

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI**  
**FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

**Katedra technologií a měření**

**DIPLOMOVÁ PRÁCE**

**Atmosférické výboje a jejich dopad na elektrická zařízení**

**vedoucí práce: doc. Ing. Pavel Trnka, Ph.D.**

**2012**

**autor: Bc. Tomáš Svačina**

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI  
Fakulta elektrotechnická  
Akademický rok: 2011/2012

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

Jméno a příjmení: **Tomáš SVAČINA**  
Osobní číslo: **E10N0059P**  
Studijní program: **N2612 Elektrotechnika a informatika**  
Studijní obor: **Komerční elektrotechnika**  
Název tématu: **Atmosférické výboje a jejich dopad na elektrická zařízení**  
Zadávací katedra: **Katedra technologií a měření**

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

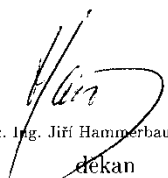
1. Popište vznik atmosférických výbojů z fyzikálního hlediska.
2. Popište následky přepětí na elektrická zařízení.
3. Popište typy ochran proti atmosférickým výbojům.
4. Zhodnoťte vhodnost jednotlivých typů ochran proti přepětí.
5. Popište zkoušky odolnosti vybraných elektrických zařízení působícímu přepětí.

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

1. V. Mentlík a kol. Diagnostika elektrických zařízení, BEN 2008.
2. Internetové databáze, elektronické informační zdroje
3. Normy IEC, EN, ČSN, IEEE
4. Sirotinskij, Technika vysokého napětí, SNTL 1956

Vedoucí diplomové práce: **Doc. Ing. Pavel Trnka, Ph.D.**  
Katedra technologií a měření

Datum zadání diplomové práce: **17. října 2011**  
Termín odevzdání diplomové práce: **11. května 2012**

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



  
Doc. Ing. Vlastimil Skočil, CSc.  
vedoucí katedry

V Plzni dne 17. října 2011

## **Anotace**

Předkládaná diplomová práce se zabývá problematikou řešení ochran proti atmosférickému přepětí. V první části je práce zaměřena na popis vzniku atmosférického výboje z fyzikálního hlediska.

Dále jsou popsány přímé a nepřímé údery blesku do vedení a následky atmosférického přepětí.

Následující kapitola popisuje vysokonapěťové svodiče přepětí, tedy prvky, které mají zamezit vážnému poškození zařízení. V práci jsou uvedeny jak ventilové bleskojistky, tak omezovače přepětí.

V další části práce se věnuji zkušebním impulsům, potřebným ke zkouškám svodičů přepětí.

V poslední části ověřuji ochranné působení omezovače přepětí v distribuční síti 22 kV, za pomoci programu ATPDraw 5.3.

## **Klíčová slova**

Atmosférický výboj, atmosférické přepětí, svodič přepětí, omezovač přepětí, ochranná vzdálenost

## **Abstract**

The protection solution against lightning are the main topic of this thesis. The formation of atmospheric discharges from the physical point of view are described in the first part this work.

The direct and indirect lightning strikes to the line voltage and the consequences of atmospheric overvoltage are described below.

The high voltage surge devices, thus the elements to prevent serious damage, are mentioned in the following charter. Both valve arresters and surge arresters are presented in this thesis.

Test pulses, needed for testing surge arresters, are discussed in the next session.

The MO - arrester protective effect in the distribution network 22 kV is verified by using the program ATPDraw 5.3 in the conclusion this thesis.

## **Key words**

Atmospheric discharge, atmospheric overvoltage, surge arrester, MO - arrester, protective distance

## **Prohlášení**

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

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

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

V Plzni dne 25.4.2012

Jméno příjmení

.....

## **Poděkování**

Rád bych poděkoval vedoucímu diplomové práce, panu doc. Ing. Pavlu Trnkovi, Ph.D., za cenné profesionální rady, připomínky a metodické vedení práce.

Dále bych chtěl poděkovat všem, kteří mi pomohli svými radami nebo poskytnutými informacemi.

Také děkuji přítelkyni, rodině a přátelům za jejich podporu.

## Obsah

<b>Seznam symbolů a zkratek.....</b>	<b>10</b>
<b>Úvod .....</b>	<b>12</b>
<b>1 Úvod do problematiky .....</b>	<b>13</b>
1.1 Elektrizací soustava v ČR .....	13
1.2 Elektrizací soustava ve světě .....	13
1.3 Přepětí .....	14
1.4 Definice přepětí.....	15
1.5 Dělení přepětí.....	15
<b>2 Elektřina v atmosféře .....</b>	<b>16</b>
2.1 Vznik bouře.....	16
2.1.1 Frontální bouře.....	17
2.1.2 Místní bouře z tepla .....	18
2.1.3 Orografická bouře .....	18
2.2 Elektrická vodivost vzduchu.....	19
2.3 Oblačná elektřina .....	19
2.3.1 Vznik náboje v kapalně fázi.....	20
2.3.2 Vznik náboje při mrazu.....	20
2.4 Atmosférický výboj .....	22
2.5 Typy bleskového výboje.....	23
2.5.1 Výboje se zápornou polaritou .....	24
2.5.2 Výboje s kladnou polaritou.....	25
2.6 Tvar vlny bleskového výboje.....	26
2.7 Druhy blesků.....	26
2.8 Hrom .....	27
<b>3 Následky atmosférického přepětí .....</b>	<b>28</b>
3.1 Přímý úder blesku do vedení nn .....	28
3.2 Přímý úder blesku do vedení vn a vvn.....	28
3.3 Zpětné přeskoky.....	30
3.4 Nepřímý úder blesku do vedení .....	30
3.5 Metoda navrhování optimální ochrany zařízení .....	30
3.5.1 Hustota výskytu blesku .....	31
3.5.2 Četnost přímých úderů do vedení .....	32
<b>4 Způsoby ochrany proti přepětí v síti vn a vvn .....</b>	<b>33</b>
4.1 Koordinace izolace zařízení sítí.....	33
4.2 Ochrana před přímým úderem blesku.....	34
4.2.1 Vedení s uzemněnými konzolami.....	34
4.2.2 Vedení na dřevěných sloupech bez uzemněných konzol.....	34
4.3 Přepětí nepřímých úderů .....	34
4.4 Zemnicí lano .....	35
4.5 Svodiče přepětí .....	36
4.5.1 Koordinační jiskřiště.....	37
4.5.2 Vyfukovací bleskojistka .....	38
4.5.3 Ventilová bleskojistka.....	39
4.5.4 Omezovač přepětí .....	40
4.6 Porovnání omezovačů přepětí a ventilových bleskojistek.....	44
4.7 Použití ochran v distribuční síti vn .....	45
4.7.1 Venkovní vedení s holými vodiči .....	45
4.7.2 Venkovní vedení s izolovanými vodiči .....	45



4.7.3	Přechod venkovního vedení do kabelového vedení.....	46
<b>5</b>	<b>Zkoušky odolnosti .....</b>	<b>47</b>
5.1	Rázové zkoušky .....	47
5.2	Rázová vlna napětí.....	47
5.3	Rázová vlna proudu .....	48
5.4	Spínací impuls.....	49
5.5	Vlastnosti omezovačů přepětí.....	50
<b>6</b>	<b>Simulace působení omezovače přepětí v síti 22 kV .....</b>	<b>51</b>
6.1	Úvod do problematiky .....	51
6.2	Charakteristika programu ATPDraw 5.3 .....	52
6.3	Struktura programu ATPDraw 5.3.....	52
6.4	Ochranná vzdálenost.....	53
6.5	Model působení omezovače v síti 22 kV .....	54
6.5.1	Stanovení ochranné vzdálenosti.....	55
6.5.2	Simulace působení omezovače přepětí .....	56
6.5.3	Vliv délky přívodů a a b .....	58
6.5.4	Změna průřezu přívodu b.....	60
6.6	Zhodnocení simulace .....	61
<b>7</b>	<b>Závěr .....</b>	<b>62</b>
	<b>Seznam literatury a informačních zdrojů .....</b>	<b>63</b>
	<b>Přílohy .....</b>	<b>65</b>
I.	Provozní přepětí.....	65
II.	Hrotové výboje .....	65
III.	Druhy přepětíových vazeb.....	66
IV.	Použité prvky v modelu a jejich parametry .....	67
1.	Napájení sítě (AC3PH) .....	67
2.	Napájecí transformátor 110/22 kV (BCTRAN).....	67
3.	Venkovní vedení a jejich modely (LCC).....	68
4.	Zdroj bleskového proudu (HEIDLER) .....	69
5.	Omezovač přepětí (MOV) .....	69
6.	Distribuční transformátor 22/0,4 kV (BCTRAN).....	70
7.	Zátěž (RLCD3) .....	71

## Seznam symbolů a zkratk

f .....	frekvence [Hz]
nn .....	nízké napětí
vn .....	vysoké napětí
vvn .....	velmi vysoké napětí
zvn.....	zvlášť vysoké napětí
HVDC .....	high voltage direct current
LEMP.....	lighting electromagnetic pulse
t .....	teplota [°C]
Cb.....	kumulonimbus
H <sub>2</sub> O .....	voda
OH <sup>-</sup> .....	záporné ionty
H <sup>+</sup> .....	kladné ionty
I <sub>p</sub> .....	maximální hodnota proudu [kA]
t <sub>f</sub> .....	doba čela [μs]
t <sub>h</sub> .....	doba mezi začátkem vlny a 50 % maximální hodnoty [μs]
S <sub>m</sub> .....	maximální strmost čela vlny [kA/μs]
Z <sub>0</sub> .....	charakteristická impedance vedení [Ω]
T <sub>d</sub> .....	hodnota keraunické úrovně
N <sub>g</sub> .....	hustota výskytu blesku
N <sub>d</sub> .....	četnost přímých úderů do vedení
H.....	průměrná výška vedení nad zemí [m]
K <sub>0</sub> .....	orografický koeficient [-]
c.....	činitel vazby [-]
ZL.....	zemnicí lano
α .....	ochranný úhel [°]
KZL.....	kombinované zemnicí lano
U <sub>p</sub> .....	zbytkové napětí svodiče [kV]
ZnO .....	oxid zinečnatý

---

SiC .....	karbid křemíku
k .....	konstanta napěťové úrovně [-]
EVA .....	etylen vinyl acetát
IEC .....	International Electrotechnical Commission
ANSI .....	American National Standards Institute
RGN .....	rázový generátor napětí
RGP .....	rázový generátor proudu
L .....	ochranná vzdálenost [m]
a .....	přívod k transformátoru [m]
b .....	přívod k omezovači [m]
BIL .....	základní izolační hladina [kV]
ATP-EMTP .....	Alternative Transients Program- ElektroMagnetic Transients Program
$t_{\text{blesk}}$ .....	Doba úderu blesku [ms]
L1,L2,L3 .....	Fázové vodiče
$U_{\text{max}}$ .....	maximální amplituda napětí [kV]

## Úvod

Elektrickou energii bereme v současnosti jako naprosto přirozenou součást našeho života. Zvyšující se požadavky na odběr elektrické energie s sebou také přinášejí zvyšující se požadavky na jednotlivé prvky soustavy, zajišťující přenos a distribuci. Vyskytne-li se v energetické soustavě napětí vyšší než nejvyšší povolené napětí, mluvíme o přepětí. Následkem přepětí dochází k namáhání izolačního systému, což může způsobit poruchu na zařízení. Přepětí dělíme podle svého původu na přepětí provozní a atmosférická.

V této práci jsem se zaměřil na vznik atmosférického přepětí, které je následkem atmosférických výbojů. Popis vzniku atmosférického výboje je uveden v kapitole 2. Atmosférická přepětí vznikají buď přímými údermi, nebo nepřímými údermi blesku do vedení. Vlivem těchto úderů vzniká elektromagnetické pole a po vedení se šíří přepět'ová vlna. Jako ochrana proti přímým výbojům do vedení se nad fázové vodiče umisťují zemnicí lana. Jsou navrženy tak, aby úder blesku do zemnicích lan byl pravděpodobnější než do fázových vodičů.

Při ochraně elektrických zařízení před nebezpečným přepětím se k nim instalují svodiče přepětí. Mezi tyto ochrany patří například ochranné jiskřiště, vyfukovací a ventilová bleskojistka a omezovač přepětí. V současné době je tendence používat hlavně omezovače přepětí. Důvodem použití je absence zapalovacího jiskřiště. Omezovače se skládají ze sériově řazených bloků varistorů na bázi ZnO. Popis jednotlivých ochran a jejich výhod je uveden v kapitole 4.

Pro společnost je velmi důležitá bezporuchová distribuce energie a její využívání. Nastane-li v energetické soustavě porucha způsobena atmosférickým výbojem, realizovaná měření v reálné síti jsou problematická. Pomocí počítačového programu ATPDraw 5.3 lze sestavit model situace a podrobně zkoumat ochranné působení omezovače. Kapitola 6 popisuje působení omezovače přepětí v síti distribuční síti 22 kV, výpočet ochranné vzdálenosti a vliv přívodů a a b.

Cílem této práce je vysvětlit a na názorném příkladu ukázat, proč jsou přepět'ové ochrany tak důležité pro život v moderní civilizaci.

# 1 Úvod do problematiky

## 1.1 Elektrizační soustava v ČR

Energetická soustava je celek jednotlivých sítí a výroben elektrické energie. Zabezpečují přenos a rozvod elektrické energie od výroben až ke konečným spotřebitelům. Tento systém je charakterizován energetickými ztrátami a nákladovými toky spojenými s realizací a provozem energetické soustavy. Jejím hlavním úkolem je spolehlivá dodávka dostatečného množství elektrické energie všem odběratelům v dohodnuté kvalitě, s minimálními náklady, při zaručené bezpečnosti práce. Jednotlivé části se dělí podle druhu využití a napěťové hladiny (tab. 1.1). Pro ČR je jmenovitý kmitočet napájecího napětí 50 Hz. Střední hodnota kmitočtu základní harmonické musí být v následujících mezích [1]:

- U systémů se synchronním připojením k propojenému systému 50 Hz  $\pm$  1 % (tj. 49,5  $\div$  50,5 Hz) během 99,5 % roku a zároveň 50 Hz - 6 % / + 4 % (tj. 47  $\div$  52 Hz) po 100 % času.
- U systémů bez synchronního připojení k propojenému systému (tj. ostrovní napájecí systémy) 50 Hz  $\pm$  2 % (tj. 49  $\div$  51 Hz) během 95 % týdne a zároveň 50 Hz  $\pm$  15 % (tj. 42,5  $\div$  57,5 Hz) po 100 % času.

Tab. 1.1 Napěťové hladiny v elektrizační soustavě v ČR [2]

název	značka	velikost napětí	způsob uzemnění
přenosová soustava	zvn	400 kV	provoz s přímo uzemněným uzlem
		220 kV	
	vvn	110kV	
distribuční soustava	vn	35 kV	provoz s nepřímo uzemněným uzlem (izolované, připojené přes tlumivku, odpor)
		22 kV	
		10 kV	
		6 kV	
	nn	0,4 kV	provoz s přímo uzemněným uzlem

## 1.2 Elektrizační soustava ve světě

Na rozdíl od ČR se v některých státech pro přenos elektrické energie používá technologie přenosu stejnosměrným proudem velmi vysokého napětí (HVDC-high voltage direct current). Výhodou HVDC, oproti střídavému přenosu, je schopnost přenášet velké množství energie na velké vzdálenosti s nižšími kapitálovými náklady a nižšími ztrátami. Nevýhodou HVDC jsou velmi nákladné koncové stanice a nižší účinnost trafostanic. Nejdelší HVDC linka na světě je

v současné době mezi Dam Xiangjiaba a Šanghaji v Číně. Délka vedení je 2 071 km, jmenovité napětí  $\pm 800$  kV a přenášený výkon 6 400 MW. V roce 2012 bude nejdelší HVDC spojení Rio Madeira mezi Amazonas a São Paulo, kde délka vedení bude 2 500 km, jmenovité napětí  $\pm 600$  kV a přenášený výkon 3 150 MW. Příklady HVDC vedení v Evropě jsou uvedeny v Tabulce 1.2.

Tab. 1.2 Vybrané HVDC vedení v Evropě [3]

název	propojení	délka	jmenovité napětí	přenášený výkon
Konti-Skan 1 (r. 1965)	Dánsko a Švédsko	87 km	$\pm 250$ kV	250 MW
Konti-Skan 2 (r. 1968)	Dánsko a Švédsko	88 km	$\pm 300$ kV	300 MW
Skagerrak 1&2 (r. 1976-1977)	Dánsko a Norsko	113 km	$\pm 250$ kV	500 MW
Skagerrak 3 (r. 1993)	Dánsko a Norsko	113 km	$\pm 350$ kV	440 MW
Skagerrak 4 (r. 2014)	Dánsko a Norsko	140 km	$\pm 500$ kV	700 MW
Kontek (r. 1995)	Zéland, Dánsko a Německo	171 km	$\pm 400$ kV	600 MW
SwePol (r. 2000)	Švédsko a Polsko	245 km	$\pm 400$ kV	600 MW
NorNed (r. 2008)	Norsko a Holandsko	518 km	$\pm 450$ kV	700 MW

### 1.3 Přepětí

Elektrizační soustava je dimenzována na určitou jmenovitou hodnotu napětí (efektivní sdružené napětí). Při provozu dochází z různých důvodů ke zvýšení napětí nad jmenovitou velikost. Tyto změny nesmějí ohrozit rozvod a přenos elektrické energie. Nejvyšší napětí soustavy je nejvyšší efektivní sdružené napětí, které se může vyskytnout v soustavě za normálních provozních podmínek v kterékoli době a v kterémkoli místě soustavy. Nejvyšší dovolená napětí a jmenovitá napětí jsou uvedena v Tabulce 1.3.

Tab. 1.3 Nejvyšší dovolená napětí v ČR nad 1 kV [2]

jmenovité napětí [kV]	nejvyšší dovolené napětí [kV]
3	3,6
6	7,2
10	12
22	25
35	38,5
110	123
220	245
400	420

**Vzroste-li však napětí v síti nebo v některé její části nad nejvyšší dovolené napětí, pak mluvíme o přepětí.** Přepětí je tedy jakékoli zvýšení napětí nad nejvyšší napětí soustavy (zpravidla nad jeho amplitudu). Přepětí se mohou objevit nejen mezi vodičem a zemí, ale též mezi dvěma vodiči. Pak mluvíme o mezifázových přepětích [4].

## 1.4 Definice přepětí

Podle českých státních norem ČSN 33 4000 a ČSN 33 4010 je přepětí definováno následovně: „ *Přepětí je takové napětí, které je vyšší než nejvyšší provozní napětí. Je možné, že tento jev bude pouze přechodový a krátkodobý.* ” ČSN EN 60664-1 ed. 2 uvádí, že se přechodové jevy neuvažují [5].

## 1.5 Dělení přepětí

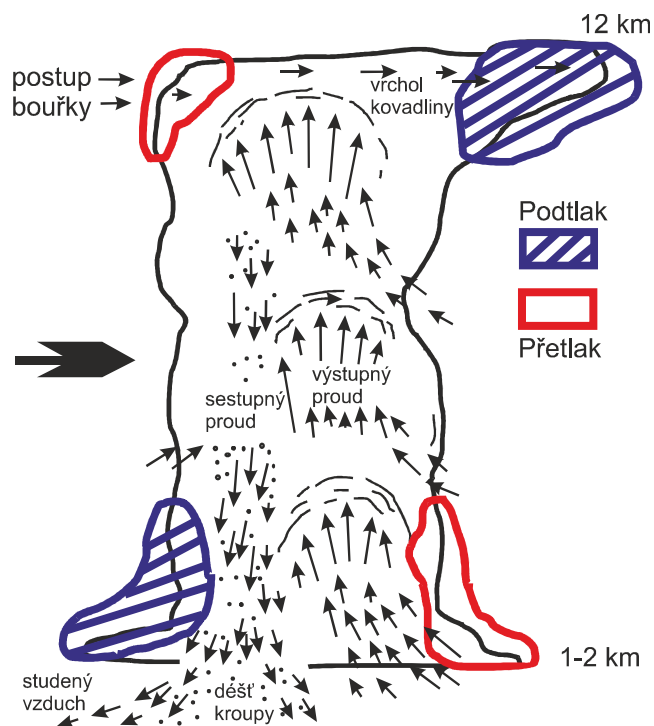
Přepětí dělíme na:

- **Atmosférická přepětí** vznikají úderem blesku do vedení nebo nekrytých částí elektrických zařízení. Mohou vzniknout také indukcí při úderu blesku v blízkosti vodičů nebo jiných částí rozvodného zařízení.
- **Provozní přepětí** jsou způsobena spínacími pochody v obvodech s velkou indukčností nebo kapacitami (při odepínání zkratů, při přerušovaném zemním spojení). Podrobněji viz. příloha I.

Pro návrh ochrany proti přepětí při provozu elektrických sítí jsou nejzávažnější poruchy vzniklé při atmosférických výbojích. Zejména úder bleskového výboje přímo do vedení nebo při úderech do země blízko vedení.

