad (6.9)$$

$$Q_K = \frac{2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot 24 \cdot 10^3 \cdot 0,5}{6}, \quad (6.10)$$

zdánlivý výkon baterie

$$Q_K = 630 \text{ kVar}. \quad (6.11)$$

Na základě výše uvedeného empirického vztahu plyne, že při připojení omezovači přepětí ke kondenzátorové baterii, je na dané napěťové hladině při použití MWD omezovače přepětí může být maximální velikost vypínaného výkonu 6,9 MVar. Z výpočtů bez omezovače přepětí plyne, že tato velikost může být jen 630 kVar. Nutno podotknout, že nebezpečné přepětí se

objeví jen v případě opětovných zápalů a při připojeném omezovači přepětí je nutno dbát na dostatečnou ochlazovací fázi v cyklu, jak je uvedeno výše.

### 6.3 Vypínání vedení naprázdno

U vypínání vedení naprázdno je rozdíl v rovnoměrném rozložení kapacity a indukčnosti podél celého vedení. Při výpočtu musí být tedy zohledněno šíření proudů i napětí po vedení.

Šíření proudů a napětí jako vlnění sebou přináší určité problémy. Jsou to především problémy rozhraní. Typickým rozhraním, které může nastat i v tomto případě, je rozhraní kabel – vedení. Uvažujeme – li rozváděč umístěný ve stanici, pak může být napojen kabelem, který je dále pak napojen na venkovní vedení. Platí, že impedance vedení je 9x větší, jak impedance kabelu. Tím pádem dojde ke změně, napěťová vlna se zdvojnásobí a proudová utlumí. Podobný jev se stane na konci vedení. Podstatná je však také vlna napětí, která se odrazí od rozhraní vedení naprázdno a postupuje zpátky k vypínači popřípadě omezovači přepětí. Zde dojde k omezení na ochrannou hladinu daného omezovače přepětí. Podobně jako v případě připojení baterie, je kladen důraz na energetickou absorpci omezovače přepětí.

Velikost přepětí se pohybuje zpravidla kolem dvojnásobku hodnoty fázového napětí, maximálně do jejího trojnásobku. Ochranná hladina omezovače přepětí u sítí používaných u nás se pohybují kolem 80 kV. Maximální možné trojnásobné přepětí při spínání vedení naprázdno by tedy mělo být takto instalovaným omezovačem přepětí omezeno.

Použití omezovače je řešení, které již omezuje a chrání zařízení před následky přechodného jevu. Možnou příčinu vzniku lze eliminovat zařazením odporů. Jejich odpor by se měl volit následovně:

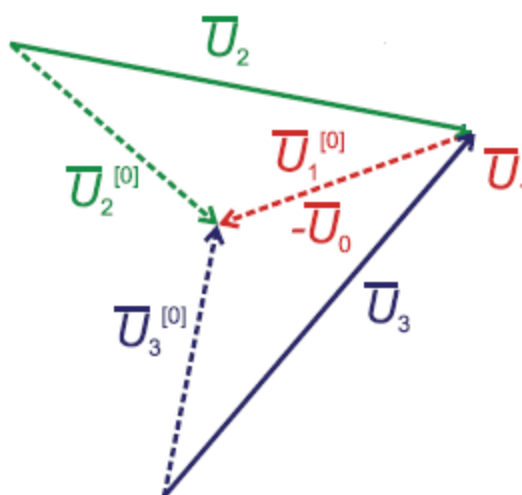
$$\frac{2,5}{\omega \cdot C} \leq R \leq \frac{5}{\omega \cdot C} \quad (6.12)$$

kde C je velikost kapacity vedení, které vypínáme

## 7 NÁVRH OMEZOVAČŮ PŘEPĚTÍ PŘI ZEMNÍCH SPOJENÍCH

### 7.1 Síť izolované

Izolované sítě jsou sítě, jejichž uzel transformátoru není spojen se zemí. Tento typ sítě se dle normy smí používat pro sítě menšího rozsahu, do kapacitního proudu 20 A. Ovšem doporučuje se už od proudu cca 10 A používat sítě kompenzované. Tyto sítě se mohou provozovat se zemním spojením. To znamená, že omezovače přepětí musí být dimenzovány na hodnotu sdruženého napětí sítě. Tento fakt ukazuje obrázek 24 [3]. Je v něm znázorněna velikost napětí při spojení jedné fáze se zemí.



Obrázek 24 Rozložení napětí při spojení jedné fáze se zemí

Pro hodnotu  $U_C$  můžeme psát:

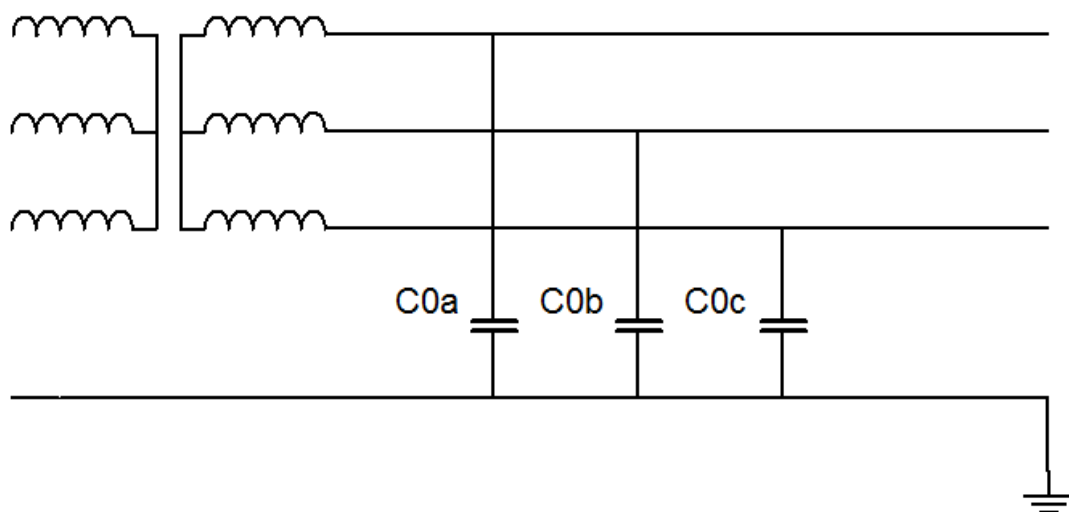
$$U_C \geq U_m. \quad (7.1)$$

$U_C$  se dá vhodným způsobem zmenšit, pokud do úvahy započítáme čas vypnutí zemního spojení. Pak by byla hodnota napětí omezovače přepětí podle následujícího vztahu:

$$U_C \geq \frac{U_m}{T}. \quad (7.2)$$

Příklad izolované sítě je znázorněn na obrázku 25.





