

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

KATEDRA ELEKTROMECHANIKY A VÝKONOVÉ ELEKTRONIKY

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Stanovení ochranného úhlu zemnicího lana

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

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE
(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Vladimír BRABEC**
Osobní číslo: **E13B0074K**
Studijní program: **B2644 Aplikovaná elektrotechnika**
Studijní obor: **Aplikovaná elektrotechnika**
Název tématu: **Stanovení ochranného úhlu zemnicího lana**
Zadávací katedra: **Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky**

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

1. Uveďte způsob vzniku a šíření atmosférického impulzu.
2. Popište postup pro stanovení ochranného úhlu zemnicího lana.
3. Navrhněte a na modelu experimentálně otestujte vysokonapěťové vedení.
4. Zpracujte a vyhodnoťte dosažené výsledky.




Rozsah grafických prací: podle doporučení vedoucího
Rozsah pracovní zprávy: 20 - 30 stran
Forma zpracování bakalářské práce: tištěná/elektronická
Seznam odborné literatury:


1. **Burke: Power Distribution Engineering**
2. **Hileman: Insulation Coordination for Power Systems**
3. **Hasman: Přepětí v elektroenergetických soustavách**

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

Datum zadání bakalářské práce: **14. října 2013**
Termín odevzdání bakalářské práce: **9. června 2014**


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




Prof. Ing. Václav Kús, CSc.
vedoucí katedry

V Plzni dne 14. října 2013

Abstrakt

Tato bakalářská práce je věnována v první řadě vzniku elektřiny v atmosféře, v oblacích a především vzniklým výbojům. Dozvíme se jakým způsobem se šíří atmosférický impulz a jaké má jeho úder do distribuční sítě následky.

Velmi důležitou součástí této práce je pojednání o způsobu ochrany sítí vn a vvn. Zvýšenou pozornost budeme věnovat sítím vvn, jejichž primární ochranou je zemnicí lana, o jehož funkci a důležitosti polohy jeho ukotvení si povíme podrobněji.

Poznatky o principech stanovení ochranného úhlu zemnicího lana si ověříme laboratorním experimentem.

Klíčová slova

Distribuční soustava, ochranný úhel, atmosférický výboj, přepětí, geometrický model

Abstract

This bachelor thesis deals with creation of electricity in the atmosphere, in the clouds and with generated leader at the first place. We will learn how atmospheric pulse is spread and which consequences have got its stroke.

Very important part of this thesis is chapter related to way to protect network of high-voltage and very high-voltage. Increased attention will be paid to network of very high-voltage. Their primary protection is grounding wire. Its function and importance of proper anchoring will be discussed later.

Knowledge of the principles of determining of the shielding angle of grounding wire will be verified in the laboratory experiment.

Key words

Distribution system, shielding angle, atmospherical leader, over-voltage, geometrical model

Prohlášení

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

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

.....

podpis

V Plzni dne 8.6.2014

Vladimír Brabec

Poděkování

Rád bych tímto způsobem poděkoval vedoucímu bakalářské práce, panu Ing. Miroslavovi Hromádkovi, Ph.D., za cenné profesionální rady, připomínky a v neposlední řadě za trpělivost.

Dále bych rád poděkoval svým blízkým za jejich podporu.

Obsah

OBSAH	8
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK	9
ÚVOD	10
1. ATMOSFÉRICKÁ ELEKTRINA	11
1.1 ZÁKLADNÍ POJMY A POZNATKY	11
1.2 IONTY V ATMOSFÉRE	12
2 OBLAČNÁ ELEKTRINA	13
2.1 ZÁKLADNÍ DĚLENÍ OBLAČNÉ ELEKTRINY	13
2.2 POHLED DO HISTORIE.....	14
3 BOUŘKY	15
3.1 PŘÍČINY VZNIKU OBLAKU	16
3.2 BOUŘKOVÝ OBLAK	18
3.2.1 Mikrostruktura bouřkového oblaku.....	18
3.2.2 Makrostruktura bouřkového oblaku.....	18
3.3 ČETNOST BOUŘEK.....	19
4 ELEKTRICKÉ PROJEVY BOUŘKOVÉ ČINNOSTI	20
4.1 HROTOVÉ VÝBOJE.....	20
4.2 BLESKOVÝ VÝBOJ.....	21
4.2.1 Rozdělení blesků.....	21
4.2.2 Mechanismus vzniku blesku	22
4.2.3 Proud bleskového výboje	23
5 ATMOSFÉRICKÁ PŘEPĚTÍ NA VENKOVNÍCH VEDENÍCH	24
5.1 MOŽNOSTI ZASAŽENÍ DISTRIBUČNÍ SÍTĚ	24
5.2 OCHRANA SÍTÍ VYSOKÉHO NAPĚTÍ	25
5.3 OCHRANA SÍTÍ VELMI VYSOKÉHO NAPĚTÍ	25
6 ZEMNÍ LANO	26
6.1 POŽADAVKY NA ZEMNÍ LANO	26
6.2 VÝVOJ V URČENÍ OCHRANNÉHO ÚHLU.....	27
6.3 GEOMETRICKÝ MODEL.....	27
6.4 ZEMNÍ ÚHEL STANOVENÝ NA ZÁKLADĚ MÍRY SELHÁNÍ.....	29
7 EXPERIMENTÁLNÍ MODEL	30
7.1 POPIS MODELU	30
7.2 POPIS MĚŘENÍ	31
7.3 NAMĚŘENÉ HODNOTY.....	33
7.4 ZPRACOVÁNÍ VÝSLEDKŮ	34
7.4.1 Stožár číslo 1.....	34
7.4.2 Stožár číslo 2.....	34
7.4.3 Stožár číslo 3.....	35
7.5 ZHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ	35
ZÁVĚR	36
SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ	37
PŘÍLOHY	1

Seznam symbolů a zkratek

nn	nízké napětí
vn	vysoké napětí
vvn	velmi vysoké napětí
AlFe	označení lana hliník železo
GM	geometrický model
r_c	poloměr oblouku GM
r_g	výška horizontály GM
A, B, C	průniky oblouků GM
h	výška ochranného lana
y	výška fázového vodiče
D_c	délka vykrytí blesků fázovým vodičem
D_g	délka vykrytí blesků ochranným lanem
L	délka vedení
A, b	konstanty jednotlivých modelů k vyjádření úderové vzdálenosti
γ	Youngovo pravidlo výpočtu r_c
α	ochranný úhel
RG	rázový generátor
D	dělič
BE	blesková elektroda
M	model
h_0	průměrná výška stožáru
α_{F1}	ochranný úhel vztažený k vyššímu fázovému vodiči
α_{F2}	ochranný úhel vztažený k nižšímu fázovému vodiči
N	počet úderů blesku
P	počet poruch způsobených zpětným přeskokem
Z	počet poruch způsobených zásahem vodiče
p	pravděpodobnost zásahu

Úvod

Jak již samotný název této práce napovídá, zaobírá se příčinou a eliminací následků atmosférických výbojů.

V první části si vysvětlíme co je příčinou vzniku atmosférické elektřiny, jakým způsobem se v atmosféře tvoří ionty a jaké má jejich vznik následky. Jelikož téma oblačné elektřiny provází lidstvo již od nepaměti, nastíníme si několik zásadních historických milníků, které lidstvo posunuli k vědeckému opodstatnění těchto fascinujících jevů. Taktéž si představíme elementární mechanismy, které dají vzniknout bouřkovým oblakům, jejich četnost v různých zemských pásech, nadmořských výškách a v neposlední řadě pojednáme o hrotových a bleskových výbojích.

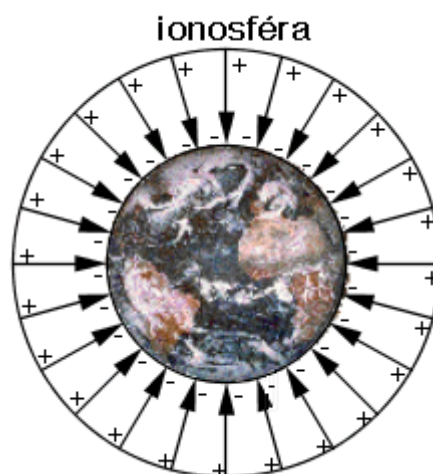
Druhá část této práce pojednává o možnostech zásahu distribuční sítě bleskem a o druhu používaných ochran, které mají za úkol zamezit škodám vzniklých následkem přepětí v rozvodné síti. Dozvíme se, že napěťové hladiny ve skupinách vysokého napětí a velmi vysokého napětí jsou vůči atmosférickým výbojům zabezpečeny odlišně. Tento poznatek nás posune k opodstatnění použití ochranného lana. Pro správnou funkci zemnicího lana je nutno dodržet několik základních pravidel, abychom mohli co možná nejlépe využít jeho stínícího efektu. Zásadním bodem pro celistvost této práce bude představení geometrického modelu pro stanovení ochranného úhlu zemnicího lana.

Pravdivost těchto poznatků si sami ověříme v podobě laboratorního experimentu.

1. Atmosférická elektřina

1.1 Základní pojmy a poznatky

Na základě poznatků a pokusů prováděných se statickou elektřinou již v osmnáctém století, bylo patrné, že s některými jevy ovšem v mnohonásobně větším měřítku se setkáváme velmi často a to v podobě atmosférických výbojů čili blesků. Zhruba v téže době došli vědci k poznání, že povrch Země a atmosféra jsou neustále ve stavu elektrického napětí. Země i atmosféra nesou elektrické náboje opačné polarity. Za podmínky bezoblačné oblohy se začal náboj zemského povrchu označovat jako náboj záporné polarity a náboj převažující v atmosféře jako náboj kladné polarity.



Obr. 1: Zemský sférický kondenzátor (převzato z [11.]

Dle zmíněných poznatků si můžeme zemský povrch a atmosféru představit jako obrovský sférický kondenzátor tvořený dvěma kulovými plochami opačné polarity oddělenými vzduchovou mezerou s malou elektrickou vodivostí. Víme, že elektrická vodivost vzduchu není díky vlhkosti a různým nečistotám nikdy nulová, to zapříčiní protékání proudu ve vertikálním směru k zemskému povrchu a přivádění kladného náboje, čímž dochází k vybíjení sférického kondenzátoru. Tímto způsobem by došlo v horizontu několika desítek minut k vybití kondenzátoru, což by mělo za následek neutralizaci záporného náboje povrchu Země a zánik elektrického pole v atmosféře. Jelikož je elektrické pole v ovzduší z dlouhodobého hlediska stálé, musí existovat i opačný mechanismus, v jehož důsledku nastane regenerace

záporného náboje zemského povrchu. Takový mechanismus sledujeme v projevech oblačné elektřiny při bouřkové činnosti. Konkrétním mechanismem přivádějícím především záporný náboj ze spodní části oblaků k zemi je hrotový výboj a blesk [1].