## 2 Elektřina v atmosféře

Atmosférický výboj (odtud anglické označení lightning electromagnetic pulse - LEMP) je silný přírodní elektrostatický výboj produkovaný během bouřky. Vznik atmosférického výboje je podmíněn existencí bouřkových oblaků. Tyto bouřkové oblaky vznikají v důsledku intenzivního vertikálního proudění vzduchu. Podle meteorologické terminologie jsou bouřkové oblaky označovány jako kumulonimbus. Jedná se o mohutný a hustý oblak velmi značného vertikálního rozsahu v podobě hor nebo obrovských věží. Alespoň část jeho vrcholu je obvykle hladká nebo vláknitá či žebrovitá a téměř vždy zploštělá. Tato část se rozšiřuje do podoby kovadliny nebo širokého chocholu. Na obrázku 2.1 můžeme vidět schématické proudění vzduchu v různých výškách kumulonimbu a vznik kovadlinového tvaru tohoto oblaku. Spodní okraj kumulonimbu je ve výšce 1 až 2 km nad povrchem země, horní části dosahují výšky až 12 km.



Obr. 2.1 Schéma proudění vzduchu v kumulonimbu

### 2.1 Vznik bouře

Bouře je meteorologický úkaz, který patří mezi elektrometeory [6]. Aby mohla vzniknout bouře, musí se vytvořit typické bouřkové mraky - kumulonimbus. Vzduch začne stoupat do horních chladných vrstev, zde se ochladí, vodní pára kondenzuje a vznikne bouřkový oblak.

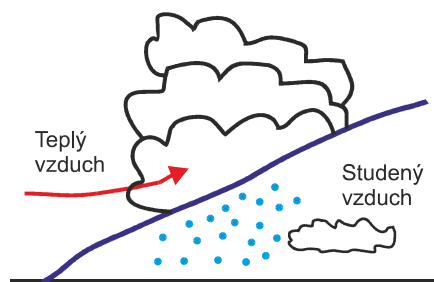


Rychlost vývoje bouřkových oblaků je nepředvídatelná. Blesky mohou vznikat kilometry před nebo za bouří a mohou vznikat i při jasné obloze. Začátek a konec bouřky je proto nejnebezpečnější. Podle dynamických procesů v atmosféře můžeme bouře rozdělit na frontální bouře, místní bouře z tepla a orografické bouře [6].

### 2.1.1 Frontální bouře

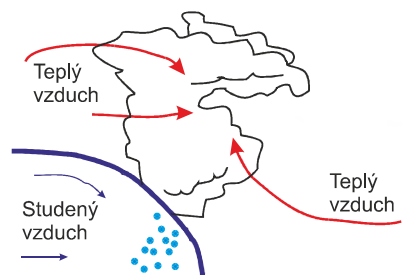
Vznikají na hranici dvou rozdílných vzdušných mas. Frontální bouřka může vzniknout v libovolnou dobu během celého roku. Je obvykle provázena silným větrem ze západních směrů. Fronta přináší obvykle i změnu počasí. Přejít fronty můžeme zjistit v předpovědi nebo na synoptické mapě.

Bouře ze studené fronty (obr. 2.2) je nejčastější druh bouře, která vzniká v letních obdobích. V teplém sektoru tlakové níže se rychlejší masa chladného (těžšího) vzduchu ve tvaru klínu podsouvá pod teplý vzduch. Tím je teplý vzduch nucen rychle stoupat nahoru, což přináší výrazný pokles teploty.



Obr. 2.2 Bouře ze studené fronty

Bouře z teplé fronty (obr. 2.3) je velmi ojedinělá. Rozvoji zpravidla brání stabilní vrstva v teplé frontě. Při vertikálním proudění na teplé frontě jsou stabilní vrstvy vzduchu dříve stlačovány. Většinou je to pár oblaků a omezuje se na málo výbojů s malým účinkem na počasí.

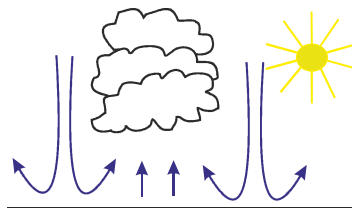


Obr. 2.3 Bouře z teplé fronty

### 2.1.2 Místní bouře z tepla

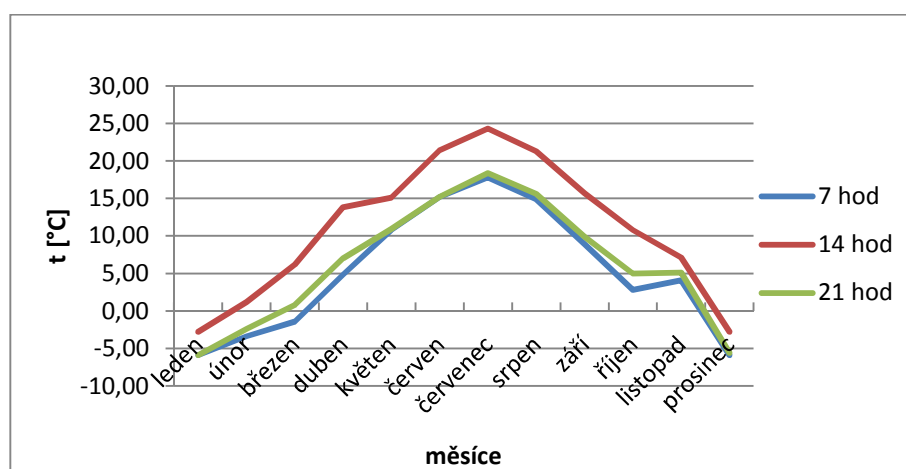
Bývají na ohraničeném prostoru a nepřinášejí změnu počasí. Vznik místních bouřek můžeme předvídat pozorováním meteorologických prvků převážně vývojem oblačnosti.

Místní bouře z tepla (obr. 2.4) vzniká termickou konvekcí v létě během slunečných dnů při nerovnoměrném silném přehřátí zemského povrchu. Teplý vzduch stoupá vzhůru a je nahrazován chladným vzduchem.



Obr. 2.4 Místní bouře z tepla

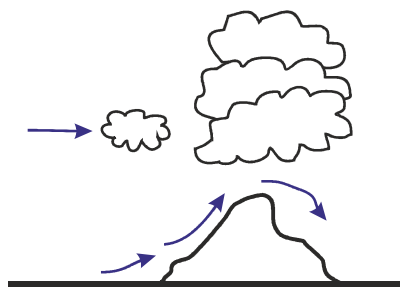
Tyto bouře vznikají od května do září v poledních a odpoledních hodinách, nejčastěji mezi 15. a 18. hodinou [6]. Na obrázku 2.5 můžeme vidět průběh teplot v roce 2010 v ČR. Hodnoty teplot jsou měřeny v 7, 14 a 21 hodin. Teploty jsou měřené ve stínu a na větraném místě ve 2 metrech nad zemí na amatérské meteorologické stanici Velké Svatoňovice.



Obr. 2.5 Průběh teplot v roce v 2010 [7]

### 2.1.3 Orografická bouře

Orografická bouře (obr. 2.6) vzniká dynamickou konvekcí nejčastěji na návětrné straně hor a pohoří. V horách jsou výstupní proudy výraznější než v nížinách. Vlhké a labilní vzdušné masy proudí přes hřebeny hor, čímž jsou vytlačovány nahoru. Horské oblasti u nás přispívají k větší četnosti bouřek [6].



Obr. 2.6 Orografická bouře

## 2.2 Elektrická vodivost vzduchu

Elektrické pole vzduchu má přibližně vertikální směr a je orientováno tak, že zemský povrch se jeví jako záporně nabitý a atmosféra nese kladný náboj. Intenzita elektrického pole vzduchu u zemského povrchu, za podmínek klidného počasí, dosahuje hodnot  $130 \div 140$  V/m [8]. Je způsobena ionizací molekul vzduchu vlivem radioaktivního a kosmického záření, což potvrzuje výrazný růst vodivosti s výškou. V případě kdy pod základnou bouřkového oblaku vyčnívá nad rovný povrch předmět, zesiluje intenzita elektrického pole na hodnotu  $600 \div 1\,000$  V/m [4]. Takto zesílené elektrické pole může vyvolat na předmětech s ostrými hranami hrotové výboje (podrobněji viz. příloha II).

Elektrická vodivost u zemského povrchu je velmi nízká a se vzrůstající výškou roste. Ve výškách 50 až 60 km [7] bývá vzduch již natolik elektricky vodivý, že považujeme tuto hodnotu výšky za pomyslnou vzdálenost mezi jednotlivými kulovými deskami kondenzátoru (země – atmosféra). Tento obrovský sférický kondenzátor odděluje vrstva dielektrika (vzduch). Mezi pomyslnými deskami vytvářejí iontové páry kosmickým zářením a radioaktivitou zemského pláště tok záporných iontů o intenzitě 1,8 kA [8] a proudové hustotě  $10$  pA/m<sup>2</sup> [8]. Tímto způsobem by během několika minut došlo k úplnému vybití zmíněného kondenzátoru. Existuje nabíjecí mechanismus udržující potenciál mezi pomyslnými deskami kondenzátoru na hodnotě  $\sim 100$  kV. Tento mechanismus nazýváme atmosférické výboje [8], [9].

## 2.3 Oblačná elektřina

Oblačná elektřina [7] se projevuje u oblaků druhu kumulonimbus (Cb). Tento oblak má strukturu se **záporným nábojem v dolní části** a **kladným nábojem v horní části**. Po elektrické stránce má tedy oblak bipolární strukturu. Silné elektrické efekty jsou prakticky

vždy spojeny s intenzivními srážkami v mírných a vyšších zeměpisných šířkách. Lze tedy předpokládat, že oblaky zpravidla obsahují ledové částice. Z tohoto důvodu představuje největší význam v oblačné elektřině teorie vycházející z přítomnosti pevné fáze vody, využívající termoelektrických vlastností ledu. V následujících podkapitolách bude tato teorie vysvětlena.

### 2.3.1 Vznik náboje v kapalně fázi

Při bouři ze studené fronty stoupá teplý vzduch, směřuje do oblak (výstupný proud) a pak se točí směrem nahoru. Stoupající vzduch v bouřkovém mraku se postupně ochlazuje a koncentrace vodních par pomalu roste. Postupně dochází k jejich nasycení a vytváření drobných kapek. Kapky vody začnou padat proti směru větru, tlak působí proti nim a nakonec dojde k jejich rozdělení. Nejvýznamnější úlohu při vzniku náboje v kapalně fázi představuje jev, tzv. **Lenardův efekt** [7]. Jeho podstata spočívá v tom, že při prudkém nárazu vodní kapky na překážku dochází k jejich rozprašování a tříštění. **Mikroskopické kapičky** ( $r \leq 6,6 \cdot 10^{-8}$  cm) [8] **odtrhnuté z povrchu vody nesou záporný náboj, větší kapky** ( $78 \cdot 10^{-8}$  cm  $< r \leq 250 \cdot 10^{-8}$  cm) [8] **nesou náboj kladný**. Výstupný proud větru nese malé kapičky s negativním nábojem nahoru, zatímco větší pozitivně nabitě kapky jsou mnohem pomalejší. Důsledkem tohoto procesu se oddělí kladné a záporné náboje uvnitř mraku. V kapalně fázi se oddělením nábojů vytváří pozitivní střed, zatímco záporný náboj je rozptýlen ve zbytku kapalně zóny. Horní oblast mraku je chladnější než 0 °C a vznik náboje probíhá podle jiného procesu [9].

### 2.3.2 Vznik náboje při mrazu

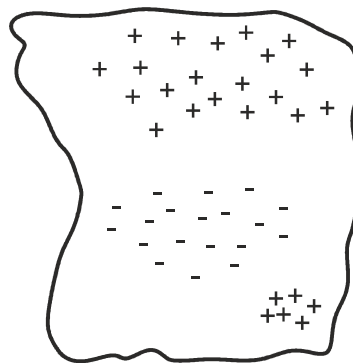
V horní části oblaku dosahují teploty kolem -30 °C [10], kapky vody tedy mrznou. Zmrazení začíná na povrchu vody, kde se vytváří tenké vrstvy ledu. Při zmrazování postupuje energie směrem do středu kapky. Po chvíli se zmrzlé ledové jádro začne omezovat v rozšiřování a na povrchu ledu se objeví trhliny. Teplota zmrzlé kapky není jednotná, ve středu je ve srovnání s povrchem vyšší. Ve zmrzlé kapce je určitá část molekul H<sub>2</sub>O disociovaná a vyskytují se zde záporné ionty **OH<sup>-</sup>** a pozitivní kationty vodíku **H<sup>+</sup>**. Kationty **H<sup>+</sup>** mají vyšší pohyblivost ve srovnání s anionty **OH<sup>-</sup>** (vyplývající z termického pohybu). Nerovnoměrné

rozdělení kladných a záporných iontů má za příčinu negativní dominanci v jádru na jedné straně a na druhé pozitivní dominanci ve vnějším popraskaném ledovém obalu [7], [9].

Po překročení napínací síly v jádru dojde k odtrhnutí ledového obalu a jádra. Výsledkem popsaneho procesu je vznik lehkých sněhových vloček s kladným nábojem a větších ledových útvarů, běžně nazývaných kroupy, nesoucích náboj záporný. Intenzivní vítr nese vzhůru malé sněhové vločky, těžká ledová zrna gravitační silou padají do střední části mraku, kde jsou dále držena výstupnými proudy větru. Sněhové vločky produkují velkou kladně nabitou zónu v horní části bouřkových mraků, zatímco kroupy a stříkající kapky vody vyplňují střední zónu záporným nábojem [9].

Kromě těchto dvou hlavních center se v základně bouřkového mraku pozoruje i podstatně menší podružné kladné centrum, které je prostorově i časově vázáno na padání srážek a vytváří se jen tehdy, existují-li v základně kumulonimbu kladné teploty. Při tání dostatečně velkých padajících ledových částic vznikají vodní kapky takových rozměrů, že blána povrchového napětí vody je neudrží pohromadě. Proto dochází k jejich samovolnému rozpadávání na několik větších zbytků a ty pak pokračují v pádu jako dešťové kapky. Tímto způsobem se pak kladně nabitě dešťové kapky v základně oblaku mohou jevit jako kladné centrum náboje [9].

V mracích se vytváří rozložení nábojů a elektrických polí podle obrázku 2.7. Kladný náboj se nachází v kulovém prostoru o poloměru 2 km a středu ve výšce 6 km, kde jsou teploty kolem  $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Záporný náboj je rozložen v kulovém objemu o poloměru 1 km se středem ve výšce 3 km. Teplota v této oblasti dosahuje přibližně  $-8\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Podružné centrum kladného má rovněž podobu kulového objemu s poloměrem 0,5 km a středem ve výšce 1,5 km, kde panuje teplota asi  $1,5\text{ }^{\circ}\text{C}$  [10].



**Obr. 2.7 Rozložení náboje v bouřkovém mraku**

Kapky vody ve spodní části mraku jsou gravitační silou přitahovány k zemi a elektrostaticky vzhůru. Záporný náboj s vysokou koncentrací v dolní části mraku převyšuje záporný náboj na zemi. Mezi spodní částí vysokého bouřkového mraku a povrchem tak

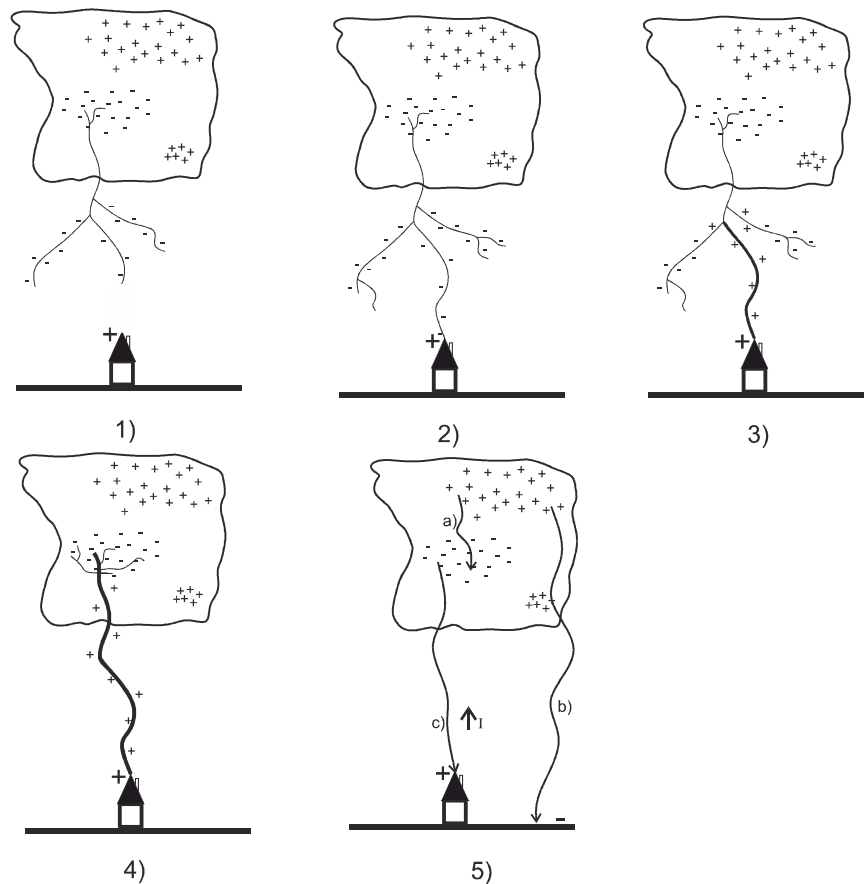
vzniká silné elektrické pole opačné přirozenému poli. V bouřkovém mraku se separuje  $\sim 50$  C náboj a vytváří pole, která mohou dosáhnout průbojných hodnot [11].

Kladné náboje v horní části bouřkového oblaku a záporné náboje v jeho spodní části, nebo náboje indukované na povrchu země, mohou být neutralizovány blesky. S ohledem na rozmístění elektrického náboje může docházet k bleskům mezi centry kladného a záporného náboje v oblaku, nebo mezi oblakem a povrchem země. Blesky v oblacích jsou častější, lépe prozkoumány jsou však výboje směrem k zemi. Vzhledem k rozmístění náboje může docházet k bleskům mezi oběma centry v oblaku nebo mezi záporně nabitou dolní částí oblaku a kladně nabitým povrchem země. Pro návrh ochran proti atmosférickému přepětí jsou významnější blesky proti zemi.

## 2.4 Atmosférický výboj

Místní podmínky pro vznik blesku jsou rozdílné. Běžně dochází k výboji při dosažení hodnoty intenzity elektrického pole  $\sim 100$  kV/m [9]. Postup výboje je na obrázku 2.8. Líderový výboj začíná z mraku směrem k zemi (obr. 2.8 1), šíří se klikatě, velmi rozvětveně a slabě svítící dráze směrem k zemi rychlostí  $10^5 \div 2 \cdot 10^5$  m/s [10]. Postup výboje probíhá po skocích, po 50  $\mu$ s překoná dráhu  $\sim 50$  m a na několik desítek  $\mu$ s se zastaví. Poslední fáze bleskového kanálu končí  $\sim 50 \div 150$  m od země. Tento výboj se nazývá **vůdčí výboj** (obr. 2.8 2). Vůdčí výboj se šíří rychlostí kolem  $10^5$  m/s [11], rychlost zpětné vlny je  $10^7 \div 10^8$  m/s [10]. Elektrická pevnost vzduchu je překonána, líderový kanál startuje ze země směrem k opačně nabitému výboji (obr. 2.8 3). Tento výboj se nazývá **vstřícný výboj** a vzniká v důsledku silného elektrického pole na předmětech s ostrými hranami (tráva, strom, komín apod.). V momentě, kdy se oba výboje setkají, je vytvořena vodivá cesta mezi centrem náboje v oblaku a povrchem země (obr. 2.8 4). Vzniká hlavní bleskový kanál, který se nazývá **zpětný výboj**. Potenciálový rozdíl mezi těmito místy vyvolá proudový impuls, který způsobí zpětný výboj sledující stopu obou předchozích výbojů.

Rychlé a prudké ohřátí vzduchu v oblasti kanálu blesku vyvolá hrom. Výboj trvá stovky  $\mu$ s, kanálem se přenesou náboj  $\sim 10$  C [11] a potom dochází k rozpadu. Ve spodní části mraku se odvedeným nábojem vytvoří kladný potenciál. Po kompenzaci vnitřními blesky z jiných částí mraku je během  $\sim 100$   $\mu$ s [11] přiveden nový záporný náboj, který se šíří k zemi v podobě dalšího blesku. V původním jiskrovém kanále jsou relaxační procesy pomalejší, nový jiskrový kanál se formuje velmi rychle v místě původního kanálu [10], [11]. Počet výbojů během blesku může být 10 a více (viz Tab. 2.2).



**Obr. 2.8** Postup výboje (a) blesk mezi oběma centry, b) negativní blesk-vyvolaný záporným nábojem, c) pozitivní blesk- vyvolaný kladným nábojem)

Na základě spektrometrických měření je teplota uvnitř bleskového výboje, tedy teplota ionizovaných plynů,  $\sim 25\,000\text{ °C}$  [4]. Průměr bleskového kanálu je jednotky až desítky mm. Tlak dosahuje asi stonásobku běžné atmosférické hodnoty. Napětí mezi bleskem a zemí dosahuje hodnot  $\sim 100\text{ MV}$  [11] a proud protékající kanálem  $\sim 30\text{ kA}$  [11]. Blesk tedy disponuje výkonem  $3 \cdot 10^{12}\text{ W}$ , ovšem trvajícím po dobu  $1 \cdot 10^{-3}\text{ s}$  [4], což odpovídá přibližně  $1\,000\text{ kWh}$  energie. Za součást jednoho blesku jsou obvykle považovány ty dílčí výboje, které proběhnou v čase do jedné sekundy a jejichž místa zásahů nejsou od sebe vzdálena více než  $10\text{ km}$ .