Obrázek 25 Izolovaná síť

### 7.1.1 Přepětí při vzniku zemního spojení

Příklad izolované sítě je na obrázku. V případě pádu jedné fáze dojde k přechodnému jevu. Napětí postižené fáze klesne na nulu a napětí nepostižených fází vzroste na hodnotu sdruženého napětí ( $U_S$ ). V úvahu je nutné vzít ovšem i přepětí, které tyto jevy doprovázejí. Platí pravidlo podle [6], že toto přechodné napětí nebude větší jak dvojnásobek rozdílu mezi oběma ustálenými stavy. Pro přechodné napětí platí:

$$u_p = U_S + \frac{1}{2} \cdot U_P, \quad (7.3)$$

kde  $U_P$  je:

$$U_p \leq 2 \cdot (U_S - U_f). \quad (7.4)$$

Po dosazení 7.4 do 7.3 je výsledkem:

$$u_p = U_S + U_S - U_f = 2 \cdot U_S - U_f. \quad (7.5)$$

Velikost přechodného jevu při vzniku zemního spojení však závisí také na fázi napětí postižené fáze, v kterém dojde ke vzniku této události. Příklad vzniku relativně velkého přepětí je při spojení vodiče se zemí v okamžiku jeho maximálního napětí. Jak již bylo řečeno výše, napětí v této fázi klesne k nule a napětí v ostatních fázích překmitne na hodnotu sdruženého napětí sítě. V okamžiku vzniku této události budou mít napětí obou „zdravých“ fází stejnou hodnotu, a to  $-0,5 U_F$ . Ve snaze překmitnout se hodnota nepostižených fází dostane až na cca 1,5 násobek  $U_F$ . Pokud tyto předpoklady dosadíme do rovnice 7.5 dostaneme podle [6]:

$$u_p = U_S + U_S - U_f = 2 \cdot U_S - U_f = 2 \cdot (-1,5) \cdot U_f + 0,5 \cdot U_f = -2,5 U_f. \quad (7.6)$$

Velkost přepětí  $2,5 U_F$  odpovídá hodnotě 31,75 kV, což je hodnota přepětí, která není pro síť nebezpečná. Zařízení v této síti mají izolační výdržnou hodnotu napětí 125 kV.

### 7.1.2 Přepětí při vypnutí zemního spojení

Přechodný jev nevzniká jenom při vzniku zemního spojení, ale také při jeho vypnutí. Častým problémem je tzv. přerušované zemní spojení. Při přerušení proudu se síť dostane, co se týče napět'ových poměrů, do původního stavu před poruchou. Kapacity nepostižených fází vůči zemi budou však stále nabity. Jsou zdrojem stejnosměrného napětí  $U_F$ , kolem kterého kmitají napětí, které ve výsledku dosahují dvojnásobku fázového napětí. Při opětovném zápalu opět v maximu. Ovšem tentokrát dochází k zakmitání na nulovou hodnotu z hodnoty sdruženého napětí sítě. Hodnoty napětí „zdravých fází“ dosáhnou  $0,5 U_F$ . Můžeme podle [6] psát:

$$u_p = U_S + U_S - U_f = 2 \cdot U_S - U_f = 2 \cdot (-1,5) \cdot U_f - 0,5 \cdot U_f = -3,5 U_f. \quad (7.7)$$

Maximální hodnota přepětí tedy vzroste na hodnotu 3,5 násobku fázového napětí, což je 44,45 kV.

### 7.1.3 Návrh omezovačů přepětí v izolované síti

Na následujících řádcích bude proveden postup návrhu omezovače přepětí do dané izolované sítě. Počáteční podmínka je velikost napětí sítě. V tomto případě smluvená hodnota 22 kV.

Na základě výše uvedených požadavků u izolovaných sítí musí platit:

$$U_C \geq U_m \quad (7.8)$$

Vzhledem k normou povolené odchylce napětí 10 % musí i omezovač přepětí toto v návrhu reflektovat:

$$U_C \geq 1,1 \cdot U_m \geq 1,1 \cdot 22 \geq 24,2 \text{ kV} \quad (7.9)$$

Omezovač přepětí bude mít projektované trvalé provozní napětí  $U_C = 25 \text{ kV}$ .

Pro správnou funkci ochrany musí být ochranná hladina napětí omezovače  $U_P$  menší jak izolační výdržné napětí chráněného zařízení  $BIL$ . Pro spolehlivou práci s rezervou se  $BIL$  dělí 1,2 a uměle se tak snižuje. V tomto případě:

$$\frac{BIL}{1,2} \geq U_P \quad (7.10)$$

$$\frac{125}{1,2} \geq 79,9 \quad (7.11)$$

Podmínka ochranné hladiny omezovače přepětí a izolační výdrže zařízení je splněna.

Další krok návrhu je určit konkrétní typ omezovače přepětí v daném kontextu podmínek.

#### 7.1.3.1 Návrh omezovače přepětí MWD

V předešlém odstavci byl navrhnout omezovač přepětí o velikosti  $U_C = 25 \text{ kV}$ . Návrh omezovače přepětí musí obsahovat mimo jiného také dostatečnou výdržnou schopnost vzhledem k hodnotě dané IEC.

$$U_V = 1,3 \cdot U_P = 1,3 \cdot 3,33 \cdot 25 = 108,23 \text{ kV} \quad (7.12)$$

Omezovač přepětí MWD v katalogovém listě má výdržné napětí podle IEC dosahovat hodnoty minimálně 100 kV. Testován je tento omezovač až na 145 kV. Podmínky tedy splňuje.

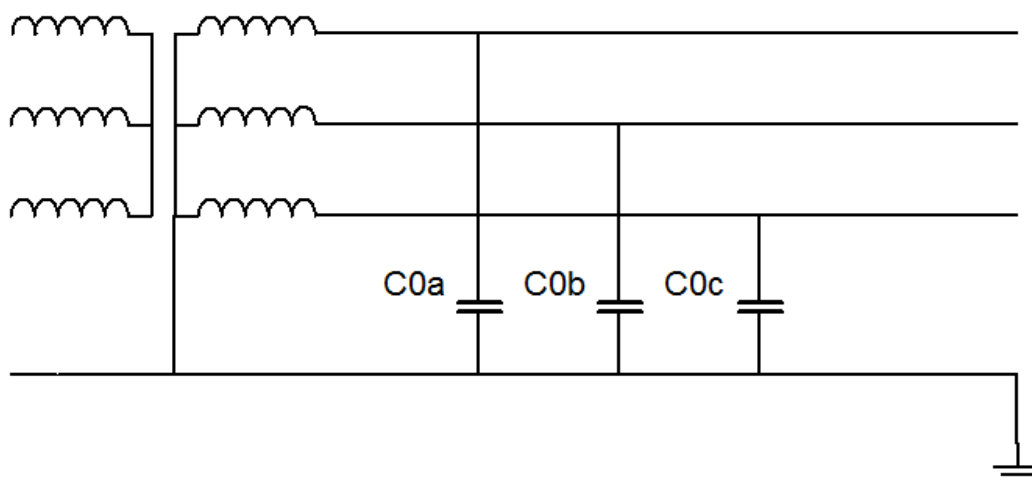
V tomto případě se uvažuje jen velmi malé znečištění. S ohledem na předepsanou povrchovou vzdálenost 16 mm/kV:

$$l = U_m \cdot 16 = 22 \cdot 16 = 352 \text{ mm}. \quad (7.13)$$

Vzhledem k použití omezovače přepětí se silikonovým pláštěm se povrchová vzdálenost redukuje o 30 %. Výsledkem je ochranná vzdálenost 246,4 mm. V katalogovém listě je pro tento konkrétní omezovač přepětí stanovena hodnota ochranné vzdálenosti 370 mm.