1.2 Ionty v atmosféře

Z předchozí kapitoly víme, že atmosféra spolu se zemským povrchem tvoří v nadsazeném slova smyslu gigantický sférický kondenzátor. Nyní se zaměříme na děje, které onu vodivost zapříčiňují.

Vzduch, kterým jsme obklopeni, je do jisté míry považován za dielektrikum, ovšem je nutno podotknout, že jeho elektrická vodivost není zcela rovna nule. I tato minimální vodivost může zapříčinit uzavření smyčky a následný tok proudu kondenzátorem [4].

Velmi významnou osobností v této oblasti výzkumu byl bezesporu Charles Augustin de Coulomb, který mimo jiné přišel s názorem, že částice, které jsou součástí vzduchu, získají elektrický náboj v důsledku nárazu do částic zelektrizovaných, od kterých jsou posléze působením elektrostatických sil odpuzovány. S koncem 19. století přicházejí vědci Elster a Geitel s objevem elektricky nabitých částic obsažených ve vzduchu na molekulární úrovni.

S dalším významným objevem přišel roku 1905 Langevin, který prokázal existenci mnohem větších elektricky nabitých částic – které jsou utvořeny záchytem molekul, nesoucích náboj stejné polarity – aerosolů.

Takovéto jevy jsou zapříčiněny ionizací. Na počátku ionizace máme elektricky neutrální molekulu, u které dojde k odtržení elektronu z její valenční vrstvy. Tímto způsobem vznikne nová molekula s přebytkem kladného náboje, tzv. kation. Tento jev se samozřejmě vyskytuje i v opačném případě, kdy je molekulou volný elektron zachycen, čímž vznikne částice s přebytkem záporného náboje tzv. anion. Aniony i kationy začnou polarizovat původně elektricky neutrální molekuly ve svém dosahu, čímž zapříčiní vznik elektrostatických sil a následné utváření shluků jedné ionizované a několika neutrálních molekul. Takto utvořený shluk je již poměrně velký, tím pádem může být zachycen aerosolovými částicemi a tím vzniknou elektricky nabitě částice nezanedbatelných rozměrů.

Atmosférické ionty jinak též aeroionty, jsou rozdělovány do následujících čtyř tříd podle Israělovy stupnice.

1) Ionty lehké

$$- r > 10^{-9} \text{ m};$$

2) Ionty střední

- malé střední, $10^{-9} \text{ m} < r < 8 * 10^{-9} \text{ m}$;
- velké střední, $8 * 10^{-9} \text{ m} < r < 2,6 * 10^{-8}$;

3) Ionty těžké

- $2,6 * 10^{-8} \text{ m} > r > 5,5 * 10^{-8} \text{ m}$;

4) Ionty ultratěžké

- $r > 5,5 * 10^{-8} \text{ m}$;

Nejvyššího významu pro elektrickou vodivost vzduchu má skupina lehkých iontů, které jsou díky své malé hmotnosti oproti těžkým iontům velmi pohyblivé. Jelikož platí, že se vzrůstající hmotností klesá jejich rychlost v elektrickém poli, mají těžké ionty minimální příspěvek k toku elektrického proudu. Pravdivost takového tvrzení můžeme sledovat například v zimních měsících, kdy je ve vzduchu zvýšené množství aerosolu. Lehké ionty se na něm zachytávají, těžknou a v důsledku toho se podstatně snižuje vodivost vzduchu.

Samotnou příčinou ionizace je v první řadě kosmické záření pronikající do atmosféry. Svědčí o tom například skutečnost, že s nadmořskou výškou roste i elektrická vodivost vzduchu. Tento jev je rovněž patrný nad rovníkovou oblastí.

V polohách bližších povrchu země je důležité podotknout vliv radiace pocházející především z vyzařování radioaktivních prvků v nerostném bohatství.

2 Oblačná elektřina

2.1 Základní dělení oblačné elektřiny

Oblačnou elektřinu v atmosféře a její projevy můžeme rozdělit do tří skupin.

- 1) Relativně slabé elektrické projevy
- 2) Silnější elektrické projevy
- 3) Projevy bouřkové elektřiny

První skupinou jsou relativně slabé elektrické projevy. Jedná se o projevy u nesrážkových oblaků, kdy elektrický náboj a elektrické pole jsou obdobné jako v případě bezoblačného vzduchu.

Druhou skupinou jsou silnější elektrické projevy, kdy se pojednává o oblacích typu nimbostratus. V rozložení náboje dominuje bipolární struktura, přičemž kladný náboj je

umístěn v horní části a záporný náboj je umístěn v části spodní. Elektrický náboj a elektrické pole je zhruba o jeden řád vyšší než v předchozím případě.

Poslední skupinou jsou projevy bouřkové elektřiny, které jsou spojeny s mraky typu kumulonimbus. V bezvýhradné bipolární struktuře se nacházejí kladné náboje v horní části a ve spodní části mraku záporné náboje. Elektrický náboj a elektrické pole v oblaku i pod ním jsou alespoň o dva řády vyšší oproti bezoblačnému vzduchu [1].

2.2 Pohled do historie

Až do počátku 17. století si lidé jevy oblačné elektřiny vysvětlovali převážně na základě mytologických, popřípadě teologických představ [2].

V 17. Století byl tehdejšími vědci I. Newtonem, J. A. Nollem vyřčen názor, že u třecí elektřiny a bleskového výboje dochází k totožnému fyzikálnímu jevu. Tuto myšlenku přijal jako první roku 1749 experimentálně potvrdil americký přírodovědec a státník Benjamin Franklin [3].

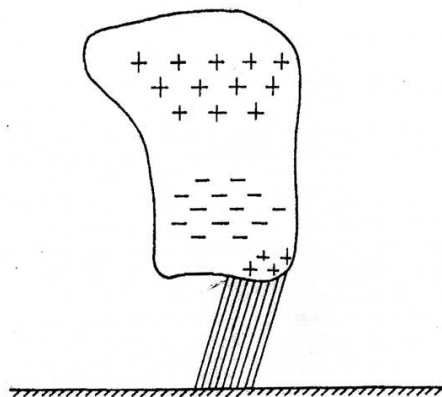
Po víc než století nebyly poznatky Benjamina Franklina překonány. Výraznějšího posunu ve výzkumu atmosférických výbojů jsme se dočkali až v první polovině 20. století s vynálezem rotační kamery a katodového osciloskopu [2].

Zvláštní pozornosti se dostalo Wilsonově teorii z roku 1929. Kdy uvažujeme, že kapky padající atmosférou jsou polarizovány. Horní část kapky je polarizována záporným nábojem a spodní část kapky má polaritu kladnou. Budeme-li uvažovat pádovou rychlost kapek vyšší než rychlost kladných iontů směřujících k záporně polarizovanému povrchu Země, budou tyto kapky na svou spodní kladně nabitou polovinu navazovat převážně záporné ionty, přičemž dojde k celkové změně a kapka ponese pouze záporný náboj, což se projeví ve spodní části mraku, kde kapky mají záporný náboj a vlivem nabalování pouze záporných iontů zůstanou v horní části mraku převážně kladné ionty. Na základě této teorie bychom si dokázali vysvětlit vznik horního kladně polarizovaného centra a spodního záporně polarizovaného centra. Tato teorie je ovšem nepostačující s přihlédnutím k velikostem nábojů v bouřkových oblacích. Dále je patrné, že vzhledem ke značné velikosti elektrického pole v bouřkových mracích nemůže být splněna podmínka vyšší pádové rychlosti kapek. Funkčnost této teorie však nelze vyloučit u mraků s menšími elektrickými projevy. Budeme-li uvažovat namísto kapek vody analogický proces pro vodu v pevném skupenství za předpokladu, že části ledu jsou již polarizovány nezávisle na vnějším elektrickém poli,

můžeme se opřít o Wallovu teorii z roku 1948. Jelikož atmosférické výboje jsou téměř vždy doprovázeny srážkami ve vyšších a mírných šířkách převážně s obsahem pevných částic, je nasnadě přiklánět se k teoriím, které jsou založeny na přítomnosti vody v pevném skupenství. Takovéto teorie nazýváme gravitační. V literatuře se však můžeme setkat i s jinými teoriemi, které například neuvažují vliv zemské tíže a nahrazují jej kupříkladu vzestupným a sestupným vzdušným proudům. Těmto teoriím se prozatím dostává menšího významu [1].

I přes značné množství výzkumů doposud neexistuje mezi vědci jednotný a jasný názor na mechanismus vzniku center elektrických nábojů. Z toho důvodu můžeme usoudit, že se nejedná o ojedinělý mechanismus, nýbrž o spojení více různých faktorů. Shoda nastává ve vysvětlení, že vznik elektrického náboje v kumulonimbu vyvolá bleskový výboj [2].

Tímto se dostaneme k rozložení onoho náboje. V horní části kumulonimbu, která se nachází ve výšce v rozmezí 6 – 10 km, se hromadí kladný náboj o velikosti přibližně 24 C zaujímající kulový prostor o poloměru 2 km. Ve spodní části oblaku nacházející se ve výšce v rozmezí 2,5 – 5 km, se hromadí záporný náboj s přibližnou velikostí 20 C rozložen taktéž na kulové ploše o poloměru 1 km. Vedle těchto dvou nejvýznamnějších center se může, ovšem pouze při vypadávání srážek, vyskytovat v kumulonimbu ještě jedna o mnoho menší, kladně polarizovaná oblast. Tato oblast má náboj zhruba 4 C a rozprostírá se na ploše o poloměru 500 m se středem v přibližné výšce 1500 m. Pro názornou představu poslouží na obr. 2 Simpsonův model [2].



Obr. 2: Simpsonův model (převzato z [1.])

3 Bouřky

Základním požadavkem pro vznik oblaku je ochlazení vodních par obsažených ve vzduchu natolik, že se z vodní páry stane pára nasycená a dále dochází k jejímu kondenzování a začne utvářet jednotlivé kapky. Tento děj je vyvolán dvěma způsoby.

3.1 Příčiny vzniku oblaku

První možností je izobarické ochlazování. Jak již samotný název napovídá, bude se jednat o ochlazování vzduchu za stálého tlaku až do takzvaného rosného bodu, kdy dochází ke kondenzaci do vodních kapek. Izobarickým ochlazováním vznikne takzvaná podinverzní oblačnost. Při tomto ději se turbulentně promíchávají přenášená kondenzační jádra spolu s vodními parami a dále se kumulují pod vrstvou inverze. Nashromážděná vodní pára se v podinverzní vrstvě začne ochlazovat pod hladinu rosného bodu a to vlivem radiačního ochlazování, které je zapříčiněno dlouhovlnným vyzařováním vodních par.