## 2.5 Typy bleskového výboje

Dosud popisovaný bleskový výboj se týkal negativního blesku, tedy výboje, který neutralizuje záporný náboj v bouřkovém oblaku. I když je více než  $90\%$  všech úderů blesku z mraku do země negativních, i pozitivní zásahy mají své zastoupení a nelze je opomíjet.

### 2.5.1 Výboje se zápornou polaritou

Charakteristika prvního zásahu se zápornou polaritou je popsána v tabulce 2.1. Většina dat v této tabulce byla naměřena na hoře San Salvador ve Švýcarsku [13].

Tab. 2.1 Parametry prvního negativního blesku [13]

parametr	počet záznamů	průměrná hodnota
$I_p$ [kA]	80	31,1
$T_{10}$ [μs]	80	4,5
$T_{30}$ [μs]	80	2,3
$t_f$ [μs]	80	3,8
$t_h$ [μs]	90	77,5
$S_{10}$ [kA/μs]	75	5,0
$S_{30}$ [kA/μs]	73	7,2
$S_m$ [kA/μs]	75	24,3

Údaje uvedené v tabulce:

$I_p$  maximální hodnota proudu (peak)

$T_{10}$  časový interval mezi 10 % a 90 % hodnoty maximálního proudu na přední části (čele) proudového impulsu

$$T_{10} = t_{90} - t_{10} \quad (2.1)$$

$T_{30}$  časový interval mezi 30 % a 90 % hodnoty maximálního proudu na přední části (čele) proudového impulsu

$$T_{30} = t_{90} - t_{30} \quad (2.2)$$

$t_f$  doba čela

$$t_f = \frac{T_{30}}{0,6} \quad (2.3)$$

$t_h$  doba mezi začátkem vlny a 50 % maximální hodnoty na týlu vlny

$S_{10}$  strmost nárůstu v intervalu 10 % a 90 %

$$S_{10} = (I_{90} - I_{10})/T_{10} \quad (2.4)$$

$S_{30}$  strmost nárůstu v intervalu 30 % a 90 %

$$S_{30} = (I_{90} - I_{30})/T_{30} \quad (2.5)$$

$S_m$  maximální strmost čela vlny



Bleskový výboj se často skládá z více výbojů. Na základě více než 6 000 záznamů blesků z různých míst světa sestavil Anderson a Eriksson tabulku (Tab. 2.2) procentuální četnosti výbojů při blesku [13].

**Tab. 2.2 Statické rozložení vícečetných zásahů [13]**

počet výbojů během jednoho blesku	frekvence výskytu [%]
1	45
2	14
3	9
4	8
5	8
6	4
7	3
8	3
9	2
10 a více	4

Obecně neplatí žádná úměrnost mezi prvním a následujícím úderem blesku. Průměrná maximální hodnota proudu následného výboje je nižší než hodnota prvního zásahu. Při některých měřeních nebyly výjimky ani hodnoty 200 %, tzn. dvojnásobný proud při následném výboji.

### 2.5.2 Výboje s kladnou polaritou

Méně než 10 % zásahů blesku do země má pozitivní polaritu. Kladné blesky se vyskytují zejména v pozdních fázích výboje bouřkového oblaku, kdy spodní záporné centrum náboje slábne a horní kladný náboj klesá dolů v sestupných vzduchových proudech. Nejčastěji se tento typ výbojů objevuje v zimě. Parametry pozitivního bleskového výboje jsou uvedeny v tabulce 2.3.

**Tab. 2.3 Parametry prvního pozitivního blesku [13]**

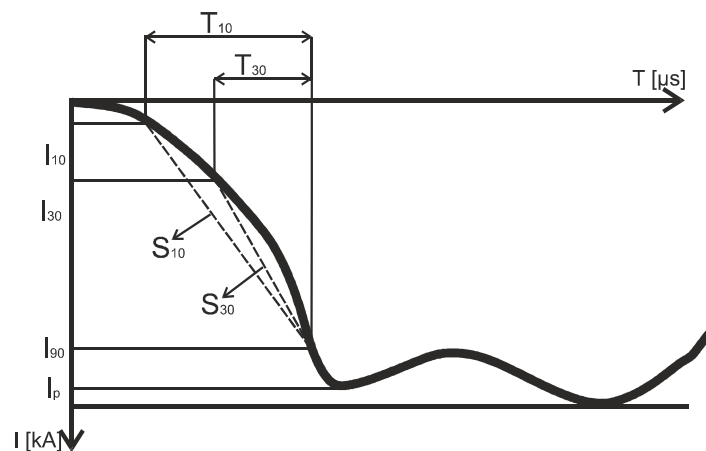
parametr	počet záznamů	průměrná hodnota
$I_p$ [kA]	26	35
$t_f$ [μs]	19	22
$t_h$ [μs]	16	230
$S_m$ [kA/μs]	21	2,4

V tabulce je uvedena průměrná maximální hodnota proudu 35 kA srovnatelná s hodnotou negativního blesku. Maximální hodnota proudu u kladného výboje může být významně vyšší

než u záporného. Dle naměřených hodnot 5 % pozitivních výbojů překračuje hodnotu proudu 250 kA a negativní výboje dosahují hodnoty 80 kA.

## 2.6 Tvar vlny bleskového výboje

Z předchozího textu víme, že 90 % bleskových výbojů jsou výboje se zápornou polaritou. Tvar vlny prvního negativního výboje je znázorněn na obrázku 2.9. Vydutost čela u prvního výboje je způsobena vstřícným výbojem z objektu proti vůdčímu výboji. Tento stoupající výboj nese poměrně malý proud a k prudkému nárůstu proudu dochází až po střetnutí s dopadajícím paprskem z mraku [13].



Obr. 2.9 Základní tvar vlny negativního blesku

## 2.7 Druhy blesků

Rozlišujeme tyto druhy blesků:

- **Blesk čárový** - jedná se o nejčtenější formu blesku. Má tvar lomené nebo klikaté, jasně svítící dráhy, pohybujících se rychlostí až 30 000 km/s [9].
- **Blesk rozvětvený** - další velmi častá forma blesku. V podstatě jde o blesk čárový s několika kanály. Pro představu připomíná bezlistou korunu stromu nebo kořenový systém rostlin. Devastující schopnosti tohoto typu blesku jsou poměrně značné, protože díky několika kanálům ani bleskosvody nedokáží před tímto typem blesku účinně chránit.

- **Blýskavice** - jedná se o typ tichého záblesku bouřkového oblaku trvajících zlomek sekundy. Vzniká mezi opačně nabitými centry uvnitř bouřkového oblaku. Ten je již tak vzdálený, že zahřmění není slyšitelné.
- **Růžencový (perlový) blesk** - skládá se z několika jednotlivých svítících těles kulového tvaru, které leží na jedné čáře. Vzdálenost mezi nimi je  $7 \div 12$  m. Jeho tvar připomíná perly na šňůrce. Svítící tělesa se objeví naráz, ale mizí jedno po druhém. Doprovází ho značný zvukový efekt.
- **Kulový blesk** - velice specifický typ blesku, pokud jej lze vůbec za blesk považovat. Podstata jeho vzniku spočívá v existenci vysoce ionizovaného plynu čili plasmy. Má podobu koule, září nejčastěji světlem oranžové až žluté barvy, ale výjimkou nejsou ani kulové blesky ostatních barev spektra. Mívá velikost řádově od centimetrů až po několik decimetrů, vzácně i okolo metru, nejčastěji však  $10 \div 20$  cm. Jeho výskyt bývá nečekaný, velmi často však ke konci bouřky popř. po ní. Náhle se ukáže, několik sekund se pomalu a nepředvídatelně pohybuje nízko nad zemí a mizí tichým rozplynutím, nebo ohlušujícím výbuchem [9].

## 2.8 Hrom

Rychlé a prudké ohřátí vzduchu v oblasti kanálu blesku způsobuje jeho náhlé rozpínání, které připomíná výbuch. Ten rozkmitá částice vzduchu, které slyšíme jako dunění. Po průchodu elektrického proudu kanálem teplota v kanálu náhle klesne, vzduch se rychle smrští a znovu dochází k jeho kmitání. Vzniká hřmění. Zvukové vlny se mohou přitom odrážet od země i od oblaků, čímž se znásobuje i tak už dost nepříjemný akustický jev. K hřmění přispívá i výbuch směsi kyslíku a vodíku, který vzniká z vodní páry při prudkém zahřátí vzduchu v kanálu blesku pod vlivem elektrického výboje. Hřmění, jako každý zvuk, se šíří ve vzduchu rychlostí asi 330 m/s a dosahuje hlasitosti 120 dB.

### 3 Následky atmosférického přepětí

Při zanedbání řádné ochrany proti atmosférickému přepětí vznikají značné škody. Ty mohou být přímé (majetek) nebo nepřímé (výpadek výroby, ztráta dat). Je patrné, že nepřímé škody několikanásobně převyšují škody přímé. Například ztráta dat v bance je katastrofou oproti zničení samotného serveru, byť byl v ceně několika milionů. Nejhorší případ nastane při selhání přístroje v nemocnici a ztrátě lidského života.

#### 3.1 Přímý úder blesku do vedení nn

Přímý úder atmosférického výboje do nadzemního vedení nn je jev, při kterém se po vedení šíří přepět'ové vlny s velmi vysokou amplitudou. Znamená to velké nebezpečí pro spotřebitele elektrické energie, neboť se může dostat podstatná část bleskových proudů na vstupy připojených budov a v nich instalovaných zařízení. Důsledek zavlečení dílčích částí bleskových proudů je poškození nebo zničení počítačů, faxů, ústředen, televizorů, měřících a řídicích regulačních zařízení.

#### 3.2 Přímý úder blesku do vedení vn a vvn

Oproti předcházejícímu případu je zásah blesku do nadzemního vedení vn nebo vvn podstatně šetrnější k zařízením koncových spotřebitelů. Při úderu blesku do vedení vn nebo vvn sice transformátory částečně redukuje bleskový proud, ale i tak se přepětí do rozvodů nn šíří. Přepět'ové impulsy se přenesou kapacitní vazbou mezi primárním a sekundárním vinutím, induktivní vazbou mezi přívody vn a vývody nn a galvanickou vazbou přes společné uzemnění obou napět'ových úrovní (viz. příloha III). Vrcholovou hodnotu přepět'ových vln určuje vlnová rovnice [4]:

$$U = Z_0 * \frac{I}{2}, \quad (3.1)$$

kde:

U amplituda přepět'ové vlny [V],

Z<sub>0</sub> charakteristická impedance vedení [Ω],

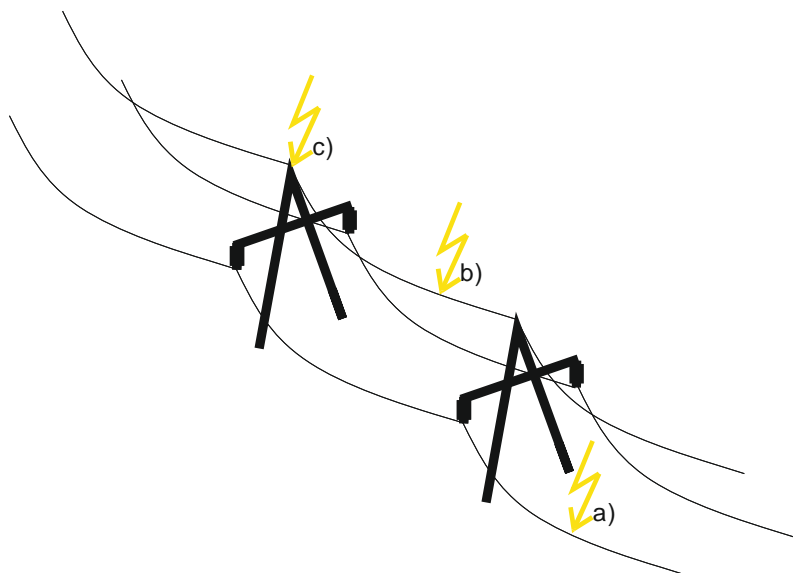
I vrcholová hodnota proudu přeneseného výbojem [A].

U vedení 110 kV typu „soudek“ je  $Z_0 \sim 460 \Omega$ , tzn. že při blesku o velikosti 30 kA je  $U = 460 * (30\ 000/2) = 6,9 \text{ MV}$  a na nejbližším izolačním závěsu musí dojít k přeskoku. Pro proudy blesku do 3 kA k přeskoku nedojde a po vedení se šíří plná vlna přepětí 690 kV.

Na obrázku 3.1 můžeme vidět 3 druhy přímých úderů do vedení. Nejnebezpečnější přepětí vzniká **při přímém úderu blesku do fázového vodiče** (obr. 3.1 a), kdy dojde k přeskoku proudového impulsu do vedení v místě zásahu. Na obě strany vedení se šíří přepěťová vlna, která dosahuje velikosti amplitudy  $\sim 10^6 \text{ V}$  [14], což je víc než rázová pevnost izolace nejvyšších jmenovitých napětí. Přepěťová vlna v jednom vodiči indukuje napětí v sousedních vodičích.

**Při přímém úderu blesku do zemnicího lana** (obr. 3.1 b) se vlny napětí šíří na obě strany od místa úderu a elektromagnetickou vazbou indukují napětí na vodičích. Napětí, které zatěžuje izolaci, je dáno rozdílem napětí na zemnicím laně a na vodičích. Dosáhne-li toto napětí hodnoty vyšší než je přeskové napětí, dojde mezi zemnicím a jedním, nebo několika vodiči ke zpětnému přeskoku.

**Při přímém zásahu stožáru** (obr. 3.1 c) se objeví napětí proti zemi v místech, kde jsou zavěšeny na izolátorech vodiče napětí. Napěťové namáhání izolátoru je dáno součtem okamžitého napětí dané fáze a napětí na stožáru. Po překročení elektrické pevnosti izolátoru dojde ke zpětnému přeskoku a může dojít k zapálení elektrického oblouku mezi stožárem a vodičem (zkrat vedení) [14].



Obr. 3.1 Přímé údery blesků do vedení (a) přímý zásah do fázového vodiče, b) přímý zásah do zemnicího lana, c) přímý zásah do uzemněné části stožáru)

### 3.3 Zpětné přeskoky

Při úderu blesku do stožáru nebo zemního lana je největší část bleskového proudu svedena přes konstrukci stožáru do země. Zbylá část proudu teče zemními lany do sousedních stožárů. Následkem toho se krátkodobě zvýší potenciál stožáru (stovky kV až 2 MV) [16]. Potenciál fázových vodičů se vlivem indukce také zvýší, ale mnohem méně. Na izolátorech se objeví krátkodobé rozdílné napětí (i více než 1 MV) [16] a může nastat přeskok na fázový vodič. Vznik zpětného přeskoku je ovlivněn jednak parametry blesku (strmost čela impulsu proudu, vrcholová hodnota proudu) a jednak parametry vedení (vlnová impedance, výška stožáru, odpor uzemnění, délka rozpětí k sousedním stožárům, počet zemních lan, geometrie fázových vodičů a zemního lana) [16].

### 3.4 Nepřímý úder blesku do vedení

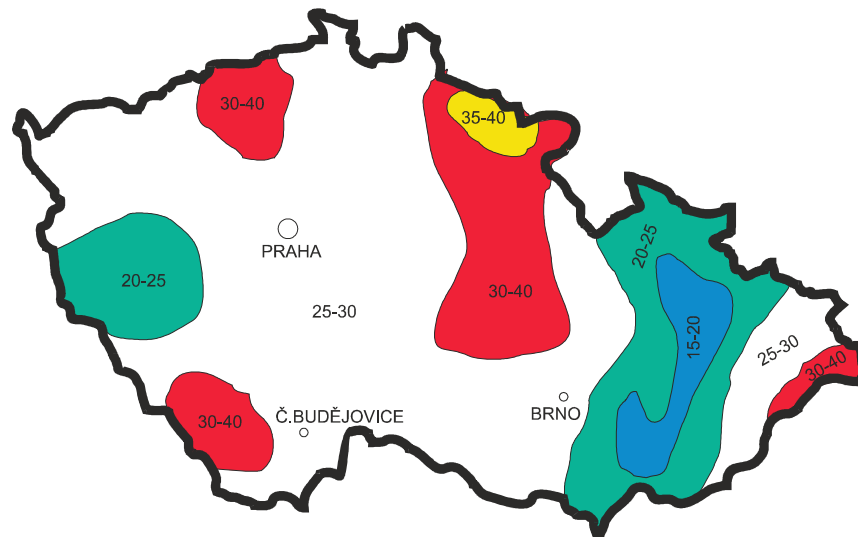
V případě kdy blesk udeří přímo do objektu, vedení nebo zařízení, může ve vedení vzniknout pulzní přepětí galvanickou vazbou přes uzemnění, resp. kapacitní a induktivní vazbou na vedení galvanicky oddělených od výboje blesku a to až do vzdálenosti ~ **2 km** [4]. Nepříznivé působení se stále častěji projevuje v informačních sítích, důvodem je neustálé rozšiřování datových struktur a velká citlivost připojených elektronických přenosových zařízení proti přepětí. Ve srovnání s přepětími vyvolanými přímým zásahem blesku do vedení jsou napětí indukovaná bleskovým výbojem daleko častější [4].

### 3.5 Metoda navrhování optimální ochrany zařízení

Zatímco spínací přepětí je možné měřit a výsledky vyhodnotit a zevšeobecnit, je obtížné nebo velmi nákladné experimentovat s atmosférickými přepětími. Proto se pro účely koordinace izolace a optimalizace ochrany proti atmosférickému přepětí v sítích vn a vvn používají různé metody výpočtů kombinované se statisticky zpracovanými daty o blescích [15].

### 3.5.1 Hustota výskytu blesku

Podle výskytu bouřek jsou vypracovávány mapy, které vyznačují počet úderů blesků na km<sup>2</sup> plochy. Dle normy ČSN 33 1390 je území České republiky klasifikováno jako území s vyšší bouřkovou činností (20 ÷ 30 bouřkových dní v roce). Na obrázku 3.2 je znázorněna izokeraunická (blesková) mapa České republiky. Mapa zobrazuje počet bouřkových dnů za rok.



Obr. 3.2 Počet bouřkových dnů za rok

Hustota výskytu blesku  $N_g$  je základním parametrem při provozu elektroenergetických systémů. Vyjadřuje četnost výskytu blesku mezi oblakem a povrchem země jako počet bleskových úderů na 1 km<sup>2</sup> povrchu země za jeden rok. Velikost tohoto parametru je určována na základě dlouhodobých měření prováděných čítači blesků. V oblastech, které nejsou těmito čítači pokryté, se velikost hustoty výskytu blesku usuzuje z hodnoty keraunické úrovně  $T_d$ , která vyjadřuje počet bouřkových dnů v roce. Za bouřkový se považuje den, kdy v daném místě bylo slyšet hřmění. Na základě měření pro odhad hustoty výskytu blesku je odvozen tento empirický vztah mezi hustotou výskytu blesku a izokeraunickou úrovní [15].

$$N_g = 0,023 * T_d^{1,3}, \quad (3.1)$$

kde:

$T_d$  hodnota keraunické úrovně [-].

### 3.5.2 Četnost přímých úderů do vedení

Jako ochrana pro venkovní vedení s holými vodiči se používají omezovače přepětí (kapitola 4.7.1). Převážně z ekonomických důvodů se posuzuje nasazení omezovačů na důležitá místa. Pro tyto účely se používá vztah určení četností přímých úderů do vedení vn nebo vvn za rok na 100 km vedení [15]:

$$N_d = 0,1 * K_0 * N_g * (b + 10,5 * H^{0,75}), \quad (3.2)$$

kde:

$N_g$  je četnost úderů do země na 1 km<sup>2</sup> za rok,

$H$  průměrná výška vedení nad zemí [m],

$b$  horizontální vzdálenost mezi krajními vodiči [m],

$K_0$  orografický koeficient.

Orografický koeficient vyjadřuje stínící účinek okolního terénu a pohybuje se v rozmezí 0,03 pro vedení v hlubokém údolí a až 3 pro vedení na horní hraně úbočí [15]. Pro vedení v rovině je  $K_0 = 1$  [15].

Pro venkovní vedení v oblasti Plzně použité při simulaci v kapitole 6, je počet bouřkových dnů v roce  $T_d = 20 \div 25$ . Četnost úderu blesku do země je tedy  $N_g = 1,51$  úderů/km<sup>2</sup> za rok. Výška vedení je  $H = 12$  m a horizontální vzdálenost mezi krajními vodiči je  $b = 0,75$  m, vedení je v rovině  $K_0 = 1$ . Četnost přímých úderů do vedení, je tedy  $N_d = 10,34$  úderů na 100 km vedení za rok.