## 7.2 Síť přímo uzemněné

Sítě přímo uzemněné jsou sítě, jejichž nulový bod transformátoru je přímo spojen se zemí. Příklad sítě přímo uzemněné je na obrázku 26.



Obrázek 26 Přímou uzemněná síť

Tyto sítě se nemohou, vzhledem k velkým proudům v případě poruchy, provozovat se spojenou fází se zemí. Pro tyto sítě se tedy uvažuje hodnota napětí omezovače přepětí jiná, než pro sítě předešlé. Tato hodnota se dá vypočítat jako:

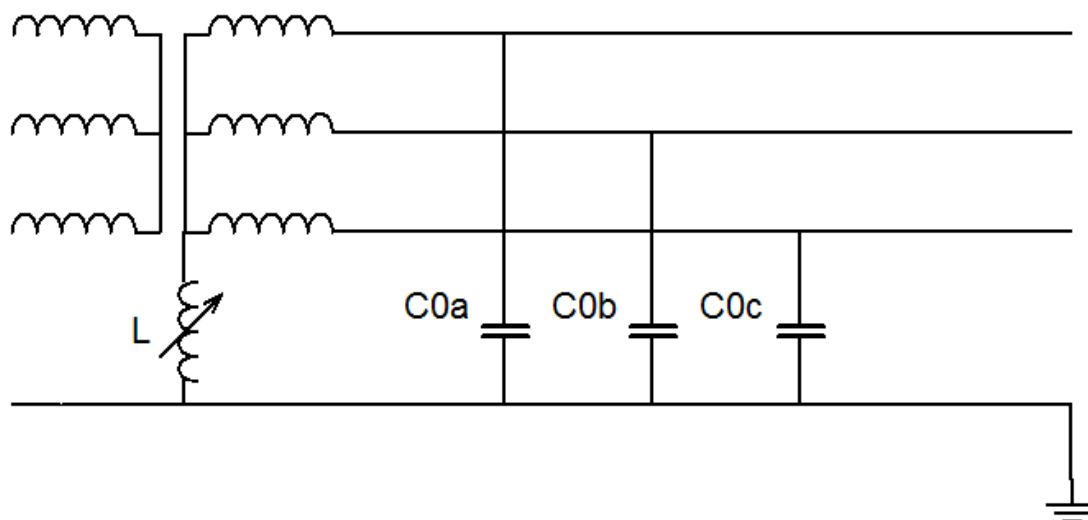
$$U_C \geq \frac{U_m \cdot C_E}{T \cdot \sqrt{3}} \quad (7.14)$$

kde  $C_E$  je faktor zemní poruchy s hodnotou 1,4. Doba  $T$  odpovídá době vypnutí poruchy a v tomto případě se pohybuje okolo 1,28.

Díky okamžitému vypnutí také nedochází k markantním přechodným jevům, na které by muselo být myšleno při návrhu omezovače přepětí. Nedochází ani k namáhání izolace a potažmo omezovačů přepětí sdruženou hodnotou napětí.

### 7.3 Sítě kompenzované

Sítě kompenzované se provozují jako sítě, které mají v nulovém bodě transformátoru připojenou Petersenovu tlumivku. Jsou to nejčastěji využívané sítě VN v České Republice. Tyto sítě podobně jako sítě izolované mohou být dále provozovány i se zemním spojením. Ovšem v případě indikace musí být místo poruchy neprodleně identifikováno a vyslaná četa by v co nejkratším čase měla poškozenou fázi opravit. Schéma této sítě na následujícím obrázku 27.



Obrázek 27 Kompenzovaná síť

Důležité jsou aspekty vzniku a vypínání zemního spojení na možné vzniknutí přepětí. Situace je tu o něco příznivější, jak u sítě izolované, zvláště u vypínacího pochodu. Zde se objevuje přepětí o maximální velikosti  $2,5 U_F$ . Stejnoseměrné napětí, jejímž původem jsou nabitě kapacity zdravých fází, bude postupně vybíjeno přes tlumivku a neprojeví se tak naplno. Nedojde tedy k opětným zápalům a přepětí se nebude zvyšovat.

Z hlediska návrhu trvalého provozního napětí omezovače přepětí v této síti bude postup obdobný jako u sítě izolované. Omezovač přepětí se bude dimenzovat na hodnotu sdruženého napětí sítě, které se bude při zemním spojení na síti určitý čas vyskytovat.

#### 7.3.1 Návrh omezovačů přepětí v kompenzované síti

Na následujících řádcích bude proveden postup návrhu omezovače přepětí do dané kompenzované sítě. Počáteční podmínka je velikost napětí sítě. V tomto případě smluvená hodnota 22 kV.

Na základě výše uvedených požadavků u kompenzovaných sítí musí platit:

$$U_C \geq \frac{U_m}{T} \quad (7.15)$$

Čas vypnutí zemního spojení je s rezervou počítán na 600s. Tomu odpovídá podle obrázku 19 hodnota  $T$  1,17. Vzhledem k normou povolené odchylce napětí 10 % musí i omezovač přepětí toto v návrhu reflektovat:

$$U_C \geq 1,1 \cdot \frac{U_m}{T} \geq 1,1 \cdot \frac{22}{1,17} \geq 20,7 \text{ kV} \quad (7.16)$$

Omezovač přepětí bude mít projektované trvalé provozní napětí  $U_C = 21 \text{ kV}$ .

Pro správnou funkci ochrany musí být ochranná hladina napětí omezovače  $U_P$  menší jak izolační výdržné napětí chráněného zařízení  $BIL$ . Pro spolehlivou práci s rezervou se  $BIL$  dělí 1,2 a uměle se tak snižuje. V tomto případě:

$$\frac{BIL}{1,2} \geq 3,33 U_C \quad (7.17)$$

$$\frac{125}{1,2} \geq 3,33 \cdot 21 \quad (7.18)$$

Podmínka ochranné hladiny omezovače přepětí a izolační výdrže zařízení je splněna.

Další krok návrhu je určit konkrétní typ omezovače přepětí v daném kontextu podmínek.

### 7.3.1.1 Návrh omezovače přepětí MWD

V předešlém odstavci byl navrhnout omezovač přepětí o velikosti  $U_C = 21 \text{ kV}$ . Návrh omezovače přepětí musí obsahovat mimo jiného také dostatečnou výdržnou schopnost vzhledem k hodnotě dané IEC.

$$U_V = 1,3 \cdot U_P = 1,3 \cdot 3,33 \cdot 21 = 90,91 \text{ kV} \quad (7.19)$$

Omezovač přepětí MWD v katalogovém listě má výdržné napětí podle IEC dosahovat hodnoty minimálně 84 kV. Testován je tento omezovač až na 129 kV. Podmínky tedy splňuje.