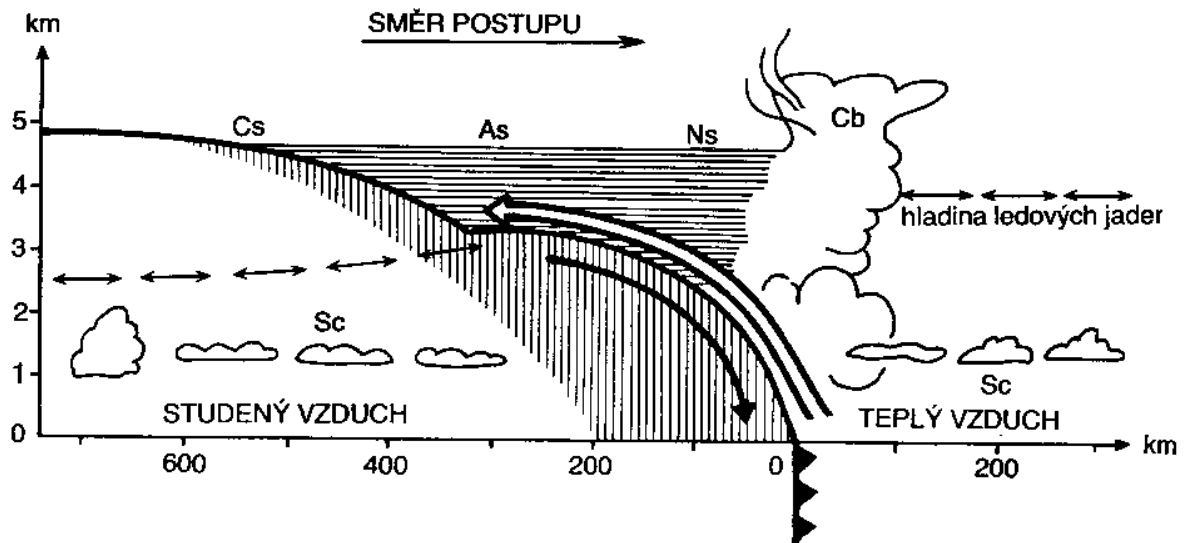
Tento způsob ochlazování vzduchu však ke vzniku bouřkových oblaků nepřispívá.

Druhou možností je stoupající pohyb vzduchu. Při tomto ději se stoupající vzduch ochlazuje a rozpíná bez výměny tepla s okolím [1].

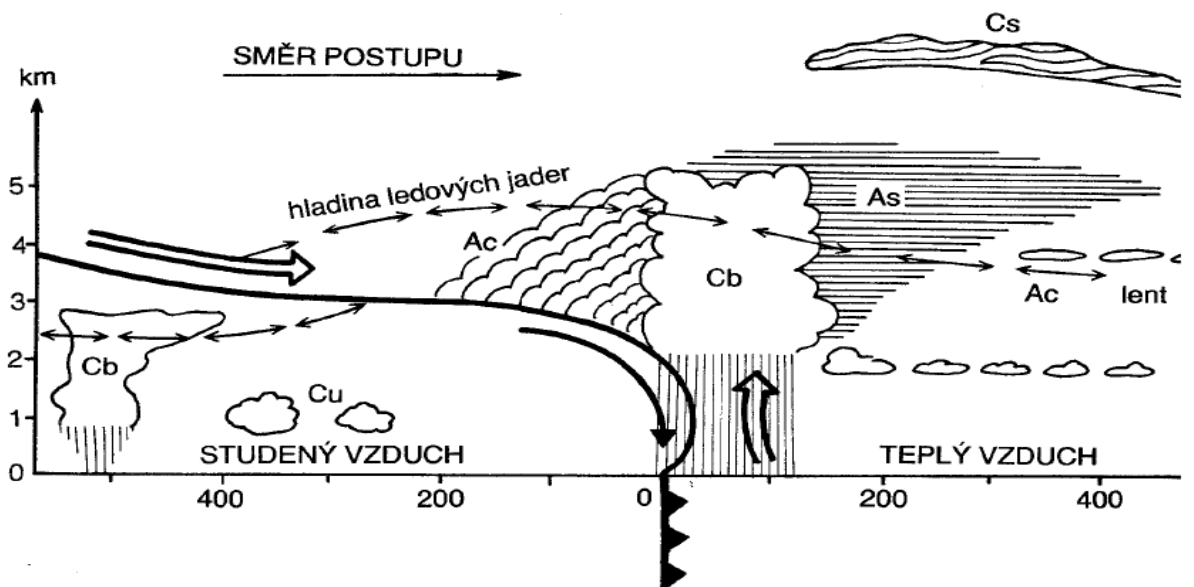
Vzestupné proudy vzduchu mohou být zapříčiněny několika způsoby, načež každý ze způsobů zadá vzniknout specifické oblačnosti [4].

Pro vznik bouřkového oblaku je však nejdůležitější stoupání teplého vzduchu v souvislosti s frontálními plochami.

V případě, kdy uvažujeme nadzvedávání rychlejšího teplého vzduchu pomalejším studeným, hovoříme o tzv. teplé frontě. Pro teplou frontu je charakteristická vrstevnatá oblačnost, ve které k bouřkám nedochází. Ke vzniku bouřky však zásadním způsobem přispívá studená fronta. V tomto případě se pohybuje rychleji studený vítr, který postupně dohání pomaleji pohybující se teplý vzduch a začne se pod něj podsouvat. Studenou frontu můžeme rozlišovat podle rychlosti proudění studeného vzduchu na dva typy projevující se odlišnými oblačnostmi.



Obr. 3: Svislý řez studenou frontou 1. druhu (převzato z [4.])



Obr. 4: Svislý řez studenou frontou 2. Druhu (převzato z [4.])

Zkratky druhů oblaků: Cb – Kumulonimbus, Cu – Kumulus, Ac – Altokumulus,
As – Altostratus, Cs – Cirrostratus, Sc – Stratokumulus, Ns – Nimbostratus

Poslední možností, při které může vznikat oblačnost, je například sopečná činnost nebo rozsáhlé požáry. Prach a vodní pára, které se následkem těchto úkazů dostanou do ovzduší, výborně poslouží jako nosiče náboje. Množství prachových částic v oblaku výrazně ovlivní počet výdojů [4].

3.2 Bouřkový oblak

3.2.1 Mikrostruktura bouřkového oblaku

Mikrostruktura bouřkového oblaku bývá v oblastech mírného pásu s velmi vysokou pravděpodobností smíšeného charakteru. Pouze v horním a spodním okraji můžeme nalézt místa, kde ve spodní vrstvě oblaku mohou být obsaženy pouze kapky vody a horní části pouze krystaly ledu. Smíšený charakter částic nacházejících se v kumulonimbu vyvolávají velké srážky a atmosférické výboje [4].

3.2.2 Makrostruktura bouřkového oblaku

Je pravidlem, že každá bouře je podmíněna existencí oblaku druhu kumulonimbus. Toto pravidlo však nemusí platit obráceně. Ne každý výskyt kumulonimbu znamená bouři. Ačkoli se v něm odehrávají děje, které jsou pro vznik bouře potřebné.

Struktura kumulonimbu je složena částicemi, tzv. buňkami, které procházejí třemi stupni vývoje.

1) Stádium kumulů

Částice jsou v tomto stádiu utvářeny stoupajícími proudy teplého vzduchu, přičemž se nad kondenzační hranicí začnou utvářet kapky vody, potažmo krystalky ledu. V této vývojové fázi se jedná o oblak druhu kumulus [1].

Buňka se v takovémto případě stále vyvíjí tím, že na jedné straně bez ustání přijímá vodní páru ze spodních úrovní a na druhé straně uvolňuje kapky, které začnou být natolik těžké, že je výstupné proudy nemohou udržet. Pokud nastane situace, kdy množství přijaté páry převyší množství uvolněných kapek, dostává se buňka do druhého stádia [4].

2) Stádium zralosti

V čele buňky se nachází stoupající proud teplého vzduchu, zatímco týlem klesá proud vzduchu studeného, kterému je odebráno teplo odpařováním a zároveň táním ledových krystalů. Nejvíce srážek a výbojů se pak vyskytuje právě na straně onoho týlu.

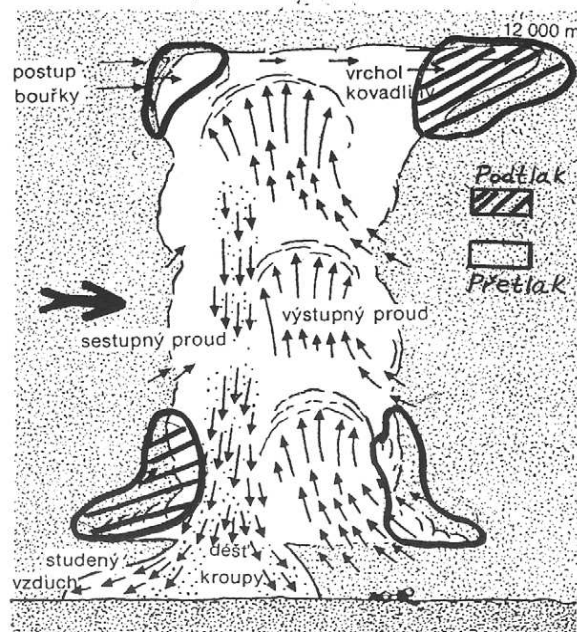
Bývá pravidlem, že s narůstající výškou se zvyšuje i rychlost proudění po horizontále. Bouřkový oblak s výškou několika kilometrů se však pohybuje jako tuhé těleso rychlostí proudů okolní atmosféry v jeho středu. Z toho plyne, že rychlost nejnižší vrstvy oblaku bude vyšší než rychlost okolí a to má za následek vznik přetlaku z přední strany a podtlaku na zadní straně oblaku. Tento poznatek můžeme analogicky použít pro nejvyšší patra oblaku, kde

bude situace samozřejmě opačná. Na přední straně bude podtlak a na straně zadní přetlak. Tímto uskupením je zajištěna cirkulace vzduchu v oblaku. Přetlak ve spodní části a podtlak v horní části přední strany zajistí stoupající proud, zatímco přetlak v horní části a podtlak ve spodní části zadní strany zajistí klesající proudění.

Pokud budou výrazněji zesíleny vzdušné proudy vyšších pater v horizontále, nastane vynášení kapek a krystalů vody před oblak. Díky čemuž získá kumulonimbus svou typickou podobu kovadliny.

3) Stádium rozpadu

V okamžik, kdy začne stoupající proud ztrácet na své intenzitě a pozvolna přestane proudit úplně, bude klesající proud zapříčiňovat zánik celé buňky. V případě, že jsou jednotlivé buňky v různých stádiích, mohou se postupně prostřídávat v činnosti i po dobu několika hodin [1].