## 4 Způsoby ochrany proti přepětí v síti vn a vvn

Sítě vn a vvn s venkovním vedením je potřeba chránit zejména proti atmosférickému přepětí, protože spínací přepětí nedosahují tak vysokých hodnot. U kabelových sítí bez připojených venkovních vedení jsou největší přepětí způsobena zkraty, spínáním nebo zemními spojeními. Ochrany proti přepětí mají snižovat nepříznivé účinky proti atmosférickým výbojům na distribuční a přenosové síti. Přepětí může ovlivnit výpadky dodávky elektrické energie, zhoršit dodávky elektrické energie a v neposlední řadě zničit nebo podstatně zkrátit životnost zařízení. Všechny následky bouřkové činnosti ovlivňují náklady provozovatele. Ovlivnění výpadků v distribuční a přenosové síti, s převahou venkovních vedení, je obtížný úkol, protože přepětí při úderu blesku do vedení mnohonásobně převyšuje dovolené hladiny napětí na vedení.

### 4.1 Koordinace izolace zařízení sítí

Při koordinaci izolace dochází k volbě izolační hladiny zařízení sítě vn a volbě ochranných opatření. Dosáhneme tak, při minimálních nákladech, na opatření požadované výpadkovosti a poruchovosti. Data potřebná pro návrh izolačních hladin zařízení vychází ze statistického charakteru přepětí v síti a z výpočtů četnosti parametrů přepětí.

Snížení poruchovosti je možné dosáhnout [16]:

- **Zvýšením izolační hladiny zařízení** - jedná se o nejnákladnější způsob koordinace s malou účinností. Při vysokých hodnotách atmosférických přepětí se zvýšení izolačních hladin projeví jen malým snížením jejich poruchovosti.
- **Snížením velikosti přepětí nebo jeho četnosti v síti vhodnými opatřeními** - pro snížení přepětí v síti jako celku je nutno aplikovat ochranná opatření (zemnicí lana, omezovače, odpory uzemnění stožárů) v celé síti. Jedná se o řešení velmi nákladné a ne zcela účinné.
- **Snížením přepětí v místech zařízení vhodnou kombinací ochranných opatření a pomocí omezovačů přepětí** - je to nejúčinnější způsob zajištění přiměřené nízké poruchovosti zařízení vn s malým vlivem na výpadkovost vedení. Kombinace omezovačů přepětí s doplňkovými opatřeními nebo dodržování určitých zásad zajistí nízkou úroveň přepětí přicházející z vedení na chráněné zařízení.

## 4.2 Ochrana před přímým úderem blesku

Charakteristika atmosférického přepětí na vedení se liší u vedení s uzemněnými konzolami a u vedení na dřevěných sloupech bez uzemněných konzol. Betonové sloupy s armováním se z hlediska impulsních bleskových proudů považují za vodivé.

### 4.2.1 Vedení s uzemněnými konzolami

Při úderu do vedení s uzemněnými konzolami úder blesku, ať už do fázového vodiče, zemnicího lana (pokud je) nebo do konstrukce stožáru, způsobí vždy přeskoky vedení k zemi a zpravidla i mezi fázemi. Velikost přepětí na fázových vodičích příliš nezávisí na tom, do čeho blesk udeří. Přeskoky k zemi sníží úroveň přepětí z řádu MV na stovky kV [16]. Po vedení se šíří série velmi strmých impulsů, vzniklá mnohonásobnými přeskoky na izolaci vedení, následovaná pomalejší vlnou přepětí, způsobenou vzrůstem potenciálu na uzemnění v místě úderu blesku.

### 4.2.2 Vedení na dřevěných sloupech bez uzemněných konzol

Dřevěné sloupy bez uzemněných konzol mají velmi vysokou izolační pevnost proti zemi, 3 až 4 MV [16] a ta způsobuje, že při úderu blesku do fázových vodičů je vedení schopno přenést přepětí řádu tisíc kV na značnou vzdálenost bez podstatného snížení jeho energie. Toto přepětí může na dálku způsobit značnou škodu na zařízení. Přitom velká izolační pevnost proti zemi neznamena nižší výpadkovost ve srovnání s vedením s uzemněnými konzolami, protože při každém úderu dojde k mezifázovému přeskoku a následnému zkratu, který je přerušen nadproudovou ochranou v síti (především v sítích nn).

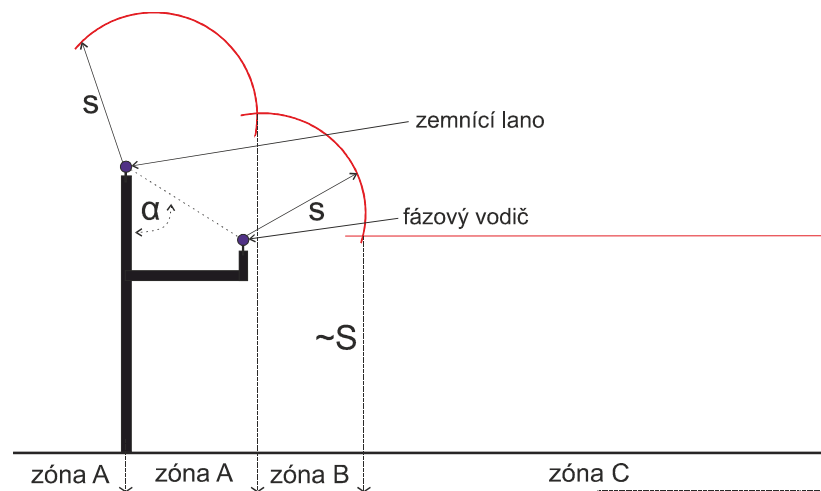
## 4.3 Přepětí nepřímých úderů

Úder blesku do země nebo do konstrukce v blízkosti vedení indukuje ve vedení přepětí, které může také překročit izolační hladinu zařízení. Indukovaná přepětí jsou přibližně stejná ve všech vodičích a mají opačnou polaritu než proud blesku. Protože v 90 % případů je proud blesku záporný, je polarita indukovaného přepětí většinou kladná. Indukovaná přepětí mají menší velikost a energii než přepětí při přímých úderech. Nejsou nebezpečná pro zařízení

chráněná omezovači, nicméně způsobují přeskočky a výpadky a tedy snižují kvalitu nebo i plynulost dodávky.

#### 4.4 Zemnicí lano

Základní funkcí zemnicího lana (ZL) je **ochrana proti přímému úderu blesku** do vedení. Další neméně důležitou úlohou ZL je, že snižují elektrostaticky indukovaná přepětí (zvětšují kapacitu vodičů vůči zemi). Na 100 km vedení udeří 30 až 40 blesků za rok, z nichž 90 % zachytí zemnicí lano [17]. Zemnicí lana jsou uzemněná na každém nebo na každém druhém stožáru a umístěna souběžně s fázovými vodiči. Volba polohy zemnicích lan vychází z teorie ochranného prostoru (obr. 4.1).



**Obr. 4.1 Ochranný prostor zemnicího lana (zóna A- zemnicí lano chrání fázový vodič, zóna B- fázový vodič není chráněn, zóna C- výboj je přitahován k zemi)**

Na obrázku 4.1 je zobrazena konstrukce ochranných prostor pro vedení se zemnicím lanem. Poloha ZL nad fázovým vodičem je dána **ochranným úhlem  $\alpha$**  ( $25^\circ \div 30^\circ$ ). Vzdálenost, na kterou je blesk přitahován, se nazývá **ochranná vzdálenost**. Ochranná vzdálenost je poloměr ochranného prostoru, jehož střed leží v místě vzniku vstřícného výboje a je obvykle totožný s nejvyšším bodem daného objektu. Velikost ochranné vzdálenosti  $S$  je dána vztahem [15]:

$$S = 10 * I^{\frac{2}{3}}, \quad (4.1)$$

kde:

$S$  ochranná vzdálenost [m],

$I$  proud blesku [kA].

Z uvedeného vztahu vyplývá, že čím vyšší bude proud blesku, tím bude větší ochranná zóna A a tím se zmenší zóna B, v které fázový vodič není chráněn.

Zemnicí lana snižují impedanci v místě úderu blesku. Odvádí část proudu k sousedním stožárům a tím snižují přepětí na stožáru s úderem o 10 ÷ 20 % [16] v závislosti na délce rozpětí. Nevýhodou ovšem je, že mohou přispět ke zvýšení potenciálu chráněného zařízení, což se může projevit nepříznivě přenosem přepětí např. do sítě nn. Z tohoto důvodu nejsou zemnicí lana platným opatřením pro snížení přepětí, ale jsou chápány jako základní opatření proti blesku. Použití ZL pro venkovní vedení je zobrazeno v tabulce 4.1.

**Tab. 4.1 Zemnicí lana pro různé napět'ové hladiny**

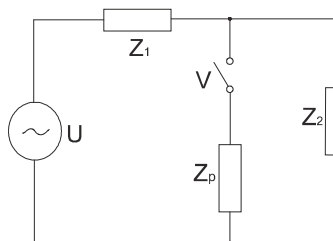
0,4 kV	6 kV	10 kV	22 kV	35 kV	110 kV	220 kV	400 kV
bez zemnicího lana				*	se zemnicím lanem		

(\* Pro vedení vn 35 kV se užívají výběhová lana ve vzdálenosti 600 až 1 000 m před rozvodnami [18])

Zvláštní skupinu mezi ZL tvoří tzv. kombinovaná zemnicí lana (KZL), která kromě základních funkcí, jako u „klasického“ ZL, umožňují rovněž rychlý a spolehlivý přenos velkého objemu dat po optických vláknech. Kabel s optickými vlákny je zapleten uvnitř lana, které se na první pohled téměř neliší od obyčejného ZL.

## 4.5 Svodiče přepětí

Svodiče přepětí jsou paralelně připojeny ke chráněnému zařízení a slouží k omezení velikosti přepětí. Základní vlastností svodiče přepětí je nelineární V-A charakteristika. Svodiče mají různé konstrukce, které jsou podrobněji popsány v následující části práce. Jejich základní úlohou je omezit nebo odvést zvýšená napětí do země tak, aby nebyla ohrožena izolace zařízení (obr. 4.2).



**Obr. 4.2 Princip činnosti svodiče přepětí ( $Z_1$ - impedance zdroje,  $Z_2$ - impedance chráněného zařízení,  $Z_p$ - impedance svodiče, V- vypínač )**

Na obrázku 4.2 představuje vypínač zapůsobení svodiče přepětí. Proud, který poteče svodičem:

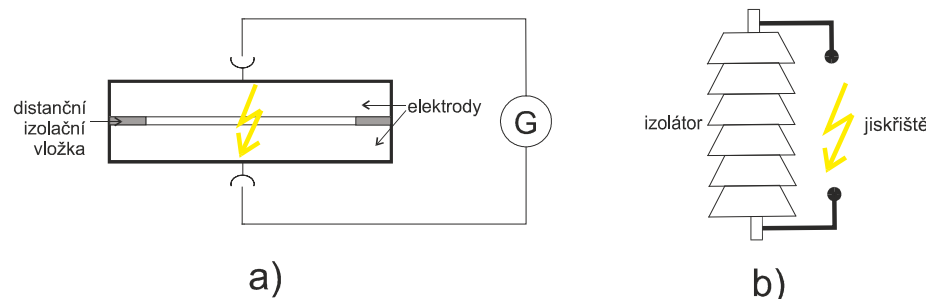
$$I_p = \frac{U}{Z_p + \frac{Z_1 * Z_2}{Z_1 + Z_2}} \quad (4.2)$$

Napětí na svodiči je dáno úbytkem napětí při průchodu proudu  $I_p$ :

$$U_p = \frac{Z_p * (Z_1 + Z_2)}{Z_p * Z_1 + Z_p * Z_2 + Z_1 * Z_2} * U. \quad (4.3)$$

#### 4.5.1 Koordinační jiskřiště

Koordinační jiskřiště (ochranné jiskřiště) je napěťový nelineární prvek pracující na principu elektrického výboje v plynném prostředí. Skládá se z komory s dvěma či více kovovými nebo uhlíkovými elektrodami a definovanou vzdušnou vzdáleností (doskokem). Na obrázku 4.3 a) můžeme vidět principiální uspořádání hrotového jiskřiště. Mezi svorkami naměříme vysokou impedanci blížíící se nekonečnu. Pokud napětí na svorkách jiskřiště překročí hodnotu **zapalovacího** (aktivačního) **napětí**, dojde k ionizaci prostředí a mezi póly jiskřiště se vytvoří obloukový výboj. Tím dojde ke skokové změně impedance mezi póly jiskřiště na nízkou hodnotu blízkou nule. Hodnota napětí na jiskřišti se skokově sníží na hodnotu **obloukového napětí**. Tento stav trvá do té doby, než hodnota proudu tekoucí jiskřištěm neklesne pod **kritickou** (přidržnou) **hodnotu**. Pak dojde vlivem nestabilního režimu obloukového výboje k jeho zhasnutí a k obnovení nevodivého stavu [19].



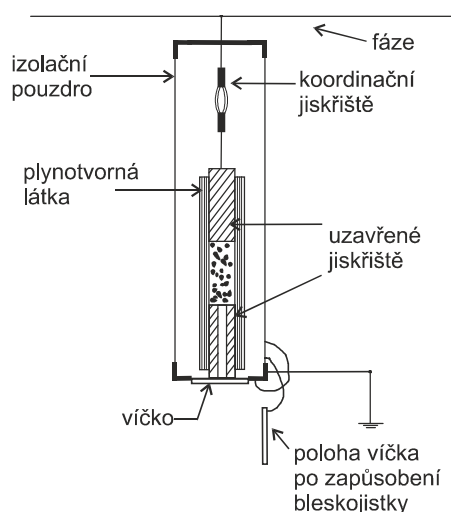
Obr. 4.3 Koordinační jiskřiště (a) principiální uspořádání koordinačního jiskřiště, b) ochranné jiskřiště na izolátorech)

Nevýhodou koordinačních jiskřišť je strmý pokles napětí po zapálení výboje. Při dalším postupu takto omezené vlny přepětí způsobí velké podélné rozdíly elektrického potenciálu na vinutí elektrických strojů (transformátorů) a ohrožuje tak jejich podélnou izolaci [20]. Další

nevýhodou jiskřišť je, že po omezení přepětí nemusí uhasit oblouk (je udržován síťovým napětím) [20]. Jiskřiště je často součástí izolátorů (obr. 4.3 b) a vysokonapěťových zařízení. Jejich význam spočívá zejména v tom, že průrazná dráha vzduchu se posune od povrchu izolátoru, takže se zabrání zničení povrchu izolátoru tepelným účinkem oblouku. V současné době se ochranné jiskřiště používá u vedení s izolovanými vodiči (viz. kapitola 4.7.2). Zapůsobení ochranného jiskřiště se liší dle konstrukce (od jednotek do desítek kA opakovaně). Ochranné jiskřiště představuje jen hrubou přepět'ovou ochranu, má velký rozptyl zapalovacího napětí ( $\pm 13\%$ ) [19].

#### 4.5.2 Vyfukovací bleskojistka

Vyfukovací bleskojistka (Torokova trubice) je v podstatě koordinační jiskřiště doplněno o vypnutí následného proudu pro omezení přepětí. Skládá ze **dvou sériově zapojených jiskřišť**, koordinačního (tyčové) jiskřiště, které má funkci odpojovače, a uzavřeného jiskřiště pro zhášení elektrického oblouku (obr. 4.4). Vnitřní jiskřiště je uzavřené v trubce z plynotvorné látky. Jako plynotvorná látka se dříve používal fibr, dnes obvykle organické sklo Umaplex (polymethylmethakrylát) [20], [21]. Za normálního provozu je uzavřené jiskřiště bez napětí, ale při vzniku přepětí se pomocí koordinačního jiskřiště zapálí oblouk v uzavřeném jiskřišti. Žářem oblouku se uvnitř trubice vytváří teplo a uvolňují se plyny. Víčko ve spodní části pouzdra je zavřené, tlak narůstá. Vznikající plyn obsahuje produkty z materiálu trubky (pryskyřici) a neionizovanou vodní páru z absorbované vody. Po překročení určité hodnoty tlaku se víčko otevře. Plyny proudí ven a svým proudem chladí oblouk na jiskřišti, oblouk zhasne [20].



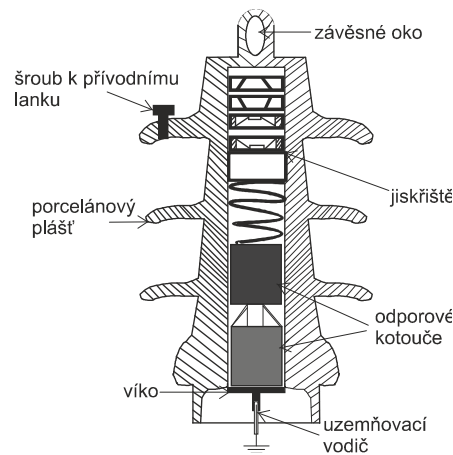
Obr. 4.4 Schématický řez vyfukovací bleskojistky

Torokovy trubice jsou používány v sítích vn (u vedení bez zemnicích lan do jmenovitého napětí 22 kV) [18]. Vyfukovací bleskojistky mají menší zapalovací zpoždění než jiskřiště, ale větší než ventilové bleskojistky. Výhodou bleskojistek je nízká pořizovací cena a vyfukování oblouku směrem od vodičů. To souvisí i s nevýhodou bleskojistek, protože oblouk při vyfukování může dosahovat několika metrů. Torokovy trubice vydrží omezený počet výbojů ( $\sim 20 \div 30$ ). V dnešní době se již tyto bleskojistky nevyrábějí, neboť vypínací schopnost je vyhovující jen pro určitou velikost proudu. Při jeho překročení může vnitřní přetlak vést k roztržení bleskojistky [20]. Další velkou nevýhodou je jejich schopnost svést jednu, maximálně několik málo přepět'ových vln.

#### 4.5.3 Ventilová bleskojistka

Ventilová bleskojistka (obr. 4.5) se skládá ze dvou částí - ze **sériového jiskřiště** a **nelineárního sériového rezistoru**. Tyto díly jsou umístěny v porcelánovém izolátoru a jsou hermeticky uzavřeny. Sériové jiskřiště se skládá většinou z řad stejných dílčích jiskřišť zapojených do série. Dílčí jiskřiště mají minimální doskokovou vzdálenost (desetiny mm), aby přeskok výboje při omezování přepětí proběhl co nejrychleji. Zapalovací napětí je dáno součtem dílčích jiskřišť. Výhoda sériového řazení vede k účinnému chlazení a deionizaci oblouku, což zaručuje dobré vlastnosti zhášení. Nelineární sériové rezistory jsou složeny z bloků (kotoučů) ve tvaru válců s pokoveným povrchem (Ag, Al, Cu-Zn atd.). Hlavním materiálem u bloků rezistorů splňující nelineární V-A charakteristiku je **SiC** (karbid křemíku). Při průchodu velkého výbojového proudu bleskojistkou se stává tento odpor tak vodivým, že nedovoluje, aby napětí na bleskojistce překročilo zapalovací napětí (omezuje napětí na chráněném zařízení) [15], [18].

Při vzniku přepětí na chráněném zařízení se zapálí jiskřiště a SiC kotouči prochází proud do země. S rostoucím přepětím klesá odpor kotoučů a roste proud procházející do země. Velikost odporu však musí být dostatečně velká, aby proud procházející do země byl dostatečně malý a mohl se v jiskřišti při průchodu proudu nulou přerušit. Odporové kotouče jsou po přerušení proudu v jiskřišti odpojeny od napětí (žádný proud neprochází do země).



Obr. 4.5 Schématický řez ventilové bleskojistky

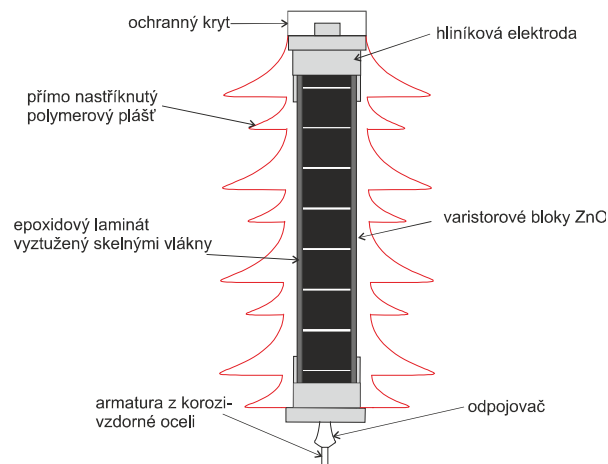
Ventilové bleskojistky se používají v sítích vn z jednoho dílu, v sítích vvn z několika dílů zapojených v sérii. Bleskojistky se jmenovitým napětím od 110 kV jsou doplněny ochranným kruhem. Ten zajišťuje stejnoměrné rozložení provozního napětí na díly a zabraňuje, aby rázové napětí bylo příliš nízké [18]. Výhodou ventilových bleskojistek je, že se otvírají bez časového zpoždění a uzavírají průchod jmenovitému proudu. Oproti vyfukovací bleskojistce poskytuje významnou výhodu, že při přeskočení na jiskřiště nedojde ke strmému poklesu napětí (ohrožení izolace el. strojů).