V tomto případě se uvažuje jen velmi malé znečištění. S ohledem na předepsanou povrchovou vzdálenost 16 mm/kV:

$$l = U_m \cdot 16 = 22 \cdot 16 = 352 \text{ mm}. \quad (7.20)$$

Vzhledem k použití omezovače přepětí se silikonovým pláštěm se povrchová vzdálenost redukuje o 30 %. Výsledkem je ochranná vzdálenost 246,4 mm. V katalogovém listě je pro tento konkrétní omezovač přepětí stanovena hodnota ochranné vzdálenosti 330 mm.

## 7.4 Důvody použití omezovačů přepětí v izolovaných, kompenzovaných a přímo uzemněných sítích

Přepětí a zvláště ta přerušovaná jsou v sítích VN častým jevem, ať už z důvodů provozních, atmosférických nebo jiných.

Každé přepětí namáhá veškerou izolaci a zařízení v síti. To vede k degradaci a postupné ztrátě životnosti. Ta je pro každý izolátor specifickým parametrem. Při častém stavu přepětí může dojít až k destrukci, která může prohloubit již vzniklý přepěťový stav.

Z tohoto důvodu je nutné síť chránit. Jak již bylo uvedeno výše, při zemních spojeních dosahují hodnoty přepětí maximálně 3,5 násobku napětí sítě, což je hodnota, která by neměla mít v síti destruktivní účinek. Největší přepětí se objevují v sítích izolovaných. V případě omezení přepětí, vznikajících také při vzniku a vypínání zemního spojení, se projevuje jako alternativa sítě izolované sítě kompenzovaná, která je schopna částečně tyto problémy řešit. Velikost přepětí je maximálně 2,5 násobkem fázového napětí sítě. Důležitým aspektem ochrany sítě je také kontrola a případná výměna izolátorů.

## 8 NÁVRH OMEZOVAČŮ PŘEPĚTÍ PŘI VYPÍNÁNÍ INDUKTIVNÍCH PROUDŮ

### 8.1 Velikost přepětí při vypínání transformátoru naprázdno

Vypínání indukčních proudů je podobně problematické jak vypínání kapacitních proudů. Problém je zvláště u spínání těch proudů, které nejsou proudy jmenovitými vzhledem k vypínací schopnosti vypínače. Jde především o malé proudy, jako jsou proudy u transformátoru naprázdno nebo motoru s kotvou nakrátko.

V tabulce 3 jsou znázorněny parametry vypínaného transformátoru 22/0,4 kV naprázdno.

Tabulka 3 Štítkové parametry transformátoru 22/0,4 kV

$S_T$ [MVA]	$\Delta P_0$ [W]	$\Delta P_k$ [W]	$u_k$ [%]	$I_0$ [%]
1	1100	9500	6	5

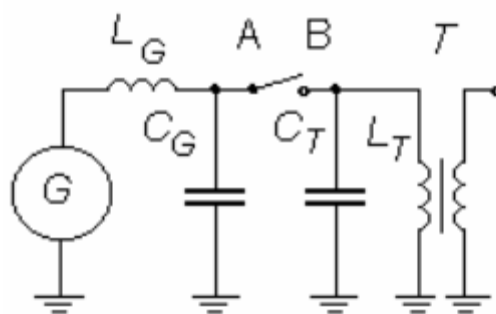
Ze štítkových hodnot lze spočítat jmenovitý proud transformátoru:

$$I_n = \frac{S}{\sqrt{3} \cdot U_{n1}} = \frac{1000}{\sqrt{3} \cdot 22} = 26,24 \text{ A}, \quad (8.1)$$

z toho pak proud naprázdno:

$$I_0 = i_0 \cdot I_n = 26,24 \cdot 0,05 = 1,312 \text{ A}. \quad (8.2)$$

Vypínač v obvodu na obr. 28 [4] bude spínat tedy proud o maximální hodnotě 1,312A.



Obrázek 28 Obvod transformátoru naprázdno

Velikost přepětí bude záležet na velikosti aktuální hodnoty proudu při sepnutí. Referenční výpočet bude proveden pro vypínanou hodnotu 0,5 A.

Pro výpočet napětí  $U_P$ , což je hodnota napětí, o kterou se zvýší napětí na kapacitě  $C_T$ , musíme znát hodnotu indukčnosti a kapacity primárního vedení. Dle [5] je kapacita primárního vedení 10 nF. Indukčnost se dá se zadaných parametrů vypočítat jako:

$$X_m = \frac{U_1^2}{\sqrt{S_T^2 \cdot i_0^2 - \Delta P_0^2}} = \frac{22^2}{\sqrt{1^2 \cdot 0,05^2 - 1,1^2}} = 7807 \Omega. \quad (8.4)$$

Z toho:

$$L_T = \frac{X_m}{\omega} = \frac{7807}{2 \cdot \pi \cdot 50} = 24,85 \text{ H}. \quad (8.5)$$

Hodnota  $U_P$  bude:

$$U_P = I_u \cdot \sqrt{\frac{L_T}{C_T}} = 0,5 \cdot \sqrt{\frac{24,85}{10 \cdot 10^{-9}}} = 24,92 \text{ kV}. \quad (8.6)$$

Celkové napětí na kapacitě  $C_T$  bude tedy součtem napětí zdroje, na který je kapacita nabita a napětí  $U_P$ .

$$U_T = U_P + U_G = 24,92 + 12,7 = 37,62 \text{ kV}. \quad (8.7)$$

Následující tabulka 4 znázorňuje velikost přepětí při různých hodnotách proudu při sepnutí.

*Tabulka 4 Velikost přepětí při různých hodnotách proudu při sepnutí*

$I_U$ [A]	$U_T$ [kV]
0,5	37,62
1	62,56
1,3	77,50

Z tabulky 4 je zřejmé, že napětí dosahuje až 6 násobku původní hodnoty napětí zdroje.

## 8.2 Návrh omezovače přepětí MWD

Daný transformátor 22/0,4 kV bude připojen k rozváděči Unigear ZS1 o jmenovitém napětí 24 kV. Tento rozváděč bude vybaven vhodnými omezovači přepětí MWD o jmenovitém napětí  $U_C$  24 kV. Nejhorší možný případ vypnutí transformátoru nastane, pokud dojde k vypnutí v okamžiku, kdy bude proud dosahovat nejvyšší hodnoty (v našem případě 1,3 A). Pak bude dle tabulky hodnota přepětí na kapacitě vinutí na hodnotě 77,50 kV.

Dle [3] jsou dány normalizované hodnoty ochranných a izolačních hladin pro jednotlivé napěťové hladiny:



Tabulka 5 Normalizované hodnoty základních izolačních hladin

$U_m$ [kV]	3,6	7,2	12	24	36
BIL [kV]	40	60	75	125	170
$U_P$ [kV]	12	24	40	79,9	119,9

Z tabulky vyplývá, že napěťové hladině 24 kV odpovídá hodnota izolační výdržné hladiny 125 kV. Ta je dostatečná pro vypočítané maximální přepětí 77,5 kV. Omezovač přepětí tedy pro tento typ zátěže vyhovuje.

Pro porovnání jsou v tabulce 6 znázorněny parametry dalších transformátorů.