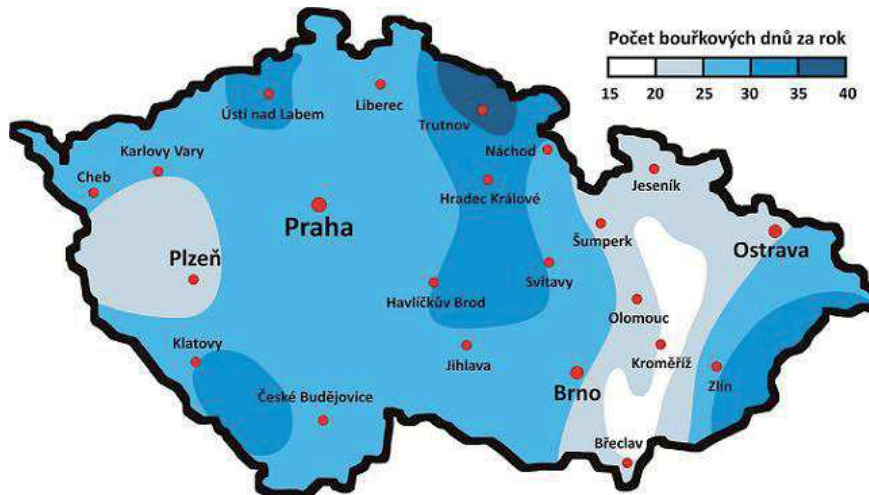


Obr. 5: Schéma proudění vzduchu v kumulonimbu (převzato z [4.])

3.3 Četnost bouřek

Z výše uvedených poznatků je patrné, že četnost bouřek se bude na Zemi lišit. Především potom s polohou. A to tak, že v oblastech rovníku, například v Brazílii, napočítáme ročně v průměru 200 dní, kdy je slyšet bouřka, oproti tomu na Islandu je takový den jediný. Další

kontrasty lze pozorovat nad pevninou a oceánem, horami a nížinami, kdy prve jmenovaný se vyznačuje vyšší četností. Abychom měli představu o četnosti bouřek v dané lokalitě a mohli tím posoudit vhodnost a parametry, kupříkladu budované distribuční sítě, poslouží nám meteorologickými ústavy vydávané izokeraunické mapy viz obr. 7. [2].



Obr. 6: Izokeraunická mapa České republiky (převzato z [8.]

4 Elektrické projevy bouřkové činnosti

4.1 Hrotové výboje

Za předpokladu působení běžných atmosférických podmínek budou hrotové výboje prezentovány kolmo k zemi tekoucími elektrickými proudy iontů, které vyvolá kosmické potažmo radioaktivní záření. Při běžných podmínkách je ionizace děj, při němž *dochází „k přeskupování valenčních elektronů“*. Poté, co je elektron vlivem záření z molekuly odtrhnut, se nabalí na další neutrální molekuly, čímž dává vzniknout aniontům a kationtům. V časovém intervalu mezi odtržením elektronu a jeho nabalením na molekulu vzduchu, se elektron stává volným a během byť malé časové jednotky získá kinetickou energii postačující k vyrazení jiného elektronu z molekuly a tím zapříčinil její ionizaci. Tento děj nazýváme ionizací nárazem. S nově vyraženým elektronem se děj opakuje a postupně dochází k lavinové ionizaci.

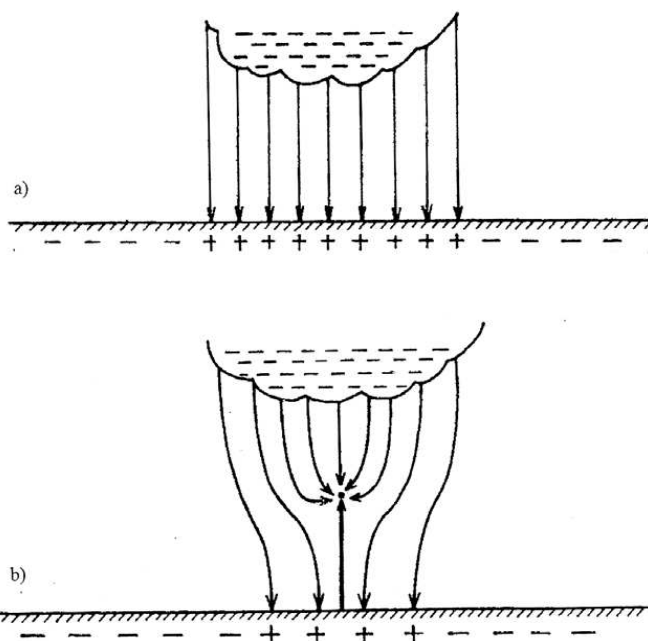
Pokud uzemníme vodič zakončený hrotem natolik dobře, že jeho potenciál bude srovnatelný s potenciálem země, budeme moci v blízkosti onoho hrotu pozorovat velké zhuštění siločar elektrického pole. V místech takového zhuštění nabývá ionizace značných hodnot, dostane-li se až na hodnotu kritickou, dochází k hrotovému výboji. Kritická hodnota

intenzity elektrického pole v úrovni vrcholů vzrostlých stromů je v rozmezí od 600 do 1000 V/m, pro porovnání za podmínek běžného ovzduší nabývá intenzita hodnot 120 - 130 V/m. Takovéto vodiče mohou být kupříkladu hromosvody, stožáry a lodní stěžně.

Hrotové výboje jsou poměrně častým jevem a dle Wormellova odhadu existuje v běžné krajině na 1 km² až 800 objektů, které jsou vhodné pro vznik výboje.

Většina takovýchto výbojů je povětšinou pouze slyšet, kdy se projevují jakýmsi praskáním, ve chvíli kdy je výboj vidět, bavíme se o Eliášově ohni. Tento název je převzat od středověkých námořníků.

Intenzita jak zvukových tak i vizuálních projevů záleží na rozdílech elektrických potenciálů povrchu země (je stejný jako uzemněné tyče) a okolním vzduchem. Dále je ovlivněna povětrnostními podmínkami, s rostoucí rychlostí větru roste i jejich intenzita [4].



Obr. 7: a) Elektrické siločáry pod kumulonimbem

b) Deformace jejich pole při hrotovém výboji (převzato z [1.])

4.2 Bleskový výboj

4.2.1 Rozdělení blesků

Bavíme-li se o blesku, hovoříme o silném elektrickém výboji, odehrávajícím se v prvním případě mezi kladnou a záporně nabytou částí kumulonimbu. V takovémto případě hovoříme o vnitřním blesku. V druhém případě vzniká výboj nejčastěji mezi spodní záporně polarizovanou částí kumulonimbu a zemí. Při druhé možnosti hovoříme o blesku do země.

Blesky taktéž rozlišujeme podle jejich vzhledu do následujících pěti skupin.

- 1) Blesk čárový, typický pro výboj mezi kumulonimbem a zemí bez rozvětvení.
- 2) Blesk perlový, pravděpodobně v důsledku pozorování za zvýšené srážkové aktivity vidíme blesk přerušovaně. Takový blesk není příliš běžný.
- 3) Blesk rozvětvený, je nejčastější formou blesku. Vyskytuje se v obou výše zmíněných případech a charakteristické je pro něj výrazné větvení, které se vzdáleností od hlavního výboje ztrácí na intenzitě.
- 4) Blesk plošný je zahalen oblakem a pouze jej osvětluje.
- 5) Blesk stuhový, který není příliš častý, vzniká za silných povětrnostních podmínek a projevuje se zesíleným kanálem vůdčího výboje.

Mohli bychom ještě podotknout kulový blesk, ovšem pro cíl této práce postrádá významu [1].

4.2.2 Mechanismus vzniku blesku

S vynálezem rotační kamery, která zaznamenává bleskový výboj velmi jemným časovým krokem, nám bylo umožněno jeho podrobnější prozkoumání. Rotační kamera přispěla k poznatku, že v praxi se blesky směřující do země budou dělit do dvou skupin a to na „blesky v otevřené krajině“ a na „blesky do vysokých objektů“.

4.2.2.1 Blesky v otevřené krajině

Na předchozím obrázku je vyobrazen bleskový výboj vycházející z kumulonimbu, který směřuje k zemi po zhruba dvaceti metrových skocích s početným větvením a nízkou intenzitou svitu. Takovéto skoky jsou s klesající vzdáleností od země delší. Takovému výboji říkáme „vůdčí stupňovitý výboj neboli leader“. Vůdčí výboj je charakteristický rychlostí v rozmezí $10^5 - 2 \times 10^5$ m/s a elektrickým proudem stovek ampér. V blízkosti země se působením intenzivního elektrického pole začne na ostrých předmětech tvořit vstřícný výboj, směřující k vůdčímu. Okamžik jejich střetu dává vzniknout vodivé cestě s vysokým potenciálovým rozdílem vyvolávajícím proudový impuls, který umožní vznik zpětného výboje. Zpětný výboj kopíruje trajektorii vůdčího ovšem stonásobnou rychlostí. Po uplynutí zhruba 40 ms může v oblaku vzniknout nový výboj, který se pohybuje bez rozvětvení již vzniklým kanálem. Takovýto výboj nazýváme rychlý vůdčí výboj, který je ve spojení se zpětným výbojem nazýván dílčí bleskový výboj trvajícím asi 1ms. Blesk bývá složen z několika takových výbojů a dle jejich počtu může trvat po dobu až 1s. Teplota ionizovaným vzduchem

vzniklého kanálu bývá odhadována na 25 000 K a jeho průměr na jednotky až desítky milimetrů. Dílčí výboje směřují v 70% do téhož bodu, zbývající jsou považovány za součást blesku v případě odeznění do 1s a do míst maximálně 10 km vzdálených. Těmito daty je prezentován záporný blesk tvořící 90% všech blesků. Před zánikem kumulonimbu se mohou vyskytovat i kladné blesky, které vzniknou oslabením koncentrace záporného náboje ve spodní části oblaku, a započne sestup kladného náboje z vyšších sfér. S přihlédnutím ke skromnému výskytu není kladný blesk příliš probádán.

4.2.2.2 Blesky do vysokých objektů

Přibližně v 25% vznikají stejným způsobem jako blesky v otevřené krajině. U zbývajících se jedná o mechanismus vyvolaný „velikým gradientem elektrického pole“ na samotném vrcholku dané stavby. Na vrcholku se začne utvářet výboj nízké světelné intenzity s početným větvením směřující k oblaku. Oproti předešlému způsobu však nebude ihned následovat zpětný výboj. A mohou nastat dvě situace. V prvním případě blesk uhasne a v druhém případě již vzniklým kanálem proletí směrem k objektu rychlý vůdčí výboj následován vzestupným zpětným výbojem. Takové výboje lze nejčastěji pozorovat před zánikem kumulonimbu za doprovodu výboje uvnitř oblaku, který zapříčiní výraznou změnu elektrického pole.

Studie blesků tímto způsobem vzniklých byla započata ve třicátých letech minulého století, na 380 m vysokém Empire State Building [2].

4.2.3 Proud bleskového výboje

Díky měřicí metodě magnetickými tyčinkami máme dobré povědomí o elektrických prouděch v bleskovém výboji. Udává se, že v 97% má výboj ve svém maximu hodnotu proudu 40 kA. U jednoho procenta blesků budeme hovořit o hodnotách 90 – 100 kA. Vyšší hodnoty se prakticky nevyskytují.