Nevýhodou u ventilových bleskojistek je, že pokud proud v jiskřištích při prvním průchodu proudu nulou nezhasne [15], bloky SiC nevydrží absorpci tepelné energie a bleskojistka exploduje. Další nevýhodou je složitá vnitřní konstrukce (otřesy při přepravě a manipulaci). Při narušení hermeticky uzavřeného pláště způsobí vlhkost korozi na jiskřištích a sníží zapalovací napětí (riziko destrukce). Pro všechny uvedené nevýhody se bleskojistky s bloky SiC postupně nahrazují bezjiskřišťovými omezovači přepětí.

#### 4.5.4 Omezovač přepětí

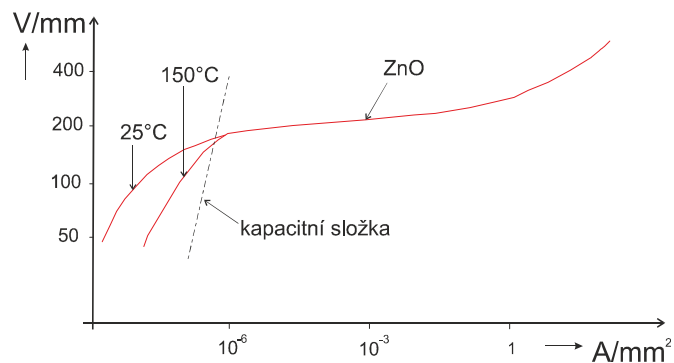
Bezjiskřišťové omezovače přepětí (obr. 4.6) se skládají z nelineárních odporů. Vyrábějí se jako kotouče a základním materiálem je oxid zinečnatý **ZnO** (odtud anglické označení Metal Oxide Varistors - MOV) s příměsí  $\text{Bi}_2\text{O}_3$  (oxid bismutitý) s malým množstvím dalších přísad. Pro napěťově proměnlivý odpor se užívá název varistor. Prvořadým úkolem omezovačů je chránit blízká zařízení, a to i za cenu „sebedestrukce“ při překročení energetické jímavosti procházejícím výbojovým proudem.





Obr. 4.6 Omezovače přepětí na bázi ZnO

Bloky ZnO mají nelineární V-A charakteristiku zobrazenou na obrázku 4.7. Napětí bloku (vztažené na 1 mm jeho výšky) je znázorněno v závislosti na proudu procházejícím ( $1 \text{ mm}^2$  plochy bloku) v kolmém řezu. Kapacitní složka proudu, znázorněná v grafu, převažuje v oblasti malých proudů [15].



Obr. 4.7 V-A charakteristika bloku ZnO

Ve střední části V-A charakteristiky lze nelinearitu vyjádřit [15]:

$$I = k * U^\alpha, \quad (4.4)$$

kde:

- I proud tekoucí omezovačem [kA],
- k konstanta napěťové úrovně (pro kterou je svodič určen),
- U hodnota napětí [kV],
- $\alpha$  exponent nabývající pro ZnO hodnoty 20 až 51 (pro bloky SiC u ventilových blekojistek hodnoty 2 až 6).

Exponent  $\alpha$  (vztah 4.4) určuje kvalitu bloku. Typickou hodnotou pro kvalitní bloky je  $\alpha = 51$ . Zvýší-li se napětí o 20 %, naroste proud více než o 4 řády (např. ze 100 mA na 1 kA). Pro proud vyšší než 1 kA se nelinearita bloků zmenšuje a proud již neroste tak rychle s rostoucím napětím [15].

Energetické společnosti shodně uvádějí stále se opakující problémy s konstrukcí omezovačů (tab. 4.2). Zkušenosti byly získány při dlouhodobém provozování velkého množství omezovačů v distribučních sítích vn. Pro úspěšné odstranění těchto problémů, uvedených v tabulce, jsou IEC a ANSI normy průběžně upravovány a doplňovány [22].

**Tab. 4.2 Konstrukční slabiny omezovačů ZnO zjištěné při dlouhodobém provozování [22]**

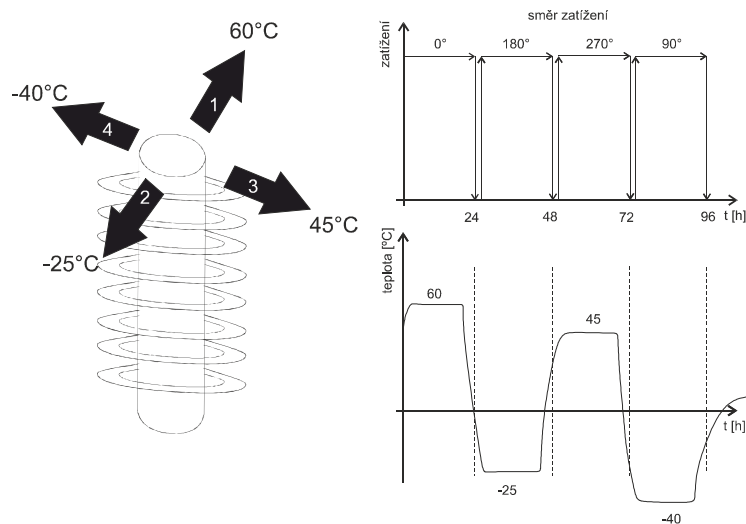
<b>problém</b>	<b>konstrukční řešení</b>	<b>vysvětlivka</b>
<b>vnikání vlhkosti do jádra omezovače</b>	přímo nastříknutý polymerový plášť	polymerový plášť je chemicky spojen s jádrem omezovače
<b>odpojovač</b> <b>-spolehlivost</b> <b>-přepřava</b>	-zapůsobení až od 2A -bez omezení	-nedochází k nechtěnému zapůsobení -není potřeba žádná certifikace pro nakládání s výrobkem osahující prachovou nálož
<b>polymerový plášť</b>	zkoušen a kvalifikován, použit silikon nebo EVA (etylen-vinyl-acetát)	odolnost proti elektrické erozi a vytváření vodivých cest
<b>výrobní kvalita</b>	certifikace výrobních závodů podle ISO 9001	-
<b>výbojový proud</b>	netříštivá konstrukce omezovače	bezpečný způsob zapůsobení bez ohně a výbuchu (IEC a ANSI požadavek)

Z tabulky 4.2 je patrné, že pronikání vlhkosti je nejčastější příčinou selhání omezovačů s porcelánovým pláštěm, ale i s pláštěm silikonovým nebo EVA. Vnikající vlhkost vyvolá vznik vodivých cest na použitém materiálu (nebo v něm či na rozhraní). Vodivé cesty mohou být následně příčinou průrazu pláště omezovače a též zkratování (přemostění) varistorových bloků ZnO.

Pronikání vlhkosti je způsobeno především [23]:

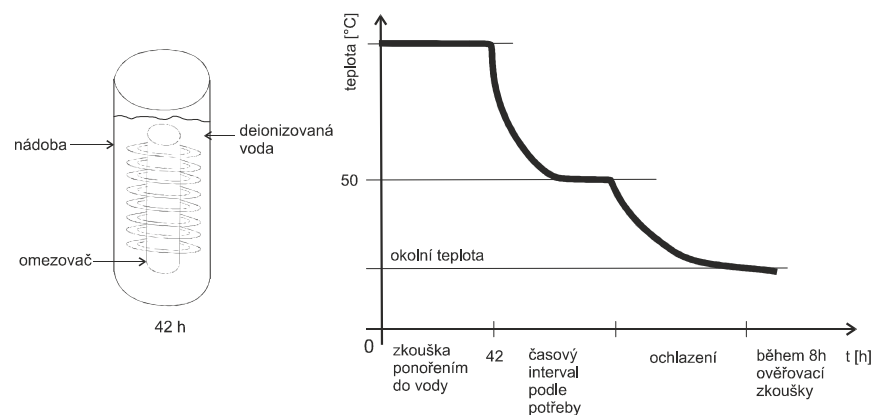
- Nedostatečným utěsněním konstrukce a stárnutím utěsnění (klimatické a mechanické namáhání).
- Nevyhovujícími mechanickými vlastnostmi (porušení utěsnění mechanickým poškozením).
- Velkými výkyvy teplot okolí (vzdušná vlhkost způsobující orosení při rozdílu okolních teplot mezi dnem a nocí).

Pro zamezení vnikání vlhkosti do konstrukce omezovače s polymerovým pláštěm je nutná dokonalost těsnícího systému. Tento systém spočívá v naprostém utěsnění jádra omezovače (varistorových bloků a elektrod). Realizace spočívá v přímém nástřiku pláště na jádro omezovače. Funkčnost utěsnění omezovačů doporučuje ověřit norma IEC 60099-4 [24]. Jedná se o zkoušku termomechanickou (obr. 4.8), pro kterou se obvykle vybere nejdelší vzorek z dané řady omezovačů a následně vystaví maximálnímu dovolenému provoznímu namáhání (ve čtyřech směrech a za změn teplot).



Obr. 4.8 Termomechanická zkouška

Po termomechanické zkoušce následuje zkouška ponořením do vody [24] (obr. 4.9). Vzorek, který prošel termomechanickou zkouškou je ponořen do nádoby s vroucí deionizovanou vodou po dobu 42 h a poté vystaven ověřovacím zkouškám.



Obr. 4.9 Zkouška ponořením do vody

Ověřovací zkoušky se vykonávají po ochlazení vzorku na okolní teplotu (do 8 h) v následujícím pořadí [23]:

- Fyzická kontrola vzorku na mechanické poškození.
- Ověření, zda nárůst wattových ztrát je  $< 20\%$  oproti měření před ponořením do vody.
- Kontrola částečných výbojů, které musí být  $< 10\text{ pC}$ .
- Ověření, zda hodnota zbytkového napětí je  $< 5\%$  oproti měření před ponořením do vody.

Přepětí působící na omezovače ovlivňuje energetické pochody, ke kterým při zapůsobení svodiče dochází. Proud přepětí ohřeje bloky omezovače a vzniklé teplo je odváděno s časovou konstantou podstatně delší, než je trvání přepětí (řádově hodiny). Odolnost omezovačů vůči

přetížení je vyjádřena zařazením do **energetické třídy** 1 až 5. Vyjadřuje schopnost pohlcení energie atmosférickým a spínacím přepětím (ČSN EN 60099-4) a udává se v kJ/kV. Příklady omezovačů přepětí a jejich energetických tříd jsou uvedeny v tabulce 4.3.

**Tab. 4.3 Omezovače přepětí společnosti Elpro-Energo [22]**

typ omezovače	energetická třída	jmenovité napětí [kV]	jmenovitý výbojový proud [kA]	přetížitelnost [kA]	schopnost pohlcení energie [kJ/kV]
<b>SBK 3 až 51/10.1-</b> omezovače pro vn s vnější izolací z polymerů	1	3 až 51	10	20	2,8
<b>SBK 6 až 120/10.2-</b> omezovač přepětí s vnější izolací z polymerů	2	6 až 120	10	40	4,5
<b>SBK 6 až 150/10.3-</b> omezovač přepětí s vnější izolací z polymerů	3	6 až 150	10	40	6,7
<b>SBK 6 až 360/10.3-I-</b> omezovače s odolnějším pouzdem	3	6 až 360	10	50 až 63	6,7
<b>SBK 6 až 420/20.4-I-</b> omezovače s odolnějším pouzdem	4	6 až 420	20	50 až 63	9,2

Omezovače přepětí se používají jako ochrana transformátorů a přechod vzdušného vedení na kabelové. Výhodou varistorů ZnO je téměř okamžitá reakce na přepětí (proud protéká během několika desítek ns) [15]. Mezi další výhody moderních omezovačů patří jejich bezúdržbovost. Díky silikonovým a porcelánovým povrchům není nutné tyto svodiče čistit. Poměrně jednoduchá konstrukce zaručuje vysokou mechanickou odolnost, a tím odolnost proti vibracím a nárazům. Polymerové pláště jsou odolné vůči elektrické erozi a vytváření vodivých cest. Proti pronikání vlhkosti se plášť přímo nastříkává na jádro. Bezjiskřišťové omezovače mají nízká zbytková napětí a vysoké ochranné rozpětí [24].

## 4.6 Porovnání omezovačů přepětí a ventilových bleskojistek

Výhody a nevýhody omezovačů přepětí a bleskojistek jsou:

- Omezovače přepětí nepotřebují žádné jiskřiště. S konstrukční jednoduchostí omezovače souvisí jeho vyšší spolehlivost než u bleskojistky (poruchy na jiskřištích).
- Prostor potřebný v bleskojistce pro jiskřiště je v omezovači využit pro umístění dalších bloků ZnO. Dosáhne se tak větší tepelné kapacity omezovače při stejných vnějších rozměrech obou svodičů.
- Omezovače přepětí omezují přepětí dříve než bleskojistky.

- U sítí vvn musí jmenovité napětí bleskojistky ležet vždy nad velikostí dočasných přepětí, u omezovačů přepětí může být trvalé provozní napětí nižší, a tudíž se docílí snížené ochranné hladiny. U sítí vn, kde je doba dočasného přepětí několikanásobná, se tyto rozdíly stírají.
- Při kontrole stavu bleskojistek je nutné odpojení od sítě a napájení ze zkušebního zdroje. Zatímco omezovače se kontrolují za provozu. Podle doporučení některých výrobců není kontrola potřeba vůbec.

## 4.7 Použití ochran v distribuční síti vn

### 4.7.1 Venkovní vedení s holými vodiči

Jako ochrana pro vedení s holými vodiči se používá omezovač přepětí. Umístění omezovačů přepětí na toto vedení se připouští např. v místech s prokazatelně zvýšenou bouřkovou činností. Tímto opatřením dojde k požadovanému poklesu výpadků vedení. Doporučuje se posuzovat takovéto případy individuálně podle výsledků analýzy. Hromadné nasazení omezovačů na vedeních 35 a 22 kV distribučních sítí není vhodné vzhledem k vysokým nákladům, malému vlivu na výpadek vedení a možnou poruchu omezovačů [15].

### 4.7.2 Venkovní vedení s izolovanými vodiči

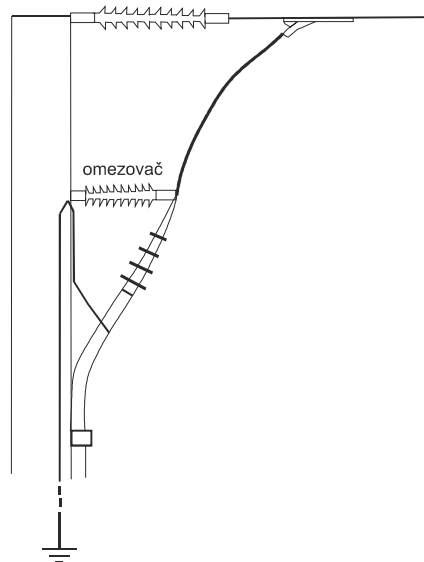
U vedení s izolovanými vodiči oproti vedení s holými vodiči je výhodou menší četnost přímých úderů blesku do fázových vodičů (díky jejich izolaci). Nevýhodou izolovaných vodičů je, že v případě průrazu izolace přepětím je místo izolačně zeslabeno a při průchodu zkratového proudu hrozí přepálení vodiče. Sloupy s uzemněnými konzolami určené k ochraně se chrání hrotovými jiskřišti instalovanými mezi fázovými vodiči a zemí. Instalují se v určité vzdálenosti od konstrukčních prvků sloupu. Vzdálenost musí být taková, aby oblouk po celou dobu hoření nebyl ovlivněn a nepřeskočil na kovové části sloupu [15]. Dosluky jiskřišť pro vedení 22 a 35 kV jsou uvedeny v tabulce 4.4.

Tab. 4.4 Dosluky jiskřišť podle napětí vedení s izolovanými vodiči [15]

parametr	hodnota	
napětí sítě	22 kV	35 kV
doskok jiskřiště - zem	12 cm	15 cm

### 4.7.3 Přechod venkovního vedení do kabelového vedení

Pro přechod kabelového vedení z venkovního do kabelového vedení se vždy chrání omezovači přepětí. Zemní svorky omezovačů se připojí nejkratším možným způsobem na konstrukci stožárů nebo k uzemňovacímu svodu sloupu. Plášť kabelu je nejkratším způsobem připojen do místa připojení zemních svorek omezovačů na konstrukci stožáru nebo k uzemňovacímu svodu sloupu. Fázový vodič venkovního vedení se musí přiblížit co nejvíce připojovací svorce vn omezovače přepětí tak, aby připojení mezi svorkou vn omezovače a fázovým vodičem bylo co nejkratší. Délka fázového vodiče mezi omezovačem a kabelovou koncovkou musí být co nejmenší [15]. Optimální způsob uspořádání, které se běžně používá, je na obrázku 4.10.



Obr. 4.10 Připojení omezovače přepětí ke koncovce kabelu

## 5 Zkoušky odolnosti

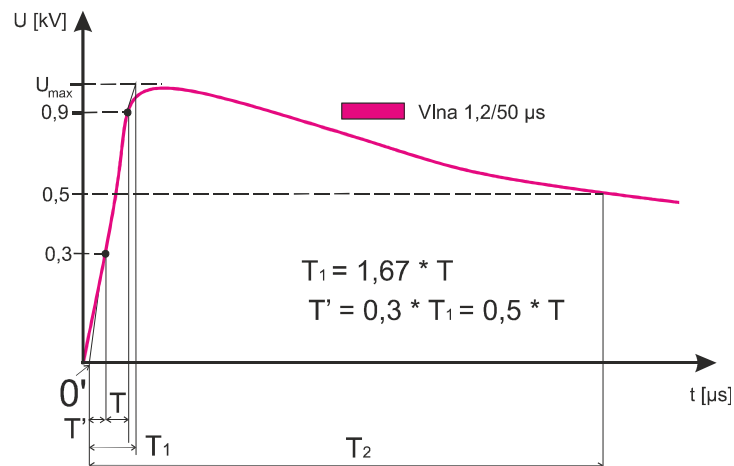
Svodiče přepětí mají za úkol bezchybně pracovat při připojených provozních napětích. V případě výskytu přepětí má svodič reagovat a chránit zbytek zařízení, protože i při krátkodobém působení vyšších hodnot napětí a proudů může dojít k destrukci prvků. Chování tohoto druhu namáhání v laboratorních podmínkách reprezentuje impuls. Impuls je tedy účelově přiložené aperiodické přechodné napětí nebo proud a je definován pomocí dvou parametrů [26]. Prvním z nich je doba čela, druhým pak doba půltýlu.

### 5.1 Rázové zkoušky

Při výskytu atmosférických výbojů, spínacích pochodů či poruch v síti vn nebo vvn se do rozvodů nn dostávají rázové impulsy s vysokou energií (mohou se projevit i tepelnými účinky). Jejich kmitočtové spektrum dosahuje až 1 MHz [27] a vysoký energetický obsah může způsobit škody na elektrických zařízeních (i bez přímé galvanické vazby prostřednictvím elektromagnetické indukce). Rázové impulsy se vytvářejí podle impedance na napájecích svorkách zkoušeného zařízení ve srovnání s výstupní impedancí zdroje. Při zkouškách elektrické rázové pevnosti se rázové napěťové vlny vyrábějí rázovými generátory napětí (RGN) [27]. Rázové vlny proudu pak v rázových generátorech proudu (RGP) [27]. Rázové generátory napětí musí vytvářet impuls na velké impedanci, rázové generátory proudu na malé impedanci.

### 5.2 Rázová vlna napětí

Rázová vlna napětí (obr. 5.1) je jednosměrnou vlnou vzrůstající rychle bez podstatných oscilací na nejvyšší hodnotu a potom pomalu klesající k nule. Je určena vrcholovou hodnotou  $U_{\max}$  [kV] a tvarem, který charakterizuje doba čela  $T_1$  [ $\mu$ s] a doba půltýlu  $T_2$  [ $\mu$ s]. Doba čela je  $T_1 = 1,67 * T$  (hodnota impulsu mezi 30 % a 90 % vrcholové hodnoty). Doba půltýlu je hodnota mezi skutečným počátkem (na obrázku O') a dobou, kdy napětí poklesne na polovinu maximální hodnoty.