Tabulka 6 Šítkové parametry dalších transformátorů 22/0,4 kV

$S_T$ [kVA]	$\Delta P_0$ [W]	$\Delta P_k$ [W]	$u_k$ [%]	$i_0$ [%]
250	425	3250	4	4,5
400	610	3850	4	4,5
630	860	5400	4	4,5
800	905	7640	6	5
1000	1100	9500	6	5
1250	1350	11000	6	6
1600	1700	14000	6	6

Podobně pak lze, jako v tabulce 4, psát velikosti přepětí, které u transformátorů z tabulky 6 vzniknou při sepnutí maximální hodnoty proudu naprázdno.

Tabulka 7 Hodnoty přepětí vzniklé při spínání maximální velikosti proudu u jednotlivých transformátorů pro kapacitu 10 nF

$S_T$ [kVA]	$I_U$ [A]	$U_T$ [V]
250	0,2	32 643
400	0,4	44 232
630	0,7	56 668
800	1	68 437
1000	1,3	77 508
1250	1,9	97 420
1600	2,5	111 229

Předchozí tabulka 7 počítá s kapacitou na primární straně transformátoru o hodnotě 10 nF. Vzhledem k tomuto zjednodušení, ke kterému bylo přistoupeno z důvodu nedostupnosti těchto údajů, jsou dále naznačeny velikosti přepětí, které se pohybují řádově v jednotkách nanofaradů kolem námi uvažované hodnoty 10 nF.

*Tabulka 8 Hodnoty přepětí vzniklé při spínání maximální velikosti proudu u jednotlivých transformátorů pro kapacitu 9 a 8 nF*

		9 nF	8nF
$S_T$ [kVA]	$I_U$ [A]	$U_T$ [V]	$U_T$ [V]
250	0,2	33 722	34 997
400	0,4	45 937	47 954
630	0,7	59 046	61 857
800	1	71 452	75 016
1000	1,3	81 014	85 158
1250	1,9	102 002	107 419
1600	2,5	116 559	122 859

*Tabulka 9 Hodnoty přepětí vzniklé při spínání maximální velikosti proudu u jednotlivých transformátorů pro kapacitu 11 a 12 nF*

		11 nF	12 nF
$S_T$ [kVA]	$I_U$ [A]	$U_T$ [V]	$U_T$ [V]
250	0,2	31 715	30 906
400	0,4	42 764	41 484
630	0,7	54 621	52 837
800	1	65 843	63 581
1000	1,3	74 492	71 861
1250	1,9	93 477	90 038
1600	2,5	106 644	102 644

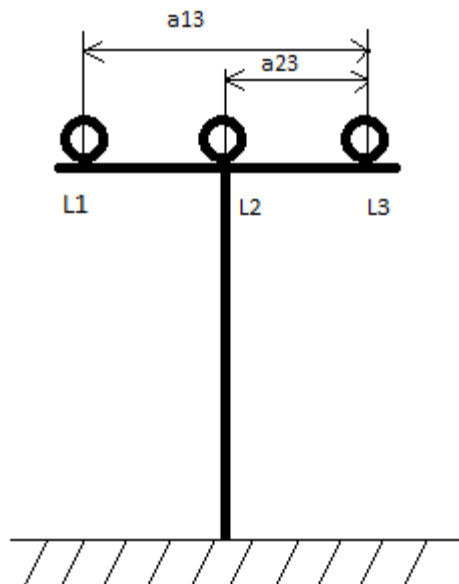
Ze vztahu 8.6 je patrné, že velikost přepětí je přímo úměrné velikosti useknutého proudu, tedy velikosti proudu, při kterém dojde k vypnutí. Dále je pak přímo úměrné hodnotě indukčnosti zařízení a nepřímo úměrné velikosti kapacity. Z tabulek 8 a 9 je patrná závislost změny kapacity na hodnotu velikosti přepětí. Změna kapacity o 4 nF vyvolá změnu velikosti přepětí o 20 kV.

## 9 PŘEPĚTÍ ZPŮSOBENÁ ATMOSFÉRICKÝMI VLIVY

Velikost přepětí při úderu lesku do vedení závisí na místě úderu blesku. Úder blesku do vedení je však často náhodný jev, proto se i velikost přepětí špatně odhaduje. Výsledkem návrhu omezovače přepětí je jeho ochranná vzdálenost  $L$ , která je důležitá vzhledem k ochranné funkci omezovače.

### 9.1 Příklad instalace omezovače přepětí na konec vedení s umístěným transformátorem

Vedení má definovanou napěťovou hladinu  $U_m = 22$  kV. Jedná se o rovinné uspořádání s délkou 10 km. Topologie stožáru je znázorněna na obrázku 29.



Obrázek 29 Stožár VN

Parametry stožáru jsou přehledně znázorněny v tabulce 10.

Tabulka 10 Parametry stožáru

Parametry stožáru			
Výška stožáru	a12	a13	a23
8 m	1,44 m	1,44 m	1,44 m

Parametry lana jsou znázorněny v tabulce 11:

Tabulka 11 Parametry lana

Typ	Průměr
Alfe6	11,55 mm

Z předložených parametrů můžeme spočítat hodnotu indukčnosti a kapacity podle [7]:

$$L_k = 0,46 \cdot \log \frac{\sqrt[3]{a_{12} \cdot a_{23} \cdot a_{13}}}{r} + 0,05 \cdot \mu_r =$$

$$= 0,46 \cdot \log \frac{\sqrt[3]{1,44 \cdot 1,44 \cdot 1,44}}{5,775 \cdot 10^{-3}} + 0,05 \cdot 1 = 1,238 \text{ mH/km} \quad (9.1)$$

$$L = L_k \cdot l = 1,238 \cdot 10 = 12,38 \text{ mH} \quad (9.2)$$

Kapacita proti zemi se vypočítá pomocí metody zrcadlení. Podle zadání je výška sloupu 8 m, rozměry konzoly jsou uvedeny výše. Permittivita vakua je  $8,84 \cdot 10^{-12}$ .

$$a'_{12} = a'_{23} = \sqrt{(2 \cdot h)^2 + a_{12}^2} = \sqrt{(2 \cdot 8)^2 + 1,44^2} = 16,06 \text{ m} \quad (9.3)$$

$$a'_{13} = \sqrt{(2 \cdot h)^2 + a_{13}^2} = \sqrt{(2 \cdot 8)^2 + 2,88^2} = 16,25 \text{ m} \quad (9.4)$$

$$\alpha_V = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \varepsilon_r \cdot \varepsilon_0} \cdot \ln \frac{\sqrt[3]{a'_{12} \cdot a'_{13} \cdot a'_{23}}}{\sqrt[3]{a_{12} \cdot a_{13} \cdot a_{23}}} =$$

$$\frac{1}{2 \cdot \pi \cdot 1 \cdot 8,84 \cdot 10^{-12}} \cdot \ln \frac{\sqrt[3]{16,06 \cdot 16,25 \cdot 16,06}}{\sqrt[3]{1,44 \cdot 2,88 \cdot 1,44}} = 3,928 \cdot 10^{10} \quad (9.5)$$