Parametry proudové vlny v případě zasažení distribuční sítě jsou udávány zlomkem. Kupříkladu 1.2/50, kdy číselník popisuje dobu čela a jmenovatel dobu týlu vlny v mikrosekundách. Uvažujeme-li šíření vlny po vedení rychlostí světla, bude 1 μ s znamenat dráhu 300 m. V případě výše uvedeného zlomku se bude délka čela vlny 360 m a délka týlu 1500 m [5].

5 Atmosférická přepětí na venkovních vedeních

5.1 Možnosti zasažení distribuční sítě

Z výsledků dlouhodobých pozorování, prováděných nad Severní Amerikou a evropským kontinentem plyne, že nejčastějším původcem poruchy v distribuční síti vn a vvn je bleskový výboj. Tato data zpracovaná v šedesátých letech prokázala, že v sítích se jmenovitým napětím 230 kV dochází k jedné čtvrtině poruch důsledkem úderu blesku. U sítí jmenovitého napětí 345 kV se hovoří až o 65%. Závěry britských a norských studií z 90. let prováděných na sítích vn hovoří o zhruba 47% poruch zapříčiněných bleskovým výbojem. Je tedy patrné, že přepětí vyvolané bleskem, mají zásadní vliv na chod přenosové soustavy [2].

Taková přepětí, na vedení nají čtyři příčiny.

- 1) Indukovaná přepětí, čili nepřímí úder
- 2) Přímí úder do fáze
- 3) Přímí úder do zemnicího lana
- 4) Přímí úder do stožáru

Přepětí způsobené nepřímým úderem je zapříčiněno elektrostatickou a elektromagnetickou indukcí od blesku. Po vedení se šíří vlna rychlostí světla s malým útlumem vyvolávající výrazná přepětí [6]. Takové přepětí jsou relativně malá a pohybují se v rozmezí 80 – 200 kV. Z toho plyne, že výraznější problém představují pouze pro sítě do 35 kV. Pokud je na vedení instalováno zemnicí lano bude na sebe přejímat indukované napětí, dále jej odvede do země a tvoří tak účinnou ochranu [5].

V případě přímého zásahu fázového vodiče se bude vlna s amplitudou v megavoltech šířit do obou stran, což má za následek enormní namáhání izolací a v neposlední řadě indukování přepětí do ostatních přímo nezasažených fází.

Pokud blesk udeří do zemnicího lana, bude se taktéž šířit do obou stran a v závislosti na rozpětí může dojít k indukování napětí na nezasažené fázové vodiče. Rozdíl napětí fází a napětí na laně bude zatěžovat izolaci. Pokud bude tento rozdíl vyšší než přeskokové napětí, dojde k přeskoku na fázový vodič [6].

I u přímého úderu do stožáru může dojít ke zpětnému přeskoku. Ten je však ovlivněn mnoha faktory, kupříkladu vlnovou impedancí lana, fází, stožáru, dále na rozpětí, uzemnění a v neposlední řadě na strmosti proudu blesku [6]. Po úderu blesku do stožáru tato situace nastává, když proud procházející skrz uzemnění na rázovém odporu stožáru vyvolá výrazný úbytek napětí, který podnítl zpětný přeskok z konzole přes izolátor do fázového vodiče. Z tohoto důvodu a informací obsažených v předchozím odstavci zjistíme, že zemnicí lana je v síti vn neúčelné, díky zmíněnému potenciálovému rozdílu dojde ke zpětnému přeskoku na fázový vodič téměř vždy [5].

5.2 Ochrana sítí vysokého napětí

Až do konce druhé světové války bylo užíváno v sítích vn jako přepětíové ochrany zemnicího lana. Z výše uvedených důvodů ovšem plyne, že pro síť vn je zemnicí lana zcela bezvýznamné, a od jeho instalace se upustilo. Zásah blesku do těchto vedení je velmi pravděpodobný a závislý především na četnosti bouřek v dané lokalitě, kterou distribuční síť prochází. V našich podmínkách můžeme uvažovat 10 – 20 úderů na 100 km trasy za rok, které způsobí 13 – 17 krátkodobých poruch. Pro omezení škod napáchaných přepětím od úderu blesku instalujeme do sítě umělá slabší místa, na kterých dochází k vhodně řízeným přeskokům. Taková místa jsou výztužové, rohové, křižovatkové případně koncové stožáry, na které instalujeme jiskřiště. Dalším vhodným nástrojem pro omezení přepětí jsou výběhová lana instalovaná zhruba 1 km od rozvodny. Takováta lana jsou v rozvodně spojená s jejími účinnými ochrannými prvky, kterými jsou kupříkladu koordinační jiskřiště nebo bleskojistky.

5.3 Ochrana sítí velmi vysokého napětí

Svůj význam a funkci si však zemnicí lana zachovalo u sítí vvn počínaje hodnotou přenášeného napětí 110 kV. U takovýchto sítí jsou na konzolách stožáru zavěšeny řetězce izolátorů s natolik významnou rázovou izolační pevností, že ke zpětnému přeskoku může dojít zcela výjimečně a u nejvyšších přenášených napětí jej můžeme zcela vyloučit. U sítí vvn jsou ochranná lana uchycena k nejvyšší části stožáru a přes stožár zároveň uzemněna. Základním požadavkem na ochranné lana je jeho správné umístění pod ochranným úhlem, který zajistí odstínění fázových vodičů. Budeme-li uvažovat na 100 km dlouhé trase vvn 30 – 40 úderů blesku za rok, a izolační hladinu 500 kV, můžeme počítat při zemnicím odporu stožáru 20 Ω se čtyřmi zpětnými přeskoky. Při uzemnění stožáru na hodnotu odporu 10 Ω dojde k jedinému zpětnému přeskoku. Je důležité si uvědomit, že o síť vvn se musíme i dále

starat jelikož se jedná o pátevní síť přenášející vysoké výkony a i chvilkový výpadek může způsobit značné škody. Tudíž se nemůžeme spolehnout pouze na dobrá zemní lana a nízké odpory uzemnění. Letité pozorování a zkušenosti nás dovedly k závěru, že na vedení uzemněném odporem 10Ω u všech stožárů a úhlem stínícího lana 30° dojde v rizikovém pruhu podél vedení ročně na 100 km vedení „*k N úderům blesků, P poruch zpětným přeskokem a Z poruch zasažením nedokonale stíněných vodičů*“. Tyto hodnoty jsou vyjádřeny v následující tabulce.

tab. 1: Počet a druhy poruch na různých napěťových hladinách (převzato z [5.])

Vedení o napětí kV	Průměrná výška h_0	N	P	Z
22	10	21	5,1	0,043
110	20	42	0,55	0,72
220	42	92	0,16	0,143
400	30	70	0,004	0,081

[

6 Zemnicí lana

Jako ochranného lana se nejčastěji užívá AlFeN lana. AlFe je zkratka použitých materiálů, čili hliníkové vodivostní složky s železnou duší zajišťující tahové vlastnosti. N udává poměr průřezů mezi těmito dvěma materiály. Ochranné lana je ukotveno k nejvyššímu bodu stožáru [5].

Stejně důležitou podmínkou pro správnou funkci a využití stínícího efektu zemnicího lana je stanovení jeho ochranného úhlu, pro nějž je nutné znát poslední krok vůdčího výboje. Pro tento krok platí, že se započíná ve výšce zhruba 50 m nad zemí. Tuto poslední fázi blesku využíváme pro determinování počtu úderů blesku do zemnicího lana.

6.1 Požadavky na zemnicí lana

Hlavním úkolem těchto zemnicích lan je fungovat jako „sběrač“ blesků a v nejlepším případě předcházet zásahu fázových vodičů bleskem, který by způsobil přepětí. V praxi je samozřejmě nemožné předejít úderům blesku do vodiče ve sto procentech případů. Někdy se i taková ochrana vodičů, aby k atmosférickému přepětí nikdy nedošlo, může jevit jako neekonomická. Cílem tedy je ukotvit zemnicí lana takovým způsobem, aby se naplnila určitá úspěšnost předejití přepětí. Například je žádoucí, aby míra selhání zemnicího zařízení byla 0,05 blesku na 100 km/rok.

6.2 Vývoj v určení ochranného úhlu

Vývoj ve zkoumání posledního kroku blesku a jeho následků se odehrával převážně v laboratorním prostředí vzhledem k nízké četnosti bouřkové činnosti z časového hlediska. Jako první představil svůj model úderu blesku Wagner, na kterého dále navázal Young se svým geometrickým modelem, který měl jeden hlavní účel, a to představit myšlenku, že úhel zemnicího lana by se měl snižovat spolu s rostoucí výškou stožáru elektrického napětí. Dle tohoto výzkumu je například vhodné, aby byl úhel 30° použit pro stožáry o výšce okolo 24 metrů.

Později byl Youngův model rozvinut fyziky Armstrongem, Whitehead-Brownem. Model nyní navíc počítal i s úhlem, pod kterým blesk udeří, čímž došlo ke změně hodnocení poruch. Výsledky těchto měření byly posléze porovnány s výstupy Pathfinderových experimentů. Ty ukazovaly data z pokusů provedených na přístrojových vodičích. Jejich doporučení byla volit úhel zemnicího lana v závislosti na výšce, ve které je nataženo zemnicí lano. Dalším cílem těchto modelů bylo ukázat, jak je úhel zemnicího lana spojen s výškou stožárů elektrického vedení.

Objevily se také alternativní přístupy k této problematice. Příkladem může být Erikssonův přístup, který využívá progresivních modelů. Výsledky jeho výzkumů taktéž poukazují na důležitost výšky stožáru. Výzkumy Dellera-Garbagnatio a Rizka se soustředily především na stanovení dokonalého úhlu zemnicího lana. V dnešní době je geometrický model využíván primárně, na rozdíl od ostatních. Důvodem je především komplexnost výpočtů.

6.3 Geometrický model

Pro popsání geometrického modelu využijeme jeho základní vyobrazení na obr. 8. Tento obrázek popisuje elektrické vedení ve složení tří fázových vodičů se dvěma zemnicími lany při daném elektrickém proudu bleskového výboje a poloměru oblouků r_c , které jsou kresleny z fázového vodiče a zároveň ze zemnicího lana. Třetím zadaným parametrem je horizontální čára ve vzdálenosti r_g od země. Hodnoty těchto parametrů se liší podle svých autorů a jsou obsaženy v následující tabulce.

Tab. 2: Vyjádření parametrů GM (převzato z [7.]