Obr. 5.1 Normalizovaný napěťový impuls

Nejdůležitější druh atmosférického impulsu označujeme jako **normalizovaný napěťový impuls**. Jedná se o plný atmosférický impuls s dobou  $T_1 = 1,2 \mu\text{s}$  a dobou  $T_2 = 50 \mu\text{s}$ . Označuje se jako  $1,2/50 \mu\text{s}$ . Mezi normalizovaným impulsem a hodnotami skutečně zaznamenaných se akceptují následující rozdíly [26]:

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

### 5.3 Rázová vlna proudu

Používají se dva typy proudových impulsů:

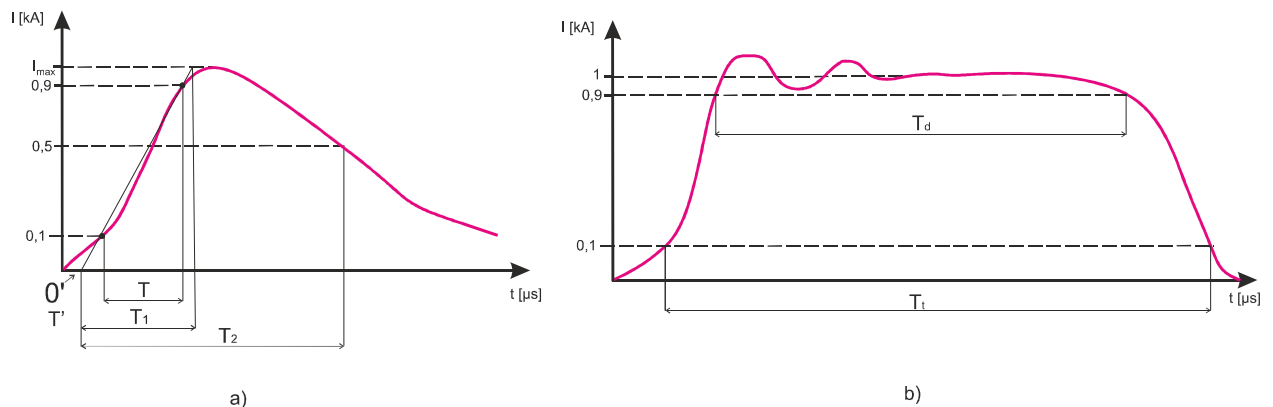
- **exponenciální proudový impuls,**
- **pravoúhlý proudový impuls.**

Exponenciální proudový impuls (obr. 5.2 a) je určen vrcholovou hodnotou  $I_{\text{max}}$  a tvarem, který charakterizuje doba čela  $T_1 [\mu\text{s}]$  a doba půltýlu  $T_2 [\mu\text{s}]$ . Doba čela je  $T_1 = 1,25 * T$  (hodnota impulsu mezi 10 % a 90 % vrcholové hodnoty). Doba půltýlu je doba mezi skutečným počátkem (na obrázku  $O'$ ) a dobou, kdy proud dosáhne 50 % své maximální hodnoty, podobně jako u napěťového impulsu [27]. Normalizované tvary proudových impulsů [26]:

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



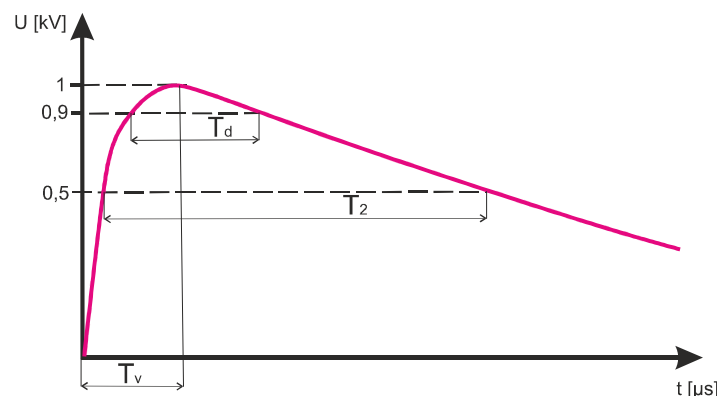
Pravoúhlý proudový impuls (obr. 5.2 b) má dobu  $T_d$  po kterou je proud větší než 90 % vrcholové hodnoty. Celkové trvání pravoúhlého impulsu  $T_t$  je doba, po kterou je proud větší než 10 % vrcholové hodnoty.



Obr. 5.2 Proudový impuls (a) exponenciální proudový impuls, b) pravoúhlý proudový impuls)

## 5.4 Spínací impuls

U spínacího impulsu (obr. 5.3) je doba  $T_v$  časový interval mezi skutečným počátkem a okamžikem, kdy napětí dosáhlo vrcholové hodnoty. Doba půltýlu  $T_2$  je interval mezi skutečným počátkem a okamžikem, kdy napětí poprvé poklesne na polovinu vrcholové hodnoty. Doba  $T_d$  je časový interval, během kterého impulsní napětí přesahuje hodnotu 90 % vrcholové hodnoty [26]. Normalizovaný spínací impuls je plný spínací impuls s dobou do vrcholu  $T_v = 250 \mu$ s a dobou půltýlu  $T_2 = 2500 \mu$ s. Označuje se jako 250/2500  $\mu$ s.



Obr. 5.3 Spínací impuls

## 5.5 Vlastnosti omezovačů přepětí

Charakteristické vlastnosti omezovačů jsou:

- **Trvalé provozní napětí** -  $U_c$  [kV] - nejvyšší napětí, které může být trvale připojeno na omezovač (s ohledem na tepelné namáhání).
- **Jmenovité napětí** -  $U_r$  [kV] - je nejvyšší napětí, aby omezovač správně působil i v podmínkách dočasných přepětí. Platí vztah  $U_r = 0,8 * U_c$ .
- **Jmenovitý výbojový proud** -  $I_n$  [kA] - jak velký proud je omezovač schopen svést.
- **Zbytkové napětí** -  $U_p$  [kV] - úbytek napětí vytvořený jmenovitým výbojovým proudem.

Zbytkové napětí omezovačů přepětí se určí podle:

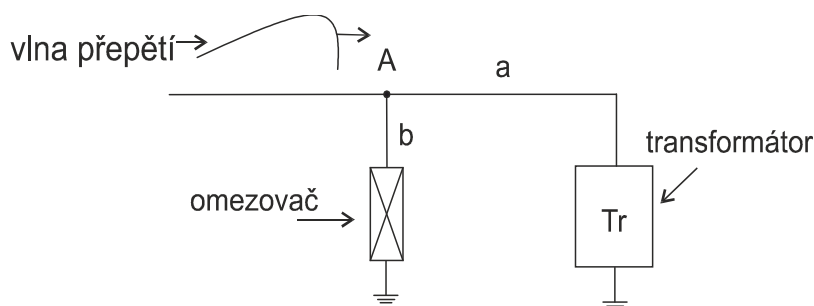
- velikosti zbytkového napětí při zkoušce **impulsem proudu 1/20  $\mu$ s**,
- velikosti zbytkového napětí při zkoušce **impulsem proudu 8/20  $\mu$ s**,
- velikosti zbytkového napětí při zkoušce **spínacím impulsem proudu s dobou čela od 30 do 100  $\mu$ s a dobou půltýlu od 60 do 200  $\mu$ s**.

## 6 Simulace působení omezovače přepětí v síti 22 kV

Simulační programy představují pomůcku pro řešení nejrůznějších teoretických i praktických případů. Použití simulací provedené počítačem pohodlně a rychle umožní sledovat různé trendy a vyhledat extrémy. Při modelování určitého systému je třeba vytvořit jeho matematický popis, abstraktní matematický model. Vhodným programem se abstraktnímu modelu přiřadí simulační model. Úkolem simulačního modelu je zpřehlednit, zjednodušit a vytvořit uživatelský komfort pro následné simulace. První simulace prověřuje chování modelu na známé reakce (naměřené hodnoty v modelovaném objektu). Po prokázání platnosti simulačního modelu je možno přistoupit k požadovaným simulacím. V současné době se používají pro simulaci v odvětví elektroenergetiky programy MODES, MULTISIM, DYMOLA, ATP-EMTP.

### 6.1 Úvod do problematiky

Při simulování předpokládáme, že blesk udeří přímo do fázového vodiče. Vedení, do kterého blesk udeří, budou dřevěné sloupy bez uzemněných konzol. Vedení na dřevěných sloupech je schopno přenést přepětí řádu tisíc kV bez podstatného snížení jeho energie. Do vedení udeří nejčastější výboj, a tedy se zápornou polaritou. Amplituda bleskového proudu bude  $I_p = 31,1 \text{ kA}$  (tab. 2.1). Pro tyto účely byl vytvořen model sítě v programu ATPDraw 5.3. Úkolem tohoto simulačního modelu je ověřit působení omezovače přepětí v síti vysokého napětí 22 kV. Dalším záměrem je návrh vhodné ochranné vzdálenosti  $L$  a zjistit vliv délky přívodů  $a$  a  $b$  na přepětí (obr. 6.1). V následujících kapitolách je stručně popsán samotný program, dále schéma modelu a způsob jakým byla ochranná vzdálenost  $L$  vypočítána.



Obr. 6.1 Schéma ochrany s vyznačením úseků  $a$  a  $b$

Do délky vodiče  $a$  a  $b$  je nutno započítat i délku od svodiče k uzemnění (resp. transformátoru k uzemnění). Pro zjednodušení modelu a popisu návrhu ochranné vzdálenosti uvažují tyto přívody jako nulové.

## 6.2 Charakteristika programu ATPDraw 5.3

Program ATPDraw 5.3 je součástí programového balíku ATP-EMTP 2007. Program EMTP (**E**lektro**M**agnetic **T**ransients **P**rogram) byl vyvinut v USA v úřadu U.S Department of Energy a v 80. letech ho upravil Dr. W. S Meyer a označil ATP (**A**lternative **T**ransients **P**rogram). V elektrotechnickém průmyslu je program používán k digitální simulaci elektromagnetických přechodných dějů. Samotný program je napsán v jazyku Fortran používaný pro numericky náročné aplikace. Práci s ním dělá uživatelsky přístupný grafický preprocesor ATPDraw. Pro grafické zobrazení průběhů existuje řada postprocesorů jako PlotXY, PCPlot, TPPlot.

V mé práci jsem pro simulaci použil program ATPDraw verze 5.3, který obsahuje knihovnu lineárních i nelineárních modelů prvků obvodu. Program je doplněn o procedury jako BCTRAN pro vygenerování parametrů modelu transformátoru nebo Line Constants a Cable Constants resp. Paramets pro vygenerování parametrů vedení (jen zadáním rozměrů a použitých materiálů a požadovaného modelu vedení).

## 6.3 Struktura programu ATPDraw 5.3

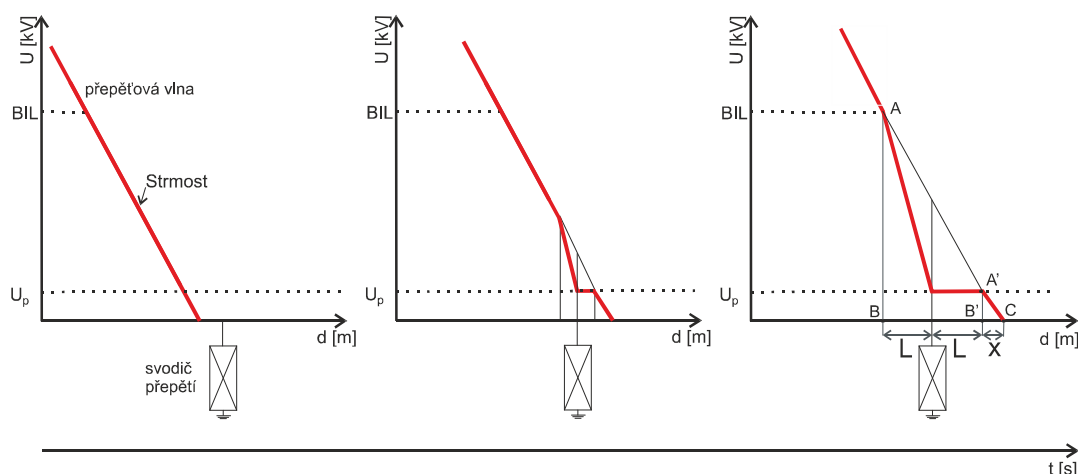
K popisu programu pomohl překlad z „help“ programu a dále literatura [28], [29].

ATPDraw lze rozdělit na tři hlavní celky:

- **vestavěné komponenty** - nahrazují reálné prvky, např. vedení, transformátory, točivé stroje, polovodičové prvky,
- **integrované simulační moduly** - slouží k simulaci modelových obvodů v časové nebo frekvenční oblasti,
- **integrované podpůrné programy** - přispívají k řešení přechodných dějů, např. dlouhé vedení a jeho transformace na  $\pi$ -článek.

## 6.4 Ochranná vzdálenost

Pojem **ochranná vzdálenost** objasňuje modelová situace na obrázku 6.2.



**Obr. 6.2 Ochranná vzdálenost (BIL – základní izolační hladina,  $U_p$  – zbytkové napětí svodiče)**

Z obrázku je patrné, že ke svodiči přichází přepětová vlna se strmostí  $S$ . Na svodiči roste napětí až do hodnoty  $U_p$  (zbytkové napětí svodiče) a dále se nemění. Po příchodu na svodič (činitel odrazu = 1) dojde k odrazu vlny a do místa  $A$  se šíří zpětná vlna. Odražená a přicházející vlna spolu superponují (vznik nižšího napětí). Superponované napětí je rozhodující pro volbu **ochranné vzdálenosti  $L$** . Jakmile dojde k sepnutí svodiče (lze ho chápat jako sepnutí spínače), činitel odrazu změní hodnotu na  $-1$ .

**Základní izolační hladina BIL** (Basic Insulation Level) udává maximální hodnotu napětí, kterému zařízení odolá. Je potřeba najít právě takovou maximální ochranou vzdálenost, ve které superponovaná vlna dosáhne velikosti BIL. Tabulka 6.1 uvádí hodnoty BIL pro různé napětěvé hladiny.

**Tab. 6.1 Normalizované hodnoty BIL [30]**

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

Nyní pro volbu ochranné vzdálenosti vyjdeme z obrázku 6.2. Na obrázku jsou vidět dva trojúhelníky  $ABC$  a  $A'B'C$ , které se shodují ve dvou úhlech (jsou podobné). Pro podobné trojúhelníky platí věta o podobnosti trojúhelníků „uu“ a plyne pro ně vztah [14]:

$$\frac{BIL}{2 \cdot L + x} = \frac{U_p}{x} \quad (6.1)$$

Vzdálenost  $x$  musí přepětová vlna se strmostí  $S$  urazit za čas k dosažení napětí  $U_p$  na svodiči. Platí vztah [14]:

$$x = \frac{U_p}{S} \cdot v, \quad (6.2)$$

kde:

$v$  rychlost vlny, která se šíří rychlostí světla [ $3 \cdot 10^8$  m/s].

Dosažením vzdálenosti  $x$  do vztahu 6.1 a matematickými úpravami dostaneme vztah pro ochranou vzdálenost  $L$  [14]:

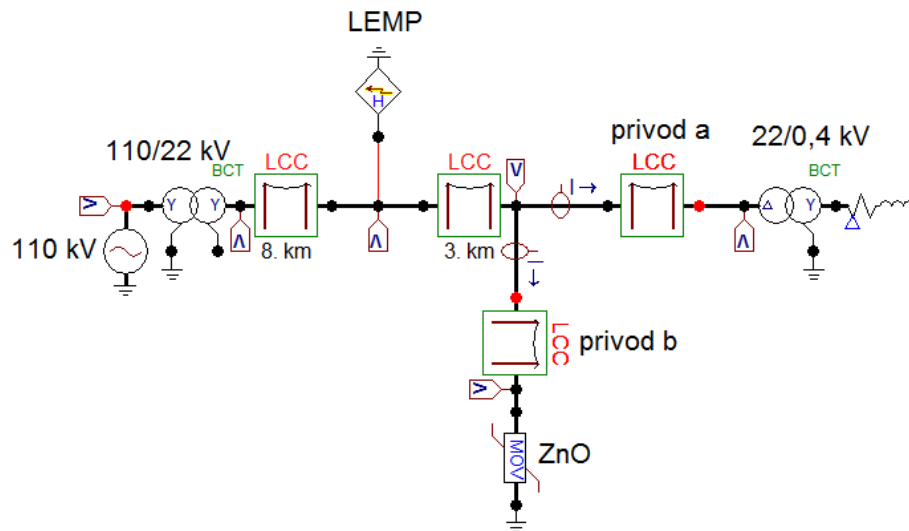
$$L = v * \frac{(BIL - U_p)}{2 * S} . \quad (6.3)$$

V modelovém příkladu se prvky ani veličiny nechovají vždy stejně a musíme brát v úvahu výdržné napětí izolace. Základní izolační hladina BIL proto musí být podělena bezpečnostním koeficientem  $K_s$ . Pro izolaci u svodičů ve vnitřních aplikacích je  $K_s = 1,15$ , pro venkovní použití  $K_s = 1,05$ . Pro síť vn je doporučená hodnota  $K_s = 1,2$  [30]. Výsledný vztah pro ochranou vzdálenost je tedy [14]:

$$L = \frac{v}{2 * S} * \left( \frac{BIL}{1,2} - U_p \right) . \quad (6.4)$$

## 6.5 Model působení omezovače v síti 22 kV

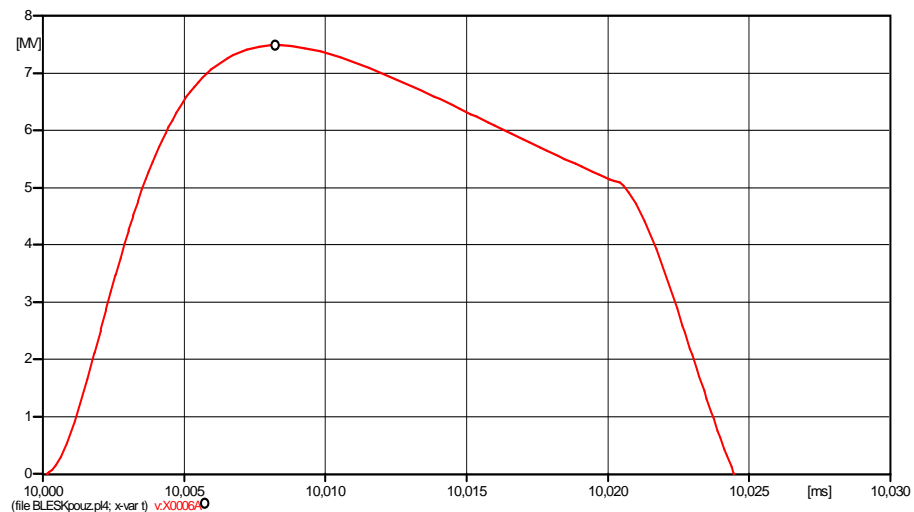
Schéma sítě (obr. 6.3) je nakresleno v postprocesoru ATPDraw 5.3. Síť je napájena z nadřazené soustavy 110 kV. Transformátor 110/22 kV převádí napětí do izolované sítě 22 kV. Soustavu tvoří úsek 8 km a 3 km vzdušného vedení a dvě krátká vedení představující přívod a (k transformátoru 22/0,4 kV) a přívod b (k omezovači přepětí). Vedení je modelováno pomocí integrovaných podpůrných programů (frekvenčně závislý model J.Marti). V uzlu VED se nachází omezovač ZnO firmy Eplro-Energo. Dále je v síti distribuční transformátor 22/0,4 kV a na hladinu nn je připojena soustava asynchronních motorů o celkovém instalovaném výkonu  $S = 250$  kVA. Zdroj bleskového proudu s  $I_p = 31,1$  kA a dobou  $T_1 = 8 \mu s$  a  $T_2 = 20 \mu s$  je připojen mezi úseky 8 km a 3 km vedení a výboj udeří do fáze L1 (detaily prvků a jejich parametry viz. příloha IV.).



Obr. 6.3 Schéma modelu působení omezovače v síti 22 kV

### 6.5.1 Stanovení ochranné vzdálenosti

Pro výpočet ochranné vzdálenosti ze vztahu (6.4) potřebujeme znát velikost strmosti  $S$ . Pomocí obrázku 6.4 a vyznačeného bodu určíme maximální strmost přepětíové vlny (změna strmosti v  $t = 10,02$  ms, způsobuje příchod odražené vlny od konce vedení 3 km). Pro simulaci je  $f = 50$  Hz a blesk udeří v  $t_{\text{blesk}} = 10$  ms.