$$\alpha = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \varepsilon_r \cdot \varepsilon_0} \cdot \ln \frac{\sqrt[3]{h \cdot h \cdot h}}{r} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot 1 \cdot 8,84 \cdot 10^{-12}} \cdot \ln \frac{\sqrt[3]{8 \cdot 8 \cdot 8}}{5,775 \cdot 10^{-3}} = 1,3003 \cdot 10^{11} \quad (9.6)$$

$$\beta = \frac{\alpha^2 - \alpha_V^2}{\alpha^3 + 2 \cdot \alpha_V^3 - 3 \cdot \alpha \cdot \alpha_V^2} =$$

$$= \frac{(1,3 \cdot 10^{11})^2 - (3,93 \cdot 10^{10})^2}{(1,3 \cdot 10^{11})^3 + 2 \cdot (3,93 \cdot 10^{10})^3 - 3 \cdot (1,3 \cdot 10^{11}) \cdot (3,93 \cdot 10^{10})^2} = 8,944 \cdot 10^{-12} \quad (9.7)$$

$$\beta_V = \frac{\alpha_V^2 - \alpha_V \alpha}{\alpha^3 + 2 \cdot \alpha_V^3 - 3 \cdot \alpha \cdot \alpha_V^2} =$$

$$= \frac{(3,93 \cdot 10^{10})^2 - (3,93 \cdot 10^{10}) \cdot (1,3 \cdot 10^{11})}{(1,3 \cdot 10^{11})^3 + 2 \cdot (3,93 \cdot 10^{10})^3 - 3 \cdot (1,3 \cdot 10^{11}) \cdot (3,93 \cdot 10^{10})^2} = -2,075 \cdot 10^{-12} \quad (9.8)$$

Kapacita proti zemi pak je

$$C_{k0} = \beta + 2 \cdot \beta_V = 8,61 \cdot 10^{-12} + 2 \cdot (-1,95 \cdot 10^{-12}) = 4,7944 \text{ nF / km} \quad (9.9)$$

$$C = C_{k0} \cdot l = 4,7944 \cdot 10 = 47,944 \text{ nF} \quad (9.10)$$

Z vypočítaných parametrů můžeme spočítat hodnotu vlnové impedance vedení:

$$Z_C = \sqrt{\frac{L}{C}} = \sqrt{\frac{12,38 \cdot 10^{-3}}{47,944 \cdot 10^{-9}}} = 508,15 \Omega \quad (9.11)$$

$U_c$ Continuous operating voltage	$U_r$ Rated voltage	Residual voltage $U_{res}$ in kV (pv) at specified impulse current									
		wave 1/... $\mu$ s		wave 8/20 $\mu$ s				wave 30/60 $\mu$ s			
kV rms	kV rms	5 kA pv	10 kA pv	1 kA pv	2.5 kA pv	5 kA pv	10 kA pv	20 kA pv	125 A pv	250 A pv	500 A pv
4	5.0	12.7	13.5	10.5	11.1	11.7	12.3	14.1	9.2	9.5	9.9
5	6.3	15.9	16.8	13.1	13.9	14.6	15.4	17.6	11.4	11.9	12.4
6	7.5	19.1	20.2	15.8	16.7	17.5	18.5	21.1	13.7	14.3	14.8
7	8.8	22.2	23.5	18.3	19.4	20.3	21.5	24.6	16.0	16.6	17.2
8	10.0	25.4	26.9	21.0	22.2	23.3	24.6	28.1	18.3	19.0	19.7
9	11.3	28.6	30.2	23.6	25.0	26.2	27.7	31.6	20.5	21.4	22.2
10	12.5	31.7	33.5	26.1	27.7	29.0	30.7	35.0	22.8	23.7	24.6
11	13.8	34.9	36.9	28.8	30.5	32.0	33.8	38.6	25.1	26.1	27.1
12	15.0	38.1	40.3	31.4	33.3	34.9	36.9	42.1	27.4	28.5	29.6
13	16.3	41.2	43.6	34.0	36.0	37.8	40.0	45.6	29.6	30.8	32.0
14	17.5	44.3	46.9	36.6	38.7	40.6	43.0	49.1	31.9	33.2	34.4
15	18.8	47.5	50.3	39.2	41.5	43.6	46.1	52.6	34.2	35.5	36.9
16	20.0	50.7	53.7	41.9	44.3	46.5	49.2	56.1	36.5	37.9	39.4
17	21.3	53.8	56.9	44.4	47.0	49.3	52.2	59.6	38.7	40.2	41.8
18	22.5	57.0	60.3	47.1	49.8	52.3	55.3	63.1	41.0	42.6	44.3
19	23.8	60.2	63.7	49.7	52.6	55.2	58.4	66.6	43.3	45.0	46.8
20	25.0	63.3	67.0	52.2	55.3	58.0	61.4	70.0	45.5	47.3	49.2
21	26.3	66.5	70.4	54.9	58.1	60.9	64.5	73.6	47.8	49.7	51.6
22	27.5	69.7	73.7	57.5	60.9	63.9	67.6	77.1	50.1	52.1	54.1
23	28.8	72.9	77.1	60.1	63.7	66.8	70.7	80.6	52.4	54.5	56.6
24	30.0	76.0	80.4	62.7	66.4	69.6	73.7	84.1	54.6	56.8	59.0
25	31.3	79.2	83.8	65.3	69.2	72.5	76.8	87.6	56.9	59.2	61.5
26	32.5	82.3	87.1	68.0	72.0	75.5	79.9	91.1	59.2	61.6	64.0

Obrázek 30 Omezovač přepětí MWD vhodný pro konkrétní aplikaci

Podle obrázku 30 je vybrán omezovač přepětí s konkrétním  $U_c$ . Přístupme k výpočtu podle [4] a [2]:

$$L = \frac{v}{2 \cdot S} \cdot \left( \frac{BIL}{1,2} - U_P \right), \quad (9.12)$$

kde  $v$  je rychlost vlny,  $S$  je strmost vlny postupující vedením,  $U_P$  je ochranná hladina omezovače přepětí,  $BIL$  je základní izolační hladina chráněného zařízení, odvozená od jmenovitého napětí, na kterém zařízení pracuje.

Teoretickou fyzikálně možnou strmost můžeme stanovit z maximální hodnoty proudu procházející omezovačem přepětí a z hodnoty vlnové impedance vedení vypočítané výše.

$$U = Z \cdot I = 508 \cdot 10000 = 5,08 \cdot 10^6 \text{ V}, \quad (9.13)$$

strmost pak lze vypočítat jako:

$$S = \frac{U}{T} = \frac{5 \cdot 10^6}{1 \cdot 10^{-6}} = 5 \cdot 10^{12} \text{ V} \cdot \text{s}^{-1}. \quad (9.14)$$

Ochranná vzdálenost bude tedy:

$$L = \frac{3 \cdot 10^8}{2 \cdot 5 \cdot 10^{12}} \cdot \left( \frac{125 \cdot 10^3}{1,2} - 79,9 \cdot 10^3 \right) = 0,728 \text{ m}. \quad (9.15)$$

Výše spočítaná ochranná vzdálenost platí pro jeden z nejhorších případů. Tak velká strmost se u chráněného zařízení může objevit jen v případě, že blesk udeří v bezprostřední blízkosti rozvodny (méně než 100 m). Uvádí se, že blesk udeří v oblasti 100 metrů od rozvodny jednou za 10 000 let [2].