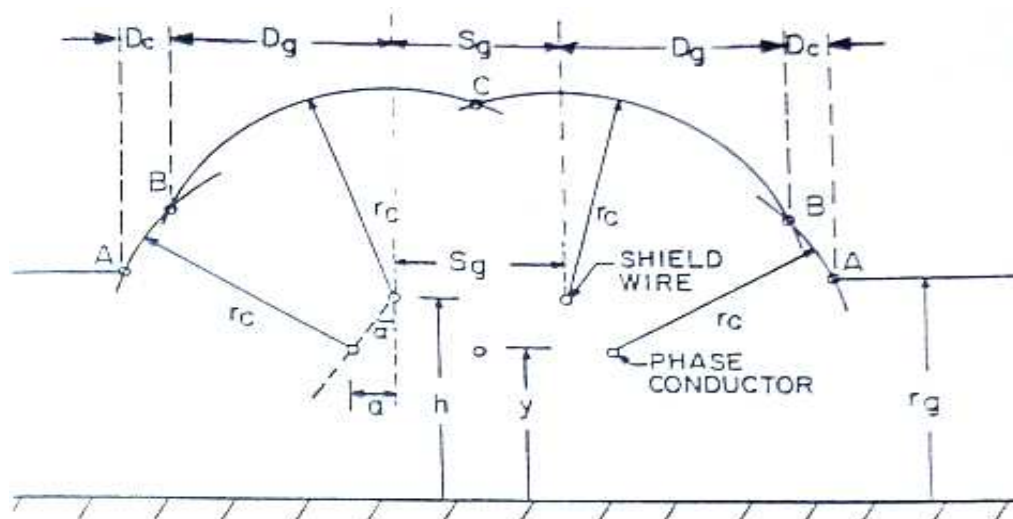
Vyjádření úderové vzdálenosti $r=A*I^b$				
	r_g - vzdálenost od země		r_c - poloměr oblouků	
	A	b	A	b
Young	27,00	0,32	$\gamma * r_g$	0,32
Brown - Whitehead	6,40	0,75	7,10	0,75
Love	10,00	0,65	10,00	0,65
Mousa a IEEE - 1995	8,00	0,65	8,00	0,65

$$\gamma = 444 / (462 - h) \text{ pro } h > 18 \text{ m}$$

$$\gamma = 1 \text{ pro } h < 18 \text{ m}$$

Nakreslíme-li horizontální čáru ve výšce r_g od země a oblouky o poloměru r_c z krajních fázových vodičů a ze zemnicích lan, získáme jejich průnikem důležité body, které značíme A, B a C. Bleskový výboj, který dopadá na vedení mezi body A a B udeří do fázového vodiče. Ty výboje, které protnou oblouk mezi body B a C, zachytí zemnicí lano. Poslední možností je dopad blesku do míst za bodem A. V takovém případě blesk udeří do země.

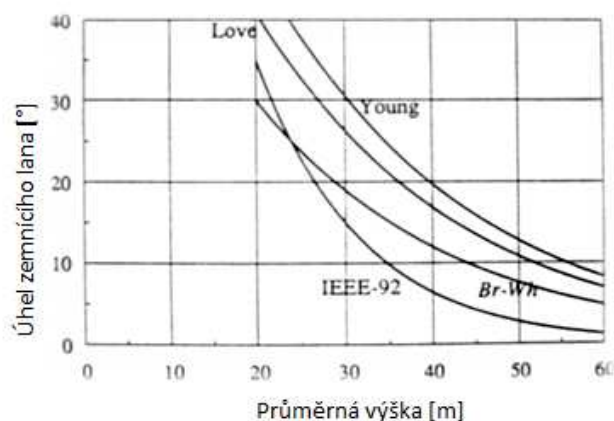
Takto uspořádaný geometrický model nadefinuje vzdálenosti odkrytí fázového vodiče a zemnicího lana D_c a D_g za předpokladu vertikálních dopadů bleskových výbojů při jejich daném proudu, pro který jsou oblouky kresleny. Počet úderů do fázového vodiče, nebo míra selhání zemnicího lana, je potom tvořena z oblasti D_c a délky vedení L znásobené četností blesků.



Obr. 8: Geometrický model definující úhly a vzdálenosti (převzato z [7.]

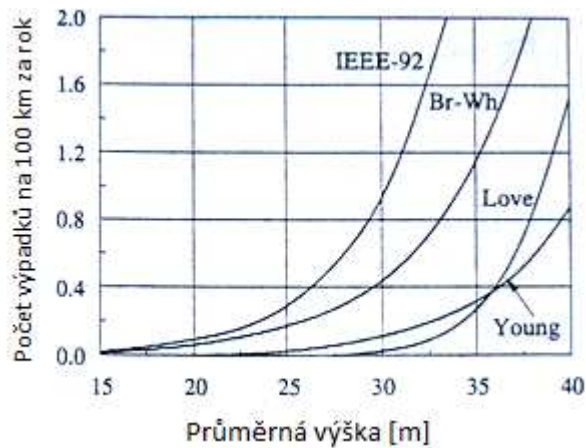
6.4 Zemnicí úhel stanovený na základě míry selhání

Primární cíl u stanovení úhlu zemnicího lana je také jejich počet a poloha. Ty by měly zajistit co nejčastější zachycení úderů blesku a eliminovat možnost selhání ochranného systému na míru, kterou je možno akceptovat. Zároveň je nutné si uvědomit, že je nemožné, aby byla míra selhání nulová. V minulosti převládala snaha o to, aby se vybraný úhel co nejvíce přiblížil dokonalému úhlu, v některých lokalitách a při určitých podmínkách je tento postup neekonomický. Z toho vyplývá, že je potřeba zohlednit např. také přírodní podmínky. V oblastech s menší hustotou blesku je vhodné jedno zemnicí lano, naopak v oblasti s větší hustotou jsou vhodná dvě zemnicí lana. Prioritou je zjistit vhodnou hodnotu míry selhání, jinou než nulovou. Tato hodnota je 0,05 blesku na 100 km/rok. Výhodou zvolení nenulové hodnoty je především fakt, že se zredukuje odchylky z alternativních metod. Další redukce odchylek se projeví v případě, že se operuje pouze s úderem, který přišel z vertikálního směru.



Obr. 9: Stanovení ochranného úhlu v závislosti na výšce (převzato z [7].)

Míra selhání zemnicího lana je brána jako vlastnost tohoto lana, přičemž jeho výška a výška fázového vodiče je brána jako konstantní. Křivka závislosti četnosti selhání na této výšce si můžeme představit jako křivku na počátku pomalu stoupající, což se záhy změní v rychle rostoucí. Křivky vytvořené na základě výpočtů Younga a Lovea dávají podobné výsledky, křivka Browna a Whiteheada je více konzervativní, vyžaduje tedy menší úhel. Všechny ale vykazují sbíhající se tendenci [7].

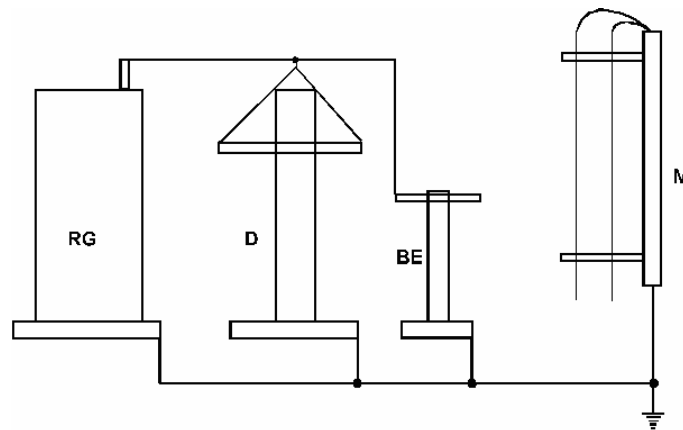


Obr. 10: Míra selhání zemnicího lana v závislosti na výšce (převzato z [7.]

7 Experimentální model

7.1 Popis modelu

Teoretické poznatky jsme si experimentálně ověřili ve vysokonapěťové laboratoři, kde jsme zjišťovali pravděpodobnost úderů blesku do několika stožárů distribuční sítě vvn při bouřce. K experimentu nám posloužil model, na jehož konstrukčním rámu je uchycena deska o rozměrech 2x2 m ve vertikálním směru simulující zem. Kolmo k oné zemi v horizontální poloze jsou zdola i shora upevněny izolační desky, ve kterých jsou otvory pro uchycení vodičů. Otvory jsou uspořádány do pravouhlého rastru se vzdálenostmi 15x15 mm. Do těchto otvorů uchytáváme železné dráty o průměru 6 mm, které plní funkci fázových vodičů a ochranných lan. Tím, že je model umístěn vertikálně, je zabráněno průhybu zmíněných drátů, které by mohlo vést ke změnám rozměrů a následnému zkreslení výsledků. Deska i jednotlivé dráty představující vodiče musí být řádně uzemněny. Před takto uskupeným modelem, je na posuvné desce, rovnoběžně s vodiči umístěn sloupek, na jehož konci je kolmo k zemi vyvedena elektroda. Z této elektrody budou vycházet blesky směrem k vedení, potažmo k zemi. Její vzdálenost od země bude tedy spjata s posledním stupněm vůdčího výboje. Jak jsme se v teoretické části dozvěděli, poslední stupeň se tvoří zhruba 50 m nad zemí. Jelikož je měřítko našeho modelu oproti skutečnosti 1:100, stanovíme si tuto vzdálenost na 50 cm od země. Poslední potřebné součásti k experimentu jsou rázový generátor a dělič. Součástí děliče je rázový vrcholový voltmetr, který měří maximální hodnotu rázového napětí. Pro lepší názornost jsou v příloze vloženy fotografie modelu a vyplněné rastry.



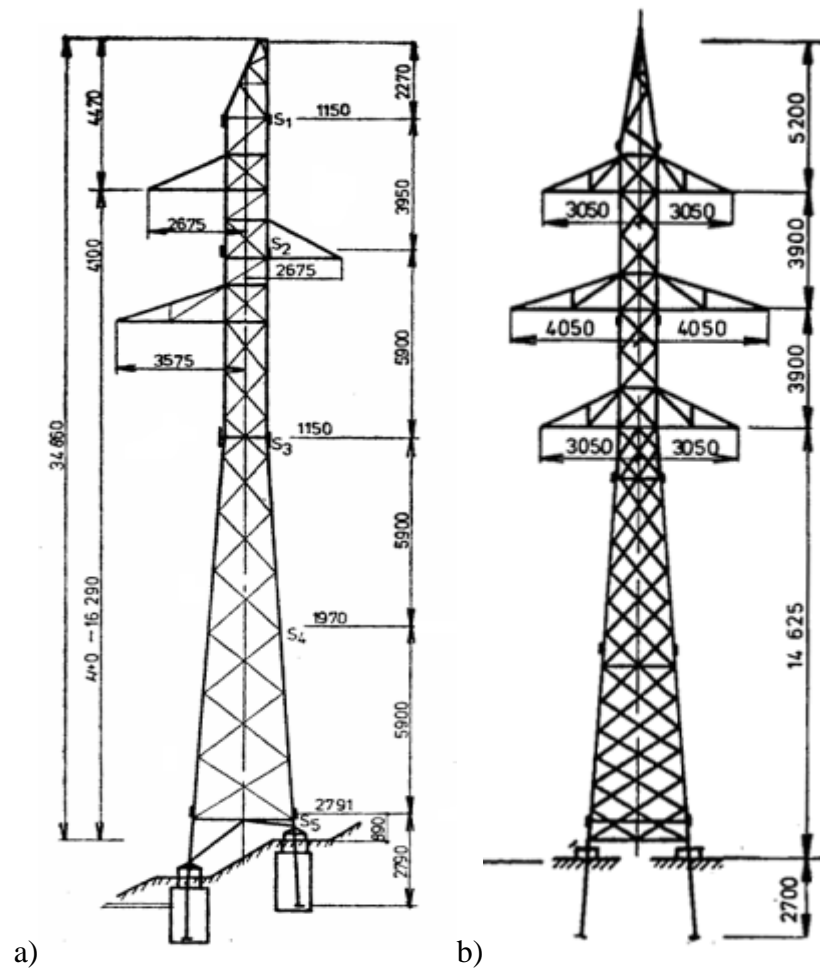
Obr. 11: Schéma zapojení modelu (převzato z [9].)