Obr. 6.4 Průběh napětí na zasažené fázi L1 v místě úderu blesku

Vyznačený bod v grafu má hodnotu  $U_{\text{max}} = 7480,4$  kV a  $t_{\text{max}} = 10,008$  ms. Nyní můžeme vypočítat strmost  $S$ :

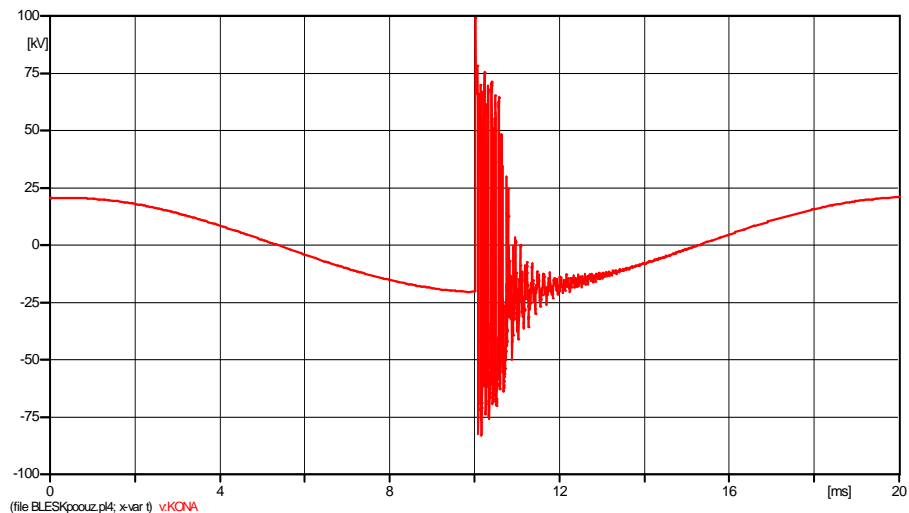
$$S = \frac{U_{\text{max}}}{t_{\text{max}}} = \frac{7480,4}{8,00} = 935,05 \text{ kV}/\mu\text{s}. \quad (6.5)$$

Dosažením do vztahu 6.4 dostaneme ochrannou vzdálenost  $L$  ( $BIL = 125$  kV, pro  $U_m = 24$  kV):

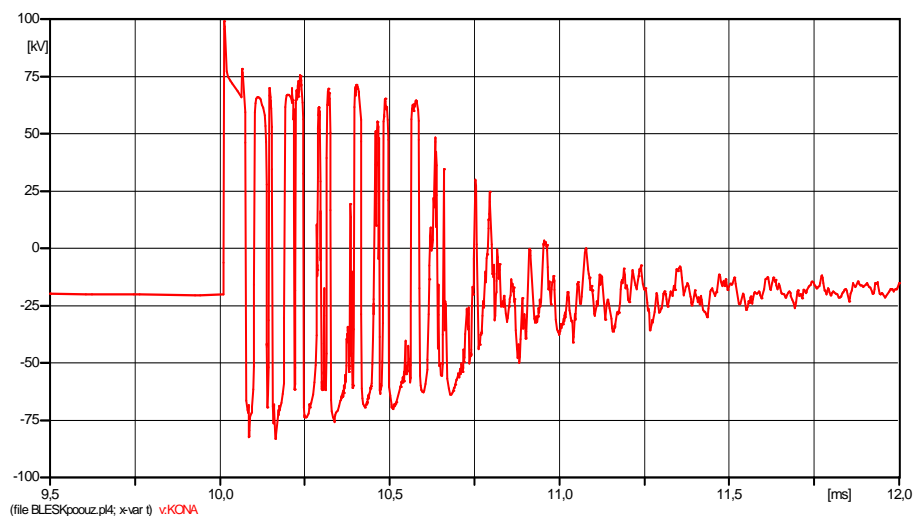
$$L = \frac{v}{2 \cdot S} * \left( \frac{BIL}{1,2} - U_p \right) = \frac{300}{2 \cdot 935,05} * \left( \frac{125}{1,2} - 75,2 \right) = 4,65 \text{ m.} \quad (6.6)$$

### 6.5.2 Simulace působení omezovače přepětí

Při simulování ochranného působení omezovače přepětí v distribuční síti 22 kV se omezovač ZnO chová jako ideální (reaguje na příchod přepět'ové vlny okamžitě). Frekvence je nastavena na  $f = 50$  Hz. Do fáze L1 udeří blesk v  $t_{blesk} = 10$  ms s amplitudou 31,1 kA a dobou 8/20  $\mu$ s. Průběh na zasažené fázi L1 je zobrazen na následujícím obrázku. Pro tuto simulaci je omezovač přepětí umístěn na mezi vypočtené ochranné vzdálenosti  $L = 4,65$  m.



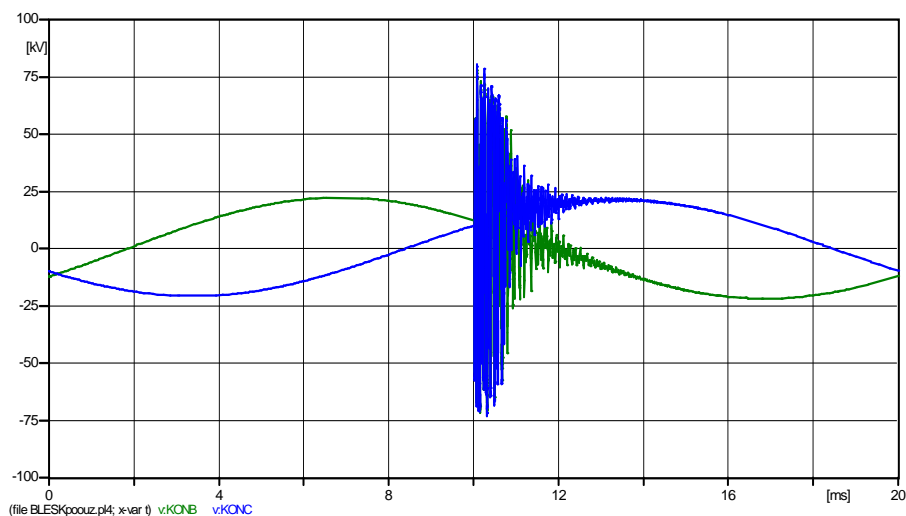
Obr. 6.5 Průběh napětí zasažené fáze L1 na transformátoru 22/0,4 kV



Obr. 6.6 Zvětšený průběh napětí zasažené fáze L1 na transformátoru 22/0,4 kV



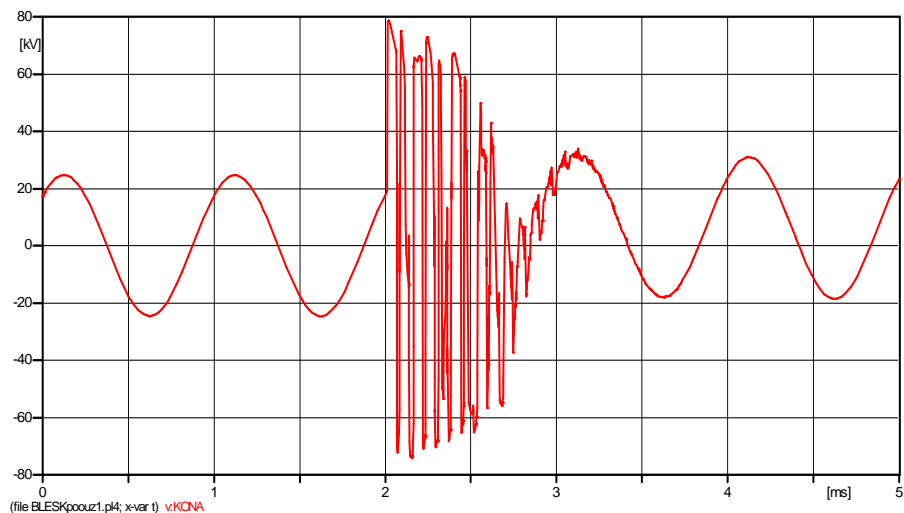
Z obrázku je patrné, že před úderem blesku bylo na fázi L1 napětí se sinusovým průběhem. Zvětšený průběh napětí zasažené fáze L1 je na obrázku 6.6. Úderem blesku v  $t_{\text{blesk}} = 10$  ms přijde ke svodiči přepěťová vlna a svodič okamžitě začne propouštět napětí v závislosti na jeho nelineární V-A charakteristice. Maximální napětí dosáhne  $U_{\text{max}} = 99,02$  kV v  $t = 10,02$  ms. Napětí tedy nepřesáhne mez  $\frac{\text{BIL}}{1,2}$  ( $\frac{125}{1,2} = 104,17$  kV) a transformátor 22/0,4 kV bude v ochranném dosahu omezovače. V čase 14 ms je průběh napětí na chráněném transformátoru 22/0,4 kV opět nezakreslený. Průběh indukovaných napětí nezasažených fází L2, L3 na transformátoru 22/0,4 kV je na obrázku 6.7.



**Obr. 6.7 Indukované napětí nezasažených fází L2, L3 na transformátoru 22/0,4 kV**

Zelená funkce (obr. 6.7) zobrazuje indukované napětí fáze L2 ( $U_{\text{max}} = 83,58$  kV,  $t = 10,09$  ms), modrá funkce (obr. 6.7) je indukované napětí fáze L3 ( $U_{\text{max}} = 85,76$  kV,  $t = 10,09$  ms). Ani v tomto případě nebyla překročena mez  $\frac{\text{BIL}}{1,2}$  a transformátor je dobře chráněn. Pomocí simulace přechodného děje bylo prokázáno správné zvolení ochranné vzdálenosti L.

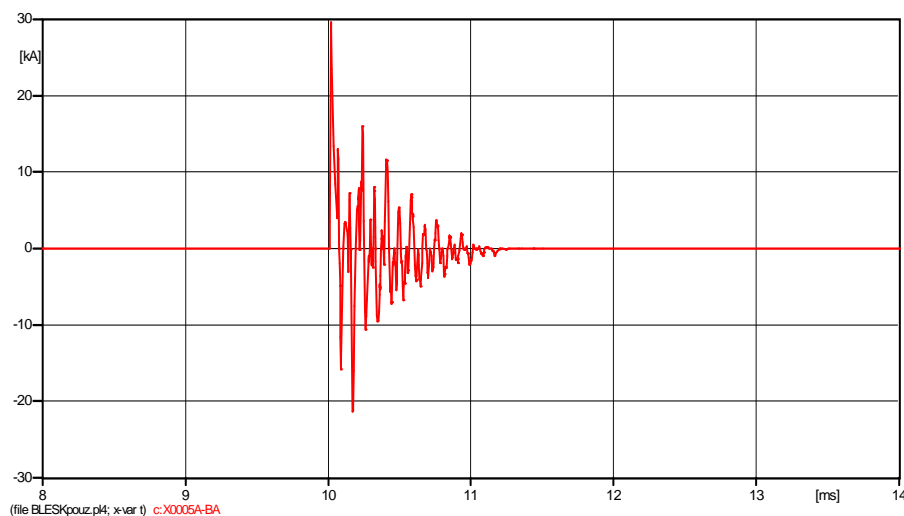
Pro názornost je uveden obrázek 6.8, pro který jsou všechny prvky schématu přepočítány pro  $f = 1000$  Hz ( $T = \frac{1}{f} = \frac{1}{1000} = 1$  ms). Frekvence byla zvětšena, aby byl patrný průběh při zapůsobení omezovače. Do fáze L1 udeří blesk v  $t_{\text{blesk}} = 2,00$  ms udeří blesk s amplitudou 10 kA a dobou  $8/20$   $\mu\text{s}$ .



Obr. 6.8 Průběh napětí na fázi L1 po úderu blesku a zapůsobení omezovače

### 6.5.3 Vliv délky přívodů a a b

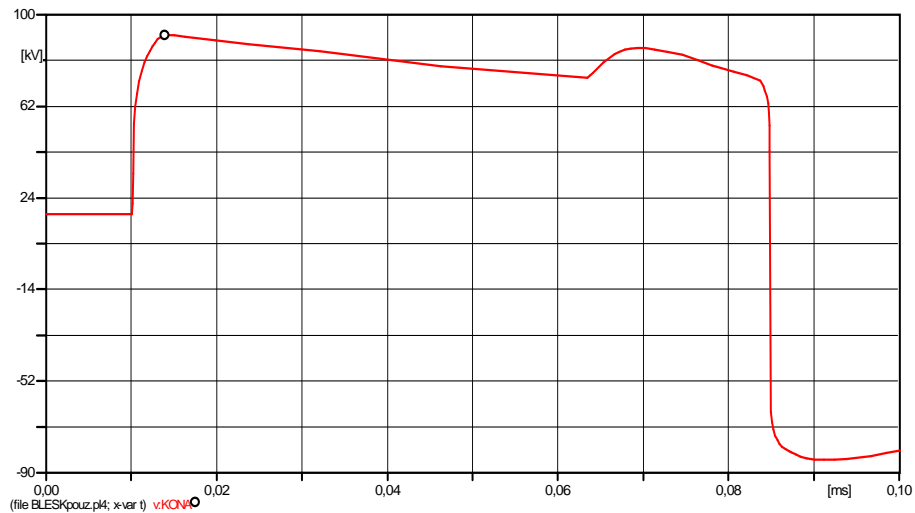
Pomocí proudových sond zjistíme velikost proudu v jednotlivých větvích obvodu. Na obrázku 6.9 je zobrazen průběh proudu na omezovači přepětí.



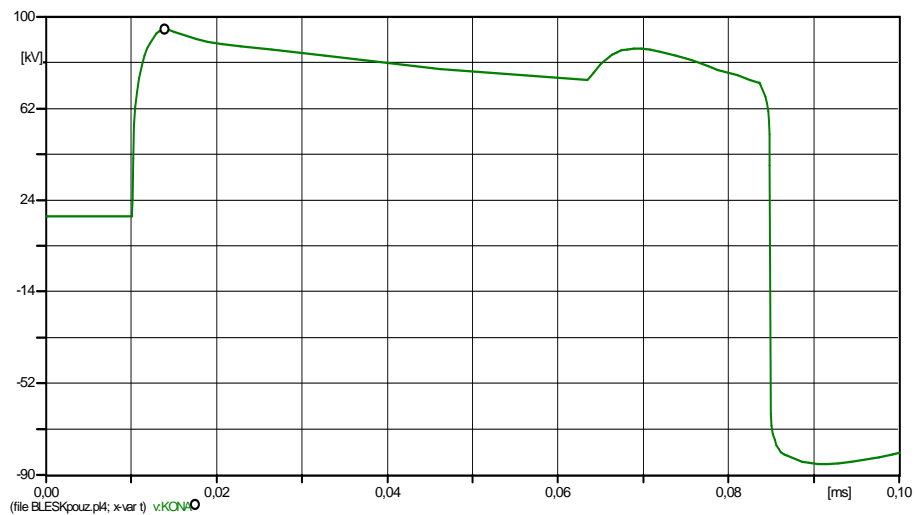
Obr. 6.9 Průběh proudu na přívodu b

Svodičem neprotéká žádný proud do okamžiku úderu blesku. V okamžiku úderu blesku začne protékat svodičem velký impulsní proud řádu kA s velkou strmostí nárůstu. Na vodiči b tak vzniká reaktanční úbytek napětí.

Nyní změňme délku připojovacího vodiče  $a = 0,5$  m a hodnotu  $b$  nejprve na 1 m (obr. 6.10) a poté na hodnotu 2 m (obr. 6.11). Cílem této simulace je zjistit změnu velikosti přepětí při změně délky přívodu  $b$ . Blesk udeří v  $t_{\text{blesk}} = 0$  ms.



Obr. 6.10 Průběh napětí zasažené fáze L1 na transformátoru 22/0,4 kV při  $b = 1$  m



Obr. 6.11 Průběh napětí zasažené fáze L1 na transformátoru 22/0,4 kV při  $b = 2$  m

Červená funkce (obr. 6.10) dosahuje maximálního napětí 91,56 kV. Zelená funkce (obr. 6.11) dosahuje 94,85 kV.

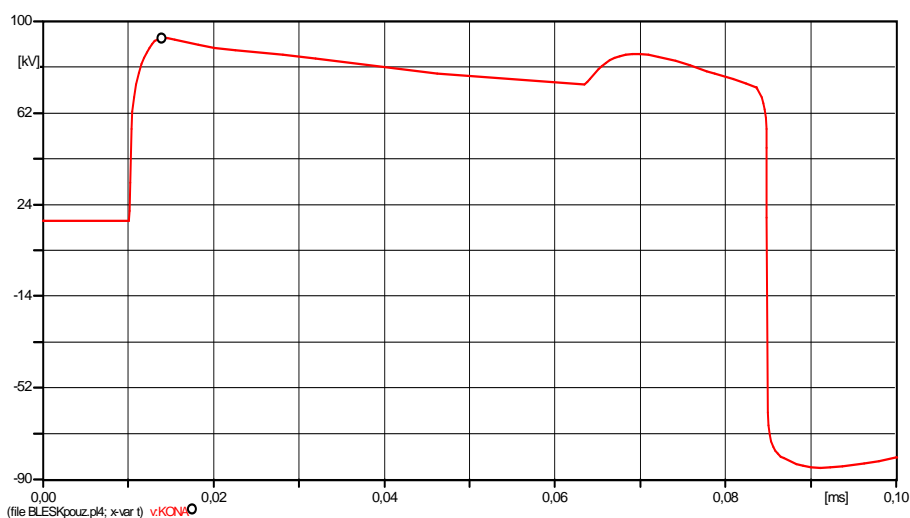
Protéká-li vodičem časově proměnný proud, bude se ve vodiči indukovat napětí, jež závisí na indukčnosti vodiče. Platí tedy vztah pro indukované napětí tedy:

$$u = -L \frac{di_L}{dt} . \quad (6.7)$$

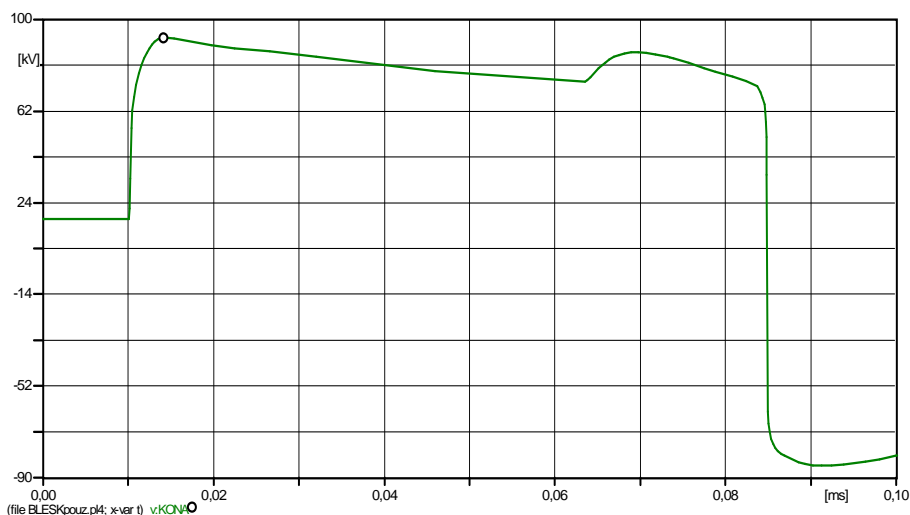
S rostoucí délkou vodiče roste jeho indukčnost. Proto je důležité, aby byl přívod  $b$  k omezovači přepětí co nejkratší. Změny v průběhu jsou způsobeny odrazy vln na obou koncích 8 km a 3 km vedení.

### 6.5.4 Změna průřezu přívodu b

Nyní necháme nastaven přívod a = 0,5 m a přívod b změníme na 1,5 m. Cílem této simulace je zjistit vliv průřezu přívodu b na přepětí. Nejprve budeme simulovat situaci pro vodič AlFe6 95 mm<sup>2</sup> (obr. 6.12). Průměr lana je 1,335 cm a maximální odpor 0,319 Ω/km. Následně provedeme simulaci pro vodič AlFe6 120 mm<sup>2</sup> (obr. 6.13). Průměr lana je 1,600 cm a maximální odpor 0,225 Ω/km. Cílem této simulace je zjistit vliv průřezu přívodu b na přepětí. Blesk udeří v  $t_{\text{blesk}} = 0$  ms.



Obr. 6.12 Průběh napětí zasažené fáze L1 na transformátoru 22/0,4 kV pro AlFe6 95 mm<sup>2</sup>



Obr. 6.13 Průběh napětí zasažené fáze L1 na transformátoru 22/0,4 kV AlFe6 120 mm<sup>2</sup>

Červená funkce (obr. 6.12) zobrazuje průběh napětí na zasažené fázi pro AlFe6 95 mm<sup>2</sup>. Napětí ve vyznačeném bodě dosahuje maxima 93,08 kV. Zelená funkce (obr. 6.13) představuje průběh napětí na stejné fázi, ale pro AlFe6 120 mm<sup>2</sup>. Maximální napětí při této

simulaci dosahuje hodnoty 92,23 kV. I v tomto případě platí vztah 6.7. S větším průřezem vodiče, klesá indukčnost a indukované napětí je tudíž menší.

## 6.6 Zhodnocení simulace

Volba ochranné vzdálenosti v úvodu kapitoly je závislá na volbě velikosti amplitudy bleskového zdroje. Při změně  $I_p = 31,1$  kA na hodnotu  $I_p = 10$  kA bude strmost přepěťové vlny  $S = 303,3$  kV/ $\mu$ s. Zvětší se tedy ochranný dosah omezovače ZnO a ochranná vzdálenost bude  $L = 14,33$  m. Z provedených simulací vyplývají základní pravidla pro ochranu v sítích vn, která se shoduje s PNE 33 0000-8 [15]:

- Omezovače přepětí a zařízení, které má být chráněno musí být uzemněny na společný systém uzemnění. Galvanické propojení mezi uzemňovacími svorkami omezovačů a uzemněním chráněného zařízení musí být co nejkratší.
- Celková délka vodičů **a** a **b** připojených k omezovači a chráněnému zařízení musí být co **nejkratší**.
- Pro omezení velikosti přepětí, by vodič **b** měl být co **nejkratší** a měl mít **nejmenší možnou induktivní reaktanci** (dostatečně velký průřez).
- Pro připojení omezovačů přepětí je proto vhodnější použít **páskové vodiče** než s kruhovým průřezem, protože mají při stejném průřezu menší indukčnost a impulsní úbytky přepětí na nich jsou menší.

Příklad ukazuje možnosti ATPDraw 5.3 a dokumentuje způsob prezentace získaných výsledků. I přesto, že základní dokumentace programu je v angličtině, je jeho obsluha intuitivní a program by měl být zařazen do výuky. Tvorba modelu uživatele programu nutí odhalovat fyzikální podstatu zkoumaného děje. Rozvíjí tak jeho teoretické vědomosti i při ladění modelu metodou pokus omyl.

## 7 Závěr

V této diplomové práci jsem se zabýval problematikou přechodných přepětí vznikajících při atmosférických výbojích a dále mechanismy, kterými se proti těmto přepětím zařízení chrání.