Výše uvedené ochranná vzdálenost 0,728 m platí při přímém úderu blesku. V případě vzdálenějšího úderu blesku se pak strmost snižuje úměrně s touto vzdáleností. Následující výpočet strmosti platí pro úder blesku ve vzdálenosti 5 km od rozvodny:

$$S = \frac{1}{\frac{1}{S_0} + K \cdot l}, \quad (9.16)$$

kde  $S_0$  je strmost v místě úderu blesku do vedení,  $K$  je konstanta pro síť VN, která bere v úvahu korónové tlumení a  $l$  je vzdálenost úderu blesku.

$$S = \frac{1}{\frac{1}{5 \cdot 10^{12}} + 5 \cdot 10^{-15} \cdot 5000} = 39,68 \frac{\text{kV}}{\mu\text{s}}. \quad (9.17)$$

Ochranná vzdálenost:

$$L = \frac{3 \cdot 10^8}{2 \cdot 39,68 \cdot 10^9} \cdot \left( \frac{125 \cdot 10^3}{1,2} - 79,9 \cdot 10^3 \right) = 91,73 \text{ m}. \quad (9.18)$$

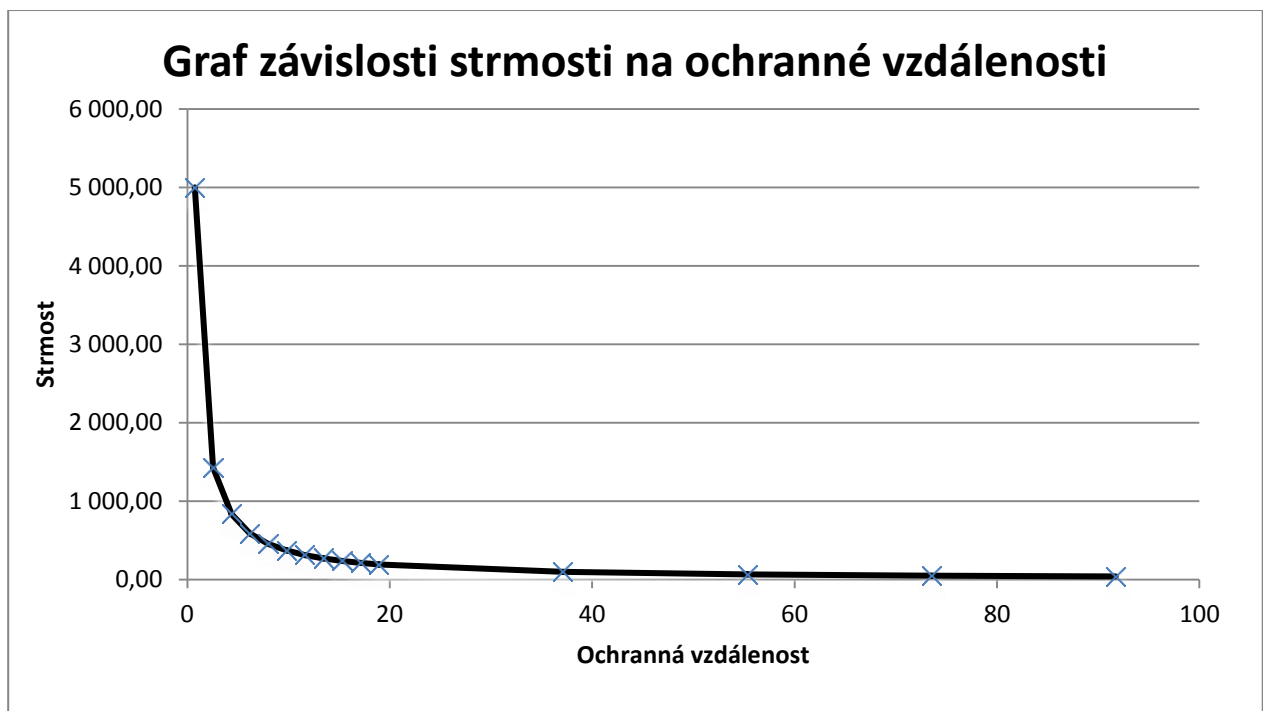
Je vidět, že při úderu blesku ve vzdálenosti 5 km je již strmost přepět'ové vlny velmi malá a tomu odpovídá i velká ochranná vzdálenost.

V tabulce 12 jsou uvedeny vzdálenosti úderu blesku do vedení a k nim odpovídající strmost přepět'ové vlny a ochranná vzdálenost omezovače přepětí.

Tabulka 12 Vzdálenosti úderů blesků do vedení a tomu odpovídající strmost a ochranná vzdálenost

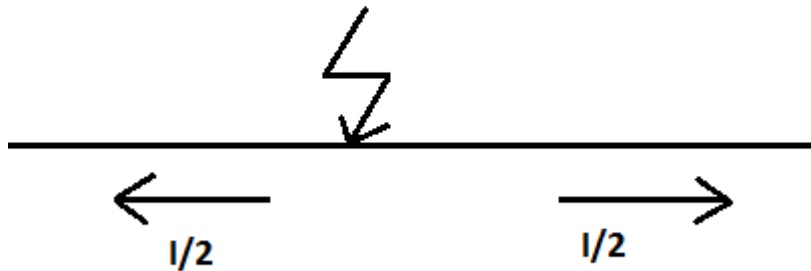
Vzdálenost úderu blesku	Strmost přepět'ové vlny	Ochranná vzdálenost
5000 m	39,68 kV/ $\mu$ s	91,735 m
1000 m	192,31 kV/ $\mu$ s	18,951 m
500 m	370 kV/ $\mu$ s	9,838 m
200 m	833 kV/ $\mu$ s	4,369 m

Na obrázku 31 je graf znázorňující závislost ochranné vzdálenosti na klesající strmosti. Je zde patrné, podobně jako z tabulky, že nejvyšší strmosti musí mít omezovače přepětí co nejblíže danému chráněnému zařízení. S klesající strmostí se pak již zvětšuje i sama ochranná vzdálenost.



Obrázek 31 Závislost strmosti na ochranné vzdálenosti

Dle statistik [2] v sítích VN na území Německa a Francie, nepřekročilo průměrně napětí sítě hodnotu 70 kV. Při úderu blesku do vedení se proud bleskového výboje začne rovnoměrně šířit na obě strany vedení s přihlédnutím k obrázku 32.