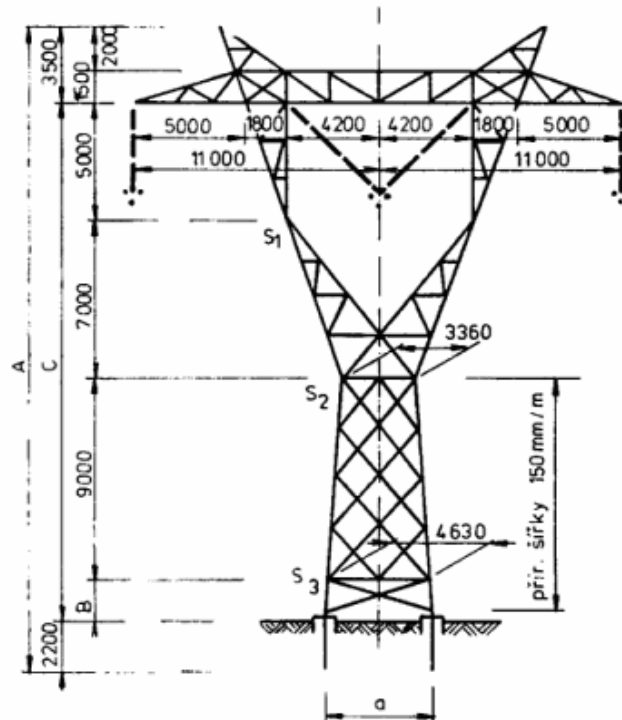
7.2 Popis měření

Pro měření jsme si zvolili tři různé stožáry užívané pro napěťové hladiny 1 x 110, 2 x 110 a 400 kV. Z technické dokumentace jednotlivých stožárů získáme jejich kóty, které v daném poměru k modelu přepočítáme na rozměry pro naše experimentální zařízení. Tento přepočet je poměrně jednoduchý, jelikož pracujeme s poměrem 1:100. Získané rozměry použijeme pro rozmístění drátů představujících vodiče na rastru izolačních desek. Dále je nutné zkontrolovat, zda jsou vodiče a deska za nimi uzemněny a můžeme se věnovat nastavení bleskové elektrody.

Jak bylo výše odůvodněno, vzdálenost elektrody od země nastavíme na 50 cm. Posuvnou desku, na které je sloupek držící bleskovou elektrodu, nastavíme tak, aby se elektroda směřující k zemi dostala do osy stožáru. V této pozici je patrné, že zemnicí lano splní svou funkci a pojme veškeré výboje. Posouváme tedy desku s elektrodou v rovnoběžném směru se zemí a samotné měření provádíme až ve vzdálenosti elektrody 25,5 cm kolmice na osu stožáru. Takto uspořádaný model je připraven k měření. Na rázovém generátoru nastavíme takovou hodnotu napětí, která bude dostačující pro přeskok výboje mezi bleskovou elektrodou a zemí. V našem případě se jedná o hodnotu napětí zhruba 260 kV. Na bleskovou elektrodu přivedeme celkem deset rázů a pozorujeme místa, do kterých výboj směřoval. Kolikrát bylo zasaženo zemní lano, fázový vodič nebo zem, zapisujeme do připravené tabulky. Po zaznamenání těchto deseti rázů posuneme desku s bleskovou elektrodou o 5 cm od osy stožáru a měření opakujeme. Posouváním desky s měřícím krokem 5 cm se dostaneme až do vzdálenosti 45,5 cm od osy stožáru. Ve chvíli, kdy máme těchto padesát hodnot zaznamenaných, změníme rozložení vodičů pro parametry dalšího stožáru a celý cyklus

opakujeme. Před jakoukoli manipulací a vstupem do experimentálního prostoru je z bezpečnostního hlediska důležité vyzkratovat a uzemnit kapacity rázového generátoru.





c)

Obr. 12: a) Nosný stožár pro 1 x 110 kV; 3 x 250 AlFe 6 + 1 x 185 AlFe 3

b) Výztužný stožár „SOUDEK“ pro 2 x 110 kV; 6 x 450 AlFe + 185 AlFe 3

c) Vylehčený stožár vedení 1 x 400 kV „KOČKA“ (převzato z [10.]

7.3 Naměřené hodnoty

Tab. 3: Měření číslo 1

Stožár číslo 1; 1 x 110 kV					
Číslo měření	1	2	3	4	5
Vzdálenost od osy	25,5	30,5	35,5	40,5	45,5
Zásah FV	6	6	10	10	6
Zásah OV	4	4	0	0	0
Zásah země	0	0	0	0	4

Tab. 4: Měření číslo 2

Stožár číslo 2; 2 x 110 kV „soudek“					
Číslo měření	1	2	3	4	5
Vzdálenost od osy	25,5	30,5	35,5	40,5	45,5
Zásah FV	0	1	5	3	0
Zásah OV	10	9	5	3	0
Zásah země	0	0	0	4	10

Tab. 5: Měření číslo 3

Stožár číslo 3; 1 x 400 kV „kočka“						
Číslo měření	1	2	3	4	5	6
Vzdálenost od osy	25,5	30,5	35,5	40,5	45,5	50
Zásah FV	0	0	0	1	4	0
Zásah OV	10	10	10	9	3	0
Zásah země	0	0	0	0	3	10

7.4 Zpracování výsledků

Základní zpracování naměřených výsledků spočívá především ve stanovení ochranného úhlu zemnicího lana, se kterým jsme měřili, jelikož se vlivem hrubého kroku rastru liší od reálné hodnoty. V příloze jsou vloženy rastry s jednotlivými rozměry pro výpočet $\alpha F1$ a $\alpha F2$. Pro výpočet pravděpodobnosti zásahu zemnicího lana a fázového vodiče využijeme data z tabulek, kde porovnáme počet úderů do daného místa vůči celkovým možným zásahům.

7.4.1 Stožár číslo 1

Pravděpodobnost zásahu fázového vodiče:

$$p = \frac{38}{50} * 100 = 76\%$$

Pravděpodobnost zásahu ochranného lana:

$$p = \frac{8}{50} * 100 = 16\%$$

Ochranný úhel zemnicího lana vůči jednotlivým fázovým vodičům:

$$\alpha F1 = \arctg \frac{3}{4,5} = 33,4^\circ$$

$$\alpha F2 = \arctg \frac{4,5}{9} = 26,56^\circ$$

7.4.2 Stožár číslo 2

Pravděpodobnost zásahu fázového vodiče:

$$p = \frac{9}{50} * 100 = 18\%$$

Pravděpodobnost zásahu ochranného lana:

$$p = \frac{27}{50} * 100 = 54\%$$

Ochranný úhel zemnicího lana vůči jednotlivým fázovým vodičům:

$$\alpha_{F1} = \arctg \frac{3}{6} = 26,56^\circ$$

$$\alpha_{F2} = \arctg \frac{4,5}{10,5} = 23,2^\circ$$

7.4.3 Stožár číslo 3

Pravděpodobnost zásahu fázového vodiče:

$$p = \frac{5}{50} * 100 = 10\%$$

Pravděpodobnost zásahu ochranného lana:

$$p = \frac{42}{50} * 100 = 84\%$$

Ochranný úhel zemnicího lana vůči fázovému vodiči:

$$\alpha = \arctg \frac{4,5}{7,5} = 30,96^\circ$$

7.5 Zhodnocení výsledků

Tímto měřením jsme si potvrdili praktické poznatky z předchozích kapitol, a především pak nutnost a důležitost užití ochranného lana. Nejlépe je vidět špatné navržení ochranného úhlu při měření stožáru č. 1. Při prvním měření zasáhl blesk fázový vodič v 76%. V běžném provozu by takovéto množství úderů bylo neakceptovatelné. Ochranný úhel je 33,4° což na první pohled není nejhorší, ovšem zásadní problém je ve výšce stožáru, která je 33 m dle Youngova modelu by měl být úhel max. 26°. U takto vysokých stožárů 110kV není rovněž dobré ochranný úhel příliš snižovat, jelikož by docházelo k častým zpětným přeskokům.

U druhého stožáru, který dopadl o poznání lépe, stojí za povšimnutí, že je náchylný na údery do fází pouze v rozmezí vzdálenosti od 35,5 do 40,5 cm od osy stožáru. Velmi hezky jsme si tím ověřili pravdivost GM z kapitoly 6.3, kde dané rozmezí prezentuje délku D_c . Hodnoty od 0 do 35,5 cm pak prezentují délku zásahu ochranného lana D_g . Veškeré výboje za vzdáleností 40,5 cm budou směřovat přímo do země.

Nejlepších výsledků jsme dosáhli u měření posledního ze stožárů. Jeho slabinou je pouze pásmo ve vzdálenosti 45,5 cm od osy a to pouze 40% úderů v tomto pásmu dopadlo na fázový vodič. Z ekonomického hlediska není tudíž důvod daný stožár vylepšovat.

Poměrně vysokou roli při výskytu chyb v měření bude hrát relativně hrubý krok rastru, jeden dílek na rastru představuje v reálném prostředí 1,5 m.

Závěr

Na základě této práce dospějeme k mnohým užitečným poznatkům. Jako první bych vyzdvihl, že velmi důležitým faktorem pro volbu trasy při výstavbě distribuční sítě je mimo jiné četnost bouřkových dní v dané lokalitě. Počet bouřkových dní do roka bude mít dopad především na ekonomickou náročnost celého projektu. Výstavba distribuční sítě v nížinách je z pohledu stavebních prací levnější, než výstavba v členitých horských oblastech, a dále s sebou nese úspory na použitém materiálu. V nížinách se setkáváme s menší četností bouřek, tudíž bychom si mohli vystačit s instalací pouze jednoho zemnicího lana namísto dvou. Těchto aspektů využijeme ovšem pouze u sítí vvn. Na sítě nn a vn se ochranná lana kvůli zpětným přeskokům neinstalují. U sítí vn se však mohou vyskytovat ochranné prvky v podobě výběhových lan v bezprostřední blízkosti rozvodny.