Princip vzniku atmosférického výboje byl teoreticky naznačen v kapitole 2. Jedná se o silný elektrostatický výboj, který vychází z termoelektrických vlastností ledu. Je zde popsán vznik náboje v kapalně fázi a vznik náboje při mrazu.

Atmosférická přepětí jsou způsobena přímými a nepřímými údery blesků do vedení a představují hlavní nebezpečí pro zařízení. V kapitole 4 je uveden přehled ochrany proti atmosférickému přepětí. Jsou zde uvedeny ochrany, které se instalují v distribučních sítích vn. V současné době se používají zejména omezovače přepětí na bázi ZnO. Na rozdíl od ventilových bleskojistek mají lepší ochranné vlastnosti a jsou spolehlivější.

Poslední část práce se zabývá simulací působení omezovače přepětí v distribuční síti 22 kV. Při úderu blesku do vedení vzniká atmosférické přepětí, které ohrožuje prvky elektroenergetické soustavy. Tato situace byla modelována v programu ATPDraw 5.3 a bylo testováno, zda omezovač přepětí umístěný na mezi ochranné vzdálenosti, ochrání transformátor. Tedy jestli bylo zařízení v ochranném dosahu omezovače a nebude tak překročena základní izolační hladina. Z provedených simulací vyplynulo, že přívod omezovače přepětí by měl mít dostatečně velký průřez a nejmenší možnou délku.

Závěrem je nutno zmínit, že i při využití všech dostupných prostředků proti přepětí, není nikdy stoprocentní jistota, že nedojde ke škodám, které může přepětí způsobit. Dokážeme pouze minimalizovat škody s využitím všech poznatků z praxe a teoretickými rozbory simulovanými v laboratořích, popřípadě v dnes již velmi vyspělých simulačních programech.

V praxi se však pravděpodobně bude vždy jednat o kompromis mezi mírou ochrany a investicí do ní vložené, neboť i v energetických společnostech zabývajících se přenosem a distribucí elektrické energie platí tržní principy.

## Seznam literatury a informačních zdrojů

- [1] ČSN EN 50160, *Charakteristiky napětí elektrické energie dodávané z veřejné distribuční sítě*, Praha, ČNI, 2000, stran-17,
- [2] ČSN 33 0120, *Elektrotechnické předpisy - Normalizovaná napětí IEC*, Praha, ČNI, 2001, stran-12,
- [3] <http://www.abb.com/industries/ap/db0003db004333/25de433ebee7d7e0c12574ad0027a678.aspx#> [Cit. 31.10.2011]
- [4] Burant, J.: *Blesk a přepětí, systémové řešení ochran*. Praha, FCC Public s.r.o., 2006, stran-256, ISBN 80-86534-10-3
- [5] ČSN 33 4000, *Požadavky sdělovacích zařízení proti přepětí a nadproudu*, Praha, ČNI, 1 /1988, stran-24
- [6] <http://www.kstst.sk/pages/vht/meteo/blesk.htm> [Cit. 17.10.2011]
- [7] <http://www.meteosvatonovice.unas.cz/prumery.html> [Cit. 5.11.2011]
- [8] Bednář, J.: *Meteorologie: Úvod do studia dějů v zemské atmosféře*, Praha, Portál, 2003, stran-223, ISBN 80-7178-653-5
- [9] Skřehot, P.: *Stručné základy teorie bouřek*, Meteorologická Operativní Rada, Praha, 2004, stran-36
- [10] [http://www.feec.vutbr.cz/EEICT/2003/fsbornik/99-CD/02-Mgr/06-Microelectronics\\_and\\_Technology/15-xtraufgott\\_zbynek.pdf](http://www.feec.vutbr.cz/EEICT/2003/fsbornik/99-CD/02-Mgr/06-Microelectronics_and_Technology/15-xtraufgott_zbynek.pdf) [Cit. 29.3.2012]
- [11] <http://www.radio-astronomy.org/library/Lightning-Protection-Systems.pdf> [Cit. 7.11.2011]
- [12] Kubeš, P.: *Impulsní silnouproudé výboje a jejich diagnostika*, Studijní text pro doktorské studium, FEL ČVUT, PRAHA, 2004
- [13] Kotlan, V. : *Rázové jevy na přenosovém vedení*, Disertační práce, ZČU, Plzeň, 2008, vedoucí práce- Prof. Ing. Zdeňka Benešová, Csc., stran-70
- [14] Hasman, T.: *Přepětí v energetických soustavách*, Praha, ČVUT, 1997, stran-129 , ISBN 80-01-01699-4
- [15] PNE 33 0000-8, *Navrhování a umístování svodičů přepětí v distribučních sítích nad 1 kV do 45 kV*, ÚJV Řež, Praha, 2005, stran- 42
- [16] <http://www.odbornecasopisy.cz/download/elektro/2007/el050704.pdf> [Cit. 8.1.2012]
- [17] <http://www.cez.cz/cs/pro-media/tiskove-zpravy/416.html> [Cit. 22.1.2012]
- [18] Veverka, A.: *Technika vysokých napětí*, Praha, SNTL, 1982, stran-301, vydání-3
- [19] [http://www.hw.cz/docs/prepetova\\_ochrana/prepeti\\_konstrukce.html](http://www.hw.cz/docs/prepetova_ochrana/prepeti_konstrukce.html) [Cit. 24.1.2012]
- [20] Rusňák Š., Řezáček, P.: *Elektrické přístroje 1*, ZČU, Plzeň, 2001, stran-155, ISBN 80-7082-825-0
- [21] soubor přednášek z předmětu EE2
- [22] <http://www.elpro-energo.cz/omezovace-prepeti/technicka-data/katalogy/> [Cit. 27.1.2012]
- [23] <http://www.odbornecasopisy.cz/res/pdf/39027.pdf> [Cit. 8.2.2012]
- [24] IEC 60099-4, *Metal-Oxide surge arresters without gaps for a.c. system*, International Electrotechnical Commission, Switzerland, 2004
- [25] [http://www.tycoelectronics.cz/catalogue/pdf/..%5C..%5CEnergy%5CCatalogues%5CZnO\\_omezovace\\_prepeti\\_nn\\_vn.pdf](http://www.tycoelectronics.cz/catalogue/pdf/..%5C..%5CEnergy%5CCatalogues%5CZnO_omezovace_prepeti_nn_vn.pdf) [Cit. 26.1.2012]
- [26] [http://www.umel.feec.vutbr.cz/VIT/images/pdf/studijni\\_materialy/bc/Vys\\_napeti\\_el\\_pristroje\\_S1.pdf](http://www.umel.feec.vutbr.cz/VIT/images/pdf/studijni_materialy/bc/Vys_napeti_el_pristroje_S1.pdf) [Cit. 7.3.2012]
- [27] soubor přednášek z předmětu TVN
- [28] <http://www.ece.mtu.edu/atp/ATPDraw/ATPDraw.html> [Cit. 29.2.2012]
- [29] <http://www.elkraft.ntnu.no/atpdraw/ATPDMAN56.pdf> [Cit. 29.2.2012]
- [30] ČSN EN 60071-1, *Koordinace izolace - Část 1: Definice, principy a Pravidla*, Český normalizační institut, Praha, 2006, stran-34

- [31] [http://fei1.vsb.cz/kat410/studium/studijni\\_materialy/ee/Cviceni\\_z\\_elektroenergetiky.pdf](http://fei1.vsb.cz/kat410/studium/studijni_materialy/ee/Cviceni_z_elektroenergetiky.pdf) [Cit. 2.3.2012]
- [32] [http://www.stanislav-misak.com/images/stories/pdf\\_source/Pokrocily/7castsoustavy.pdf](http://www.stanislav-misak.com/images/stories/pdf_source/Pokrocily/7castsoustavy.pdf) [Cit. 3.3.2012]
- [33] <http://www.elpro-energo.cz/download/omezovace-prepeti/1393En-Cz.pdf> [Cit. 3.3.2012]



## Přílohy

### I. Provozní přepětí

Mezi nejdůležitější zdroje těchto přepětí patří:

- Odpínání nezatížených zařízení s indukčností připojených paralelně ke zdrojům napětí. Mohou to být například transformátory v chodu naprázdno, kompenzační tlumivky, cívky, relé a stykače. Při jejich odepnutí ve stavu na prázdno vznikne rezonanční obvod s tlumenými kmity.
- Odpínání sériové připojených zařízení s indukčností od velkých proudových zdrojů, kompenzátorů nebo vodivých smyček. Při rozpojení obvodu s indukčností se indukčnost snaží zachovat proud i po rozpojení obvodu. V obvodu vznikne napětí, které se snaží držet velikost proudu. Velikost napětí závisí na indukčnosti obvodu, na procházejícím proudu v okamžiku rozpojení:

$$u = -L \frac{di_L}{dt}. \quad (\text{I.1})$$

- Zařízení, která jsou řízena frekvenčně nebo fázově. Rychlé spínání výkonových obvodů polovodičových měničů, vlivem kapacit a indukčností vznikají periodicky se opakující kmity. Dochází tak k deformaci průběhu napájecího napětí, jehož kmitočtové spektrum sahá až do MHz. Potlačení napěťových kmitů závisí na kvalitě provedení souvisejících filtračních obvodů. Nežádoucí jevy vznikají u tyristorově řízených motorů tramvají, trolejbusů, lokomotiv a výtahů [5].

### II. Hrotové výboje

Na rozdíl od kapitoly 2.2 uvažujeme, že elektrické pole mezi oblakem a zemí je orientováno záporně a zemský povrch se jeví jako kladně nabitý. Elektrické siločáry jsou přibližně vertikální a směřují od záporného náboje spodní části oblaku ke kladnému náboji na zemském povrchu. Vložíme-li do tohoto elektrického pole vodič natolik malých rozměrů, abychom ho mohli považovat za bod (hrot), začnou se kolem něj deformovat elektrické siločáry. Tento hrot bude uzemněn, a proto má stejný elektrický potenciál. V jeho bezprostředním okolí dochází ke zhuštění siločar (zesílení elektrického pole). Tím mohou být vytvořeny podmínky pro ionizaci nárazem. Okolo hrotu se vytváří oblak iontů, z něhož jsou

uzemněním odváděny k zemskému povrchu ty částice, které jsou vzhledem k zemi opačné polarity. Tento děj je nazýván hrotovým výbojem.

Předmět, který vyčnívá nad rovný povrch (strom, anténa, hrany letadla, stěžeň lodě), mění normální rozložení elektrického pole ovzduší. V případě takovýchto předmětů představuje kritická hodnota  $600 \div 1\,000$  V/m [4], tj. několiknásobek intenzity elektrického pole v podmínkách klidného ovzduší ( $130 \div 140$  V/m [8]). Hrotové výboje jsou trsové nebo doutnavé výboje fialové barvy, délky několika centimetrů a svou podobou připomínají koronu. Silné hrotové výboje jsou provázeny i zvukovými efekty (praskáním) a dobře viditelným jiskřením a sršením různých kovových hrotů antén, špiček věží apod. Proto bývá tento úkaz lidově označován jako „Eliášův oheň“.

### III. Druhy přepět'ových vazeb

Při průniku přepětí mezi zdrojem přepětí a zařízením se projevují galvanické, induktivní a kapacitní vazby a vazba elektromagnetickým polem. Druhy přepět'ových vazeb [4]:

- **Galvanická vazba** se nejčastěji vztahuje na vodičích společného napájení. Velikost impedance jednotlivých zařízení určuje stupeň a kvalitu vzájemného ovlivnění.
- **Induktivní vazba** umožňuje ovlivňovat chování elektrického obvodu proudem protékajícím v odděleném vedení, prostřednictvím indukovaného magnetického pole. Působení elektromagnetického pole je důležité zejména při uvažování o nepřímých účincích bleskového proudu protékajícího hromosvodem na zařízení umístěné v budově. Je třeba eliminovat případné chybové smyčky, protože stupeň vazby mezi elektrickými obvody roste s její plochou.
- **Kapacitní vazba** se projevuje především mezi vzájemně galvanicky oddělenými vodiči umístěnými v dlouhém těsném souběhu.
- **Vazba elektromagnetickým polem** je vzájemně ovlivňování elektrických zařízení, které nejsou v přímém kontaktu. Jedná se o vazby, kdy část zařízení nebo jeho obal působí jako přijímací nebo vysílací anténa. Z hlediska ochrany před přepětím je tato vazba většinou nepodstatná.

## IV. Použité prvky v modelu a jejich parametry

### 1. Napájení sítě (AC3PH)

Síť je napájena z nadřazené soustavy 110 kV. Pro účely tohoto modelu lze předpokládat, že soustava disponuje neomezeným výkonem (ideální napěťový zdroj). Pro nastavení parametrů ideálního zdroje s frekvencí je nutné nejprve určit velikost amplitudy fázové hodnoty napětí Amp, pro kterou platí:

$$U_{\max} = \frac{U}{\sqrt{3}} * \sqrt{2} = \frac{110000}{\sqrt{3}} * \sqrt{2} = 89814,6 \text{ V}.$$

Dialogové menu v ATP:

- Amp. 89814.6 amplituda napětí fáze [V],
- f 50 frekvence zdroje [Hz],
- pha 0 fáze, kterou začíná fáze [°, rad],
- A1 0 specifikace jednotky úhlu, 0 – stupně , 1 – sekundy,
- Tstart -1 začátek generace [s],
- Tstop 10 konec generace [s].

### 2. Napájecí transformátor 110/22 kV (BCTRAN)

Síť, na níž je simulace v této práci prováděna, je napájena z transformátoru firmy SIEMENS. Parametry transformátoru jsou v tabulce IV.1.

Tab. IV.1 Parametry transformátoru 110/22 kV [31]

Výkon [MVA]	Napětí nakrátko [%]	Proud naprázdno [%]	Ztráty nakrátko [kW]	Ztráty naprázdno [kW]
25	9,5	2	63	24

Dialogové menu v ATP:

Struktura-

- Number of phases 3 počet fází,
- Number of windings 2 počet vinutí,
- Type of core Other typ jádra, další,
- Test frequency [Hz] 50 zkušební frekvence.

Štítkové hodnoty a zapojení-

- L-L Voltage [kV] 110 22 napětí na primární straně, na sekundární straně,
- Power [MVA] 25 25 jmenovitý výkon,
- Connections Y Y zapojení vinutí transformátoru,
- Phase shift [rad] 0 hodinový úhel.

## Měření naprázdno-

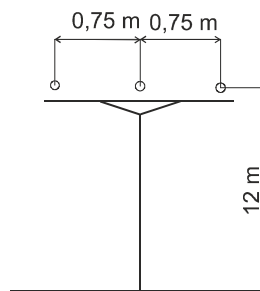
• Performed at	HV	na které straně se měření provádělo,
• Connect at	HV	napětí připojené při měření, primární vinutí,
• Volt [%]	100	napětí, při kterém se měřilo,
• Curr [%]	2	proud naprázdno,
• Loss [kW]	24	ztráty naprázdno.

## Měření nakrátko-

• Imp. [%]	9,5	napětí nakrátko,
• Pow. [MVA]	25	jmenovitý výkon,
• Loss [kW]	63	ztráty nakrátko.

### 3. Venkovní vedení a jejich modely (LCC)

Pro simulaci bylo použito vzdušné vedení AlFe6 95 mm<sup>2</sup>. Rozmístění vodičů ukazuje obrázek I.1. Při simulaci uvažují prověšení vodičů 1,1 m (průměrná hodnota pro vedení 22 kV).



Obr. I.1 Schematické znázornění uložení vedení na stožárech

Parametry vedení potřebné pro simulaci jsou uvedeny v tabulce IV.2.

Tab. IV.2 Parametry vzdušného vedení AlFe6 95 mm<sup>2</sup> [32]

Phase No, číslo fáze	Rin [cm], poloměr ocelové duše vodiče	Rout [cm], poloměr ocelové duše vodiče	Reiss [Ω/km], odpor vodiče na jeden kilometr délky	Horiz [m], horizontální vzdálenost	Vtower [m], výška lana nad zemí u stožáru	Vmind [m], výška v prověšení
1	0,218	1,335	0,319	-0,75	12	10,9
2	0,218	1,335	0,319	0	12	10,9
3	0,218	1,335	0,319	0,75	12	10,9

Dialogové menu v ATP pro vedení 8 km:

## Typ systému-

• Overhead line	3	vzdušné vedení, 3 fáze,
• Transposed	nezatrženo	transponované vedení,
• Auto building	nezatrženo	automatická rekonstrukce vedení,
• Skin effect	zatrženo	vliv skin efektu,

• Units	metric	jednotky.
Standardní data-		
• Rho [ $\Omega \cdot m$ ]	100	měrná rezistivita země,
• Freq. init [Hz]	50	maximální frekvence,
• Length [km]	8	délka vedení.
Model-		
• J.Marti	zatrženo	frekvenčně závislý model.
Data-		
• Decades	7	počet dekád,
• Points/Dec	10	body na dekádu,
• Fraq. matrix [Hz]	100000	maximální frekvence,
• Fraq. SS [Hz]	50	frekvence ustáleného stavu.

#### 4. Zdroj bleskového proudu (HEIDLER)

Do vedení udeří nejčastější výboj, a tedy se zápornou polaritou. Amplituda bleskového proudu je tedy 31,1 kA (tab. 2.1).

Parametry v ATP:

• Amp.	31100	amplituda bleskového proudu [A],
• T <sub>f</sub>	8E-6	doba náběžné hrany [s],
• tau	2E-5	doba půltýlu [s],
• n	2	faktor ovlivňující rychlost růstu funkce,
• Tstart	0,01	začátek generace [s],
• Tstop	10	konec generace [s].

#### 5. Omezovač přepětí (MOV)

Pro hladinu napětí 22 kV byl použit omezovač firmy Eplro - Energo [33]. Omezovač má referenční napětí 33 kV a provozní napětí 26,4 kV.

Parametry v ATP:

• Vreg	75200	reakční napětí [V],
• Vflash	-1	přeskokové napětí, -1-žádný přeskok,
• Vzero	0	počáteční napětí [V],
• COL	1	počet sloupců,
• SER	1	počet bloků v serii,
• ErrLim	0,05	montážní tolerance.

## Charakteristika-

- I [A]            U [V]            velikost napětí a proudu.
- 5000            75200
- 1000            79200
- 20000          86300
- 40000          91900

**6. Distribuční transformátor 22/0,4 kV (BCTAN)**

Distribuční transformátory převádí napětí 22 kV na napětí 400 V, tedy z hladiny vn na hladinu nn. Parametry transformátoru SIEMENS TUNORMA jsou uvedeny v tabulce IV.3.

Tab. IV.3 Parametry transformátoru 22/0,4 kV [31]

Výkon [MVA]	Napětí nakrátko [%]	Proud naprázdno [%]	Ztráty nakrátko [kW]	Ztráty naprázdno [kW]
0,4	4	5	6	0,93

Dialogové menu v ATP:

## Struktura-

- Number of phases    3            počet fází,
- Number of windings 2            počet vinutí,
- Type of core          Other        typ jádra, další,
- Test frequency [Hz] 50            zkušební frekvence.

## Štítkové hodnoty a zapojení-

- L-L Voltage [kV]    22    0,4    napětí na primární straně, na sekundární straně,
- Power [MVA]        0,4    0,4    jmenovitý výkon,
- Connections        D      Y      zapojení vinutí transformátoru,
- Phase shift [rad]               30    hodinový úhel.

## Měření naprázdno-

- Performed at        HV            na které straně se měření provádělo,
- Connect at          HV            napětí připojené při měření, primární vinutí,
- Volt [%]            100          napětí, při kterém se měřilo,
- Curr [%]            5            proud naprázdno,
- Loss [kW]          0,93        ztráty naprázdno.

## Měření nakrátko-

- Imp. [%]            4            napětí nakrátko,
- Pow. [MVA]        0,4        jmenovitý výkon,
- Loss [kW]          6            ztráty nakrátko.

## 7. Zátěž (RLCD3)

Na výstupu transformátoru 22/0,4 kV je připojena soustava asynchronních motorů o celkovém instalovaném výkonu  $S = 250$  kVA, a proudovým odběrem 60 A,  $\cos\varphi = 0,9$ . Transformátor je tedy zatížen přibližně na 60 % svého jmenovitého sdruženého výkonu. Asynchronní motory jsou nahrazeny RLC článkem v D spojení. Parametry RLC článku jsou:

$$Z_{nf} = \sqrt{3} * \frac{250}{6} = 72,1 \Omega$$

$$R_{Z1} = Z_{nf} * \cos\varphi = 7,21 * 0,9 = 64,95 \Omega$$

$$L_{Z1} = \frac{Z_{nf} * \sin\varphi}{2\pi f} = \frac{72,1 * 0,436}{2\pi * 50} = 100 \text{ mH} .$$

Dialogové menu v ATP:

- R1            65            odpor ve fázi A [ $\Omega$ ],
- L1            100           indukční reaktance ve fázi A [mH],
- C1            0                kapacitní reaktance ve fázi A [ $\mu$ F],
- R2            65            odpor ve fázi B [ $\Omega$ ],
- L2            100           indukční reaktance ve fázi B [mH],
- C2            0                kapacitní reaktance ve fázi B [ $\mu$ F],
- R3            65            odpor ve fázi C [ $\Omega$ ],
- L3            100           indukční reaktance ve fázi C [mH],
- C3            0                kapacitní reaktance ve fázi C [ $\mu$ F].