Obrázek 32 Úder blesku do vedení

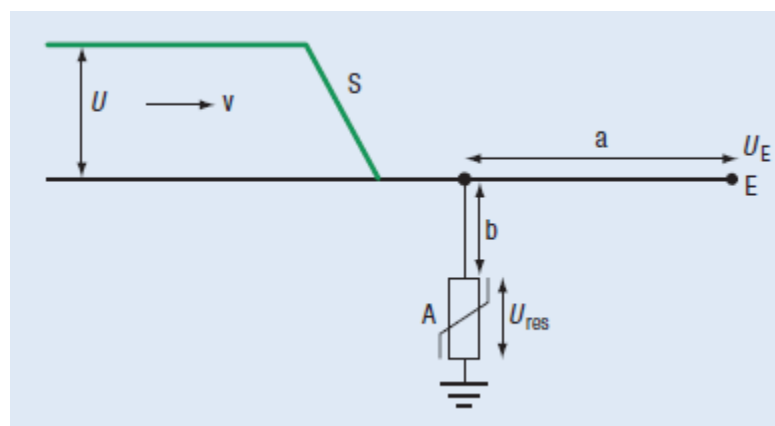
Na základě obrázku můžeme psát:

$$U = \frac{i}{2} \cdot Z_C \rightarrow i = \frac{2 \cdot U}{Z_C} = \frac{2 \cdot 70 \cdot 10^3}{508,15} = 275,51 \text{ A.} \quad (9.19)$$

Lze tedy říci, že místo úderu blesku je náhodná veličina. Pro dimenzování omezovače přepětí na účinky atmosférického přepětí je především potřeba pracovat s jeho ochrannou vzdáleností. Tato ochranná vzdálenost je:

$$L = a + b. \quad (9.20)$$

Jednotlivé vzdálenosti jsou naznačeny v obrázku 33 [2]. Z toho obrázku plyne, že vzdálenost  $b$  musí být kratší, jak vzdálenost  $a$ .



Obrázek 33 Ochranná vzdálenost omezovače přepětí



## 10 ZÁVĚR

V předložené práci jsou diskutovány možnosti použití omezovače přepětí v různých aplikacích.

První diskutovanou věcí v praktické části práce je použití omezovačů přepětí při spínání kapacitních zátěží. Zátěž tohoto druhu klade na omezovač přepětí požadavky vzhledem k jeho energetické absorpční schopnosti. Tato hladina energie, kterou je omezovač přepětí schopen pojmout, nesmí být překročena. Hrozila by ztráta omezovací schopnosti, až zničení prvku. Zdrojem přepětí není samotné prvotní vypnutí kapacitního proudu, nýbrž opětovné spínání a opětné zápal. Omezovač přepětí je schopen přepětí na baterii až na hodnotu  $\sqrt{2} U_C$ . V případě odpojení od sítě se pak postupně omezovač přepětí vybije. U stále připojených prvků bude vybití pomalejší vzhledem k malé velikosti vybíjecího proudu. Po třetím přechodném jevu je doporučeno omezovač přepětí podrobit ochlazovací fázi. Z provedených výpočtů plyne, že při použití omezovače přepětí MWD je před účinky přepětí bezpečná baterie o výkonu 6,912 MVar. Bez omezovače přepětí by bezpečný výkon byl 630 kVar. Oba výkony jsou pro napětí sítě 24 kV.

Druhá část praktické části je zaměřena na použití omezovače přepětí při spínání induktivních zátěží. Modelovým příkladem je transformátor 22/0,4 kV provozovaný naprázdno o různých výkonech a parametrech zobrazených v tabulce. Velikost přepětí závisí na okamžiku sepnutí proudu, na velikosti indukčnosti vycházející z parametrů stroje a na velikosti kapacity primárního vinutí. Přepětí je stanoveno pro různé hodnoty kapacit pohybujících se v jednotkách nF kolem zvolené referenční hodnoty 10 nF. Z tabulek je patrné, že změna o 4 nF vyvolá změnu napětí o 20 kV.

Atmosférické přepětí je dalším druhem analyzovaného přepětí v diplomové práci. Ochrany před atmosférickým přepětím se docílí vhodným umístěním omezovače přepětí do vhodné vzdálenosti od právě chráněného zařízení. Velikost přepětěvé vlny, která dorazí až ke spotřebiči je závislá na místě úderu blesku. V práci je proveden výpočet pro různé vzdálenosti úderu blesku a tím i patřičné upravené strmosti přepětěvé vlny. Výsledná ochranná vzdálenost zaručuje, že nebude překročena izolační výdržná pevnost chráněného zařízení a tím nedojde k poškození. Hraniční vzdálenosti jsou stanoveny na 200 a 5000 m. Při úderu blesku ve vzdálenosti 200 metrů je ochranná vzdálenost 4,369 m. Pro úder blesku ve vzdálenosti 5000 m je pak ochranná vzdálenost stanovena výpočtem na hodnotu 91,735 m.

Zemní spojení jsou častou příčinou přepětí v sítích VN. Jsou důsledkem styku jedné fáze se zemí. Vyskytují se v sítích kompenzovaných a izolovaných. U sítí přímo uzemněných, které se u nás nevyskytují, je tento termín nahrazen slovem zkrat. Při návrhu omezovačů přepětí v sítích, kde se může vyskytnout zemní spojení, musí být omezovač přepětí dimenzován na hodnotu sdruženého napětí sítě, které se po zemní poruše mezi fází a zemí vyskytne. Druhá věc je samotný přechodný děj při vzniku zemního spojení. Velikost tohoto přepětí je maximálně 3,5 násobkem hodnoty fázového napětí sítě u sítí izolovaných a 2,5 násobkem hodnoty fázového napětí u sítí kompenzovaných. Jistou alternativou je tedy použití sítí kompenzovaných s menší hodnotou přepětí. Což je i nad 20 A nabíjecího proudu předepsáno normou a od 10 A doporučeno.

## POUŽITÁ LITERATURA

- [1] HASMAN, T. *Přepětí v elektroenergetických soustavách*. Vydavatelství ČVUT, Praha 2004, 130 stran, ISBN 80-01-02952-2
- [2] ABB S.R.O., UTILITIES. *Overvoltage Protection Application Guidelines*. *ABB High Voltage Technologies Ltd*, July 1999, 88 pp.
- [3] TOMAN, P. A KOL. *Provoz distribučních soustav*. Vydavatelství Europrint, Praha 2011, 264 stran, ISBN 978-80-01-04935-8
- [4] NĚMEC, O. *Návrh svodičů přepětí v rozváděči VN v závislosti na parametrech připojené zátěže*. BRNO, 2011. 52 s. BAKALÁŘSKÁ PRÁCE. VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ, FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ.
- [5] NOSEK, J. *Příprava školicích materiálů pro rozváděče vysokého napětí*. BRNO, 2011. 45 s. BAKALÁŘSKÁ PRÁCE. VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ, FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ.
- [6] GERT, T. *Provozní přepětí v elektrizačních soustavách*. Vydavatelství SNTL, Praha 1964, 144 stran, DT 621.3.015.3
- [7] BLAŽEK, V. – SKALA, P.: *Distribuce elektrické energie*. 140 stran. Dostupný též z WWW: [https://www.feec.vutbr.cz/et/skripta/ueen/Distribuce\\_el\\_energie\\_S.pdf](https://www.feec.vutbr.cz/et/skripta/ueen/Distribuce_el_energie_S.pdf) (PDF)