Zemnicí lano uchycené na vrcholku stožáru musí vždy splnit několik pravidel. Nesmíme zapomenout, že v literatuře velmi hojně vyskytující se hodnota stanovení ochranného úhlu na hodnotu 30° platí pouze pro výšku stožáru 24 m. S narůstající výškou ukotvení lana se hodnota ochranného úhlu zmenšuje. Při určení ochranného úhlu bychom měli mít také na zřeteli, že 100% zajištění sítě před účinky blesku není z ekonomického hlediska žádoucí. Jako ideální počet zásahů se jeví 0,05 úderů na 100 km trasy za rok.

Ačkoli možnost úderu blesku do sítí vvn při vhodně umístěných ochranných lanech je takřka nepatrná a zemním odporem stožáru 10Ω téměř vyloučíme možnost přeskoků, je nutností si uvědomit, že pravděpodobnost přeskoků není zcela nulová. Z toho důvodu je zapotřebí věnovat se následkům přepětí bleskem ještě jiným doplňujícím zařízením. Takovým nástrojem mohou být nejrůznější jiskřiště, bleskojistky a varistory. Materiálovou kvalitou zemnicích lan a jejich umístění bychom měli brát za samozřejmé. Zrovna tak i zemnicí odpory stožárů.

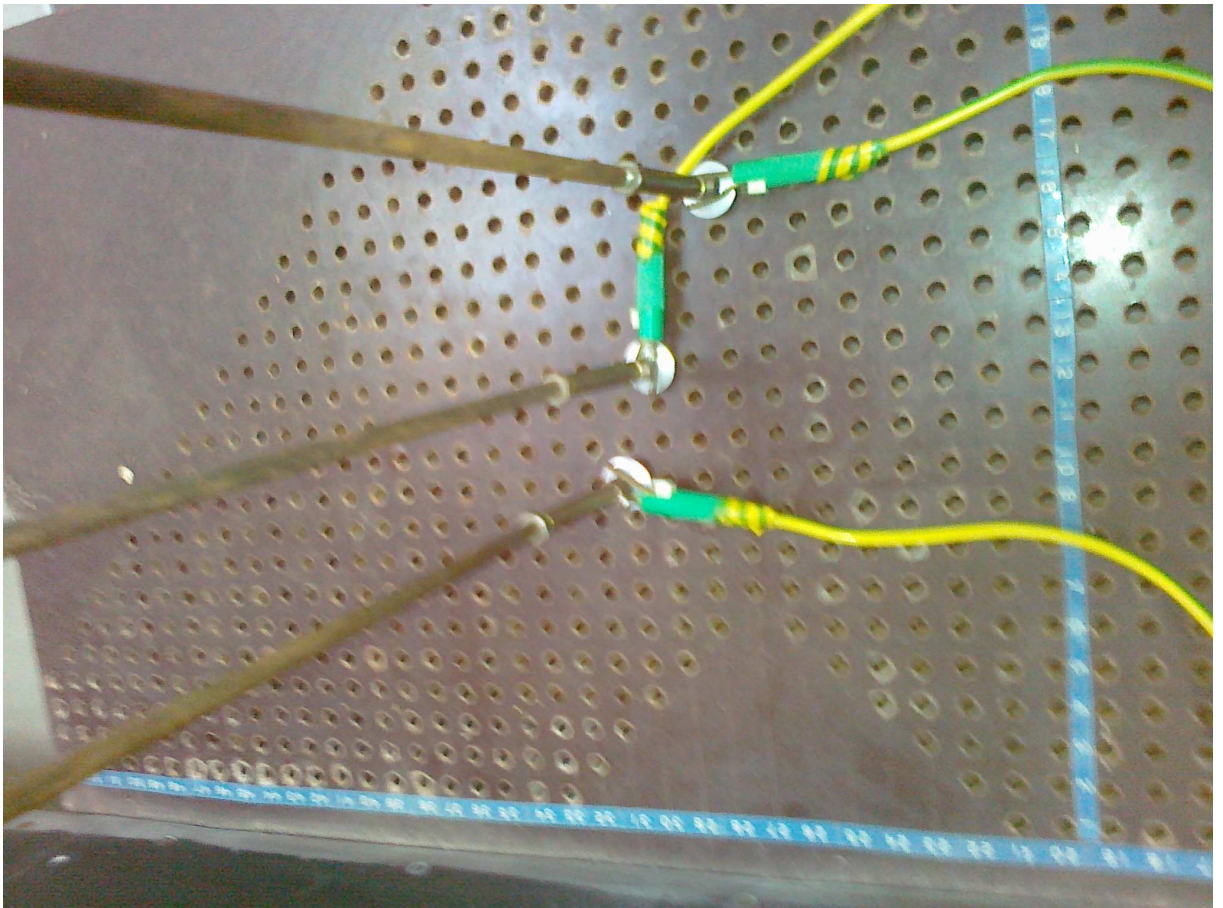
Seznam literatury a informačních zdrojů

- [1.] BEDNÁŘ, J. *Meteorologie: úvod do studia dějů v zemské atmosféře*, Praha, Portál, 2003. 224 s.
- [2.] HASMAN, T. *Přepětí v elektroenergetických soustavách*, Praha, ČVUT, 1997. 129 s.
- [3.] MAYER, D. *Pohledy do minulosti elektrotechniky*, České Budějovice, Kopp, 2004. 427 s.
- [4.] SKŘEHOT, P. *Stručné základy teorie bouřek*, Meteorologická Operativní Rada, Praha, 2004. 36 s.
- [5.] MATĚNA, Š. *Výroba a rozvod elektrické energie II*, Praha, SNTL – Nakladatelství technické literatury, 1975. 661 s.
- [6.] VEVERKA, A. *Technika vysokých napětí*, Praha, SNTL – Nakladatelství technické literatury, 1978. 295 s.
- [7.] Hileman, A.R. *Insulation Coordination for Power Systems*, New York, Marcel Dekker Inc., 1999. 767 s.
- [8.] OEZ, Minia, *Aplikační příručka: Přepětíové ochrany*, [online], 2012 [cit. 15.5.2014]. Dostupný z WWW: < <http://www.oez.cz/ke-stazeni/prirucky-letaky>>
- [9.] Laboratorní cvičení z techniky vysokého napětí, *Úloha č. 14: Ochrana venkovního vedení zemnicím lanem*, [online], Plzeň, Západočeská univerzita v Plzni, [cit. 6.6.2014]. Dostupný z WWW: < <http://home.zcu.cz/~laurenc/tvn.php> >
- [10.] Stožáry VVN (1), *Funkční požadavky na stožáry*, [online], 2007 [cit. 15.5.2014]. Dostupný z WWW: < https://www.pslib.cz/pe/skola/studijni_materialy/technologie_vedeni/stozary.doc >
- [11.] Techmania, *Blesk*, [online], [cit. 15.5.2014]. Dostupný z WWW: < http://www.techmania.cz/edutorium/art_exponaty.php?xkat=fyzika&xser=456c656b74f8696e612061206d61676e657469736d7573h&key=424 >

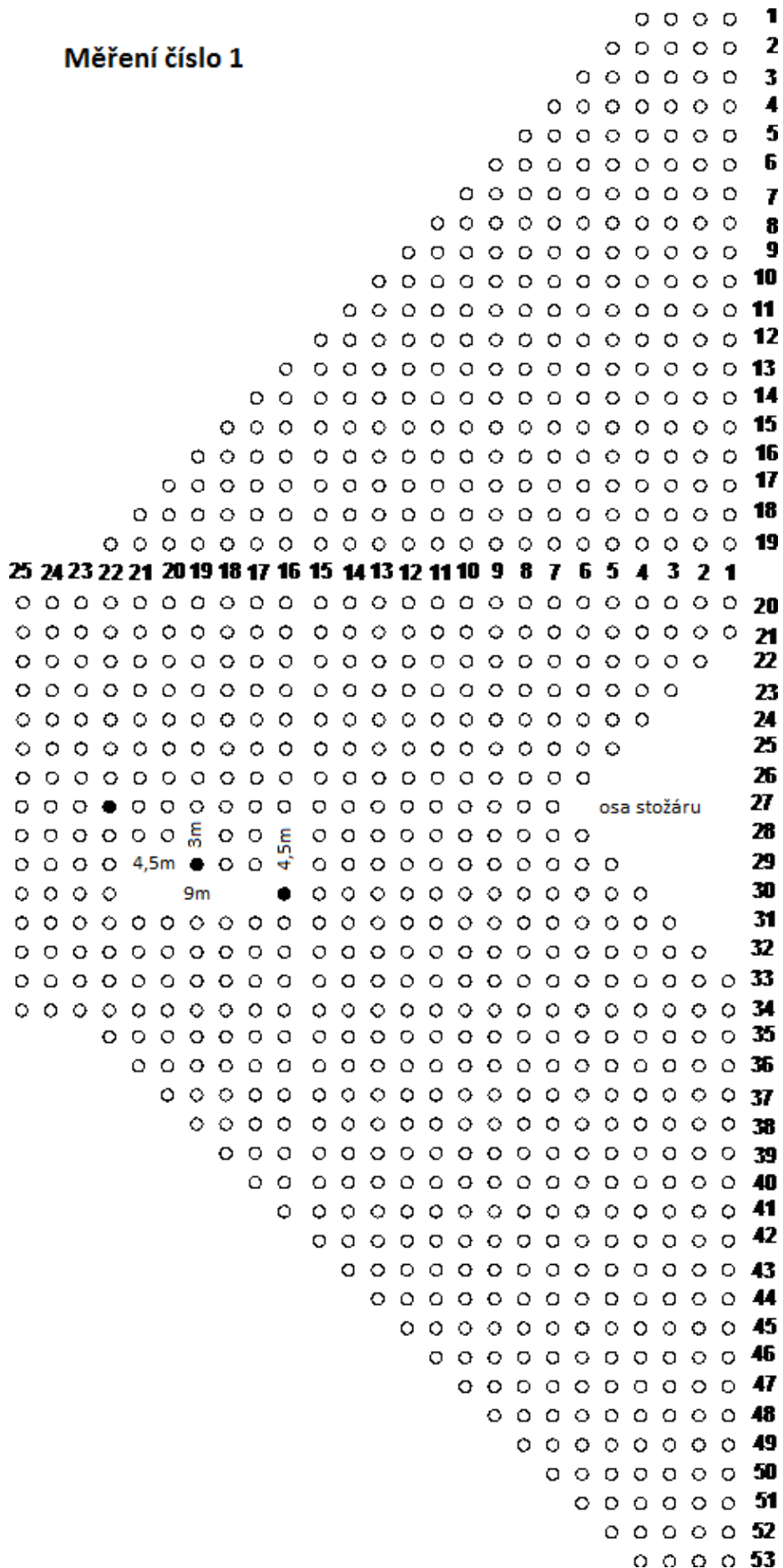
Přílohy

Ukázka měřicího modelu a vyplněné rastry k jednotlivým měřením





Měření číslo 1



Měření číslo 2

